

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

WYDZIAŁ MECHATRONIKI

Rozprawa doktorska

mgr inż. Marcin Adamczyk

**Metoda kompensacji wpływu temperatury na odwzorowanie
geometrii 3D z wykorzystaniem techniki oświetlenia
strukturalnego**

Promotor
dr hab. inż. Robert Sitnik, prof. uczelni

Promotor pomocniczy
dr inż. Leszek Wawrzyniuk

WARSZAWA 2019

Podziękowania

Chciałem bardzo podziękować:

- Promotorowi Robertowi Sitnikowi, za niespożyte pokłady cierpliwości, pasji, zaangażowania oraz wiary w to, że skończę tę rozprawę. Nie zliczę ile razy przychodziłem do Jego pokoju z silnym poczuciem, że moja praca naukowa nie ma sensu. Za każdym razem wychodziłem pełen entuzjazmu, chęci i zapału do dalszego działania.
- Promotorowi Leszkowi Wawrzyniukowi, za zaangażowanie, fachowość i konstruktywną krytykę całej pracy, a także za niesłychaną cierpliwość i skrupulatność podczas sprawdzania manuskryptu.
- Koleżankom i Kolegom, a także Kadrze dydaktycznej, naukowej i administracyjnej z zespołu tworzącego Instytut Mikromechaniki i Fotoniki, na których zawsze mogłem liczyć w sprawach naukowych i tych mniej naukowych.

Streszczenie

Technika skanowania 3D przy wykorzystaniu metody projekcji z oświetleniem strukturalnym jest obecnie wykorzystywana w wielu dziedzinach naukowych, przemysłowych oraz inżynierskich. Bardzo intensywnie rozwijane są algorytmy, które pozwalają na szybsze i bardziej dokładne przeprowadzanie digitalizacji kształtu powierzchni obiektów przestrzennych. Skanery 3D z oświetleniem strukturalnym są obecnie uznawane za w pełni funkcjonalne urządzenia pomiarowe. Jest to po części konsekwencją faktu, że opracowane zostały międzynarodowe normy definiujące w jaki sposób należy przeprowadzać ich walidację metrologiczną. Należy jednak mieć świadomość, że oszacowanie budżetu niepewności skanera 3D z oświetleniem strukturalnym jest zagadnieniem bardzo złożonym. Istotną kwestią jest także fakt, że zalecane procedury walidacji nakazują, by skaner kalibrowany i walidowany był w stałej i tej samej temperaturze. Brakuje badań, które stwierdzałyby, jak zmienia się wartość błędu pomiarowego wraz ze zmianą temperatury, w której skaner prowadzi pomiary.

W tej pracy podjęto próbę zbadania zjawisk termicznych, które występują w skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym. Opisano wyniki badań oraz eksperymentów, które ukierunkowane były na ilościowe opisanie tych zjawisk, a także na opracowanie modelu kompensacji termicznej.

W pracy przedstawiono metody kompensacji wpływu temperatury na polowe, optyczne przyrządy pomiarowe. Oceniono je w kontekście możliwości ich zastosowania w skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym.

W rozprawie opisano także 4 autorskie metody kompensacji wpływu temperatury na skanery 3D oraz ich komponenty składowe. Przebadano wpływ temperatury na bazę mechaniczną skanera, na detektory polowe i projektory rastra używane w skanerach oraz na cały skaner 3D z oświetleniem strukturalnym.

Opisane eksperymenty oraz opracowane metody kompensacyjne ukierunkowane były na wyznaczenie oraz skompensowanie efektów zjawisk termicznych, których konsekwencją były deformacje geometryczne skanów, rejestrowanych obrazów bądź też projektowanych wzorów.

Słowa kluczowe: *pomiary 3D, skanery 3D, skaner 3D ze światłem strukturalnym, wpływ temperatury, kompensacja temperatury, kalibracja skanera 3D*

Abstract

The 3D scanning technique based on the projection method with structural light is currently used in many scientific, industrial and engineering domains. The algorithms that allows for faster and more accurate 3D digitalization are constantly developed. 3D structured-light scanners are now considered as a fully functional measuring devices. This is partly a consequence of the fact that international standards have been developed defining how to carry out their metrological validation. However, one should be aware that estimating the uncertainty budget of a 3D structured-light scanner is a very complex issue. Another important fact is that recommended validation procedures require that the scanner should be calibrated and validated at a constant and the same temperature. There are no tests that would indicate what is the effect of temperature on calibration quality of structured-light 3D scanners. This dissertation attempts to investigate the thermal phenomena that occur in 3D structured-light scanners. The results of tests and experiments, that were focused on the quantitative description of this phenomena, as well as on the development of a thermal compensation model are described.

The work also presents methods for compensating the influence of temperature on field optical measuring instruments. Described method were evaluated in the context of their applicability in 3D structured-light scanners.

This dissertation also describes four original methods of temperature compensation for 3D structured-light scanners and for their components. The effect of temperature on the mechanical base of the scanner, on field detectors and raster projectors that are used in 3D scanners and on the whole 3D structured-light scanner was tested.

Described experiments and developed compensation methods were focused on determining and compensating for the effects of thermal phenomena, which resulted in geometric deformations of scans, registered images or projected images.

Keywords: *3D measurement, 3D structured-light scanner, temperature effect, temperature compenssation, 3D scaner calibration*

Spis treści

1	Wprowadzenie	11
1.1	Motywacja	11
1.1.1	Budowa oraz zasada działania skanerów 3D z oświetleniem strukturalnym	12
1.1.2	Walidacja metrologiczna skanerów 3D z oświetleniem strukturalnym. .	20
1.1.3	Zagadnienie wpływu temperatury na skanery 3D z oświetleniem strukturalnym	21
1.2	Cele rozprawy	24
1.3	Struktura rozprawy	25
2	Przegląd metod kompensacji wpływu temperatury na skanery 3D z oświetleniem strukturalnym	28
2.1	Sprzętowe metody kompensacji	29
2.1.1	Materiały o niskim współczynniku liniowej rozszerzalności temperaturowej	29
2.1.2	Atermalizacja zespołów optycznych	33
2.1.3	Kompensacja różnicowa bazy mechanicznej	37
2.1.4	Aktywne chłodzenie skanera	41
2.1.5	Rekalibracja skanera	44
2.1.6	Podsumowanie sprzętowych metod kompensacji	45
2.2	Programowe metody kompensacji	48
2.2.1	Symulacja odkształceń termicznych bazy mechanicznej skanera	48
2.2.2	Kompensacja wpływu temperatury na kalibrację kamery	50
2.2.3	Kompensacja wpływu temperatury na cały skaner	61
2.2.4	Podsumowanie programowych metod kompensacji	63
2.3	Podsumowanie	65
3	Kompensacja wpływu temperatury na bazę mechaniczną skanera	67
3.1	Rzeczywisty skaner 3D i jego kalibracja	72
3.2	Symulacja wpływu temperatury na bazę mechaniczną skanera	78

3.3	Wirtualny model skanera 3D w środowisku 3DsMAX	80
3.4	Model kompensacyjny	84
3.5	Eksperymenty weryfikacyjne	86
3.6	Rezultaty pomiarów	88
3.7	Podsumowanie	89
4	Kompensacja wpływu temperatury na kamerę cyfrową	92
4.1	Zjawisko rozgrzewania się kamery (<i>warming-up process</i>)	94
4.1.1	Kamera Gasshopper 2.0 GS2-GE-50S5M-C	95
4.1.2	Kamera IDS UI-6280SE-M-GL-R3	101
4.1.3	Kamera ArduCam IMX219 8MPix	107
4.1.4	Kamera RaspberryPi Camera v2 8MPix3	112
4.1.5	Kamera Vieworks VP-8MC M16A0	117
4.1.6	Podsumowanie	125
4.2	Wpływ zmiany temperatury zewnętrznej	127
4.2.1	Stanowisko pomiarowe z komorą termiczną	129
4.2.2	Wyniki testów wpływu zmian temperatury zewnętrznej na kamerę Grashopper 2.0	130
4.2.3	Modyfikacja konstrukcji kamery Grasshopper 2.0	132
4.3	Model kompensacji wpływu temperatury na kamerę cyfrową	135
4.3.1	Budowa modelu kompensacyjnego	135
4.3.2	Weryfikacja modelu kompensacyjnego w dziedzinie obrazu	137
4.3.3	Weryfikacja modelu kompensacyjnego dla kalibracji kamery	138
4.3.4	Wnioski	142
4.4	Podsumowanie	143
5	Kompensacja wpływu temperatury na projektory rastra	146
5.1	Zjawisko rozgrzewania się projektora	152
5.1.1	Rozgrzewanie się projektora DLP LightCrafter 4500	154
5.1.2	Rozgrzewanie się projektora Casio XJ-A252	159
5.1.3	Podsumowanie	166
5.2	Wpływ zmiany temperatury zewnętrznej	167
5.3	Model kompensacji wpływu temperatury na projektor	170
5.4	Podsumowanie	176
6	Kompensacja wpływu temperatury na skaner 3D	178
6.1	Stanowisko pomiarowe do badania wpływu temperatury na skaner 3D z oświetleniem strukturalnym	179

6.2	Eksperymenty w komorze termicznej	184
6.3	Model kompensacji wpływu temperatury na skaner 3D z oświetleniem strukturalnym	187
6.4	Podsumowanie i wnioski	189
7	Podsumowanie	192
7.1	Kierunki dalszych prac	196
	Spis rysunków	198
	Spis tabel	203
	Bibliografia	204

Rozdział 1

Wprowadzenie

1.1 Motywacja

Technika widzenia maszynowego (ang. *machine vision*) rozwija się bardzo dynamicznie. Przy użyciu systemów wizyjnych (ang. *vision systems*) przeprowadza się analizę otoczenia i podejmuje decyzje korzystając z urządzeń elektronicznych, na podobieństwo człowieka używającego zmysłu wzroku. System wizyjny składa się z urządzenia pozyskującego informację o otoczeniu (np. kamera cyfrowa) oraz układu do analizy pozyskanych danych - najczęściej komputera z dedykowanym oprogramowaniem. Istnieją systemy wizyjne, w których akwizycja oraz analiza danych realizowana jest od razu w układzie samego detektora - to inteligentne sensory wykorzystywane np. na liniach produkcyjnych do detekcji cech lub kontroli jakości. Efektem działania systemu wizyjnego może być np. informacja o rozpoznaniu zdefiniowanej wcześniej cechy i sprzężony z nią sygnał sterujący do urządzenia wykonawczego (np. kontrola zakręcenia butelki na linii produkcyjnej i sygnał o odrzuceniu butelki z powodu niewłaściwej pozycji korka) [1]. Rozwój techniki wizyjnej wiąże się z ciągłym zwiększaniem mocy obliczeniowej komputerów, za pomocą których dokonywana jest analiza obrazu. Towarzyszy temu rozwój technologii produkcji komponentów elektronicznych (np. kamer cyfrowych).

Osobną kategorią systemów wizyjnych są sensory ze zintegrowanym projektorem odpowiedzialnym za projekcję tzw. rastrów pomiarowych. Systemy te używane są jako urządzenia do pomiaru kształtu powierzchni trójwymiarowej (3D) różnych obiektów. Potocznie nazywane są skanerami 3D z oświetleniem strukturalnym (angielski skrót SLS *structured-light 3D scanners*)¹ [2, 3]. Skanery 3D z oświetleniem strukturalnym stanowią na tyle odrębną kategorię systemów wizyjnych, że traktuje się je jako kompletne i kompleksowe rozwiązania do przeprowadzania pomiarów. Jako informację wyjściową z takich skanerów otrzymuje się

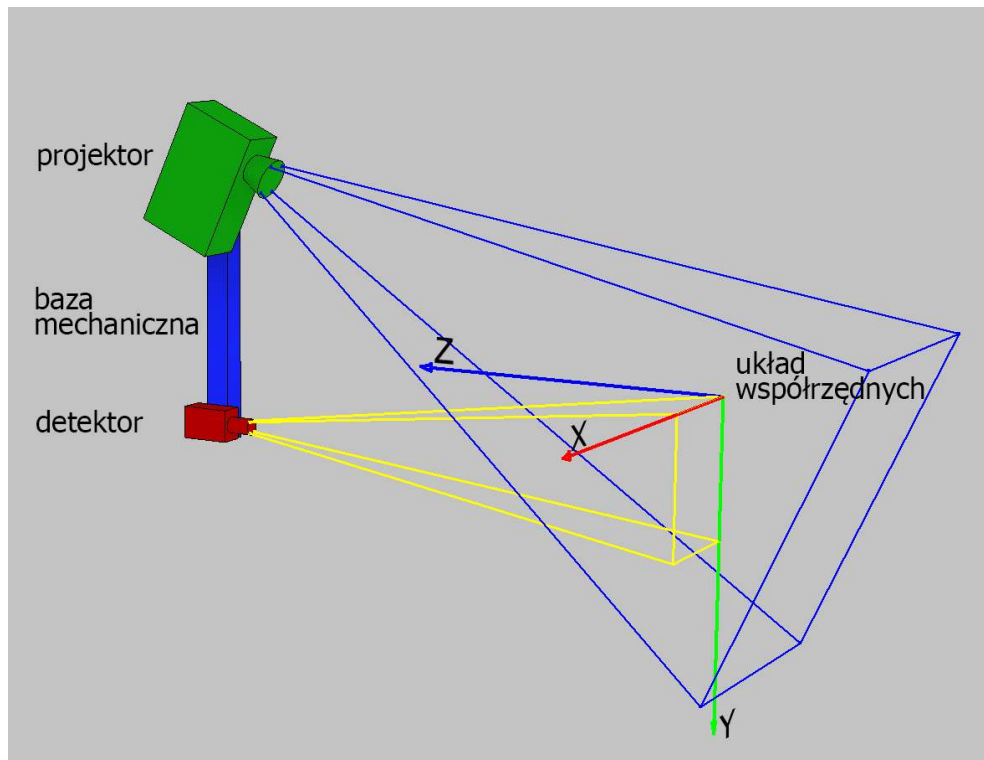
¹Gdziekolwiek w pracy pojawi się określenie: *skaner 3D z oświetleniem strukturalnym*, *skaner 3D SLS* oraz *skaner 3D* - będę miał na myśli skaner 3D wykorzystujący technikę z oświetleniem strukturalnym

odwzorowanie kształtu geometrii powierzchni mierzonego detalu. Najczęściej jest to tzw. chmura punktów (ang. *cloud of points*), czyli zbiór współrzędnych punktów (X,Y,Z) w układzie współrzędnych związanym ze skanerem [4, 5]. Istnieją rozwiązania, w których pomiar wzbogacony jest o barwę np.: (X,Y,Z,R,G,B) [3–9].

Skanery 3D z oświetleniem strukturalnym znajdują szerokie zastosowanie w bardzo wielu dziedzinach naukowych, inżynierskich i przemysłowych [3]. Wykorzystywane są w zagadnieniach inżynierii odwrotnej [3], mogą być źródłem modeli do druku 3D, używane są w medycynie (np. pomiary krzywizny kręgosłupa [10–13]), w protetyce [14], jako urządzenia do kontroli jakości lub do pomiaru cech geometrycznych [3, 9, 15], w procesie tworzenia modeli do rzeczywistości rozszerzonej (np. dokumentacja miejsca zdarzenia kryminalnego na potrzeby procesu rekonstrukcji przebiegu zdarzenia [7, 9]), wreszcie jako urządzenia służące do digitalizacji dziedzictwa kulturowego na potrzeby archiwizacji i przeprowadzania analiz (np. wpływ procesów konserwatorskich a także analizy procesów starzenia) [6, 8, 9, 16].

1.1.1 Budowa oraz zasada działania skanerów 3D z oświetleniem strukturalnym

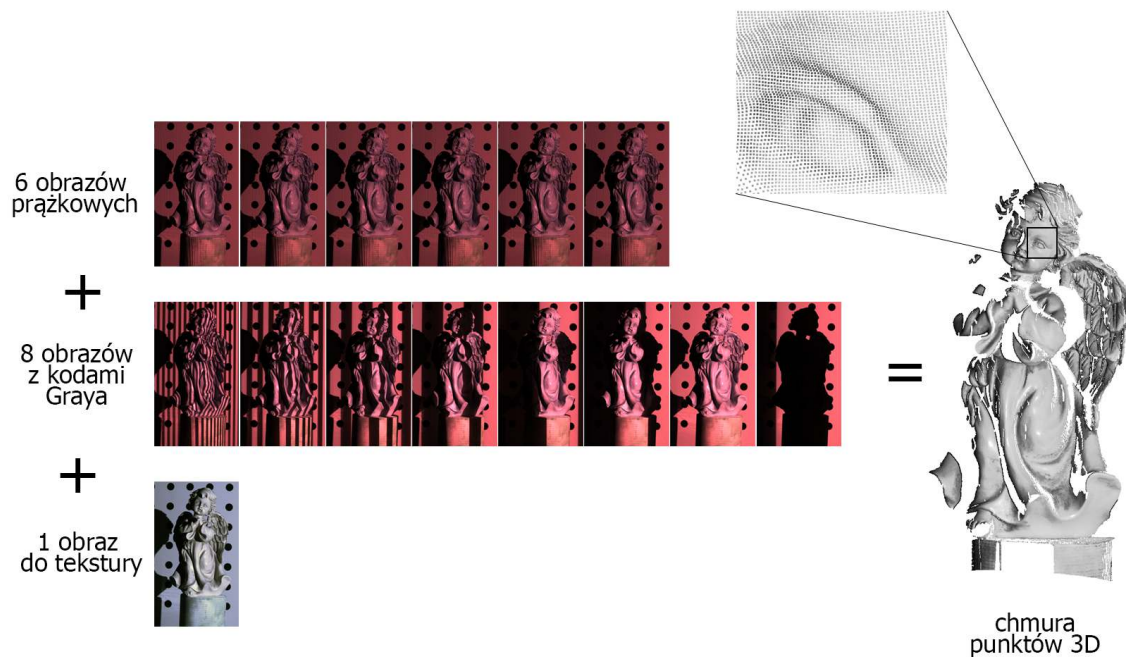
Cechą wspólną metod pomiarowych wykorzystujących technikę projekcji z oświetleniem strukturalnym jest zastosowanie projektora cyfrowego (albo innego, polowego źródła będącego jego odpowiednikiem) jako źródła światła oraz detektora macierzowego w postaci aparatu cyfrowego lub kamery z matrycą CCD lub CMOS [2–5, 17] (Rys. 1.1). Projektor używany jest do rzutowania tzw. rastrów pomiarowych na mierzoną powierzchnię. Detektor służy do rejestracji obrazów powierzchni przedmiotu oświetlonego przez projektor. Na podstawie zarejestrowanego zestawu obrazów, oraz uprzednio wykonanej kalibracji, odtwarzany jest trójwymiarowy kształt powierzchni mierzonego detalu w postaci chmury punktów.



Rysunek 1.1: Rozmieszczenie elementów składowych skanera 3D z oświetleniem strukturalnym. Układ współrzędnych skanera 3D definiowany jest na etapie kalibracji. Położenie i orientacja układu współrzędnych zależy od konkretnej implementacji, na rysunku przedstawiono jedynie przykład.

Odtwarzanie kształtu powierzchni 3D z zarejestrowanych obrazów 2D.

Istnieją różne metody i algorytmy pozwalające na odtworzenie kształtu powierzchni z obrazów. Najbardziej popularną techniką z grupy metod z oświetleniem strukturalnym jest metoda wykorzystująca projekcję prążków o sinusoidalnie zmiennej intensywności oraz kodów Graya [2, 3, 5, 17]. Ta technika pomiarowa bazuje na metodzie czasowej dyskretnej zmiany fazy (ang. *temporal-phase-shifting*) [2–5, 15, 18, 19]. Do usuwania skoków fazy (ang. *phase unwrapping*) najczęściej wykorzystywana jest analiza kodów Graya [2, 3, 5, 20].



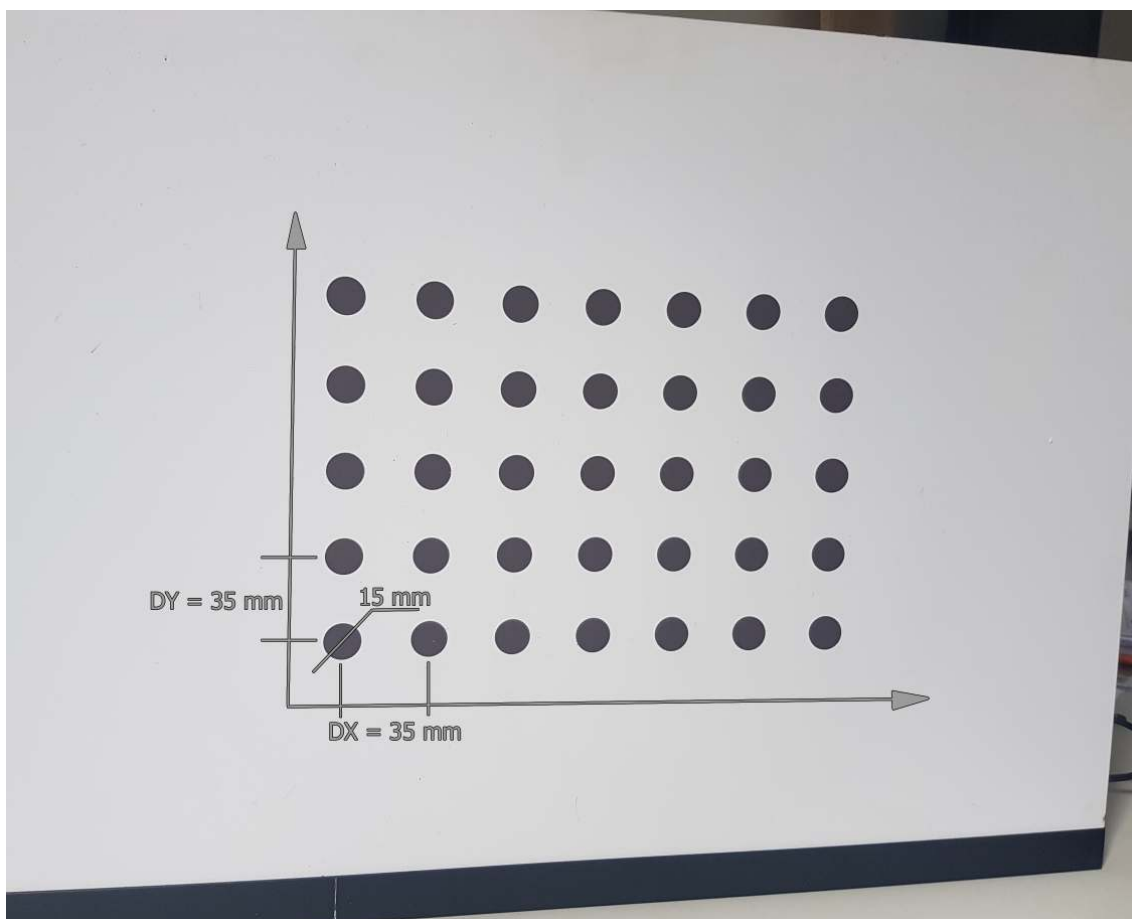
Rysunek 1.2: Przykładowy zestaw obrazów pomiarowych do odwzorowania geometrii obiektu (figurki aniołka). Pojedynczy pomiar składa się w tym przypadku z 6 obrazów prążkowych, 8 obrazów z kodami Graya oraz jednego obrazu do odtworzenia tekstury. W wyniku obliczana jest chmura punktów reprezentująca kształt mierzonej powierzchni obiektu.

Istnieje wiele różnych metod obliczania fazy. Bardzo dobre rezultaty daje tzw. metoda 6-obrazkowa [2, 3, 5]. W celu odtworzenia kształtu powierzchni mierzonego detalu niezbędne jest zarejestrowanie 6 obrazów obiektu, na który rzutowany jest raster w postaci prążków o sinusoidalnie zmiennej intensywności. W każdym obrazie prążki przesunięte są w fazie o $\frac{\pi}{3}$. Następnie rejestrowane są obrazy z tzw. kodami Graya, które wykorzystywane są przy operacji usuwania skoków fazy. Kody Graya wykorzystywane są do nadania numerów każdemu okresowi prążków na obrazie z kamery. Liczba tych obrazów zależy od wymiarów matrycy projektora oraz przyjętej liczby pikseli na jeden okres obrazów prążkowych. W przypadku np. 6 pikseli na okres i projektora o wymiarach matrycy 1280 na 800 pikseli, wymagane jest 8 obrazów z kodami Graya. Sekwencję rzutowanych obrazów często uzupełnia się o jeszcze jeden obraz służący do zebrania informacji o teksturze obiektu. W konsekwencji, dla opisanej konfiguracji, niezbędne jest zapisanie 15 obrazów w celu uzyskania pojedynczego pomiaru 3D wzbogaconego o teksturę (Rys. 1.2).

W tej rozprawie nie będę się skupiał na opisywaniu algorytmów do odtwarzania wartości fazy oraz usuwania skoków fazy. Stanowi to odmienne i bardzo obszerne zagadnienie, nie będące przedmiotem tej rozprawy. Istotne jest natomiast, że w celu wykonania pojedynczego pomiaru skanerem 3D SLS, niezbędne jest zarejestrowanie kilkunastu obrazów tego samego

obiektu. Bardzo ważny jest także fakt, że podczas akwizycji obrazów pomiarowych projektor, detektor oraz obiekt nie mogą zmienić swojego położenia.

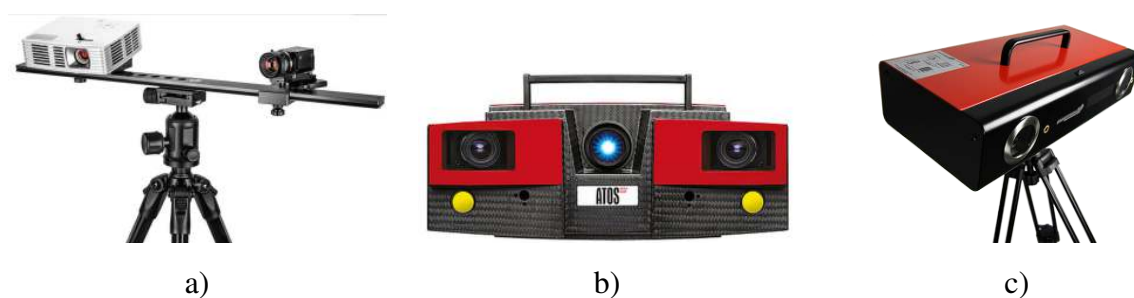
Z obrazów zarejestrowanych przez detektor, na podstawie uprzednio wykonanej kalibracji, wyznaczana jest zależność pomiędzy wartościami fazy a wartościami współrzędnych (X, Y, Z) w zdefiniowanej objętości pomiarowej. Podczas kalibracji wykorzystywany jest specjalny wzorzec o znanych wymiarach i zdefiniowanym położeniu pewnych cech geometrycznych, np. położeniu środków kołowych markerów na płaszczyźnie. Podczas procesu kalibracji definiowany jest układ współrzędnych skanera, a także jego objętość pomiarowa (ang. *measuring volume*) (Rys. 1.1). Sam proces kalibracji skanera najczęściej podzielony jest na dwa etapy: na etap kalibracji detektora oraz etap kalibracji fazy [2, 3, 5, 15]. Z punktu widzenia użytkownika proces kalibracji polega najczęściej na rejestracji obrazów specjalnego wzorca kalibracyjnego (Rys. 1.3) ustawianego przed skanerem w uprzednio zdefiniowanych pozycjach.



Rysunek 1.3: Przykładowy wzorzec do kalibracji skanera 3D z oświetleniem strukturalnym złożony z siatki (5×7) kontrastowych znaczników zwanych markerami. Odległość pomiędzy środkami markerów wynosi 35mm .

Budowa skanerów 3D z oświetleniem strukturalnym.

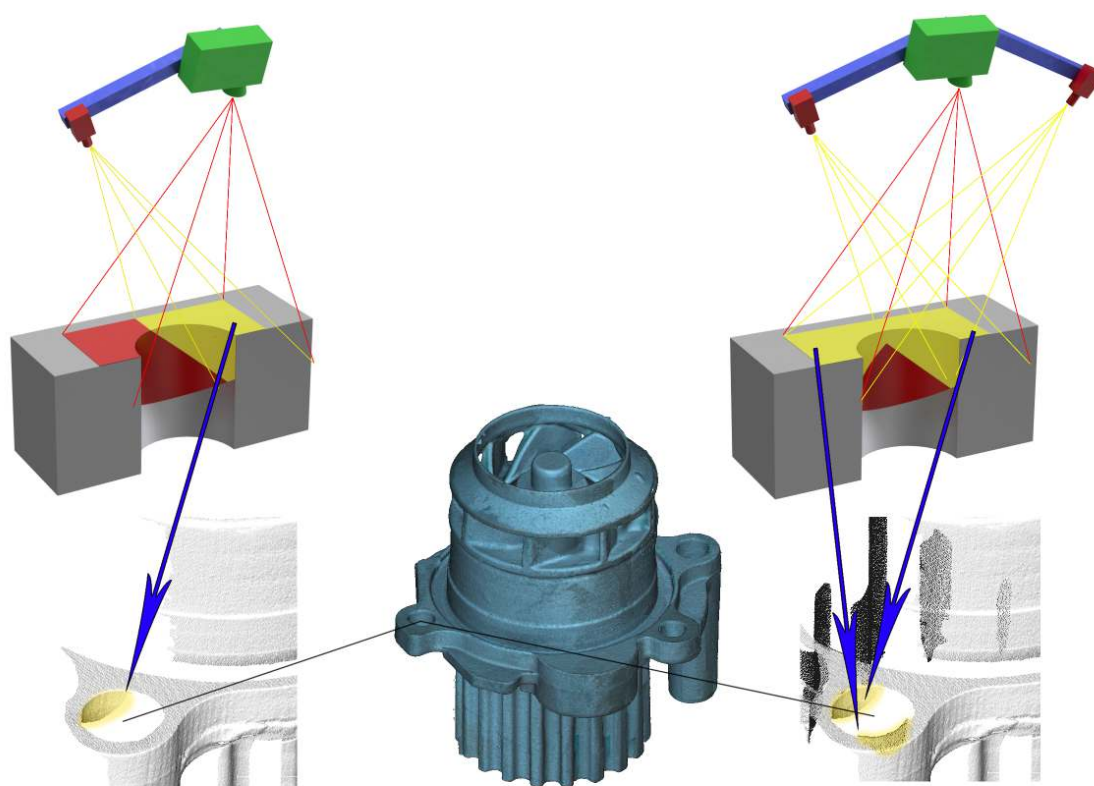
Od strony konstrukcyjnej, w skanerze 3D wykorzystującym metodę z oświetleniem strukturalnym, daje się wyróżnić wyraźny podział na moduł detekcyjny i projekcyjny. Moduły te zamontowane są na bazie mechanicznej (Rys. 1.1). Baza zapewnia niezmienną orientację projektora względem detektora. Zachowanie tej niezmiennej orientacji, a także niezmiennego toru optycznego zespołu projekcyjnego oraz detekcyjnego jest kluczowe z punktu widzenia zachowania niezmiennych właściwości metrologicznych skanera. W rzeczywistości, każda zmiana pozycji projektora i detektora względem siebie, lub jakakolwiek zmiana w ich torach optycznych, pociąga za sobą konieczność wykonania ponownej kalibracji skanera 3D [7, 12, 21–29].



Rysunek 1.4: Typowe konstrukcje skanerów 3D SLS: a) skaner 3D z oświetleniem strukturalnym, w którym można wyróżnić: detektor (kamera z obiektywem), projektor rastra oraz bazę konstrukcyjną - skaner HP3DScan, źródło [30], b) skaner 3D SLS z dwoma detektorami, baza mechaniczna jest jednocześnie obudową skanera, źródło: [31], c) ScanBright archeo - konstrukcja skanera 3D z oświetleniem strukturalnym, całkowicie zamknięta w aluminiowej obudowie, źródło: [32].

Główne różnice w konstrukcji mechanicznej skanerów 3D dostępnych na rynku dotyczą bazy mechanicznej. Najprostsze rozwiązania bazują na schemacie przedstawionym na Rysunku 1.1. Dobrym przykładem może być skaner HP 3D Scan [30] produkowany przez firmę Hewlett-Packard (Rys. 1.4 a). Skaner ten składa się z aluminiowego profilu, do którego, za pomocą specjalnych gniazd zapewniających możliwość justowania orientacji, mocowane są projektor oraz detektor. Sam skaner nie jest wyposażony w jednostkę obliczeniową. Do poprawnej pracy wymagane jest podłączenie kamery oraz projektora do komputera PC, na którym zainstalowane jest dedykowane oprogramowanie. Taka konstrukcja ma tę zaletę, że jest bardzo prosta i pozwala na stosunkowo łatwą zmianę objętości pomiarowej (poprzez rozsunięcie projektora i detektora oraz odpowiednie ustawienie płaszczyzn ostrości). Jednocześnie nie zapewnia żadnej ochrony tych modułów. Skaner HP 3D Scan jest rozwiązaniem dedykowanym dla odbiorców domowych, małych firm i hobbystów. Najprawdopodobniej stąd wynika forma skanera, pozwalająca na eksperymenty.

Inna konstrukcja skanera przedstawiona jest na Rysunku 1.4 b). Niemiecka firma GOM GmbH swój flagowy skaner GOMAtos [31] zamyka w obudowie wykonanej z kompozytów. Obudowa jest jednocześnie bazą mechaniczną projektora oraz dwóch detektorów (z punktu widzenia działania skanera 3D, zabieg używania więcej niż jednego detektora może służyć do zwiększenia objętości pomiarowej oraz zmniejszenia efektu przysłaniania, którego wynikiem są obszary niepomierzone - Rys. 1.5). Takie rozwiązanie jest na pewno lepsze z punktu widzenia trwałości kalibracji (osłonięty projektor oraz detektor). Używanie elementów z laminatów pozwala osiągnąć odpowiednią sztywność, przy jednoczesnej niskiej masie konstrukcji. Skaner GOMAtos jest rozwiązaniem dedykowanym dla profesjonalistów. Stąd też zwarty i zamknięty charakter całego urządzenia.



Rysunek 1.5: Zagadnienie pomiaru otworów, wnek oraz cech trudno dostępnych. Pomierzone zostaną jedynie te detale obiektu, które są jednocześnie oświetlone przez projektor oraz znajdują się w polu widzenia kamery. W przypadku skanera 3D z jedną kamerą powierzchnia obszarów niepomierzonych jest większa, niż w przypadku systemu składającego się z dwóch kamer. Przykład: pomiar pompy wody do silnika 1.9 TDI z grupy Volkswagen.

Podobne rozwiązanie, ale nie tak zaawansowane technologicznie, przedstawione jest na rysunku 1.4 c) - skaner ScanBright archeo [32] polskiego producenta skanerów, firmy Smarttech Sp. z o.o. Projektor razem z kamerą, zamontowane na aluminiowym profilu, zamknięte

są w obudowie wykonanej z blachy. Takie rozwiązanie powoduje, że elementy składowe skanera są zamontowane na sztywnym profilu i jednocześnie ukryte wewnątrz obudowy. Obudowa spełnia wtedy rolę ochronną i zwiększa estetykę konstrukcji. Dodatkowo, podobnie jak w przypadku skanera GOMAtos, obudowa pozwala na umieszczenie wewnątrz skanera dodatkowych elementów np. układu elektronicznego do synchronizacji procesu projekcji oraz rejestracji obrazów przez kamerę, dodatkowego źródła oświetlenia do zbierania informacji o teksturze mierzonego obiektu albo np. układu do informowania użytkownika o położeniu skanera względem obiektu, by ułatwić pozycjonowanie skanera.

Cechy skanerów 3D z oświetleniem strukturalnym

Najważniejsze z cech skanerów 3D wykorzystujących technikę z oświetleniem strukturalnym, to:

- liczba detektorów

W zdecydowanej większości, producenci skanerów 3D wykorzystują jeden albo dwa detektory. Użycie dwóch detektorów najczęściej podyktowane jest chęcią zwiększenia objętości pomiarowej oraz zwiększenia możliwości pomiarowych skanera, np. podczas pomiaru wnętrza otworów (Rys. 1.5).

- rozdzielczość przestrzenna pomiaru

Średnia odległość pomiędzy punktami w chmurze nazywana jest rozdzielczością przestrzenną skanera [5, 33]. Może ona przyjmować różne wartości i zależna jest głównie od rodzaju detektora użytego do budowy skanera (od wymiarów jego sensora), zastosowanego obiektywu oraz odległości objętości pomiarowej od matrycy detektora. Rozdzielczość przestrzenna skanerów 3D SLS kształtuje się najczęściej na poziomie od ok. $10\mu\text{m}$ [5, 6, 8, 16] do kilku mm [3, 5, 11, 12].

- niepewność przy pomiarze odległości

Zgodnie z wytycznymi podanymi w rekomendacji VDI/VDE 2634 [34, 35] oraz normie ISO 10360-8 [35, 36] podczas procesu walidacji metrologicznej skanera 3D wyznaczany jest tzw. błąd graniczny dopuszczalny E_{MPE} przy pomiarze odległości pomiędzy dwiema kulami wzorcowymi. Wartość tego błędu dla różnych skanerów waha się w granicach $0,05\text{mm} \div 1\text{mm}$ [5, 7, 15, 29]. Jest bardzo silnie związana z gabarytami objętości pomiarowej skanera i zazwyczaj kształtuje się na poziomie 10^{-4} w stosunku do największego wymiaru objętości pomiarowej [15, 34].

- gabaryty objętości pomiarowej

W zależności od przeznaczenia, skanery 3D z oświetleniem strukturalnym mogą mieć różne gabaryty objętości pomiarowej. Skanery do precyzyjnych pomiarów

niewielkich detali i cech geometrycznych mogą mieć objętość pomiarową opisaną prostopadłościanem o wymiarach 50mm × 50mm × 10mm [6–8, 16, 29]. Największe objętości pomiarowe skanerów dochodzą do 1,5m × 2m × 1,5m, są to głównie skanery używane przy pomiarach ludzkich sylwetek [10–12].

- **prędkość pomiaru**²

Prędkość akwizycji danych dla pojedynczego pomiaru zdeterminowana jest najczęściej przez prędkość działania detektora oraz przez zastosowany sposób synchronizacji akwizycji z projekcją. Najszybsze skanery posiadają sprzętową synchronizację i pozwalają na pomiar w około 250ms [12, 29]. Najwolniejsze skanery to takie, w których rolę detektora pełni aparat fotograficzny. Używane są często w muzealnictwie z uwagi na fakt bardzo dobrego odwzorowania tekstury. W przypadku takich skanerów pojedynczy pomiar może trwać nawet minutę [6]. Osobnym zagadnieniem jest kwestia obliczeń prowadzących do wyznaczenia chmury punktów. Czas niezbędny do przeliczenia wyniku pomiaru zależy od wielu czynników, między innymi:

- od wymiarów matrycy detektora i związanej z tym wielkością obrazów pomiarowych;
- od architektury skanera i użytych protokołów komunikacyjnych. Istnieją skanery wyposażone w mikrokomputer, który przelicza pomiar, zapisuje go na dysku i ewentualnie wysyła na komputer operatora [29]. Inne skanery nie posiadają swojej jednostki centralnej. Do ich działania niezbędny jest komputer, do którego podłącza się detektor i projektor oraz ewentualnie dodatkowe urządzenia sterujące pracą skanera;
- od operacji wykonywanych podczas post-processingu chmur punktów³;
- od oprogramowania sterującego pracą skanera.

Prędkość przeliczania pomiaru waha się w zakresie od kilku sekund do kilku minut.

- **pomiar w kolorze**

W zależności od użytego detektora oraz metody użytej do odtwarzania tekstury, niektóre skanery 3D mogą odtwarzać chmurę punktów wzbogaconą o informację o teksturze mierzonego obiektu (RGB albo szaroodcieniowo).

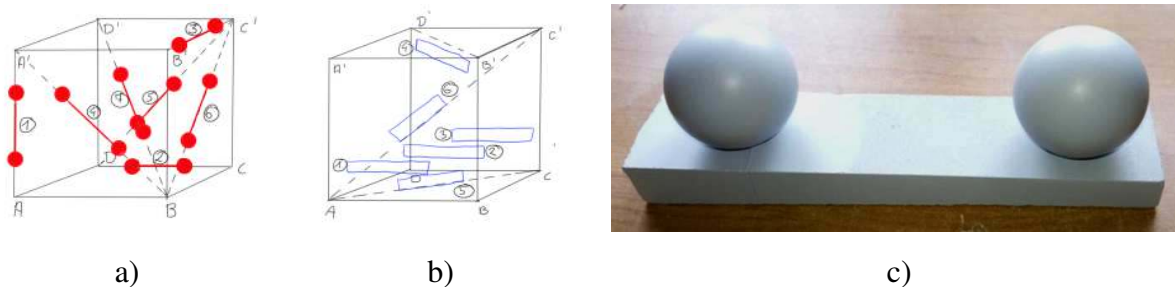
²Prędkość pomiaru odnoszę do skanerów 3D z oświetleniem strukturalnym, które wykorzystują metodę wieloobrazkową do odwzorowania kształtu powierzchni. W przypadku skanerów, które używają metody jednoobrazkowej prędkość pomiaru jest oczywiście znacznie szybsza [11, 12]

³*post-processing* w terminologii związanej ze skanowaniem 3D przy użyciu techniki z oświetleniem strukturalnym odnosi się do końcowych operacji wykonywanych na chmurze punktów lub na obrazach pomiarowych, np. usuwanie szumu pomiarowego, obliczanie wektorów normalnych, wstępna segmentacja chmur, etc.

1.1.2 Walidacja metrologiczna skanerów 3D z oświetleniem strukturalnym.

Budżet niepewności skanera 3D wykorzystującego technikę z oświetleniem strukturalnym jest trudny do oszacowania [5, 7, 15, 27, 37–40]. Związane jest to z samą techniką pomiarową, ale także z formą wyniku pomiaru, będącego zbiorem współrzędnych punktów tworzących chmurę punktów reprezentującą kształt geometrii powierzchni mierzonego detalu. Niemożliwym jest zatem wskazanie jednej, charakterystycznej wartości będącej wynikiem pomiaru. Na podstawie otrzymanej chmury punktów można dopiero obliczać pożądane wartości np. odchyłki od wirtualnej płaszczyzny, odległości pomiędzy wskazanymi punktami, wartości średnic otworów etc. Na ostateczny wynik pomiaru oddziałuje bardzo wiele zmiennych. Wśród czynników, które bardzo istotnie wpływają na wyniki, można wyróżnić (na podstawie [38–40]):

- zmienne warunki przeprowadzania kalibracji i pomiarów: temperatura, wilgotność, ciśnienie atmosferyczne, zewnętrzne pola elektromagnetyczne, wibracje, zewnętrzne oświetlenie,
- błędy związane z metodą kalibracyjną (iteracyjne algorytmy dopasowania, błędy zaokrągleń, błędy dyskretyzacji),
- nieliniowość charakterystyki odpowiedzi detektora (ang. *CRF* - *Camera Response Function* *CRF* oraz projektora,
- charakterystyka rozpraszania światła na powierzchni mierzonego obiektu,
- algorytmy użyte do obliczeń ostatecznych wyników charakteryzujących badaną cechę np.: przy pomiarze płaskości można używać różnych algorytmów do dopasowania płaszczyzny do chmury punktów,
- algorytmy używane podczas post-processingu wyników pomiarów,
- błędy definicji wzorca kalibracyjnego.



Rysunek 1.6: Pozycje wzorców walidacyjnych zdefiniowane w normach: a) położenia wzorca typu *ball-bar* w przestrzeni roboczej skanera SLS opisaną symbolicznie przez prostopadłościan ABCDA'B'C'D, b) położenia wzorca płaskości w przestrzeni roboczej skanera, c) wzorzec typu *ball-bar* wykonany z dwóch kul łożyskowych o średnicy nominalnej 40mm przyklejonych do płyty wykonanej z marmuru.

Wzrastające zainteresowanie skanowaniem 3D przy użyciu techniki z oświetleniem strukturalnym zaowocowało podejściem do standaryzacji tej metody pomiarowej. Obecnie jednym z kanonów staje się przeprowadzanie walidacji metrologicznej skanerów 3D w oparciu o normę ISO 10360-8 [35, 36] lub rekomendację VDI/VDE 2634 [34, 35] niemieckiej organizacji PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt). Dokumenty te nie odnoszą się bezpośrednio do skanerów 3D SLS jako takich, ale zostały przyjęte jako najlepiej odzwierciedlające problematykę pomiarów 3D i obecnie są jedynymi standardami o charakterze międzynarodowym, które podają konkretną metodę walidacji metrologicznej skanerów 3D z oświetleniem strukturalnym [15, 35, 38, 39].

Proces walidacji metrologicznej skanera zaproponowany w normie ISO10360-8 oraz rekomendacji VDI/VDE 2634, nakazuje porównanie pomiarów wykonanych za pomocą skanera 3D z pomiarami wykonanymi metodą referencyjną, o niepewności co najmniej 10 razy mniejszej niż zakładana niepewność pomiarowa skanera [15, 35, 39, 41]. Obydwa dokumenty rekomendują użycie wzorca typu *ball-bar* (Rys. 1.6 c) oraz wzorca płaskości. Norma ISO 10360-8 zakłada także użycie dodatkowych wzorców: sinusoidalnego oraz wzorca określającego głębokość szczeliny [35, 36]. Sposób ustawienia wzorców w objętości pomiarowej skanera, wg. rekomendacji VDI/VDE 2634, pokazany jest na rysunku Rys. 1.6 a) i b).

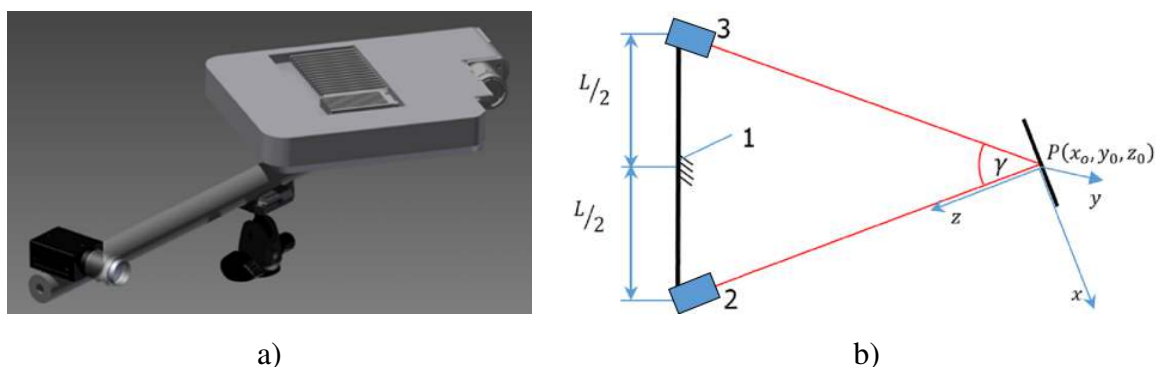
1.1.3 Zagadnienie wpływu temperatury na skanery 3D z oświetleniem strukturalnym

W zdecydowanej większości przypadków producenci skanerów przeprowadzają kalibrację skanera w warunkach laboratoryjnych. Następnie dokonują jego walidacji (proces może wykonać akredytowane laboratorium). Użytkownik otrzymuje skalibrowany skaner z

certyfikatem walidacji [35, 38, 39, 42]. Takie podejście zakłada, że skaner skalibrowany oraz certyfikowany w warunkach laboratoryjnych, zachowuje właściwości metrologiczne poza laboratorium. Pamiętać należy jednak o tym, że warunki środowiskowe panujące w laboratorium mogą się zasadniczo różnić od tych, w których przeprowadzane będą pomiary. Jednym z czynników, który może ulec wyraźnej zmianie, jest temperatura.

Istnieją badania [21, 22, 24–28, 43, 44], których wyniki sugerują, że wpływ temperatury na skanery z oświetleniem strukturalnym oraz na ich komponenty składowe jest na tyle istotny, że powinien wręcz wymuszać rekaliibrację skanera w przypadku zmiany temperatury już o kilka stopni. Jeden z wiodących na rynku producentów skanerów 3D, niemiecka firma GOM GmbH, zaleca monitorowanie temperatury otoczenia podczas przeprowadzania pomiarów. Jednocześnie akceptuje zdefiniowanie odchyłki od temperatury referencyjnej (domyślnie jest to $\pm 5^{\circ}\text{C}$). Po jej przekroczeniu oprogramowanie nie pozwala na wykonywanie pomiarów [45].

Wykonane przeze mnie badania eksperymentalne nad wpływem temperatury na jakość kalibracji skanera 3D ze światłem strukturalnym [27] oraz na kamery cyfrowe [28], potwierdzają, że jest on bardzo istotny. Warto dodać, że brak kompensacji tego oddziaływania może prowadzić do rozkalibrowania skanera.

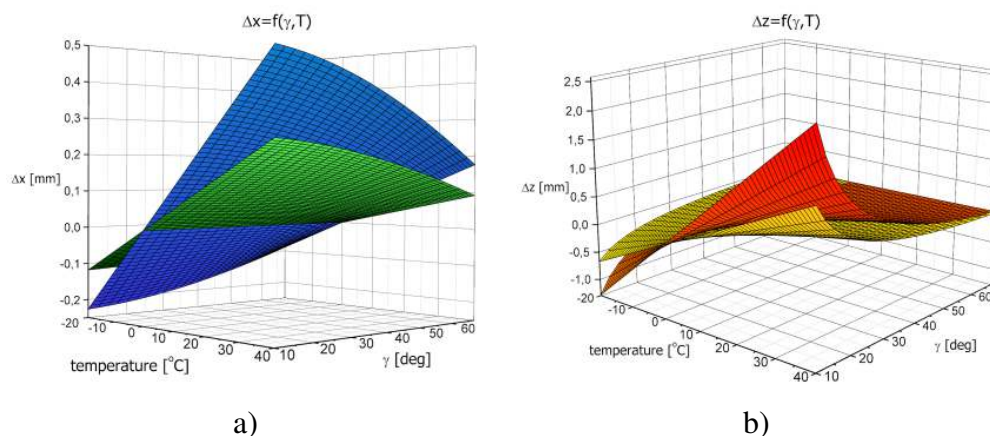


Rysunek 1.7: Poglądowy rysunek pokazujący prosty, jedno-detektorowy model skanera 3D SLS: a) w skład skanera wchodzi: detektor polowy (kamera cyfrowa z obiektywem), projektor rastra oraz baza mechaniczna, b) geometria skanera: baza mechaniczna o długości L , kąt bazowy γ , punkt przecięcia się osi optycznych detektora (2) oraz projektora (3) $P(x_0, y_0, z_0)$, układ współrzędnych związany jest z detektorem: oś OX oraz OY leżą w płaszczyźnie obrazu, a oś OZ jest normalna do płaszczyzny obrazu, belka utwierdzona jest w geometrycznym środku (1). Źródło: [27].

W celu bardziej ilościowego przedstawienia skali problemu, można posłużyć się prostym modelem geometrycznym skanera z oświetleniem strukturalnym, pokazanym na rysunku 1.7. Załóżmy, że bazą skanera jest belka wykonana z materiału o znanej wartości współczynnika liniowej rozszerzalności temperaturowej α . Na jednym z końców belki przymocowany jest detektor polowy, a na drugim projektor rastra. Belka utwierdzona jest na środku za pomocą

np. sztywnego statywu. Do celów symulacji można zatem przyjąć, że zarówno detektor, jak i projektor przymocowane są do dwóch wsporników utwierdzonych w tym samym punkcie.

Na wykresach (Rys. 1.8 a i b) pokazano błędy przecinania się osi optycznych projektora i detektora, zdefiniowane jako odchyłki punktu przecięcia się rzutów osi optycznych kamery i projektora od punktu $P(x_0, y_0, z_0)$, w zależności od zmiany wymiaru bazy skanera L spowodowanej zmianą temperatury bazy o ΔT oraz w zależności od kąta bazowego γ . Symulacje obliczone są dla bazy o długości $L = 1\text{m}$ wykonanej z dwóch różnych materiałów: stali (współczynnik liniowej rozszerzalności termicznej $\alpha = 12 \times 10^{-6} 1/K$ oraz aluminium $\alpha = 23 \times 10^{-6} 1/K$). Odchyłki mogą osiągać znaczące wartości np. dla bazy wykonanej z aluminium oraz przyrostu temperatury o $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ oraz kąta bazowego $\gamma = 25^\circ \rightarrow \Delta x = 0,1\text{mm}$ oraz $\Delta z = 0,22\text{mm}$, a dla bazy wykonanej ze stali: $\Delta x = 0,05\text{mm}$ oraz $\Delta z = 0,12\text{mm}$. Rzeczywisty model skanera ze światłem strukturalnym o podobnej geometrii, miałby błąd graniczny dopuszczalny na poziomie około $E_{MPE} = \pm 0,1\text{mm}$ [6, 7, 15]. Zatem w wyniku zmiany temperatury o zaledwie 10°C , skaner z bazą wykonaną ze stali nieznacznie przekroczyłby próg swojego błędu granicznego E_{MPE} , a skaner, którego baza została wykonana z aluminium, przekroczyłby ten próg ponad dwukrotnie.



Rysunek 1.8: Odchyłki: a) Δx oraz b) Δz spowodowane odkształceniem termicznym bazy skanera w zależności od temperatury T oraz kąta bazowego γ , dla różnych materiałów bazy: aluminium (niebieski oraz czerwony) i stali (zielony i żółty). Źródło: [27].

Ten prosty model symulacyjny dowodzi, że wpływ zmiany temperatury na skaner 3D z oświetleniem strukturalnym może znacząco wpływać na jakość skanów. Można go zmniejszać podczas procesu konstrukcji samego skanera, np. poprzez używanie materiałów o jak najmniejszej wartości współczynnika liniowej rozszerzalności temperaturowej. Takie podejście nie zawsze jest jednak uzasadnione ekonomicznie. Ponadto wykorzystanie takich materiałów nie wyeliminuje całkowicie wpływu temperatury. Przyczyni się jedynie do zmniejszenia negatywnego wpływu tego zjawiska. Kolejnym, bardzo istotnym, aspektem jest

wpływ temperatury na pozostałe elementy konstrukcyjne skanera: detektor oraz projektor. Nie można założyć, że w warunkach zmiennej temperatury otoczenia geometria układu projekcyjnego i detekcyjnego oraz parametry projekcji i detekcji obrazów nie ulegają zmianie. W rzeczywistości jest zupełnie inaczej, a wpływ zmiennej temperatury na detektor oraz projektor jest bardzo istotny [21–26, 43, 46].

Zgromadzone przeze mnie doświadczenia pokazuje, że na rynku skanerów 3D SLS temat wpływu temperatury na jakość pomiarów jest najczęściej pomijany. Producenci mają zwyczaj podawania zakresu temperaturowego pracy skanerów, ale w zdecydowanej większości zakres ten dotyczy temperatur, w których skaner *może* pracować. Nie ma natomiast żadnej informacji o tym, jak zmiana temperatury wpływa na wynik pomiaru. Nieliczni producenci (np. GOM GmbH) dostarczają skalibrowany termicznie wzorzec kalibracyjny i sugerują rekaliibrację skanera w przypadku prowadzenia pomiarów w różnych temperaturach [45]. Praktyka pokazuje jednak, że temat uwzględnienia wpływu temperatury w budżecie niepewności skanera 3D z oświetleniem strukturalnym oraz kompensacja tego wpływu nie są brane pod uwagę.

1.2 Cele rozprawy

Obecnie obserwowany jest postępujący rozwój rynku skanerów SLS. Rosną przy tym potrzeby użytkowników w zakresie przeprowadzania precyzyjnych pomiarów połowych 3D [2, 3, 5]. Czynniki te powodują, że wpływ temperatury na jakość odwzorowania kształtu geometrii mierzonego detalu zaczyna odgrywać znaczącą rolę w tej dyscyplinie. Brakuje badań, które w sposób ilościowy determinowałyby wartość błędu pomiarowego skanera związanego ze zmianą temperatury.

Celem rozprawy jest stworzenie jakościowego i ilościowego opisu zjawisk, które zachodzą w skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym podczas zmiany temperatury otoczenia, a także zaprezentowanie autorskiej metody kompensacji tego wpływu. W pracy opisałem osiągnięcia uzyskane podczas własnych badań naukowych prowadzonych na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej w latach 2014 - 2018. Przeprowadziłem szereg eksperymentów i testów, które ukierunkowane były na analizę zachowania skanera 3D poddanego zmianom temperatury zewnętrznej. Skupiłem się także na temacie wpływu temperatury na poszczególne komponenty składowe skanera - bazę mechaniczną, kamerę oraz projektor. Prowadziłem również testy z różnymi wzorcami do walidacji metrologicznej skanerów 3D SLS. Wyniki moich badań częściowo zostały opublikowane w artykułach [7, 12, 27–29].

W badaniach nad wpływem temperatury na skanery 3D i ich komponenty składowe skupiłem się na termicznych deformacjach obserwowanych w rejestrowanych ramkach, projektowanych obrazach i wyznaczonych chmurach punktów. W pracy nie poruszyłem kwestii dotyczących zjawisk związanych z elementami elektronicznymi i półprzewodnikowymi (np.

odwzorowanie barwy, kontrast, stosunek sygnału do szumu - ang. *Signal to Noise Ratio* SNR etc.). W tej rozprawie nie będę się zajmował tymi zagadnieniami, gdyż stanowią one odrębny i bardzo obszerny temat. Z przeprowadzonego przeze mnie przeglądu wynika, że dostępna jest literatura traktująca o tych zagadnieniach [44, 47–53]. Jeśli zaś chodzi o wpływ temperatury na deformacje skanów, deformacje rejestrowanych obrazów lub też deformacje projektowanych przez projektor wzorów, tutaj dostępna literatura jest o wiele uboższa.

Cele, które zamierzałem osiągnąć, realizując badania opisane w tej rozprawie są następujące:

1. Przedstawić metody kompensacji wpływu temperatury na polowe, optyczne przyrządy pomiarowe. Ocenic je w kontekście zastosowania w skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym.
2. Zaprezentować wyniki własnych badań i eksperymentów dotyczących wpływu temperatury na skanery 3D z oświetleniem strukturalnym oraz ich komponenty składowe (detektor oraz projektor rastra).
3. Przedstawić nową metodę kompensacji wpływu temperatury na skaner 3D z oświetleniem strukturalnym, a także na jego elementy składowe: bazę mechaniczną, detektor oraz projektor rastra.

1.3 Struktura rozprawy

Niniejsza rozprawa podzielona jest na 7 rozdziałów. Na początku, w rozdziale 2 przedstawiłem przegląd metod kompensacji wpływu temperatury na przyrządy służące do bezdotykowych pomiarów polowych 3D. Przegląd dostępnych metod został podzielony na dwie grupy: kompensację sprzętową (rozdział 2.2) oraz programową (rozdział 2.2). W rozdziale 2.3 podsumowałem przegląd opisanych metod. W kolejnych rozdziałach przedstawiłem wyniki badań nad wpływem temperatury na skanery 3D z oświetleniem strukturalnym, które prowadziłem w latach 2014 - 2018 w Instytucie Mikromechaniki i Fotoniki. Prace ukierunkowane były na zbadanie zagadnień związanych z opisaniem wpływu temperatury na pomiary przeprowadzane przy użyciu skanerów 3D z oświetleniem strukturalnym. Część badań finansowana była z dwóch grantów:

- grant PRELUDIUM, finansowany przez Narodowe Centrum Nauki, tytuł: "Badania wpływu temperatury na jakość kalibracji skanera 3D wykorzystującego metodę projekcji z oświetleniem strukturalnym." 2014/15/N/ST7/00735 [54],

- grant dziekana, finansowany przez Dziekana Wydziału Mechatroniki PW, tytuł: "Budowa stanowiska do badań nad wpływem temperatury na elementy składowe skanerów z oświetleniem strukturalnym oraz samych skanerów" [55].

W ramach prac i eksperymentów, które prowadziłem zbudowałem kilka modeli skanerów 3D z oświetleniem strukturalnym. Konstrukcje te wykonane zostały jako urządzenia laboratoryjne, ale cechowały się pełną funkcjonalnością pomiarową. We wszystkich badaniach, które przeprowadziłem do sterowania pracą skanera używałem pakietu oprogramowania 3DMADMAC [2, 4, 5, 56, 57]. Cechami tego pakietu są:

- rzeczywista kalibracja kamery, opisująca rozkład promieni w postaci wiązki prostych [2, 4, 5, 57],
- metoda kalibracji głowicy skanującej, wykorzystująca wzorzec w postaci płaskiej planszy z naniesioną macierzą okrągłych, kontrastowych znaczników,
- brak konieczności precyzyjnego pozycjonowania wzorca kalibracyjnego przy użyciu dodatkowych manipulatorów,
- elastyczność w konfiguracji sprzętowej skanera: modułowość w zakresie oprogramowania sterującego projektorem oraz detektorem; co za tym idzie: modułowość w zakresie doboru różnych projektorów oraz detektorów,
- elastyczność w doborze parametrów projekcji oraz detekcji obrazów pomiarowych, a także parametrów opisujących post-processing obliczonych chmur punktów.

Wyniki przeprowadzonych przeze mnie badań oraz zaproponowane metody kompensacji opisane zostały w następujących rozdziałach:

- W rozdziale 3 opisałem metodę kompensacji wpływu temperatury na bazę mechaniczną skanera 3D z oświetleniem strukturalnym.
- W rozdziale 4 opisałem wyniki badań nad wpływem temperatury na geometrię obrazów rejestrowanych przez detektory używane do budowy skanerów 3D z oświetleniem strukturalnym. Przedstawiłem wyniki badań wpływu temperatury na różnego rodzaju kamery. Przedstawiłem metodę kompensacji wpływu temperatury na kamerę z obiektywem, bazującą na kompensacji w dziedzinie obrazu. Zaproponowałem także modyfikację konstrukcji kamery, zapewniającą poprawność działania modelu kompensacyjnego.
- W rozdziale 5 przedstawiłem wyniki eksperymentów dotyczących wpływu temperatury na projektory rastrów używane w konstrukcji skanerów 3D. Przeanalizowałem wpływ

temperatury na dwa modele projektorów używane w konstrukcji skanerów 3D. Zaproponowałem także metodę kompensacji wpływu temperatury.

- W rozdziale 6 opisałem wyniki eksperymentów dotyczących wpływu temperatury na cały skaner 3D. Zaproponowałem metodologię przeprowadzania walidacji termicznej skanerów 3D mającą na celu skompensowanie wpływu temperatury.

Rozdział 2

Przegląd metod kompensacji wpływu temperatury na skanery 3D z oświetleniem strukturalnym

Wpływ temperatury na urządzenia pomiarowe jest zagadnieniem, które należy uwzględniać w zasadzie w każdym pomiarze wielkości fizycznej [58]. Z punktu widzenia wyniku pomiaru, pomiar skanerem 3D z oświetleniem strukturalnym zbliżony jest do pomiarów na Współrzędnościowej Maszynie Pomiarowej (WMP)¹ [15]. Wpływ temperatury na pomiary wykonywane przy użyciu WMP jest zagadnieniem znanym i opisanym w literaturze [15, 59–67]. Nie chcąc zagłębiać się w teorię pomiarów przy wykorzystaniu WMP, można powiedzieć, że kompensację błędów spowodowanych zmienną temperaturą realizuje się na dwa zasadnicze sposoby: ograniczając wpływ temperatury na mechanizmy przyrządów pomiarowych oraz modelując ten wpływ i obliczając odpowiednie wartości odchyłek [38, 59–64].

Zagadnienie kompensacji wpływu temperatury na skanery 3D z oświetleniem strukturalnym może być realizowane w bardzo podobny sposób: ograniczając wpływ temperatury oraz symulując go i wyznaczając wartości odchyłek korygujących. Ograniczanie wpływu temperatury na skanery 3D SLS oraz ich elementy składowe sprowadza się do używania materiałów o możliwie niskiej wartości współczynnika rozszerzalności termicznej α , umiejętnie projektując konstrukcję nośną skanera oraz układy optyczne, redukując źródła ciepła w skanerze lub odprowadzając nadmiar ciepła z wnętrza skanera - te metody kompensacji bezpośrednio związane są z konstrukcją skanera. Nazwałem je **sprzętowymi metodami kompensacji**. Zostały one opisane w rozdziale 2.1. Odrębną grupę technik kompensacji stanowią **metody programowe**. Są to takie sposoby kompensacji, które implementowane są w oprogramowaniu skanera. Uwzględniają one różne sposoby symulacji wpływu temperatury

¹Podobne podejście, bazujące na podobieństwie w wynikach pomiarów zaproponowane jest w normach opisujących metodę walidacji skanerów 3D SLS, ISO 10360-8 [36] i VDI/CDE2634 [34]

na skaner 3D i na jego elementy składowe. Efektem symulacji jest opracowanie modelu matematycznego, który pozwala na obliczanie odchyłek kompensacyjnych, używanych następnie do korekcji wyników pomiarów. Programowe metody kompensacji opisane zostały w rozdziale 2.2.

2.1 Sprzętowe metody kompensacji

2.1.1 Materiały o niskim współczynniku liniowej rozszerzalności temperaturowej

Odpowiedni projekt konstrukcyjny skanera może bardzo istotnie wpływać na jego późniejsze zachowanie podczas zmiany temperatury zewnętrznej. Świadome używanie materiałów o niskiej wartości współczynnika liniowej rozszerzalności temperaturowej α w konstrukcji może przynieść wymierne korzyści. Istnieją technologie, które pozwalają na produkcję detali konstrukcyjnych z materiałów o bardzo małym współczynniku rozszerzalności temperaturowej α : np. Zerodur [68–71], Robax [70–73], Cer-Vit [69–71, 74], ClearCeram-Z [71], inwar [75, 76], materiały kompozytowe np. laminaty (laminaty z włókna węglowego, kevlar) [77, 78]. Właściwości fizyczne wybranych materiałów i materiałów konwencjonalnych typu stal i aluminium, zostały porównane w tabeli Tab. 2.1.

Tabela 2.1: Właściwości materiałowe (moduł Younga E , gęstość ρ) niektórych materiałów o niskiej wartości liniowego współczynnika rozszerzalności termicznej α .

	$E[GPa]$	$\rho[kg/m^3]$	$\alpha(0^\circ C \div 50^\circ C)[K^{-1}]$
stal [75]	205 ÷ 210	7500 ÷ 7900	$(12 \div 18) \times 10^{-6}$
stopy aluminium [75]	~ 69	~ 2700	~ 23×10^{-6}
Zerodur [68, 70, 71, 79, 80]	90,3	2530	$(< 0,01 \div 0,03) \times 10^{-6}$
Robax [70–73]	93	~ 2600	$(0 \pm 0,5) \times 10^{-6}$
inwar i podobne [76, 79–81]	137 ÷ 145	8100 ÷ 8200	$(< 0,01 \div 1,3) \times 10^{-6}$
kompozyty węglowe [77]	120 ÷ 180	~ 1400	$(4 \div 7) \times 10^{-6}$

Dewitryfikaty

Robax, Ceran [70, 72, 73], Zerodur [68, 70] oraz Cer-Vit i podobne [70, 71, 74] to materiały z grupy dewitryfikatów (ang. *low-expansion glass ceramics*). Cytując Autorów książki "Szkło optyczne i fotoniczne" [71]: "Istotą struktury dewitryfikatu jest obecność mikrokryształów zawieszonych w masie szklanej. Oczekiwana szczególna właściwość znikomej rozszerzalności termicznej mogła być uzyskana dzięki ujemnej rozszerzalności materiału krystalicznego o strukturze kwarcu, kompensującej dodatnie zmiany wymiarów wykazywane przez masę

szklana." Na skutek swojej budowy i składu, dewitryfikaty odznaczają się bardzo dużą odpornością na zmiany temperatur oraz stałością wymiarową w dużym zakresie temperatur dzięki ekstremalnie niskiej wartości współczynnika rozszerzalności termicznej α (patrz Tab. 2.1). W nomenklaturze inżynierskiej nazywane są często materiałami szklanokrystalicznymi, szkłoceramicznymi lub szkłem krystalizowanym [71]. Charakteryzują się nieco wyższą wartością współczynnika Younga niż konwencjonalne szkła optyczne [71], ale tak samo narażone są na kruche pękanie. Dlatego nie do końca nadają się do użycia w projekcie bazy mechanicznej skanera. Zwłaszcza w przypadku skanerów o większych gabarytach (o długiej bazie pomiarowej L) tworzywa te mogą nie spełnić swojej roli. Dodatkową trudnością są koszty. Zarówno Zerodur, Robax, Ceran jak i Cer-Vit to bardzo drogie materiały. Znajdują one zastosowanie m.in. w astronomii do budowy teleskopów [71, 82, 83]. Ich wykorzystanie w konstrukcji skanerów 3D SLS jest więc także niezasadne z ekonomicznego punktu widzenia.

Inwar i pochodne

Inwar i pochodne (elinwar, super inwar, kowar [75, 76, 79, 80]) to materiały z grupy stali stopowych. Wyróżniają się dużą zawartością niklu w składzie. Stopy typu inwar zawierają 36% ÷ 52% niklu. Resztę składu stanowi żelazo oraz dodatki stopowe (głównie chrom i mangan) [75, 76, 79, 80]. Stopy inwarowe odznaczają się niemal stałym i bardzo niskim współczynnikiem liniowej rozszerzalności temperaturowej w dużym zakresie temperatur. Można je obrabiać tradycyjnymi metodami obróbki ubytkowej, ale z uwagi na dużą zawartość niklu są trudno obrabialne [75, 76, 81]. Stopy inwarowe są często stosowane w produkcji łopatek wirników oraz dysz turbin gazowych w silnikach rakietowych i odrzutowych. Wykorzystuje się je również w narzędziach aparatury chemicznej, które są przystosowane do pracy w bardzo wysokiej temperaturze i w niesprzyjającym środowisku np. korozji gazowej. Używane są także w elektronice jako złącza metal-ceramika lub metal-szkło oraz do produkcji precyzyjnych przyrządów, kamertonów i precyzyjnych sprężyn [79–81].

Podobnie, jak wymienione poprzednio materiały szklane, inwar i pochodne są wykorzystywane w astronomii oraz przemyśle militarnym np. do budowy kompensatorów termicznych [79, 80, 83–85]. Właściwości mechaniczne stali inwarowych są bardzo pożądane z punktu widzenia konstrukcji skanerów 3D. Należy jednak podkreślić, że materiały te są bardzo trudno dostępne i drogie, a także trudne w obróbce. Dlatego też w zasadzie nie są one stosowane w projektach skanerów 3D z oświetleniem strukturalnym.

Laminaty kompozytowe

Ostatnią grupą materiałów, które odznaczają się stosunkowo niską wartością współczynnika rozszerzalności temperaturowej α (Tab. 2.1), są materiały kompozytowe. Materiały kompozytowe to materiały, w których budowie makroskopowej można wyróżnić co najmniej dwie fazy: fazę ciągłą, zwaną matrycą lub osnową oraz drugą fazę rozproszoną zwaną zbrojeniem [78]. W produkcji skanerów 3D z oświetleniem strukturalnym najczęściej używane

są tzw. kompozyty włókniste, a w szczególności laminaty z włókna węglowego, szklanego lub aramidowego (tzw. kevlar) w osnowie z żywicy epoksydowej lub polimerowej. Materiały te mają także inne pożądane cechy: są lekkie (niska gęstość) i sztywne (wysoka wartość modułu Younga), mają atrakcyjny wygląd bez dodatkowego pokrycia [77, 78, 86]. Wpływ temperatury na bazy konstrukcyjne wykonane z laminatów kompozytowych jest z pewnością mniejszy, niż w przypadku zastosowania innych, konwencjonalnych materiałów (stal, aluminium). Nie można go jednak całkowicie pomijać. Właściwości mechaniczne laminatów z włókna węglowego bardzo mocno zależą od technologii wytwarzania samych detali, od struktury ułożenia włókien oraz od zastosowanej żywicy [77, 78, 86].

Technologia wytwarzania detali z laminatów kompozytowych jest niestety stosunkowo skomplikowana i nie daje się zautomatyzować. Istnieją półautomatyczne metody wytwarzania półfabrykatów w postaci profili i płyt (metoda ciągła wytwarzania prętów i rur tzw. poltruzja - ang. *poltrusion* - lub metoda nawijania włókien [78]), ale w celu osiągnięcia bardziej zaawansowanych kształtów, trzeba się posłużyć laminowaniem na formie - jest to tzw. metoda kontaktowa [78]. Technologia ta polega na wytworzeniu pozytywowej formy (w żargonie nazywa się ją kopytem) z twardego materiału (aluminium, drewno, specjalny polietylen, laminat kompozytowy, gips), na której umieszcza się warstwy tkaniny z odpowiednich włókien i w odpowiedniej orientacji, a następnie nasącza się je żywicą. Tak przygotowany detal okrywa się specjalną folią, spod której wysysa się powietrze. Folia kompresuje tkaninę na formie, pozwalając na odpowiednie nasączenie tkaniny żywicą oraz usunięcie pęcherzyków powietrza ze ścianek detalu. Istnieją różne wariacje tej metody (wygrzewanie detali w wysokich temperaturach, używanie specjalnie nasączonych wcześniej tkanin, używanie różnych splotów w tkaninach etc.).

W laminatach z reguły nie wykonuje się gwintów. Z tej przyczyny wszystkie połączenia rozłączne, w postaci połączeń gwintowych, przygotowuje się przy użyciu nakrętek albo specjalnie przystosowanych tulejek z gwintem, które laminuje się w trakcie wytwarzania detali (tzw. *inserty*). W celu wykonywania połączeń nierozłącznych można używać klejenia. Późniejsza obróbka ubytkowa detali jest możliwa (wiercenie, toczenie, frezowanie), ale wymaga używania bardzo ostrych narzędzi, małych posuwów i dużych prędkości obrotowych narzędzia. Należy także pamiętać, że wióry obróbcze (a w zasadzie pył powstały w trakcie obróbki) są szkodliwe dla zdrowia. Inną, ważną kwestią jest możliwość uszkodzenia obrabiarki wykorzystanej do skrawania. Wynika to stąd, że pył z obrabianego włókna węglowego przewodzi prąd. Należy więc zachować ostrożność, aby zanieczyszczenie to nie dostało się np. do szczotek silników napędzających obrabiarkę

Inną, często stosowaną technologią wytwarzania z laminatów kompozytowych, jest wycinanie formatek z płyt laminowanych za pomocą strumienia wody ze ścierniwem tzw. *water-jet*. W tej technologii używa się prefabrykatów w postaci płyt, prętów oraz rur (profilu).

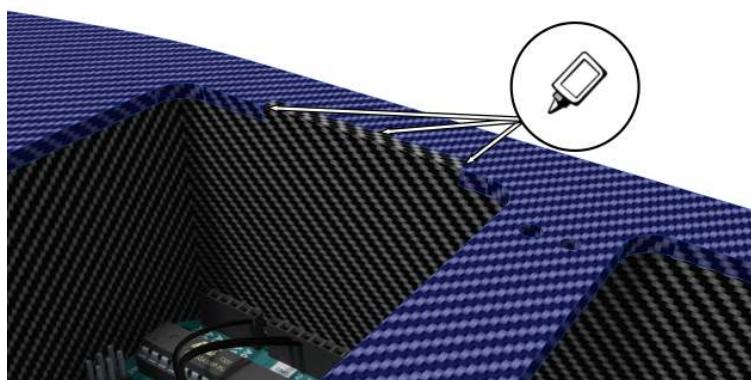
W celu połączenia ze sobą poszczególnych formatek lub profili najczęściej stosuje się klejenie (przykład wykonania zamków do klejenia pokazuje Rys. 2.1 c). Ta technologia jest tańsza od laminowania na formie, ale jednocześnie bardzo ogranicza późniejszy kształt detalu do stosunkowo prostych brył geometrycznych (Rys. 2.1 b). Dodatkową trudnością jest fakt raczej niskiej precyzji obróbki typu *water-jet*. Formowana struga cieczy, wzbogacona o materiał ścierny ma średnicę rzędu 2 – 3mm - oznacza to, że ślad obróbczy ma taką szerokość. Często na krawędziach ciętego detalu zaobserwować można strzępienie się materiału oraz odpryski, a nawet delaminację (rozwarstwienie). Przykładowy skaner wykonany w tej technologii pokazany został na zdjęciu (Rys. 2.1 a).



a)



b)



c)

Rysunek 2.1: Skaner 3D z oświetleniem strukturalnym wykonany w technologii sklejania formatek z laminatu węglowego wyciętych na maszynie typu *water-jet*: a) wygląd skanera, b) wizualizacja projektu CAD, c) sposób wykonania zamków do klejenia poszczególnych formatek. Przedstawiony na rysunkach skaner wykonany został przeze mnie w ramach projektu "Rekonstrukcja miejsca zdarzenia kryminalnego na podstawie wyglądu krwawych śladów" DOBR/0006/R/ID1/2012/03.

Wymienione trudności powodują, że technologia wytwarzania detali konstrukcyjnych z laminatów jest stosunkowo droga. Niemniej jednak włókno węglowe coraz częściej zaczyna

być stosowane jako materiał do konstrukcji skanerów 3D ze światłem strukturalnym. Używanie laminatów z kompozytów węglowych pozwala projektować bardzo wyszukane kształty skanerów 3D (w technologii laminowania na formie). Z jednej strony może się to przekładać na atrakcyjny wygląd, a z drugiej na dobre właściwości sztywnościowe i dobry stosunek masy do sztywności. Pozwala to także zrealizować taki projekt skanera, w którym baza mechaniczna stanowi jednocześnie obudowę skanera. Zmniejsza to stopień skomplikowania konstrukcji, a jednocześnie uatrakcyjnia ją wizualnie.

Pomimo niewątpliwych zalet, ani dewitryfikaty typu Zerodur, Robax, Ceran i Cer-Vit, ani stopy typu inwar i jemu pochodne, nie znajdują zastosowania jako materiały do konstrukcji skanerów 3D SL. Jedynie laminaty z włókna węglowego zaczynają być używane. Jednocześnie wielu producentów skanerów dalej chętnie korzysta z konwencjonalnych materiałów (stal, aluminium) (Rys. 1.4 a i c). Używanie laminatów węglowych przynosi wymierne korzyści w postaci lekkiej, sztywnej i estetycznej konstrukcji. Są jednak wady takiego podejścia. Zastosowanie kompozytów wiąże się z bardzo pracochłonną technologią wytwarzania. Podnosi to znacząco koszty produkcji skanerów 3D. Ponadto bazy konstrukcyjne z włókna węglowego są co prawda mniej czułe na zmiany temperatury, ale wpływ ten nie jest na tyle niski, żeby zupełnie go pominąć.

2.1.2 Atermalizacja zespołów optycznych

Kompensacja wpływu temperatury na skanery 3D z oświetleniem strukturalnym może być także realizowana na poziomie projektu zespołów optycznych detektora oraz projektora. Istnieją metody konstruowania komponentów oraz zespołów optycznych, w których realizowana jest kompensacja termiczna. Proces stabilizacji charakterystyki optycznej przyrządu optycznego poprzez projektowanie układu optycznego, opraw elementów optycznych i montażu w celu skompensowania zmian temperatury nazywa się atermalizacją [83, 87, 88].

Wyróżnić można 3 podstawowe metody atermalizacji optyki [83, 85, 88]: atermalizację pasywną optyczną, atermalizację pasywną mechaniczną oraz atermalizację aktywną elektromechaniczną. Jest jeszcze jedna metoda, która nie do końca daje się przyporządkować w tym podziale. Polega ona na wykonywaniu całego systemu optycznego z jednego materiału o tej samej wartości współczynnika liniowej rozszerzalności temperaturowej α . Taką formę atermalizacji stosuje się w systemach zwierciadlanych (ang. *reflective optics systems*) [83, 87–89]. W przypadku układów optycznych projektora oraz detektora nie znajduje ona zastosowania, gdyż wymagają one systemów optycznych, w których występują także elementy transmisyjne, a nie tylko odbiciowe.

Atermalizacja pasywna optyczna

Atermalizacja pasywna optyczna jest związana z doбором materiałów o różnych właściwościach cieplnych na elementy optyczne. Odpowiednio dobierając materiały na poszczególne elementy układu optycznego można z powodzeniem osiągać efekt atermalizacji i kompensować w ten sposób wpływ temperatury. Ten rodzaj atermalizacji jest korzystny, ponieważ nie wymaga żadnych dodatkowych elementów ruchomych w torze optycznym, a przez to jest bezawaryjny i stosunkowo dokładny. Jednocześnie powoduje zwiększenie złożoności układu optycznego, a także wymaga stosowania bardziej wyspecjalizowanych (a przez to drogich i trudno dostępnych) materiałów [85, 87, 88]. Trzeba także pamiętać, że pasywna atermalizacja optyczna, zaprojektowana w ten sposób, by niwelować efekt rozogniskowania, może skutkować niewielkimi zmianami w powiększeniu obrazu (efekt zoom'u). Takie zjawisko byłoby bardzo niekorzystne z punktu widzenia kalibracji skanera 3D z oświetleniem strukturalnym.

Atermalizacja pasywna mechaniczna

Atermalizacja pasywna mechaniczna polega na odpowiedniej konstrukcji mechanicznej zespołu optomechanicznego. Może być realizowana na różne sposoby. Jednym z takich rozwiązań jest odpowiedni dobór współpracujących ze sobą materiałów, co pozwala izolować cieplnie elementy optyczne. Przepływ ciepła pomiędzy korpusem toru optycznego, a komponentami optycznymi (np. soczewkami) odbywa się przez radiację, konwekcję oraz przewodzenie ciepła. Radiacja i konwekcja mają bardzo niewielki udział w tym procesie. Za wzrost lub spadek temperatury elementu optycznego odpowiada głównie przewodzenie ciepła pomiędzy korpusem, oprawą i samym materiałem komponentu optycznego. W celu ograniczenia tego efektu, korzystnie jest stosować oprawy, bądź elementy opraw wytwarzane z tytanu [83, 85], który ma niski współczynnik przewodzenia ciepła w stosunku do innych materiałów z grupy metali. Pozwala to na ograniczenie przepływu ciepła do elementu optycznego. Dodatkowo, współczynnik liniowej rozszerzalności temperaturowej α tytanu ma wartość podobną do współczynnika rozszerzalności temperaturowej wielu materiałów szklanych używanych w konstrukcjach optycznych [83, 85]. Jest to korzystne z punktu widzenia ograniczania naprężeń wywołanych odkształceniem temperaturowym konstrukcji.

Kolejnym sposobem realizacji pasywnej atermalizacji mechanicznej jest konstrukcja, w której odkształcenie termiczne korpusu mechanicznego podtrzymującego elementy optyczne niweluje efekt rozogniskowania w torze optycznym. Należy tutaj pamiętać, że zmienna temperatura wpływa także na zmianę współczynnika załamania n materiału, z którego zbudowany jest element optyczny. Zjawisko, dla standardowego materiału szklanego, w

pewnym uproszczeniu, można opisać równaniem 2.1 [83].

$$\beta \approx \alpha - \frac{1}{n-1} \frac{dn}{dT} \quad (2.1)$$

gdzie (patrz rysunek 2.2:

β - współczynnik rozszerzalności optotermicznej (ang. *the optothermal expansion coefficient*),

α - współczynnik cieplnej rozszerzalności liniowej materiału elementu optycznego,

n - współczynnik załamania materiału elementu optycznego,

$\frac{dn}{dT}$ - stała termooptyczna materiału elementu optycznego (ang. *the lens material termoptic coefficient*).

Zatem atermalizacja ma za zadanie nie tylko skompensować wzajemne ruchy elementów optycznych, ale także zmianę współczynnika załamania materiału. W takim przypadku kompensacja wpływu temperatury polega na dobieraniu takich materiałów, by liniowa rozszerzalność termiczna całego systemu optycznego α_s była równa współczynnikowi rozszerzalności optotermicznej całego systemu β_s (Równanie 2.2).

$$\alpha_s = \beta_s \quad (2.2)$$

Jednym ze sposobów realizacji tej metody jest tzw. kompensator bimetaliczny (ang. *bi-metallic compensator*) [83, 88]. Kompensator bimetaliczny zbudowany jest z dwóch materiałów o różnych wartościach współczynnika liniowej rozszerzalności temperaturowej α . Odpowiednio dobierając długość tych elementów uzyskuje się efekt kompensacji wpływu temperatury. Atermalizacja przy użyciu kompensatora bimetalicznego opisana jest równaniem 2.3.

$$\alpha_1 L_1 + \alpha_2 L_2 = \beta_s f \quad (2.3)$$

gdzie:

α_1, α_2 - współczynniki liniowej rozszerzalności termicznej elementów kompensatora,

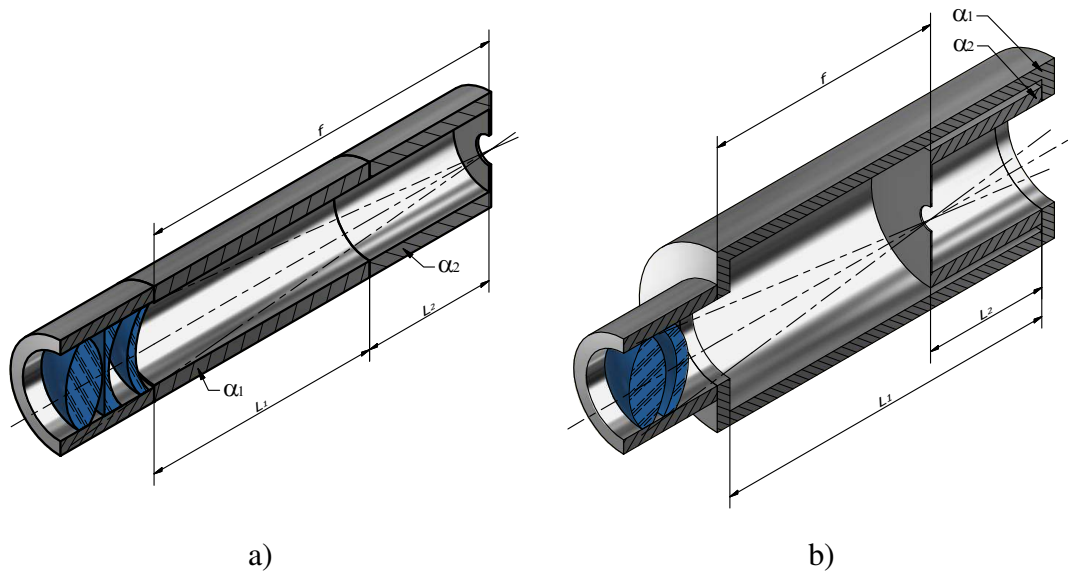
L_1, L_2 - długości elementów mechanicznych kompensatora,

β_s - współczynnik rozszerzalności optotermicznej całego systemu optycznego,

f - długość ogniskowej.

Przykłady realizacji konstrukcyjnej kompensatorów bimetalicznych pokazałem na Rysunku 2.2 a i b. W pierwszym przypadku (Rys. 2.2 a) tuleja o długości L_1 zrobiona jest z materiału o bardzo niskiej wartości współczynnika liniowej rozszerzalności termicznej α_1 np. z inwaru. Tuleja o długości L_2 zrobiona jest z materiału o większej wartości współczynnika liniowej rozszerzalności termicznej α_2 . Efekt kompensacji uzyskiwany jest w tulei L_2 , bo tuleja L_1 w zasadzie nie ulega odkształceniu termicznemu, ale jest niezbędna w celu uzyskania pożądanej długości całego zespołu optycznego. Dobierając odpowiednią relację między długościami L_1

i L_2 oraz współczynnikami α_1 i α_2 osiąga się efekt atermalizacji opisany równaniem 2.3. W przypadku pokazanym na Rysunku 2.2 b, ten sam efekt uzyskiwany jest poprzez różnicowe działanie obydwu tulei L_1 i L_2 , które mogą być wykonane ze standardowych materiałów, ale o różnych wartościach współczynnika liniowej rozszerzalności termicznej α_1 i α_2 . To rozwiązanie nie wymaga stosowania drogich materiałów typu inwar.



Rysunek 2.2: Kompensator bimetaliczny: a) kompensator, w którym jedna z tulei zbudowana jest z materiału o bardzo niskiej wartości współczynnika rozszerzalności termicznej np. inwaru, a druga ze standardowego materiału. Długość tulei została tak dobrana, by spełnić warunek opisany Równaniem 2.3, b) kompensator zbudowany z dwóch tulei wykonanych z konwencjonalnych materiałów np. ze stali i aluminium, kompensacja realizowana jest poprzez różnicowe działanie dwóch tulei, przez co równanie 2.3 także jest spełnione. Źródło: opracowanie własne na podstawie [83].

Pasywna atermalizacja mechaniczna ma tę zaletę, że jest stosunkowo prosta konstrukcyjnie. Jest dosyć dokładna i nieskomplikowana w montażu i serwisie [87, 88]. Raczej nie nadaje się do stosowania w systemach optycznych ze zmienną ogniskową (np. obiektywy z zoom'em). W niektórych realizacjach, dodatkowym problemem jest konieczność stosowania drogich materiałów (inwar) [82, 84]. Z kolei stosując tańsze i bardziej dostępne materiały, często napotyka się problemy związane ze znaczącym zwiększaniem się gabarytów konstrukcji oraz znacznie zwiększoną inercją termiczną całego systemu optycznego. Wymienić należy także problemy z uszczelnieniem konstrukcji (występują elementy ruchome) oraz nieliniowością ruchu kompensowanych elementów [87, 88].

Atermalizacja aktywna elektromechaniczna

Ta metoda atermalizacji polega na wykorzystywaniu silników do realizowania przemieszczania elementów optycznych. Konstrukcja mechanizmu staje się o wiele bardziej skomplikowana, bo wymaga zapewnienia ruchomych detali z napędem oraz pętlą sprzężenia zwrotnego w celu dokładnego ustalania pozycji. Układ sterowania wyposażony jest w czujniki temperatury i na bieżąco kompensuje pozycję elementów optycznych w ten sposób, by osiągnąć efekt atermalizacji.

Ten typ atermalizacji ma tę zaletę, że wykonawczy układ elektromechaniczny może zostać tak zaprogramowany, by realizować nieliniowe charakterystyki przemieszczeń zespołów optycznych. Może o wiele szybciej reagować na zmiany temperatury, bo czujniki temperatury można umieścić bardzo blisko elementów optycznych. Tym samym może być stosowany w bardzo dużych gabarytowo układach optycznych, w których występują duże gradienty temperatur. Oczywiście wadami są natomiast: o wiele bardziej skomplikowana konstrukcja mechaniczna (uwzględniająca silniki, prowadnice oraz układy przeniesienia napędu), zdecydowanie większa masa oraz zwiększone wymiary przyrządu optycznego, konieczność doprowadzenia zasilania oraz zbudowania elektronicznego układu sterującego. Wymienione niedoskonałości powodują, że atermalizacja aktywna elektromechaniczna jest wykorzystywana raczej w bardzo drogich układach optycznych budowanych dla wojska lub na potrzeby astronomii [82, 85, 90].

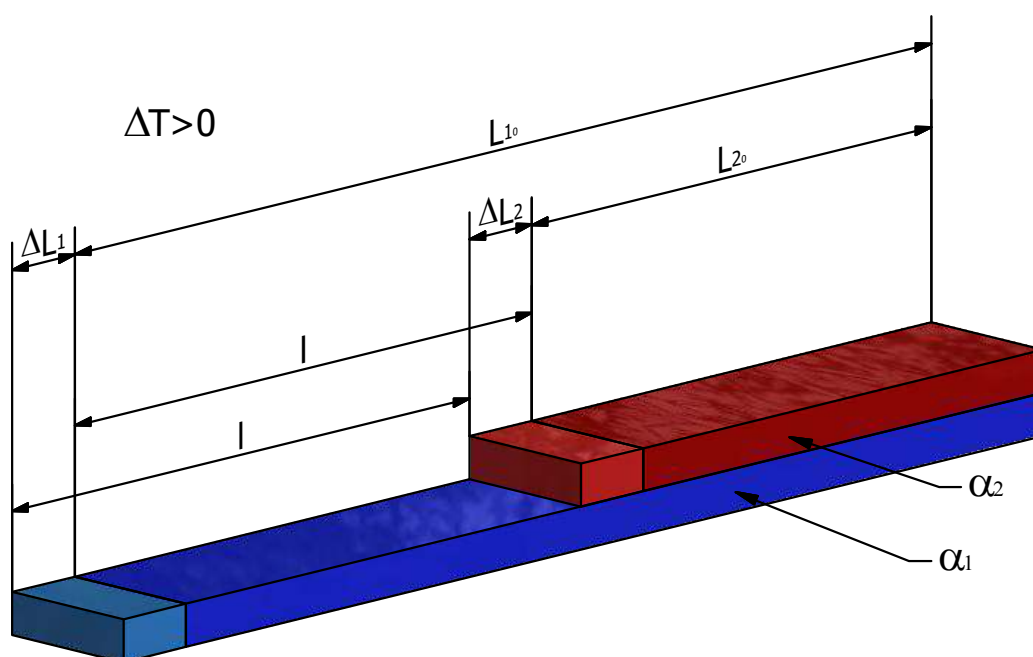
2.1.3 Kompensacja różnicowa bazy mechanicznej

Projekt bazy mechanicznej skanera także może zostać wykonany w ten sposób, by realizować kompensację wpływu temperatury. Jedną z metod kompensacji może być wykorzystanie metody opisanej w atermalizacji pasywnej mechanicznej. Użycie dwóch detali o różnej długości i charakteryzujących się różnymi wartościami współczynnika liniowej rozszerzalności temperaturowej α oraz takie ich połączenie, by ich wydłużenia/skrócenia nawzajem różnicowo się kompensowały. Taką konstrukcję nazwać można kompensatorem bimetalicznym (ang. *bimetallic compensator*) [83, 88].

W rozdziale 1.1 przedstawiłem koncepcję konstrukcji skanera 3D z oświetleniem strukturalnym, której bazę mechaniczną tworzyła belka o długości L_0 . Wydłużenie takiej belki w funkcji temperatury opisane jest prawem liniowej rozszerzalności temperaturowej (Równanie 2.4). Jeśli belka zostanie podgrzana/ochłodzona o ΔT stopni, wtedy jej długość L po odkształceniu wzrośnie/zmaleje proporcjonalnie do liniowego współczynnika rozszerzalności temperaturowej α (charakteryzującego materiał, z którego wykonana jest belka) oraz proporcjonalnie do przyrostu temperatury ΔT , zgodnie ze wzorem 2.4:

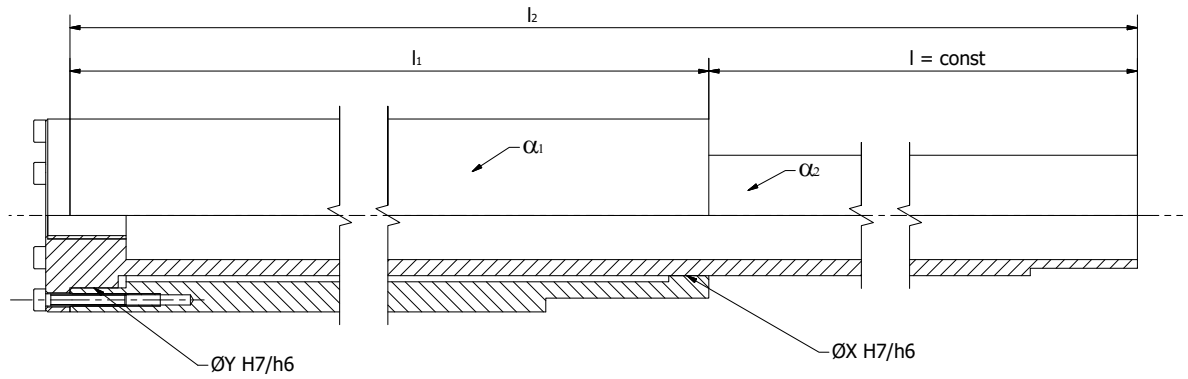
$$L = L_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (2.4)$$

Przyrost długości wynosi w tym wypadku $\Delta L = L - L_0$. Dobranie materiału o dużo większej wartości współczynnika liniowej rozszerzalności temperaturowej α , pozwoli uzyskać taki sam przyrost długości ΔL , przy mniejszej długości L_0 . Połączenie dwóch belek o różnych długościach i wartościach współczynnika liniowej rozszerzalności temperaturowej α tak, aby odkształcenia termiczne działały różnicowo, pozwoli uzyskać kompensację wydłużenia/skracania się bazy mechanicznej skanera. Rozwiązanie to pokazałem na Rysunku 2.3.



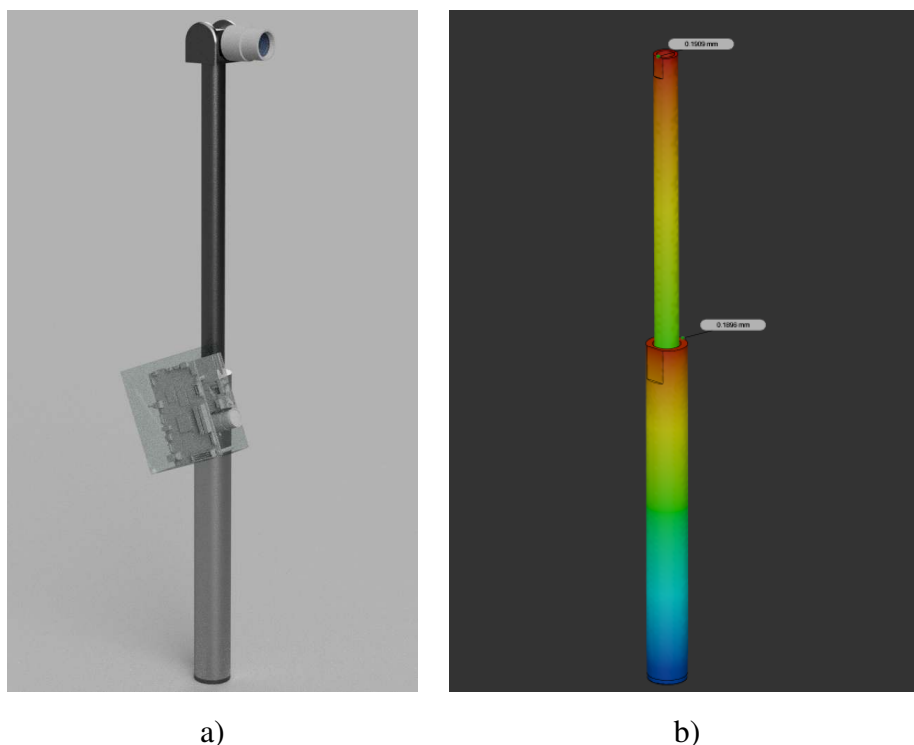
Rysunek 2.3: Koncepcja kompensacji różnicowej bazy mechanicznej skanera 3D z oświetleniem strukturalnym.

Zakładając, że dłuższa belka (niebieska) ma długość L_{1_0} i współczynnik rozszerzalności temperaturowej α_1 , a krótsza (czerwona) długość L_{2_0} oraz α_2 , żeby dystans L nie uległ zmianie podczas zmiany temperatury o ΔT , musi być spełniony warunek (Równanie 2.5).



Rysunek 2.4: Projekt bazy mechanicznej skanera, w której realizowana jest koncepcja kompensatora bimetalicznego. Źródło: opracowanie własne.

$$\begin{cases} L_1 = L_{1_0}(1 + \alpha_1 \Delta T) \\ L_2 = L_{2_0}(1 + \alpha_2 \Delta T) \end{cases} \Rightarrow (\Delta L = L_1 - L_{1_0} = L_2 - L_{2_0}) \Rightarrow \frac{L_{1_0}}{L_{2_0}} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \quad (2.5)$$



Rysunek 2.5: Baza mechaniczna z kompensatorem bimetalicznym: a) koncepcja skanera 3D z oświetleniem strukturalnym, w którym wykorzystano bazę mechaniczną skonstruowaną zgodnie z zasadami kompensatora bimetalicznego. Projektor zamontowany jest na jednym z końców aluminiowej rurki, a kamera na końcu stalowej rurki. Odształcenie termiczne rurek oraz ich długości dobrane zostały w ten sposób, by dystans pomiędzy projektorem, a detektorem pozostał niezmienny, b) wyniki symulacji dla przyrostu temperatury o 20°C , zmiana dystansu pomiędzy detektorem, a projektorem nie jest większa niż $\sim 13\mu\text{m}$, przy jednoczesnym wydłużeniu całej bazy mechanicznej na poziomie $\sim 200\mu\text{m}$.

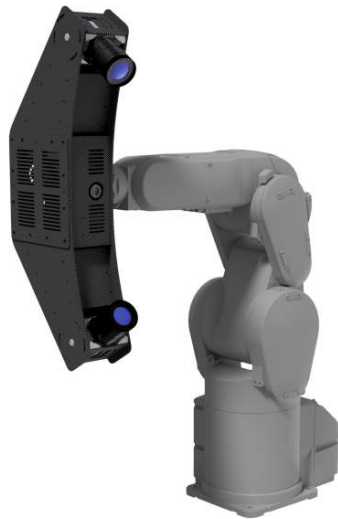
Zatem umieszczając np. detektor na krańcu belki o długości L_{10} oraz projektor na krańcu belki o długości belki L_{20} można uzyskać efekt kompensacji wpływu temperatury na bazę mechaniczną skanera. Odległość pomiędzy projektorem a detektorem pozostanie na niemalże tym samym poziomie równym L . Przykład bazy skonstruowanej według tych wytycznych pokazano na rysunku 2.4 i 2.5. Baza składa się z dwóch rur o przekroju okrągłym. Dłuższa z rur wykonana jest ze stali, a krótsza ze stopu aluminium. Stosunek współczynników liniowej rozszerzalności temperaturowej dla tych materiałów wynosi $\sim 1,97$, zatem rurka aluminiowa powinna być $\sim 1,97$ razy krótsza od rurki stalowej. Symulacja odształcenia termicznego, wykonana w programie Catia V5 [91] przy użyciu modułu Generative Structure Analysis, dla tego układu, dla przyrostu temperatury o $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$ pokazuje, że rozsuniecie względne detektora i projektora będzie wynosiło $\sim 13\mu\text{m}$, przy jednoczesnym wydłużeniu bazy mechanicznej na poziomie $\sim 200\mu\text{m}$ (Rys. 2.5 b).

Ta metoda kompensacji pozwala na zmniejszenie wpływu rozszerzalności termicznej materiałów bazy mechanicznej tylko w jednym kierunku - wzdłuż osi podłużnej bazy. Metoda ta nadaje się do skanerów, w których odległość pomiędzy detektorem i projektorem jest stosunkowo duża, wtedy wpływ temperatury przejawia się głównie w wydłużaniu/skracaniu bazy, a inne efekty (np. zmiana wymiarów przekroju) są mniej istotne.

2.1.4 Aktywne chłodzenie skanera

Innym sposobem ograniczania wpływ temperatury na skaner 3D jest utrzymywanie stałej temperatury wewnątrz skanera. W skanerze 3D SLS wyróżnić można na pewno dwa źródła ciepła: detektor oraz projektor. Dodatkowe elementy elektroniczne, jeśli występują, nie są istotnym źródłem ciepła (elektroniczne interfejsy komunikacyjne, synchronizatory akwizycji i projekcji etc.). Wyjątek mogą stanowić skanery 3D wyposażone w jednostkę obliczeniową, która np. jest odpowiedzialna za akwizycję i wstępne przetwarzanie danych. Realizowane jest to najczęściej przy użyciu mikrokomputera klasy PC albo podobnej klasy jednostki obliczeniowej (Rys. 2.6). Taki komputer także jest źródłem ciepła, stąd nie można go pominąć wymieniając źródła ciepła w skanerze.

Po włączeniu i inicjalizacji wszystkich modułów skanera, po jakimś czasie skaner osiąga swoją równowagę termodynamiczną. Ilość ciepła wytworzonego przez elementy elektroniczne jest taka sama, jak ilość ciepła odprowadzonego na zewnątrz, poza obudowę. Zjawisko rozgrzewania się systemu elektronicznego (ang. *warming-up*) jest normalne i charakterystyczne dla każdego w zasadzie urządzenia pomiarowego. Występuje także w skanerach 3D. Zostało opisane w wielu pozycjach literaturowych [21–25, 43, 44, 50]. Przedstawiłem je na zdjęciach z kamery termowizyjnej (Rys. 2.7 a, b i c).



a)



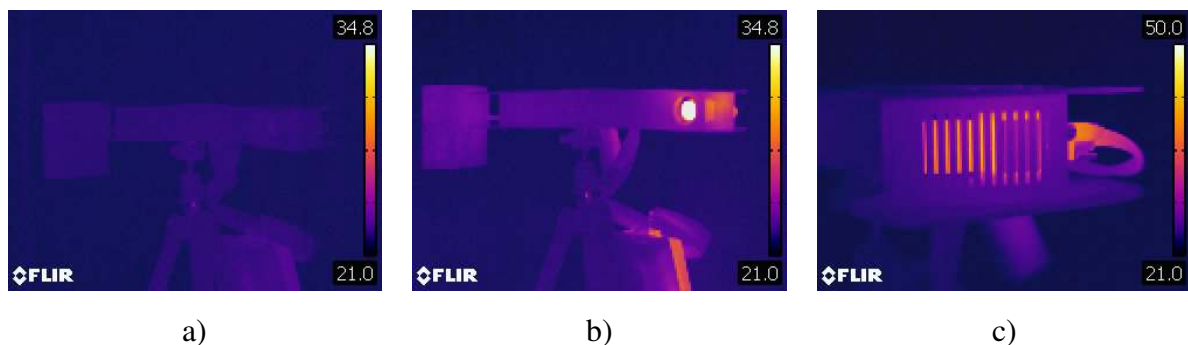
b)

Rysunek 2.6: Skaner SLSCAN 3D: a) skaner 3D z oświetleniem strukturalnym firmy PragmaVision [92] - wizualizacja CAD, b) skaner posiada wewnątrz obudowy (wykonanej w całości z włókna węglowego) mikrokomputer IntelNUC [93] odpowiadający za akwizycję danych z kamer oraz przeliczanie chmury punktów. Skaner został umieszczony na ramieniu robota 6-osioowego i razem tworzą stanowisko do automatycznej digitalizacji detali. Skaner został zaprojektowany oraz wykonany przeze mnie w ramach start-up'u - firmy PragmaVision sp. z o.o. [92]..

W przypadku zmiany temperatury zewnętrznej na wyższą, do skanera dopływa dodatkowa porcja ciepła i równowaga termiczna zostaje zaburzona. Po jakimś czasie, gdy przepływy termiczne się ustalą i gradienty temperaturowe wyrównają, skaner ponownie osiąga swoją równowagę termiczną, ale w innej temperaturze. Pomiary robione przez skaner będą w tym wypadku zaburzone przez odkształcenia termiczne oraz wszystkie inne konsekwencje wpływu temperatury na skaner i jego komponenty składowe. W celu kompensacji tego efektu należałoby utrzymywać stałą temperaturę wewnątrz skanera. Pozwoli to na utrzymanie skanera w równowadze termicznej, którą osiągnął podczas kalibracji. W przypadku, gdy temperatura zewnętrzna maleje, mechanizm przepływów cieplnych jest bardzo podobny, ale temperatura skanera maleje. W tym przypadku o wiele łatwiej byłoby utrzymać stałą temperaturę wewnątrz skanera - wymagałoby to zainstalowania elementu grzejnego (np. drutu elektrooporowego). O wiele trudniej jest pozbyć się nadmiaru ciepła - wymaga to aktywnego chłodzenia.

Aktywne chłodzenie, które dodatkowo utrzymuje stałą temperaturę chłodzonego detalu niezależnie od temperatury zewnętrznej, wymaga elementu wykorzystującego efekt termoelektryczny [94] - np. modułu Peltiera. Istnieją rozwiązania, gdzie moduły Peltiera użyte są do utrzymywania np. stałej temperatury sensora wewnątrz kamery [44, 53, 95, 96]. W takich kamerach, do radiatora chłodzącego sensor dołączony jest moduł Peltiera, który

pozwała na wymuszanie zadanej temperatury sensora, bądź też na utrzymywanie go w stałej temperaturze. Takie rozwiązanie pozwala na zmniejszenie szumów termicznych matrycy, ale nie eliminuje problemów związanych z temperaturowym dryftem obrazu. W rozdziale 5.1 pokazałem wpływ efektów rozgrzewania się kamery z aktywnym chłodzeniem na rejestrowane obrazy. Inną, bardzo istotną wadą takich kamer jest fakt, że mają one istotnie większe gabaryty i pobierają więcej prądu. Także ich cena jest nieporównywalnie większa. W kamerach z aktywnym chłodzeniem mamy do czynienia z rozwiązaniem, w którym element, którego temperatura utrzymywana jest na stałym poziomie, ma relatywnie niewielkie wymiary. W przypadku skanera 3D SLS należałoby chłodzić o wiele większe obszary, a to wiąże się z koniecznością zastosowania większych modułów (lub większej ich liczby). Problemem staje się zasilanie skanera, ponieważ moduły Peltiera wymagają dużej mocy prądu zasilającego. Dodatkowo, w przypadku odprowadzania znacznych ilości ciepła, same wymagają chłodzenia [94]. W konsekwencji, użycie modułów Peltiera do utrzymywania stałej temperatury wewnątrz skanera 3D z oświetleniem strukturalnym, pociągałoby za sobą konieczność wyposażenia skanera w bardzo wydajne źródło zasilania. Powodowałoby to także potrzebę uwzględnienia bardzo dobrego chłodzenia samych modułów Peltiera.



Rysunek 2.7: Skaner 3D SLS z bazą mechaniczną z włókna węglowego, ten sam skaner został zaprezentowany na rysunku 2.1. Zdjęcia a) oraz b) wykonane zostały kamerą termowizyjną FLIR E40 [97]: a) przed włączeniem skanera, b) po 30 minutach od włączenia skanera, c) detektor z obiektywem może być stosunkowo intensywnym źródłem ciepła, bo potrafi się rozgrzać o nawet $\Delta T = 25^{\circ}\text{C}$.

Takie podejście do kompensacji wpływu temperatury na skaner 3D SLS jest niestety bardzo kłopotliwe właśnie z uwagi na niską sprawność modułów Peltiera. W praktyce nie spotkałem skanera 3D z oświetleniem strukturalnym, w którym kompensacja realizowana byłaby w ten sposób.

2.1.5 Rekalibracja skanera

Zupełnie innym podejściem do kompensacji wpływu temperatury na skanery 3D z oświetleniem strukturalnym, jest przeprowadzanie ponownej kalibracji skanera za każdym razem, gdy zmianie ulegnie temperatura, w której pracuje skaner - tzw. rekalibracja [98]. Należy wyposażyć skaner 3D w czujnik temperatury, który ostrzeże użytkownika o fakcie przekroczenia temperatury granicznej i konieczności rekalibracji. Takie podejście gwarantuje w zasadzie przeprowadzanie poprawnych metrologicznych skanów. Warunkiem jest właściwie wykonany proces kalibracji. Kolejnym wymogiem jest potrzeba znajomości wpływu temperatury na wzorzec kalibracyjny.

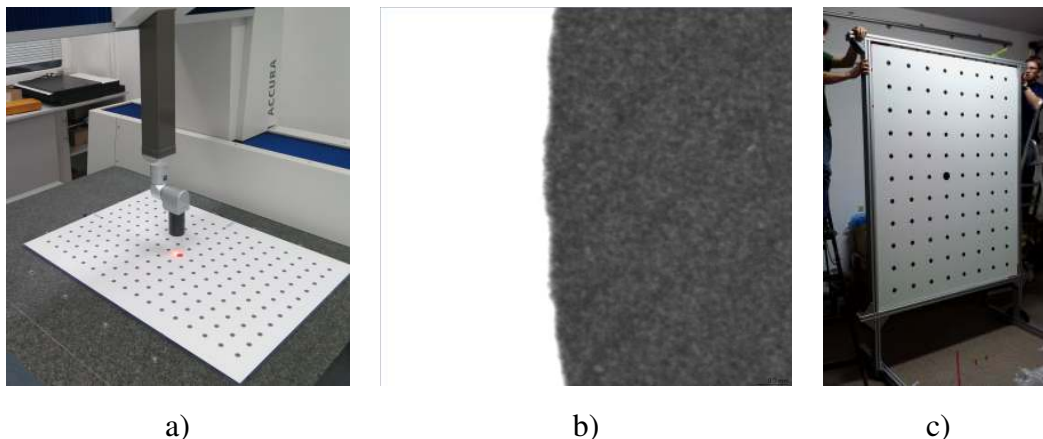
Kalibracja skanera 3D, w zdecydowanej większości wypadków, podzielona jest na dwa etapy: kalibrację geometryczną detektora/detektorów (kamery z obiektywem) oraz kalibrację fazową [2, 3, 5, 7, 15]. W obydwu przypadkach można używać tego samego wzorca. Najczęściej jest to płaska płyta z naniesioną siatką markerów (kołowych, lub kwadratowych) o dużym kontraście i matowym wykończeniu powierzchni. Wzorzec ustawia się przed skanerem w odpowiednich pozycjach, przy czym najczęściej nie jest wymagane bardzo precyzyjne pozycjonowanie skanera [2, 5].

Proces kalibracji skanera 3D jest stosunkowo skomplikowany i nie zawsze może być przeprowadzony przez niewykwalifikowanego użytkownika [2, 5, 7, 12]. Mechanizm ten staje się problematyczny szczególnie w przypadku skanerów z dużą objętością pomiarową. Trudność wynika z potrzeby pozycjonowania dużego wzorca przed skanerem (wymiar wzorca zawsze związany jest z gabarytem objętości pomiarowej) (Rys. 2.8c). Istnieją także aplikacje, w których przeprowadzanie kalibracji skanera na miejscu prowadzenia pomiarów może być zwyczajnie niemożliwe: np. pomiary na miejscu zdarzenia kryminalnego w warunkach polowych [7].

Dodatkowym problemem, związanym z rekalibracją jest konieczność opisanie wpływu temperatury na wzorzec kalibracyjny. Często realizuje się to w ten sposób, że wzorzec wykonany jest z materiału o znanym współczynniku rozszerzalności liniowej (np. aluminium). Można wtedy modelować zachowanie się wzorca w różnych temperaturach i wyliczać odpowiednie odchyłki [45]. Technologia wykonywania wzorca z aluminium jest niestety droga. Wymaga ona dostępu do dobrej klasy obrabiarek z dużym polem roboczym (w celu otrzymania dobrej klasy płaskości wzorca) oraz dostępu do technologii nanoszenia warstw o różnych kolorach na materiały metalowe (np. trawienie w celu uzyskania kontrastowych markerów).

Częściej stosuje się wzorce wykonane z szklanej płyty z naklejoną specjalną folią, na której nadrukowane są wzory kalibracyjne (Rys. 2.8c) [2, 5–7, 10–12, 27, 28]. Wzorce wykonane w tej technologii wymagają dodatkowej kalibracji metrologicznej w celu wyznaczenia dokładnej relacji geometrycznej pomiędzy środkami markerów (Rys. 2.8). Ulega ona zaburzeniu podczas naklejania folii z wydrukowanym wzorem kalibracyjnym na płytę. Technologia wykonywania wzorców z płyty szklanej jest tańsza, ale jednocześnie nie nadaje się do symulowania wpływu

temperatury na wzorzec, ponieważ folia oraz szkło mają inne współczynniki rozszerzalności termicznej i nie można dokładnie przewidzieć ich wzajemnego zachowania podczas zmian temperatury. W ogólności wzorce wykonane w tej technologii nie powinny być narażone na duże zmiany temperatury.



Rysunek 2.8: Wzorzec z macierzą kołowych markerów: a) wzorzec do kalibracji skanera 3D z oświetleniem strukturalnym podczas walidacji metrologicznej na maszynie współrzędnościowej ACCURA 7 Carl Zeiss z głowicą optyczną ViScan [99], b) widok powiększonej krawędzi markera z głowicy ViScan, c) przykład wzorca wykonanego w technologii naklejania wydruku na szklaną płytę. Wymiary wzorca $2\text{m} \times 1,5\text{m}$. Wzorzec używany był do kalibracji skanerów 3D wykorzystywanych w pomiarach ciała ludzkiego [10–12].

Proces rekalkibracji skanera 3D, wykonany w miejscu przeprowadzania pomiarów, jest dobrym wyjściem z punktu widzenia kompensacji wpływu temperatury. Jednocześnie zawiąza grupę użytkowników skanera do wąskiego grona specjalistów. Pociąga za sobą także konieczność posiadania mobilnego wzorca z wyznaczoną temperaturą odchyłką kompensacyjną. Każdorazowa kalibracja skanera 3D pociąga za sobą każdorazową konieczność wykonywania walidacji metrologicznej (przy użyciu wzorca typu *ball-bar* oraz wzorca płaskości [34]), a to bardzo wydłuża proces pomiarów i dodatkowo je komplikuje.

2.1.6 Podsumowanie sprzętowych metod kompensacji

W rozdziale przedstawiłem różne sposoby realizacji sprzętowej kompensacji wpływu temperatury na przyrządy optyczne. Poniżej ocenię wspomniane metody pod kątem ich przydatności do ewentualnego zastosowania przy kompensacji wpływu temperatury na skanery 3D ze światłem strukturalnym.

Materiały o niskim współczynniku liniowej rozszerzalności temperaturowej Spośród wszystkich wymienionych materiałów, jedynie laminaty z włókna węglowego są używane przez producentów skanerów. Jednocześnie należy pamiętać, że pozostałe wymienione przeze mnie materiały (Robax, Ceran, Zerodur, Cer-Vit, inwar i pochodne) są często bardzo drogie, trudno obrabialne i trudno dostępne. Znajdują zastosowanie raczej w laboratoriach oraz w przyrządach optycznych produkowanych dla wojska oraz astronomii [68, 69, 71, 74, 81, 82, 84]. Trudno także powiedzieć, czy używanie włókna węglowego jest podyktowane bardziej względami estetycznymi oraz marketingowymi, czy też faktyczną dbałością o właściwości metrologiczne skanera. Niemniej jednak, na rynku skanerów pojawiają się konstrukcje, które zbudowane są z włókna węglowego i innych kompozytów (Rys. 1.4b). Niestety producenci niechętnie dzielą się swoimi sekretami i nie byłem w stanie przeanalizować konstrukcji wewnętrznej takich skanerów. Taka inspekcja pozwoliłaby stwierdzić, czy wewnątrz także zbudowane jest z włókna węglowego, co miałoby wymierny skutek w postaci ograniczania wpływu temperatury na pomiary. Głównym problemem jest raczej fakt, że producenci skanerów w zasadzie w ogóle nie informują użytkownika o skutkach zmiany temperatury zewnętrznej na jakość prowadzonych pomiarów.

Atermalizacja zespołów optycznych Atermalizacja zespołów optycznych także nie do końca znajduje bezpośrednie zastosowanie w budowie skanerów 3D SLS. Należy pamiętać, że w zdecydowanej większości skanery 3D SLS budowane są z gotowych modułów optycznych: kamery, obiektywów i projektora. Nie spotkałem skanera, w którym producent zaprojektowałby oraz wykonał własny tor optyczny dla kamery lub projektora. Podyktowane jest to względami ekonomicznymi. W celu wykonania poprawnej atermalizacji należałoby przeanalizować cały układ kamera-obiektyw oraz projektor-obiektyw, a komponenty te pochodzą od różnych producentów i można je łączyć ze sobą w bardzo różnych konfiguracjach. Z tego względu producenci skanerów 3D nie stosują metod atermalizacji toru optycznego.

Kompensacja różnicowa bazy konstrukcyjnej To rozwiązanie mogłoby być użyte w konstrukcji skanera 3D SLS. Problematiczna okazałaby się forma takiego skanera. Baza kompensowana różnicowo wymaga, żeby długość bazy była zdecydowanie większa niż faktyczna odległość pomiędzy kamerą, a projektorem (Rys. 2.4, 2.5). Nie można także zapominać, że skompensowanie wpływu temperatury na bazę pomiarową skanera nie powoduje, że można mówić o całościowej kompensacji wpływu temperatury. Pozostałe komponenty składowe, projektor i kamera, także wymagają kompensacji. Należy także pamiętać, że ta metoda pozwala redukować jedynie błędy temperaturowe związane z odkształcaniem bazy w jednym kierunku- wzdłuż osi podłużnej bazy mechanicznej. Niemniej jednak to rozwiązanie mogłoby przyczynić się do poprawy właściwości metrologicznych

skanera i choć częściowo zredukować wpływ temperatury na jakość przeprowadzanych pomiarów.

Aktywne chłodzenie skanera To rozwiązanie jest możliwe do adaptacji, ale wymaga doprowadzenia do skanera dużej mocy prądu elektrycznego do zasilenia modułów Peltiera. Zużycie prądu będzie tym większe, im większa będzie różnica pomiędzy temperaturą w której kalibrowany był skaner, a temperaturą w której prowadzone są pomiary. Rozwiązanie to można dodatkowo optymalizować i zmniejszać pobór prądu, projektując obudowę, która zapewni izolację termiczną. Należy się jednak liczyć z tym, że zwiększy to gabaryty oraz masę całego urządzenia.

Rekalibracja skanera Rekalibracja skanera nie jest w zasadzie metodą kompensacji. Jest jednak rozwiązaniem, które, jako jedyne, pozwala przeprowadzić poprawne pomiary dowolnym skanerem 3D w dużym zakresie temperatur. Niezbędnym jest, aby użytkownik potrafił go poprawnie skalibrować, miał do tego wystarczająco dużo miejsca i czasu, a także dysponował odpowiednimi wzorcami. Oczywistymi wadami tego rozwiązania jest konieczność przeprowadzania czasochłonnej i często skomplikowanej kalibracji na miejscu prowadzenia pomiarów.

Wymienione metody kompensacji zestawilem w Tabeli 2.2. Oceńłem każdą z metod pod względem:

1. **Złożoność konstrukcji** - ocenia złożoność i stopień komplikacji projektu konstrukcyjnego w stosunku do tradycyjnego projektu, który nie uwzględnia kompensacji termicznej. Skala oceny: niska\średnia\wysoka.
2. **Niezawodność konstrukcji** - ocena niezawodności konstrukcji skanera, w którym zastosowano tę metodę kompensacji. Uwzględnia takie aspekty jak trudność serwisu, konieczność wykonywania przeglądów, trwałość konstrukcji. Skala oceny: niska\średnia\wysoka.
3. **Dostępność materiałów** - ocena dostępności materiałów i stopień ich specjalizacji. Skala oceny: łatwo dostępne\średnio dostępne\trudno dostępne.
4. **Zapotrzebowanie na energię** - ocena zapotrzebowania na energię elektryczną konieczną do realizacji zastosowanej metody kompensacyjnej. Skala oceny: brak\niskie\średnie\wysokie.
5. **Kompensacja wpływu temperatury** - to kryterium ocenia, na ile zastosowana metoda faktycznie wpływa na skompensowanie wpływu temperatury na skaner 3D ze światłem strukturalnym. Skala oceny: niska\średnia\wysoka.

6. **Koszt** - ocena kosztów uwzględnienia tej metody kompensacji w konstrukcji skanera 3D. Uwzględnia takie czynniki jak koszty materiałowe, koszty dodatkowego sprzętu, koszty wyspecjalizowanych technologii wytwarzania. Skala oceny: niski\średni\wysoki\b.wysoki.

Tabela 2.2: Ocena sprzętowych metod kompensacji temperaturowej możliwych do zastosowania w skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym

l.p.	Metoda kompensacji	Złożoność konstrukcji	Niezawodność konstrukcji	Dostępność materiałów	Zapotrzebowanie na energię	Kompensacja wpływu temperatury	Koszt
1	materiały Ceran, Robax, Cer-Vit, Zerodur	niska	średnia	średnio\trudno dostępne	brak	średnio wysoka	wysoki\b.wysoki
	inwar i podobne	niska	wysoka	trudno dostępne	brak	średnio wysoka	wysoki\b.wysoki
	laminaty kompozytowe	niska	wysoka	łatwo dostępne	brak	średnia	wysoki
2	atermalizacja pasywna optyczna	niska	wysoka	średnio\trudno dostępne	brak	wysoka, kompensacja	niski\średni
	pasywna mechaniczna	średnia	wysoka	zależna od ostatecznej metody	brak	jedynie zespołów optycznych	niski\średni
	aktywna elektromechaniczna	wysoka	średnia	łatwo dostępne	niskie\średnie		wysoki
3	kompensacja różnicowa	niska	wysoka	łatwo dostępne	brak	wysoka, kompensacja jedynie bazy konstrukcyjnej	niski
4	aktywne chłodzenie	średnia/wysoka	średnia	łatwo dostępne	wysokie	wysoka	wysoki
5	rekalibracja	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	wysoka o ile temperatura otoczenia jest stała	n.d.

2.2 Programowe metody kompensacji

W odróżnieniu od metod sprzętowych, które skupiają się na zapobieganiu odkształceniom termicznym lub też na ich mechanicznym kompensowaniu, metody programowe bazują na symulowaniu oraz obliczaniu tych odkształceń. Powstały w symulacji model matematyczny jest następnie wykorzystywany do obliczenia odchyłki kompensacyjnej. W tym rozdziale przedstawiłem programowe metody, które są lub mogą być wykorzystywane do kompensacji wpływu temperatury na skanery 3D i ich elementy składowe. Niektóre z opisanych przeze mnie metod mogą być zaimplementowane w już istniejących modelach skanerów 3D z oświetleniem strukturalnym. Jedyną zmianą sprzętową, która jest konieczna, jest wyposażenie skanera w czujnik temperatury i umożliwienie mikroprocesorowi sterującemu odczytywanie temperatury w celu obliczenia odpowiednich odchyłek.

Symulacje i modele kompensacyjne mogą się odnosić do poszczególnych elementów składowych skanera: bazy konstrukcyjnej, kamery oraz projektora.

2.2.1 Symulacja odkształceń termicznych bazy mechanicznej skanera

Jedną z metod, która pozwala na przeprowadzenie programowej kompensacji jest symulacja odkształcenia termicznego bazy mechanicznej skanera. W zależności od złożoności konstrukcji,

do symulacji można posłużyć się stosunkowo prostymi metodami znanymi z wytrzymałości materiałów. W przypadku bardziej złożonych konstrukcji można posłużyć się programami symulacyjnymi i metodą MES [100]. Należy przy tym pamiętać, że wymienione metody obliczeniowe nie znajdują zastosowania w przypadku detali konstrukcyjnych wykonanych z laminatów kompozytowych. Klasyczne metody wytrzymałości materiałów najczęściej pomijają laminaty włókniste i ograniczają się do materiałów anizotropowych [78]. W przypadku konwencjonalnych materiałów konstrukcyjnych używanych w konstrukcjach mechanicznych (głównie metali), wystarczy znajomość modułu Younga, modułu Poissona, wartości liniowego współczynnika rozszerzalności temperaturowej α oraz charakterystyk wytrzymałościowych (wytrzymałość na rozciąganie, ściskanie oraz ścinanie) by móc symulować zachowanie detalu wykonanego z danego materiału. Istotne jest także, że materiały te są skatalogowane i np. biorąc pod uwagę stal C45 inżynier doskonale wie, jakich właściwości wytrzymałościowych może się spodziewać. W przypadku laminatów kompozytowych już tak niestety nie jest. Laminaty wykazują bardzo dużą anizotropowość, zależną m.in. od ułożenia włókien w poszczególnych warstwach, a nawet od ułożenia względem siebie poszczególnych warstw laminatu. Znamienne są tu słowa dr hab. inż. Janusza Germana, profesora Politechniki Krakowskiej ze wstępu do "Podstaw mechaniki kompozytów włóknistych" [78]:

"W ich przypadku «kompozytów» analiza konstrukcji jest nierozłączna od analizy materiału, gdyż charakterystyki materiałowe, a w konsekwencji także stan naprężenia, odkształcenia i przemieszczenia są ściśle związane z budową kompozytu. Można powiedzieć, że każda konstrukcja wymaga indywidualnego zaprojektowania odpowiedniego dla niej kompozytu. Co więcej, "wrodzona" anizotropia kompozytów powoduje, że ilość tak stałych sprężystych, jak i charakterystyk wytrzymałościowych jest znacznie większa niż w materiałach izotropowych."

Laminaty kompozytowe używane w konstrukcjach skanerów 3D ze światłem strukturalnym (patrz rozdział 2.1.1) charakteryzują się zatem (na podstawie [78]):

- bardzo wyraźną zależnością właściwości mechanicznych od procesu technologicznego,
- niestałością charakterystyk mechanicznych i dużym rozrzutem w tych charakterystykach dla tych samych kompozytów,
- anizotropowością charakterystyk mechanicznych (zarówno wytrzymałościowych jak i sztywnościowych) i stałych materiałowych.

Te cechy kompozytów powodują, że symulacja wpływu temperatury na detale wykonane z laminatów kompozytowych jest bardzo skomplikowana. Wymaga bardzo dobrej definicji samego materiału. Istnieje cały dział mechaniki, który zajmuje się mechaniką kompozytów [78]. Należy jednak mieć świadomość, że obliczenia i symulacje wykonane dla konkretnego

kształtu detalu mogą mieć bardzo duży rozrzut wyników. Spowodowane jest to faktem, że proces technologiczny dla każdego z detali może być odrobinę inny. W konsekwencji właściwości mechaniczne poszczególnych elementów mogą się różnić. Dlatego aby otrzymać detale kompozytowe o powtarzalnych właściwościach mechanicznych, należy mieć dobrze opanowaną technologię i skrupulatnie przestrzegać wytycznych techniki laminowania.

W przypadku używania konwencjonalnych materiałów konstrukcyjnych, typu stале i stopy aluminium, symulacja odkształceń wywołanych zmianą temperatury jest bardziej przewidywalna, a wyniki są znacznie bardziej zbieżne. Wykorzystując moce obliczeniowe dostępnych dzisiaj komputerów oraz metodę MES, można symulować zachowanie konkretnych detali poddanych działaniu różnych wymuszeń, także termicznych. Należy mieć jednak świadomość, że metoda kompensacji wpływu temperatury na bazę mechaniczną skanera 3D nie uwzględnia wszystkich aspektów wpływu temperatury na skaner. Jednakże w niektórych przypadkach może prowadzić do rozszerzenia zakresu temperatur, w których skaner pracuje poprawnie. Szczególnie w przypadku skanerów o stosunkowo dużych wymiarach, w których efekt wpływu zmian temperatury na bazę mechaniczną jest większy niż wpływ zmian temperatury na inne komponenty składowe skanera, metoda ta może przynieść oczekiwane wymierne rezultaty.

Pomimo, że taka metoda kompensacji wydaje się stosunkowo prosta, okazuje się, że symulacja odkształcenia samej bazy skanera nie pozwala jeszcze na bezpośrednie opracowanie matematycznego modelu kompensacyjnego. W tym podejściu do symulacji, kamerę oraz projektor skanera 3D traktuje się jako ciała sztywne, na które temperatura nie ma wpływu. Zmiana temperatury powoduje jedynie zmianę wzajemnej konfiguracji przestrzennej projektora i detektora. Symulacja ma za zadanie wyznaczenie wzajemnych położzeń kamery oraz projektora w różnych temperaturach. Problematyczne staje się jednak przełożenie tych danych na informację o tym, jak konkretna zmiana tej konfiguracji wpływa na pomiar skanerem 3D i deformację objętości pomiarowej. Nie znalazłem żadnych opracowań naukowych, które wykorzystywałyby symulację odkształceń termicznych bazy w celu zbudowania matematycznego modelu kompensacyjnego. W rozdziale 3 opisałem wyniki własnych badań i eksperymentów, w których zastosowałem powyżej opisaną metodę kompensacji.

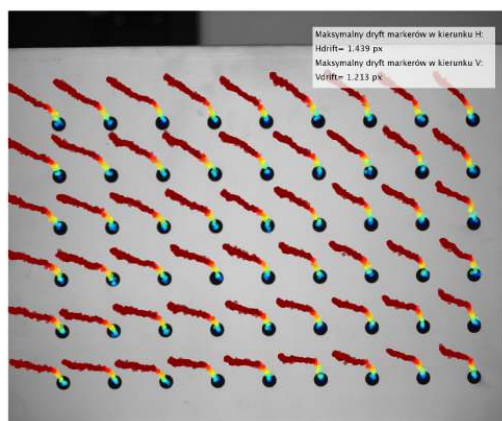
2.2.2 Kompensacja wpływu temperatury na kalibrację kamery

Jednym z najważniejszych komponentów każdego skanera 3D z oświetleniem strukturalnym jest detektor. Odpowiada on za akwizycję obrazów pomiarowych, które następnie przeliczane są przez odpowiednie oprogramowanie. Pozwala ono wyznaczyć współrzędne punktów chmury reprezentującej kształt powierzchni mierzonego detalu [2–5]. W skanerach 3D najczęściej stosuje się kamery cyfrowe, rzadziej cyfrowe aparaty fotograficzne [5, 6]. Aparaty fotograficzne, pomimo bardzo dobrych parametrów zbieranych obrazów, bardzo wysokiej

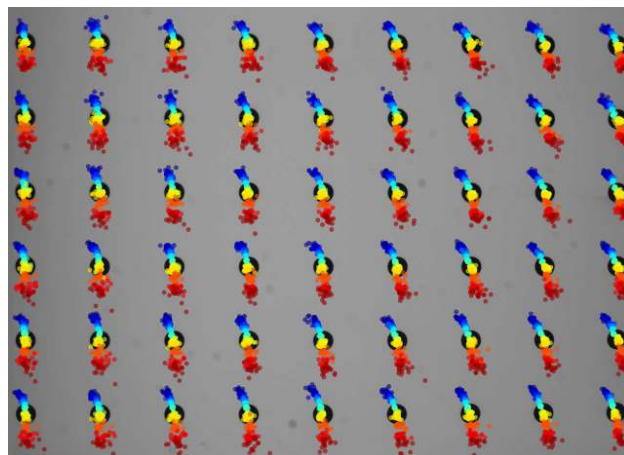
rozdzielczości² sensorów, a także szeroko dostępnych obiektywów wysokiej jakości, nie są już raczej używane. Głównymi ich wadami są: wolna akwizycja, brak powtarzalności przy wykonywaniu zdjęć ze względu na mechaniczną migawkę, niska sztywność układu aparat-obiektyw, spore gabaryty oraz masa, ograniczona liczba protokółów komunikacji oraz trudność integracji z oprogramowaniem sterującym pracą skanera. Producenci aparatów fotograficznych najczęściej decydują się na zamkniętą architekturę oprogramowania, do której użytkownik nie ma dostępu z poziomu własnej aplikacji. Dostęp ten jest niezbędny w przypadku zastosowania aparatów w budowie skanerów 3D. Te wady spowodowały, że aparaty fotograficzne zostały w zasadzie wyparte przez kamery cyfrowe. Wymienione niekorzystne cechy nie występują w przypadku kamer cyfrowych. Użytkownik może wybierać spośród wielu standardów transmisji danych (np. GigE, USB 2.0, USB 3.0, FireWire). Standardy te pozwalają na bardzo szybką transmisję, a w połączeniu z szybkimi sensorami, także na szybką akwizycję danych pomiarowych, dochodzącą do kilkudziesięciu ramek na sekundę (ang. *Frame Per Second - FPS*). Zastosowanie kamer cyfrowych w budowie skanerów 3D z oświetleniem strukturalnym jest także możliwe z powodu zastosowania w nich sensorów o coraz wyższej rozdzielczości, dochodzącej do ponad 10 Mpix [101]. Ze względu na mnogość aplikacji, w których wykorzystane są kamery, producenci udostępniają tzw. SDK (ang. *Software Development Kit*), czyli pakiet dokumentacji programistycznej pozwalający na pełną integrację z oprogramowaniem skanera 3D.

Z punktu widzenia budowy skanera 3D z oświetleniem strukturalnym, zastosowanie kamer cyfrowych przynosi także wiele korzyści. Kamery takie mają niewielkie wymiary oraz relatywnie niewielką masę. Pozwala to na znaczące ograniczenie wymiarów oraz zredukowanie masy skanera 3D. Na rynku dostępna jest duża różnorodność kompatybilnych obiektywów, co pozwala na budowę skanerów o różnych wymiarach objętości pomiarowej. Kamery cyfrowe, w porównaniu z aparatami fotograficznymi są także bardziej energooszczędne.

²W żargonie inżynierskim przyjęło się mówić o **rozdzielczości** sensorów polowych używanych w kamerach cyfrowych. W rzeczywistości chodzi o **wymiary matrycy** i **liczbę pikseli**, a nie o gęstość upakowania pikseli przypadającą na jednostkę powierzchni. Niemniej jednak takie nazewnictwo jest ogólnie przyjęte i ja także je stosuję.



a)

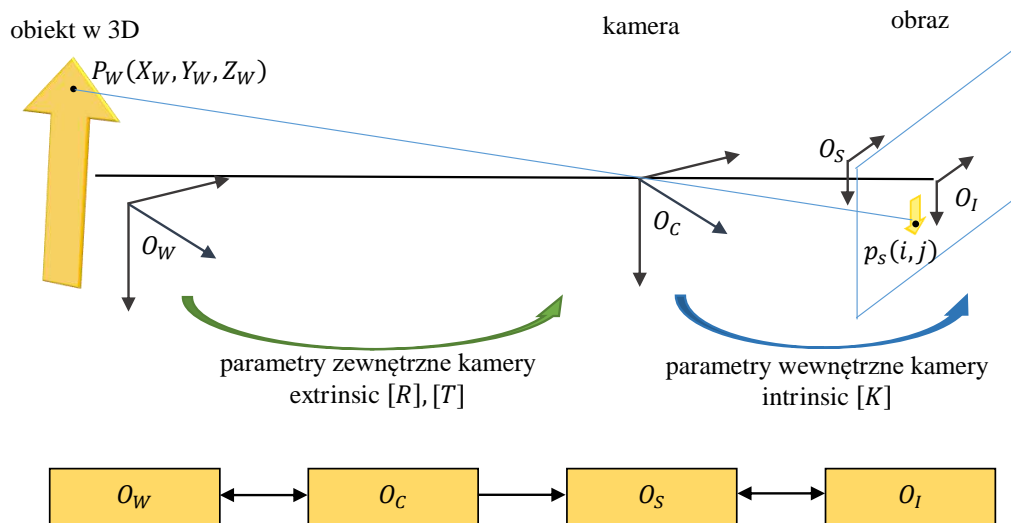


b)

Rysunek 2.9: Różne efekty termiczne obserwowane na obrazach pochodzących z kamery cyfrowej: a) dryft obrazu spowodowany rozgrzewaniem się kamery, b) dryft obrazu spowodowany zmianą temperatury zewnętrznej. Punkty reprezentują wyznaczoną zmianę pozycji kołowego markera dla poszczególnych ramek zarejestrowanych przez kamerę, przeskalowaną 100 razy. Zmienną temperaturę obrazują kolory punktów, od niebieskiego (niska temperatura) do czerwonego (wysoka temperatura). Temperatura mierzona była przez fabryczny sensor umieszczony w bezpośrednim sąsiedztwie matrycy. Pomiary dla kamery FLIR (dawniej PointGrey) Grasshopper 2.0 [101].

Na etapie kalibracji skanera 3D, kalibrowana jest także kamera³ (ang. *camera calibration*). Bez względu na to, jaka metoda kalibracji kamery została przyjęta, na tym etapie obliczana jest pozycja kamery względem objętości pomiarowej skanera, redukowane są zniekształcenia wynikające z dystorsji optycznych układu obrazującego oraz definiowany jest układ współrzędnych całego skanera. Ponieważ wszystkie publikacje, które prezentują metody kompensacji wpływu temperatury na kalibrację kamery korzystają z otworkowego modelu kamery (ang. *pinhole camera*), w dalszych rozważaniach także przyjmę ten model [102–105].

³W pracy będę używał wymiennie słów *kamera* oraz *detektor*, mając na myśli kamerę cyfrową używaną jako detektor polowy w skanerze 3D SLS. Kamery cyfrowe są na tyle powszechnie stosowane w budowie skanerów 3D z oświetleniem strukturalnym, że taki skrót myślowy jest całkowicie zasadny.



Rysunek 2.10: Schemat geometryczny modelu kamery otworkowej oraz transformacje pomiędzy układami współrzędnych. Źródło: opracowanie własne na podstawie [102–104].

Zgodnie z modelem kamery otworkowej (Równanie 2.6 oraz 2.7) (Rys. 2.10) punkt $P_W(X_W, Y_W, Z_W)$, znajdujący się w globalnym układzie współrzędnych O_W (ang. *world coordinate system*) transformowany jest do układu związanego z kamerą O_C (ang. *camera coordinate system*). Tę transformację opisuje się tak zwanymi zewnętrznymi parametrami kamery (ang. *extrinsic camera parameters*). Są to: orientacja w przestrzeni oraz pozycja w przestrzeni. Pozycja opisana jest przez translację t , a orientacja przez rotację R . Następną transformacją jest przejście z trójwymiarowego układu kamery (O_C) do dwuwymiarowego układu związanego z płaszczyzną obrazowania (O_I) (ang. *image plane*). Jest to transformacja perspektywiczna. Dalej następuje transformacja $2D \rightarrow 2D$ z układu związanego z płaszczyzną obrazowania w układ związany z sensorem kamery O_S . Tutaj następuje przejście do współrzędnych obrazu (piksele). Przejście z układu O_C do układu O_S opisane jest przez tak zwane wewnętrzne parametry kamery (ang. *intrinsic camera parameters*). Parametry wewnętrzne kamery są najczęściej zapisywane w postaci macierzy wewnętrznych parametrów kamery K (ang. *intrinsic parameters matrix*). W wyniku zastosowania wszystkich transformacji otrzymuje się związek matematyczny pomiędzy współrzędnymi punktów w globalnym układzie współrzędnych O_W oraz współrzędnymi pikseli w układzie związanym z sensorem kamery O_S . Równanie modelu kamery otworkowej może przybrać postać (na podstawie [102–105]):

$$s \begin{bmatrix} p_S \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R | t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_W \end{bmatrix}^T \quad (2.6)$$

gdzie:

p_S - współrzędne i, j w dziedzinie obrazu w układzie sensora O_S ,

$[K]$ - macierz parametrów wewnętrznych kamery - *intrinsic parameters matrix*,

$[R|t]$ - macierz parametrów zewnętrznych kamery - *extrinsic parameters matrix*,

P_W - współrzędne X, Y, Z w globalnym układzie współrzędnych O_W .

Równanie 2.6 po rozwinięciu przyjmuje postać:

$$s \begin{bmatrix} i \\ j \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Równanie 2.7 można przekształcić w zestaw równań:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \end{bmatrix} + [t] \quad (2.8a)$$

$$x' = \frac{x}{z} \quad \text{oraz} \quad y' = \frac{y}{z} \quad (2.8b)$$

$$i = f_x x' + c_x \quad \text{oraz} \quad j = f_y y' + c_y \quad (2.8c)$$

$$\text{gdzie: } f_x = kf \quad f_y = lf \quad (2.8d)$$

Powyższy model opisany jest przez 10 niezależnych parametrów:

- 3 kąty definiujące orientację kamery $[R]$ w globalnym układzie współrzędnych O_W ,
- 3 współrzędne wektora translacji $[t]$ w globalnym układzie współrzędnych O_W ,
- 4 parametry wewnętrzne kamery: f_x i f_y wyrażające długość rzeczywistej ogniskowej f (wyrażonej w mm) przemnożoną przez współczynniki skali k oraz l zależne od rzeczywistych wymiarów piksela i wyrażone w $[\frac{\text{piksele}}{mm}]$, oraz c_x i c_y opisujące położenie optycznego środka matrycy (w pikselach) ang. *principal point*.

Zaprezentowany model można rozszerzyć o korekcję dystorsji optyki obrazującej. W przypadku uwzględnienia korekcji dystorsji radialnej (ang. *radial distortion*) oraz tangencjalnej (ang. *tangential distortion*), zestaw równań 2.8 należy poszerzyć o model korekcji dystorsji. Można to zrobić, wstawiając pomiędzy równania (2.8b) oraz (2.8c) dodatkowe dwie zależności. Dla modelu dystorsji radialnej opisaną przez 6 współczynników oraz tangencjalnej przez 2 współczynniki, model przyjmie postać (na podstawie [102–104]):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + [t] \quad (2.9a)$$

$$x' = \frac{x}{z} \quad \text{oraz} \quad y' = \frac{y}{z} \quad (2.9b)$$

$$x'' = x' \frac{1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6}{1 + k_4 r^2 + k_5 r^4 + k_6 r^6} + 2p_1 x' y' + p_2 (r^2 + 2x'^2) \quad (2.9c)$$

$$y'' = y' \frac{1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6}{1 + k_4 r^2 + k_5 r^4 + k_6 r^6} + 2p_2 r' y' + p_1 (r^2 + 2y'^2) \quad (2.9d)$$

$$r^2 = x'^2 + y'^2 \quad (2.9e)$$

$$i = f_x x'' + c_x \quad \text{oraz} \quad j = f_y y'' + c_y \quad (2.9f)$$

$$\text{gdzie: } f_x = kf \quad f_y = lf \quad (2.9g)$$

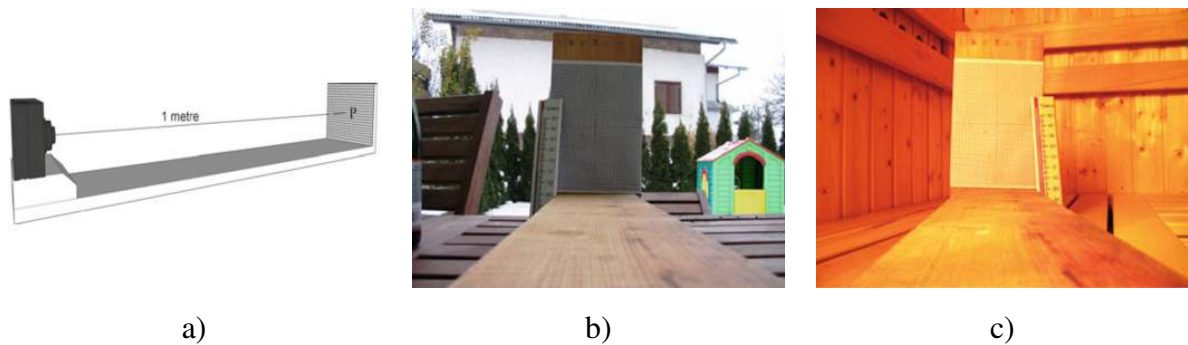
W zdecydowanej większości przypadków przyjmuje się, że po skalibrowaniu kamery, jej parametry obrazowania (parametry wewnętrzne, zewnętrzne oraz parametry korekcji dystorsji) pozostają niezmiennie [21–26, 43, 102–104]. W rzeczywistości jednak, na skutek narażenia kamery na działanie zmiennych warunków środowiskowych, mogą one ulec zmianie. Jednym z parametrów, które wpływają na parametry kalibracji kamery jest temperatura [21–26, 43]. Wpływ temperatury na proces obrazowania w kamerze przejawia się na dwa sposoby: obserwuje się dryft obrazu związany z rozgrzewaniem się kamery tuż po włączeniu (ang. *warming-up process*) (Rys. 2.9 a) oraz dryft temperaturowy obrazu związany ze zmianą temperatury otoczenia kamery (Rys. 2.9 b). Zjawisko wpływu temperatury na kalibrację kamery jest opisane w literaturze. Opiszę teraz znalezione przeze mnie publikacje, które odnoszą się do tego zagadnienia.

Holder Handel w cyklu 3 publikacji [21], [22] oraz [23] opisał sposób kompensacji wpływu temperatury na kalibrację kamery. Zaprezentowane rozwiązania dotyczą kompensacji dryftu związanego z rozgrzewaniem się kamery, jak i zmianą temperatury zewnętrznej. Przedstawiona metoda kompensacji zakłada użycie modelu kamery otworkowej, opisanego równaniem 2.7 (nie uwzględnia korekty dystorsji). Kompensacja odbywa się poprzez dopasowanie liniowego modelu sparametryzowanego jedynie względem parametrów zewnętrznych kamery. Autor zakłada, że parametry wewnętrzne kamery nie ulegają zmianie pod wpływem temperatury. Spośród 10 parametrów opisujących równanie 2.7 Autor używa 6 do stworzenia liniowego modelu kompensacji. W rzeczywistości jest to spore uproszczenie, które nie uwzględnia wszystkich aspektów wpływu temperatury na kalibrację kamery. Na skutek odkształceń termicznych obudowy kamery, sensora, gniazda obiektywu oraz samego obiektywu, współczynniki wewnętrzne kamery także ulegają zmianie. Zastrzeżenia budzi także

zakres eksperymentów, które zostały przeprowadzone w celu walidacji zaproponowanego modelu. W publikacjach Autor nie skupia się na opisie samego eksperymentu, a jedynie przytacza jego wyniki oraz wnioski, które sugerują, że zaproponowany model w bardzo dużym stopniu kompensuje wpływ temperatury na kamerę, zarówno podczas rozgrzewania kamery, jak i podczas zmiany temperatury zewnętrznej. W konsekwencji czytelnik nie jest w stanie sam ocenić, na ile rzetelnie i poprawnie zaplanowane oraz przeprowadzone zostały eksperymenty. Moje doświadczenia w tej dziedzinie sugerują, że eksperymenty mające na celu pokazanie wpływu temperatury na kamerę są bardzo złożone. Odształcenia termiczne w kamerze, z uwagi na niewielkie gabaryty kamer, są bardzo małe. Jednocześnie obserwowane dryfty temperaturowe mogą sięgać kilku pikseli, co może odzwierciedlać przesunięcia obiektu, który rejestruje kamera, nawet o kilka milimetrów (w zależności od użytego obiektywu). Taka dysproporcja powoduje, że eksperymenty te można bardzo łatwo zakłócić. Nawet przymocowanie zewnętrznego czujnika temperatury do kamery może w bardzo istotny sposób zaburzyć proces akwizycji ramek przez kamerę. Także niewielka zmiana orientacji kamery względem siły grawitacji ma bardzo duży wpływ na wyniki. Zebrane przeze mnie doświadczenia pokazują, że efekty ogrzewania i ochładzania kamery są kierunkowe, tj. obserwowana jest histereza. Dodatkowym problemem jest brak powtarzalności pomiarów. Wszystkie te zagadnienia opisałem w rozdziale 4. Jednoznaczne wyniki, opisane w przytoczonych 3 publikacjach, pokazujące poprawność modelu oraz kompensacji, nie są poparte opisem przeprowadzonych eksperymentów. Dodatkowo ograniczenie się jedynie do kompensacji wpływu temperatury na parametry zewnętrzne powoduje, że zaprezentowane przez Autora rozwiązanie jest niepełne. Dodatkową wadą rozwiązania jest fakt, że zaproponowana metoda kompensacji nie nadaje się do zaaplikowania do innych, niż model kamery otworkowej, modeli matematycznych kamery. Autor używa także modelu bez korekcji dystorsji. Zaprezentowane rozwiązanie można co prawda rozszerzyć także o korekcję dystorsji, ale model kompensacyjny nie będzie oddziaływał na wpływ temperatury na dystorsję. Jednocześnie chcę podkreślić, że przytoczone 3 publikacje są jednymi z pierwszych, które opisują problem wpływu temperatury na detektory polowe oraz prezentują metodą kompensacji tego wpływu.

Peter Podbreznik oraz Božidar Potočnik w publikacji [25] zaprezentowali własną metodę kompensacji wpływu temperatury na kalibrację kamery. Podobnie, jak w przypadku prac Handela [21–23], użyli otworkowego modelu kamery oraz metody kalibracji wg. Zhanga [105]. Wyszli z założenia, że temperatura nie wpływa na parametry wewnętrzne kamery. Ich podejście opiera się na przypuszczeniu, że temperatura wewnątrz całej kamery oraz obiektywu jest taka sama. Wychodząc z tej hipotezy oraz przyjmując liniowy model rozszerzalności temperaturowej wszystkich parametrów opisujących parametry wewnętrzne

kamery, twierdzą, że zarówno parametry f_x jak i f_y oraz c_x i c_y pozostają niezmiennie i temperatura nie ma na nie wpływu. Autorzy upraszczają także wpływ temperatury na parametry zewnętrzne i ograniczają się jedynie do translacji, twierdząc, że orientacja kamery nie może zostać zmieniona na skutek odkształceń temperaturowych. Takie podejście jest konsekwencją założenia, w którym temperatura odkształca jedynie konstrukcję, na której zamocowana jest kamera. Symulując tę konstrukcję jako belkę, słup lub kątownik i zakładając liniowy model rozszerzalności temperaturowej ciał (Równanie 2.4), Autorzy utrzymują, że kamera nie może zmieniać swojej orientacji w przestrzeni, a zmienia się jedynie jej położenie. Ostatecznie, model kompensacji zaproponowany w publikacji jest zbudowany w oparciu o prawo liniowej rozszerzalności termicznej ciał. Uwzględnia kompensację jedynie 3 parametrów zewnętrznych kamery - translacji kamery w globalnym układzie współrzędnych O_W . Eksperymenty opisane w publikacji są bardziej rozbudowane, ale wątpliwości budzi przyjęta metoda weryfikacji niektórych założeń oraz przyjętego modelu.



Rysunek 2.11: Stanowisko pomiarowe użyte do weryfikacji założeń oraz modelu kompensacyjnego opisanego w publikacji [25]: a) rysunek schematyczny stanowiska użytego do weryfikacji założeń oraz modelu kompensacyjnego, b) widok wzorca - ramka zebrana przez kamerę, stanowisko wyniesione na zewnątrz budynku - temperatura 0°C , c) widok wzorca - ramka zebrana przez kamerę, stanowisko umieszczone w saunie - temperatura $+50^{\circ}\text{C}$). Źródło: [25].

Autorzy, najwyraźniej nie mając dostępu do komory termicznej, korzystają z różnicy temperatur panujących w saunie ($+50^{\circ}\text{C}$) i na zewnątrz budynku (0°C) w celu wykazania braku wpływu temperatury na parametry wewnętrzne kamery. Kamerę wraz z wzorcem do detekcji dryftu umieszczają na sztywnym stelażu zbudowanym z drewna i całe stanowisko umieszczają w ogrodzie lub w saunie. W ten sposób zmieniają temperaturę zewnętrzną (Rys. 2.11). Taka metoda nie jest do końca wiarygodna z co najmniej dwóch powodów:

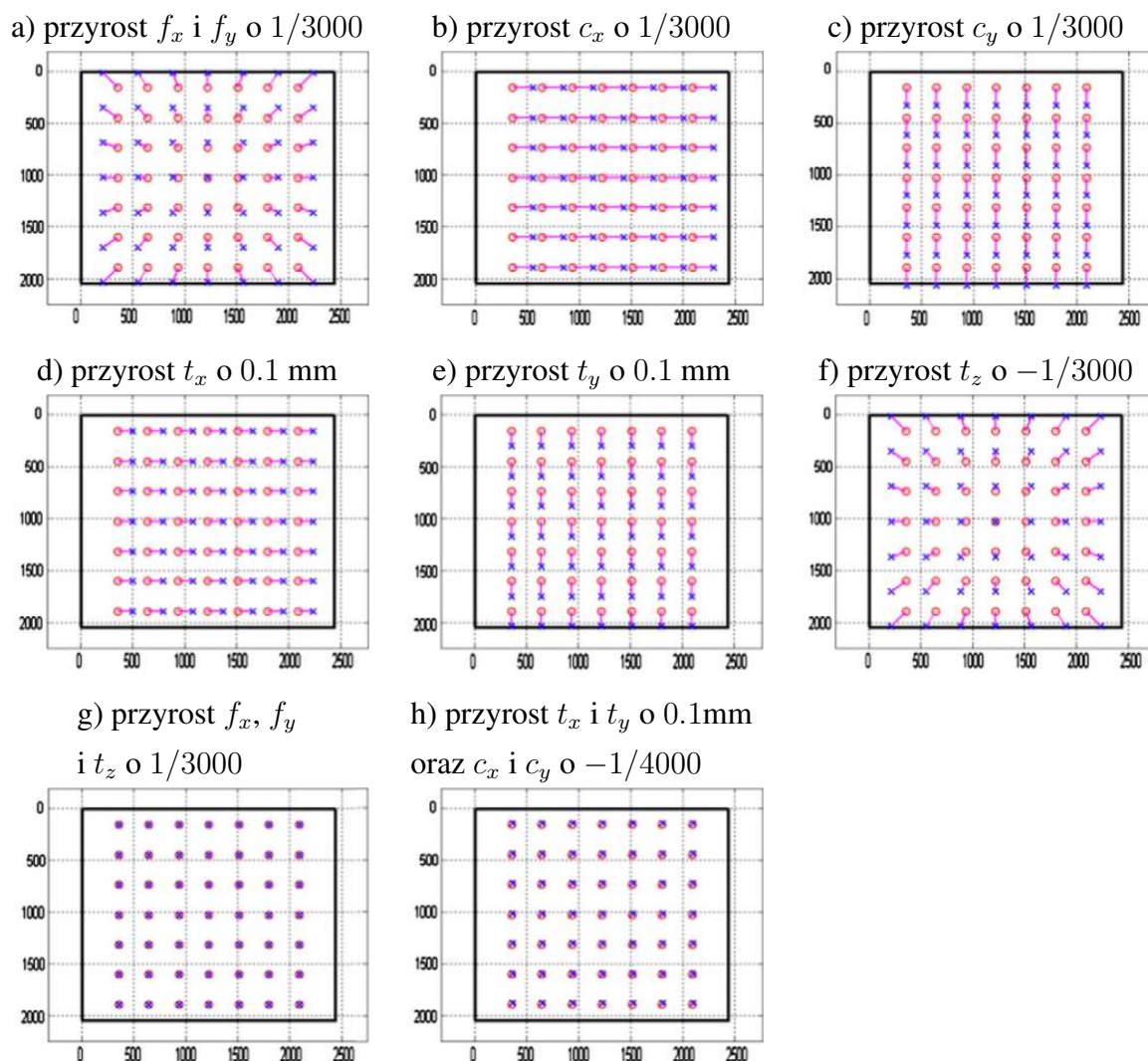
- zmienna temperatura odkształca drewniany stelaż, co powoduje zafałszowanie wyników eksperymentu. Drewno jest materiałem anizotropowym i narażone na zmiany temperatury może się zachowywać bardzo różnie. Jednocześnie drastyczna zmiana

wilgotności (na zewnątrz budynku, wewnątrz sauny) także niekorzystanie wpływa na stałość wymiarową drewnianego stelaża,

- Autorzy nie opisują budowy samego wzorca i nie podają, z czego jest zbudowany. W konsekwencji nie można przyjąć, że zmiana temperatury nie odkształca także samego wzorca.

Zaprezentowana metoda kompensacji ma zostać zastosowana do kompensacji wpływu temperatury na kamery, które są wykorzystywane do obserwacji dużych obiektów konstrukcyjnych. Autorzy prezentują wyniki eksperymentów, które pokazują, że w przypadku dużych odległości obserwacji (ponad 10 metrów) ich założenia mogą prowadzić do poprawnych wyników. Jednocześnie nie podają żadnych szczegółów dotyczących samej kamery, mówiąc jedynie o *"This was carried out by just simply using widely accessible, low-cost cameras, and ordinary measuring equipment"*. Mogę jedynie podejrzewać, że użyta kamera ma bardzo małą rozdzielczość, a to może skutkować wysnuciem wniosków o braku wpływu temperatury na parametry wewnętrzne oraz o poprawności modelu kompensacyjnego. W przypadku skanerów 3D z oświetleniem strukturalnym, odległość obserwacji jest o wiele mniejsza, a rozdzielczości używanych kamer są najczęściej z zakresu od około 2Mpix do około 10MPix. Odległość pracy skanera, w zależności od gabarytów objętości pomiarowej, waha się w granicach od kilkudziesięciu milimetrów dla skanerów wykorzystywanych w np. muzealnictwie, do około 1,5 metra dla skanerów używanych np. w medycynie. Dlatego też, zaprezentowana w publikacji metoda kompensacji, nie może znaleźć zastosowania w przypadku skanerów 3D z oświetleniem strukturalnym.

Yu Qifeng i inni są Autorami jednej z najbardziej kompletnych i najlepiej udokumentowanych metod kompensacji wpływu temperatury na kalibrację kamery [24]. Autorzy, podobnie jak w przypadku wcześniej opisanych metod kompensacyjnych korzystają z modelu kamery otworkowej, a także kalibracji kamery wg. Zhanga [105]. W publikacji bardzo rozbudowana jest część opisująca model matematyczny kamery oraz możliwe aspekty wpływu temperatury na poszczególne parametry kamery. W tej części Autorzy starają się znaleźć te parametry opisujące kalibrację kamery, których zmiana najbardziej wpływa na wartości oraz charakter dryftu temperaturowego. Korzystając z syntetycznie wygenerowanych danych oraz równania kamery otworkowej (Równanie 2.6 i 2.7), symulują wpływ bardzo niewielkich zmian poszczególnych parametrów równań (parametrów wewnętrznych oraz zewnętrznych kamery) na wielkość oraz trend dryftu (Rys. 2.12).



Rysunek 2.12: Symulacja pokazująca efekty niewielkich zmian parametrów wewnętrznych i zewnętrznych kamery na dryft cech obserwowany w obrazie. Na rysunkach a) - h) przedstawiono efekty symulacji niewielkich zmian parametrów wewnętrznych i zewnętrznych na dryft cech obserwowany na obrazie. Źródło [24].

Korzystając z wyników tak przeprowadzonej symulacji autorzy wysnuli następujące wnioski:

- jednoczesne zmiany f_x i f_y w tym samym kierunku prowadzą do efektu zoom'u obserwowanego na obrazie,
- zmiany położenia optycznego środka matrycy (ang. *principle point*) c_x i c_y prowadzą do przesunięć poziomych i pionowych w obrazie,
- dryft spowodowany przez zmianę pozycji globalnej kamery t_x i t_y jest podobny do wywołanego przez zmiany c_x i c_y ,

- dryft spowodowany zmianą parametru t_z jest podobny do wywołanego jednoczesną zmianą f_x oraz f_y ,
- jednoczesne zmiany parametrów f_x i f_y oraz t_z w odpowiednich kierunkach mogą się nawzajem znosić i nie wywołać zmian na obrazie, podobnie z parametrami t_x , t_y oraz c_x i c_z .

Wnioski wysnute z powyższych dywagacji prowadzą do konkluzji, że z 10 parametrów, które opisują model kamery otworkowej (Równanie 2.7), jedynie 7 wymaga uwzględnienia w modelu kompensacyjnym. Efekt dryftu obrazu, wywołany przez zmianę globalnej pozycji kamery t_x , t_y i t_z jest tożsamy z efektem dryftu wywołanego przez odpowiednie zmiany parametrów f_x , f_y , c_x i c_y . Autorzy zakładają liniowy charakter zmian parametrów kamery, a do zbudowania modelu kompensacyjnego używają procesu identyfikacji (ang. *system identification*), który pozwala im poznać zależności między wejściem, a wyjściem na podstawie danych doświadczalnych. Wejściem do systemu jest zbiór wartości 7 parametrów w różnej temperaturze, a wyjściem są wartości współrzędnych punktów kalibracyjnych na matrycy kamery.

Proces identyfikacji prowadzi do tym lepszych wyników, im więcej danych eksperymentalnych posłużyło do opracowania modelu. Autorzy przeprowadzili 10 eksperymentów, w których zbierali dane do budowy modelu. Nie pokazują stanowiska pomiarowego, a jedynie jego schemat, w którym przed kamerą ustawiają aluminiową planszę kalibracyjną, pozwalającą na identyfikację 49 punktów kalibracyjnych. Zmiana temperatury realizowana jest przez zmianę temperatury w całym laboratorium przez klimatyzację. Z wykresów umieszczonych w publikacji można odczytać, że zakres zmian temperatury to około 8°C. Efekty kompensacji, zaprezentowane na wykresach, są bardzo dobre. Autorzy prezentują efekt kompensacji na kalibrację kamery zarówno podczas rozgrzewania się kamery, jak i podczas zmiany temperatury zewnętrznej. W przypadku kompensacji rozgrzewania się kamery, autorzy redukują powstały dryft o 95%, a w przypadku zmiany temperatury zewnętrznej o 65%.

Zaprezentowana metoda kompensacji nie uwzględnia wpływu temperatury na dystorsje układu optycznego. Nie nadaje się także do zastosowania w przypadku innego modelu, niż model kamery otworkowej.

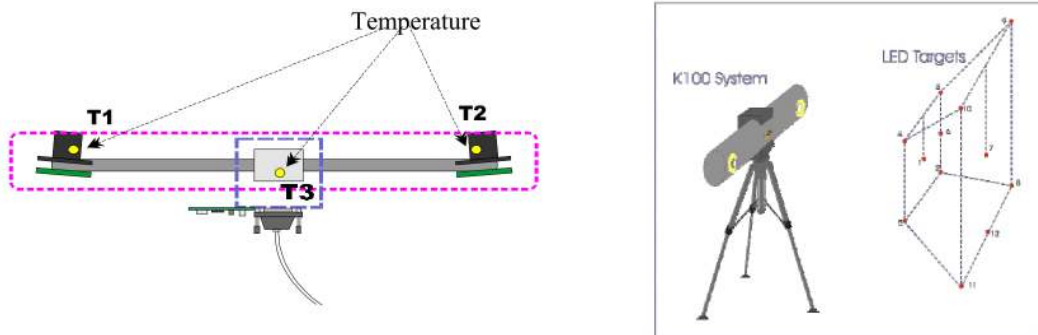
Stuart Robson, Lindsey Macdonald, Stephen A. Kyle i Mark R. Shortis w publikacji [43] zaprezentowali szczegółowy opis eksperymentów badających wpływ temperatury na kamerę. Autorzy nie modelują wpływu temperatury na kamerę, ale starają się go opisać i zbadać jego trend. Publikacja ta nie rozwiązuje problemu kompensacji wpływu temperatury, ale porusza inną bardzo istotną kwestię: wpływ zmian współczynnika załamania powietrza,

wywołany gradientem temperatury, na wyznaczoną pozycję detekowanych przez kamerę obiektów. Autorzy używają w eksperymentach wysokiej klasy kamery IDS uEYE 5480CP [106] oraz wysokiej klasy obiektywu bezdystorsyjnego Kern75mm [107]. Wniosek wysnuty z badań jest następujący: po 90 minutach od momentu włączenia kamery i jednoczesnego rozpoczęcia akwizycji ramek, kamera osiąga swoją równowagę termiczną i nie ulega dalszym odkształceniom termicznym. Autorzy nie przeprowadzają badań wpływu zmiany temperatury zewnętrznej, a ograniczają się jedynie do zjawiska rozgrzewania się kamery. Korzystając z równania Edlén'a [108], odtwarzają bieg promienia trafiającego do kamery i obliczają spowodowany zmianą współczynnika załamania błęd wyznaczenia pozycji.

Z punktu widzenia tematu tej rozprawy istotny jest wniosek, że w większości zastosowań, w których używa się skanerów 3D z oświetleniem strukturalnym, wpływ zmian współczynnika załamania powietrza na pozycję obiektu obserwowanego przez kamerę jest na tyle mały, że nie musi być uwzględniany w pomiarach. Dopiero w przypadku znaczących odległości obserwacji oraz dużych zmian temperatury (w publikacji kamera obserwuje obiekt z około 6 metrów i rejestrowane są zmiany temperatur $< 2^{\circ}\text{C}$) efekt ten należałoby uwzględnić.

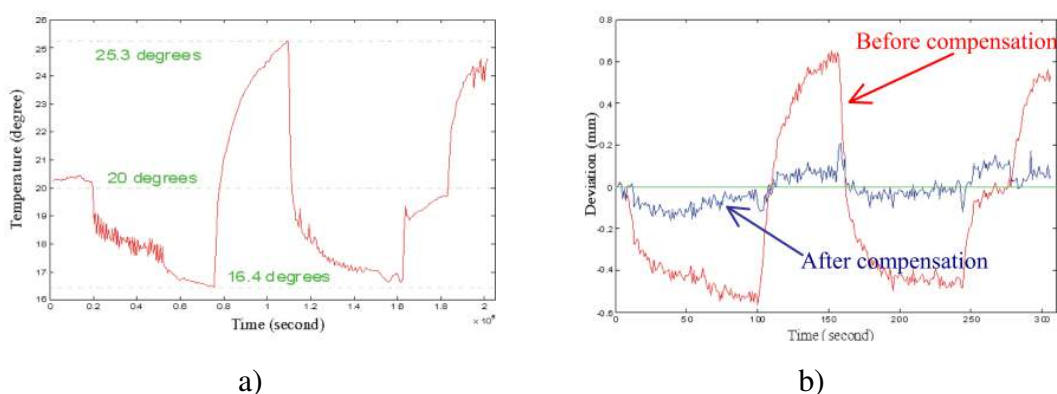
2.2.3 Kompensacja wpływu temperatury na cały skaner

J-P. Kruth, L. Zhou, P. Vanherck w publikacji [26] zaprezentowali zupełnie inne podejście do tematu kompensacji wpływu temperatury na kamerę. Autorzy skupiają się na zredukowaniu błędów pomiarowych, wywołanych zmienną temperaturą, na dwu-kamerowy system do pomiarów fotogrametrycznych. System pomiarowy Krypton K100 System [26] składa się z dwóch kamer cyfrowych zamontowanych na sztywnej bazie i zamkniętych w obudowie. Głowica pomiarowa przymocowana jest do statywu z przegubem kulowym. Pomiar odbywa się poprzez identyfikację położenia aktywnych markerów LED-owych, przyczepionych do mierzonego obiektu. Głowica pomiarowa Krypton K100 System [26] może obsłużyć do 12 aktywnych markerów. System został skalibrowany w temperaturze 20°C i przy pomiarze odległości na poziomie 1m, rozrzut wyników opisany parametrem 1σ wynosi $\pm 30\mu\text{m}$ [109]. W celu wyznaczenia wpływu temperatury na pomiary wykonane głowicą, Autorzy posłużyli się wzorcem wykonanym z inwarycznych rurek, do którego przymocowali aktywne znaczniki LED-owe. Tak przygotowany wzorec został umieszczony wraz z głowicą pomiarową w laboratorium, w którym utrzymywana była stała temperatura $20^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ (Rys. 2.13).



Rysunek 2.13: Rozmieszczenie czujników temperatury wewnątrz głowicy pomiarowej Krypton K100 System [26] oraz schematyczne przedstawienie inwarowego wzorca pomiarowego. Źródło: [26].

Po włączeniu systemu oraz odczekaniu ponad 2 godzin, wykonany został pomiar wzorca. Ten pomiar uznany został za referencyjny. Następnie w laboratorium wymuszono zmianę temperatury (za pomocą klimatyzatora) i podczas zmian temperatury wykonywano pomiary wzorca inwarowego z przyczepionymi markerami. Zakres temperatur wymuszony przez klimatyzator wynosił od $16,5^{\circ}\text{C}$ do $25,5^{\circ}\text{C}$ (2.14 a). Głowicę pomiarową wyposażono w 3 czujniki temperatury, usytuowane w pobliżu dwóch kamer (wewnątrz obudowy głowicy) oraz na zewnątrz obudowy, w okolicach mocowania głowicy pomiarowej na statywie. Obliczone pozycje markerów, razem z danymi odczytanymi z czujników temperatury posłużyły do wyznaczenia liniowego modelu matematycznego. Stworzono 3 odrębne modele, dla każdej współrzędnej X , Y oraz Z . Wyniki działania modelu przedstawiono na wykresie (Rys. 2.14 b)).



Rysunek 2.14: Wykresy temperatury oraz odchyłek: a) zarejestrowana podczas eksperymentu temperatura, b) odchyłki od wymiaru nominalnego przed i po kompensacji. Źródło: [26].

Podejście zaprezentowane przez Autorów ma na celu zbadanie zachowania się całego urządzenia pomiarowego narażonego na zmiany temperatury, a następnie dopasowanie do

niego matematycznego modelu kompensacyjnego. W tym podejściu nie modeluje się systemu pomiarowego, a jedynie bada się końcowy efekt deformacji objętości pomiarowej wywołany zmianą temperatury. Takie podejście może zostać użyte bezpośrednio do całego skanera 3D z oświetleniem strukturalnym, bądź też do jego komponentów składowych (kamery, projektora i bazy). Ma ono tę zaletę, że nie zależy od przyjętego modelu kamery, a także sposobu kalibracji skanera 3D SLS. Wadą tego rozwiązania jest konieczność zastosowania odpowiednich wzorców. W tym przypadku inwarowej konstrukcji z aktywnymi markerami LED. Wzorce takie muszą mieć wyznaczoną charakterystykę temperaturową albo być skonstruowane z materiałów o bardzo niskiej wartości współczynnika rozszerzalności temperaturowej α . Dodatkowo, zaprezentowany w publikacji przebieg eksperymentu zakłada, że temperatura mierzona przez czujniki na głowicy jest mierzona w stanie ustalonym. Tymczasem zarejestrowane wartości zaprezentowane na wykresach sugerują, że pomiary temperatury przebiegają w stanach nieustalonych. W konsekwencji stworzony model kompensacyjny może nie działać poprawnie w przypadku, gdy będziemy mieli do czynienia ze zmianami temperatury o innej dynamice. Dodatkowym problemem w eksperymencie jest fakt, że obliczony model kompensacyjny odnosi się do całego układu: głowica pomiarowa - statyw - podłoga - wzorzec. O ile sam wzorzec, wykonany z inwaru, można traktować jako nieodkształcalny w podanym zakresie temperatur, o tyle cały układ pomiarowy już nie. Oznacza to, że zbudowany model matematyczny będzie działał poprawnie jedynie w tym konkretnym laboratorium, w tej konkretnej orientacji głowicy. W tym kontekście, model kompensacyjny nie jest związany z samą głowicą pomiarową, a z całym układem pomiarowym wraz z laboratorium.

2.2.4 Podsumowanie programowych metod kompensacji

W tym rozdziale przedstawiłem różne możliwości realizacji programowej kompensacji wpływu zmian temperatury na niektóre optyczne przyrządy pomiarowe. Poniżej przedstawię ocenę możliwości ich praktycznego zastosowania w skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym:

Symulacja odkształceń termicznych bazy mechanicznej skanera

Główną cechą, która znacząco utrudnia wdrożenie tej metody w skanerach 3D jest fakt, że nie pozwala ona na bezpośrednie opracowanie matematycznego modelu kompensacyjnego. W tym podejściu symulacja ma za zadanie wyznaczyć wzajemne położenie kamery oraz projektora w różnych temperaturach. Niemożliwe jest jednak bezpośrednie przełożenie tych danych na informację o tym, jak konkretna zmiana tej konfiguracji wpływa na pomiar skanerem 3D i deformację objętości pomiarowej. By to ocenić potrzebne są dodatkowe modele symulacyjne. Niemniej jednak ta metoda może prowadzić do zmniejszenia negatywnych skutków efektów termicznych. W rozdziale 3 opisałem własne doświadczenia związane z tą metodą. Jednym z ograniczeń jej stosowania jest fakt, że traktuje kamerę oraz projektor jako ciała sztywne, które nie odkształcają się wraz ze zmianą temperatury. Niemniej jednak istnieją skanery, w

których odległość bazowa jest stosunkowo duża i wpływ temperatury na bazę mechaniczną jest znacząco bardziej istotny, niż wpływ temperatury na kamerę oraz projektor. W przypadku takich skanerów, ta metoda kompensacji może przynieść wymierne korzyści.

Kompensacja wpływu temperatury na kalibrację kamery.

Porównanie zaprezentowanych metod kalibracji kamery zestawilem w tabeli (Tab. 2.3).

Tabela 2.3: Porównanie różnych metod kompensacji kalibracji kamery

Autorzy	Tytuł	Model kamery	Kompensowane parametry	Cechy modelu kompensacyjnego
Holder Handel	cykl 3 publikacji [21–23]	model kamery otworkowej	tylko parametry zewnętrzne	możliwość uwzględnienia modelu dystorsji, brak korekcji temperaturowej dystorsji, brak możliwości adaptacji do innego modelu kamery
Peter Podbreznik Božidar Potočnik	<i>Assessing the influence of temperature variation on the geometrical properties of a low-cost calibrated camera system by using computer vision procedures</i> [25]	model kamery otworkowej	tylko translacja kamery	możliwość uwzględnienia modelu dystorsji, brak korekcji temperaturowej dystorsji, brak możliwości adaptacji do innego modelu kamery
Yu Qifeng i inni	<i>The effects of temperature variation on videometric measurement and a compensation method</i> [24]	model kamery otworkowej	7 parametrów: parametry wewnętrzne kamery oraz rotacja kamery	możliwość uwzględnienia modelu dystorsji, brak korekcji temperaturowej dystorsji, brak możliwości adaptacji do innego modelu kamery
Stuart Robson i inni	<i>Close Range Calibration of Long Focal Length Lenses in a Changing Environment</i> [43]	model kamery otworkowej	brak modelu kompensacyjnego	brak modelu kompensacyjnego

W skanerach 3D, które wykorzystują otworkowy model do kalibracji kamery, zaprezentowane powyżej metody kompensacji mogłyby zostać wdrożone. Niemniej jednak, żadna z zaprezentowanych metod nie mogłaby zostać użyta w skanerach, w których do przeprowadzenia kalibracji kamery używany jest model kamery rzeczywistej. W rozdziale 3 zaprezentowałem własną metodę, która może zostać zastosowana dla dowolnego modelu kamery.

Kompensacja wpływu temperatury na cały skaner

Zaprezentowana w publikacji [26] metoda kompensacji skupia się na wyznaczeniu deformacji objętości pomiarowej systemu fotogrametrycznego wywołanej zmianą temperatury. Ta metoda może zostać porównana do wzorcowania termicznego. Takie podejście można użyć bezpośrednio do całego skanera 3D z oświetleniem strukturalnym, bądź też do jego komponentów składowych. Wadą tej metody kompensacji jest konieczność stosowania odpowiednich wzorców kształtowych, które zachowują stałe wymiary w szerokim

zakresie temperatur (bądź same są wzorcowane termicznie). Niemniej jednak, z pewnymi modyfikacjami, może zostać bezpośrednio wdrożona w skanerach 3D. W rozdziale 6 opisałem wyniki moich doświadczeń z zastosowaniem tej metody.

2.3 Podsumowanie

Analiza dostępnych metod kompensacji wpływu temperatury na skanery 3D z oświetleniem strukturalnym, a także analiza dostępnych na rynku skanerów 3D sugeruje, że zagadnienie wpływu temperatury na skanery jest z jednej strony bardzo złożone, a z drugiej, najczęściej pomijane w analizie niepewności pomiarowej. W zdecydowanej większości, producenci skanerów ograniczają się do podania zakresu temperatur, w którym skaner może pracować. Nie ma natomiast informacji, jak zmienia się niepewność pomiaru wraz ze zmianą temperatury. Dostępna literatura naukowa i naukowo-badawcza także jest raczej uboga. Nie znalazłem w zasadzie żadnego pełnego opracowania, które bezpośrednio opisywałoby problem kompensacji wpływu temperatury na pomiary wykonywane skanerami 3D z oświetleniem strukturalnym.

Nieco szerzej opisane jest zjawisko wpływu zmian temperatury na detektory polowe, stosowane w skanerach 3D. Przedstawione w rozdziale 2.2.2 wyniki różnych eksperymentów pokazują, że zagadnienie to ma bardzo istotny wpływ na geometrię obrazów rejestrowanych przez detektory. W przedstawionych publikacjach zaprezentowane są też metody kompensacji tego wpływu. Niemniej jednak, przeprowadzone przeze mnie badania pokazują (patrz rozdział 4), że zagadnienie wpływu temperatury na kamery cechuje się bardzo dużą losowością i niezwykle trudno jest znaleźć taki model kamery, którego zachowanie w zmiennej temperaturze byłoby powtarzalne. W związku z tym bardzo trudno byłoby wdrożyć zaprezentowane metody kompensacji na potrzeby innych modeli kamer dostępnych na rynku. Przedstawione modele kompensacji bazują na kompensacji wewnętrznych oraz zewnętrznych parametrów kalibracji kamery i w związku z tym nierozwalnie związane są z zastosowaniem otworkowego modelu kamery. Nie znalazłem żadnych wyników badań, które opisywałyby kompensację wpływu temperatury na kamery, do których kalibracji użyty został model kamery rzeczywistej. Ogranicza to zatem możliwość aplikacji tych metod jedynie do rozwiązań, w których do kalibracji kamery używany jest model kamery otworkowej.

Dostępne rozwiązania sprzętowe, w których do utrzymania stałej temperatury sensora kamery używany jest np. moduł Peltiera [110], mają tę istotną wadę, że z jednej strony w znaczący sposób zwiększają gabaryty i masę kamery, a także zapotrzebowanie na energię elektryczną, a z drugiej strony nie kompensują wpływu temperatury na deformacje rejestrowanych obrazów. W efekcie, w takich kamerach także obserwowany jest temperaturowy dryft obrazu (porównaj rozdział 5.1).

Zjawisko wpływu temperatury na projektory, które mogą być używane w budowie skanerów 3D z oświetleniem strukturalnym, opisywane jest w literaturze w zakresie analizy wpływu temperatury na cykl życia matryc [47–49] używanych do kształtowania obrazu, a także na parametry jakościowe wyświetlanego obrazu (kontrast, intensywność, odwzorowanie barwy, temperatura barwowa) [50, 51]. Nie znalazłem opublikowanych wyników badań, które pokazywałyby w jaki sposób deformuje się obraz wyświetlany przez projektor, wraz ze zmianą temperatury otoczenia.

Przedstawiony przegląd literatury pokazuje, że temat wpływu temperatury na skanery 3D z oświetleniem strukturalnym oraz na ich komponenty składowe jest z jednej strony zagadnieniem bardzo istotnym z punktu widzenia właściwości metrologicznych skanera, a z drugiej, że w zasadzie nie została opracowana kompletna metoda pozwalająca na kompensację tego wpływu. Praktyka wskazuje, że w budżecie niepewności pomiarowej skanera 3D SLS, wpływ temperatury nie jest uwzględniany. W konsekwencji, większość skanerów 3D, dostępnych na rynku powinna pracować jedynie w warunkach stałej temperatury zewnętrznej, w której zostały skalibrowane. Jest to z oczywistych względów bardzo niekorzystne i w znaczący sposób ogranicza zastosowanie skanerów niemalże jedynie do aplikacji laboratoryjnych. Dlatego uważam, że badania nad efektami termicznymi obserwowanymi w kamerach, projektorach oraz skanerach 3D, a także opracowanie metody kompensacji tego wpływu, są bardzo istotne z punktu widzenia rozwoju całej metody pomiarowej.

W dalszej części tej rozprawy zaprezentuję wyniki własnych badań nad efektami termicznymi obserwowanymi w komponentach skanerów 3D oraz w samych skanerach, a także zaprezentuję metody kompensacji tego wpływu.

Rozdział 3

Kompensacja wpływu temperatury na bazę mechaniczną skanera

Wstęp do tej metody kompensacyjnej opisałem w programowych metodach kompensacji wpływu temperatury na skanery 3D z oświetleniem strukturalnym (2.2.1). Cechą charakterystyczną tej techniki jest kompensacja wpływu temperatury jedynie na bazę mechaniczną skanera - w symulacjach pomijany jest wpływ temperatury na kamerę oraz projektor.

Takie podejście może być uzasadnione np. w przypadku skanerów, w których długość bazy mechanicznej L jest stosunkowo duża, a rozdzielczość samego skanera stosunkowo niewielka, np. skanery 3D z oświetleniem strukturalnym wykorzystywane w medycynie do pomiaru sylwetki człowieka [11–13]. Do budowy tych systemów bardzo często wykorzystywane są systemy profili aluminiowych, które zapewniają odpowiednią sztywność przy jednocześnie stosunkowo lekkiej i estetycznej konstrukcji (Rys. 3.1) [11, 12]. Z uwagi na fakt użycia w konstrukcji materiałów bardzo podatnych na zmiany temperatury (aluminium), takie systemy są bardzo narażone na rozkalibrowanie.

Rysunek 3.1: System skanujący 3D do zastosowań medycznych, wykorzystujący 8 skanerów z oświetleniem strukturalnym. Każdy podwójny skaner składa się z profilu aluminiowego, na którym zamontowane są po dwa detektory oraz jeden projektor. System wykorzystywany jest do tworzenia modeli 3D ciała ludzkiego podczas ruchu, np. na potrzeby analizy chodu pacjenta podczas rehabilitacji. Źródło: [12].

Punktem wyjścia w tej metodzie kompensacyjnej jest założenie, że skaner 3D skalibrowany jest w warunkach stałej, referencyjnej temperatury panującej w laboratorium po tym, gdy osiągnął swoją równowagę termiczną. Następnie, na podstawie symulacji wpływu temperatury na bazę mechaniczną skanera, obliczane są odkształcenia bazy, które bezpośrednio przekładają się na zmianę orientacji pomiędzy detektorem i projektorem. Wyznaczone z symulacji wzajemne położenia kamery oraz projektora służą do odpowiedniego skompensowania wpływu temperatury na pomiary wykonane skanerem. Największą zaletą takiego podejścia jest fakt, że nie wymaga ono stosowania żadnych dodatkowych wzorców walidacyjnych. Nie wymaga także dostępu do komory termicznej. Cały proces kompensacji wpływu temperatury na skaner 3D jest symulowany na komputerze. Oczywiście wady to: brak kompensacji wpływu temperatury na detektor oraz na projektor, a także konieczność stworzenia dokładnego modelu symulacyjnego rzeczywistego skanera 3D.

W celu poprawnego symulowania zmian położenia projektora i detektora, należy dysponować modelem konstrukcyjnym samego skanera. Obecnie nie stanowi to większego

problemu, gdyż zdecydowaną większość projektów wykonuje się przy użyciu oprogramowania CAD. Jedyną nieścisłością, jaką można spotkać jest dokładna pozycja i orientacja osi projektora i detektora. W wielu przypadkach w konstrukcji skanerów wykorzystuje się połączenia przegubowe lub głowice fotograficzne (Rys. 3.2) do justowania pozycji kamery względem projektora, w celu zgrania pól widzenia i oświetlenia. W efekcie, pomiędzy rzeczywistym skanerem, a jego modelem projektowym (CAD) istnieje rozbieżność położenia projektora i kamery. W konsekwencji trudno jest jednoznacznie określić, w jakim miejscu względem bazy mechanicznej znajduje się projektor oraz detektor skanera. Te położenia są istotne z punktu widzenia poprawności symulacji oraz budowy późniejszego modelu kompensacyjnego.



a)



b)

Rysunek 3.2: Fotograficzna głowica kulowa: a) typowa głowica kulowa wykorzystywana do justowania wzajemnego położenia kamery oraz projektora w skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym, źródło: www.cyfrowe.pl, b) głowica z zainstalowaną kamerą na krańcu profilu aluminiowego - detektor w skanerze 3D z oświetleniem strukturalnym.

W celu wyznaczenia dokładnej pozycji detektora w globalnym układzie współrzędnych skanera można posłużyć się obliczeniami pochodzącymi bezpośrednio z kalibracji. Należy pamiętać, że na etapie kalibracji skanera 3D kalibrowana jest także kamera. Wyznaczana jest pozycja kamery w globalnym układzie współrzędnych (ściśle rzecz ujmując obliczana jest pozycja tzw. punktu nodalnego, czyli punktu przecięcia się/przewężenia promieni biegnących w kierunku detektora). Zarówno w przypadku skanerów bazujących na modelu otworkowym kamery jak i rzeczywistym modelu kamery, obliczana jest pozycja punktu nodalnego kamery. Zatem pozycję detektora można wyznaczyć, korzystając z danych kalibracyjnych. Inaczej jest w przypadku projektora. W klasycznym podejściu do kalibracji ¹ pozycja projektora nie jest i nie musi być obliczana. W celu jej wyznaczenia można się posłużyć różnymi

¹mam na myśli podejście opisane w [5] i zrealizowane w systemie 3DMADMAC [2, 4, 5, 57], opisałem tę procedurę kalibracyjną w podrozdziale 3.1

metodami, np. projekcją prążków w dwóch kierunkach i zastosowaniem odwrotnego modelu kamery otworkowej [111, 112] albo metodą zaprezentowaną przeze mnie w podrozdziale 3.1. Mając wyznaczoną pozycję detektora oraz projektora, można skorygować położenie detektora i projektora w modelu CAD'owskim i odtworzyć rzeczywisty model skanera 3D. Dysponując takim modelem można wyznaczać wpływ odkształceń termicznych bazy na zmianę orientacji pomiędzy projektorem, a detektorem.

Kolejnym krokiem, jest wyznaczenie wpływu zmian położenia detektora i projektora na zniekształcenia samego pomiaru (chmury punktów). Korzystając z rzeczywistego modelu kamery i procedury kalibracji stosowanej w oprogramowaniu 3DMADMAC [2, 5, 57] nie można bezpośrednio przełożyć zmiany wzajemnego położenia kamery i projektora na odpowiadającą jej deformację pomiaru (chmury punktów). Problem ten rozwiązałem korzystając z wirtualnego modelu skanera 3D z oświetleniem strukturalnym wykonanym w programie 3DsMAX 2018 [113]. Za pomocą dostępnych tam narzędzi oraz znanej orientacji detektora względem projektora odtworzyłem geometrię skanera w wirtualnym środowisku i uzyskałem możliwość przeprowadzania wirtualnych pomiarów. Ogromną zaletą takiego podejścia jest fakt, że mogę wykorzystywać dowolnie skomplikowane wirtualne wzorce do wyznaczenia charakteru odkształceń objętości pomiarowej wywołanej temperaturowymi odkształceniami bazy.

Opisany przeze mnie sposób kompensacji wpływu temperatury na bazę skanera 3D z oświetleniem strukturalnym, przebiega zatem następująco:

1. Rzeczywisty skaner 3D z oświetleniem strukturalnym kalibrowany jest w stałej temperaturze referencyjnej. Kalibracja przebiega w sposób opisany w [5] przy użyciu wzorca z naniesioną macierzą okrągłych znaczników-markerów. Istotne jest, że do przeprowadzenia kompensacji wymagany jest model CAD rzeczywistego skanera.
2. Na podstawie wykonanej kalibracji obliczam pozycję detektora oraz projektora w globalnym układzie współrzędnych związanym z wzorcem kalibracyjnym.
3. Wiedząc, gdzie znajduje się projektor oraz detektor względem wzorca kalibracyjnego, odtwarzam tę geometrię w środowisku 3DsMAX 2018 [113] i buduję wirtualny model skanera 3D, charakteryzujący się pełną funkcjonalnością. Kalibruję skaner wirtualny (odtwarzam procedurę kalibracyjną, renderując zestaw obrazów w postaci obrazów rastrowych i przeliczam te obrazy w tym samym oprogramowaniu 3DMADMAC [56]). W efekcie otrzymuję wierną, wirtualną kopię rzeczywistego skanera 3D w programie 3DsMAX 2018 [113].
4. Znając rzeczywistą pozycję oraz orientację projektora oraz detektora modyfikuję model CAD skanera w ten sposób, by odzwierciedlał ich rzeczywiste położenie. Przechodzę do

symulacji wpływu temperatury na bazę mechaniczną skanera. W tym celu korzystam z oprogramowania firmy Dassault Systemes CATIA V5 [91] i modułu Generative Structure Analysis (symulacja przy użyciu metody elementów skończonych MES).

5. Przeprowadzam szereg symulacji, w których zmieniam temperaturę bazy skanera, zwiększając ją stopniowo - za każdym razem obliczam nowe pozycje oraz orientacje kamery i projektora.
6. W środowisku 3DsMAX 2018 [113] zmieniam pozycje detektora i projektora zgodnie z obliczonymi z symulacji MES, za każdym razem wykonując wirtualny pomiar wirtualnego wzorca: 140 wzorcowych kul, jednorodnie rozłożonych w całej objętości pomiarowej skanera. W efekcie otrzymuję zestaw chmur punktów reprezentujących pomiar wzorca (140 kul) w różnych temperaturach.
7. Obliczam położenia środków kul dla każdego pomiaru, dla różnych temperatur. Otrzymuję zestaw danych: współrzędnych środków kul (równomiernie rozłożonych w objętości pomiarowej skanera) w każdej z temperatur. Ten zestaw danych służy do stworzenia modelu kompensacyjnego, który opisuje deformację objętości pomiarowej wirtualnego skanera 3D ze światłem strukturalnym, który z kolei jest wiernym odzwierciedleniem skanera rzeczywistego. Powstały model kompensacyjny może służyć także do kompensacji rzeczywistego modelu skanera.

Podstawową zaletą opisaną metody kompensacyjnej jest fakt, że nie wymaga ona dostępu do dodatkowej aparatury pomiarowej (komory termicznej, wzorców walidacyjnych, maszyny współrzędnościowej). Nie wymaga ona także zmian w konfiguracji skanera (przy czym skaner musi być wyposażony w sensor temperatury mierzący temperaturę bazy skanera). Dodatkowo, do obliczenia wyników pomiaru wykorzystywane jest oprogramowanie dostarczone wraz ze skanerem. Dopiero na ostatnim etapie obliczeń można przeliczyć współrzędne punktów w chmurze i skompensować ich wartości zgodnie z modelem kompensacyjnym. Oznacza to, że nie trzeba wprowadzać żadnych istotnych zmian w oprogramowaniu sterującym skanera. Wadą opisywanej metody jest fakt braku kompensacji wpływu temperatury na detektor oraz projektor. Kolejną ewentualną trudnością jest konieczność dysponowania modelem CAD skanera oraz konieczność przeprowadzenia poprawnych symulacji odkształceń termicznych bazy skanera i wpływu tych odkształceń na pozycję detektora i projektora. Ta trudność powoduje, że opisana metoda kompensacji dedykowana jest raczej do mniej skomplikowanych konstrukcji skanerów 3D. Jest ona tym dokładniejsza, im bardziej dokładnie i poprawnie przeprowadzona zostanie symulacja odkształcenia termicznego bazy (dlatego np. bardzo istotny jest też materiał, z którego wykonana jest baza konstrukcyjna, w rozdziale 2.2.1 opisałem trudności z symulacjami wytrzymałościowymi i termicznymi dla materiałów kompozytowych).

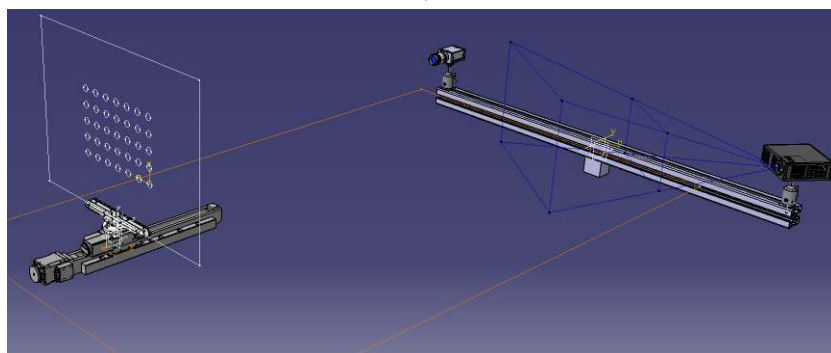
3.1 Rzeczywisty skaner 3D i jego kalibracja

Do sprawdzenia opisanej przeze mnie metody kompensacji wpływu temperatury na bazę mechaniczną skanera 3D z oświetleniem strukturalnym przygotowałem model skanera (Rys. 3.3), który składał się z:

- bazy mechanicznej w postaci profilu aluminiowego (wartość liniowego współczynnika rozszerzalności termicznej $\alpha \approx 23 \times 10^{-6} [K^{-1}]$) z systemu Bosch Rexroth, użyłem profilu 45x45L [114] o długości 1 metra,
- kamery FLIR (dawniej PointGrey) Grasshopper 2.0 GS2-GE-50S5M-C [101], z matrycą szaroodcieniową o rozmiarze 5MPix oraz obiektywem Fujinon HF25 [115] o ogniskowej długości 25mm,
- projektora cyfrowego firmy Optoma model Optoma ML750 [116],
- dwóch głowic kulowych, które umożliwiają odpowiednie wyjustowanie wzajemnej pozycji i orientacji kamery i projektora.



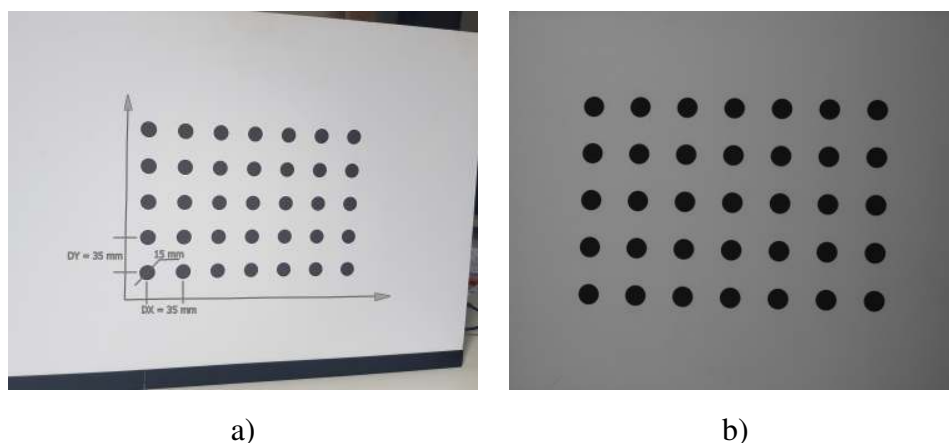
a)



b)

Rysunek 3.3: Stanowisko do sprawdzania poprawności zaproponowanej metody kompensacji: a) prototypowy skaner zbudowany przy użyciu profilu aluminiowego z systemu Bosch Rexroth 45x45L [114], projektora OPTOMA ML750 [116] oraz kamery FLIR Grasshopper 2.0 GS2-GE-50S5M-C [101] z obiektywem Fujinon HF25 [115], b) model CAD stanowiska pomiarowego w środowisku programu Catia V5 [91].

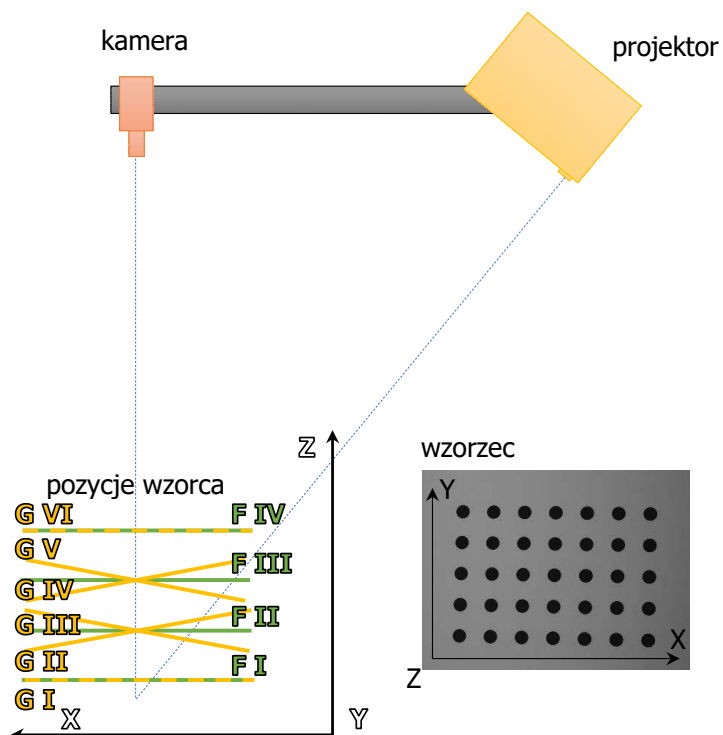
Tak zbudowany skaner skalibrowałem przy użyciu wzorca zbudowanego z płaskiej płyty szklanej o grubości 8mm z naklejoną wydrukowaną folią z naniesionym wzorem kalibracyjnym (Rys. 3.4). Wzór kalibracyjny zawierał macierz czarnych, okrągłych i matowych znaczników (zwanymi dalej markerami) o średnicy 15mm ułożonych w szyku 7×5 z odstępem 35mm w obydwu kierunkach. W celu wyeliminowania błędów powstałych podczas manualnej produkcji wzorca (naklejanie folii na szybę), współrzędne środków markerów na wzorcu zostały wyznaczone przy użyciu maszyny współrzędnościowej ACCURA 7 firmy Carl Zeiss z głowicą optyczną ViScan [117].



Rysunek 3.4: Wzorec kalibracyjny: a) wzorec zawiera macierz 7×5 okrągłych markerów o średnicy 15mm, b) zdjęcie wzorca zebrane przez kamerę badanego skanera.

W celu wyeliminowania wpływu operatora na jakość i wynik kalibracji, do pozycjonowania wzorca użyłem zestawu dwóch manipulatorów: stolika liniowego Standa 8MT160-300 o zakresie 300 mm [118] oraz zainstalowanego na nim stolika obrotowego Standa 8MR151 [119]. Procedura kalibracji jest zgodna z procesem kalibracji systemu pomiarowego 3DMADMAC [4, 5, 57] i podzielona jest na dwa etapy. W pierwszym etapie wykonywana jest kalibracja geometryczna (kalibracja kamery), a w drugim wyznaczana jest dystrybucja fazy w funkcji współrzędnych (X, Y, Z) . Do przeprowadzenia kalibracji niezbędne jest zatem zebranie dwóch zestawów obrazów kalibracyjnych:

- do kalibracji geometrycznej: 6 obrazów wzorca ustawionego w pozycjach określonych na rysunku 3.5 (pozycje G I - G VI), do tych zdjęć projektor używany jest jedynie w celu wprowadzenia jednolitego oświetlenia wzorca (projektor emituje jednolite oświetlenie we wszystkich kanałach RGB),
- do kalibracji fazy: 4 zestawy obrazów (każdy zestaw składa się z 6 obrazów z prążkami oraz obrazów z kodami Graya i jednego obrazu służącego do określenia pozycji wzorca na podstawie wykonanej kalibracji geometrycznej) wzorca ustawionego na pozycjach określonych na rysunku 3.5 (pozycje F I - F IV).



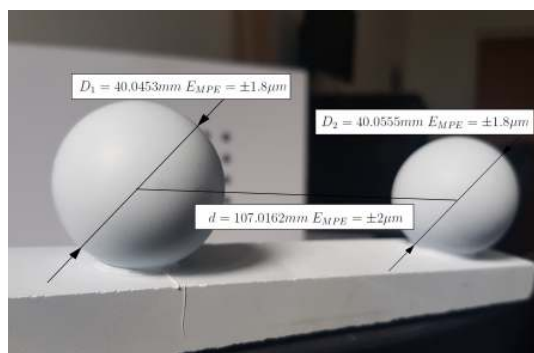
Rysunek 3.5: Pozycje wzorca do kalibracji geometrycznej (G I - G VI) oraz fazowej (F I - F IV).

Zebrane zestawy danych służą do kalibracji skanera 3D. W pierwszym etapie kalibracji wyznaczane są współrzędne środków markerów w układzie współrzędnych detektora. Środki markerów wyznaczane są z rozdzielczością subpikselową (przy użyciu algorytmów odpornych na różne warunki oświetleniowe oraz na szum termiczny [4, 5, 57, 120]), osobno dla każdego z obrazów reprezentujących różną pozycję wzorca kalibracyjnego. W następnym kroku, dla każdej pozycji wzorca wyznaczane są wielomiany opisujące zależność pomiędzy współrzędnymi detektora, a rzeczywistymi współrzędnymi wzorca, pochodzącymi z pomiaru wzorca na maszynie współrzędnościowej. W dalszej kolejności, w sposób iteracyjny wyznaczane są rzeczywiste transformacje wzorca w rzeczywistym układzie współrzędnych, zdefiniowanym przez pierwszą pozycję wzorca (pozycja oznaczona jako G I na rysunku 3.5). W ostatnim etapie kalibracji geometrycznej, przy użyciu metody minimalizacji błędu średniokwadratowego, dla każdego piksela kamery wyznaczana jest prosta wyznaczająca kierunek rzutowania punktu z rzeczywistego układu współrzędnych na matrycę kamery. Zbiór wszystkich prostych, dla każdego piksela detektora, tworzy wiązkę prostych, której punkt przewężenia opisuje położenie tzw. punktu nodalnego kamery i obiektywu, odzwierciedlającego położenie detektora wraz z obiektywem w objętości pomiarowej skanera.

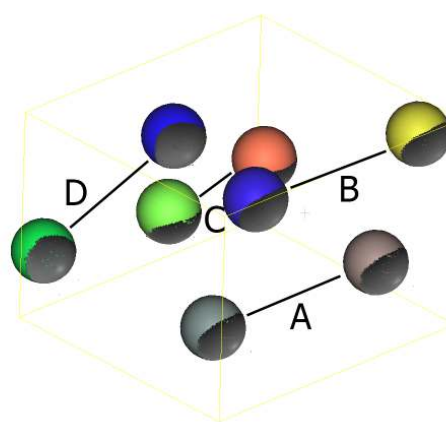
Na etapie kalibracji fazy, w każdej pozycji wzorca zbierane są obrazy służące do wyznaczenia bezwzględnego rozkładu fazy na powierzchni wzorca oraz jeden obraz służący

do wyznaczenia pozycji wzorca w globalnym układzie współrzędnych (Rys. 3.5 pozycje F I - F IV). Dla każdej pozycji wzorca, w każdym pikselu obliczane są wartości fazy oraz odpowiadające jej wartości współrzędnych w globalnym układzie współrzędnych i na tej podstawie obliczane są zależności pomiędzy wartościami fazy, a wartościami współrzędnych w całej objętości pomiarowej skanera. Na ostatnim etapie, na podstawie analizy obrazów z kodami Graya, usuwane są skoki fazy.

Skaner skalibrowany został w laboratorium, w którym utrzymywana była stała temperatura, po około 40 minutach od włączenia skanera (podłączenia zasilania do kamery oraz projektora). Skalibrowany skaner posiada objętość pomiarową, którą można opisać prostopadłością o wymiarach $400\text{mm} \times 300\text{mm} \times 100\text{mm}$ oraz rozdzielczość na poziomie $0,15\text{mm}$. Do oszacowania niepewności pomiaru posłużono się wzorcem typu ball-bar (Rys. 3.6 a), zbudowanym z dwóch kul łożyskowych o średnicach nominalnych 40mm przyklejonych do marmurowego bloku. Średnice kul, oraz odległość między nimi zostały pomierzone na maszynie współrzędnościowej ACCURA 7 firmy Carl Zeiss z aktywną sondą Vast GOLD (wartość maksymalnego dopuszczalnego błędu, przy pomiarze odległości dla maszyny ACCURA 7 wynosi $E_{MPE} = 1,7 + L/333\mu\text{m}$, wartość maksymalnego dopuszczalnego błędu skanowania MPE_{Tij} dla użytej sondy wynosi $2,7\mu\text{m}$).



a)



b)

Rysunek 3.6: Wzorzec do walidacji metrologicznej: a) wzorzec typu ball-bar użyty do sprawdzenia kalibracji skanera 3D, b) pozycje wzorca typu ball-bar podczas walidacji skanera 3D, dla każdej pozycji wzorca (A, B, C i D) obliczane były współrzędne środka każdej z kul wzorcowych, a następnie ich średnice oraz odległość pomiędzy nimi. Na rysunku pokazano 4 chmury reprezentujące poszczególne pozycje wzorca oraz wirtualne sfery dopasowane do pomiarów.

Na rysunku 3.6 b) pokazano wyniki pomiarów wzorca typu ball-bar. Do każdej z pomierzonych kul (na rysunku widać 8 kul, po 2 na każdą pozycję wzorca) dopasowana

została wirtualna sfera. Wyniki pomiaru średnic kul oraz odległość pomiędzy ich środkami przedstawione zostały w Tabeli 3.1.

Tabela 3.1: Wyniki pomiaru wzorca typu ball-bar w temperaturze referencyjnej $24^{\circ}C$

pomiar referencyjny:

$$D_1 = 40,0453mm \quad E_{MPE} = \pm 1,8\mu m$$

$$D_2 = 40,0555mm \quad E_{MPE} = \pm 1,8\mu m$$

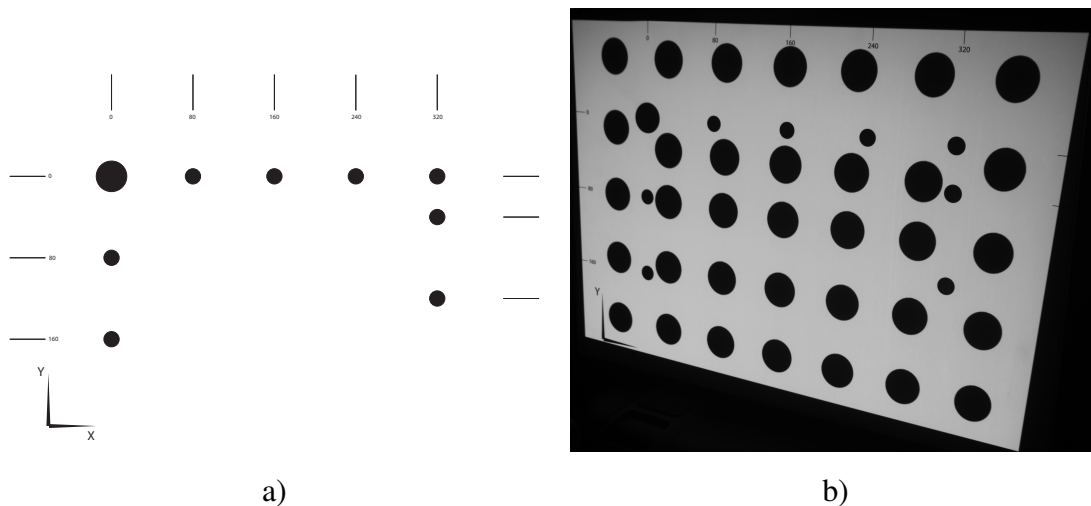
$$d = 107,0162mm \quad E_{MPE} = \pm 2\mu m$$

pozycja	D_1 [mm]	D_2 [mm]	d [mm]	ΔD_1 [mm]	ΔD_2 [mm]	Δd [mm]
A	40,0764	40,0342	107,1002	-0,0311	0,0213	-0,0840
B	40,1124	40,1429	107,0245	-0,0671	-0,0874	-0,0083
C	40,1085	40,0741	107,0041	-0,0632	-0,0186	0,01210
D	40,0254	40,0125	107,0925	0,0199	0,0430	-0,0763

Na podstawie danych kalibracyjnych odtworzyłem położenie oraz orientację kamery w układzie współrzędnych skanera. Do wyznaczenia pozycji projektora w układzie skanera, posłużyłem się następującą metodą:

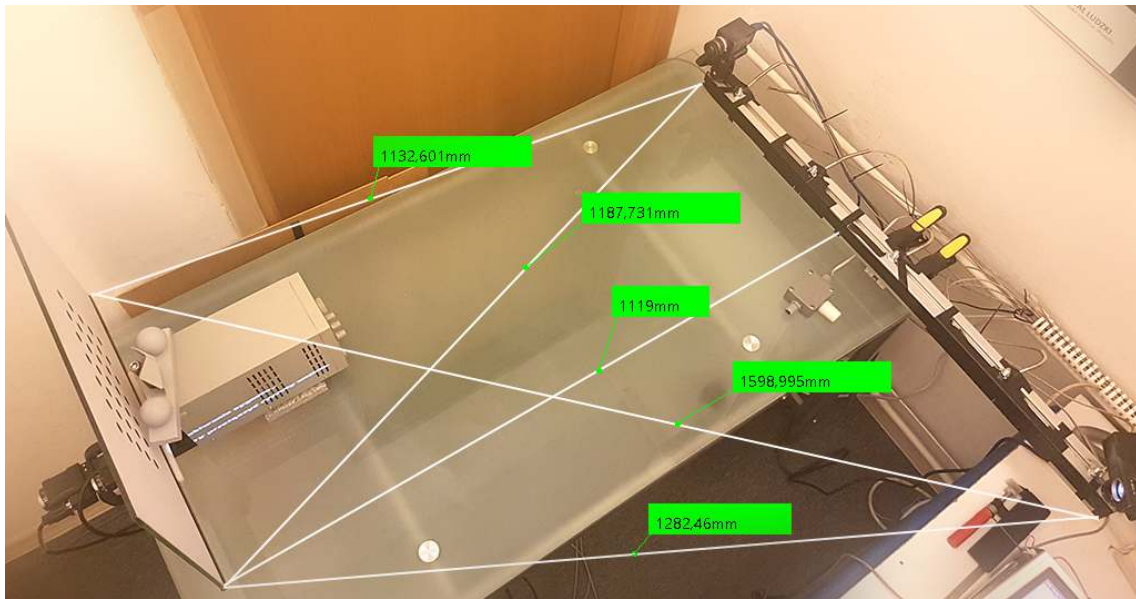
- Przygotowałem dodatkowy wzorec, podobny do wzorca kalibracyjnego, ale z innym rozkładem znaczników (Rys. 3.7 a). Technologia wykonania wzorca była taka sama, jak wzorca kalibracyjnego: szklana tafla o grubości 8mm, na którą nakleiłem folię z wydrukowanym wzorem. Wzór rozłożenia markerów został dobrany w ten sposób, by z jednej strony móc obliczyć transformację wzorca w układzie skanera (korzystając z kalibracji geometrycznej kamery), a z drugiej strony zostawić obszar, na którym można wyświetlać wzory z projektora.
- Na wzorec, za pomocą projektora skanera, rzutowałem przygotowany wcześniej obraz, który zawierał 35 czarnych znaczników kołowych na białym tle. Wymiar markerów i ich rozkład zostały tak dobrane, by po rzutowaniu na przygotowany wzorec, markery wypełniły wolny obszar wewnątrz wzorca (Rys. 3.7 b).
- Zebrałem 4 obrazy wzoru rzutowanego na przygotowany wzorec, w 4 różnych pozycjach wzorca (pozycje wzorca były podobne do pozycji podczas kalibracji fazowej z rysunku 3.5). Korzystając z kalibracji geometrycznej kamery skanera wyznaczyłem transformację wzorca w globalnym układzie współrzędnych skanera (korzystając ze znaczników, które związane są z samym wzorcem). Dla każdej z pozycji wzorca wyznaczyłem także położenie środków markerów rzutowanych przez projektor. W ten sposób otrzymałem zbiór punktów w globalnym układzie współrzędnych skanera, które wyznaczają wiązkę

prostych reprezentujących kierunki rozchodzenia się promieni projektora. Obliczając punkt przewężenia tej wiązki wyznaczyłem położenie punktu nodalnego projektora. W podobny sposób wyznaczyłem orientację projektora.

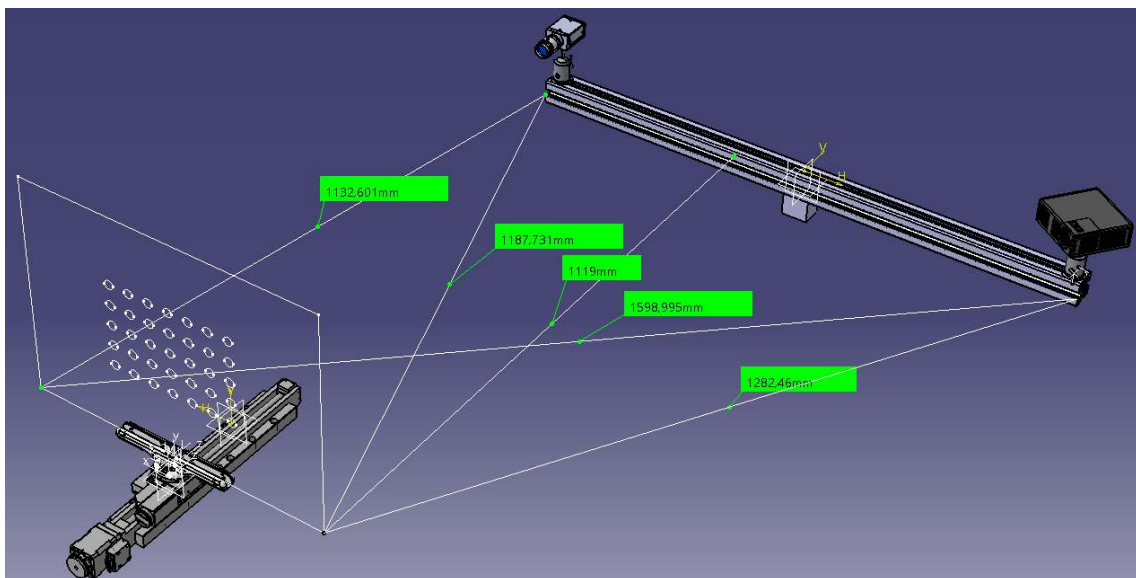


Rysunek 3.7: Dodatkowy wzorec do wyznaczenia pozycji projektora w objętości pomiarowej skanera: a) schemat wzorca, b) obraz ze wzorem do obliczenia pozycji projektora zrzutowany na dodatkowy wzorec.

Wyznaczona pozycja i orientacja projektora i detektora posłużyły do skorygowania położenia detektora i projektora w modelu CAD'owskim skanera. Zaproponowana metoda nie pozwala na jednoznaczne określenie położenia bazy mechanicznej skanera w układzie współrzędnych skanera - dysponujemy jedynie informacją o położeniu kamery, projektora i wzorca. W celu precyzyjnego usytuowania bazy mechanicznej w układzie współrzędnych skanera posłużyłem się prostymi pomiarami geometrycznymi. Dysponując modelami CAD'owskimi wzorca, stolików do manipulacji wzorcem, kamery, projektora, profilu będącego bazą mechaniczną oraz głowic do justowania pozycji kamery i projektora, przy użyciu dalmierza laserowego pomierzyłem rzeczywiste odległości bazy skanera od wzorca w kilku punktach i na tej podstawie wyznaczyłem położenie profilu względem pierwszej pozycji wzorca kalibracyjnego (wyznaczającej położenie układu współrzędnych skanera) (Rys. 3.8). Ten pomiar obarczony był błędem, ale biorąc pod uwagę charakter odkształceń termicznych badanej bazy mechanicznej (przewaga odkształceń wzdłuż profilu) oraz otrzymane wyniki kompensacji, precyzję tego pomiaru uznaję za wystarczającą.



a)



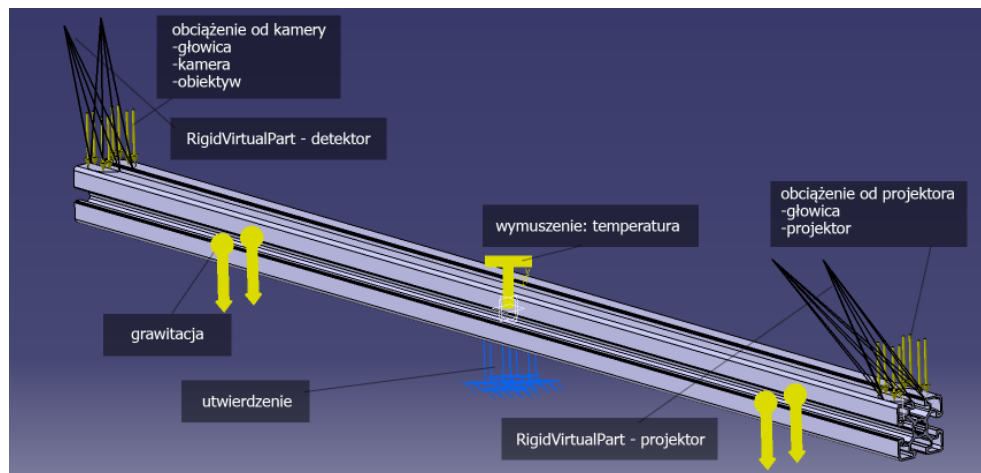
b)

Rysunek 3.8: Pomiar położenia bazy mechanicznej w objętości pomiarowej skanera: a) pomiary odległości położenia bazy mechanicznej skanera służące ustaleniu pozycji bazy mechanicznej w objętości roboczej skanera, b) odpowiadające im dystanse w modelu CAD.

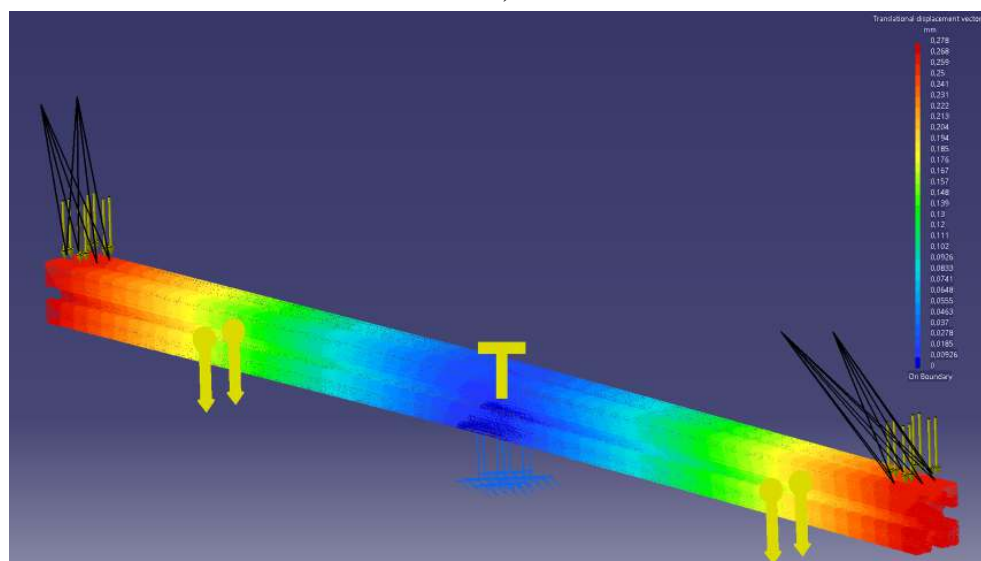
3.2 Symulacja wpływu temperatury na bazę mechaniczną skanera

Dysponując rzeczywistym modelem skanera 3D oraz jego wirtualną kopią przystąpiłem do wyznaczenia wpływu temperatury na bazę mechaniczną skanera. W symulacji założyłem

jednolity rozkład temperatury na całej długości bazy mechanicznej. Założyłem także, że głowice do mocowania projektora oraz detektora nie odkształcają się pod wpływem temperatury. To założenie jest oczywistym uproszczeniem, ale w rzeczywistości wpływ odkształceń termicznych tych głowic na zmianę orientacji kamery i projektora jest nieporównywalnie mniejszy w stosunku do wpływu odkształceń bazy mechanicznej.



a)



b)

Rysunek 3.9: Symulacja wpływu temperatury na bazę mechaniczną skanera 3D z oświetleniem strukturalnym: a) dane wejściowe do symulacji: wymuszenie w postaci przyrostu temperatury ΔT (jednorodny rozkład temperatury na całej długości profilu), utwierdzenie w środku profilu, obciążenia od masy kamery, projektora i głowic do justowania, b) odkształcenie belki na skutek zmiany temperatury belki o $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$.

W symulacji korzystam z metody MES zaimplementowanej w module *Generative Structural Analysis* dostępnej w oprogramowaniu Catia V5 [91]. Wybór oprogramowania jest

podyktowany funkcjonalnością tzw. *RigidVirtualPart* [121]. Jest to funkcjonalność pozwalająca na zdefiniowanie wirtualnych detali, które mogą reprezentować dowolną część w zespole. Za ich pomocą można wyznaczyć wpływ odkształceń siatki symulowanej części na inne komponenty. W przypadku analizy, którą przeprowadzam, definiuję zestaw dwóch *RigidVirtualPart* (Rys. 3.9):

1. *RigidVirtualPart* 1 - wektor i punkt reprezentujący orientację i położenie detektora względem bazy mechanicznej,
2. *RigidVirtualPart* 2 - wektor i punkt reprezentujący orientację i położenie projektora względem bazy mechanicznej.

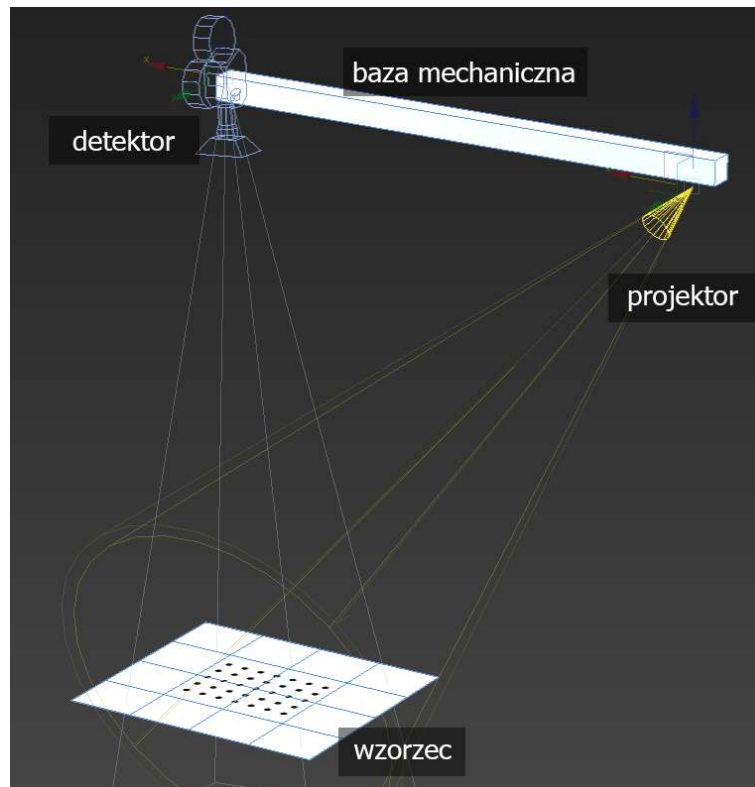
W celu zbadania wpływu temperatury na pozycję projektora oraz detektora wykonałem 5 symulacji, zwiększając temperaturę co $5^{\circ}C$. Uzyskane z symulacji pozycje detektora oraz projektora w funkcji temperatury zebrane są w Tabeli 3.2. Wyniki symulacji pokazują, że podczas podgrzewania bazy mechanicznej orientacja kamery i projektora zostaje praktycznie niezmienną. Zmienia się natomiast położenie detektora i projektora względem siebie. Detektor i projektor odsuwają się od siebie, co jest naturalną konsekwencją wydłużania się bazy mechanicznej skanera względem punktu utwierdzenia.

Tabela 3.2: Wyniki symulacji wpływu temperatury na bazę mechaniczną skanera 3D. Tabela zawiera kolejne pozycje (pos) detektora (D) i projektora (P) odniesione do pozycji z temperatury referencyjnej, a także wektor wyznaczający kierunek (dir) odniesiony do kierunku w temperaturze referencyjnej, dla 6 różnych temperatur bazy mechanicznej. Wartości podane są w milimetrach.

		referencja 24°C			29°C			34°C			39°C			44°C			49°C		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
D	pos	194,1340	11,8470	1127,5750	-0,0531	0,0177	0,0009	-0,1063	0,0355	0,0018	-0,1594	0,0533	0,0027	-0,2126	0,0711	0,0036	-0,2657	0,0888	0,0045
	dir	-6,7730	4,7650	-79,5700	0,0001	0,0004	0,0000	0,0001	0,0011	0,0001	0,0002	0,0018	0,0001	0,0002	0,0025	0,0001	0,0003	0,0032	0,0002
P	pos	-735,0240	4,2100	1072,2960	0,0530	0,0178	0,0007	0,1060	0,0356	0,0015	0,1590	0,0535	0,0022	0,2120	0,0713	0,0029	0,2650	0,0892	0,0036
	dir	50,7280	4,0150	-61,7290	-0,0001	0,0017	0,0000	-0,0002	0,0035	0,0001	-0,0002	0,0051	0,0001	-0,0003	0,0069	0,0002	-0,0004	0,0085	0,0002

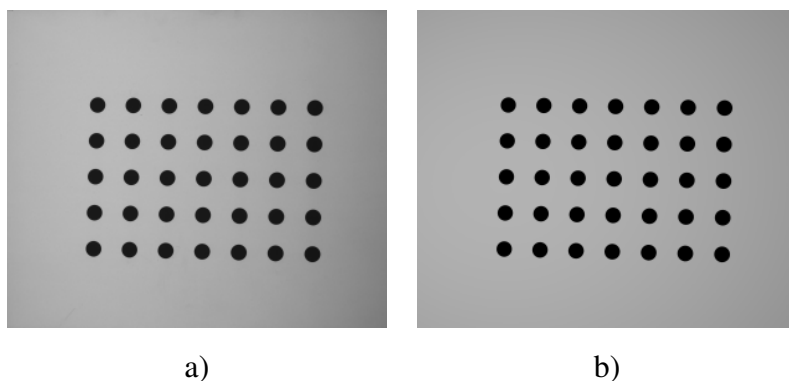
3.3 Wirtualny model skanera 3D w środowisku 3DsMAX

Kolejnym etapem tworzenia modelu kompensacji wpływu zmiennej temperatury na bazę badanego skanera 3D z oświetleniem strukturalnym, jest określenie wpływu symulowanych zmian położenia detektora i projektora (wywołanych odkształceniami termicznymi) na deformację chmury punktów. W tym celu posłużyłem się funkcjonalnością oprogramowania Autodesk 3DsMAX 2018 [113], które pozwala na zaawansowany rendering obrazów z wykorzystaniem wirtualnej kamery fizycznej. W środowisku programu 3DsMAX [113] stworzyłem kamerę o właściwościach możliwie zbliżonych do kamery rzeczywistej.



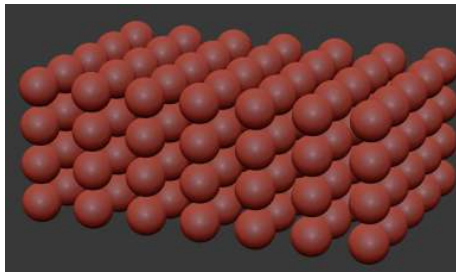
Rysunek 3.10: Wirtualny skaner stworzony w środowisku 3DsMAX 2018 [113].

Stworzyłem także wirtualny wzorzec kalibracyjny oraz projektor, za pomocą którego rzutowałem dowolne bitmapy na wzorzec (Rys. 3.10). Scena w 3DsMAX'ie wyposażona została w skrypty, za pomocą których renderowałem sekwencje obrazów pomiarowych - takich samych, jak obrazy pochodzące z rzeczywistego skanera. Obrazy te następnie przeliczałem za pomocą oprogramowania 3DMADMAC [56]. Na rysunku 3.11 pokazałem rzeczywisty obraz wzorca zebrany przez kamerę ze skanera 3D (Rys 3.11 a) oraz obraz wzorca renderowany w 3DsMAX'ie [113] (Rys. 3.11 b) - obrazy są niemal identyczne - różnice we współrzędnych opisujących środki markerów w dziedzinie obrazów nie różnią się od siebie o więcej niż 0,5 piksela.

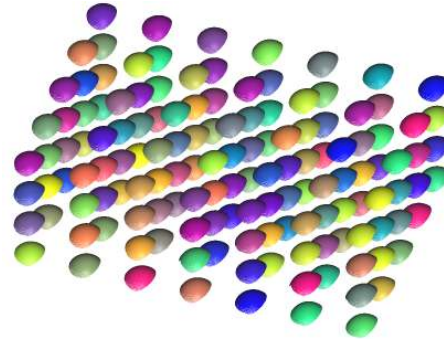


Rysunek 3.11: Porównanie ramki zebranej przez kamerę oraz renderowanej w programie 3DsMAX 2018 [113]: a) rzeczywisty obraz wzorca zebrany przez kamerę ze skanera 3D, b) ten sam obraz, ale wyrenderowany w środowisku 3DsMAX 2018 [113] za pomocą odtworzonej geometrii skanera 3D.

Zaprojektowana w 3DsMAX'ie 2018 [113] scena pomiarowa pozwala na renderowanie sekwencji obrazów, które po przeliczeniu w oprogramowaniu 3DMADMAC [56] prowadzą do wyniku w postaci chmury punktów. Cała scena zdefiniowana jest w jednostkach rzeczywistych (milimetrach), więc otrzymane chmury punktów są w pełni metryczne. Takie rozwiązanie ma tę zaletę, że w wirtualnym środowisku skanera w jego objętość pomiarową mogą wprowadzać dowolne obiekty - w tym dowolnie zdefiniowane wzorce walidacyjne. Na potrzeby zbudowania modelu kompensacyjnego posłużyłem się wzorcem w postaci 140 kulek, rozmieszczonych w objętości pomiarowej skanera (Rys. 3.12 a). W celu pomierzenia wszystkich kul, każdy z pomiarów składał się z 4 pojedynczych pomiarów jednej warstwy kulek. Wyniki pomiarów, w postaci zintegrowanej z 4 chmur punktów, przedstawiłem na rysunku 3.12 b). Do każdej z pomierzonej powierzchni sferycznych dopasowałem wirtualną sferę i obliczyłem współrzędne jej środka. Na wykresie (Rys. 3.12 c)) pokazałem obliczone wszystkie możliwe odległości pomiędzy środkami kulek odniesione do dystansów nominalnych dla symulowanych temperatur (obliczyłem odległości od środka pierwszej kulki do pozostałych kulek i powtórzyłem to dla kolejnych kulek otrzymując w konsekwencji 9753 odległości, odniosłem wyniki do odpowiadających odległości obliczonych dla temperatury referencyjnej, następnie powtórzyłem obliczenia dla każdej z pozostałych 5 symulowanych temperatur).

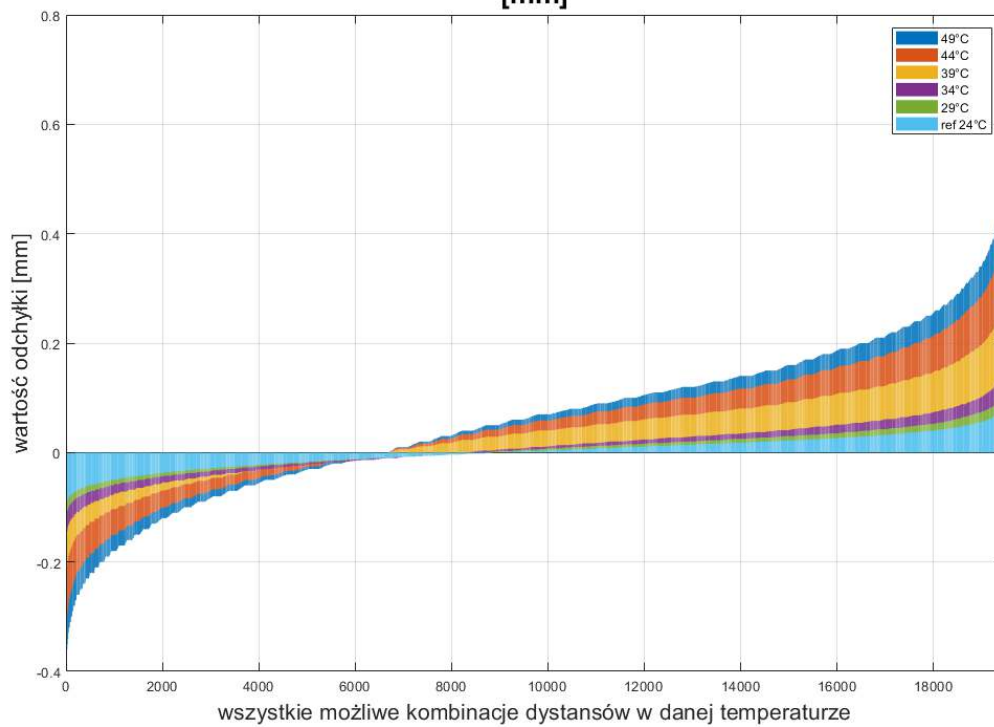


a)



b)

Dystanse pomiędzy kulkami wzorcowymi odniesione do dystansów nominalnych dla różnych symulowanych temperatur przed zastosowaniem modelu kompensacyjnego [mm]



c)

Rysunek 3.12: Pomiar wirtualnego wzorca: a) 140 kulek równo rozmieszczonych w objętości roboczej wirtualnego skanera: b) pomiary wzorca złożone w jedną chmurę punktów reprezentującą pomiar wszystkich 140 kulek. Do kulek dopasowane zostały wirtualne sfery co umożliwiło obliczenie współrzędnych środka każdej kulki, c) wykres przedstawia odchyłki dystansów pomiędzy środkami pomierzonych kul wzorcowych odniesione do nominalnych dystansów między nimi dla symulowanych różnych temperatur bazy mechanicznej.

Analizując wyniki przedstawione na wykresie (Rys. 3.12 c)) można zauważyć, że odchyłki od wymiarów nominalnych dla temperatury referencyjnej, w której została przeprowadzona

kalibracja, nie są większe niż $\pm 0,1\text{mm}$. Wynik ten jest na takim samym poziomie, co wyniki pomiaru wzorca typu ball-bar przedstawione w rozdziale 3.2 (Tabela 3.1). Gdy zmianie ulega temperatura bazy mechanicznej skanera, co w scenie 3DsMAX zrealizowane jest poprzez zmianę pozycji kamery oraz projektora w układzie współrzędnych skanera (zmienione pozycje pochodzą z symulacji wpływu temperatury), odchyłki od wymiarów nominalnych zwiększają się. Dla bazy mechanicznej podgrzanej o $+25^{\circ}\text{C}$ odchyłki te mogą osiągać wartości dochodzące do $\pm 0,6\text{mm}$. Ma to bezpośredni związek z deformacją objętości pomiarowej skanera wywołanej deformacją temperaturową bazy mechanicznej skanera.

3.4 Model kompensacyjny

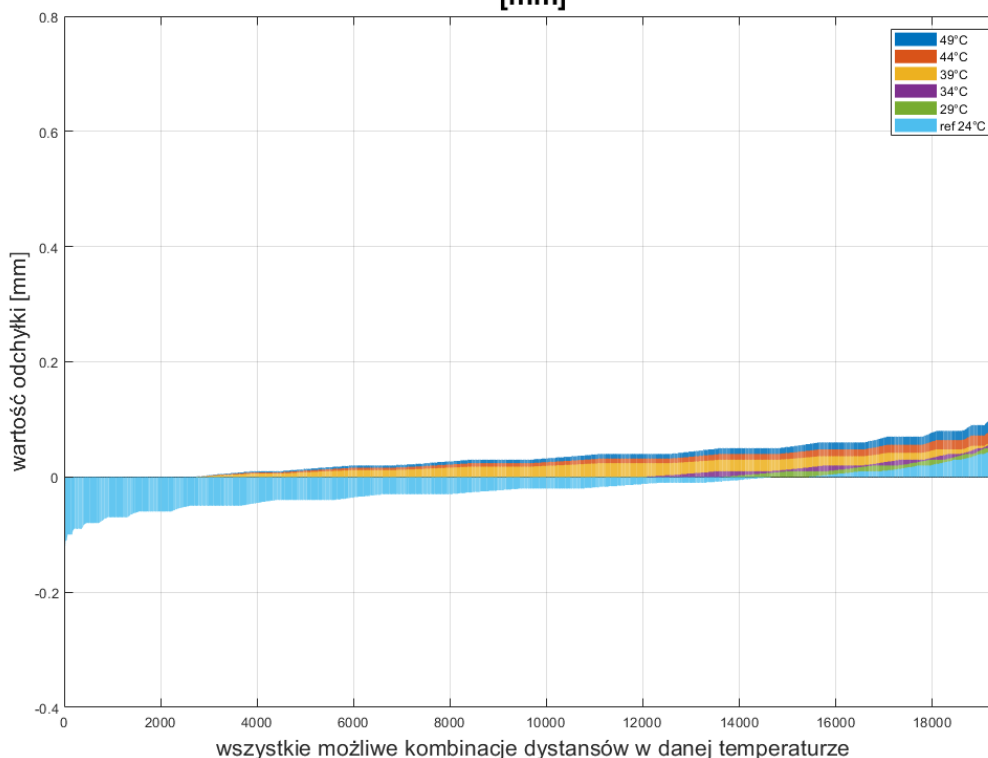
Dysponując danymi z przeprowadzonych symulacji i wirtualnych pomiarów wzorca z kulkami, przeszedłem do budowy modelu kompensacyjnego. Danymi wejściowymi do modelu był zestaw współrzędnych (X, Y, Z) opisujących środki kul wzorcowych oraz temperatura T , w której symulowany był pomiar. Za pomocą dopasowania wielomianu Q w dziedzinie (X, Y, Z, T) stworzyłem 3 modele kompensacyjne, osobno dla każdej z współrzędnych:

$$X_{skompensowane} = Q(X_{nieskompensowane}, Y_{nieskompensowane}, Z_{nieskompensowane}, T) \quad (3.1a)$$

$$Y_{skompensowane} = Q(X_{nieskompensowane}, Y_{nieskompensowane}, Z_{nieskompensowane}, T) \quad (3.1b)$$

$$Z_{skompensowane} = Q(X_{nieskompensowane}, Y_{nieskompensowane}, Z_{nieskompensowane}, T) \quad (3.1c)$$

Dystanse pomiędzy kulkami wzorcowymi odniesione do dystansów nominalnych dla różnych symulowanych temperatur po zastosowaniu modelu kompensacyjnego [mm]



Rysunek 3.13: Wykres przedstawia odchyłki dystansów pomiędzy środkami pomierzonych kul wzorcowych odniesione do nominalnych dystansów między nimi dla symulowanych różnych temperatur bazy mechanicznej, po zastosowaniu modelu kompensacyjnego.

Do dopasowania wielomianów wykorzystałem funkcję $Q = \text{polyfitn}(\text{IndepVar}, \text{DepVar}, n)^2$. Zmiennymi niezależnymi `IndepVar` jest zbiór współrzędnych centrów kul wzorcowych w symulowanych temperaturach, wraz z temperaturami. Zmienną zależną `DepVar` jest jedna ze współrzędnych X , Y albo Z (w zależności od modelu) w temperaturze referencyjnej. W rozprawie skupiłem się jedynie na przedstawieniu wyników dla kompensacji przeprowadzonej przy użyciu wielomianu 3-go stopnia, dla którego osiągałem najlepsze wyniki kompensacji.

Na tym etapie przeprowadziłem weryfikację modelu kompensacyjnego. Przeliczyłem ponownie chmury punktów reprezentujące wirtualne pomiary kulek wzorcowych korzystając z wyznaczonych modeli kompensacyjnych. Ponownie dopasowałem wirtualne sfery do pomierzonych powierzchni sferycznych i obliczyłem współrzędne ich środków. Wyniki porównania wszystkich możliwych dystansów pomiędzy 140 kulkami, odniesione do dystansów nominalnych dla symulowanych temperatur po kompensacji, pokazałem na wykresie

²implementacja funkcji w programie Matlab 2018a [122] wg. John'a D'Errico [123]

(Rys. 3.13). Widać, że w wyniku zastosowania modelu kompensacyjnego, odchyłki dla całego zakresu temperatur nie przekraczają wartości $\pm 0,1\text{mm}$.

3.5 Eksperymenty weryfikacyjne

W celu zweryfikowania poprawności zaproponowanej metody kompensacyjnej zbudowałem stanowisko pomiarowe. Zaproponowana metoda kompensacji temperatury dotyczy wpływu temperatury na bazę mechaniczną skanera, zatem w zbudowanym przeze mnie stanowisku ograniczyłem się do wymuszania zmiany temperatury samej bazy skanera. W celu podgrzania bazy mechanicznej skanera, użyłem zestawu rezystorów grzewczych. Rezystory połączyłem ze sobą w magistralę grzewczą i wsunąłem do wnętrza profilu będącego bazą mechaniczną skanera. Przepuszczając przez rezystory prąd o regulowanym napięciu, uzyskałem efekt promieniowania ciepła z rezystorów. Ciepło przekazywane było do bazy mechanicznej i powodowało jej podgrzewanie. W tym eksperymencie nie byłem w stanie sprawdzić zachowania się skanera ochładzanego, gdyż nie dysponowałem odpowiednią aparaturą. Do pomiaru temperatury użyłem rejestratora MultiCon CMC-99 firmy Simex [124]. Do rejestratora podłączone zostało 6 czujników temperatury typu PT100, cztero-przewodowych, z kompensacją rezystancji doprowadzeń. Czujniki temperatury przykręcone zostały bezpośrednio do profilu i przykryte czarną taśmą izolacyjną, żeby maksymalnie ograniczyć wpływ temperatury otoczenia na pomiar temperatury bazy. Stanowisko pomiarowe ustawione było na specjalnym stabilnym stole, w laboratorium z temperaturą stabilizowaną za pomocą klimatyzatora. Stanowisko pomiarowe przedstawione zostało na zdjęciu (Rys. 3.14).



Rysunek 3.14: Stanowisko do weryfikacji modelu kompensującego wpływ temperatury na bazę mechaniczną skanera 3D.

Przeprowadziłem szereg pomiarów przy wzrastającej temperaturze bazy mechanicznej skanera. Cykl pomiarów zrealizowany został wg. następującego algorytmu:

- Przed rozpoczęciem pomiarów włączyłem zasilanie skanera i odczekałem 40 minut do czasu osiągnięcia przez projektor oraz kamerę stanów równowagi termodynamicznej.
- Przeprowadziłem kalibrację skanera 3D przy użyciu stolika liniowo - obrotowego w celu wyeliminowania wpływu operatora na wynik kalibracji (sposób kalibracji opisany został w rozdziale 3.1).
- Przeprowadziłem częściową walidację metrologiczną i oszacowałem wartość błędu E_{MPE} skanera, mierząc wzorzec typu ball-bar umieszczony w objętości pomiarowej skanera (patrz 3.1).
- Przeprowadziłem procedurę wyznaczania pozycji projektora, kamery oraz bazy mechanicznej w skalibrowanej objętości pomiarowej skanera - zgodnie z procedurami opisanymi w rozdziale 3.3.
- Przeprowadziłem symulację odkształceń temperaturowych bazy mechanicznej skanera i wyznaczyłem wpływ tych odkształceń na położenie projektora i detektora badanego skanera, zgodnie z opisami z rozdziału 3.2. Następnie przeprowadziłem procedurę budowania modelu kompensacyjnego (rozdział 3.3 i 3.4).

- Włączyłem zasilanie magistrali rezystorów grzewczych i podniosłem temperaturę bazy mechanicznej skanera o $\sim 4^{\circ}C$. W objętości pomiarowej skanera umieściłem wzorzec ball-bar. Po ustabilizowaniu się temperatury bazy mechanicznej skanera wykonałem pomiar wzorca.
- Zwiększałem temperaturę bazy, za każdym razem powtarzając pomiar wzorca ball-bar. Łącznie wykonałem 6 pomiarów, osiągając temperaturę bazy na poziomie $\sim 42,8^{\circ}C$.

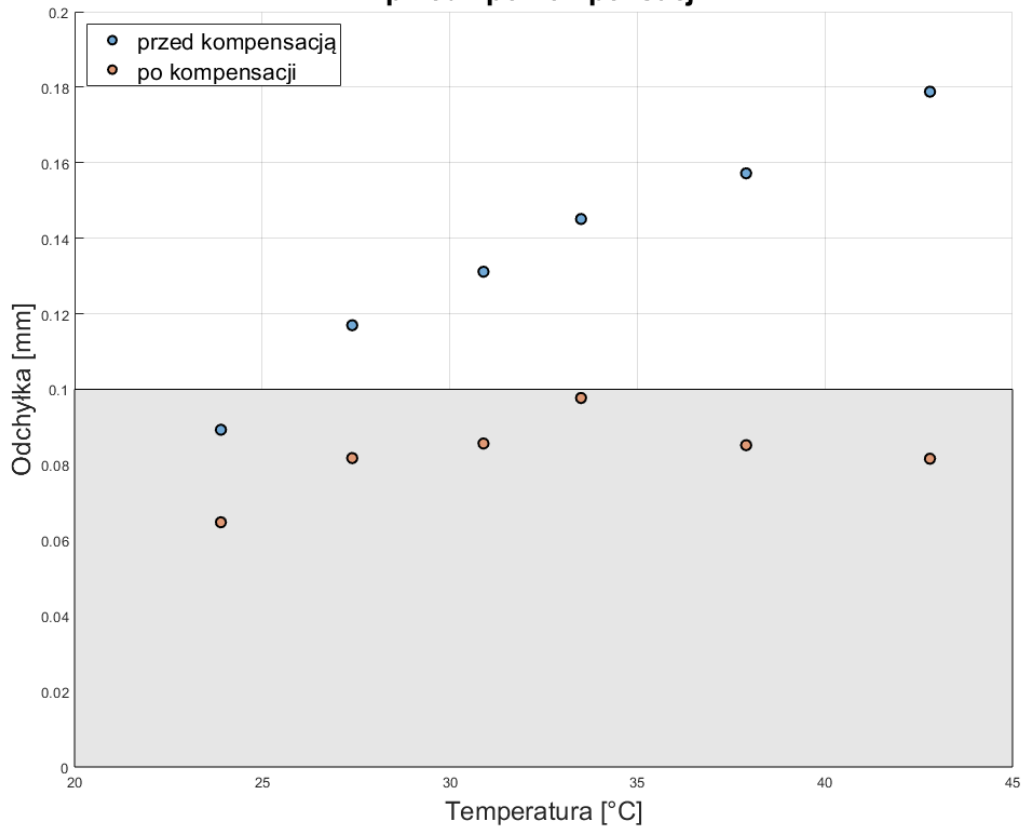
3.6 Rezultaty pomiarów

Zarejestrowałem 6 pomiarów wzorca typu ball-bar, dla różnych temperatur bazy mechanicznej skanera. Wynikiem każdego z pomiarów była chmura punktów. Dla każdej chmury przeprowadziłem dopasowanie wirtualnych sfer do kulek wzorcowych i obliczyłem dystans między tymi kulami. W tabeli 3.3 oraz na wykresie (Rys. 3.15 zaprezentowałem otrzymane wyniki.

Tabela 3.3: Dystans pomiędzy kulami wzorcowymi dla różnych temperatur bazy mechanicznej przed kompensacją i po zastosowaniu modelu kompensacyjnego. Odchyłka odnoszona do wymiaru nominalnego mierzonego metodą referencyjną $d_{ref} = 107,0162\text{mm} \pm 1,8\mu\text{m}$.

Temp [$^{\circ}C$]	przed kompensacją		po kompensacji	
	dystans [mm]	odchyłka [mm]	dystans [mm]	odchyłka [mm]
23,9	106,9269	0,0892	106,9514	0,0648
27,4	106,8992	0,1169	106,9344	0,0818
30,9	106,8851	0,1311	106,9306	0,0856
33,5	106,8711	0,1450	106,9185	0,0977
37,9	106,8590	0,1571	106,9310	0,0852
42,8	106,8374	0,1788	106,9346	0,0816

Odchyłki od wymiaru nominalnego dystansu pomiędzy kulkami wzorcowymi dla różnych temperatur bazy mechanicznej skanera przed i po kompensacji



Rysunek 3.15: Wykres przedstawia odchyłki od wymiaru nominalnego dystansu pomiędzy kulkami wzorcowymi dla różnych temperatur bazy mechanicznej przed i po kompensacji. Na szaro zaznaczono obszar odchyłek mieszczących się w zakresie $\pm 0,1$ mm.

Porównując wyniki obliczonego dystansu pomiędzy kulkami wzorcowymi w różnych temperaturach przed i po kompensacji, widać poprawę. Dla temperatury najbardziej odbiegającej od temperatury kalibracji (temperatura $42,8^{\circ}\text{C}$, przyrost temperatury o $\Delta T = 18,9^{\circ}\text{C}$) zastosowanie modelu kompensacyjnego pozwoliło obniżyć wartość odchyłki o 54%. Po kompensacji wszystkie odchyłki nie są większe niż 0,1mm, czyli osiągają wartość nie większą niż wartości odchyłek obliczane dla temperatury referencyjnej.

3.7 Podsumowanie

Poprawność przedstawionej metody kompensacyjnej została potwierdzona eksperymentalnie. Po zastosowaniu modelu kompensacyjnego odchyłki pomiaru dystansu pomiędzy kulkami wzorca znacznie się zmniejszyły i nie są większe niż odchyłki wyznaczone dla temperatury

referencyjnej. Eksperymenty potwierdziły, że w ten sposób można kompensować wpływ temperatury na bazę mechaniczną skanera 3D. Niemniej jednak należy także wziąć pod uwagę następujące cechy, które limitują zastosowanie zaproponowanej metody:

1. Zaprezentowana metoda kompensacji wpływu temperatury odnosi się jedynie do wpływu temperatury na bazę mechaniczną skanera 3D. Podczas modelowania i symulacji, kamerę oraz projektor traktuję jako elementy, na które temperatura nie ma wpływu - co jest oczywistym uproszczeniem. Takie założenie może być stosowane jedynie w przypadku skanerów, w których odległość bazowa jest stosunkowo duża i wpływ temperatury na bazę mechaniczną jest znacząco bardziej istotny, niż wpływ temperatury na kamerę oraz projektor. Takie skanery mają najczęściej stosunkowo niewielką rozdzielczość i stosunkowo dużą objętość pomiarową [11, 12].
2. Przeprowadzona symulacja wpływu temperatury na bazę mechaniczną zakłada jednolity rozkład temperatury na całej długości bazy mechanicznej. W przypadku, gdyby rozkład temperatury w bazie skanera byłby nierównomierny (gradienty temperatury), należy ten fakt uwzględnić w symulacjach. Jednocześnie należy zwrócić uwagę, że przeprowadzona symulacja odnosi się jedynie do stanów ustalonych. Istotne jest także, że symulacja wpływu temperatury na bazę mechaniczną skanera jest jedynie częścią całej metody kompensacyjnej i można ją dowolnie rozbudowywać. Z punktu widzenia metody kompensacji, istotne jest wyznaczenie położenia projektora oraz detektora w funkcji temperatury.
3. W celu wyznaczenia poprawnego modelu wpływu temperatury na bazę skanera 3D, należy dysponować wiernym modelem do symulacji. Należy także przeprowadzić poprawną symulację wpływu temperatury na bazę mechaniczną skanera. Z moich doświadczeń wynika, że najlepsze wyniki osiągnie się dla prostych geometrii skanera, w których baza ma kształt podpartej belki wykonanej z materiału o stałym współczynniku rozszerzalności termicznej α i izotropowym charakterze deformacji termicznych.
4. Podczas symulacji oraz weryfikacji modelu przeprowadziłem jedynie próby podgrzewania profilu. Nie byłem w stanie sprawdzić działania modelu kompensacyjnego dla ochładzanej bazy skanera. Powodem takiego stanu rzeczy był brak dostępu do odpowiedniej aparatury. Niemniej jednak, biorąc pod uwagę stosunkowo prosty kształt bazy skanera, można zaryzykować stwierdzenie, że podczas ochładzania bazy, można się spodziewać efektów symetrycznych do tych uzyskanych dla podgrzewania bazy.

Z punktu widzenia zastosowania tej metody kompensacji w skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym, największym problemem jest przeprowadzenie poprawnej symulacji wpływu temperatury na bazę mechaniczną oraz fakt braku kompensacji wpływu temperatury na kamerę

i projektor. Jednocześnie istnieje pewna grupa skanerów 3D, w których metoda ta może przynieść wymierne efekty. Dodatkowym atutem tej metody jest brak ingerencji sprzętowej w skaner i brak konieczności dysponowania zaawansowaną aparaturą w celu zbudowania modelu kompensacyjnego. Skaner 3D musi być jedynie wyposażony w czujnik temperatury, który dostarczy informacji o temperaturze bazy mechanicznej. Natomiast nie jest wymagany dostęp do komory termicznej oraz do specjalistycznych wzorców walidacyjnych - wystarczy wzorzec kalibracyjny dostarczony do skanera.

Rozdział 4

Kompensacja wpływu temperatury na kamerę cyfrową

W rozdziale 2.2.2 opisałem istniejące metody kompensacji wpływu temperatury na detektory polowe, które mogłyby zostać użyte na potrzeby zminimalizowania efektu wpływu temperatury na pomiary wykonywane skanerem 3D z oświetleniem strukturalnym. Opisane procedury tworzenia modelu kompensacyjnego mają jedną wspólną cechę: odnoszą się jedynie do modelu kamery otworkowej. Nie znalazłem metody kompensacji wpływu temperatury na kamery cyfrowe, która bazowałaby na rzeczywistym modelu kamery, opisanym np. w [5, 56, 57]. W tym rozdziale zaprezentuję własną metodę, która z powodzeniem może zostać zastosowana do dowolnego modelu kamery. W tym rozdziale opiszę także rezultaty badań nad efektami termicznymi, występującymi w kamerach cyfrowych używanych do budowy skanerów 3D z oświetleniem strukturalnym.

W skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym najczęściej stosuje się cyfrowe. Ich zaletą jest stosunkowo dobra jakość rejestrowanych obrazów, mnogość dostępnych protokołów komunikacyjnych, dostępność bibliotek do obsługi kamery z poziomu własnej aplikacji (SDK), a także dostępność kompatybilnych obiektów (patrz rozdział 2.2.2). W zdecydowanej większości modeli skanerów 3D dostępnych na rynku, kamera występuje jako gotowy, w pełni funkcjonalny moduł, który nie podlega żadnym modyfikacjom. W rzeczywistości kamera wraz z obiektywem stanowią złożony układ elektroniczno-mechaniczno-optyczny, który nie zawsze zachowuje się w sposób przewidziany przez projektanta skanera 3D. Jednym z istotnych zagadnień, które najczęściej nie jest uwzględniane podczas projektowania skanera i doboru detektora, jest wpływ temperatury na kamerę i efekt tego wpływu na rejestrowany obraz. Efekty termiczne, obserwowane w przypadku kamer cyfrowych, dotyczą głównie wpływu efektu rozgrzewania się kamery (*warming-up*) oraz wpływu zmian temperatury zewnętrznej na rejestrowane obrazy.

Kamera sama w sobie jest źródłem ciepła. Podczas rejestracji obrazów, zależnie od swojej budowy, gabarytów oraz użytego systemu chłodzenia, może się rozgrzewać nawet o kilkadziesiąt stopni [21–23, 28, 44]. Bardzo istotny jest także fakt, że w niektórych modelach kamer, zainicjalizowana kamera (podłączona do zasilania i oczekująca na sygnał do rejestracji obrazów) wydziela mniej ciepła, niż kamera będąca w trybie rejestrowania obrazu¹. W związku z faktem, że pojedynczy pomiar najczęściej wiąże się z zarejestrowaniem kilkunastu ramek, kamera podczas takiej rejestracji może, ale nie musi rozgrzać się na tyle, by efekt ten został zaobserwowany na zarejestrowanych obrazach. Okres rozgrzewania się kamery, w zależności od jej budowy, może zajmować od kilku sekund do kilkudziesięciu minut [21–23, 28, 44]. W związku z tym, w zależności od użytego modelu kamery, pojedynczy pomiar nie musi wywołać na tyle istotnego podgrzania kamery, by doprowadzić do zmian w rejestrowanych obrazach. Dlatego tak bardzo istotne jest odpowiednie zrozumienie i zbadanie zjawiska rozgrzewania się kamery, a także odpowiedniego sterowania kamerą, by ograniczyć efekty związane z jej rozgrzewaniem się.

Odrębną kwestią, związaną z efektami termicznymi w kamerach cyfrowych, jest pomiar temperatury samych kamer. Używane w skanerach 3D kamery cyfrowe najczęściej dostarczone są jako gotowe moduły w obudowie wykonanej ze stopów aluminium lub też jako płytki elektroniczne, z matrycą i gniazdem do mocowania obiektywu. W przypadku kamer w obudowie, pomiar temperatury wydaje się być prostszy- wystarczy zamocować do obudowy kamery czujnik temperatury. W rzeczywistości jednak, na skutek różnego rozkładu temperatur wewnątrz kamery, obiektywu oraz obudowy, czujnik ten może wskazywać temperaturę inną od tych, które występują wewnątrz kamery np. w bezpośredniej bliskości matrycy. Ten fakt jest o tyle istotny, że w większości publikacji opisujących kompensację wpływu temperatury wykorzystywany jest odczyt temperatury z zewnętrznych czujników, zamocowanych do obudowy [21–25, 44]. Eksperymenty, które przeprowadziłem sugerują, że takie podejście do kwestii pomiaru temperatury kamery oraz bazowanie na nim modelu kompensacyjnego może być błędne. W przypadku kamer bez obudowy, pomiar temperatury także nie jest zagadnieniem prostym, bo pojawia się problem z miejscem przyłożenia czujnika temperatury. Z punktu widzenia budowy poprawnego modelu kompensacyjnego, najlepsze są kamery cyfrowe, które mają wbudowany czujnik temperatury w bezpośredniej bliskości matrycy. Takie kamery dostarcza np. firma FLIR (dawniej PointGrey), IDS, Vieworks.

W dalszej części rozdziału przedstawiłem wyniki eksperymentów dotyczących efektu rozgrzewania się kamery. Eksperymenty przeprowadziłem dla 5 różnych modeli kamer cyfrowych (Roz. 4.1). Następnie zaprezentowałem wyniki badań nad wpływem zmiany temperatury zewnętrznej na obraz rejestrowany przez kamerę (Roz. 4.2). W tym rozdziale

¹proces rejestrowania obrazu będę określał także procesem: *zbierania ramek* od angielskiego odpowiednika *frame capturing*. W przetwarzaniu obrazu termin *ramka* odnosi się do zarejestrowanego przez kamerę obrazu.

przedstawiłem także sposób modyfikacji budowy kamery, który doprowadził do osiągnięcia požądanej powtarzalności w obserwowanych temperaturowych dryftach obrazu. Na końcu rozdziału przedstawiłem model kompensacji wpływu temperatury na kamerę i pokazałem efekty zastosowania tego modelu w praktyce (Roz. 4.3 oraz 4.4).

4.1 Zjawisko rozgrzewania się kamery (*warming-up process*)

W przeprowadzonych przeze mnie eksperymentach przebadałem efekty rozgrzewania się 5 różnych modeli kamer (Tab. 4.1). Wybrałem modele reprezentujące przekrój dostępnych na rynku kamer cyfrowych. Przebadałem dwa modele wysokiej klasy kamer cyfrowych: FLIR Grasshopper 2.0 [101] (nazywana dalej Grasshopper 2.0) oraz IDS UI-6280SE-M/C Mono MPix [106] (nazywana dalej IDS-UI-6280SE), oraz dwa tanie modele kamer dedykowane dla mikrokontrolerów RaspberryPi [125]: ArduCam Sony IMX219 8MPix [126] (nazywana dalej ArduCam) oraz RaspberryPi Camera v2 8MPix [127] (nazywana dalej RaspberryPi Camera). Ostatnim modelem była kamera dedykowana do naukowych aplikacji, model VP-8MC M16A0 firmy Vieworks [96] (zwana dalej VP-8MC) wyposażona w moduł regulatora temperatury.

Tabela 4.1: Przebadane modele kamer

	Grasshopper 2.0 GS2-GE-50S5M-C	IDS UI-62180 SE-M-GL-R3	ArduCam IMX219 8MPix	RaspberryPi Camera v2 8MPix	Vieworks VP-8MC M16A0
model sensora	CCD Sony ICX625 5MPix	CCD Sony ICX655ALA 5MPix	CMOS Sony IMX219 8MPix	CMOS Sony IMX219 8MPix	KAI-08051
wymiar matrycy	2/3"	2/3"	1/4"	1/4"	4/3"
wymiar piksela	3,45 μ m	3,45 μ m	1,12 μ m	1,12 μ m	5,5 μ m
migawka	global shutter	global shutter	rolling shutter	rolling shutter	global shutter
gniazdo obiektywu	C-mount	C-mount	C-mount	zintegrowany obiektyw	C-mount
obudowa	aluminiowa	aluminiowa	brak, aluminiowe gniazdo obiektywu	brak	aluminiowa
wew. czujnik temp.	tak	tak	nie	nie	tak + Temp. reg.

Podczas eksperymentów z rozgrzewaniem się kamer, badałem następujące zjawiska:

- zmiana temperatury kamery podłączonej do źródła zasilania, ale nie rejestrującej ramek - *stand-by mode*,
- zmiana temperatury kamery podłączonej do źródła zasilania i rejestrującej ramki, a także wpływ rozgrzewania się kamery na zarejestrowane obrazy,
- test powtarzalności dryftu temperaturowego oraz test wpływu zwiększenia prędkości rejestrowanych ramek na dynamikę rozgrzewania się kamery.

Pierwszy test przeprowadzałem dla kamery bez obiektywu. Kamera podłączana była do źródła zasilania, a za pomocą kamery termowizyjnej rejestrowana była maksymalna temperatura na obudowie kamery. Dodatkowo, jeśli model kamery to umożliwia, zapisywana była także temperatura wewnętrzna kamery, mierzona przez wewnętrzny sensor. W drugim

teście do kamery podłączony został obiektyw i kamera rejestrowała obrazy przedstawiające wzorzec do kalibracji skanera 3D z oświetleniem strukturalnym. Prędkość rejestracji ramek ustawiana była na 1 FPS². Wzorzec posiadał macierz 9×6 czarnych, kołowych markerów na białym tle. Dla każdej zarejestrowanej ramki, wyznaczyłem położenie środka każdego z markerów w dziedzinie obrazu (korzystałem z algorytmów odpornych na różne warunki oświetleniowe oraz na szum termiczny [4, 5, 57, 120]). Zestaw tych współrzędnych posłużył do zobrazowania temperaturowego dryftu obrazu rejestrowanego przez rozgrzewającą się kamerę. W ostatnim teście sprawdzana była powtarzalność dryftu temperaturowego oraz wpływ prędkości rejestracji ramek na dynamikę rozgrzewania się kamery. W celu zbadania powtarzalności dryftu, zebrałem 4 serie obrazów z rozgrzewającej się kamery, rejestrującej ramki z prędkością 10 FPS. Testy ze zwiększoną prędkością rejestracji możliwe były do przeprowadzenia jedynie dla kamery Grasshopper 2.0 [101] oraz IDS UI-6280SE[106], pozostałe modele nie były w stanie zapisać ramek z taką prędkością.

Testy rozgrzewania się kamery VP-8MC ograniczyłem jedynie do rejestracji obrazów ze stałą prędkością akwizycji. Kamera VP-8MC jest dedykowana do naukowych zastosowań i przez to jest o co najmniej rząd wielkości droższa od najdroższych badanych kamer firmy FLIR oraz IDS. Jest też o wiele większa niż pozostałe badane kamery i jako taka nie znalazłaby raczej zastosowania w budowie skanera 3D z oświetleniem strukturalnym. Niemniej jednak znalazła się w tym zestawieniu, ponieważ jako jedyna posiada aktywnie chłodzony sensor i z punktu widzenia badań nad wpływem rozgrzewania się kamer na rejestrowane obrazy, jej testy są bardzo pożądane.

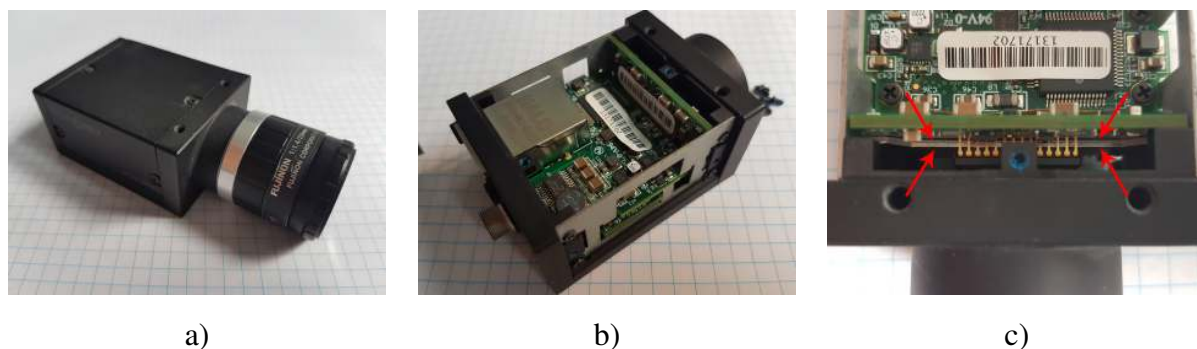
Do przeprowadzenia testów zbudowałem specjalne stanowisko pomiarowe, które umożliwiło stabilne umocowanie kamery przed wzorcem. Stanowisko w całości zbudowane było z Robaxu [72, 73]. Użycie materiału o tak niskiej wartości współczynnika rozszerzalności termicznej pozwoliło na minimalizację wpływu rozgrzewania się elementów mocujących kamerę na obserwowane wyniki eksperymentu. Wszystkie pomiary odbyły się w klimatyzowanym pomieszczeniu, w którym panowała temperatura 24°C . Użyte stanowisko pomiarowe było częścią zbudowanej przeze mnie komory termicznej i zostało szerzej opisane w rozdziale 4.2.

4.1.1 Kamera Grasshopper 2.0 GS2-GE-50S5M-C

Kamera Grasshopper 2.0 [101] posiada szaroodcieniowy sensor CCD Sony ICX625 o rozmiarze $2/3''$. Wersja, którą badałem, wykorzystywała protokół GigE do transmisji danych. Kamera wyposażona była w wewnętrzny czujnik temperatury, umieszczony w bezpośredniej bliskości sensora. Korzystając z dołączonego pakietu SDK można na bieżąco śledzić temperaturę kamery.

²tzw. *frame rate*, prędkość rejestracji mierzona w liczbie ramek na sekundę, ang. *Frame Per Secound - FPS*

Konstrukcja mechaniczna kamery wykorzystuje elementy aluminiowe, anodowane na czarno z wykończeniem matowym. Elementy połączone wkrętami tworzą sztywną ramę służącą do zamontowania sensora oraz komponentów elektronicznych (Rys. 4.1). Kamera wyposażona jest w gniazdo typu C-Mount [128] do montażu obiektywów. Przed sensorem zamontowany jest filtr polaryzacyjny. Sensor kamery wlutowany jest bezpośrednio w płytke elektroniczną. Pomiędzy sensorem, a płytką znajduje się metalowa blaszka, pełniąca najprawdopodobniej rolę radiatora (Rys. 4.1 c).

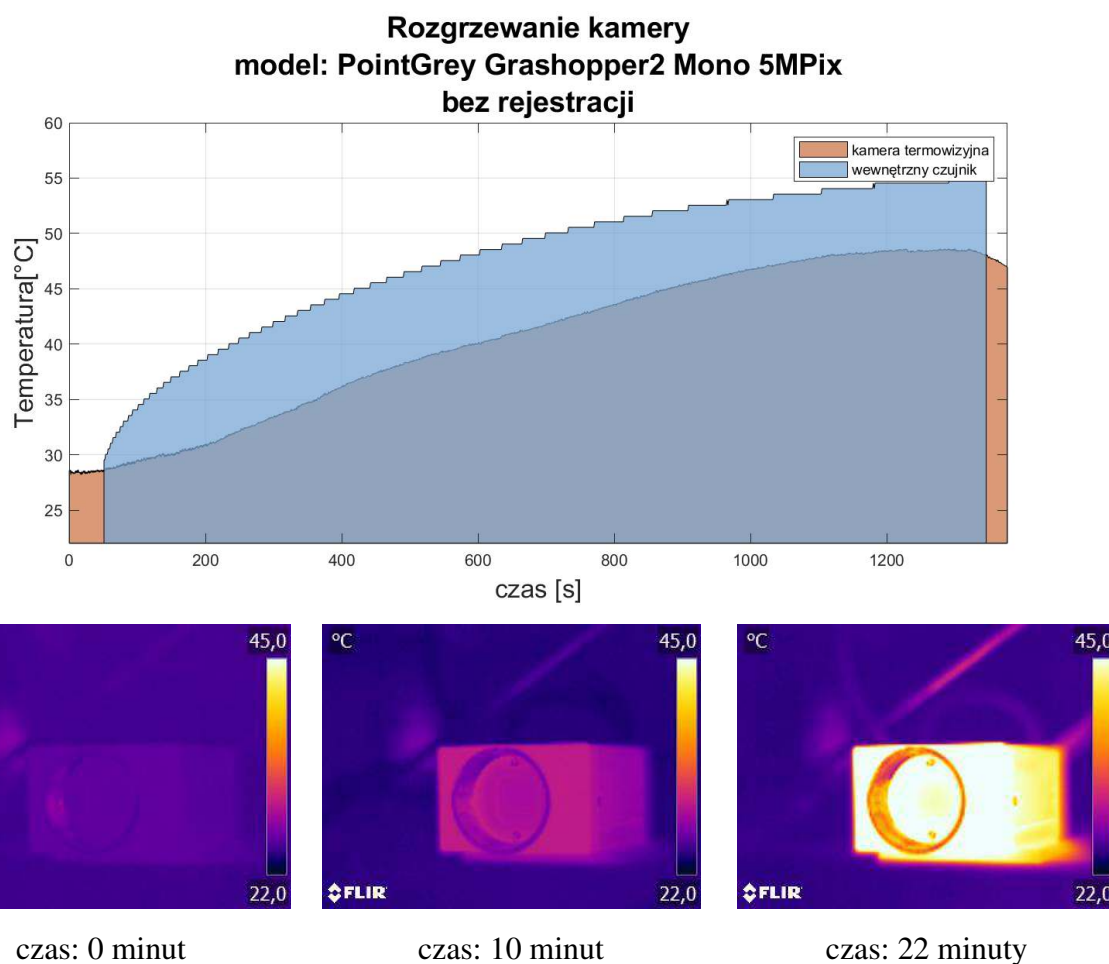


Rysunek 4.1: Kamera Grasshopper 2.0 użyta w testach: a) kamera Grasshopper 2.0 [101] z obiektywem Fujinon 25mm [115] użyta do testów, b) zdjęta obudowa kamery, widać płytke z sensorem przykręconą do aluminiowej kostki, w której montowany jest także obiektyw, c) zdjęcie pokazujące sposób montażu matrycy oraz stalową płytkę radiatora umieszczoną pod matrycą.

TEST I - rozgrzewanie bez rejestracji obrazów

Kamera podłączona do źródła zasilania zaczyna się rozgrzewać. Po około 22 minutach osiąga stan równowagi termicznej i rozgrzewa się do temperatury około 48°C (pomiar kamerą termowizyjną). Na rysunku 4.2 pokazałem obrazy z kamery termowizyjnej, ilustrujące proces rozgrzewania. Rozkład temperatury na powierzchni jest w miarę jednorodny, przy czym w okolicach matrycy (przód kamery) temperatura jest wyższa. Matryca jest głównym źródłem ciepła w kamerze. Kostka do której zamocowany jest sensor generuje najwięcej ciepła (Rys. 4.2). Ciemniejsza obwódka wokół gniazda obiektywu C-Mount [128] spowodowana jest niższą emisyjnością materiału w tym miejscu. Wewnętrzna powierzchnia gniazda C-Mount [128] ma jest nagwintowana. Chropowatość materiału w tym miejscu jest niższa niż na innych, anodowanych na czarno powierzchniach (w tym miejscu jest też brak anodowanej powłoki) stąd mylne wrażenie niższej temperatury. Na wykresie (Rys. 4.2) zilustrowałem temperaturę mierzoną za pomocą kamery termowizyjnej oraz za pomocą wewnętrznego czujnika. Pomiar czujnikiem wewnętrznym możliwy był dopiero w momencie, w którym kamera poprawnie zarejestrowała się w lokalnej sieci i można było się z nią połączyć za pomocą komputera (stąd przerwa w rejestracji temperatury w początkowych 50 sekundach pomiaru). Można

zaobserwować, że temperatura wskazywana przez czujnik wewnętrzny jest zawsze wyższa o około $7,5^{\circ}\text{C}$ (z wyjątkiem początkowych faz rozgrzewania). Ten stan utrzymuje się przez cały czas trwania eksperymentu - nawet po bardzo długim czasie różnica pomiędzy wskazaniami wynosi około $7,5^{\circ}\text{C}$ (warunkiem jest stała temperatura otoczenia). Związane jest to z faktem, że całą obudowa kamery działa jednocześnie jak radiator i odprowadza ciepło wygenerowane przez sensor do otoczenia.

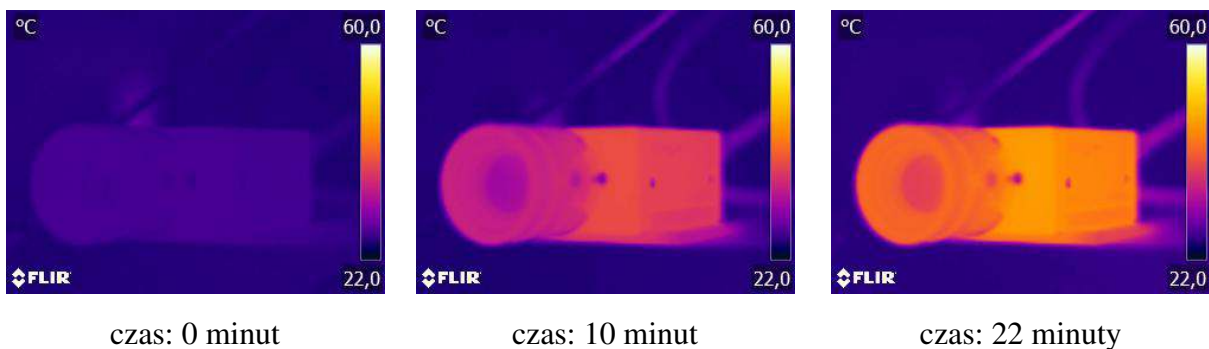
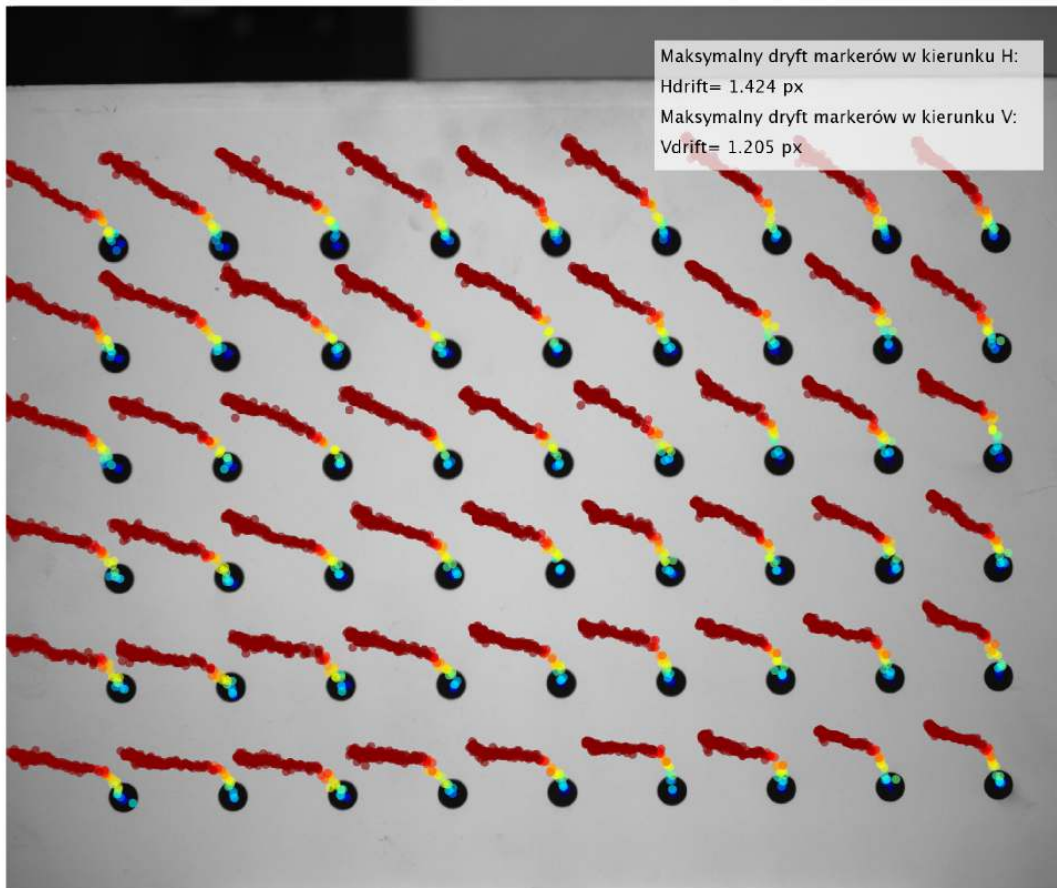


Rysunek 4.2: Na górze: wykres temperatury kamery Grasshopper 2.0 [101] zarejestrowany podczas testu nr I. Na niebiesko zaznaczona jest temperatura zarejestrowana przez wewnętrzny czujnik kamery, na pomarańczowo temperatura zarejestrowana przez kamerę termowizyjną. Poniżej: ujęcia z kamery termowizyjnej pokazujące rozkład temperatur na powierzchni kamery podczas rozgrzewania się kamery (zakres skali temperatury 22°C - 45°C).

TEST II - rozgrzewanie z rejestracją obrazów z prędkością 1 FPS

W drugim teście do kamery podłączony został obiektyw i kamera rejestrowała obrazy wzorca z prędkością 1 ramki na sekundę (1 FPS). Korzystając z wewnętrznego czujnika temperatury, dla każdej zapisanej ramki zapisywałem także temperaturę kamery. Na rysunku 4.3 zilustrowałem dryft temperaturowy środków markerów powstały podczas rozgrzewania się

kamery. Tłem dla rysunku jest pierwsza zapisana ramka, a kolorowe punkty wskazują na kolejne wyznaczone środki znaczników (w celu zobrazowania dryftu kolejne przyrosty pozycji środków markerów zostały przeskalowane 200 razy). Kolory od niebieskiego do czerwonego ilustrują wzrastającą temperaturę kamery. Na obrazie znajduje się także informacja o maksymalnym obliczonym dryfcie pikseli w kierunku poziomym $H_{drift} = 1,424\text{px}$ oraz pionowym $V_{drift} = 1,205\text{px}$. Dla rejestrowanych obrazów odległość pomiędzy dwoma sąsiednimi pikselami jest równa około 0,12mm w płaszczyźnie wzorca, co daje przesunięcie na poziomie $H_{drift} = 0,17\text{mm}$ w kierunku poziomym oraz $V_{drift} = 0,14\text{mm}$ w kierunku pionowym w płaszczyźnie wzorca. Na zarejestrowanym dryfcie (Rys. 4.3) zaobserwować można przesunięcie centrów markerów w kierunku pionowym oraz poziomym, a także niewielkie przeskalowanie obrazu. Dla pojedynczych markerów trend dryftu nie jest jednakowy. Środki znaczników "wędrują" po trajektoriach, które mocno się zakrzywiają lub nagle zmieniają kierunek. Trudno jednoznacznie stwierdzić, czym to jest spowodowane. Należy pamiętać, że na kształt trajektorii markerów wpływ mają także odkształcenia termiczne obiektywu. Na obrazach z kamery termowizyjnej (Rys. 4.3) widać, że obiektyw ogrzewa się niemal tak samo, jak kamera. Podejrzewam, że zaobserwowane trajektorie są efektem rozgrzewania się elementów konstrukcyjnych kamery i obiektywu i kasowania niewielkich luzów wewnątrz konstrukcji kamery i obiektywu. Takie luzy mogą w znaczący sposób wpływać na charakter odkształceń poszczególnych elementów obudowy i w konsekwencji mogą zmieniać położenie całej matrycy.



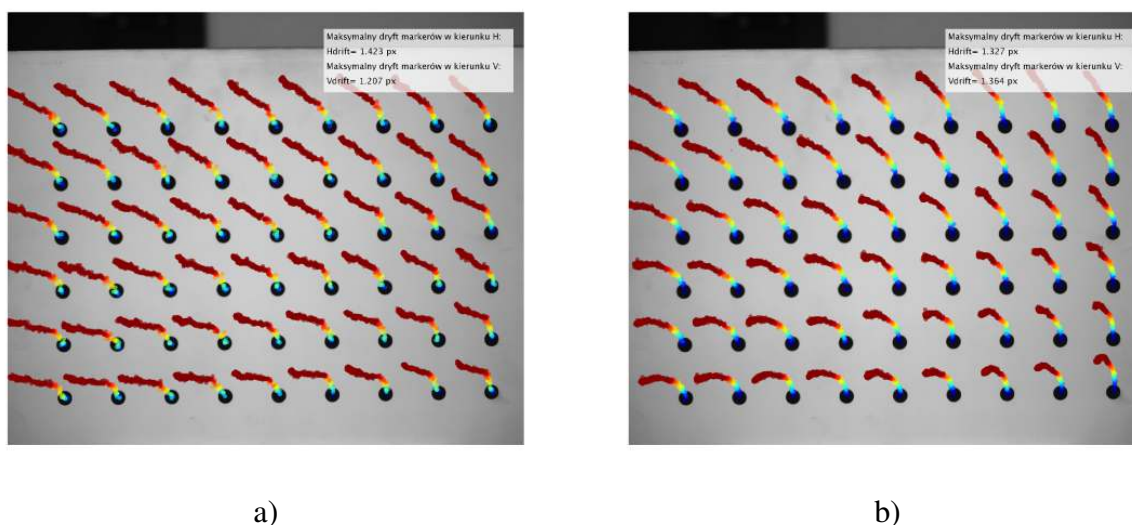
Rysunek 4.3: Na górze: rozkład temperaturowego dryftu obrazu dla całej matrycy kamery. Kolorowe punkty pokazują wyznaczone środki markerów (przemieszczenie przeskalowane jest 200 krotnie), a ich barwa wskazuje na temperaturę kamery. Poniżej: ujęcia z kamery termowizyjnej pokazujące rozkład temperatur na powierzchni kamery i obiektywu podczas rozgrzewania się kamery (zakres skali temperatury 22°C-60°C).

Zastanawiający jest rozkład temperatury obrazowany przez kolory punktów reprezentujących środki markerów. Na samym początku rozgrzewania kamery obserwowany jest dosyć dynamiczny dryft środków markerów "ku górze" i "w lewo". Temperatura kamery także dynamicznie rośnie. Po chwili jednak zmienność temperatury wyraźnie wyhamowuje

(kolor ciemnoczerwony markerów na rysunku 4.3), ale dalej obserwowany jest dosyć mocny dryft centrów markerów. Podejrzewam, że jest to związane z transferem ciepła do obiektywu i podgrzewaniem się obiektywu oraz obudowy kamery. W konsekwencji, proces rozgrzewania się układu kamery, obiektywu oraz obudowy jest w rzeczywistości nieco dłuższy, pomimo, że temperatura mierzona przy sensorze jest już ustabilizowana.

TEST III - powtarzalność dryftu oraz zwiększona prędkość rejestracji.

Ten test przebiegał podobnie, ale zmieniona została prędkość rejestracji, która została zwiększona dziesięciokrotnie (10 FPS). Z punktu widzenia zarejestrowanego dryftu temperaturowego oraz temperatur, wyniki okazały się być zbliżone do tych zebranych podczas Testu II. Czas rozgrzewania się kamery wyniósł około 22 minut, w czasie których kamera rozgrzała się do około $45^{\circ}C$ (pomiar kamerą termowizyjną). Test został czterokrotnie powtórzony, by zbadać powtarzalność dryftu (Rys. 4.4 zaprezentowałem wyniki tylko dwóch najbardziej reprezentatywnych serii). Ogólny trend jest zachowany, środki markerów "przemieszczają" się najpierw w kierunku "ku górze", by potem "zakręcić w lewo". Porównując jednak trajektorie poszczególnych markerów można dostrzec różnice.



Rysunek 4.4: Na obrazach a) - b) zilustrowano trajektorie markerów będące wynikiem dryftu temperaturowego dla 2 najbardziej różniących się od siebie serii rozgrzewania się kamery dla ramek rejestrowanych z prędkością 10 FPS. Trajektorie odpowiadających sobie markerów wykazują podobne trendy, ale widoczne są różnice.

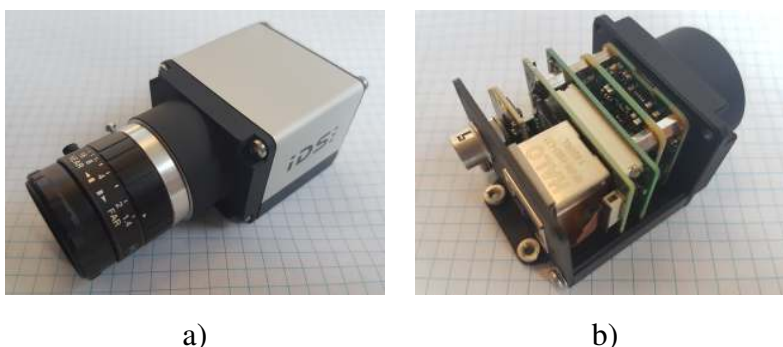
Wnioski

Z punktu widzenia zjawisk cieplnych obserwowanych w kamerze Grasshopper 2.0 [101] nie ma znaczenia, czy kamera rejestruje ramki, czy pozostaje w stanie oczekiwania. Od razu po włączeniu zasilania kamera rozgrzewa się i po około 22 minutach osiąga swój stan równowagi termicznej. Analiza dryftu temperaturowego sugeruje jednak, że do pełnego

ustabilizowania kamery należy poczekać nieco dłużej. Z punktu widzenia zastosowania takiej kamery w skanerze 3D z oświetleniem strukturalnym, takie zachowanie jest pożądane, ponieważ po rozgrzaniu się kamera utrzymuje stałą temperaturę i rejestruje obrazy w ten sam sposób (przy założeniu stałej temperatury zewnętrznej). Zarejestrowany dryft temperaturowy i trajektorie markerów sugerują, że proces rozgrzewania się kamery nie jest jednorodny i rozgrzewająca się obudowa, mocowanie obiektywu oraz sam obiektyw, mają bardzo duży wpływ na rejestrowane obrazy. Można zatem domniemywać, że np. zmiana sposobu mocowania kamery może diametralnie odmienić charakter dryftu temperaturowego bo zaburzy proces transferu ciepła, a także zmieni charakter odkształceń termicznych. Niepokojący jest także fakt obserwowania różnych trajektorii wyznaczonych przez środki markerów dla powtarzanych eksperymentów rozgrzewania się kamery. Trudno jednoznacznie stwierdzić, jakie mogą być przyczyny obserwowanych różnic. Ważne jest, że zaobserwowany brak powtarzalności może być przyczyną niepoprawnego działania modelu kompensacyjnego. W dalszych rozdziałach, w których badałem wpływ zmiany temperatury zewnętrznej na obrazy rejestrowane przez kamerę, także obserwowałem zjawisko braku powtarzalności efektów termicznych obserwowanych na rejestrowanych obrazach. W rozdziale 4.2 zaproponowałem metodę modyfikacji konstrukcji kamery, która doprowadziła do uzyskania pożądanej powtarzalności w obserwowanym dryfcie temperaturowym, zarówno podczas testu rozgrzewania, jak i zmian temperatury zewnętrznej.

4.1.2 Kamera IDS UI-6280SE-M-GL-R3

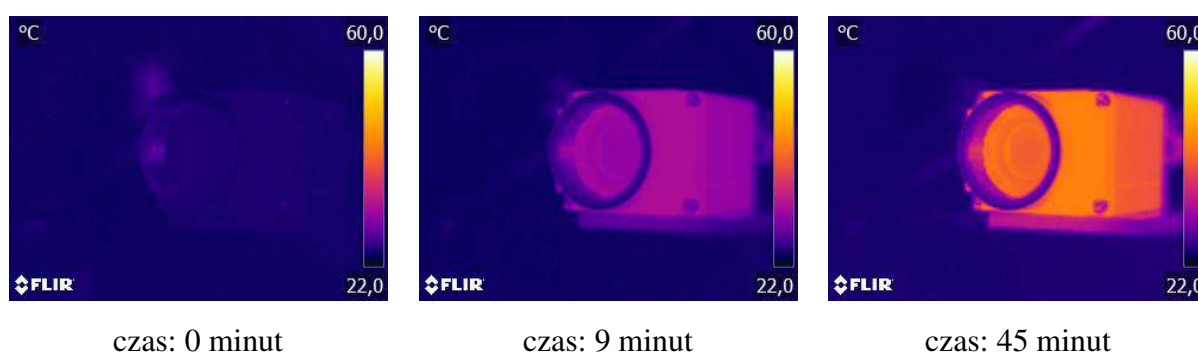
Badana przeze mnie kamera IDS UI-6280SE [106] (Rys. 4.5 a)) wyposażona jest w szaroodcieniowy sensor CCD Sony ICX655ALA o rozmiarze 2/3". We wnętrzu aluminiowej obudowy kryje 4 płytki drukowane ułożone jedna na drugiej. Na płytce znajdującej się na samym wierzchu stosu przylutowana jest matryca. Płytki skrócone są ze sobą za pomocą gwintowanych słupków dystansowych (Rys. 4.5 b)). Nie udało mi się dokładnie obejrzyć sposobu montażu sensora, bo wymagałoby to dalszego rozkręcania całej kamery, a obawiałem się ją zniszczyć. Matryca najprawdopodobniej przylutowana jest bezpośrednio do płytki drukowanej. Kamera wyposażona jest w wewnętrzny sensor temperatury. Nie byłem w stanie sprawdzić, gdzie dokładnie znajduje się sensor, ale sądząc po dynamice jego pomiarów, można podejrzewać, że znajduje się gdzieś w okolicach matrycy. Do eksperymentów z kamerą użyłem obiektywu Fujinon HF25 o ogniskowej 25mm [115].



Rysunek 4.5: Kamera IDS UI-62180SE użyta w testach: a) wygląd kamery IDS UI-62180SE [106] z założonym obiektywem Fujinon 25mm [115], b) zdjęta obudowa kamery, widać 4 płytki ułożone w stos. Na wierzchniej płytce znajduje się sensor. Dodatkowa płytka zawiera złącza GigE oraz Hirose.

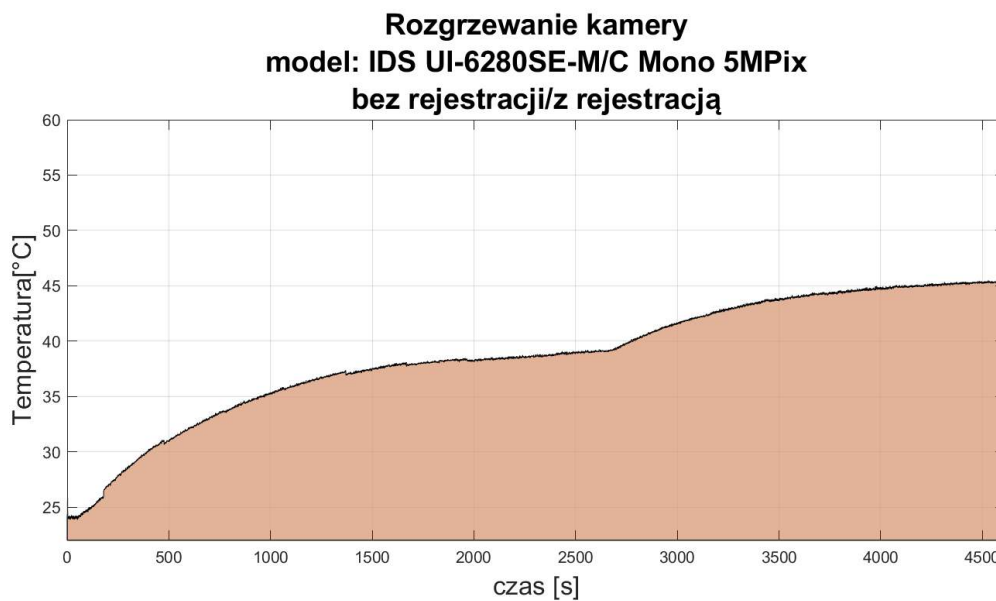
TEST I - rozgrzewanie bez rejestracji obrazów

Kamera podłączona do źródła zasilania zaczyna się rozgrzewać i po około 42 minutach osiąga stałą temperaturę około 39°C . Na obrazach (Rys. 4.6) z kamery termowizyjnej widać dosyć jednolity rozkład temperatury na powierzchni obudowy kamery. Podobnie, jak w przypadku kamery Grasshopper 2.0 [101], w okolicach złącza C-Mount [128] zauważyć można ciemną obwódkę, która wskazuje na niższą emisyjność materiału w tym miejscu. Podobne zjawisko, na dużo mniejszą skalę, można zaobserwować na boku obudowy: kostka, do której przykręcony jest sensor jest anodowana na czarno (Rys 4.5 a), natomiast główna część obudowy anodowana jest na szaro. Stąd też najprawdopodobniej odrobinę ciemniejsze obszary na boku kamery mają niższą emisyjność, ale tę samą temperaturę co reszta obudowy.



Rysunek 4.6: Ujęcia z kamery termowizyjnej pokazujące rozkład temperatur na powierzchni kamery podczas rozgrzewania się kamery IDS UI-62180SE [106] (zakres skali temperatury $22^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$). Ciemna obwódka wokół złącza C-Mount jest efektem niskiej chropowatości materiału na gwincie i czole złącza, a co za tym idzie niższej emisyjności tej powierzchni.

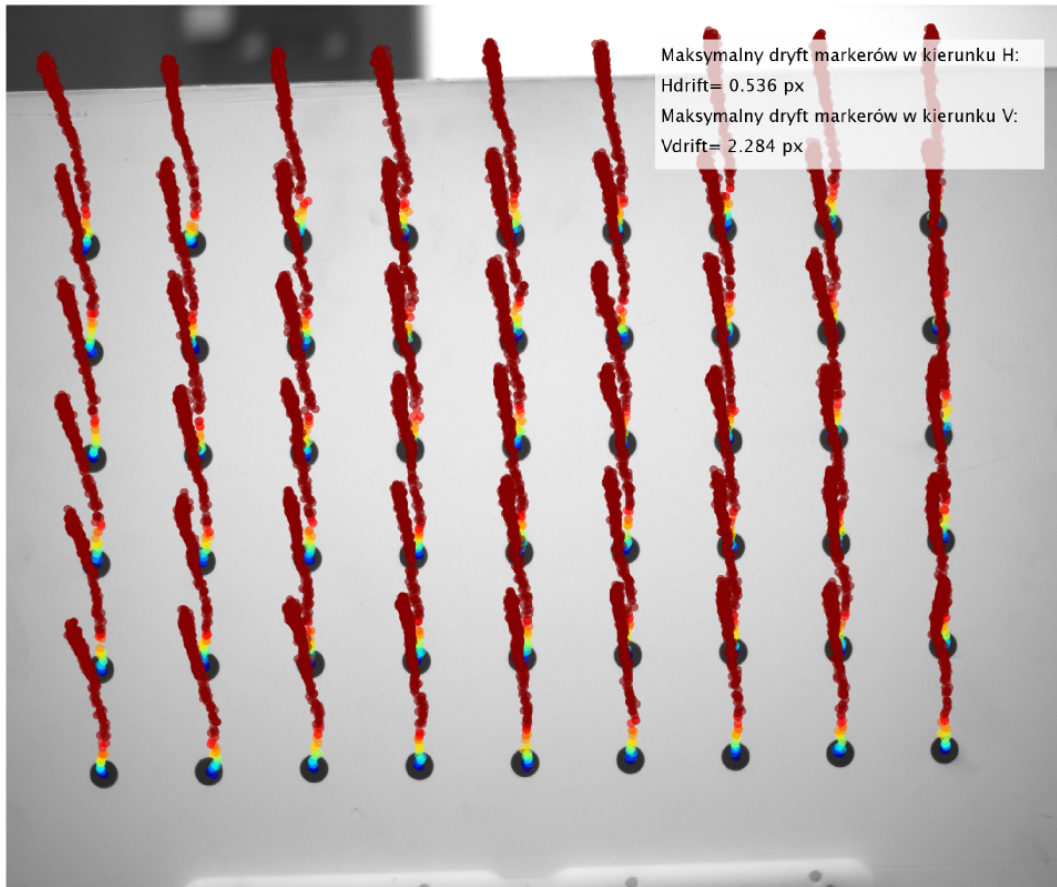
Stan równowagi termicznej zostaje zaburzony w momencie, w którym kamera zaczyna rejestrować obrazy. W odróżnieniu od kamery Grasshopper 2.0 [101], która zawsze rozgrzewa się do tej samej temperatury, niezależnie od tego, czy rejestruje ramki, czy nie, kamera IDS UI-62180SE [106] generuje dodatkową porcję ciepła w momencie, w którym zaczyna rejestrować ramki. Na wykresie (Rys. 4.7) widać wykres temperatury kamery, która po 42 minutach rozgrzewania się bez rejestracji ramek, dostała sygnał do rozpoczęcia rejestracji ramek z prędkością 1 ramki na sekundę. Można zauważyć, że temperatura kamery wzrasta do ponad 46°C w ciągu kolejnych 30 minut (pomiar temperatury przy użyciu kamery termowizyjnej).



Rysunek 4.7: Wykres temperatury kamery IDS UI-62180SE zarejestrowanej przez kamerę termowizyjną. Przez pierwsze 45 minut testu badana kamera pozostawała w trybie *stand – by*, a potem rozpoczęła rejestrację ramek z prędkością 1 FPS.

TEST II - rozgrzewanie z rejestracją obrazów z prędkością 1 FPS

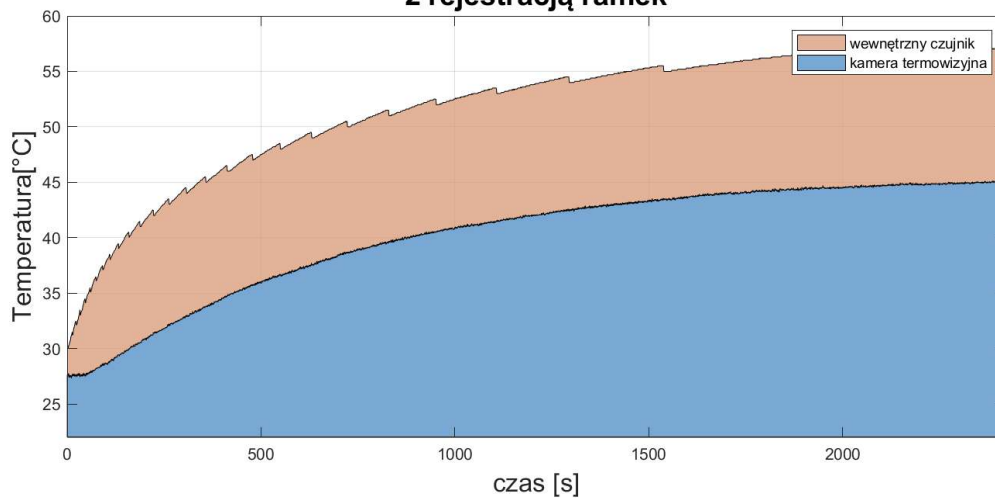
W tym teście kamera zaczyna rejestrację ramek od razu po zarejestrowaniu w lokalnej sieci - kilka sekund od momentu włączenia zasilania. Prędkość akwizycji ustawiona jest na 1 ramkę na sekundę. Dla każdej ramki zapisywana jest także wartość temperatury odczytanej przez wewnętrzny sensor w kamerze. Kamera rejestruje obrazy wzorca. Dla każdego obrazu obliczane są współrzędne środków macierzy markerów w dziedzinie obrazu. Obliczone środki wzorców tworzą trajektorie, które odzwierciedlają temperaturowy dryft obrazów rejestrowanych przez kamerę. Każde kolejne pozycje markerów przeskalowane są 200 krotnie. Zarejestrowany dryft pokazany jest na rysunku 4.8, kolory punktów odzwierciedlają temperaturę kamery (od niebieskiego do czerwonego).



Rysunek 4.8: Trajektorie markerów zarejestrowane podczas testu rozgrzewania się kamery.

Zarejestrowany dryft osiąga znaczące wartości. Dla kierunku poziomego jego maksymalna wartość sięga $H_{drift} = 0,54px$, co w przeliczeniu na milimetry daje wartość $0,08mm$ w płaszczyźnie wzorca. Dla kierunku pionowego maksymalny dryft osiąga wartość $V_{drift} = 2,284px$, czyli $0,36mm$. Dryft ma podobny charakter dla wszystkich markerów, dominująca jest składowa pionowa dryftu. W rozkładzie temperatury zaobserwować można to samo zjawisko, co w eksperymencie z kamerą Grasshopper 2.0 [101]. Początkowo zwiększającej się temperaturze kamery towarzyszy dosyć jednostajny dryft środków markerów, ale stabilizującej się temperaturze nie towarzyszy "hamowanie" dryftu.

**Rozgrzewanie kamery
model: IDS UI-6280SE-M/C Mono 5MPix
z rejestracją ramek**

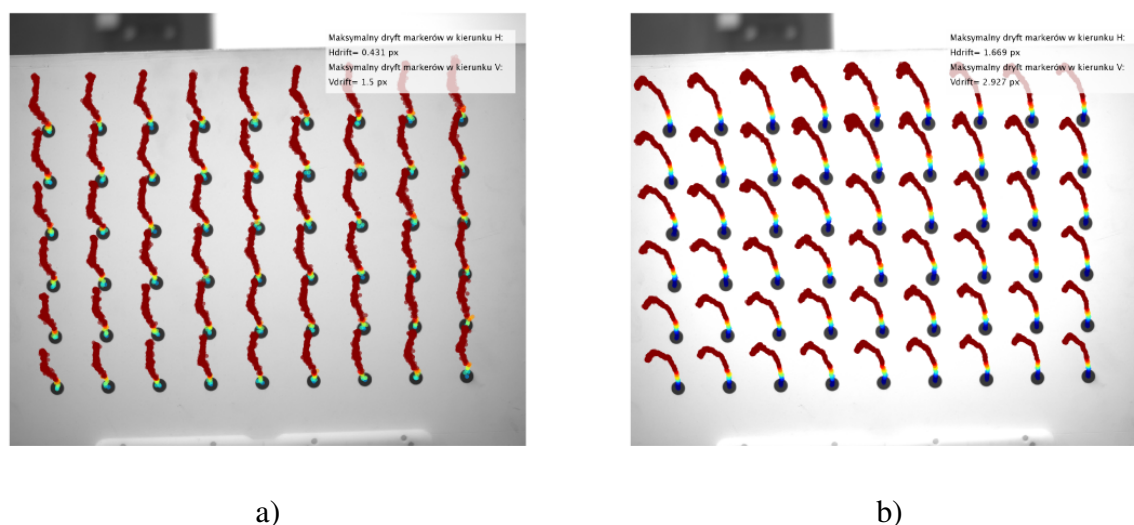


Rysunek 4.9: Temperatura kamery IDS UI-6280SE zarejestrowana podczas testu rozgrzewania z rejestracją ramek. Na pomarańczowo zaznaczono temperaturę zmierzoną przez wewnętrzny czujnik, na niebiesko - temperaturę zarejestrowaną przez kamerę termowizyjną. Charakterystyczne "zabki" na wykresie temperatury zmierzonej przez wewnętrzny czujnik są najprawdopodobniej wynikiem błędnej implementacji odczytu temperatury z rejestrów kamery. Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 4.9 pokazany jest wykres temperatury zarejestrowanej przez kamerę termowizyjną (kolor niebieski) oraz przez wewnętrzny czujnik w kamerze (kolor pomarańczowy). Kamera osiąga stan równowagi termicznej po około 42 minutach od momentu podłączenia zasilania. Maksymalna temperatura rejestrowana przez kamerę termowizyjną sięga wartości 45°C, wewnętrzny czujnik rejestruje temperaturę maksymalną o wartości 58°C. Zastanawiający jest przebieg temperatury zarejestrowany przez wewnętrzny czujnik (kolor pomarańczowy na wykresie). W przebiegu zaobserwować można okresowe, bardzo krótkie, momenty spadku temperatury. Te zaburzenia nie są obserwowane przez kamerę termowizyjną. Zaburzenia nie mają stałego okresu, ale częstotliwość ich występowania maleje wraz z czasem trwania eksperymentu oraz malejącym przyrostem temperatury. Nie umiem wytłumaczyć tego zjawiska. Nie sądzę, żeby było ono związane ze zmianami termodynamicznymi wewnątrz kamery - dynamika spadku temperatury jest zbyt duża i zbyt powtarzalna (spadek wynosi dokładnie 0.4°C). Niewykluczone, że jest to błąd dyskretyzacji i przeliczania temperatury kamery podawanej w postaci bitowej w rejestrach kamery. Zaburzenia mają tak niewielką amplitudę, że uznałem, że nie wpływają one na wiarygodność całego eksperymentu.

TEST III - powtarzalność dryftu oraz zwiększona prędkość rejestracji

W tym teście prędkość akwizycji ramek podczas rozgrzewania kamery została zwiększona dziesięciokrotnie. Poza tym eksperyment ten przebiegał w ten sam sposób, co poprzedni. Rejestrowane były obrazy wzorca i wyznaczane były trajektorie środków markerów. Temperatura kamery mierzona była za pomocą kamery termowizyjnej oraz za pomocą wewnętrznego czujnika kamery. Test został powtórzony 4 krotnie, w celu zbadania powtarzalności trajektorii środków markerów. Zwiększona prędkość akwizycji nie wpłynęła na dynamikę wzrostu temperatury kamery. Kamera rozgrzewała się do tych samych temperatur, w bardzo podobnym czasie. Natomiast zarejestrowane trajektorie centrów markerów różnią się znacząco od siebie. Na rysunku 4.10 pokazałem wyniki dwóch spośród wykonanych 4 testów.



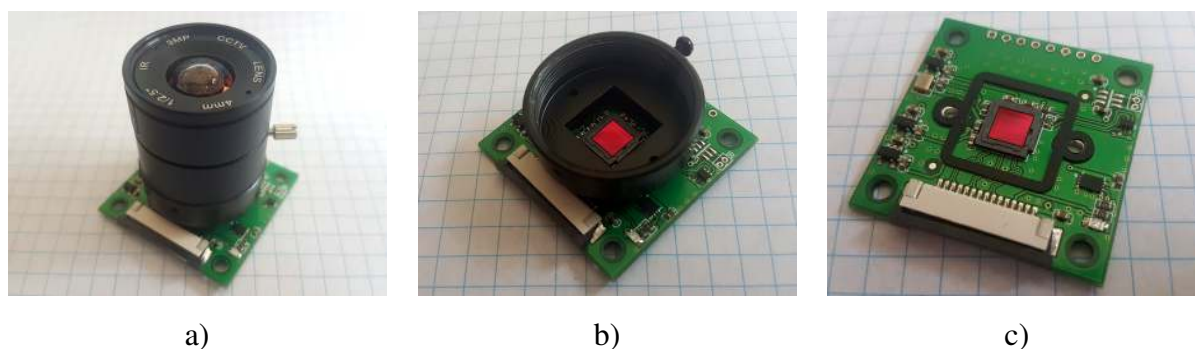
Rysunek 4.10: Na obrazach a) i b) zilustrowane są trajektorie środków markerów będące wynikiem dryftu dla 2 najbardziej różniących się od siebie serii rozgrzewania się kamery dla ramek rejestrowanych z prędkością 10 FPS. Trajektorie odpowiadających sobie markerów są znacząco różne. Na obrazu b) widać o wiele większy wpływ składowej poziomej, trajektorie ulegają także zakrzywieniu.

Wnioski

Z punktu widzenia zjawisk cieplnych, kamera IDS UI-62180SE ma dwa tryby pracy. Po włączeniu zasilania, ale bez rejestracji obrazów, kamera rozgrzewa się w ciągu 42 minut do stabilnej temperatury. Od momentu startu akwizycji ramek, kamera generuje dodatkową porcję ciepła i po kolejnych 30 minutach osiąga stabilną temperaturę. Badana kamera rozgrzewa się do najwyższych temperatur spośród wszystkich badanych modeli kamer. Najwyższa zarejestrowana podczas testów temperatura (czujnik wewnętrzny) wyniosła aż 58.5°C. Czas rozgrzewania się kamery także jest najdłuższy spośród wszystkich badanych kamer. Rejestrowany dryft temperaturowy osiąga znaczne wartości, sięgające aż 0,36mm w płaszczyźnie wzorca i wykazuje brak powtarzalności w kolejnych wykonywanych testach.

4.1.3 Kamera ArduCam IMX219 8MPix

Kamera ArduCam [126] (Rys. 4.11 a) podobnie jak kamera RaspberryPi Camera [127] nie posiada obudowy. Obydwie kamery używają tego samego sensora CMOS Sony IMX219 [129]. Kamera dostarczona jest jako płytkę drukowaną z bezpośrednio wlutowanym sensorem. W płytce znajdują się dwa otwory służące do montażu gniazda obiektywu C-Mount (Rys. 4.11 b i c). Kamera dostarczona jest razem z obiektywem o długości ogniskowej 4mm. Kamera nie jest wyposażona w czujnik temperatury, wszystkie pomiary wykonywałem przy użyciu kamery termowizyjnej.



Rysunek 4.11: Kamera ArduCam użyta w testach: a) wygląd kamery ArduCam [126], b) gniazdo obiektywu C-Mount [128], c) matryca Sony IMX219 [129] wlutowana jest bezpośrednio w płytkę drukowaną.

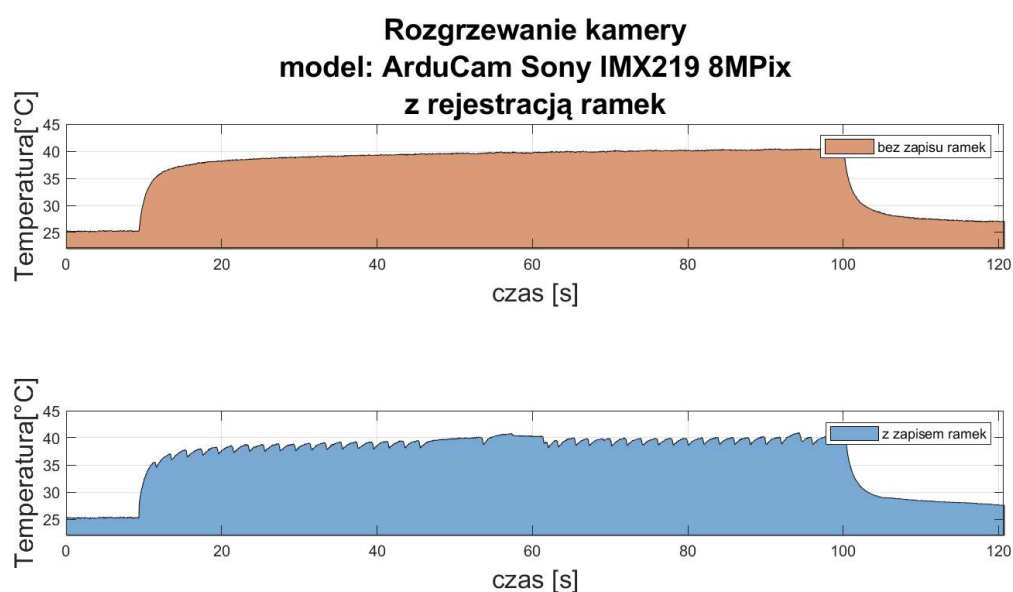
TEST I - rozgrzewanie bez rejestracji obrazów

W tym teście badałem temperaturę kamery podłączonej do zasilania i pozostającej w stanie *stand-by*. W odróżnieniu od kamer Grashopper 2.0 [101] oraz IDS UI-6218SE [106], kamera ArduCam [126] pozostając w tym stanie nie generuje ciepła (które mogłoby zostać zarejestrowane przez kamerę termowizyjną). Moduł zaczyna generować ciepło dopiero w momencie, w którym dostaje polecenie rejestracji ramek.

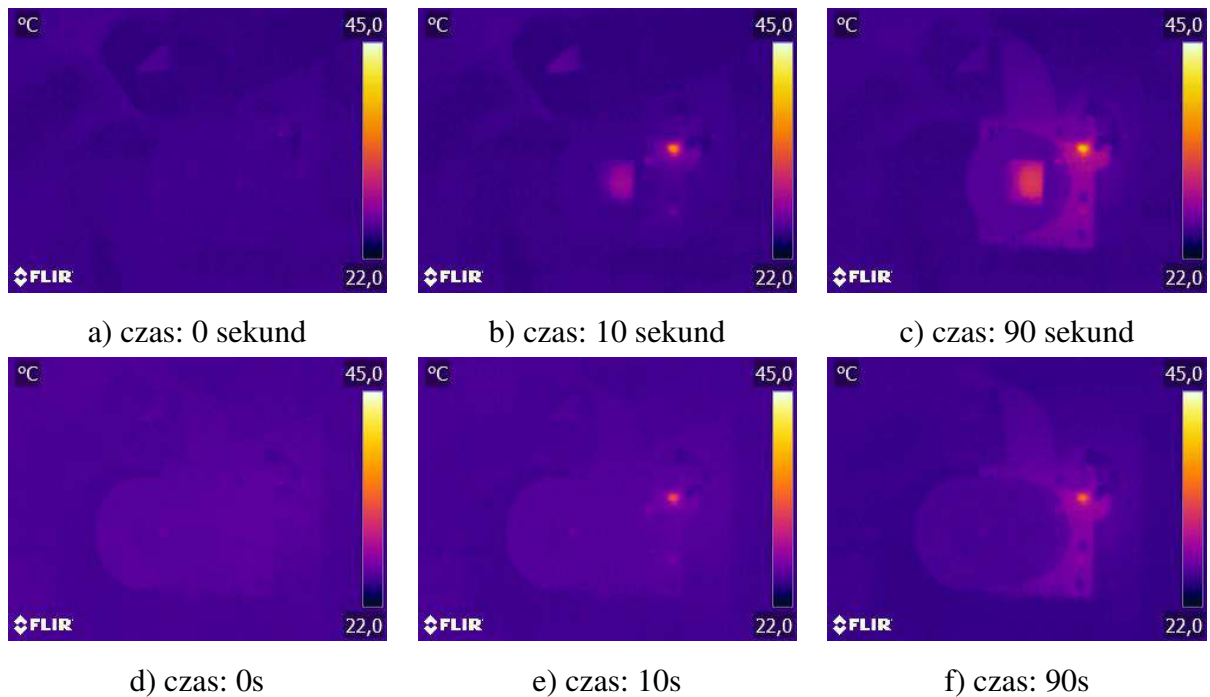
TEST II - rozgrzewanie z rejestracją obrazów z prędkością 0,5 FPS

W tym teście kamera rejestruje nieprzerwanie ramki z prędkością 0,5 ramki na sekundę. Test z prędkością 1 ramki na sekundę nie był możliwy do przeprowadzenia, gdyż kamera nie nadążała z zapisem ramek. Przy prędkości 0,5 ramki na sekundę kamera "zgubiła" kilka ramek, ale uznałem, że nie wpłynęło to znacząco na wynik testu. Test trwał do momentu, w którym kamera osiągnęła stan równowagi termicznej i jej temperatura przestała wzrastać. Mierzony był czas rozgrzewania się oraz temperatura kamery. W przypadku tego modelu wykonałem dodatkowy test, w którym kamera rejestrowała obrazy, ale nie przysyłała ich do zapisania na dysk. Na wykresach (Rys. 4.12) pokazałem różnice w zarejestrowanych temperaturach. Na wykresie pokazującym temperaturę kamery, która rejestruje ramki i zapisuje je na dysku (wykres niebieski) widać charakterystyczne "ząbki". Każdy "ząbek" zbiega się

w czasie z rejestracją pojedynczej ramki. Drugi wykres (Rys. 4.12 wykres pomarańczowy), który pokazuje temperaturę kamery rejestrującej obrazy bez zapisywania ich na dysku, wykres ma "gładki" przebieg. Charakterystyczne "zębki" występują zatem w momencie, w którym zarejestrowany obraz przesyłany jest na dysk. W czasie przesyłania ramki temperatura kamery odrobinę maleje i w efekcie na wykresie widać periodyczne zaburzenia. Dodatkowo, na wykresie (Rys. 4.12 wykres niebieski) widać także, kiedy kamera "zgubiła" ramki, pomiędzy 48s a 60s widać zaburzenie w pomiarze temperatury. Zaburzenie to pokrywa się z momentem, w którym kamera nie zdążyła zapisać ramek na dysku.

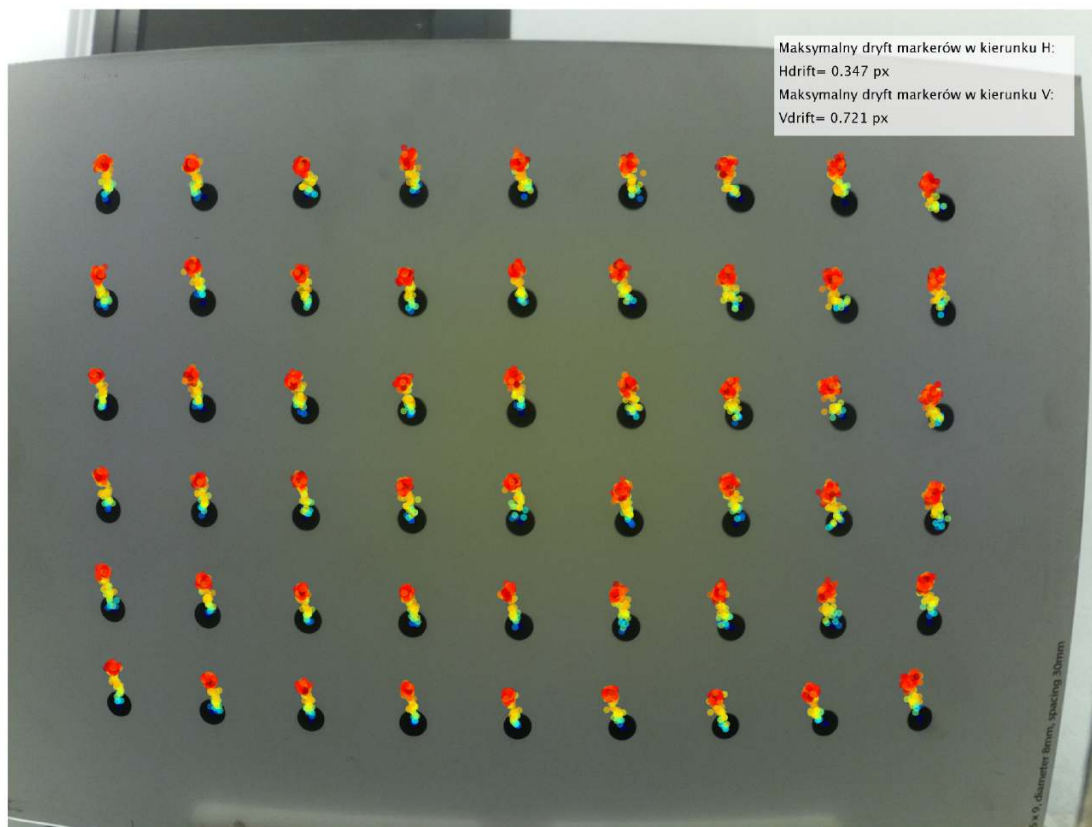


Rysunek 4.12: Wykres temperatury zarejestrowanej przez kamerę termowizyjną nagrzewającej się kamery ArduCam [126]. Na wykresie pomarańczowym pokazana jest temperatura kamery rejestrującej obrazy, ale bez zapisywania ich na dysku. Na wykresie pomarańczowym pokazano temperaturę kamery rejestrującej obrazy, które są też zapisywane na dysku. Widać, że w momencie zapisywania obrazów na dysku temperatura kamery odrobinę maleje, by po chwili znowu wzrosnąć. Konsekwencją są charakterystyczne "zębki" na wykresie. Pomiędzy 48s a 60s widać zaburzenie (wykres niebieski), które pokrywa się w czasie z momentem "zgubienia" ramek przez kamerę.



Rysunek 4.13: Na obrazkach pokazano obraz zarejestrowany przez kamerę termowizyjną przedstawiający rozgrzewającą się kamerę ArduCam [126]: a) - c) bez obiektywu, e) - f) z obiektywem. Zakres skali temperatury 22°C - 45°C.

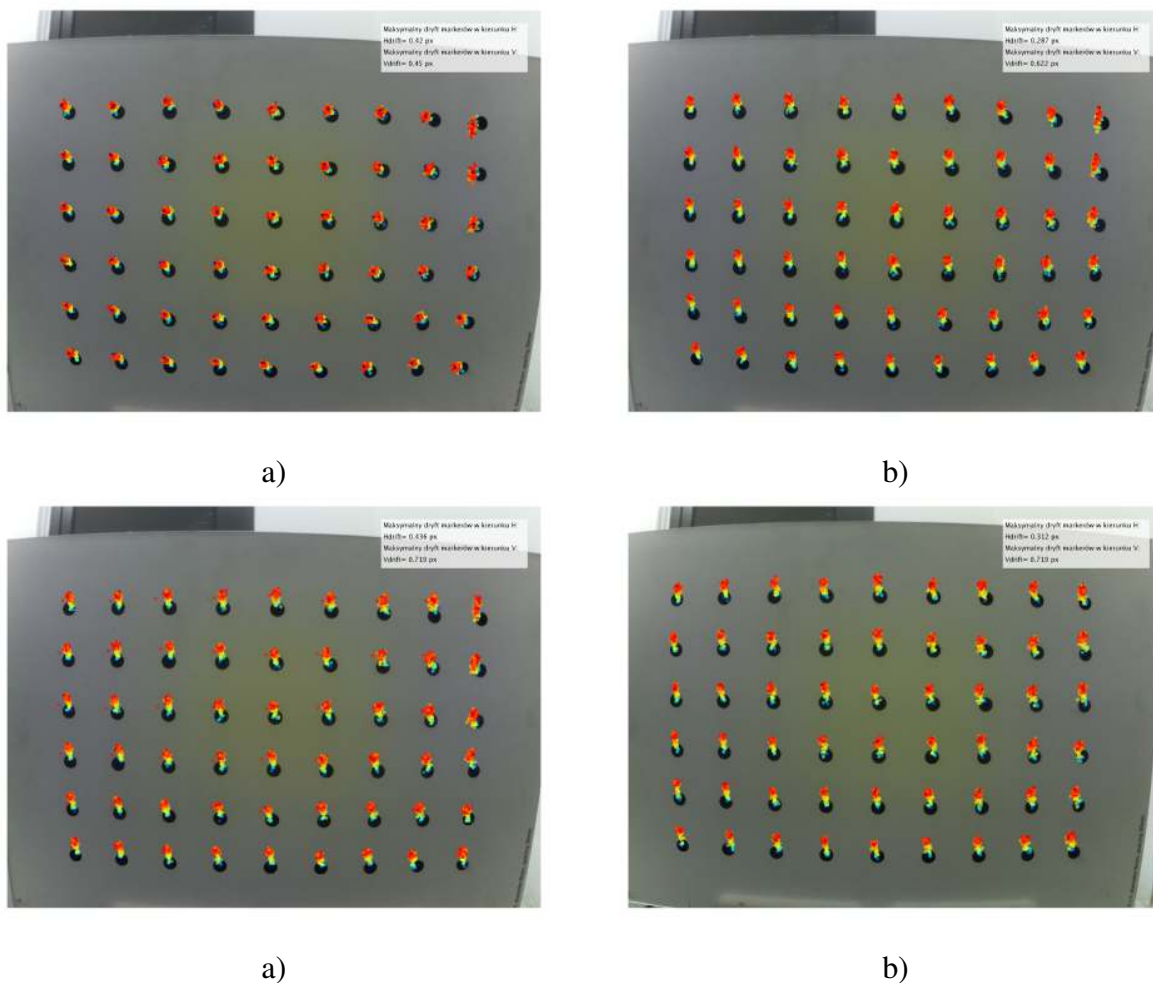
Niezależnie od tego, czy kamera zapisuje ramki czy też nie, po około 90s jej temperatura stabilizuje się. Przyrost temperatury wynosi około 17°C. Na rysunku 4.13 a) - c) pokazałem zarejestrowany przez kamerę termowizyjną rozkład temperatury na powierzchni badanej kamery ze zdjętym obiektywem. Widać, że najcieplejszy punkt znajduje się w prawym górnym rogu kamery. Punkt ten najszybciej zaczyna się też nagrzewać. Drugim obszarem o podwyższonej temperaturze jest matryca. Na rysunku 4.13 d) - f) pokazałem ten sam test, ale z założonym obiektywem. Test trwał około 90 sekund i w tym czasie nie zarejestrowałem zmiany temperatury obiektywu. Na rysunku 4.14 widać trajektorie centrów markerów zarejestrowane podczas testu. Każde kolejne przemieszczenia środków markerów przeskalowane są 200 razy w celu lepszego zobrazowania dryftu temperaturowego. Maksymalne przesunięcie markerów w kierunku poziomym wyniosło $H_{drift} = 0,347px$, a w kierunku pionowym $V_{drift} = 0,721px$, co po przeliczeniu na mm daje: $H_{drift} = 0,04mm$ oraz $V_{drift} = 0,09mm$. Dryft środków markerów jest w miarę jednorodny, dominuje przesunięcie środków markerów "ku górze". Efekt skalowania macierzy markerów jest w zasadzie niewidoczny.



Rysunek 4.14: Trajektorie środków markerów na obrazach zarejestrowanych przez rozgrzewającą się kamerę ArduCam. Środki markerów reprezentowane są przez kolorowe punkty (przemieszczenie środków przeskalowane jest 200 krotnie).

TEST III - powtarzalność dryftu oraz zwiększona prędkość rejestracji

Badana kamera nie była w stanie zapisywać ramek z prędkością 10 ramek na sekundę. Maksymalna prędkość, przy której kamera nadążała rejestrować i przysyłać obrazy na dysk wyniosła 0.5 FPS (ramka co 2s). W związku z tym test wpływu prędkości rejestracji ramek nie mógł zostać przeprowadzony. Wykonałem drugą część testu i zbadałem powtarzalność dryftu temperatury. Na rysunku 4.15 zaprezentowałem wyniki 4 serii rozgrzewania się kamery. Wyniki wydają się zbliżone do siebie. Dominujący jest dryft markerów w kierunku pionowym. Maksymalny dryft w kierunkach poziomych i pionowym utrzymuje się na podobnym poziomie i nie przekracza 0,8 piksela.



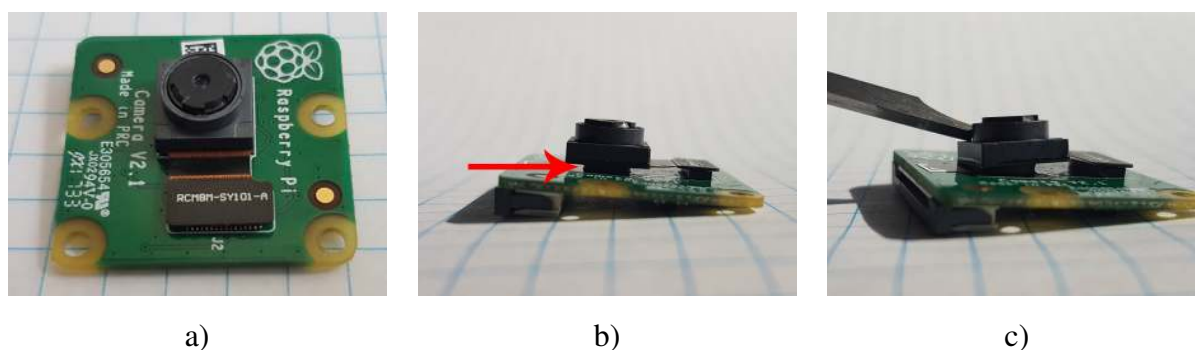
Rysunek 4.15: Na obrazach a) - d) zilustrowano trajektorie markerów będące wynikiem dryftu temperaturowego dla 4 serii rozgrzewania się kamery dla ramek rejestrowanych z prędkością 0,5 FPS.

Wnioski

Kamera ArduCam charakteryzuje się najmniejszym dryftem temperaturowym spośród wszystkich badanych przez mnie kamer. Zachowanie rozgrzewającej się kamery jest także dosyć powtarzalne, środki markerów "poruszają" się po bardzo podobnych trajektoriach podczas powtarzanych eksperymentów. Kamera bardzo szybko osiąga stan równowagi termicznej, po około 90 sekundach jej temperatura jest już w zasadzie stała. Po 20 sekundach jej temperatura wzrasta do poziomu około 90% temperatury maksymalnej. Zarejestrowany dryft środków markerów nie przekracza 0,8 piksela, co dla badanego wzorca przekłada się na niecałe 100 μ m przesunięcia w płaszczyźnie wzorca. Tak niewielki wpływ rozgrzewania się kamery na rejestrowany przez nią obraz spowodowany jest niewielkimi gabarytami samej matrycy, a także sposobem montażu matrycy, która jest bezpośrednio przylutowana do płytki drukowanej, bez żadnych elementów pośrednich.

4.1.4 Kamera RaspberryPi Camera v2 8MPix3

Kamera RaspberryPi Camera [127] nie posiada obudowy, dostarczona jest jako sensor przyklejony na płytce drukowanej (Rys. 4.16 a). Bezpośrednio na płycie znajduje się złącze CSI (ang. *Camera Serial Input*) do połączenia z mikrokontrolerem typu RaspberryPi [125]. Kamera wykorzystuje kolorową matrycę Sony IMX219 1/4" [129]. Matryca kamery przyklejona jest do płytki drukowanej za pomocą piankowej taśmy dwustronnej (Rys. 4.16 b) i połączona z płytką drukowaną za pomocą elastycznej taśmy przewodów. Z matrycą zintegrowany jest jednosoczewkowy mikroobiektyw. Przyklejenie matrycy do płytki za pomocą piankowej taśmy dwustronnej powoduje, że obudowa matrycy jest podatna i po lekkim dociśnięciu zmienia swoje położenie (Rys. 4.16 c). Jest to niedopuszczalne, jeśli chodzi o zastosowanie w precyzyjnych skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym. Niemniej jednak cena kamery (około 100 PLN) jest na tyle atrakcyjna, że zdecydowałem się wykonać jej testy rozgrzewania się. Kamera mogłaby znaleźć zastosowanie w niskobudżetowym projekcie skanera 3D z oświetleniem strukturalnym. Moduł kamery nie został wyposażony w czujnik temperatury, dlatego wszystkie pomiary temperatury wykonałem przy użyciu kamery termowizyjnej.



Rysunek 4.16: Kamera RaspberryPi Camera użyta w testach: a) wygląd kamery RaspberryPi Camera [127], b) matryca kamery przyklejona jest do płytki drukowanej za pomocą elastycznej piankowej taśmy dwustronnej, c) naciśnięcie na matrycę wywołuje jej pochylenie, ponieważ piankowa taśma jest elastyczna.

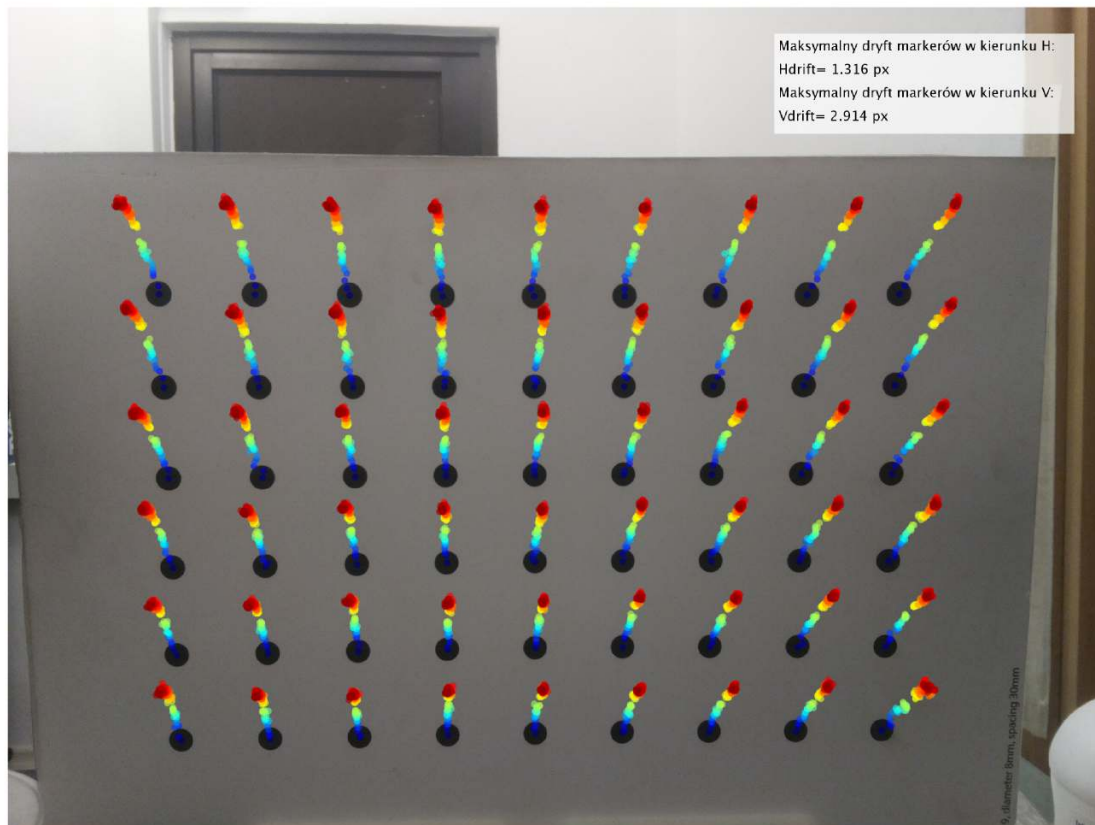
TEST I - rozgrzewanie bez rejestracji obrazów

Zachowanie kamery jest identyczne z modelem ArduCam. Kamera RaspberryPi Camera [127] pozostając w stanie *stand-by* nie generuje ciepła (które mogłoby zostać zarejestrowane przez kamerę termowizyjną). Moduł zaczyna generować ciepło dopiero w momencie, w którym zaczyna rejestrować ramki.

TEST II - rozgrzewanie z rejestracją obrazów z prędkością 1 FPS

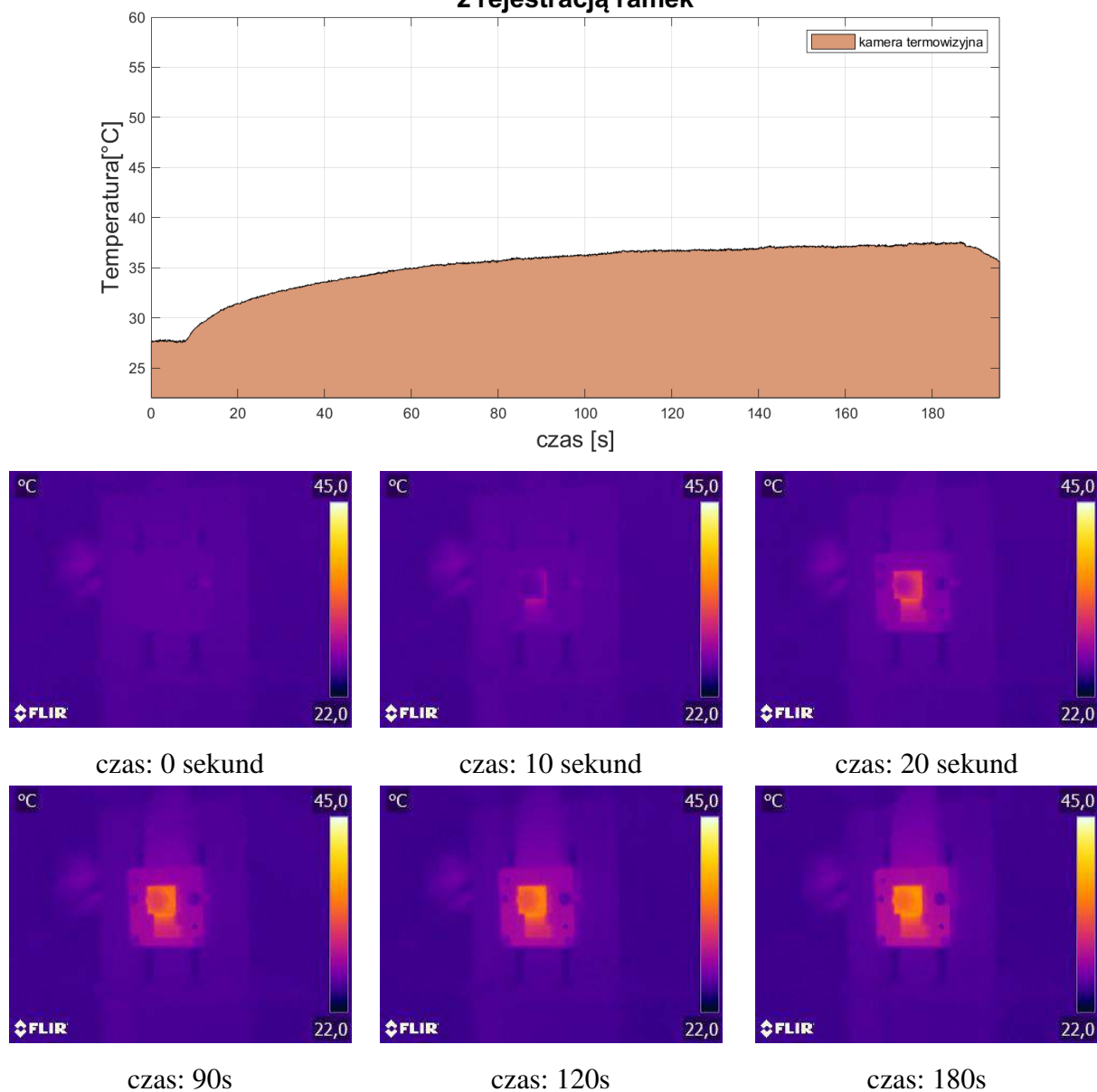
W tym teście kamera rejestruje ramki z prędkością 1 ramki na sekundę (1 FPS). Na wykresie (Rys. 4.18) pokazany jest wykres maksymalnej temperatury kamery, zmierzonej przez kamerę termowizyjną. Poniżej znajdują się obrazki z kamery termowizyjnej pokazujące proces

rozgrzewania się kamery. Widać, że kamera osiąga równowagę termiczną już po niecałych 3 minutach od momentu rozpoczęcia transferu ramek. Przyrost temperatury kamery to około 10°C . Rozkład temperatury jest w zasadzie jednorodny na powierzchni całej obudowy matrycy. Płytkę drukowaną podczas tego testu nie nagrzewa się znacząco, ponieważ dwustronna taśma samoprzylepna izoluje przepływ ciepła od matrycy do płytki.



Rysunek 4.17: Wizualizacja trajektorii środków markerów na obrazach zarejestrowanych przez rozgrzewającą się kamerę RaspberryPi Camera [127]. Środki markerów reprezentowane są przez kolorowe punkty (przemieszczenie środków przeskalowane jest 100 krotnie).

Rozgrzewanie kamery
model: RaspberryPi Camera v2 8MPix
z rejestracją ramek



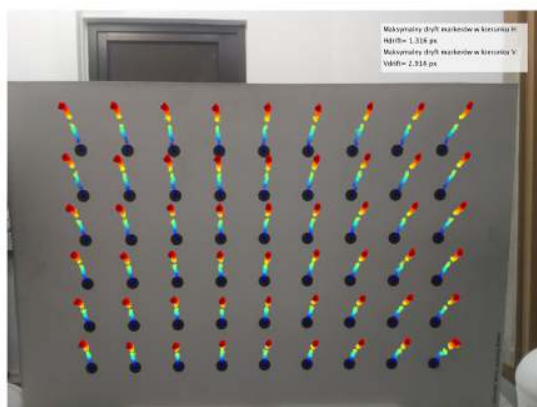
Rysunek 4.18: Na górze: wykres ilustrujący pomiar temperatury na powierzchni kamery (za pomocą kamery termowizyjnej), podczas rozgrzewania się kamery. Poniżej: ujęcia z kamery termowizyjnej pokazujące rozkład temperatur na powierzchni kamery podczas rozgrzewania się kamery (zakres skali temperatury 22°C - 45°C).

Na rysunku 4.17 pokazałem trajektorię środków markerów, zarejestrowaną podczas testu. Przyrosty przesunięć w kolejnych obrazach zostały przeskalowane 100 krotnie. Maksymalne przesunięcie środków markerów w dziedzinie obrazu, w kierunku poziomym wyniosło $H_{drift} = 1,316px$, a w kierunku pionowym $V_{drift} = 2,914px$. Po przeliczeniu tych wartości do milimetrów, maksymalne przesunięcie w poziomie wynosi $H_{drift} = 0,18mm$, a w pionie

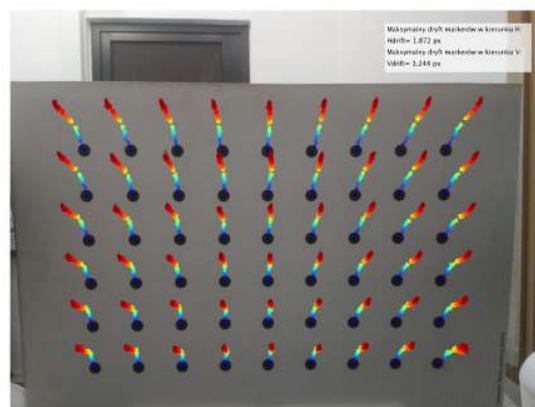
$V_{drift} = 0,40\text{mm}$, w płaszczyźnie wzorca. Analizując trajektorie środków markerów można zauważyć dominujące przesunięcie centrów markerów w kierunku pionowym oraz rozszerzanie się macierzy markerów w obydwu kierunkach.

TEST III - powtarzalność dryftu oraz zwiększona prędkość rejestracji

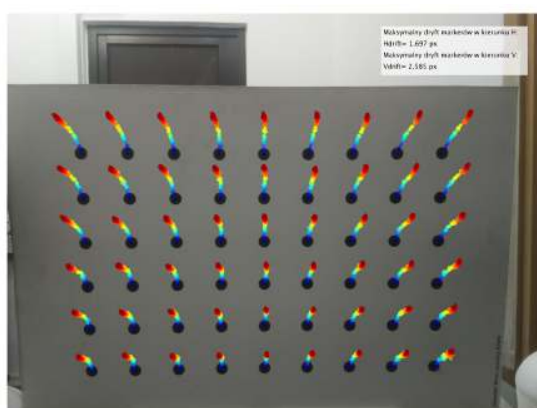
W przypadku kamery RaspberryPi Camera, nie byłem w stanie osiągnąć stabilnego przetwarzania ramek dla prędkości 10 FPS. W rzeczywistości, maksymalna prędkość, przy której kamera nie "gubiła" ramek podczas rejestracji, to jedna ramka na sekundę. Dlatego w teście nr III nie udało mi się przebadać wpływu prędkości akwizycji ramek na efekty termiczne, zbadałem natomiast powtarzalność procesu rozgrzewania się kamery. Na rysunkach 4.19 a) - d) pokazałem wyniki z 4 testów rozgrzewania się kamery. Każdy test trwał 180 sekund, a kamera rejestrowała ramki z prędkością 1 ramki na sekundę. Podobnie, jak w poprzednim teście, kolejne przyrosty położenia centrów markerów zostały przeskalowane 100 razy. Wyniki testu wskazują, że zachowanie się kamery podczas rozgrzewania jest podobne. Dominujący jest ruch środków markerów w kierunku pionowym oraz rozszerzanie się całej macierzy markerów w kierunkach poziomym i pionowym. Obliczone maksymalne wartości dryftu mają podobną wartość w powtarzanych eksperymentach.



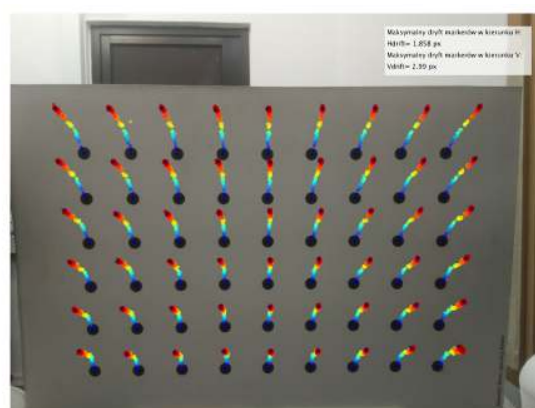
a)



b)



a)



b)

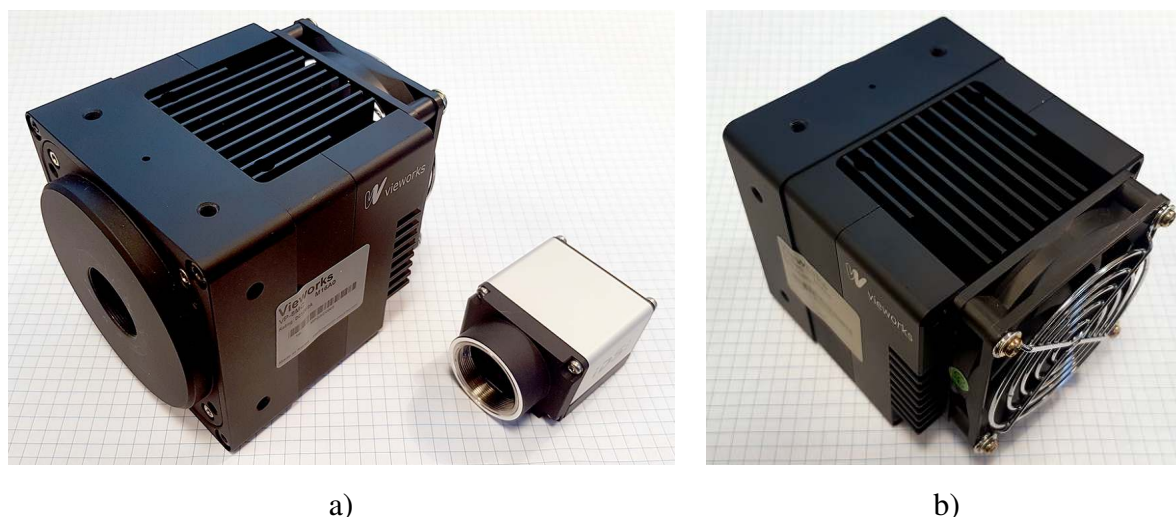
Rysunek 4.19: Na obrazach a) - d) zilustrowane są trajektorie środków markerów będące wynikiem temperaturowego dryftu obrazu dla 4 serii rozgrzewania się kamery dla ramek rejestrowanych z prędkością 1 FPS. Trajektorie odpowiadających sobie markerów wykazują podobne trendy, widoczne są jedynie niewielkie różnice.

Wnioski

Kamera RaspberryPi Camera wykazuje największą zależność dryftu obrazu od wzrostu temperatury wywołanego procesem rozgrzewania się. Niewątpliwie spowodowane jest to sposobem montażu matrycy do płytki drukowanej modułu kamery. Obserwowany dryft ma podobny charakter i wydaje się być powtarzalny dla kolejnych serii pomiarowych. Kamera rozgrzewa się bardzo szybko, już po około 3 minutach osiąga swój stan równowagi termicznej, a jej temperatura wzrasta o około 10°C . Prędkość rozgrzewania się związana jest na pewno z niewielkimi gabarytami kamery oraz faktem, że nie jest ona umieszczona w obudowie.

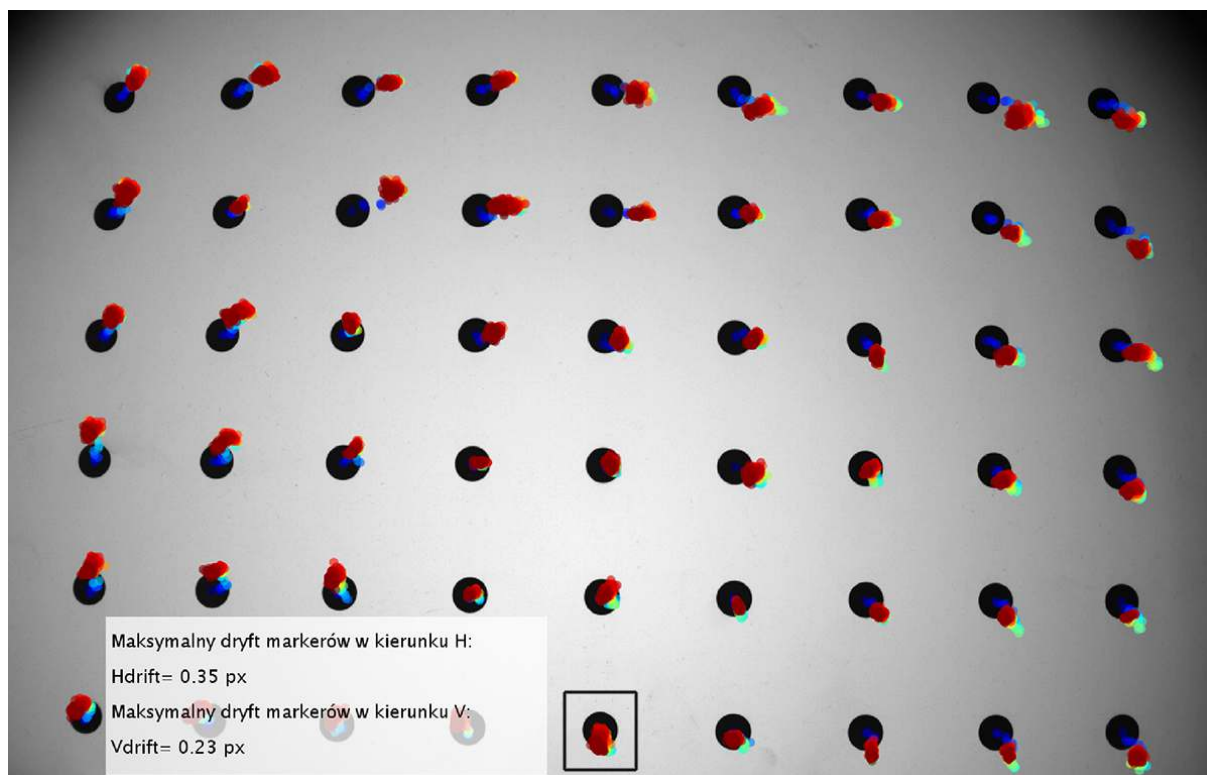
4.1.5 Kamera Vieworks VP-8MC M16A0

Kamera Vieworks VP-8MC wyposażona jest w szaroodcieniowy sensor CCD KAI-08051 o rozdzielczości 3296 na 2472 pikseli oraz w wewnętrzny stabilizator temperatury. Kamera ma zdecydowanie największe gabaryty spośród wszystkich badanych przez mnie modeli kamer (patrz Rys. 4.20 a). Jej konstrukcja bazuje na masywnej bryle wykonanej z anodowanego na czarno aluminium. Z tyłu kamery widać radiator oraz dołączony wiatrak chłodzący. Badany przez mnie model wyposażony został w protokół CameraLink do połączenia z komputerem. Protokół ten pozwala na emulowanie wirtualnego portu szeregowego, za pomocą którego można komunikować się z dodatkowymi systemami kamery. W tym przypadku jest to system do regulacji temperatury sensora, który pozwala na zadawanie temperatury sensora (w zakresie od -10°C do $+50^{\circ}\text{C}$), włączenie i wyłączenie wiatraka chłodzącego, odczytywanie temperatury sensora oraz samej kamery, a także włączenie i wyłączenie całego systemu chłodzącego.



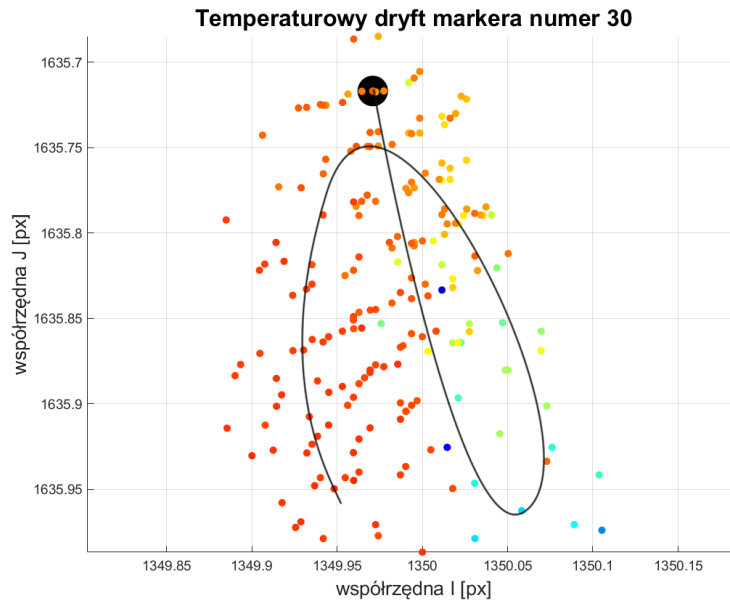
Rysunek 4.20: Kamera VP-8MC użyta w testach: a) Porównanie gabarytów kamery VP-8MC [96] z gabarytami kamery IDS UI-62180 [106]. b) Wiatrak i masywny radiator do chłodzenia kamery.

Test rejestracji temperaturowego dryftu kamery przeprowadziłem dla wymuszonej temperatury sensora równej 5°C oraz włączonego wiatraka chłodzącego. Za pomocą dołączonego przez producenta SDK zapisywałem wartości temperatury kamery oraz sensora. Ramki rejestrowałem z częstotliwością 8 FPS. Na rysunku 4.21 pokazałem temperaturowy dryft obrazu zarejestrowany przez kamerę. Dryft został przeskalowany 200 krotnie. Rozgrzewanie trwało około 30 minut, a temperatura kamery wzrosła o około 16°C .



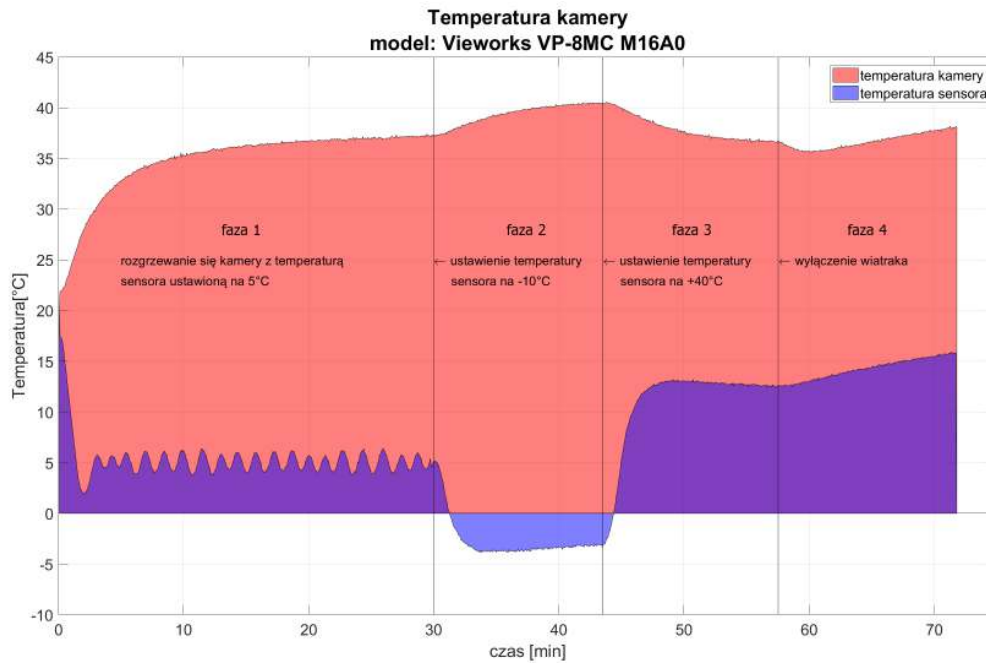
Rysunek 4.21: Wizualizacja trajektorii środków markerów na obrazach zarejestrowanych przez rozgrzewającą się kamerę VP-8MC [96]. Środki markerów reprezentowane są przez kolorowe punkty (przesunięcie środków przeskalowane jest 200 krotnie). Trajektoria markera numer 30, zaznaczonego czarną ramką, została dodatkowo powiększona i zaprezentowana w formie wykresu na rysunku 4.22.

Trajektorie poszczególnych markerów mają bardzo zróżnicowany kształt. Analizując wszystkie trajektorie, zauważyć można niewielki obrót całej macierzy znaczników wokół jej środka, zgodnie z ruchem wskazówek zegara. Trudno wnioskować o skalowaniu macierzy znaczników, gdyż dryft obrazu jest bardzo mały. Interesująca jest także trajektoria pojedynczych markerów. Na rysunku 4.22 pokazałem dryft jednego z markerów (zaznaczony na rysunku 4.21 czarną ramką) w powiększeniu. Zauważyć można, że ślad zakreślony przez środek markera porusza się po dość skomplikowanej krzywej i zatacza pętlę. Maksymalny temperaturowy dryft w kierunku poziomym wyniósł $H_{drift} = 0,35px$, a w kierunku pionowym $V_{drift} = 0,23px$. Odpowiada to przesunięciom o wartościach $H_{drift} = 0,035mm$ i $V_{drift} = 0,023mm$ w płaszczyźnie wzorca. Jest to zdecydowanie najmniejszy wynik ze wszystkich badanych kamer. Dzięki swoim gabarytom oraz obecności wentylatora chłodzącego, kamera rozgrzewa się najmniej ze wszystkich badanych kamer.



Rysunek 4.22: Wizualizacja trajektorii środków markerów dla markera numer 30. Czarną linią zaznaczono uśrednioną i wygładzoną trajektorię, po której poruszały się środki markerów wraz ze wzrastającą temperaturą kamery. Czarna kropka reprezentuje pozycję markera tuż po włączeniu kamery.

W dalszej części przebadalem także wpływ zmiany ustawionej temperatury sensora, na rejestrowany przez kamerę obraz. Test zaczął się w ten sam sposób, co test z rozgrzewaniem się kamery, ale po 30 minutach od rozpoczęcia testu, wymusiłem zmianę temperatury sensora na -10°C (minimalna temperatura, którą można ustawić), po dalszych 15 minutach na $+40^{\circ}\text{C}$ (maksymalna temperatura, którą można ustawić), a po kolejnych 15 minutach dodatkowo wyłączyłem wentylator. Temperatura kamery oraz sensora zarejestrowana podczas tego eksperymentu została pokazana na rysunku 4.23. Kamera cały czas rejestrowała ramki z częstotliwością 8FPS.

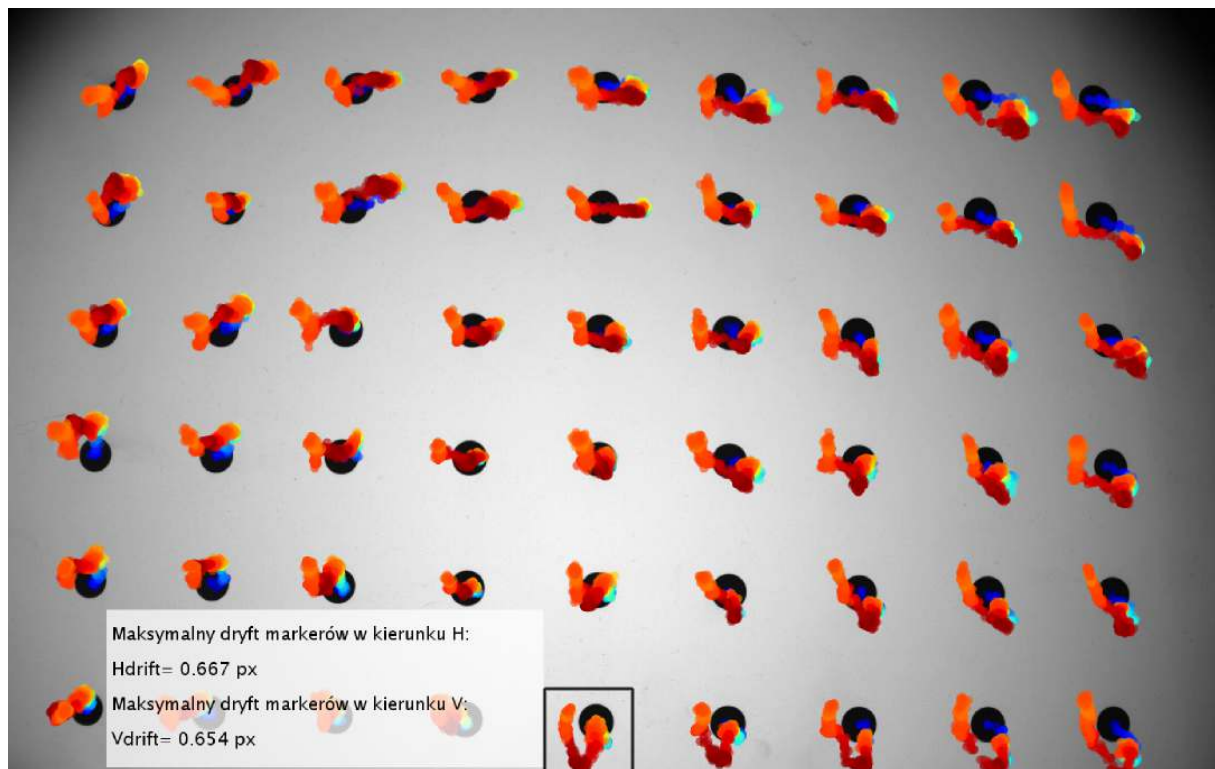


Rysunek 4.23: Temperatura kamery (na czerwono) oraz sensora (na niebiesko) zarejestrowana podczas testu ze zmianą temperatury sensora.

W pierwszej fazie rozgrzewania się kamery, temperatura w dość naturalny sposób podwyższa się, by osiągnąć swoją wartość ustaloną. Z kolei temperatura sensora bardzo szybko spada, by już po około 3 minutach od początku testu, zacząć oscylować wokół zadanej wartości 5°C. Amplituda oscylacji temperatury sensora wynosi około 2,5°C. Analiza tej fazy rozgrzewania się kamery może tłumaczyć "dziwne" zachowanie się środków obserwowanych markerów, zaprezentowane na rysunkach 4.21 i 4.22. Bardzo prawdopodobne jest, że początkowy dryft "do dołu" środka markera związany jest z bardzo dynamiczną zmianą temperatury sensora oraz z przeregulowaniem obserwowanym na samym początku tej fazy. Następnie obserwowany jest dryft środka markera "ku górze", z powrotem w kierunku pozycji z temperatury referencyjnej. W tym czasie temperatura sensora oscyluje wokół wartości zadanej. Dryft powrotny może być związany z faktem, że na tym etapie obudowa kamery nie zdążyła się jeszcze podgrzać na tyle, by wpłynąć na kształt trajektorii. Kamera rozgrzewa się jedynie lokalnie, powodując odkształcenia, których efektem jest dryft środków obserwowanych markerów "ku górze". W następnym etapie obudowa kamery zaczyna się już podgrzewać na tyle, że jej odkształcenia termiczne mają dominujący wpływ na charakter dryftu, czego efektem jest ponowna zmiana kierunku dryftu na "ku dołowi". Podobne zachowanie, z nagłą zmianą trajektorii ruchu markerów obserwowane było w przypadku kamery Grashopper 2.04.4 oraz IDS UI-62180 4.10.

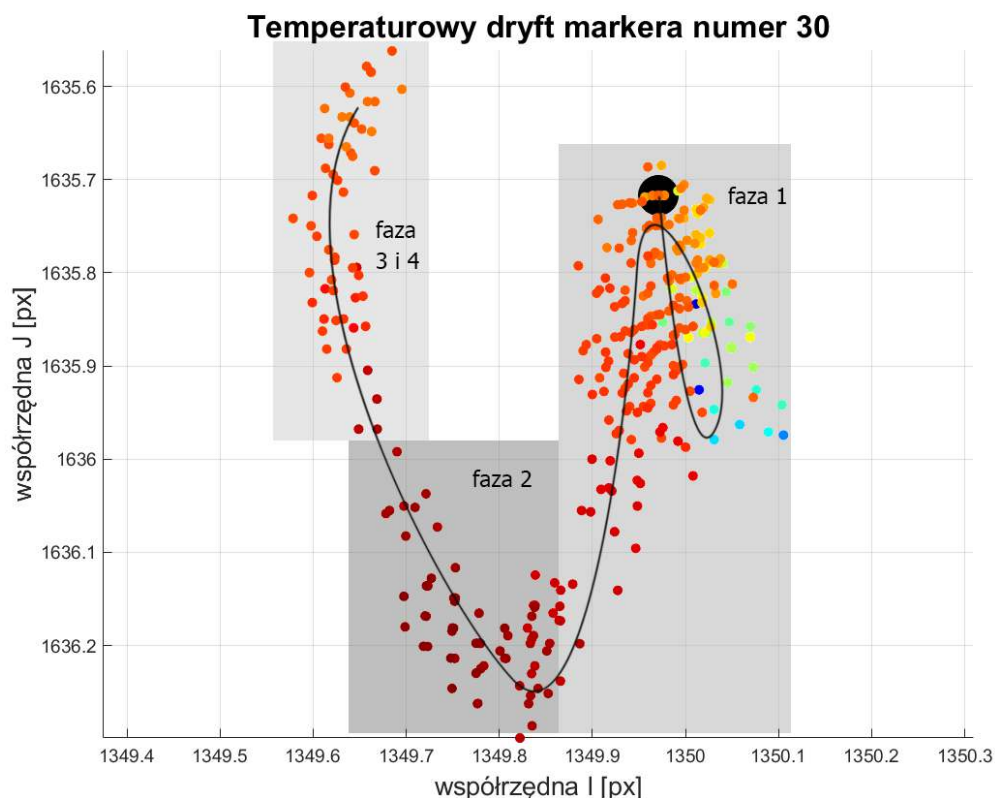
Po pierwszej fazie eksperymentu, wymusiłem zmianę temperatury sensora na -10°C . Na wykresie widać, że kamera nie zdołała osiągnąć tak niskiej temperatury. Sensor został ochłodzony do $-3,9^{\circ}\text{C}$, a potem jego temperatura nieznacznie wzrastała. Ten postępujący wzrost temperatury sensora tłumaczyć można dość charakterystycznym zjawiskiem obserwowanym w przypadku układów chłodzących wykorzystujących ogniwa Peltiera. Wykres temperatury sensora nie oscyluje wokół wartości zadanej, ponieważ regulator sterujący pracą ogniwa Peltiera nie jest w stanie osiągnąć zadanej temperatury i forsuje ogniwo maksymalnym możliwym prądem, starając się osiągnąć wartość zadaną. Duży prąd płynący przez ogniwo skutkuje powstaniem dużej różnicy temperatur pomiędzy stroną ciepłą i zimną ogniwa, ale jednocześnie strona zimna zaczyna się ogrzewać od strony ciepłej w wyniku niedostatecznego odprowadzenia ciepła ze strony ciepłej. W konsekwencji obserwujemy postępujący nieznaczny wzrost temperatury sensora (czyli strony zimnej ogniwa Peltiera). W tym samym czasie temperatura kamery wzrasta i osiąga wartość około 41°C .

W kolejnej fazie eksperymentu wymusiłem zmianę temperatury sensora na $+40^{\circ}\text{C}$. Układ sterujący temperaturą sensora wymusił zmianę polaryzacji prądu płynącego przez ogniwo Peltiera, które tym razem zaczęło ogrzewać sensor oraz chłodzić obudowę kamery. Temperatura sensora wzrosła do około $13,5^{\circ}\text{C}$ i zaczęła się powoli stabilizować na poziomie około $12,5^{\circ}\text{C}$. W tym czasie temperatura kamery spadła i zaczęła się stabilizować na poziomie około 37°C . W tym trybie układ regulujący temperaturę sensora ma za zadanie ogrzanie sensora, ale w konsekwencji ogrzewania, zimna strona ogniwa Peltiera zaczyna chłodzić obudowę kamery. Regulator forsuje ogniwo Peltiera maksymalnym prądem o odwrotnej polaryzacji, przez co strona ciepła ogrzewa sensor, a zimna chłodzi obudowę. Jednocześnie obudowa wraz z radiatorem owiewana jest przez wentylator powietrzem o temperaturze panującej w laboratorium. W konsekwencji układ regulacji temperatury nie ma na tyle dużej wydajności, by odpowiednio schłodzić obudowę i jednocześnie rozgrzać sensor. Po wyłączeniu wiatraka, na początku obserwowane jest dalsze schłodzenie obudowy kamery, ale po chwili temperatura kamery oraz sensora zaczyna rosnąć (co odpowiada zjawisku, w którym zimna strona ogniwa Peltiera zaczyna się nagrzewać w wyniku niedostatecznego schłodzenia strony ciepłej). Po około 4h (niewidoczne na wykresie) temperatury ustalają się na poziomie: temperatura kamery około 43°C , a sensora około 21°C .



Rysunek 4.24: Trajektorie środków markerów na obrazach zarejestrowanych przez kamerę VP-8MC podczas eksperymentu ze zmianą temperatury sensora.

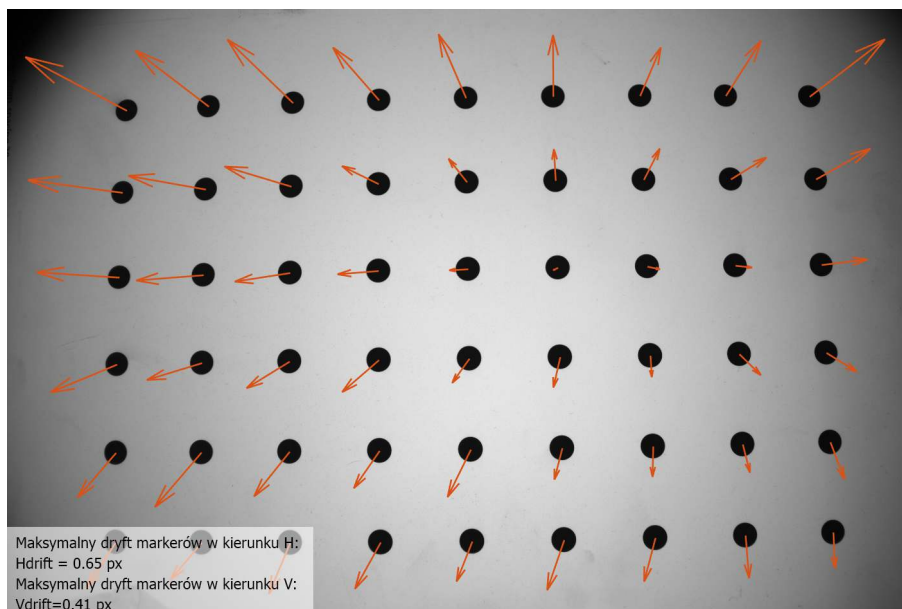
Przez cały czas trwania tego testu kamera rejestrowała obrazy wzorca. Na rysunku 4.24 zaprezentowałem temperaturowy dryft obrazu podczas eksperymentu. Na rysunku 4.25 pokazałem powiększoną trajektorię tego samego markera, co w eksperymencie z rozgrzewaniem się kamery. Na obydwu obrazach kolory znaczników odpowiadają temperaturze kamery. Widać, że trajektorie środków markerów zmieniają się w różnych fazach trwania eksperymentu. Pomimo dość dużych zmian temperatury kamery oraz sensora, maksymalny dryft obrazu osiąga stosunkowo niewielkie wartości ($H_{drift} = 0,068\text{mm}$ oraz $V_{drift} = 0,067\text{mm}$).



Rysunek 4.25: Trajektoria wyróżnionego markera dla kamery VP-8MC podczas testu ze zmianą temperatury sensora.

Ostatni eksperyment dotyczący kamery VP-8MC polegał na zarejestrowaniu temperaturowego dryftu kamery poddanej zmiennej temperaturze zewnętrznej. W tym celu posłużyłem się stanowiskiem z komorą termiczną, które szerzej opisałem w rozdziale 4.2. Najbardziej istotną cechą tego stanowiska jest fakt, że pozwala ono wymusić zmianę temperatury zewnętrznej kamery przy jednoczesnej niezmienniej temperaturze wzorca, który znajduje się poza komorą termiczną. Badaną kamerę zamknąłem w komorze termicznej i pozostawiłem włączoną na okres około jednej godziny, by osiągnęła stan równowagi termodynamicznej. Następnie zarejestrowałem jedną ramkę przedstawiającą wzorec w temperaturze referencyjnej. Potem zmieniłem temperaturę wewnątrz komory, zwiększając ją o $+5^{\circ}\text{C}$. Po ustabilizowaniu się temperatury wewnątrz komory oraz temperatury kamery zarejestrowałem kolejną ramkę przedstawiającą ten sam wzorec w niezmiennym położeniu względem kamery. Podczas trwania eksperymentu, system regulacji temperatury sensora pozostawał włączony i utrzymywał temperaturę sensora na tym samym poziomie 5°C . Na rysunku 4.26 zaprezentowałem wyniki eksperymentu. Tłem jest ramka zebrana w temperaturze referencyjnej, a końce strzałek reprezentują obliczone pozycje środków markerów w wyższej temperaturze (przesunięcie zostało przeskalowane 200 krotnie). Widać, że w wyniku zmiany

temperatury zewnętrznej kamery zaledwie o $+5^{\circ}\text{C}$, zarejestrowany obraz bardzo mocno się zmienił. Kierunki strzałek sugerują przeskalowanie macierzy markerów i rozszerzenie się jej. Jest to najprawdopodobniej spowodowane odkształceniem termicznym obudowy kamery, na skutek którego nastąpiła zmiana położenia obiektywu względem matrycy.



Rysunek 4.26: Przeskalowanie macierzy znaczników na skutek zmiany temperatury zewnętrznej kamery o $+5^{\circ}\text{C}$.

Wnioski

Kamera Vieworks VP-8MC odznacza się najmniejszą wartością temperaturowego dryftu obrazu powstałego na skutek rozgrzewania. Jest to niewątpliwie związane z wyposażeniem kamery w układ regulujący temperaturę sensora. Temperaturowy dryft obrazu podczas rozgrzewania w bardzo istotny sposób zależy od tego, jaka została ustawiona temperatura sensora. Najważniejsze wnioski płyną jednak z analizy wyników ostatniego eksperymentu, w którym wymusiłem zmianę temperatury całej kamery. Widać, że układ utrzymujący stałą temperaturę sensora nie kompensuje wpływu zmiennej temperatury zewnętrznej na rejestrowane obrazy. W konsekwencji, pomimo stałej temperatury sensora, zarejestrowany obraz ulega deformacjom termicznym. W dalszych podsumowaniach i rozważaniach nie zestawiam otrzymanych wyników z wynikami otrzymanymi dla innych kamer. Badana kamera VP-8MC nie znalazłaby raczej zastosowania w skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym. Głównie z powodów masywnej i ciężkiej konstrukcji, dużego poboru prądu, a także bardzo wysokiej ceny. Przeprowadzone przeze mnie testy miały za zadanie pokazać, że nawet wysokiej klasy kamery wyposażone w stabilizację temperaturową, nie są pozbawione efektu wpływu zmian temperatury na rejestrowany obraz. Stabilizacja temperatury sensora ma za zadanie

utrzymywać na niskim i niezmiennym poziomie szumy matrycy, ale nie kompensuje wpływu zmian temperatury na odkształcenia rejestrowanych obrazów.

4.1.6 Podsumowanie

Wyniki eksperymentów pokazują, że zjawisko rozgrzewania się kamer powinno być uwzględnione podczas projektowania skanerów 3D z oświetleniem strukturalnym. Wydawać by się mogło, że efekty tego zjawiska można pominąć, wymagając od użytkownika skanera odczekanie odpowiedniego czasu, po upływie którego skaner (a także kamera) osiągnie swój stan równowagi termicznej. Niestety, testy powtarzalności dryftu pokazują, że zjawisko rozgrzewania się kamery nie zawsze przebiega w ten sam sposób i może prowadzić do różnych efektów obserwowanych na rejestrowanych obrazach. Biorąc pod uwagę, że podczas kalibracji skanera 3D z oświetleniem strukturalnym, dla każdego piksela kamery obliczana jest wartość fazy, efekt braku powtarzalności podczas rozgrzewania może prowadzić do rozkalibrowania całego skanera.

W tabeli 4.2 zebrałem wyniki przeprowadzonych testów. W kolejnych wierszach wyszczególniłem:

- **Czas rozgrzewania** Czas, jaki upływa od momentu podłączenia zasilania kamery do osiągnięcia przez nią stabilnej temperatury. Czas ten mierzony jest podczas testów, w którym kamera rejestruje ramki z prędkością 1 FPS.
- T_{max}^1/T_{max}^2 Maksymalna zarejestrowana temperatura podczas testu rozgrzewania - temperatura, do jakiej rozgrzała się kamera po upływie **czasu rozgrzewania**. T_{max}^1 odpowiada temperaturze zmierzonej za pomocą kamery termowizyjnej, T_{max}^2 odpowiada temperaturze zmierzonej przez wewnętrzny sensor (o ile jest dostępny).
- H_{drift} Maksymalny dryft środków markerów w kierunku poziomym, w płaszczyźnie wzorca, zarejestrowany podczas 5 eksperymentów (wyniki testu nr II oraz testu nr III) przeskalanowany w milimetrach.
- V_{drift} Maksymalny dryft środków markerów w kierunku pionowym, w płaszczyźnie wzorca, zarejestrowany podczas 5 eksperymentów (wyniki testu nr II oraz testu nr III) przeskalanowany w milimetrach.
- **Powtarzalność dryftu** Subiektywna ocena powtarzalności dryftu, wydana na podstawie 5 eksperymentów rozgrzewania się kamery (wyniki testu nr II oraz testu nr III). Ocenie poddałem takie parametry, jak: zmienność wartości H_{drift} oraz V_{drift} , zmiana ogólnego trendu dryftu, zmiana kształtu trajektorii odpowiadających sobie markerów. Skala oceny: **brak powtarzalności** (zarejestrowane dryfty różnią się trendem, a odpowiadające sobie

trajektorie środków markerów znacząco różnią się od siebie) / **średnio powtarzalny** (ogólny trend dryftu jest zachowany, ale poszczególne trajektorie mogą się od siebie różnić) / **powtarzalny** (ogólny trend dryftu jest zachowany, poszczególne trajektorie środków markerów nie różnią się od siebie).

Tabela 4.2: Podsumowanie testów rozgrzewania się kamer

model kamery	Grasshopper 2.0 GS2-GE-50S5M-C	IDS UI-62180 SE-M-GL-R3	ArduCam IMX219 8MPix	RaspberryPi Camera v2 8MPix
czas rozgrzewania	22 min.	42 min.	2 min.	3 min.
T_{max}^1/T_{max}^2	48°C/55.5°C	45°C/58°C	41°C/X	37°C/X
H_{drift}	0,17mm	0,26mm	0,05mm	0,26mm
V_{drift}	0,16mm	0,46mm	0,09mm	0,45mm
powtarzalność dryftu	średnio powtarzalny	brak powtarzalności	powtarzalny	powtarzalny

Z analizy wyników wynika, że wysokiej klasy kamery cyfrowe mogą odznaczać się bardzo dużym wpływem rozgrzewania się na rejestrowane obrazy. Niepokojący jest brak powtarzalności dryftu temperaturowego, który w bezpośredni sposób może się przełożyć na pogorszenie jakości kalibracji skanera 3D z oświetleniem strukturalnym. Jednocześnie interesujący jest fakt obserwowania bardzo niewielkiego dryftu temperaturowego obrazu dla kamery ArduCam [126]. Spowodowane jest to najprawdopodobniej faktem, że matryca kamery przylutowana jest bezpośrednio do płytki drukowanej, kamera nie posiada obudowy, a do tego wydziela zdecydowanie mniej ciepła, niż kamery wysokiej jakości. Generowanie mniejszej ilości ciepła związane jest także z faktem, że kamera ArduCam [126] posiada matrycę typu CMOS.

Z punktu widzenia zastosowania w skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym, modele kamer ArduCam [126] oraz RaspberryPi Camera [127] mogłyby znaleźć zastosowanie jedynie w tanich i mało precyzyjnych modelach. Należy wziąć pod uwagę, że zjawiska termiczne i ich wpływ na rejestrowane przez kamerę obrazy, to nie jedyne kryteria podczas wyboru detektora. Równie istotne są parametry typu: sposób akwizycji ramki (migawka typu *rolling-shutter* oraz *global-shutter*), maksymalna prędkość rejestracji, możliwość synchronizacji akwizycji z wyświetlaniem obrazów pomiarowych, jakość odwzorowania kolorów (jeśli skaner mierzy także teksturę w kolorach), dostępność kompatybilnych obiektywów, wymiar matrycy, rozmiar piksela etc. Te cechy powodują, że tanie kamery cyfrowe raczej nie znajdują zastosowania w skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym.

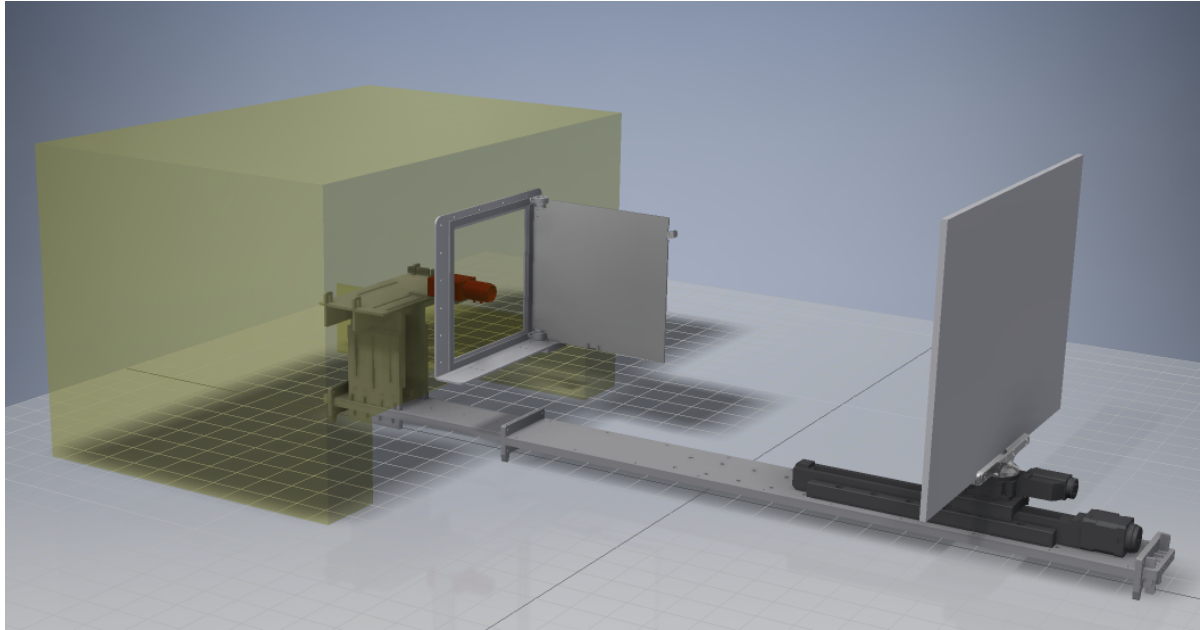
Do dalszych testów nad wpływem zmian temperatury zewnętrznej na rejestrowane przez kamerę obrazy ograniczyłem się jedynie do modelu Grasshopper 2.0 [101]. Kamera ta posiada wewnętrzny czujnik temperatury i charakteryzuje się wysoką jakością rejestrowanych obrazów.

Posiada także bardzo istotną cechę: od razu po włączeniu zasilania rozgrzewa się zawsze do tej samej temperatury, niezależnie od tego, czy rejestruje ramki, czy nie. Jedynym problemem jest fakt braku powtarzalności temperaturowego dryftu obrazu. W celu ograniczenia tego efektu, zaproponowałem modyfikację konstrukcji kamery. Efekty modyfikacji, a także ich wpływ na rejestrowane obrazy, zostały zaprezentowane w następnym rozdziale 4.2.

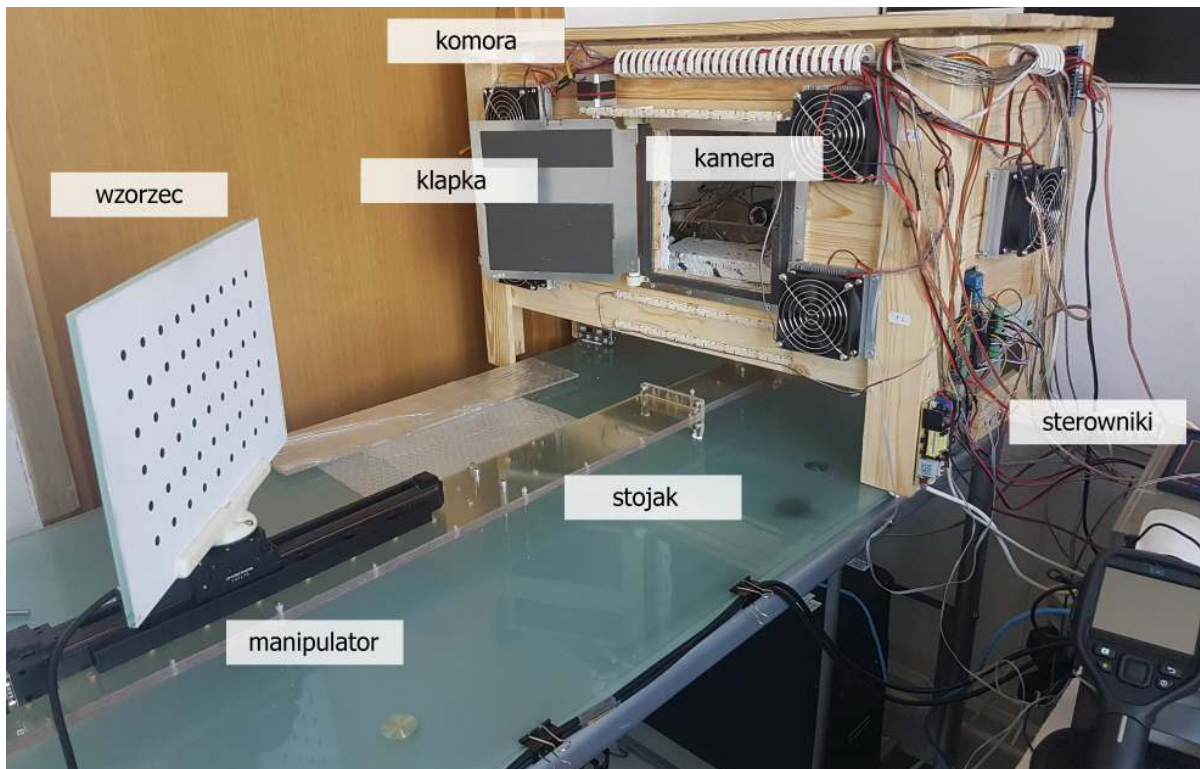
Przeprowadzone testy rozgrzewania się kamer cyfrowych pokazały, że temat zjawisk termicznych w detektorach używanych w konstrukcji skanerów 3D z oświetleniem strukturalnym jest bardzo istotną kwestią, która powinna podlegać analizie. Najbardziej niepożądane zjawisko, które obserwowałem podczas testów, to zjawisko braku powtarzalności temperaturowego dryftu obrazu, wywołanego rozgrzewaniem się kamery. Zarejestrowane w kilku eksperymentach temperaturowe dryfty obrazu, dla dwóch modeli kamer wysokiej jakości, potrafiły bardzo mocno różnić się od siebie. Jest to o tyle niepożądane, że w skanerze 3D z oświetleniem strukturalnym, na etapie kalibracji fazy, obliczana jest wartość fazy dla każdego piksela kamery [2, 5, 56]. Po odłączeniu zasilania i ostygnięciu skanera oraz ponownym jego włączeniu, można się niestety spodziewać utraty kalibracji, właśnie na skutek różnych efektów rozgrzewania się kamery - odpowiadające sobie piksele nie "trafią" w to samo miejsce i obliczone przez skaner chmury punktów będą obarczone błędem.

4.2 Wpływ zmiany temperatury zewnętrznej

W tym rozdziale przedstawiłem kolejne wyniki badań nad zjawiskami termicznymi występującymi w kamerach cyfrowych. Skupiłem się nad wpływem zmian temperatury zewnętrznej na rejestrowane przez kamerę obrazy. W badaniach ograniczyłem się do jednego modelu kamery, wybrałem kamerę FLIR Grasshopper 2.0 GS2-GE-50S5M-C [101]. Zrezygnowałem z eksperymentów z tanimi kamerami gorszej jakości, ponieważ jakość rejestrowanych przez nie obrazów była zbyt niska, żeby mogły być użyte w bardziej profesjonalnym skanerze 3D z oświetleniem strukturalnym. Z kolei kamera IDS UI-62180SE-M-GL-R3 [106] charakteryzowała się nieporównywalnie większymi wartościami temperaturowego dryftu obrazu, niż kamera Grasshopper 2.0 [101]. Ograniczenie się do jednego modelu kamery zostało podyktowane także względami ekonomicznymi. Finalnie zmuszony byłem zmodyfikować bardzo istotnie konstrukcję kamery, żeby osiągnąć powtarzalność jej zachowania. Modyfikacja konstrukcji wiązała się z dużym ryzykiem nieodwracalnego uszkodzenia kamery, dlatego zdecydowałem się ograniczyć modyfikacje do jednego modelu.



a)

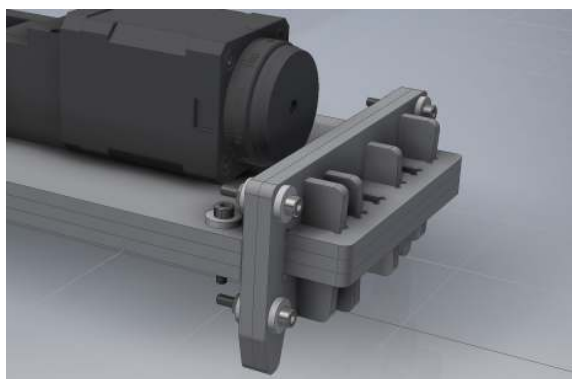


b)

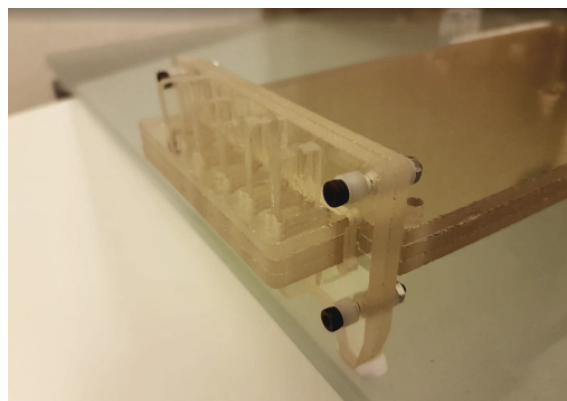
Rysunek 4.27: Stanowisko pomiarowe z komorą termiczną: a) wizualizacja CAD modelu stanowiska pomiarowego, b) widok stanowiska pomiarowego z komorą termiczną. Stojak wykonany z Robaxu [72, 73], na którym z jednej strony zamocowałem manipulator z wzorcem, a z drugiej, znajdującej się we wnętrzu komory, badaną kamerę. Zmiana temperatury wewnątrz komory wymuszana była przez 8 ogniw Peltiera umieszczonych na obudowie komory. Komora wyposażona była w automatycznie sterowaną klapkę, otwieraną na czas zbierania ramek przez kamerę.

4.2.1 Stanowisko pomiarowe z komorą termiczną

Do przeprowadzenia badań zbudowałem specjalne stanowisko pomiarowe, wyposażone w komorę termiczną. Stanowisko zostało zaprojektowane i wykonane w ten sposób, by maksymalnie ograniczyć wpływ zmiennej temperatury na wzorec usytuowany przed kamerą. Zaprojektowane i wykonane stanowisko przedstawiłem na rysunku 4.27. Głównym elementem jest stojak wykonany z dewitryfikatu typu Robax [72, 73]. Stojak został wykonany z formatek wyciętych przy użyciu technologii *water-jet* z tafli Robaxu o grubości 4mm. Poszczególne formatki zostały połączone przy użyciu specjalnych zamków, także wykonanych z Robaxu [72, 73]. Zamki ukształtowane zostały w formie klina. Umożliwiło to sztywne i pewne połączenie poszczególnych formatek ze sobą. Zdecydowałem się na takie połączenia, ponieważ chciałem maksymalnie ograniczyć użycie innych materiałów, które mogłyby się odznaczać innym, wyższym, współczynnikiem rozszerzalności termicznej i powodować zafałszowanie wyników badań. W niektórych miejscach konstrukcji użyłem połączenia gwintowanego, zrealizowanego przez śrubę z nakrętką oraz podkładką sprężystą. Połączenie to zostało zrealizowane w ten sposób, by zawsze elementami bezpośrednio się ze sobą stykającymi, były detale wykonane z Robaxu [72, 73]. Śruba z nakrętką służyły do wytworzenia siły ściskającej. Nawet podczas dużych zmian temperatury, śruba z nakrętką nie zmieniały geometrii połączenia, a jedynie osłabiły lub wzmocniły siłę dociskającą do siebie dwie formatki z Robaxu [72, 73]. Podkładka sprężysta ochraniała powierzchnie formatek, w przypadku, gdyby nadmierny skurcz w połączeniu gwintowanym mógł wywołać pęknięcie materiału.



a)



b)

Rysunek 4.28: Na rysunkach a) i b) zaprezentowany jest sposób łączenia formatek z Robaxu [72, 73]. Połączenia zrealizowane są za pomocą specjalnych zamków wykonanych w formie klina. Stanowisko pomiarowe z komorą termiczną.

Na jednej ze stron stojaka umieszczony został manipulator z przymocowanym wzorcem. Jako manipulatora użyłem stolika liniowego Standa 8MT160-300 o zakresie 300mm [118]

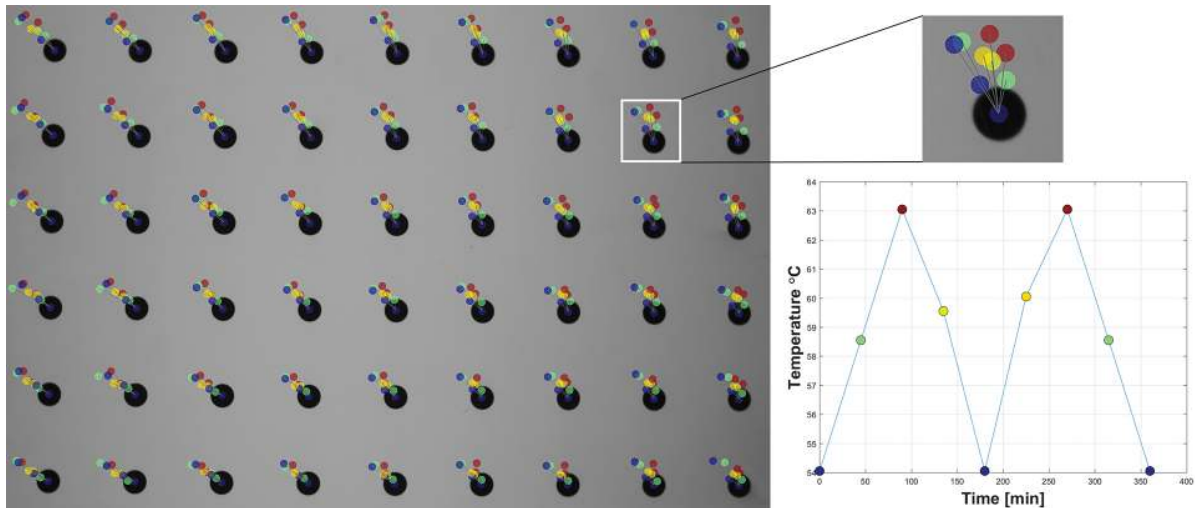
oraz zainstalowanego na nim stolika obrotowego Standa 8MR151 [119]. Druga strona stojaka umieszczona została w komorze termicznej. Komora zbudowana została z drewnianej skrzyni, zaizolowanej styropianem. W przedniej części skrzyni zainstalowałem automatycznie sterowaną klapkę inspekcyjną. Stanowisko zostało zbudowane w ten sposób, by obudowa komory termicznej nie stykała się z elementami stojaka. W ten sposób odkształcająca się podczas zmian temperatury obudowa komory termicznej nie powodowała zafałszowania eksperymentów. Jako elementy do wymuszania zmian temperatury wewnątrz komory użyłem ośmiu ogniw Peltiera TEC1-12706 12V/6A [110]. Każde ogniwo wyposażone zostało w radiator oraz wentylator. Korzystając z faktu, że odwrócenie polaryzacji prądu płynącego przez ogniwo powoduje zamianę kierunku transportu ciepła, uzyskałem komorę w której mogłem wytwarzać zarówno niższą, jak i wyższą temperaturę od temperatury otoczenia. Badana kamera umieszczona została wewnątrz komory w ten sposób, że otwierając automatyczną klapkę inspekcyjną, w polu widzenia kamery znajdował się wzorec umieszczony na stoliku liniowo-obrotowym. Podczas eksperymentów bazowałem na tym, że czas otwierania klapy oraz czas akwizycji ramki przez kamerę był na tyle krótki, że w bardzo niewielki sposób wpływał na zmianę temperatury wewnątrz komory. W ten sposób byłem w stanie wyizolować wpływ zmiennej temperatury jedynie na kamerę i jej obiektyw. Pozostałe elementy stanowiska, w tym wzorec, pozostawały w niezmienniej temperaturze utrzymywanej przez klimatyzator zainstalowany w laboratorium.

Korzystając z równania Edlén'a [108] oraz prawa Snelliusa [130], obliczyłem że dla zaprojektowanej geometrii stanowiska pomiarowego maksymalny błąd spowodowany ugięciem się promieni na skutek zmiany gradientu temperatury na wewnątrz i na zewnątrz komory nie będzie większy niż $4\mu\text{m}$ w płaszczyźnie wzorca, dla zmiany temperatury $\Delta T = 30^\circ\text{C}$. Taka wartość błędu może zostać pominięta, ponieważ w eksperymentach jednemu pikselowi kamery odpowiadał dystans wielkości około $114\mu\text{m}$.

4.2.2 Wyniki testów wpływu zmian temperatury zewnętrznej na kamerę Grasshopper 2.0

Badana kamera Grasshopper 2.0 [101] wraz obiektywem Fujinon HF25 [115] umieszczona została w komorze termicznej i przykręcona do stojaka z Robaxu [72, 73]. Po otwarciu klapy inspekcyjnej kamera mogła rejestrować obrazy wzorca (użyłem tego samego wzorca, co w badaniach nad wpływem rozgrzewania się kamery, patrz rozdział 4.1). Na początku eksperymentu podłączyłem kamerę do źródła zasilania i odczekałem 50 minut w celu ustabilizowania się jej temperatury. Temperatura wewnątrz laboratorium regulowana była za pomocą klimatyzatora i utrzymywana na poziomie 24°C . Wnętrze laboratorium zostało także zaciemnione, a na czas rejestracji ramek włączane były dodatkowe lampy LED'owe

oświetlające wzorzec. Po ustabilizowaniu się temperatury kamery, zebrałem ramkę prezentującą obraz wzorca. Była to ramka referencyjna. Następnie za pomocą ogniów Peltiera wymusiłem zmianę temperatury wewnątrz komory termicznej. Kamera podczas eksperymentu pozostawała cały czas włączona, ale nie rejestrowała ramek (z wyników rozgrzewania się kamery przedstawionych w rozdziale 4.1 wynika, że nie wpływa to na zachowanie kamery). Po ustabilizowaniu się temperatury wewnątrz komory (przyrost temperatury o około $4,5^{\circ}\text{C}$) otworzyłem na chwilę klapkę inspekcyjną i zebrałem ramkę prezentującą obraz wzorca. Eksperyment powtórzyłem ponownie podwyższając temperaturę w komorze. Zebrałem łącznie 9 pomiarów, naprzemiennie zwiększając i zmniejszając temperaturę. Wyniki, w postaci zarejestrowanego temperaturowego dryftu obrazu, przedstawione zostały na rysunku 4.29. Tłem obrazu jest zebrana ramka referencyjna. Kolorowe punkty oznaczają kolejne obliczone środki znaczników, przy czym przemieszczenia środków zostały przeskalowane 100 krotnie. Kolor punktu oznacza temperaturę, w jakiej zebrana została ramka. Po prawej stronie rysunku znajduje się także wykres temperatury zarejestrowanej przez czujnik w kamerze podczas eksperymentu. Na rysunku znajduje się także powiększony obszar wokół jednego z markerów, ukazujący zarejestrowaną trajektorię środka markera. Maksymalny zarejestrowany dryft w kierunku poziomym wyniósł $H_{drift} = 0,17\text{mm}$ w płaszczyźnie wzorca, a w kierunku pionowym $V_{drift} = 0,16\text{mm}$ w płaszczyźnie wzorca.



Rysunek 4.29: Zarejestrowany podczas początkowych eksperymentów temperaturowy dryft obrazu (przeskalowanie przesunięć 100 razy).

Wyniki testu wpływu temperatury zewnętrznej na obraz rejestrowany przez kamerę (Rys. 4.29) pokazują, że badana kamera cechuje się brakiem powtarzalności temperaturowego dryftu obrazu, powstałego na skutek zmian temperatury zewnętrznej. Na rysunku 4.29 można zauważyć, że punkty reprezentujące środki markerów w tej samej temperaturze, nie pokrywają

się. Oznacza to, że po zmianie temperatury i powrocie do poprzedniej temperatury, trend temperaturowego dryftu jest odmienny. Obserwowana jest histereza, przy czym histereza ta nie jest powtarzalna. Ten sam problem widoczny był także podczas testów, w których zmiana temperatury kamery następowała na skutek rozgrzewania się kamery (rozdział 4.1). W moim odczuciu jest to bardzo poważny problem, który znacząco utrudnia, a może nawet uniemożliwia budowę modelu kompensacyjnego. Na skutek rozgrzewania się i ochładzania kamery, temperaturowe dryfty obrazów różnią się od siebie i nie są w żaden sposób powtarzalne. Zjawisko to obserwowałem także dla innych badanych modeli kamer (patrz rozdział 4.1).

Trudno jednoznacznie stwierdzić, jakie są źródła braku powtarzalności. W rozdziale 4.1 opisałem zjawisko, w którym obserwowany był dryft obrazu, pomimo, że temperatura kamery, mierzona przez jej wewnętrzny czujnik, pokazywała ustabilizowanie się temperatury (Rys. 4.3, 4.4, 4.8 oraz 4.10). Zjawisko to obserwowane było podczas testów rozgrzewania kamery. W teście, który przeprowadziłem (Rys. 4.29) odczekiwałem ponad 45 minut pomiędzy kolejnymi wymuszeniami zmian temperatury. Czas ten dobrałem na podstawie obserwacji kamerą termowizyjną, z których wynikało, że zarówno obiektyw, jak i kamera osiągnęły stabilne temperatury i obserwowana scena znajduje się w stanie ustalonym. Dlatego też uważam, że przyczyn braku powtarzalności należy szukać gdzie indziej.

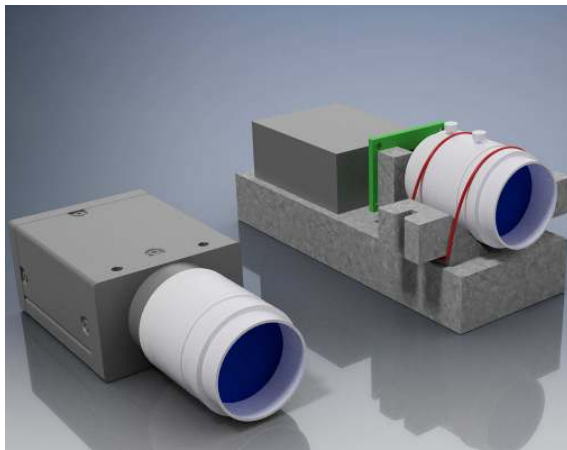
W mojej opinii obserwowany brak powtarzalności odnosi się bezpośrednio do konstrukcji kamery oraz obiektywu. Cała konstrukcja kamery oparta jest o wykorzystanie detali wykonanych z aluminium. Obudowa składa się z kilku części, które podczas zmian temperatury ulegają deformacji. Należy pamiętać, że matryca kamery przylutowana jest do płytki drukowanej, a płytka przykręcona jest do obudowy kamery. Wynika z tego, że odkształcenie obudowy kamery wpływa także na zmianę pozycji matrycy. W konsekwencji, na zaobserwowanym temperaturowym dryfcie widać efekty deformacji obudowy, matrycy, obiektywu i wszystkich innych zespołów kamery. Każdy z tych zespołów wykonany jest z innego materiału i temperatura ma na niego inny wpływ. Stąd też wypadkowy temperaturowy dryft obrazu składa się z tak wielkiej liczby czynników, że w efekcie złożenia ich w całość, obserwowany jest brak powtarzalności.

W moim odczuciu, w celu uzyskania powtarzalnego dryftu, należy zmodyfikować konstrukcję kamery w ten sposób, by maksymalnie zmniejszyć liczbę elementów, które mogą mieć wpływ na deformacje obrazu. Przeprowadziłem takie modyfikacje, a ich efekty opisałem w następnym rozdziale.

4.2.3 Modyfikacja konstrukcji kamery Grasshopper 2.0

W celu osiągnięcia powtarzalnego temperaturowego dryftu obrazu zmodyfikowałem znacząco konstrukcję kamery Grasshopper 2.0 [101]. Zdjąłem obudowę kamery i usunąłem wszystkie aluminiowe elementy. Odłączyłem płytkę z sensorem i zmodyfikowałem jej mocowanie.

Zamiast wykorzystywać otwory montażowe na płycie drukowanej, zdecydowałem się na zamocowanie matrycy bezpośrednio za jej obudowę. W tym celu wykorzystałem granitowy bloczek, do którego dokleiłem dwie granitowe kolumny. Pomędzy kolumnami zaklinowałem sensor, mocując go za obudowę. Przed sensorem na granitowej pryzmie umieściłem obiektyw i zamocowałem go za pomocą gumowego uchwytu do granitowego bloczku. Modyfikacje kamery pokazane są na rysunku 4.30.



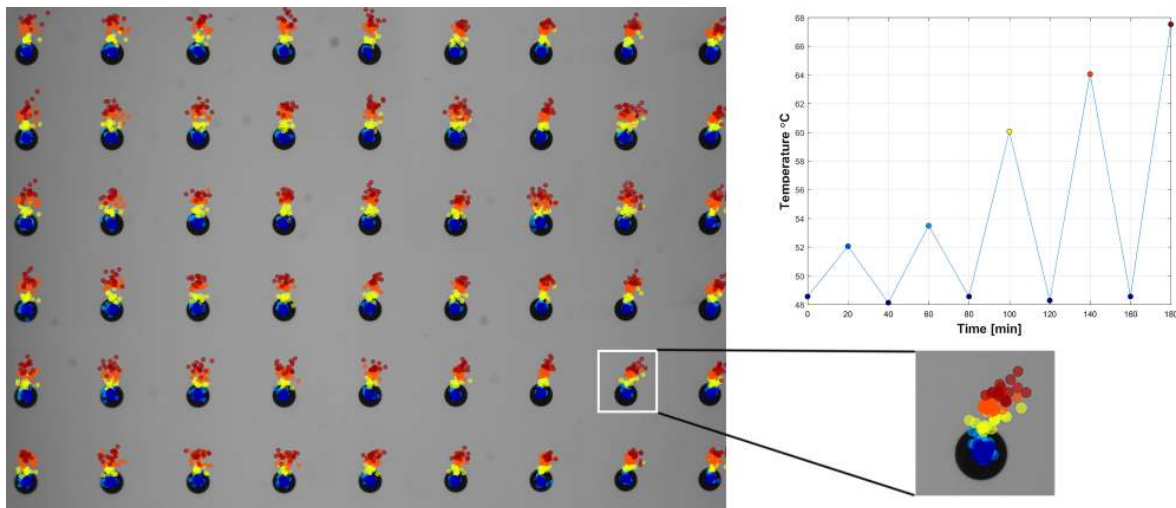
a)



b)

Rysunek 4.30: Na rysunkach a) i b) model CAD oraz zdjęcie zmodyfikowanej konstrukcji kamery Grasshopper 2.0 [101]. Źródło: [28].

Kamera o zmodyfikowanej konstrukcji została ponownie przebadana w komorze termicznej. Na rysunku 4.31 zaprezentowałem wyniki eksperymentu, w którym kamera na przemian była podgrzewana i ochładzana do temperatury referencyjnej (na wykresie temperatury wykres wyskalowany jest w wartościach odczytanych z wewnętrznego czujnika temperatury kamery). Przy każdym kolejnym cyklu wzrastała temperatura, do jakiej ogrzewałem kamerę. Dla każdej ustabilizowanej temperatury zbierałem około 15 ramek. Czas, jaki odczekiwałem pomiędzy kolejnymi cyklami został dwukrotnie zmniejszony.



Rysunek 4.31: Zarejestrowany temperaturowy dryft obrazu zmodyfikowanej kamery (przeskalowanie przesunięć 200 razy).

Na zarejestrowanym temperaturowym dryfcie obrazu (Rys. 4.31) widać, że dryft jest o wiele bardziej powtarzalny. Zarejestrowany rozrzut spowodowany jest raczej szumem termicznym, a nie faktyczną deformacją obrazu. Za każdym razem, gdy kamera ochładzana jest do temperatury referencyjnej, środki markerów obserwowane są w tych samych obszarach (niebieski punkty na rysunku 4.31). Widać także, że za każdym razem, gdy zwiększana jest temperatura, do której podgrzewana jest kamera, środki markerów "przesuwają" się coraz wyżej. Kolejną obserwowaną cechą jest znaczące zmniejszenie poziomej składowej dryftu. Dominuje przesunięcie środków markerów w kierunku pionowym. Zmniejszeniu uległa także wartość maksymalnego dryftu w obydwu kierunkach: wartość dryftu w kierunku poziomym zmalała do $H_{drift} = 0,07\text{mm}$ w płaszczyźnie wzorca, a w kierunku pionowym do $V_{drift} = 0,02\text{mm}$ w płaszczyźnie wzorca.

Wprowadzone modyfikacje pozwoliły na wyeliminowanie najważniejszego problemu obserwowanego podczas eksperymentów: braku powtarzalności temperaturowego dryftu obrazu wywołanego zjawiskami cieplnymi w kamerze. Przeprowadzone modyfikacje w bardzo znaczący sposób ingerują w budowę kamery. Dyskusyjne jest na pewno zastosowanie zmodyfikowanej kamery w prawdziwym skanerze 3D z oświetleniem strukturalnym. Trudno wyobrazić sobie skaner 3D, w którym detektor zbudowany jest z granitowego bloczka. Niemniej jednak zaproponowane przeze mnie zmiany traktuję jako pewnego rodzaju wytyczne do projektowania kamer, które używane są w aplikacjach pomiarowych i w których wymagana jest wysoka stabilność rejestrowanego obrazu. W moim odczuciu, korzystając z zaproponowanej przeze mnie prototypowej konstrukcji można zaprojektować kamerę, której zachowanie będzie powtarzalne w kontekście zjawisk cieplnych.

4.3 Model kompensacji wpływu temperatury na kamerę cyfrową

Zmodyfikowana konstrukcja kamery pozwoliła wyeliminować największy problem związany z kompensacją wpływu temperatury na rejestrowane obrazy: brak powtarzalności wywołany zmianami temperatury (Rys. 4.29). Powtarzalność rejestrowanych obrazów w różnych temperaturach mierzonych przez sensor w kamerze jest kluczowa w kontekście opisywania wpływu temperatury na kamerę i wyznaczenia modelu kompensacyjnego. Zaproponowane zmiany w konstrukcji kamery pozwoliły osiągnąć stabilny i powtarzalny temperaturowy dryft obrazu, a zatem pozwoliły na zaproponowanie modelu kompensacyjnego.

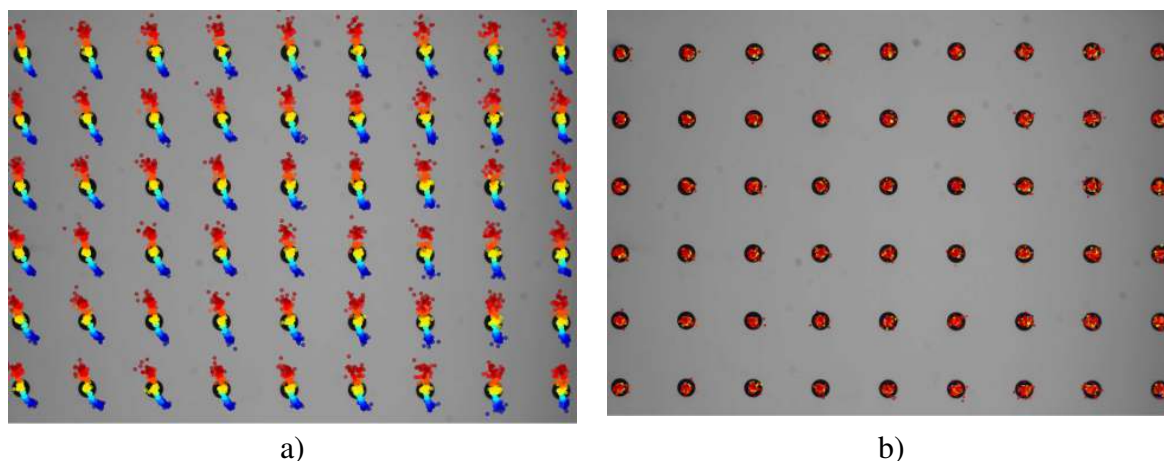
W tym rozdziale opisałem zaproponowaną przeze mnie metodę kompensacji wpływu temperatury na zmodyfikowaną kamerę cyfrową. Moja metoda bazuje na kompensacji w dziedzinie obrazu, co pozwala na używanie jej nie tylko w aplikacjach z oświetleniem strukturalnym. Przeprowadzanie kompensacji w dziedzinie obrazu pozwala na zastosowanie tej metody we wszystkich w zasadzie aplikacjach pomiarowych, bazujących na systemach wizyjnych. Dodatkowym atutem jest fakt, że zaproponowana metoda kompensacji może być użyta zarówno dla modelu kamery otworkowej [102–105], jak i modelu kamery rzeczywistej [2, 4, 5, 56, 57]. W rozdziale opisałem także metodę weryfikacji zaproponowanej metody kompensacji, a także pokazałem zastosowanie metody w zagadnieniu kompensacji wpływu temperatury na geometryczną kalibrację kamery.

Badania opisane w tym rozdziale zostały opublikowane w artykule *Temperature Compensation Method for Digital Cameras in 2D and 3D Measurement Applications* w czasopiśmie *Sensors* z 30 października 2018 roku [28].

4.3.1 Budowa modelu kompensacyjnego

Do zebrania danych służących do budowy modelu wykonałem serię eksperymentów w komorze termicznej. Posłużyłem się tym samym stanowiskiem, które opisałem w rozdziale 4.2. Zmodyfikowana kamera została umieszczona wewnątrz komory na stelażu z Robaxu [72, 73]. Wzorzec zamontowany na manipulatorze liniowo-obrotowym [118, 119] umieszczony został na zewnątrz komory. Przeprowadzony przeze mnie eksperyment zakładał rejestrację obrazów w różnych temperaturach otoczenia. Podczas zapisywania ramek wzorzec pozostawał w tym samym położeniu dla całego zakresu wymuszanych w komorze temperatur. Po włączeniu zasilania kamery i odczekaniu aż osiągnie ona równowagę termiczną, zacząłem od zebrania ramki referencyjnej w temperaturze 24°C. Następnie zmniejszałem stopniowo temperaturę i rejestrowałem po 10 ramek w każdej ustalonej temperaturze. Potem temperatura była stopniowo zwiększana, a na końcu powróciłem do temperatury referencyjnej. Ostatecznie zebrałem

12 zestawów ramek dla 12 różnych temperatur z zakresu od około 0°C do około 45°C (odpowiadało to zakresowi temperatur od około 24°C do około 68°C zmierzonymu przez wewnętrzny czujnik temperatury w kamerze). Wyniki przeprowadzonego eksperymentu, w postaci zarejestrowanego temperaturowego dryftu obrazu (przeskalowanego 200 razy) zostały zaprezentowane na rysunku 4.32 a).



Rysunek 4.32: Temperaturowy dryft obrazu zmodyfikowanej kamery dla 12 różnych temperatur (temperatura referencyjna + 11 innych temperatur). Kolejne położenia środków markerów zostały przeskalowane $\times 200$ krotnie: a) dryft przed zastosowaniem modelu kompensacyjnego, b) dryft po zastosowaniu modelu kompensacyjnego. Źródło: [28].

Dysponując współrzędnymi środków markerów w temperaturze referencyjnej (24°C) oraz środkami markerów w 11 innych temperaturach, za pomocą dopasowania wielomianu zbudowałem model kompensacyjny. Dla każdej ze współrzędnych obrazu (I, J) wyznaczyłem osobny model (posłużyłem się takim samym aparatem matematycznym, jak w przypadku kompensacji wpływu temperatury na bazę mechaniczną skanera, patrz rozdział 3.4). Zmiennymi niezależnymi `IndepVar` był zatem zbiór współrzędnych środków markerów w różnych temperaturach, a zmienną zależną `DepVar` był zbiór współrzędnych w temperaturze referencyjnej³. Po dopasowaniu wielomianów, otrzymałem dwie osobne funkcje Q_I i Q_J opisujące rozkład współrzędnej I oraz J w dziedzinie obrazu, w różnych temperaturach (Równanie 4.1 a) i b).

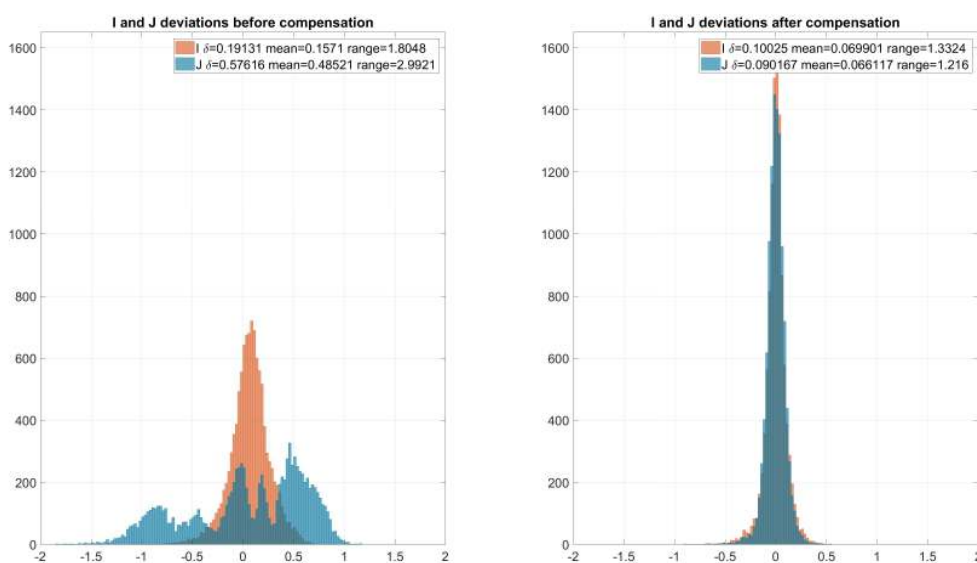
$$I_{skompensowane} = Q_I(I_{nieskompensowane}, J_{nieskompensowane}, T) \quad (4.1a)$$

$$J_{skompensowane} = Q_J(I_{nieskompensowane}, J_{nieskompensowane}, T) \quad (4.1b)$$

³implementacja funkcji `Q=polyfitn(IndepVar, DepVar, n)` w programie Matlab 2018a [122] wg. Jorn'a D'Errico [123].

4.3.2 Weryfikacja modelu kompensacyjnego w dziedzinie obrazu

W celu weryfikacji modelu przeprowadziłem ponowne pomiary, w których zbierałam ramki w różnych temperaturach otoczenia kamery, po ustabilizowaniu się temperatury wewnątrz komory. Zebrałem zestaw 12 serii pomiarowych z zakresu temperatur od około 0°C do około 45°C, każda seria w ustalonej temperaturze zawierała 10 ramek. Przy użyciu wyznaczonych funkcji Q_I i Q_J skompensowałem wyliczone współrzędne środków markerów. Testowałem różne stopnie wielomianów, a najlepsze wyniki kompensacji osiągałem dla wielomianów czwartego stopnia. Wyniki skompensowanego dryftu zaprezentowałem na rysunku 4.32 b). Porównując obrazy 4.32 a) i b) można zauważyć bardzo istotne zmniejszenie się dryftu: wszystkie punkty reprezentujące środki markerów znajdują się bardzo blisko swoich pierwotnych wartości, obliczonych dla temperatury referencyjnej. W celu ilościowego oszacowania zysku z przeprowadzonej kompensacji sporządziłem histogram odchyłek wartości współrzędnych I oraz J dla różnych temperatur od wartości współrzędnych w temperaturze referencyjnej przed i po kompensacji (Rys. 4.33).

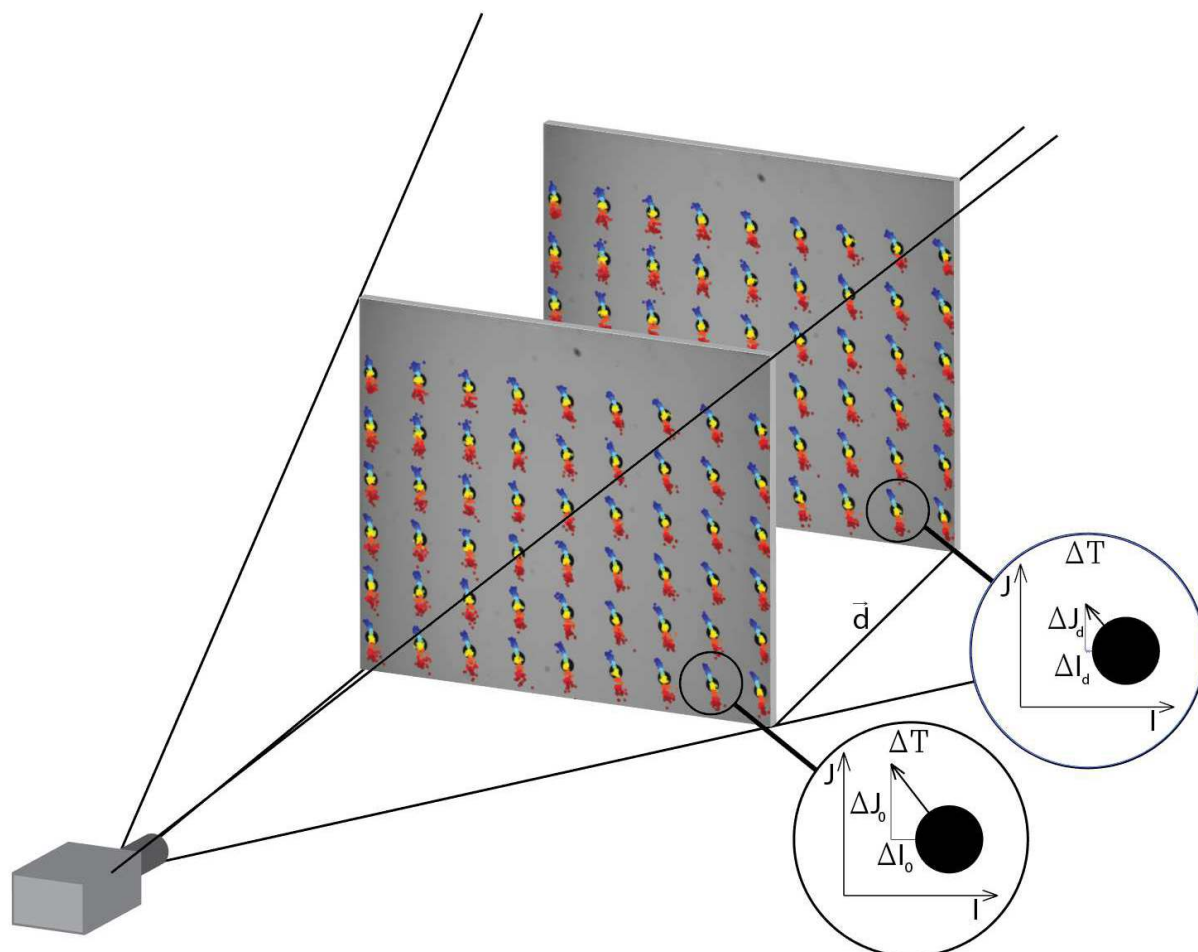


Rysunek 4.33: Histogram odchyłek wartości współrzędnych I oraz J od wartości współrzędnych referencyjnych przed i po kompensacji. Źródło: [28].

Średnia wartość odchyłki dla współrzędnej I (pozioma współrzędna obrazu) przed kompensacją wynosiła 0,157px, a po kompensacji 0,070px. Średnia wartość odchyłki dla współrzędnej J (pionowa współrzędna obrazu) wynosiła 0,485px, a po kompensacji 0,066px. Także porównanie odchylenia standardowego odchyłek potwierdza zysk z zastosowania modelu: przed kompensacją δ_I wynosiło 0,19px, po kompensacji 0,10px, z kolei δ_J wynosiło 0,58px, a po kompensacji 0,09px.

4.3.3 Weryfikacja modelu kompensacyjnego dla kalibracji kamery

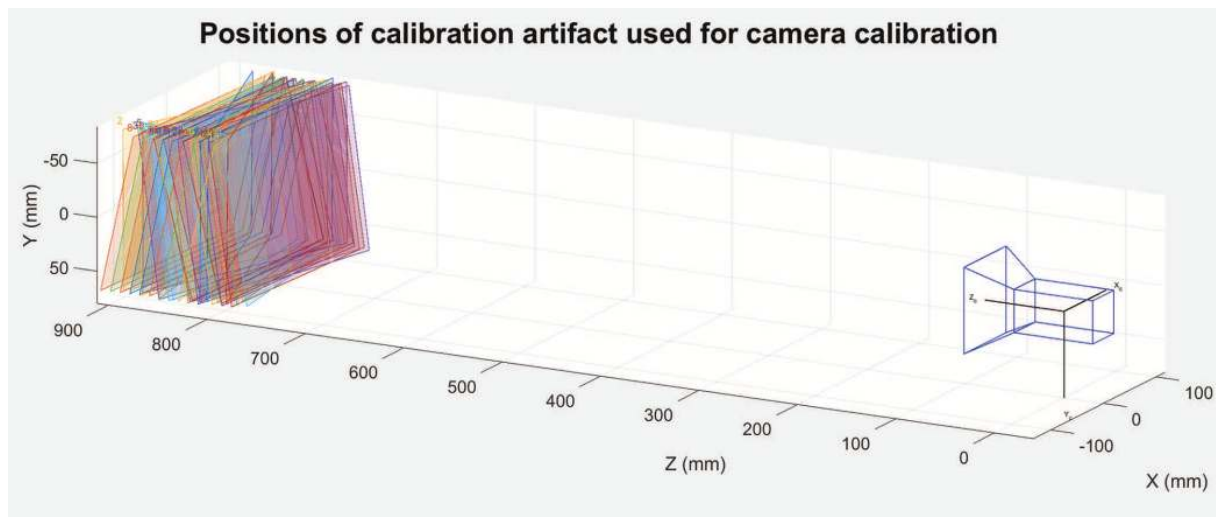
Powyższe wyniki potwierdzają działanie modelu dla obrazów znajdujących się w płaszczyźnie wzorca. Zaproponowana przeze mnie metoda będzie także działała dla innych płaszczyzn, ponieważ przeprowadzana jest w dziedzinie obrazu (Rys. 4.34). Może zostać zatem użyta do kompensacji wpływu temperatury na kalibrację geometryczną kamery.



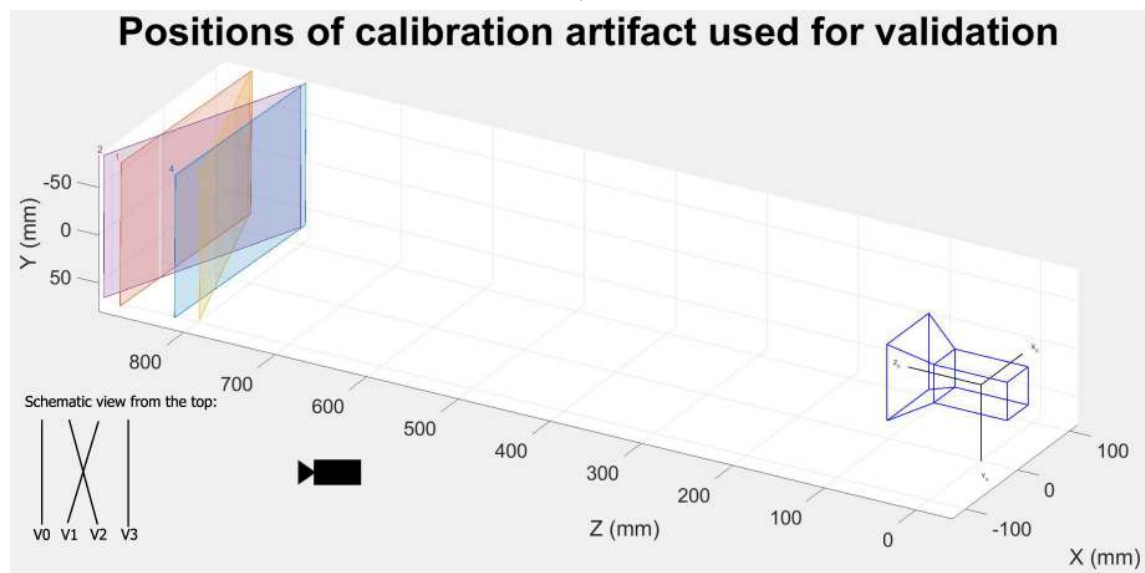
Rysunek 4.34: Model kompensacyjny przeprowadzony dla jednej z płaszczyzn będzie także prawdziwy dla innych płaszczyzn, ponieważ oddalając/przybliżając wzorec od kamery otrzymuje się efekt skalowania. Źródło: [28].

W celu potwierdzenia działania modelu dla innych pozycji wzorca przeprowadziłem dodatkowy eksperyment weryfikacyjny. Wykonałem kalibrację geometryczną kamery w temperaturze referencyjnej (24°C). Skorzystałem ze stolika liniowego oraz obrotowego, na którym zamontowany był wzorec (Rys. 4.27). Zmieniając pozycję wzorca zebrałem 30 ramek z wzorcem usytuowanym w różnych miejscach przed kamerą (Rys. 4.35 a)). Korzystając z oprogramowania 3DMADMAC [5, 56] wyznaczyłem geometryczną kalibrację kamery. Następnie zebrałem dodatkowe 4 ramki, ustawiając wzorec w 4 różnych położeniach

(nazwałem je położeniami walidacyjnymi $V0 - V3$): dwa położenia na wprost kamery w różnej odległości od kamery oraz dwa położenia pod kątem do kamery (Rys. 4.35 b)). Dysponując kalibracją geometryczną kamery byłem w stanie wyznaczyć transformacje wzorca w układzie współrzędnych rzeczywistych, wyznaczonym podczas kalibracji geometrycznej. Następnie, korzystając z faktu, że użyty manipulator posiada bardzo wysoką precyzję oraz powtarzalność ruchu [118, 119], zebrałem dodatkowe 11 serii pomiarowych w 11 różnych temperaturach, za każdym razem pozycjonując wzorzec w 4 tych samych położeniach walidacyjnych $V0 - V3$ (Rys. 4.35 b)). W dalszej kolejności użyłem modelu kompensacyjnego, by skorygować położenie środków markerów dla każdej zarejestrowanej ramki (w dziedzinie obrazu). Na końcu wyznaczyłem transformacje wzorca dla 4 położen walidacyjnych w dziedzinie rzeczywistej ze skompensowanych wartości współrzędnych środków markerów, dla wszystkich 11 temperatur.



a)



b)

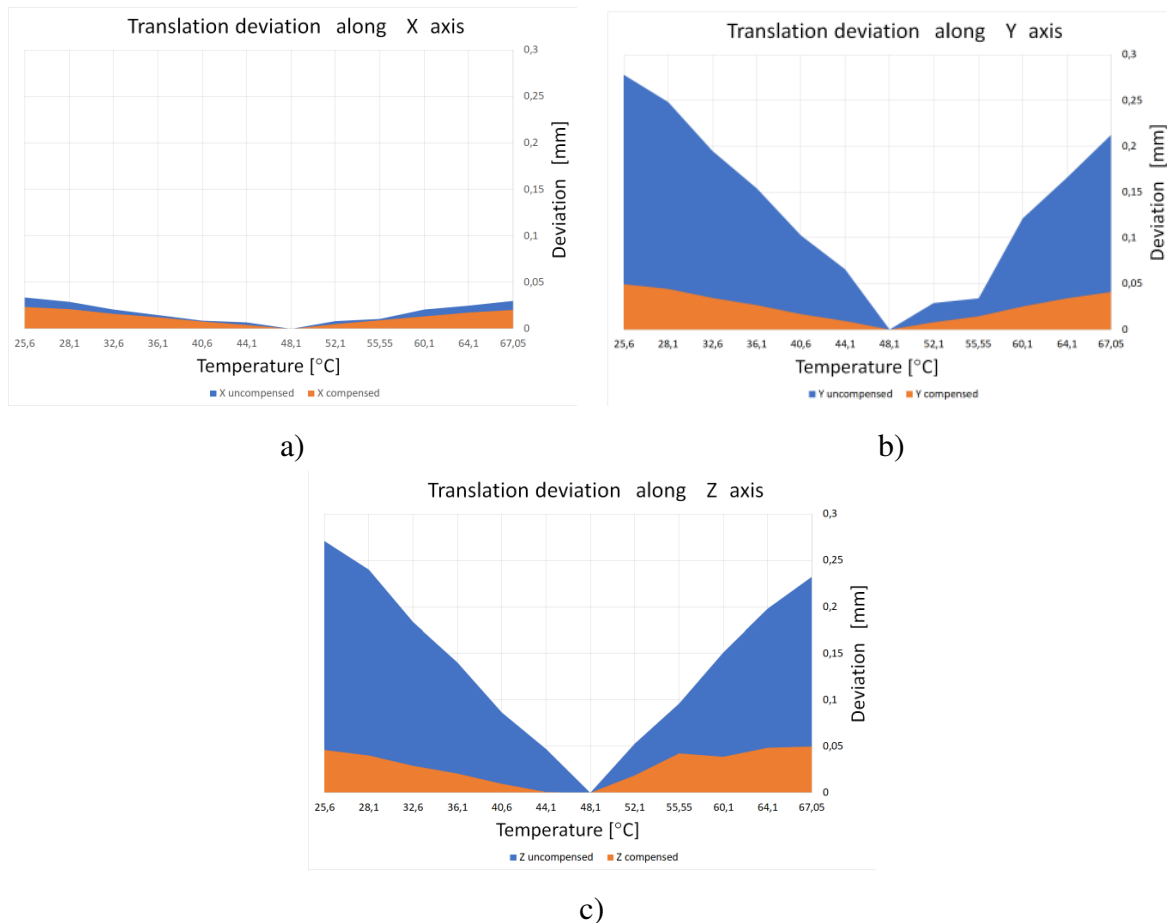
Rysunek 4.35: Pozycje wzorca podczas eksperymentu weryfikującego działanie modelu kompensacyjnego dla zastosowań 3D: a) pozycje wzorca do kalibracji w temperaturze referencyjnej (24°C), b) cztery pozycje walidacyjne wzorca V0-V3, dla których obliczane były transformacje w układzie współrzędnych wyznaczonym podczas kalibracji geometrycznej kamery. Źródło: [28].

W Tabeli 4.3 zaprezentowałem wartości odchyłek od transformacji w temperaturze referencyjnej dla dwóch temperatur (55.55°C oraz 67.05°C - pomiar za pomocą czujnika wewnątrz kamery) wyznaczone dla środków markerów przed i po zastosowaniu modelu kompensacyjnego. Prezentuję jedynie wyniki porównania translacji, ponieważ porównując wartości rotacji nie zauważyłem znaczącego wpływu zmiany temperatury na wartości rotacji w poszczególnych transformacjach wzorca. Na wykresach (Rys. 4.36 a) - c) zaprezentowałem

zestawienie wyników porównania odchyłek translacji (uśrednione wartości bezwzględne odchyłek) wzdłuż osi OX , OY oraz OZ przed i po zastosowaniu modelu kompensacyjnego dla wszystkich temperatur.

Tabela 4.3: Odchyłki translacji dla dwóch temperatur przed i po kompensacji.

Odchyłki translacji [mm]							
Temp [$^{\circ}C$]	pos.	Przed kompensacją			Po kompensacji		
		X	Y	Z	X	Y	Z
55,55	V0	0,0171	0,0289	0,1174	0,0093	-0,0034	0,0354
	V1	-0,0093	0,0193	0,2016	-0,0139	-0,0081	0,0341
	V2	0,0000	0,0537	0,0174	-0,0041	0,0312	-0,0761
	V3	0,0157	0,0341	0,0481	0,0092	0,0150	-0,0244
	mean(abs)	0,0105	0,0340	0,0961	0,0091	0,0144	0,0425
67,05	V0	-0,0366	-0,1943	0,1911	0,0026	-0,0058	-0,0156
	V1	-0,0129	-0,2312	0,3267	0,0327	-0,0121	0,1198
	V2	-0,0352	-0,2235	0,2352	0,0228	0,0592	0,0187
	V3	-0,0344	-0,2015	0,1775	0,0234	0,0873	-0,0455
	mean(abs)	0,0298	0,2126	0,2326	0,0204	0,0411	0,0499



Rysunek 4.36: Wartości odchyłek od transformacji w temperaturze referencyjnej dla wszystkich temperatur, dla 4 położen walidacyjnych wzorca $V0 - V3$. Na niebiesko: odchyłki przed kompensacją, na pomarańczowo: odchyłki po kompensacji. Wykresy dla osi: a) OX , b) OY , c) OZ . Źródło: [28].

4.3.4 Wnioski

Wyniki zaprezentowane w tabeli 4.3 oraz na wykresach (Rys. 4.36 a - c) pokazują, że dominujący jest dryft wartości odchyłek translacji w kierunku osi OY oraz OZ . To zjawisko najprawdopodobniej związane jest ze sposobem przeprowadzenia modyfikacji konstrukcji kamery. Sensor został utwierdzony pomiędzy dwoma granitowymi kolumnkami (Rys. 4.30), co znacząco ograniczyło możliwość jego przesunięcia w kierunku poziomym (oś OX). Najbardziej prawdopodobne ruchy matrycy, związane z odkształceniami termicznymi, były związane z kierunkiem pionowym (oś OY) oraz wzdłuż osi kamery (oś OZ), a także obrotem wokół osi OX . Analiza wykresów odchyłek translacji (Rys. 4.36 a-c), a także samego temperaturowego dryftu obrazu (Rys. 4.32) wydają się potwierdzać te przypuszczenia.

Pokazane wyniki eksperymentu weryfikacyjnego dowodzą, że zaprezentowana metoda kompensacji wpływu temperatury na kamerę cyfrową, przeprowadzana na obrazach 2D może

także służyć do kompensacji efektu wpływu temperatury na kalibrację geometryczną kamery. W wyniku zastosowania modelu kompensacyjnego, udało się ograniczyć wartości odchyłek translacji wzorca:

- średnia wartość odchyłki wzdłuż osi OX , przed kompensacją wynosiła 0,018mm, po kompensacji 0,012mm,
- średnia wartość odchyłki wzdłuż osi OY , przed kompensacją wynosiła 0,134mm, po kompensacji 0,025mm,
- średnia wartość odchyłki wzdłuż osi OZ , przed kompensacją wynosiła 0,142mm, po kompensacji 0,029mm,

Zastosowanie modelu kompensacyjnego pozwoliło na zredukowanie wartości odchyłek o 30% dla osi OX , 81% dla osi OY oraz 80% dla osi OZ . Bardzo istotną cechą zaproponowanej metody kompensacji jest fakt, że może być ona zastosowana także do innych aplikacji pomiarowych, również tych bazujących na otworkowym modelu kamery [102–105]. Należy jednak pamiętać, że nieodzownym elementem tej metody kompensacji jest warunek dysponowania powtarzalnymi obrazami rejestrowanymi przez kamerę w różnych temperaturach. W zaprezentowanym przeze mnie przypadku, wiązało się to ze znaczącymi modyfikacjami w konstrukcji kamery.

4.4 Podsumowanie

W tym rozdziale zaprezentowałem wyniki badań wpływu temperatury na kamery cyfrowe, używane jako detektory polowe w skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym. Pokazałem, że zarówno podczas rozgrzewania, jak i na skutek zmiany temperatury zewnętrznej, w seriach rejestrowanych obrazów można zaobserwować temperaturowy dryft. Kolejną bardzo istotną kwestią jest pewna nieprzewidywalność odkształceń termicznych w kamerach, którego skutkiem jest brak powtarzalności w obserwowanym temperaturowym dryfcie obrazów. Ta losowość jest powodem dla którego nie można zbudować poprawnego modelu kompensującego wpływ zmian temperatury na kamerę. W przeprowadzonych badaniach pokazałem także, że nawet wysokiej klasy kamery przeznaczone do naukowych aplikacji, wyposażone w precyzyjne układy stabilizacji temperatury sensora, mogą być tak samo narażone na zniekształcenia rejestrowanych obrazów wywołane efektami termicznymi.

W celu opracowania modelu kompensacyjnego, byłem zmuszony znacząco zmodyfikować konstrukcję kamery. Modyfikacje obejmowały rezygnację z aluminiowej obudowy i zastąpienie jej detalami wyciętymi z granitu. W konsekwencji, zmodyfikowana konstrukcja w oczywisty sposób nie nadawałaby się do zastosowania w skanerze 3D albo w dowolnym innym systemie

wizyjnym. Przeprowadzone przeze mnie zmiany w budowie kamery miały charakter czysto badawczy i służyły pokazaniu, że możliwe jest takie zmodyfikowanie konstrukcji kamery, by jej zachowanie w zmiennych temperaturach było bardziej przewidywalne. Moją intencją było pokazanie, że odpowiednio modyfikując konstrukcję kamery można zmniejszyć negatywne efekty zjawisk termicznych, a także osiągnąć pożądaną powtarzalność, a co za tym idzie opracować model kompensacji termicznej.

Zaproponowana metoda kompensacji ma szereg cech, które zawężają zakres jej aplikacji. Jedną z nich jest fakt, że bazuje na pomiarze temperatury w stanach ustalonych. A zatem może być stosowana do kompensacji wpływu zmiennej temperatury jedynie w stanach ustalonych termodynamicznie. Co za tym idzie, w obecnie zaprezentowanej formie, nie może zostać zastosowana do kompensacji wpływu rozgrzewania się kamery na rejestrowane obrazy. Taką kompensację dałoby się przeprowadzić, ale wymagałoby to uwzględnienia dodatkowych cech, które określałyby np. dynamikę zmian temperatury. Ogólna koncepcja kompensacji w dziedzinie obrazów 2D pozostałaby niezmienną, ale przekształceniu musiałby ulec algorytm do obliczania odpowiednich odchyłek korekcyjnych. Możliwe także, że taki model wymagałby zastosowania dodatkowych czujników temperatury w kamerze.

Kolejną wadą zaproponowanej metody kompensacji jest fakt, że opracowany model kompensacyjny związany jest nierozzerwalnie nie tylko z kamerą, ale także z obiektywem. Ta cecha jest niestety nie do wyeliminowania, a co za tym idzie, zawęża zastosowanie metody kompensacyjnej do kamer z dedykowanym obiektywem lub już istniejących systemów wizyjnych z dobraną parą kamera-obiektyw.

Ostatnią, i w mojej opinii największą wadą jest fakt, że do opracowania modelu kompensacyjnego niezbędne jest dysponowanie stosunkowo złożonym stanowiskiem laboratoryjnym, wyposażonym w komorę termiczną, stojak z materiału o bardzo niskim współczynniku rozszerzalności termicznej (np. użyty dewitryfikat typu Robax [72, 73]), oraz odpowiednie wzorce. W przypadku chęci wdrożenia zaproponowanej metody kompensacyjnej w seryjnie produkowanych kamerach, konieczność posiadania dostępu do laboratorium wyposażonego w taką aparaturę, znacząco wpłynęłoby na ostateczną cenę kamery.

Pomimo wymienionych wad, uważam, że zaproponowana metoda może znaleźć zastosowanie w projektowanych, a także już istniejących skanerach 3D wykorzystujących metodę projekcji z oświetleniem strukturalnym oraz systemach wizyjnych. Jest przeprowadzana na obrazach 2D, a co za tym idzie, może być stosowana zarówno do aplikacji bazujących na otworkowym modelu kamery, jak i rzeczywistym modelu kamery. Przeprowadzone eksperymenty pokazują, że pozwala ona znacząco rozszerzyć zakres temperatur, w którym kamera może rejestrować ramki bez ryzyka wystąpienia termicznych deformacji obrazu. Wreszcie, weryfikacja polegająca na wyznaczeniu transformacji wzorca w układzie

współrzędnych kamery pokazuje, że zaproponowana metoda kompensacji może być z powodzeniem stosowana w trójwymiarowych aplikacjach pomiarowych.

Rozdział 5

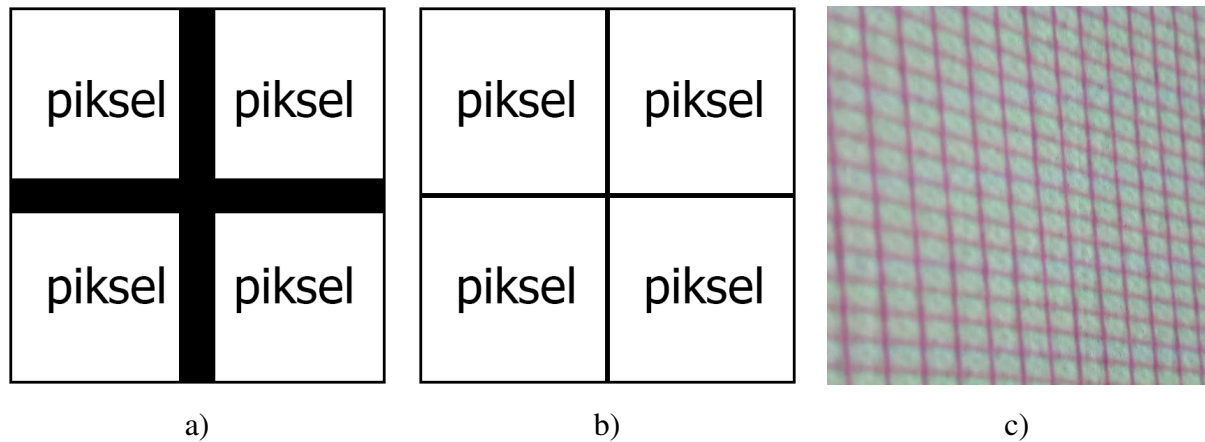
Kompensacja wpływu temperatury na projektory rastra

W budowie praktycznie każdego skanera 3D z oświetleniem strukturalnym zauważyć można bardzo wyraźny podział na moduł projekcyjny, detekcyjny oraz bazę mechaniczną, będącą często szkieletem nośnym całej konstrukcji. W poprzednich rozdziałach opisałem metodę kompensacji wpływu zmian temperatury na bazę mechaniczną (patrz rozdział 3) oraz na moduł detekcyjny - kamerę cyfrową z obiektywem (patrz rozdział 4). W tym rozdziale opiszę wyniki badań nad wpływem temperatury na moduł projekcyjny, a także zaprezentuję metodę kompensacji tego wpływu.

Na potrzeby projekcji obrazów prążkowych najczęściej wykorzystywane są projektory, w których stosuje się matryce cyfrowe jako elementy kształtujące obraz. Ze względu na sposób tworzenia obrazu, matryce dzieli się najczęściej na odbiciowe oraz transmisyjne. Do transmisyjnych należą głównie te, wykorzystujące matrycę LCD (ang. *Liquid Crystal Display*), a do odbiciowych, wykorzystujące matryce LCoS (ang. *Liquid Crystal on Silicone*) oraz DMD (ang. *Digital Micromirror Device*).

Matryca LCD składa się z macierzy miniaturowych filtrów polaryzacyjnych, w których można zmieniać kierunek polaryzacji. Każdy piksel matrycy tworzony jest przez pojedynczy filtr. By uzyskać efekt zmiany intensywności światła, matryca oświetlana jest spolaryzowanym światłem. Poprzez obrót kierunku polaryzacji pojedynczego piksela uzyskuje się efekt przepuszczania światła (piksel jasny) bądź też jego zablokowania (piksel ciemny). W ten sposób uzyskiwany jest pożądaný obraz. W praktyce "wygaszenie" piksela nigdy nie jest pełne, dlatego też matryce LCD mają mniejszą zdolność wyświetlania ciemnych tonów i mniejszy kontrast. Dodatkową wadą, z punktu widzenia zastosowania w skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym, jest raczej niskie wypełnienie piksela (około 40-60%) (patrz Rys. 5.1). Związane jest to z faktem, że część powierzchni każdego piksela zajmowana jest przez konstrukcję odpowiadającą za sterowanie jego transmisją. Niski stopień wypełnienia piksela skutkuje

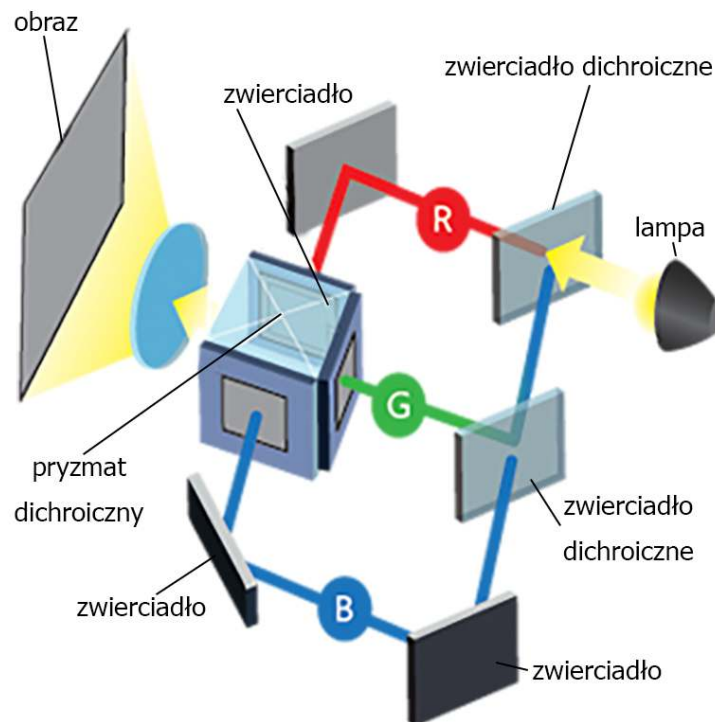
pojawieniem się charakterystycznej ciemniejszej obwódki wokół każdego piksela w obrazie (Rys. 5.1). Ma ona negatywny wpływ na kalibrację fazy [5], dlatego im większe wypełnienie piksela tym lepiej.



Rysunek 5.1: Wypełnienie piksela w projektorach używanych do kształtowania obrazu w skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym. a) niskie wypełnienie piksela, b) wysokie wypełnienie piksela, c) w rzeczywistym obrazie z projektora wykorzystującego matrycę LCD, wyraźnie widoczna jest ciemna obwódka wokół każdego piksela.

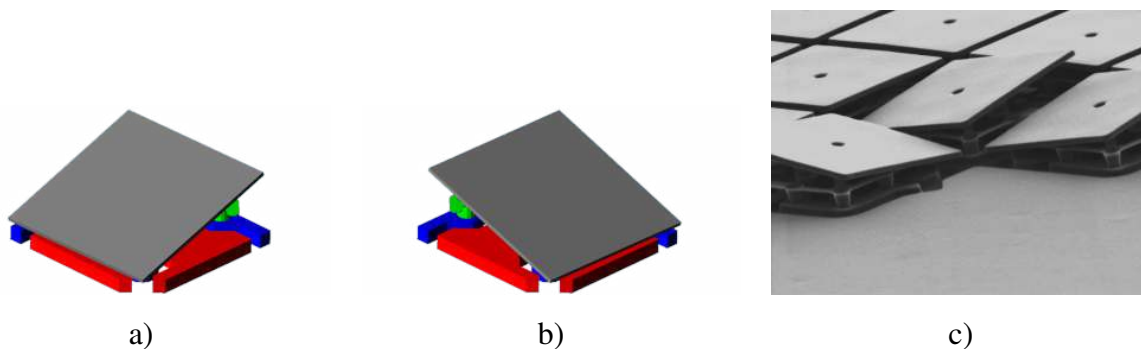
Dodatkową wadą matryc LCD jest fakt, że ulegają procesowi starzenia się i z czasem poszczególne piksele tracą zdolność do zmiany polaryzacji, przez co obserwowany jest efekt "wypalonego piksela".

Typowy układ projekcyjny wykorzystujący matrycę transmisyjną LCD pokazano na rysunku 5.2. Występuje w nim jedno źródło światła i 3 matryce LCD. Światło z lampy, poprzez system zwierciadeł oraz zwierciadeł dichroicznych rozdzielane jest na trzy zakresy spektralne odpowiadające kanałom RGB obrazu. Następnie w każdym z kanałów barwnych światło przechodzi przez matrycę LCD. Poprzez pryzmat dichroiczny wszystkie 3 kanały łączone są w jedną wiązkę, która po przejściu przez obiektyw trafia na ekran i tworzy kolorowy obraz.



Rysunek 5.2: Układ optyczny projektora z matrycami LCD. Źródło: [131].

Do niewątpliwych zalet matryc LCD należy ich stosunkowo niewielka cena, ale pomimo tego faktu są one coraz częściej wypierane przez matryce refleksyjne DMD, które mają większe wypełnienie pikseli, są jaśniejsze i których proces starzenia się jest dużo wolniejszy. Matryce DMD odpowiadają za tworzenie obrazu w projektorach wykorzystujących technikę DLP (ang. *Digital Light Processing*) opracowaną przez amerykańską firmę Texas Instruments. Obraz, w projektorach DLP tworzony jest przez chipy DMD wykonane w technologii mikroukładów elektromechanicznych MEMS (ang. *Micro Electro Mechanical System*). Matryce DMD posiadają macierz mikrozwierciadeł, które mogą się obracać skokowo względem płaszczyzny obrazu o kąt $\pm 12^\circ$ lub $\pm 17^\circ$ [132] (Rys.5.3).



Rysunek 5.3: Matryca DMD. a) Pojedyncze mikrozwierciadło w pozycji -17° , b) Pojedyncze mikrozwierciadło w pozycji $+17^\circ$; c) Zbliżenie na matrycę DMD ilustrujące pojedyncze mikrozwierciadła. Źródło: [132].

Pojedyncze mikrozwierciadło odpowiada pojedynczemu pikselowi obrazu. Dzięki zmianie swojego położenia, pojedyncze mikrozwierciadło może kierować wiązkę do obiektywu projekcyjnego - efekt jasnego piksela albo w kierunku absorbera - efekt ciemnego piksela. Efekt skali szarości uzyskiwany jest poprzez bardzo szybkie przełączanie pomiędzy poszczególnymi stanami mikrozwierciadeł. Matryce DMD mają większe współczynniki wypełnienia, ponieważ mechanizm odpowiadający za obrót pojedynczego mikrozwierciadła znajduje się pod jego powierzchnią, przez co powierzchnia odbijająca światło i tworząca piksel jest większa niż w przypadku matryc LCD. Dodatkową zaletą jest możliwość wyświetlenia obrazu o większym kontraście, niż w przypadku matryc LCD.

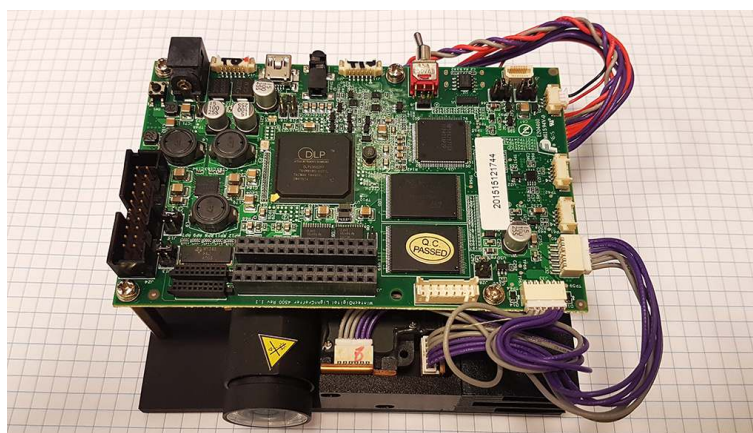
W technologii DLP efekt kolorowego obrazu uzyskiwany jest poprzez bardzo szybkie przełączanie kanałów R, G i B i sprzężone z tym sterowanie matrycą DMD. W efekcie, każda pojedyncza ramka wyświetlanego obrazu składa się z 3 ramek - R, G oraz B. Oko ludzkie uśrednia w czasie wszystkie ramki i obserwuje się efekt kolorowego obrazu. Projekторы DLP wykorzystujące matryce DMD znajdują coraz szersze zastosowanie w projektorach biznesowych, domowych oraz profesjonalnych projektorach kinowych. Także w skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym są chętnie stosowane z uwagi na osiągnięte wysokie kontrasty oraz stosunkowo duże wypełnienie piksela, a także kompaktowe wymiary całych urządzeń. Projekторы DLP mogą wykorzystywać pojedynczą matrycę DMD lub 3 matryce DMD, dla każdego kanału osobno. To drugie rozwiązanie jest droższe i stosowane najczęściej w profesjonalnych projektorach używanych np. w kinematografii.

Ostatnim typem matryc używanych w projektorach są matryce typu LCoS. Są to matryce refleksyjne składające się z miniaturowych zwierciadeł wykonanych z aluminium, pokrytych dodatkowo warstwą ciekłych kryształów. Podobnie, jak w przypadku matryc LCD, tutaj także wykorzystywany jest efekt obracania kierunku polaryzacji. Główną zaletą technologii LCoS są małe rozmiary pikseli, a co za tym idzie większe rozdzielczości projektorów oraz

współczynnik wypełnienia dochodzący do 90%, a także możliwość uzyskania wysokiego kontrastu w projektowanym obrazie. Największą wadą matryc LCoS jest ich wysoka cena oraz konieczność wykorzystania polaryzatorów, które mogą ulegać wypaleniu w podwyższonej temperaturze. Projektory wykorzystujące matryce LCoS najczęściej wytwarzane są w podobnej konfiguracji jak projektory DLP: z jedną matrycą lub trzema matrycami, osobno na każdy kanał barwny. Z punktu widzenia zastosowania w skanerze 3D z oświetleniem strukturalnym, projektory z matrycą LCoS byłyby najlepszym rozwiązaniem, z racji na wysoki współczynnik wypełnienia piksela oraz wysoki kontrast. W rzeczywistości jednak, z uwagi na mniejszą dostępność oraz wysokie koszty wykonania, w większości przypadków stosowane są matryce DMD i LCD.

W budowie skanerów 3D z oświetleniem strukturalnym często wykorzystuje się handlowe projektory klasy biznesowej. Spowodowane jest to ich stosunkowo niską ceną, dobrą jakością obrazu, a także łatwością w integracji z pozostałymi komponentami skanera. Projektory biznesowe najczęściej wyposażone są w wejście typu HDMI, DisplayPort bądź też VGA, co pozwala na bardzo łatwą integrację z komputerem i oprogramowaniem sterującym pracą skanera. Wadą używania handlowych projektorów biznesowych jest fakt, że ich konstrukcja nie została zoptymalizowana pod kątem zastosowania ich w skanerach 3D. Co za tym idzie, ich obiektywy oraz tor optyczny często nie są odpowiednio sztywne. Niektóre projektory posiadają system chłodzenia, który wprowadza wibracje w torze optycznym. Wibracje te nie wpływają na percepcję obrazu podczas np. wygłaszania prezentacji biznesowej, ale przy wykorzystaniu projektora jako źródła obrazów prążkowych w skanerze 3D, takie wibracje są niedopuszczalne. Kolejną wadą są dodatkowe usprawnienia sprzętowe, które w skanerach 3D mogą prowadzić do pogorszenia jakości skanów bądź też do rozkalibrowania skanera. Są to wszelkiego rodzaju funkcje związane z korekcją obrazu (np. cyfrowa korekcja zniekształcenia obrazu tzw. korekcja typu *keystone* albo interpolacja rozdzielczości), a także funkcje związane z adaptacyjną zmianą intensywności obrazu w zależności od natężenia światła zewnętrznego. Tego typu funkcje mogą wpływać na deformacje projektowanych obrazów prążkowych służących do obliczania wartości fazy. Dodatkową cechą, która nie zawsze jest pożądana w projektorach używanych w skanerach 3D jest fakt wyświetlania obrazów kolorowych. W skanerach 3D, wykorzystujących metodę projekcji prążków, obrazy rastrowe są najczęściej monochromatyczne. Używanie wszystkich 3 kanałów projekcyjnych może wręcz powodować pogorszenie jakości projektowanych rastrów, z racji na niewielkie przesunięcia pomiędzy obrazami wyświetlanymi w kanale R, G i B (w projektorach z jedną matrycą związane jest to najczęściej z korekcją chromatyzmu w obiektywach projekcyjnych, a w projektorach z 3 matrycami dodatkowo z ich wzajemnych położeniem). Z tego powodu do projekcji obrazów prążkowych najczęściej wykorzystywany jest tylko jeden kanał barwny.

Alternatywą dla projektorów biznesowych, są projektory typu development-kit np. rodzina projektorów DLP LightCrafter firmy Texas Instruments. Są to projektory wyposażone w układ DLP oraz matrycę DMD. Pozwalają na projekcję obrazów prążkowych bezpośrednio zaimplementowanych w pamięci (do projekcji obrazu nie jest wymagane zewnętrzne źródło sygnału), co pozwala na przeprowadzanie szybkich pomiarów, bo znacząco ułatwia synchronizację wyświetlania z rejestracją obrazu przez kamerę. Na rysunku 5.4 przedstawiono projektor DLP LightCrafter4500 [133]. Tor optyczny projektora zamknięty jest w korpusie wykonanym z czarnego tworzywa sztucznego. Projektor nie posiada obudowy, dostarczony jest jako tzw. płytki ewaluacyjna, na której można testować różne rozwiązania sprzętowe i programowe. Zaletą tego projektora jest fakt, że nie został on wyposażony w żadne wymienione wcześniej funkcje dedykowane dla projektorów biznesowych. Jednocześnie użytkownik ma dostęp do szeregu parametrów projekcji, które może modyfikować i zapisywać w pamięci urządzenia. Z punktu widzenia zastosowania tego projektora w budowie skanera 3D z oświetleniem strukturalnym, wydaje się on być obecnie najlepszym rozwiązaniem sprzętowym.



Rysunek 5.4: Projektor DLP LightCrafter 4500.

Projektory biznesowe oraz projektory typu development-kit mają jeszcze jedną bardzo istotną cechę, która powinna zostać uwzględniona podczas wyboru modułu projekcyjnego do skanera 3D z oświetleniem strukturalnym. Tą cechą jest fakt nieuwzględnienia w ich konstrukcji wpływu zmian temperatury na wyświetlany obraz. Układ optyczny w projektorach jest dosyć skomplikowany, stąd można się spodziewać, że wpływ zmian temperatury zewnętrznej na projektory będzie co najmniej tak samo istotny, jak w przypadku kamer. Proces rozgrzewania się projektora (ang. *warming up process*) będzie miał najprawdopodobniej także bardzo duży wpływ na projektowany obraz. Korpusy układów optycznych projektorów wykorzystywanych w skanerach 3D zbudowane są z odlewów z metali albo z tworzyw sztucznych. Użycie takich materiałów powoduje, że zmienna temperatura zewnętrzna na pewno będzie powodowała odkształcenia termiczne toru optycznego i będzie wpływała na projektowany obraz.

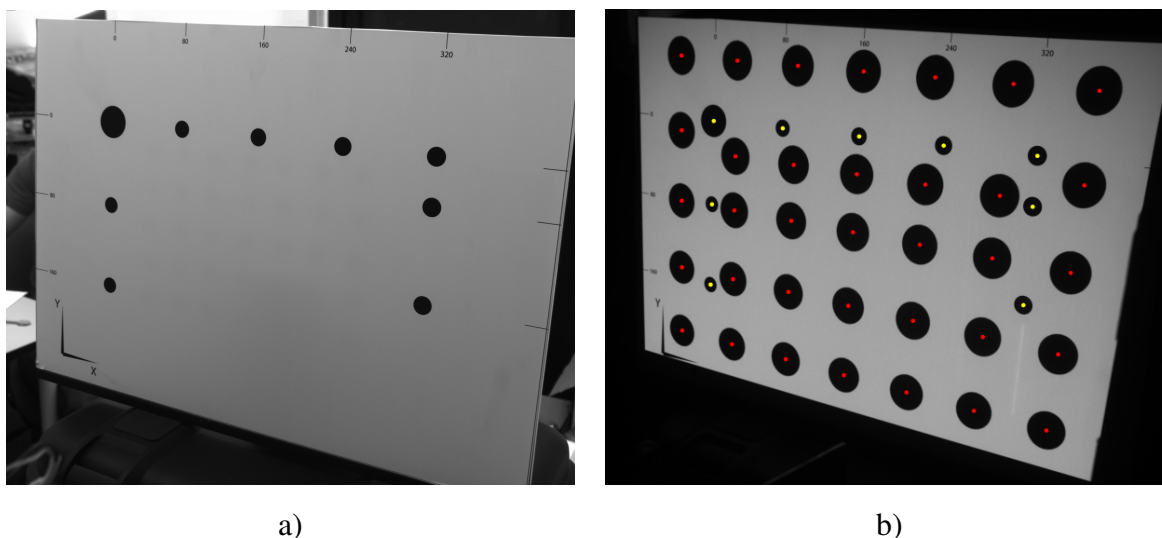
W następnych rozdziałach przedstawiłem wyniki badań wpływu zmian temperatury na dwa typowe projektory używane w produkcji skanerów 3D: projektor biznesowy DLP Casio XJ-A252 [134], oraz projektor typu development kit DLP LightCrafter 4500 [133]. W dalszej części tego rozdziału przyjąłem podobną konwencję, jak w przypadku rozdziału o wpływie temperatury na kamery (rozdział 4). W rozdziale 5.1 opisałem wpływ procesu rozgrzewania się projektora na projektowany obraz. W rozdziale 5.2 opisałem wpływ zmiany temperatury zewnętrznej, a w 5.3 zaproponowałem metodę kompensacji tego wpływu. W rozdziale 5.4 znajduje się podsumowanie wykonanych eksperymentów oraz całego działu związanego z projektorami.

5.1 Zjawisko rozgrzewania się projektora

W opisanych poniżej eksperymentach badałem do jakich temperatur i w jakim czasie rozgrzewa się projektor oraz starałem się wyznaczyć wpływ rozgrzewania się projektora na deformacje wyświetlanego obrazu. Eksperymenty przeprowadziłem dla dwóch różnych modeli projektorów, wykorzystujących technologię DLP oraz matrycę DMD. Pierwszym modelem był projektor DLP LightCrafter4500 [133], a drugim projektor Casio XJ-A252 [134].

Przeprowadziłem dwa rodzaje eksperymentów. Pierwszy związany był jedynie z rejestracją temperatury, do której rozgrzewa się projektor oraz pomiarem czasu, jaki mija do osiągnięcia przez niego równowagi termodynamicznej. Drugi związany był z deformacjami wyświetlanego obrazu podczas rozgrzewania się projektora. W pierwszym eksperymencie zebrałem dwie serie pomiarowe. W pierwszej projektor przez cały okres rozgrzewania się wyświetlał jednolity, całkowicie biały obraz (poziom 255 intensywności dla każdego kanału barwnego). W drugiej wyświetlana była całkowicie czarna ramka (0 poziom intensywności w każdym kanale barwnym). W drugim eksperymencie, przed badanym projektorem ustawiłem wzorec, na który projektował on zdefiniowany wcześniej obraz. Bezpośrednio po włączeniu zasilania projektora i wyświetlenia przez niego zadanego obrazu, zewnętrzna kamera, której pole widzenia obejmowało oświetlony przez projektor wzorec, zaczynała rejestrację ramek. W eksperymentach użyłem tego samego wzorca, co w badaniach nad wpływem temperatury na bazę mechaniczną skanera (Rozdział 3). Do rejestracji obrazów użyłem kamery FLIR Grasshopper 2.0 [101]. Kamera została włączona odpowiednio wcześniej, tak by jej rozgrzewanie się nie zakłócało eksperymentu. Pomiary prowadzone były w laboratorium, w którym temperatura utrzymywana była na stałym poziomie za pomocą klimatyzatora. Większość powierzchni badanego wzorca stanowiła biała, matowa powierzchnia, na którą projektowany był obraz z projektora. W celu sprawdzenia, czy podczas eksperymentu nie zmieniło się położenie wzorca względem projektora lub kamery, wzorec dodatkowo posiadał 9 czarnych matowych markerów kołowych. Markery usytuowane były na planie odwróconej

literę U w pewnym oddaleniu od centrum wzorca. Na powierzchnię wzorca projektowałem obraz, składający się z macierzy 35 czarnych markerów kołowych na białym tle. Na rysunku 5.5 zaprezentowałem użyty wzorec wraz z rzutowanym na niego obrazem.

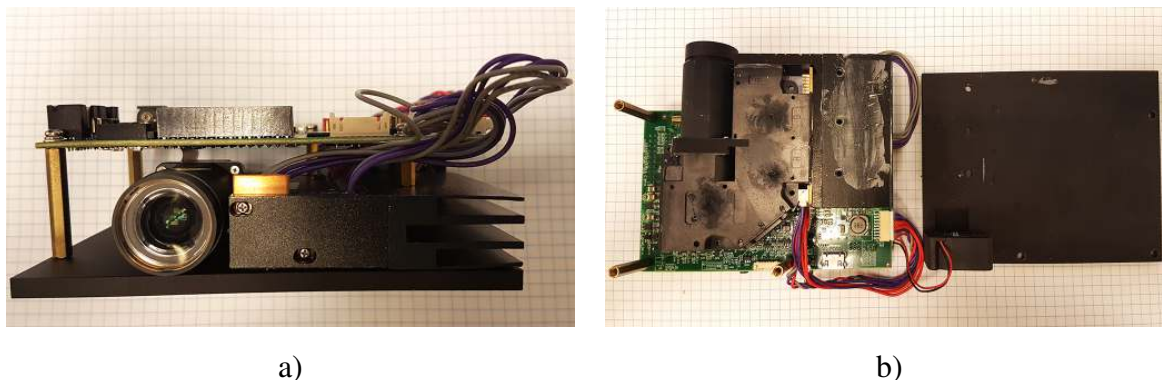


Rysunek 5.5: Użyty w eksperymencie wzorec. a) Zdjęcie wzorca wykonane przez kamerę użytą do rejestrowania ramek w eksperymencie, bez obrazu rzutowanego przez projektor. b) Zdjęcie wzorca oświetlonego przez projektor z rzutowanym obrazem. Na żółto zazaczyłem środki markerów związanych z wzorcem, a na czerwono, środki markerów rzutowanych przez projektor.

Badane projektory nie posiadały czujników, które mogłyby być wykorzystywane do rejestrowania temperatury projektora. Do pomiarów temperatury użyłem zewnętrznego czujnika dotykowego PT100 z kompensacją doprowadzeń oraz rejestratora temperatury Multicon CMC-99 firmy Simex [124]. Należy mieć świadomość, że gradient rozkładu temperatury na powierzchni każdego z projektorów był bardzo zróżnicowany i w zależności od umiejscowienia zewnętrznego czujnika dotykowego można było odczytywać bardzo różne wartości temperatury. Dlatego tak istotną kwestią było odpowiednie umiejscowienie czujnika. Dysponując tylko jednym czujnikiem temperatury narażałem się na popełnienie błędu związanego z pomiarem temperatury projektora w stanie nieustalonym termodynamicznie. Z uwagi na wymiary, transfer ciepła w komponentach projektora trwał dłużej, niż w przypadku kamery. Niepoprawne umiejscowienie czujnika temperatury mogło skutkować obserwowaniem efektu, który zarejestrowałem podczas eksperymentów z kamerami (patrz rozdział 5.1). Efekt polegał na tym, że po jakimś czasie od początku eksperymentu, temperatura kamery ustalała się na stałym poziomie i wskazywała na osiągnięcie równowagi termodynamicznej, ale temperaturowy dryft obrazu postępował dalej (porównaj Rys. 4.3).

5.1.1 Rozgrzewanie się projektora DLP LightCrafter 4500

Projektor DLP LightCrafter 4500 ma kompaktową, zwartą budowę. Nie posiada obudowy, a jego konstrukcję nośną stanowi aluminiowa płyta podstawy o grubości 5 mm, anodowana na czarno. Do płyty, za pomocą słupków dystansowych, przytwierdzona jest płytką drukowana z procesorem DLP (Rys. 5.4 oraz 5.6).

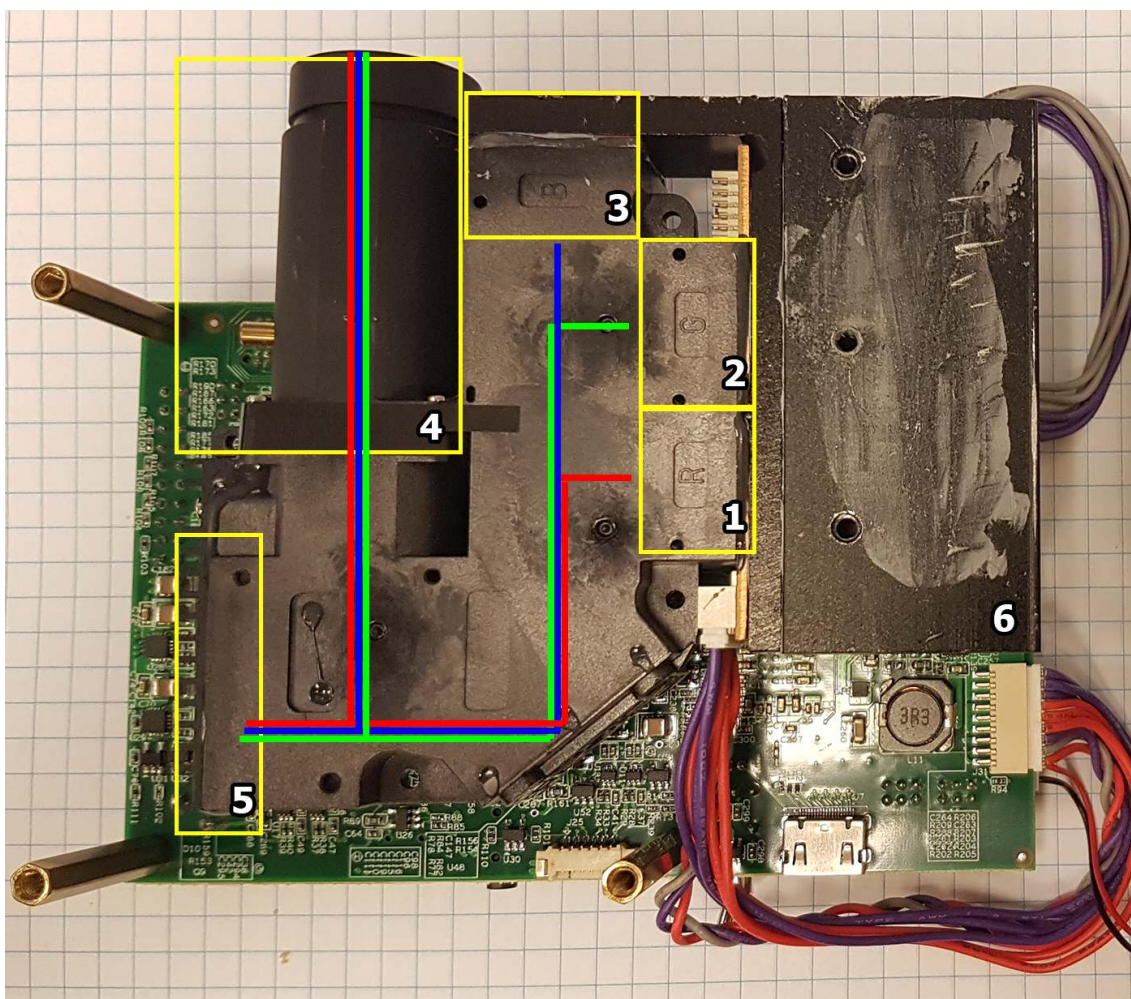


Rysunek 5.6: Budowa projektora DLP LightCrafter4500. a) Głównym elementem nośnym projektora jest aluminiowa płyta podstawy. b) Widok od dołu, z odkręconą płytą nośną. Widać korpus układu optycznego zamknięty w odlewie z czarnego tworzywa sztucznego.

Układ optyczny projektora (Rys. 5.7) zamknięty jest w korpusie odlanym z czarnego tworzywa sztucznego. Korpusu nie można otworzyć, kłapka zabezpieczona jest klejem. Projektor wyposażony jest w 3 źródła LED (oznaczone na rysunku 5.7 jako (1) - źródło czerwone R, (2) - źródło zielone G, (3) - źródło niebieskie B), znajdujące się na jednym z końców układu optycznego. Światło o poszczególnych barwach wprowadzane jest do toru optycznego najprawdopodobniej za pomocą zwierciadeł dichroicznych. Następnie za pomocą zwierciadła ustawionego pod kątem 45° do wiązki, kierowane jest na matrycę DMD (5). Po odbiciu od matrycy (5), wiązka światła najprawdopodobniej także za pomocą zwierciadła dichroicznego, odbijana jest w kierunku obiektywu projekcyjnego (4). Sądząc po kształcie i umiejscowieniu wyprowadzeń, sama matryca DMD (5) znajduje się w pobliżu obiektywu (4) pod kątem prostym do jego osi. Korpus układu optycznego nie jest mechanicznie związany z płytą podstawy, ale jest na sztywno połączony z radiatorami źródeł światła (6). Podejrzewam, że taka konstrukcja związana jest z faktem, że podczas pracy układ optyczny ulega odkształceniom termicznym i przytwierdzenie go do płyty podstawy mogłoby skutkować wystąpieniem niepożądanych naprężeń w szklanych elementach optycznych.

Projektor DLP LightCrafter4500 jest pewnego rodzaju platformą testową z matrycą DMD. Producent udostępnia obszerną dokumentację oraz SDK, dzięki któremu można w dosyć dużym stopniu wpływać na parametry wyświetlanego obrazu. Bardzo ważną cechą, z punktu widzenia zastosowania tego projektora w skanerze 3D z oświetleniem strukturalnym, jest fakt, że posiada

on wewnętrzną pamięć, którą można wykorzystać jako źródło do wyświetlania zdefiniowanych wcześniej obrazów. Dzięki temu, a także dzięki obecności uniwersalnych wejść i wyjść (GPIO ang. *General Purpose Input/Output*) w bardzo wygodny i skuteczny sposób zrealizować można np. sprzętowo synchronizację wyświetlanego obrazu z akwizycją danych przez detektor skanera 3D. Dodatkową funkcjonalnością jest możliwość wpływania na intensywność projektowanego obrazu poprzez definiowanie poziomów jasności (od 0 do 255) każdego z kanałów RGB osobno. Zmiana tej intensywności wpływa na temperaturę, do której rozgrzewa się projektor.

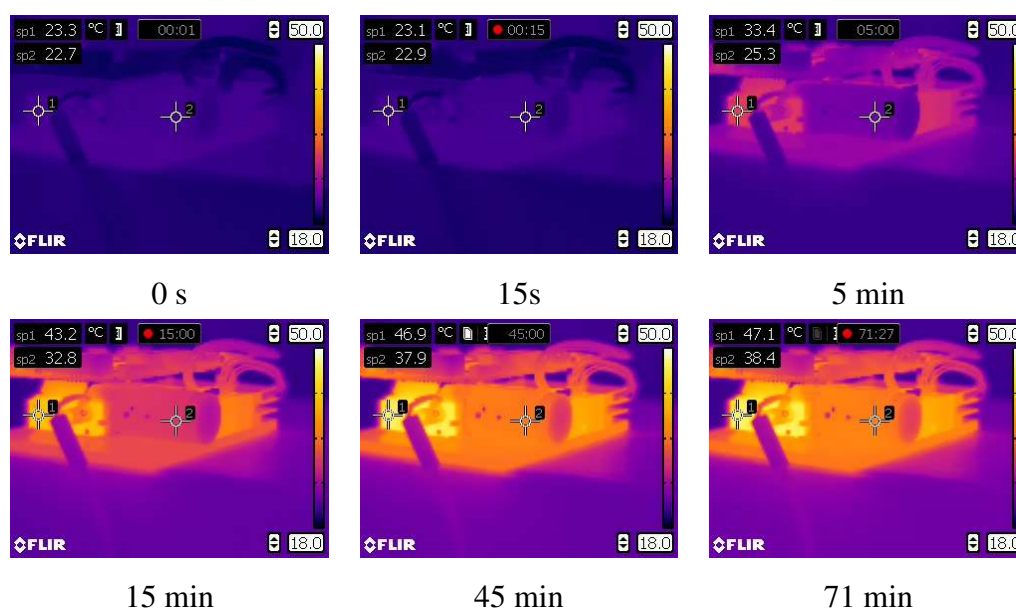


Rysunek 5.7: Układ optyczny projektora DLP LightCrafter4500 zamknięty jest w korpusie odlanym w czarnym tworzywie sztucznej. Na rysunku zazaczyłem: źródła LED (1) - czerwone, (2) - zielone, (3) - niebieskie, obiektyw projekcyjny (4), prawdopodobne położenie matrycy DMD (5) oraz radiator chłodzący źródła (6). Zazaczyłem także prawdopodobną drogę optyczną wiązek o poszczególnej barwach.

TEST I - rozgrzewanie z projekcją czarnego i białego obrazu

W teście rozgrzewania intensywność oświetlenia każdego z kanałów została ustawiona na 110. Po podłączeniu do zasilania projektor zaczął się rozgrzewać. Na rysunku 5.8 pokazano

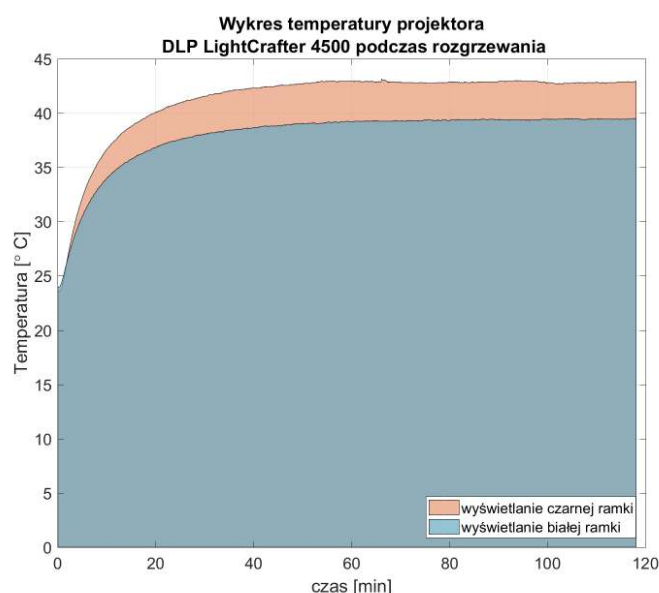
kolejne etapy rozgrzewania się projektora zarejestrowane przez kamerę termowizyjną. Emisyjność materiału została dobrana dla materiału radiatora matrycy DMD (punkt pomiarowy numer 1) oraz obiektywu (punkt pomiarowy numer 2). Obydwa te elementy zostały wykonane z anodowanego na czarno aluminium i odznaczały się bardzo wysoką emisyjnością (radiator matrycy DMD posiadał nieznacznie bardziej połyskliwe wykończenie). Temperatura radiatora matrycy wzrosła z około 23,2°C, do około 47,1°C, natomiast obiektywu z około 22,7°C do około 38,4°C. Cały test trwał nieco ponad 70 minut. Rozkład temperatury na powierzchni elementów projektora po tym czasie był w miarę jednorodny, przy czym w okolicach radiatora matrycy DMD widać obszar o największej temperaturze. Bardzo istotne jest, że aluminiowa płyta podstawy projektora ogrzała się do podobnych temperatur, co reszta aluminiowych elementów projektora. Można podejrzewać, że jej odkształcenia będą miały duży wpływ na deformacje obrazu rzutowanego przez projektor.



Rysunek 5.8: Kolejne etapy rozgrzewania się projektora DLP LightCrafter4500 zarejestrowane przez kamerę termowizyjną.

Zewnętrzny czujnik temperatury został umieszczony w pobliżu matrycy DMD. Na rysunku 5.9 zaprezentowałem wykres temperatury rozgrzewającego się projektora DLP LightCrafter 4500 przy wyświetlaniu ramki całkowicie czarnej (kolor pomarańczowy) oraz całkowicie białej (kolor niebieski). Widać, że w zależności od projektowanego obrazu projektor rozgrzewa się do różnych temperatur. Spowodowane jest to faktem, że podczas wyświetlania całkowicie białej ramki, światło trafiające na matrycę DMD jest od niej odbijane i niemalże w całości trafia do obiektywu projekcyjnego. W przypadku wyświetlania czarnej ramki, matryca DMD odbija światło w kierunku absorbera. Efekt obserwowania różnych temperatur, do których rozgrzewa się projektor, jest najprawdopodobniej związany z faktem podgrzewania się absorbera na

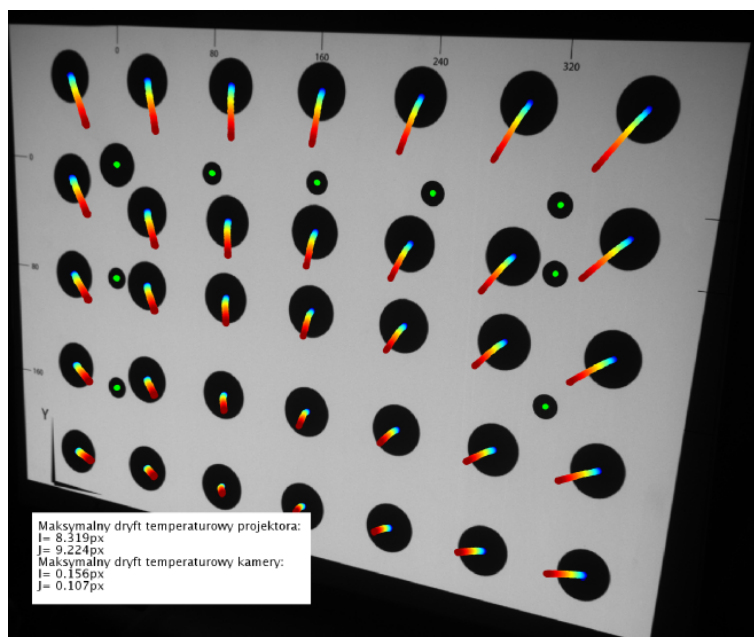
skutek padania na niego światła odbitego przez matrycę DMD. Przy wyświetlaniu ramki białej, projektor nagrzał się do około $39,5^{\circ}\text{C}$, przy wyświetlaniu ramki czarnej, nagrzał się do około $42,7^{\circ}\text{C}$. W obydwu przypadkach czas rozgrzewania wynosił około 70 minut. Różnica temperatur mierzonych przez kamerę termowizyjną oraz zewnętrzny czujnik wynika najprawdopodobniej z faktu nieprecyzyjnie dobranej emisyjności materiału podczas pomiarów kamerą termowizyjną.



Rysunek 5.9: Temperatura zarejestrowana przez zewnętrzny czujnik podczas testu rozgrzewania się projektora DLP LightCrafter 4500 wyświetlającego całkowicie biały (kolor niebieski) oraz całkowicie czarny (kolor pomarańczowy) obraz.

TEST II - wyznaczenie temperaturowego dryftu projektowanego obrazu

W tym teście projektor zamontowany został na tym samym stanowisku z komorą termiczną, które zostało opisane w badaniach na wpływem temperatury na kamerę (rozdział 4.2). Zarówno projektor, jak i wzorec umieszczone były na stojaku wykonanym z Robaxu co zapewniało niezmiennosc ich wzajemnego położenia podczas testów rozgrzewania się oraz późniejszych testów ze zmianą temperatury zewnętrznej. Podczas rozgrzewania się projektor wyświetlał obraz pokazany na rysunku 5.5. Za pomocą zewnętrznej kamery obserwowałem obraz rzutowany na wzorec. Rejestrowałem ramki z częstotliwością 1 ramki co 5 sekund. W ten sposób zebrałem obrazy ukazujące temperaturowy dryft obrazu projektowanego przez projektor. Na rysunku 5.10 zaprezentowałem temperaturowy dryft obrazu wyświetlanego przez projektor podczas rozgrzewania. Test trwał 70 minut, w czasie których projektor rozgrzał się do temperatury około $42,5^{\circ}\text{C}$.



Rysunek 5.10: Temperaturowy dryft obrazu wyświetlanego przez projektor DLP LightCrafter 4500 podczas rozgrzewania. Tłem obrazu jest pierwsza ramka zarejestrowana przez kamerę. Zielonymi znacznikami zaznaczono środki markerów związanych ze wzorcem. Za pomocą barwnych markerów zaprezentowano kolejne środki markerów związane z projektowanym obrazem. Kolejne przesunięcia zostały przeskalowane 20 krotnie w celu poprawy widoczności trendu dryftu.

Środki markerów związane z wyświetlanym obrazem zaznaczone zostały kolorowymi znacznikami, a barwa znacznika odpowiada temperaturze projektora odczytanej przez zewnętrzny czujnik (na niebiesko - niska temperatura, na czerwono - wysoka temperatura). Tłem obrazu jest pierwsza zarejestrowana przez zewnętrzną kamerę ramka. Kolejne przesunięcia wyświetlanych markerów zostały przeskalowane 20 razy. Markery związane z wzorcem zostały zaznaczone zielonymi znacznikami. Maksymalny zarejestrowany dryft obrazu wyświetlanego przez projektor wyniósł $I_{max} = 8,32\text{px}$ w kierunku poziomym oraz $J_{max} = 9,22\text{px}$ w kierunku pionowym. Należy pamiętać, że na tym etapie badań dryft wyskalowany był w pikselach kamery obserwującej eksperyment, nie we współrzędnych obrazu wyświetlanego przez projektor. Po przeliczeniu na milimetry, zarejestrowane przez kamerę maksymalne przesunięcia środków markerów wyniosły $I_{max} = 1,89\text{mm}$ oraz $J_{max} = 2,1\text{mm}$ w płaszczyźnie wzorca. Dryft markerów związanych z wzorcem był bardzo mały ($I_{max} = 0,16\text{px}$ w kierunku poziomym oraz $J_{max} = 0,11\text{px}$ w kierunku pionowym) co świadczyło o tym, że podczas eksperymentu pozycja wzorca względem kamery oraz projektora nie uległa zmianie i obserwowany dryft obrazu projektora związany był jedynie z odkształceniami termicznymi. W zależności od współrzędnej wyświetlanego obrazu (I, J), środki wyświetlanych markerów

miały różne trajektorie, ale zauważalny był bardzo wyraźny trend. W okolicach środkowego markera z najniższego rzędu obserwowane było najmniejsze przesunięcie. Im dalej od tego markera i im wyższa temperatura, tym większe przesunięcie. Kierunek dryftu dla każdego markera wyznaczony był przez kierunek od środka danego markera do środka środkowego markera z najniższego rzędu. W efekcie, im wyższa temperatura tym bardziej zbliżały się do siebie środki markerów, a centrum tego przekształcenia znajdowało się mniej więcej na środku dolnej części wyświetlanego obrazu.

Test numer II został powtórzony czterokrotnie w celu sprawdzenia powtarzalności rejestrowanego dryftu. Za każdym razem markery poruszały się po podobnych trajektoriach, maksymalne przesunięcia miały podobne wartości i za każdym razem widoczny był opisany przed chwilą wyraźny trend przesunięć markerów.

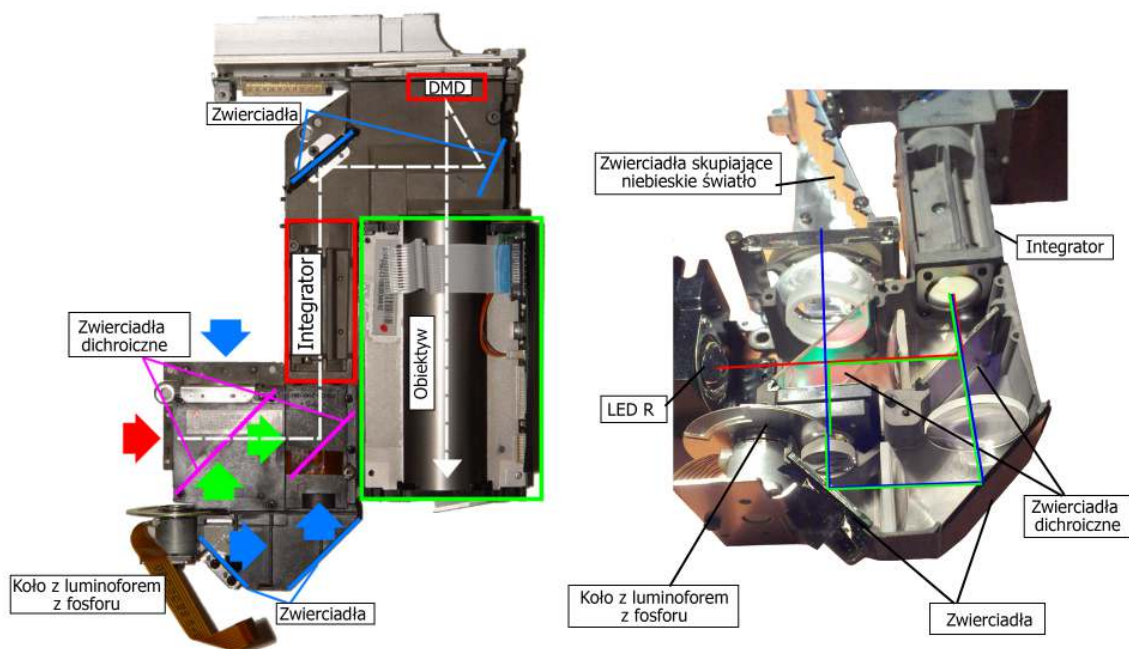
5.1.2 Rozgrzewanie się projektora Casio XJ-A252

Projektor DLP Casio XJ-A252 [134] ma kształt płaskiego prostopadłościanu, z obiektywem usytuowanym niesymetrycznie bliżej jednego z boków. Zamknięty jest w obudowie odlanej z tworzywa sztucznego. Jego konstrukcję nośną stanowi dolna płyta wykonana z aluminium malowanego proszkowo na kolor biały. Po zdjęciu górnej pokrywy (Rys. 5.11) widać płytę główną z procesorem DLP, zasilacz, układy oświetlaczy, układ chłodzący oraz obiektyw projekcyjny.



Rysunek 5.11: Projektor Casio XJ-A252. a) Wygląd projektora. b) Wygląd projektora ze zdjętą górną pokrywą. Na zdjęciu zaznaczono: (1) zasilacz, (2) wentylatory chłodzące matrycę niebieskich diod LED, (3) moduł matrycy niebieskich diod LED z radiatorem, (4) moduł czerwonej diody LED z radiatorem, (5) koło barwne, (6) obiektyw projekcyjny, (7) procesor DLP na płycie głównej oraz (8) moduł chłodzący czerwoną diodę LED.

Pod płytą główną z procesorem DLP znajduje się układ optyczny (Rys. 5.12). W projektorze Casio do kształtowania obrazu użyta została jedna matryca DMD o wymiarach 1280×800 pikseli. Zastosowano także dwa źródła światła: czerwoną diodę LED dużej mocy oraz matrycę niebieskich diod LED.



Rysunek 5.12: Układ optyczny projektora Casio XJ-A252. Fot. Dominik Paraszka oraz Michał Kamiński.

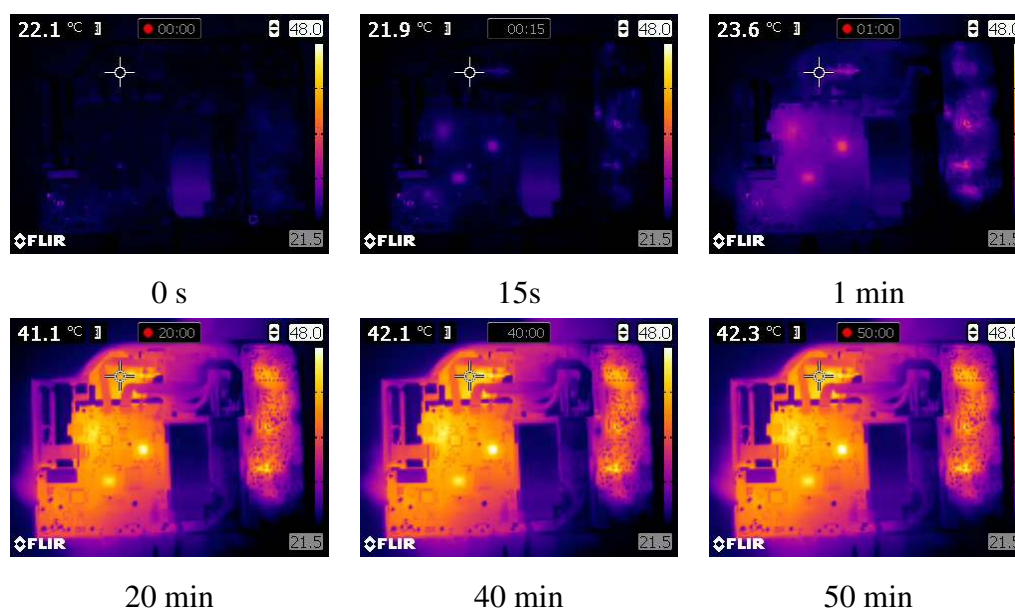
Światło z diody czerwonej przechodzi przez zwierciadła dichroiczne i po przejściu przez integrator trafia na matrycę DMD jako kanał R. Światło niebieskie przechodzi przez zwierciadło dichroiczne i trafia na obracającą się płytkę z zielonym luminoforem. Luminofor zajmuje jedynie część płytki, pozostała część jest przezroczysta. Gdy niebieskie światło trafia na powierzchnię przezroczystą, przechodzi dalej i trafia do integratora i na matrycę DMD jako kanał B. Gdy trafi na luminofor, odbija się w postaci światła zielonego i poprzez zwierciadła dichroiczne także trafia do integratora oraz na matrycę DMD w postaci kanału G. Poprzez synchronizację obrotu koła z luminoforem oraz wysterowania matrycy DMD, do obiektywu projekcyjnego trafia wiązka, która niesie informację o projektowanym obrazie. Oko ludzkie uśrednia informację z 3 kanałów dzięki czemu obserwuje się kolorowy obraz RGB.

Tego typu projektor jest używany w produkcji np. skanera 3D z oświetleniem strukturalnym MICRON3D green firmy Smarttech [135]. Na bazie tego modelu powstał także skaner do digitalizacji kształtu ciała ludzkiego w ruchu, opisany w publikacji [11] oraz [12]. Ten sam projektor został także użyty w pierwszych prototypach skanerów do digitalizacji miejsc zdarzeń

kryminalnych [7, 29], powstałych w grancie badawczym "Rekonstrukcja miejsca zdarzenia kryminalnego na podstawie wyglądu krwawych śladów" DOBR/0006/R/ID1/2012/03.

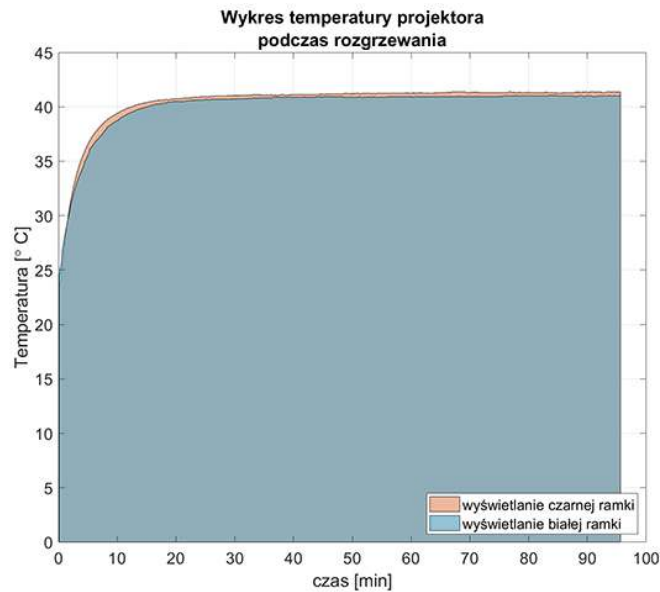
TEST I - rozgrzewanie z projekcją czarnego i białego obrazu

Po włączeniu zasilania, projektor Casio DLP XJ-A252 zaczął się nierównomiernie rozgrzewać. Intensywność wyświetlanego obrazu została zdefiniowana w połowie zakresu, podobnie, jak w przypadku testów z projektorem DLP LightCrafter 4500. Na rysunku 5.13 pokazałem ujęcia wykonane kamerą termowizyjną FLIR E40 [97], ukazujące proces rozgrzewania się projektora. Analizując obrazy z kamery termowizyjnej, można zidentyfikować główne źródła ciepła usytuowane na płycie głównej oraz na zasilaczu. Sam procesor DLP generował dość dużo ciepła. Po około 20 minutach temperatura całej płytki drukowanej wzrosła już prawie dwukrotnie. Należy mieć jednak świadomość, że podczas wizualizacji gradientu temperatur za pomocą kamery termowizyjnej, wyniki pomiaru temperatury bardzo mocno zależą od podania poprawnej wartości emisyjności obserwowanego materiału. Skala temperatury, pokazana na rysunku 5.13, została wyznaczona dla emisyjności materiału $\epsilon = 95\%$, czyli odpowiedniej dla czarnego i matowego wykończenia powierzchni (wg. danych w oprogramowaniu kamery FLIR E40 [97]). Niektóre elementy widoczne na zdjęciu mają zupełnie inną emisyjność, np. blachy radiatorów źródeł światła niebieskiego oraz czerwonego, wykonanego z aluminium o srebrzystym, połyskliwym wykończeniu. Stąd też pomiary kamerą termowizyjną należy traktować jedynie jako pewnego rodzaju jakościowe informacje o rozkładach temperatury. Punkt pomiarowy na kamerze termowizyjnej został zdefiniowany na powierzchni korpusu układu optycznego, którego fragment wyłaniał się spod płyty głównej projektora. Dla tej powierzchni została także zdefiniowana emisyjność. Kamera zarejestrowała prawie dwukrotny wzrost temperatury tego elementu. Z punktu widzenia eksperymentu, bardzo ciekawa byłaby obserwacja rozkładu temperatury na powierzchni całego układu optycznego. Niestety jest to niemożliwe, ponieważ płyta główna jest związana z korpusem układu optycznego i połączona gniazdem sygnałowym. Po jej odłączeniu projektor z oczywistych względów nie dawał się uruchomić.



Rysunek 5.13: Kolejne etapy rozgrzewania się projektora Casio XJ-A252 zarejestrowane przez kamerę termowizyjną.

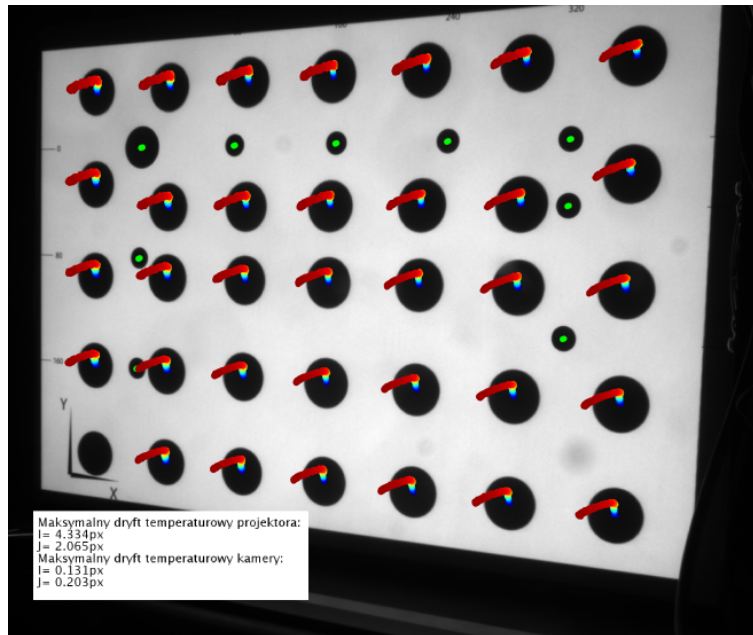
Podczas testu numer I, zewnętrzny czujnik temperatury został umieszczony w bezpośredniej bliskości punktu zdefiniowanego na kamerze termowizyjnej. Starałem się tak zamontować czujnik, by jego wskazania odpowiadały pomiarowi temperatury korpusu układu optycznego. Na rysunku 5.14 pokazałem wykres reprezentujący temperaturę projektora zarejestrowaną podczas wyświetlania całkowicie białej (kolor niebieski) oraz czarnej (kolor pomarańczowy) ramki. Z analizy obydwu przebiegów widać, że po około 30 minutach projektor osiąga swój stan równowagi termodynamicznej i rozgrzewa się do temperatury około 41°C. Podczas testu wyświetlania białej ramki, projektor osiąga temperaturę 41,06°C, a podczas testu z czarną ramką - temperaturę 41,38°C. Różnica osiągniętych temperatur jest zatem bardzo niewielka, a dynamika wzrostu temperatury niemalże taka sama. Wyniki tego testu, w porównaniu do wyników dla projektora DLP LightCrafter 4500 są zatem zupełnie inne. Spowodowane jest to najprawdopodobniej adaptacyjnym systemem chłodzenia projektora Casio XJ-A252, którego wydajność regulowana jest w funkcji temperatury mierzonej przez wewnętrzne czujniki znajdujące się na płycie głównej projektora. Nie jestem w stanie potwierdzić tej teorii, ale może za nią przemawiać fakt różnej prędkości obrotowej wentylatorów układu chłodzącego (wentylatory sterowane są poprzez zmianę współczynnika wypełnienia sygnału, na oscyloskopie można zaobserwować różną szerokość impulsów sterujących w czasie działania projektora).



Rysunek 5.14: Temperatura zarejestrowana przez zewnętrzny czujnik podczas testu rozgrzewania się projektora Casio XJ-A252 wyświetlającego całkowicie biały (kolor niebieski) oraz całkowicie czarny (kolor pomarańczowy) obraz.

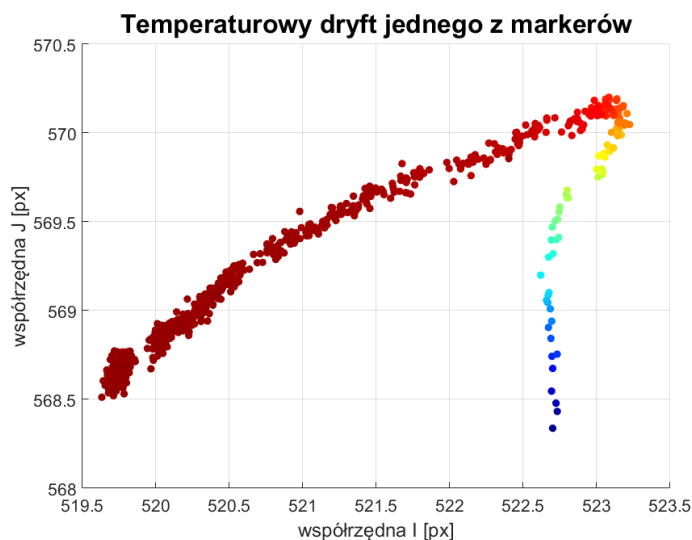
TEST II - wyznaczenie temperaturowego dryftu projektowanego obrazu

W tym teście wyznaczyłem temperaturowy dryft obrazu wyświetlanego przez projektor. Test przebiegał w ten sam sposób, co dla projektora DLP LightCrafter 4500. Na rysunku 5.15 zaprezentowałem wyniki testu. Maksymalny zarejestrowany dryft obrazu wyświetlanego przez projektor, wyrażony w pikselach kamery wyniósł $I_{max} = 4,33\text{px}$ w kierunku poziomym oraz $J_{max} = 2,06\text{px}$ w kierunku pionowym (odpowiadają temu przesunięcia o wartości 1,05mm w kierunku pionowym oraz 0,51mm w kierunku poziomym w płaszczyźnie wzorca).



Rysunek 5.15: Temperaturowy dryft obrazu wyświetlanego przez projektor Casio XJ-A252 podczas rozgrzewania. Tłem obrazu jest pierwsza ramka zarejestrowana przez kamerę. Zielonymi znacznikami zaznaczono środki markerów związanych ze wzorcem. Za pomocą barwnych markerów zaprezentowano kolejne środki markerów związane z projektowanym obrazem. Kolejne przesunięcia zostały przeskalowano 20 krotnie w celu poprawy widoczności trendu dryftu. Brak trajektorii dryftu lewego dolnego markera projektora spowodowany jest nałożeniem się obrazu tego markera na wydrukowany na wzorcu znacznik układu współrzędnych.

Osiągane wartości dryftu są zatem mniejsze, niż w przypadku projektora DLP LightCrafter 4500. Charakter dryftu także jest zupełnie inny. Widać wyraźny podział trajektorii, po której przesuwały się markery, na dwie części. W początkowej fazie rozgrzewania się projektora, środki projektowanych markerów przesuwały się ku górze. Przesunięcie jest niemalże jednakowe dla wszystkich markerów. W pewnym momencie, gdy zewnętrzny czujnik temperatury wskazuje temperaturę około 37°C, trajektorie wszystkich markerów gwałtownie zmieniają swój charakter i "zakręcają" w kierunku lewego dolnego rogu obrazu. Opisane zjawisko pokazałem dodatkowo na rysunku 5.16, który prezentuje wykres przemieszczeń środków jednego z projektowanych markerów podczas testu rozgrzewania.



Rysunek 5.16: Temperaturowy dryft jednego z markerów projektowanych przez projektor Casio XJ-A252.

Taki charakter temperaturowego dryftu obrazu jest bardzo podobny do dryftu obserwowanego w przypadku rozgrzewania się niektórych kamer (porównaj rozdział 4.1 i np. rysunek 4.3). Spowodowany jest on najprawdopodobniej wpływem niejednorodnego nagrzewania się całej konstrukcji projektora, korpusu optycznego oraz obudowy. W początkowej fazie rozgrzewania się projektora, na charakter dryftu wpływ ma deformacja temperaturowa jakiejś konkretnej części projektora (przy czym nie jestem w stanie zidentyfikować, która to część), a po przekroczeniu temperatury granicznej, odkształcenia termiczne innego elementu konstrukcyjnego zaczynają mieć dominujące znaczenie, czego efektem są pokazane na rysunkach 5.15 oraz 5.16 "złamane" trajektorie markerów.

W obserwowanym dryfcie temperaturowym zauważyć można także zjawisko postępującego dryftu pomimo osiągnięcia przez projektor równowagi termodynamicznej. Porównanie temperatury projektora wskazanej przez zewnętrzny czujnik z charakterem dryftu pokazuje, że pomimo faktu, że projektor osiągnął stan równowagi termodynamicznej, dryft obrazu nadal dość dynamicznie postępuje (podobne zjawisko obserwowane było także w przypadku niektórych kamer, porównaj rozdział 4.1 i rysunek 4.8 oraz 4.3). Przyczyną tego zjawiska jest niejednorodny rozkład temperatur na powierzchni projektora oraz umiejscowienie zewnętrznego czujnika temperatury w miejscu, w którym lokalnie projektor o wiele szybciej osiąga stan równowagi termodynamicznej. Przy czym stan ten nie jest tożsamy ze stanem równowagi termodynamicznej całego projektora. Zatem w przypadku podejścia do budowy modelu kompensacyjnego dla tego modelu projektora, należałoby wybrać inne miejsce do pomiaru temperatury.

Test numer II został powtórzony czterokrotnie, w celu zbadania powtarzalności temperaturowego dryftu obrazu. W każdym z testów obserwowałem bardzo podobny kształt trajektorii markerów. Osiągane maksymalne wartości dryftu w obydwu kierunkach także były na podobnym poziomie.

5.1.3 Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych testów pokazują, że zjawisko rozgrzewania się projektorów ma bardzo duży wpływ na kształt wyświetlanego przez nie obrazu. Jednocześnie, dla projektora DLP LightCrafter 4500 widać bardzo wyraźny związek pomiędzy wyświetlanym obrazem, a temperaturą, do której rozgrzał się projektor. Fakt ten jest o tyle istotny, że może mieć bardzo duże znaczenie dla poprawnego działania skanera 3D. Podczas przeprowadzania pomiarów skanerem 3D, wyświetlanie sekwencji obrazów pomiarowych zajmuje jedynie pewien okres w całym cyklu pracy skanera. W zależności od użytego detektora oraz liczby wyświetlanych ramek, czas projekcji wynosi z reguły od ułamka sekundy (dla bardzo szybkich skanerów) do nawet kilkudziesięciu sekund (dla skanerów wykorzystywanych np. w muzealnictwie). Poza tymi okresami, projektor w skanerze może wyświetlać dowolny obraz, a w praktyce często wykorzystuje się projekcję całkowicie czarnej ramki. Przeprowadzone testy pokazały, że podczas wyświetlania czarnej ramki, na skutek kierowania strumienia światła w absorber, temperatura projektora może wzrosnąć o kilka stopni. Nie można kategorycznie stwierdzić, że taka zmiana pogorszy jakość wykonywanych skanów, ale na pewno istnieje ryzyko, że tak się stanie. Dlatego tak ważne jest zrozumienie zjawisk cieplnych w skanerze oraz umiejętne sterowanie projekcją, by jak najbardziej ograniczyć zmiany temperatury projektora na skutek wyświetlania przez niego różnych obrazów.

Badania temperaturowego dryftu wyświetlanego obrazu pokazują, jak ważne jest poprawne zdefiniowanie miejsca, w którym mierzona jest temperatura projektora. W przypadku projektora Casio XJ-A252 miejsce to nie zostało poprawnie dobrane i w efekcie podczas eksperymentów wysnuto błędne wnioski o osiągniętym stanie równowagi termodynamicznej. Jednocześnie pragnę zaznaczyć, że badany projektor Casio ma bardzo skomplikowaną budowę, w związku z czym bardzo trudno byłoby znaleźć reprezentatywne dla całego projektora miejsce pomiaru temperatury. W przypadku projektora DLP LightCrafter 4500, analiza temperaturowego dryftu obrazu sugeruje, że miejsce pomiaru temperatury zostało wybrane poprawnie.

W dalszych pracach nad opracowaniem modelu kompensacji wpływu temperatury na projektor, skupiłem się jedynie na modelu DLP LightCrafter 4500. Abstrahując od badanych przeze mnie kwestii związanych z wpływem temperatury na wyświetlany przez ten projektor obraz, w mojej opinii jest to na razie najlepszy na rynku projektor, który może zostać użyty w budowie skanera 3D z oświetleniem strukturalnym. W odróżnieniu od np. projektora Casio XJ-A252 nie wymaga on w zasadzie żadnych modyfikacji

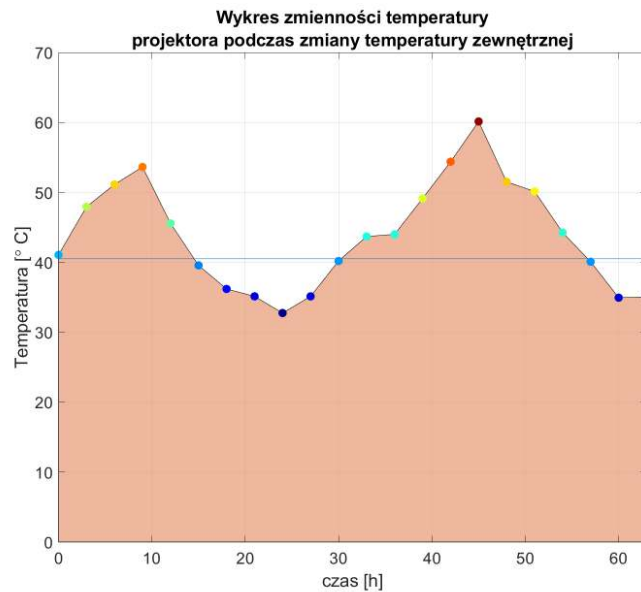
sprzętowych. Ma stosunkowo niewielkie wymiary i sztywną konstrukcję. Użyte chłodzenie nie wprowadza niepożądanych wibracji obserwowanych w obrazie. Bardzo istotną kwestią jest także fakt, że podczas wielokrotnie powtarzanych eksperymentów z rozgrzewaniem się, zarejestrowany temperaturowy dryft obrazu cechowała bardzo duża powtarzalność. Takie stabilne i przewidywalne zachowanie się projektora w różnych temperaturach pozwoliło na przeprowadzenie badań służących do budowy modelu kompensacyjnego, bez konieczności ingerencji w budowę projektora (jak miało to miejsce w przypadku kamery, patrz rozdział 4.2).

5.2 Wpływ zmiany temperatury zewnętrznej

Do wyznaczenia wpływu zmian temperatury zewnętrznej na projektor DLP LightCrafter 4500 posłużyłem się tym samym stanowiskiem z komorą termiczną, którego używałem do badań nad kamerami (rozdział 4.2). Podobnie, jak w przypadku testu z rozgrzewaniem się projektora i rejestracją temperaturowego dryftu obrazu, projektor umieszczony został wewnątrz komory na stojaku z Robaxu. Na drugim końcu stojaka, poza komorą termiczną umieszczony był wzorzec. Klapka inspekcyjna komory pozostawała zamknięta na czas ustalania się zadanej temperatury wewnątrz komory. Na początku testu, projektor oraz zewnętrzna kamera zostały włączone i pozostawione na 120 minut w celu osiągnięcia stabilnej temperatury. Dla tej temperatury, zwanej temperaturą referencyjną, zebrałem serię ramek referencyjnych przedstawiających wzorzec oświetlony przez projektor. Użyłem tego samego wzorca oraz wyświetlanego obrazu, co w badaniach z rozgrzewaniem się projektora (Rysunek 5.5). Następnie zmieniałem temperaturę wewnątrz komory termicznej i czekałem co najmniej 3 godziny na ustabilizowanie się temperatury projektora oraz wnętrza komory.

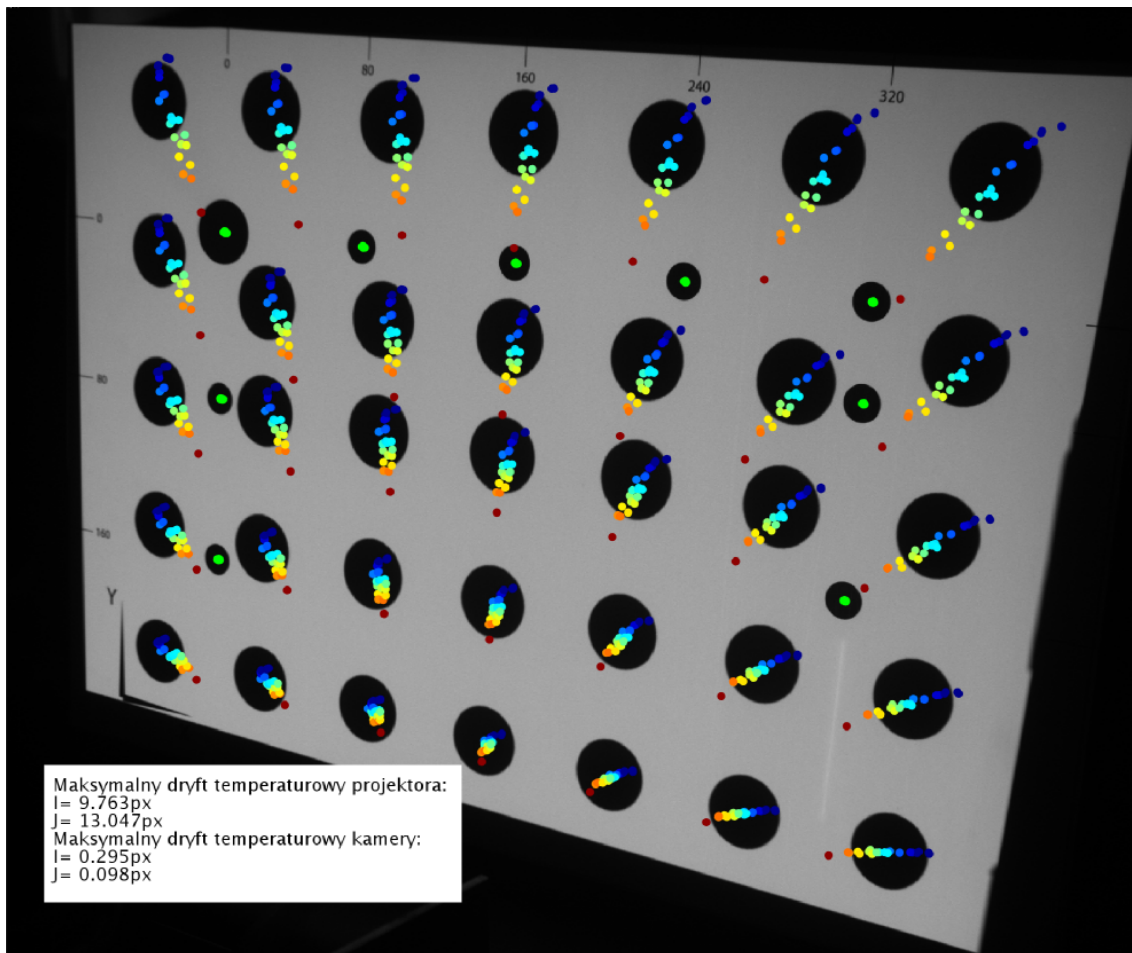
Okazało się, że zbudowana na potrzeby eksperymentów komora termiczna posiadała zbyt małą moc chłodzenia w stosunku do mocy grzewczej projektora. Stąd też w badaniach widać brak symetrii w zadawanych temperaturach: udało mi się schłodzić projektor jedynie do temperatury około 32°C, co odpowiada około 14°C wewnątrz komory. Maksymalna temperatura rejestrowana podczas eksperymentów wyniosła około 60°C, co odpowiada około 42°C wewnątrz komory. Nie zwiększałem tej temperatury, bojąc się przekroczyć dopuszczalną temperaturę pracy projektora.

Na wykresie 5.17 zaprezentowałem temperatury projektora, w których rejestrowane były obrazy służące do budowy modelu kompensacyjnego. Poziomą linią, o wartości rzędnej około 42°C, zaznaczyłem temperaturę referencyjną. Podczas zbierania danych wykonałem podwójnie cykl zwiększania oraz zmniejszania temperatury wewnątrz komory. Cały eksperyment trwał nieprzerwanie przez ponad 66 godzin.



Rysunek 5.17: Temperatura projektora DLP LightCrafter 4500, zarejestrowana przez zewnętrzny czujnik podczas eksperymentu ze zmianą temperatury zewnętrznej. Kolory punktów odzwierciedlają temperaturę i są takie same jak kolory znaczników reprezentujących środki markerów w poszczególnych temperaturach na rysunku 5.18.

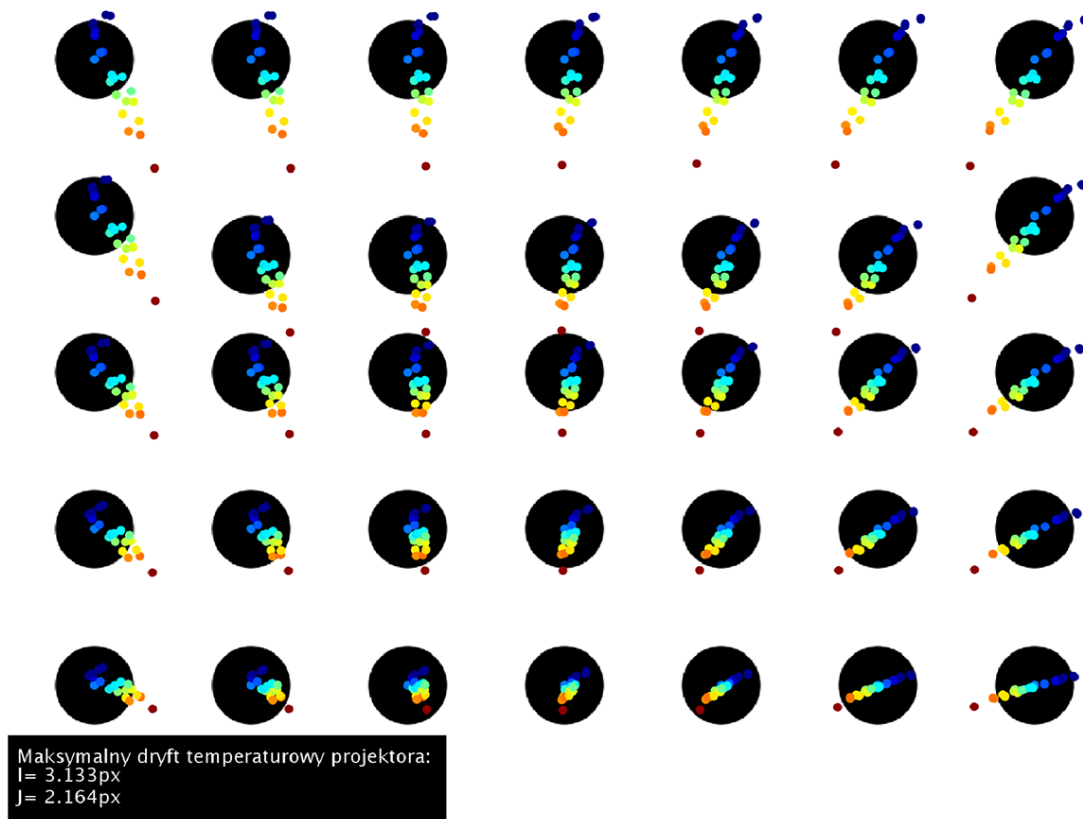
Na rysunku 5.18 zaprezentowałem temperaturowy dryft obrazu wyświetlanego przez projektor, zarejestrowany podczas eksperymentu. Kolejne przesunięcia środków markerów zostały przeskalowane 20-krotnie. Widać, że środki wyświetlanych markerów zachowują się w bardzo podobny sposób, co w przypadku eksperymentu z rozgrzewaniem się projektora. Zauważyć można taki sam trend związany ze zbliżaniem się środków markerów w kierunku środkowej dolnej części wyświetlanego obrazu wraz ze wzrastającą temperaturą. Środki markerów związane ze wzorcem (zaznaczone na zielono) pozostały w zasadzie nieruchome podczas trwania całego eksperymentu (maksymalne przesunięcie markerów związanych z wzorcem wyniosło $I_{max} = 0,3\text{px}$ oraz $J_{max} = 0,1\text{px}$ w płaszczyźnie wzorca).



Rysunek 5.18: Temperaturowy dryft obrazu wyświetlanego przez projektor DLP LightCrafter 4500, zarejestrowany podczas eksperymentu ze zmianą temperatury zewnętrznej. Kolejne przesunięcia środków markerów zostały przeskalowane 20-krotnie. Zielonymi znacznikami zaznaczono wyznaczone podczas eksperymentu środki markerów związane ze wzorcem.

Dotychczas prezentowane rysunki pokazujące temperaturowy dryft wyświetlanego obrazu związane były z kamerą użytą do obserwacji eksperymentu. Z punktu widzenia budowy modelu kompensacyjnego, bardziej interesujące byłoby wyznaczenie przesunięć środków markerów w dziedzinie wyświetlanego przez projektor obrazu, a nie obrazu rejestrowanego przez kamerę. By przejść do układu współrzędnych obrazu projektowanego przez projektor, posłużyłem się dopasowaniem wielomianu i wyznaczyłem zależności pozwalające na obliczenie współrzędnych I_{proj} oraz J_{proj} w funkcji współrzędnych kamery. Obliczenia wykonałem w programie Matlab [122] i posłużyłem się tymi samymi funkcjami, co w przypadku kompensacji bazy mechanicznej (rozdział 3.4) oraz kompensacji wpływu temperatury na kamerę (rozdział 4.3). Najlepsze wyniki dopasowania uzyskiwałem dla wielomianów 5-go stopnia.

Na rysunku 5.19 pokazałem temperaturowy dryft obrazu zarejestrowany podczas eksperymentu, we współrzędnych związanych z wyświetlanym obrazem. Tłem obrazu jest bitmapa faktycznie wyświetlana przez projektor, a kolejne przesunięcia środków markerów zostały przeskalowane 20-krotnie. Po przejściu na współrzędne związane z projektowanym obrazem, maksymalne wartości temperaturowego dryftu obrazu wyniosły $I_{max} = 3,133\text{px}$ w kierunku poziomym oraz $J_{max} = 2,164\text{px}$ w kierunku pionowym.

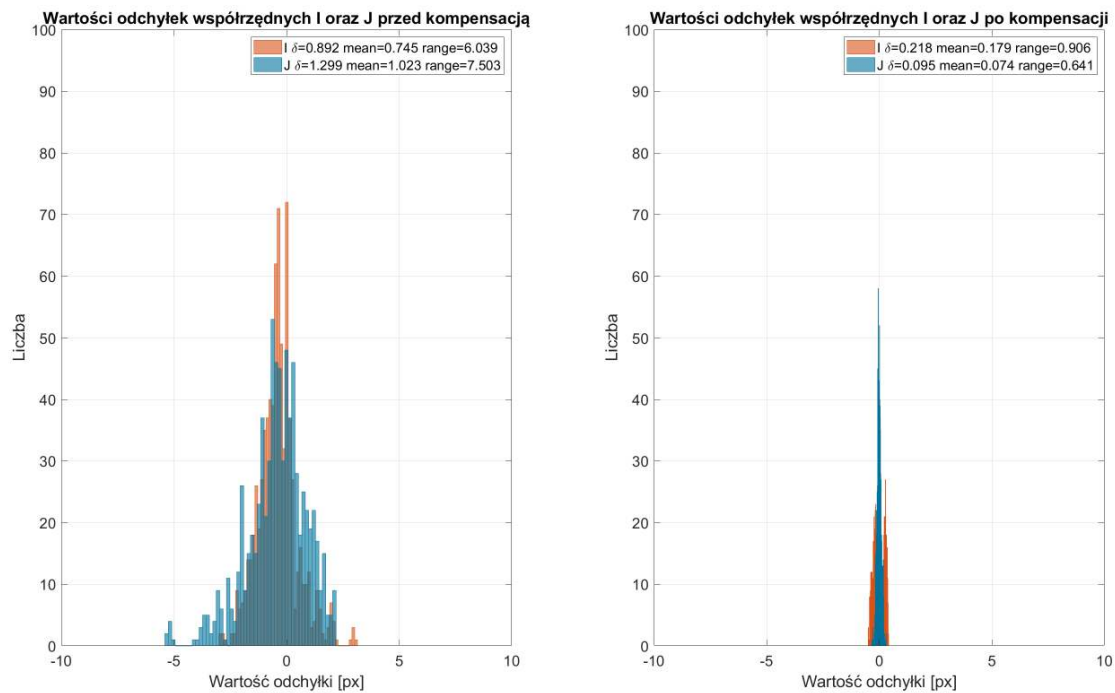


Rysunek 5.19: Temperaturowy dryft obrazu wyświetlanego przez projektor DLP LightCrafter 4500 z rysunku 5.18 przeniesiony do współrzędnych związanych z wyświetlanym obrazem. Tłem rysunku jest bitmapa faktycznie wyświetlana przez projektor.

5.3 Model kompensacji wpływu temperatury na projektor

Wyznaczone w eksperymencie współrzędne środków projektowanych markerów dla różnych wartości temperatury zewnętrznej posłużyły do budowy modelu kompensacyjnego. Danymi niezależnymi do wyznaczenia modelu był zbiór współrzędnych środków markerów w różnych temperaturach, a danymi zależnymi, zbiór odpowiadających im współrzędnych w temperaturze referencyjnej. Do budowy modelu kompensacyjnego użyłem tych samych funkcji co w przypadku innych modeli omawianych w tej rozprawie. Korzystałem z dopasowania wielomianem w dziedzinie współrzędnych projektora (I, J) oraz temperatury projektora

T. Wszystkie obliczenia wykonałem w programie Matlab [122]. Wyzaczyłem osobny model kompensacyjny dla współrzędnej I oraz J projektora. Najlepsze wyniki dopasowania otrzymywałem dla wielomianów 5-go stopnia. Na rysunku 5.20 zaprezentowałem histogramy pokazujące wartości współrzędnych odchyłek środków dla odpowiadających sobie markerów w różnych temperaturach odniesione do współrzędnych z temperatury referencyjnej przed oraz po kompensacji.



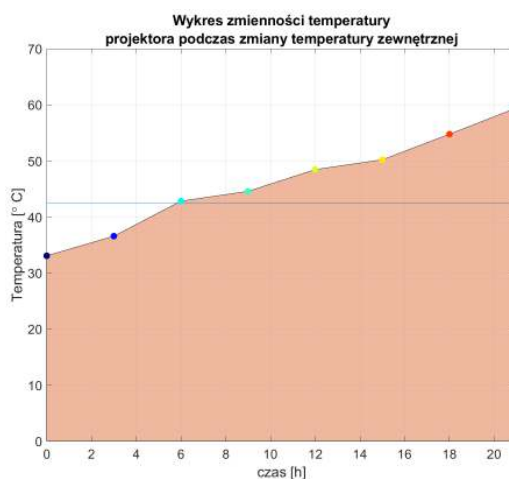
Rysunek 5.20: Histogram odchyłek współrzędnych markerów projektora przed i po zastosowaniu modelu kompensacyjnego.

Zaprezentowane histogramy pokazują, że po zastosowaniu modelu kompensacyjnego odchyłki środków markerów dla poszczególnych temperatur projektora znacząco się zmniejszyły. Zarówno dla współrzędnej I oraz J widać bardzo wyraźną poprawę, wartość średnia modułów odchyłek przed kompensacją wynosiła $I_{mean} = 0,892\text{px}$ $J_{mean} = 0,299\text{px}$, a po kompensacji zmniejszyła się do $I_{mean} = 0,218\text{px}$ $J_{mean} = 0,095\text{px}$. Rozpiętość temperaturowego dryftu obrazu przed kompensacją wynosiła $I_{range} = 6,039\text{px}$ $J_{range} = 7,503\text{px}$, a po kompensacji zmniejszyła się do $I_{range} = 0,906\text{px}$ $J_{range} = 0,641\text{px}$ (we współrzędnych kamery użytej do obserwacji eksperymentu).

Histogram z rysunku 5.20 pokazuje kompensację danych służących do budowy modelu, zatem nie można na jego podstawie wnioskować do końca o poprawnym działaniu modelu kompensacyjnego. By wykazać poprawność zbudowanego modelu, posłużyłem się kolejnym eksperymentem. Wykorzystując program Matlab i funkcję do transformacji geometrycznej obrazów, wygenerowałem zestaw obrazów przetransformowanych przy użyciu wyznaczonych

wielomianów kompensacyjnych. Skorzystałem z funkcji `TransformedImage = imwarp(ImageToTransform, DisplacementField)` [136] (skorzystałem z liniowej interpolacji pomiędzy poszczególnymi pikselami). Obrazem podlegającym transformacji był referencyjny obraz rzutowany przez projektor, a pole przemieszczeń wyznaczyłem korzystając z wyznaczonych wielomianów kompensacyjnych, zmieniając wartości przemieszczeń obliczonych dla konkretnych temperatur, na przeciwne. Wyznaczyłem zdeformowane obrazy dla całego zakresu temperatur, w których badałem wpływ zmiany temperatury zewnętrznej na projektor, od 33,0°C do 60,0°C co 0,1°C. W ten sposób uzyskałem zestaw 271 obrazów dla całego zakresu temperatur. Każdy z tych obrazów, dla odpowiadającej sobie temperatury projektora, po rzutowaniu na wzorzec powinien tworzyć nieodkształconą macierz markerów, obserwowaną dla referencyjnej temperatury projektora.

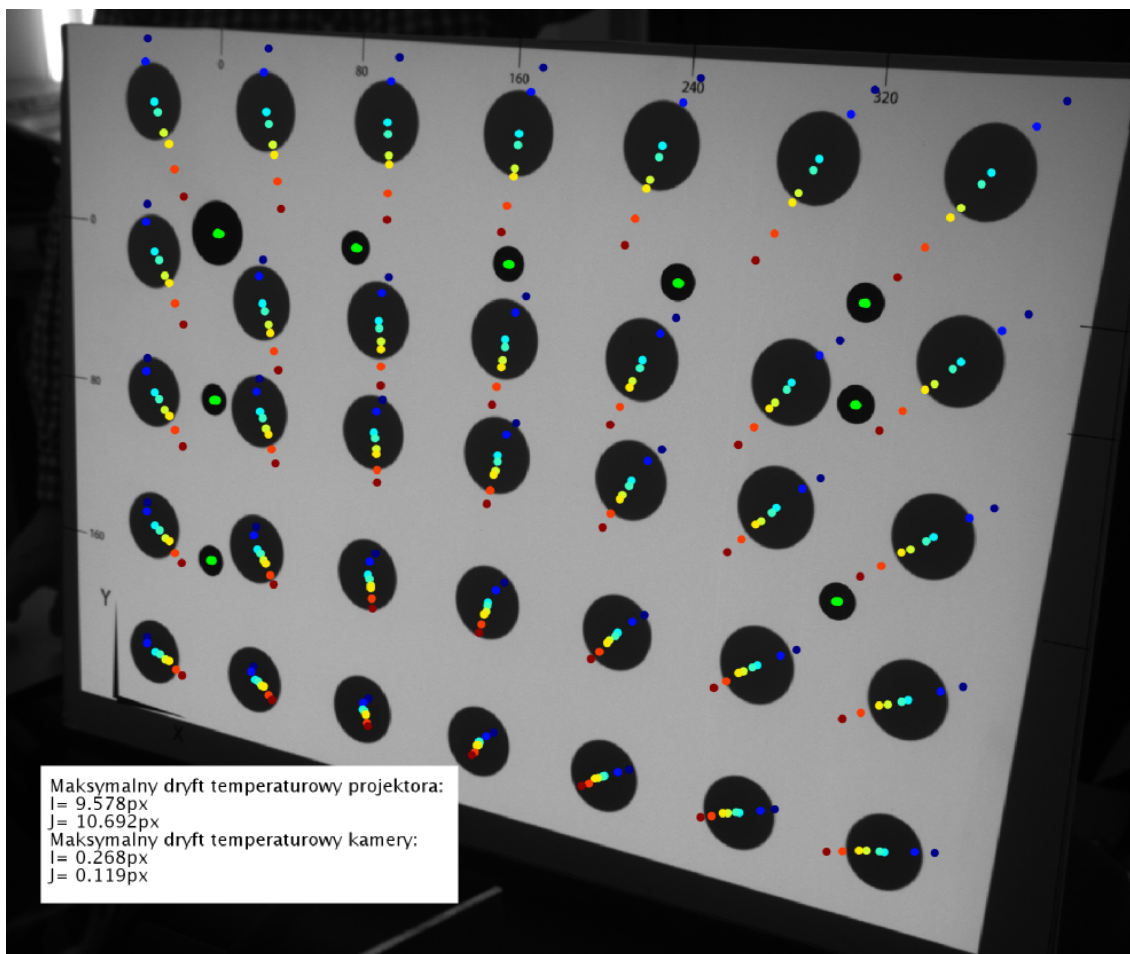
Ponownie posłużyłem się stanowiskiem z komorą termiczną, by zweryfikować poprawność powyższej hipotezy. Zebrałem podobne dane, jak podczas wyznaczania modelu kompensacyjnego, zmieniając temperaturę projektora w zakresie od 33,06°C do 59,44°C (Rys. 5.21). W każdej z ustalonych temperatur wewnątrz komory, za pomocą zewnętrznej kamery, zbierałem dwie ramki: jedną ramkę z wzorcem oświetlonym przez projektor rzutujący referencyjny obraz macierzy markerów (odpowiada to projekcji bez kompensacji) oraz jedną ramkę z wzorcem oświetlonym przez projektor rzutujący przetransformowany obraz z macierzą markerów (odpowiada to projekcji z kompensacją).



Rysunek 5.21: Zarejestrowana temperatura projektora podczas eksperymentu weryfikującego wyznaczony model kompensacyjny.

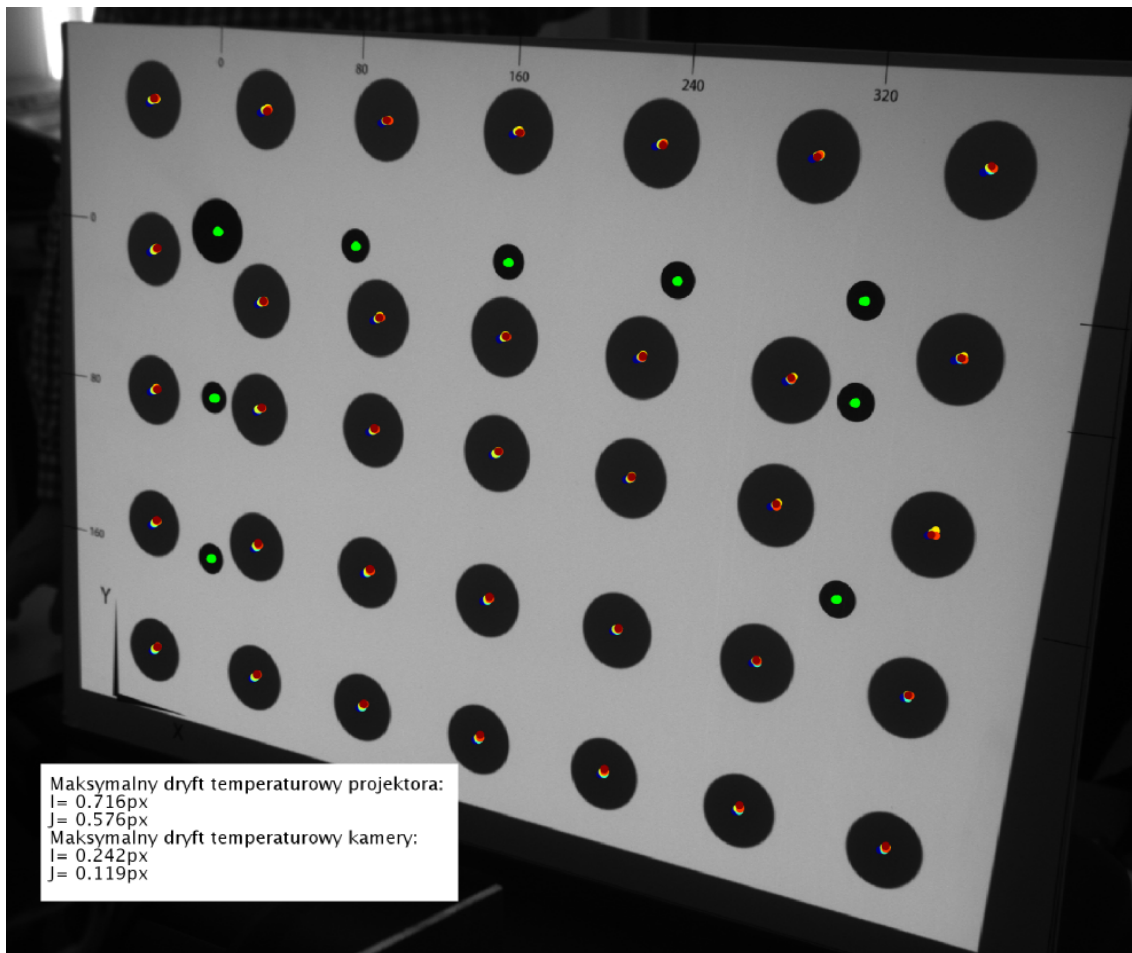
Na rysunku 5.22 zaprezentowałem wyznaczone środki markerów (kolejne przemieszczenia środków markerów zostały przeskalowane 20 krotnie) dla temperatur z wykresu na rysunku 5.21. Rysunek ten przedstawia projekcję macierzy markerów bez zastosowania modelu kompensacyjnego - w każdej z ustawionych temperatur, projektor rzutował ten sam obraz

macierzy markerów. Maksymalny temperaturowy dryft środków markerów w kierunku poziomym wyniósł $I_{max} = 9,578\text{px}$, a w kierunku pionowym $J_{max} = 10,692\text{px}$.



Rysunek 5.22: Macierz markerów projektowana bez użycia modelu kompensacyjnego. Obrazek prezentuje środki markerów wyznaczone dla poszczególnych temperatur przedstawionych na wykresie z rysunku 5.21. Kolejne przesunięcia środków markerów zostały przeskalowane 20 krotnie. Kolor znacznika reprezentuje temperaturę projektora, w której zarejestrowana została ramka.

Na rysunku 5.23 zaprezentowałem wyznaczone środki markerów pochodzące z projekcji, w której projektor wyświetlał odpowiednio przetransformowane obrazy macierzy markerów. Kolejne przesunięcia środków markerów także zostały 20-krotnie przeskalowane. W wyniku projekcji z zastosowaniem modelu kompensacyjnego, kolejne obliczone środki markerów przemieszczają się o bardzo niewielką wartość, pomimo zmieniającej się temperatury projektora. Maksymalny dryft środków markerów dla całego zakresu temperatur wyniósł $I_{max} = 0,716\text{px}$ dla kierunku poziomego oraz $J_{max} = 0,576\text{px}$ dla kierunku pionowego.

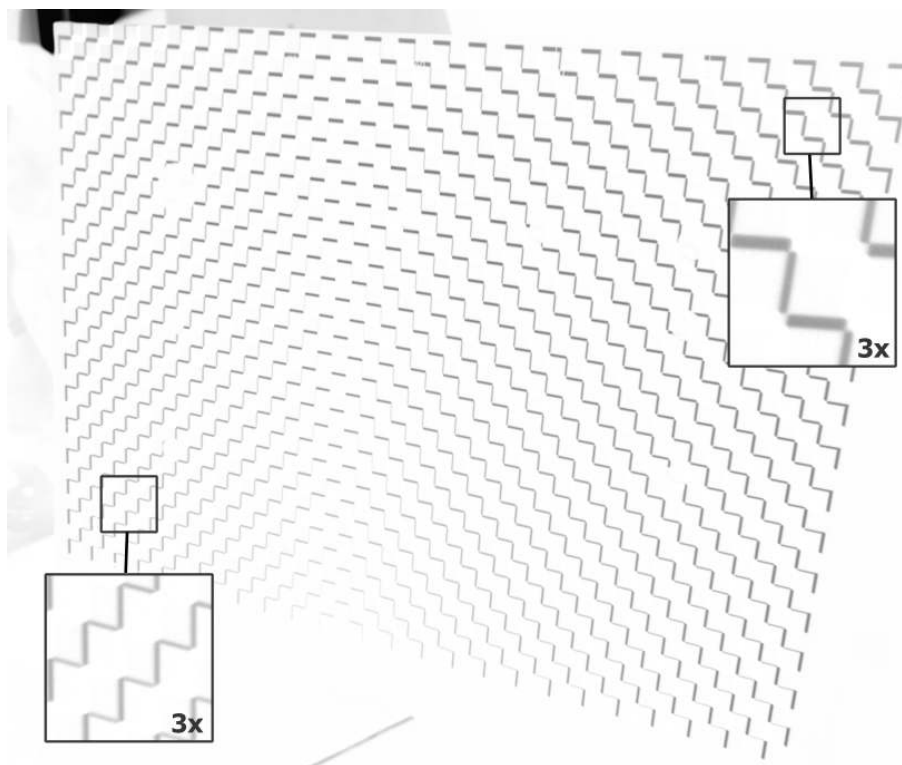


Rysunek 5.23: Wyniki eksperymentu weryfikacyjnego, dla projekcji obrazów z zastosowaniem modelu kompensacyjnego..

Zaprezentowane wyniki potwierdzają, że wyznaczony model kompensacyjny pozwala na znaczące zmniejszenie deformacji projektowanego obrazu powstałych na skutek zmian temperatury zewnętrznej projektora. Dla obliczonych wartości współrzędnych środków markerów, osiągnięto obniżenie wartości odchyłek od wartości referencyjnych o 92% dla kierunku poziomego oraz 94% dla kierunku pionowego.

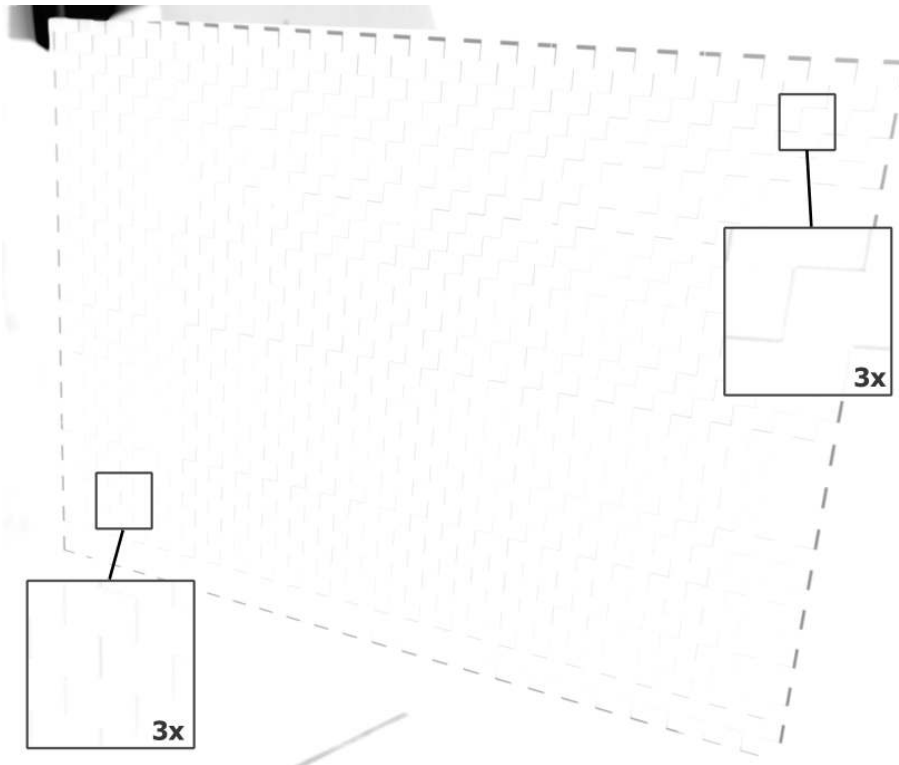
Na rysunkach 5.24 i 5.25 zaprezentowałem w bardziej obrazowy sposób efekty działania modelu kompensacyjnego. Rysunek 5.24 powstał przez odjęcie od siebie ramki zebranej w temperaturze referencyjnej oraz ramki zebranej w temperaturze 55°C, przy projekcji bez kompensacji. Tym razem do projekcji użyłem czarno-białej szachownicy, o kwadratowych polach szerokości 25 pikseli. W celu poprawienia widoczności, intensywność obrazu będącego różnicą ramek została dodatkowo odwrócona. Widać dość wyraźne krawędzie związane z przesunięciem się obrazu oraz jego deformacją wywołaną zmianą temperatury projektora. W centralnej i dolnej części projektowanego obrazu przemieszczenia są najmniejsze i propagują się promieniście w kierunku rogów obrazu. Odpowiada to trendowi, który obserwowałem dla

wyznaczonych środków markerów zarówno podczas rozgrzewania się projektora, jak i zmiany temperatury zewnętrznej.



Rysunek 5.24: Jakościowe pokazanie działania modelu kompensacji wpływu temperatury na projektor DLP LightCrafter 4500. Zaprezentowany obraz jest wynikiem odejmowania od siebie (i późniejszego odwrócenia intensywności) dwóch ramek zebranych w temperaturze referencyjnej 42°C oraz temperaturze 55°C przy projekcji biało-czarnej szachownicy bez kompensacji.

Na rysunku 5.25 pokazałem obraz będący wynikiem takiego samego odejmowania dwóch ramek wykonanych w dwóch różnych temperaturach (temperaturze referencyjnej 42°C oraz 55°C), ale dla projekcji z kompensacją. Widać, że powstałe na skutek odejmowania od siebie obrazów krawędzie szachownicy są o wiele mniej widoczne, a ich grubość jest w całym obszarze taka sama. Jedynie na krawędziach projektowanego obrazka widać wyraźne krawędzie, świadczące o różnicy pomiędzy projekcją z kompensacją i bez kompensacji. Związane są one z działaniem funkcji `imwarp`, która nie pozwala na ekstrapolację obrazu poza jego obszar roboczy. Obszar, w którym widać wyraźne krawędzie jest jednak bardzo niewielki i zajmuje ramkę o grubości około 4 do 5 pikseli na brzegach obrazu.



Rysunek 5.25: Obraz powstały w wyniku tych samych operacji co obraz zaprezentowany na rysunku 5.24, ale ramka projektowana w temperaturze 55°C została przetransformowana przy użyciu modelu kompensacyjnego.

5.4 Podsumowanie

W tym rozdziale zaprezentowałem wyniki badań wpływu temperatury na projektory, które są stosowane do kodowania poprzez projekcję obrazów na analizowaną scenę. Badania przeprowadziłem dla dwóch modeli projektorów. Wykazałem, że podczas procesu rozgrzewania się projektora, a także na skutek narażenia projektora na zmienną temperaturę zewnętrzną, projektowany obraz ulega deformacjom. Deformacje te mają o wiele większe wartości, niż w przypadku analogicznych badań przeprowadzonych dla kamer. Związane jest to najprawdopodobniej z bardziej skomplikowanym układem optycznym, a także ze zdecydowanie większymi gabarytami całych urządzeń.

Zaproponowany przeze mnie model kompensacji wpływu zmian temperatury na projektory jest bardzo podobny do modelu kompensacji dla kamer cyfrowych. Jediną różnicą jest fakt, że projektor nie może rejestrować obrazów. Do zbierania danych niezbędna jest zatem zewnętrzna kamera oraz opracowanie dodatkowego modelu matematycznego, pozwalającego na przejście do układu współrzędnych projektora. Z uwagi na oczywiste podobieństwa w obydwu metodach kompensacyjnych, mają one podobne wady i zalety.

Jednym z ograniczeń, jest fakt, że bazuje ona na stanach ustalonych. A zatem, może być stosowana jedynie do kompensacji projekcji w stanach ustalonych i nie może być użyta do kompensacji podczas rozgrzewania się projektora. Podobnie, jak w przypadku kamer, dałoby się ją rozszerzyć i uwzględnić dynamikę zmian temperatury, ale z uwagi na gabaryty projektorów oraz o wiele bardziej zróżnicowane gradienty temperaturowe, wiązałyby się to z koniecznością zastosowania dodatkowych czujników temperatury.

Kolejną cechą opracowanej metody jest fakt, że dotyczy ona całego układu projektora, tj. całego układu optycznego formującego wiązkę, układu kształtującego obraz oraz układu obiektywu projekcyjnego. O ile w przypadku kamer była to dość istotna wada, o tyle w projektorach już tak nie jest. Związane jest to z faktem, że w zdecydowanej liczbie przypadków, projektory dostarczane są od razu z obiektywami projekcyjnymi i nie praktykuje się raczej zmiennych obiektywów projekcyjnych.

Ostatnim ograniczeniem, wspólnym dla metody kompensacji wpływu temperatury na kamery oraz projektory, jest fakt, że do opracowania modelu kompensacyjnego niezbędne jest dysponowanie odpowiednim stanowiskiem eksperymentalnym, wyposażonym w komorę termiczną. Jest to o tyle niekorzystne, że dostęp do laboratorium wyposażonego w taką aparaturę jest na pewno bardzo kosztowny i nie każdy producent projektorów ma na niego środki.

Niemniej jednak uważam, że zaproponowana metoda kompensacji wpływu temperatury zewnętrznej na projektory może zostać z powodzeniem użyta w skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym. Przedstawione wyniki weryfikacji pokazują, że dla użytego modelu projektora, pozwala na zmniejszenie termicznego dryftu obrazu w projektowanych obrazach o ponad 90%. Metoda ta nie wymaga w zasadzie żadnych ingerencji w budowę projektora, niezbędne jest jedynie wyposażenie projektora w odpowiednio umiejscowiony czujnik temperatury.

Rozdział 6

Kompensacja wpływu temperatury na skaner 3D

W tym rozdziale opisałem autorską metodę kompensacji wpływu temperatury na cały skaner 3D z oświetleniem strukturalnym. Metodę tę można porównać do pewnego rodzaju wzorcowania termicznego. Skaner 3D traktowałem jako "czarną skrzynkę", nie analizując osobno efektów wpływu temperatury na detektor, projektor i bazę mechaniczną. Skupiłem się na opisanu deformacji objętości pomiarowej skanera na skutek zmian temperatury zewnętrznej. Opisane badania oraz model kompensacyjny ukierunkowane były na zwiększenie zakresu temperatury, w której skaner 3D z oświetleniem strukturalnym może przeprowadzać pomiary poprawne pod względem metrologicznym. Oznaczało to, że niepewność skanera pozostawała na poziomie wyznaczonym w temperaturze, w której wykonana została kalibracja skanera.

Wyniki badań pokazały, że pomiary przeprowadzone skanerem, w którym nie zastosowano modelu kompensacyjnego, wraz ze zmianą temperatury zewnętrznej już o około 5°C , przekraczają wartość błędu granicznego dopuszczalnego E_{MPE} wyznaczoną w temperaturze kalibracji. Dopiero zastosowanie odpowiednio obliczonej poprawki kompensacyjnej pozwala na rozszerzenie temperaturowego zakresu poprawnej pracy skanera.

Badany skaner 3D wyeksponowany był na zmiany temperatury otoczenia w komorze termicznej. Przed skanerem usytuowany był specjalny wzorzec kształtowy, w całości wykonany z laminatu węglowego (w badanym zakresie temperatur wzorzec mogłem traktować jako nieodkształcalny termicznie). Analizując pomiary wzorca w różnych temperaturach, badałem jednocześnie wpływ temperatury na deformację objętości pomiarowej skanera. Na podstawie zebranych danych (pomiarów wzorca w różnych temperaturach) opracowałem model kompensacyjny. Zaproponowana i opisana przeze mnie metoda była podobna do tej, opisanej w publikacji J-P.Kruth, L. Zhou i P.Vannherck *Thermal Error Analysis and Compensation of an LED-CMOS Camera 3D Measuring System* [26] (patrz rozdział 2.2.3). Główna różnica polega na tym, że wyznaczony przeze mnie model kompensacyjny związany był bezpośrednio tylko

ze skanerem 3D, a nie z całym systemem pomiarowym: statywem, głowicą i wzorcem (jak miało to miejsce w eksperymentach opisanych w [26]). Dodatkowo, w swoich eksperymentach korzystałem z dostępu do komory termicznej, co pozwoliło mi przebadać skaner w o wiele większym zakresie temperatur, a także przeprowadzać pomiary w stanach ustalonych termodynamicznie.

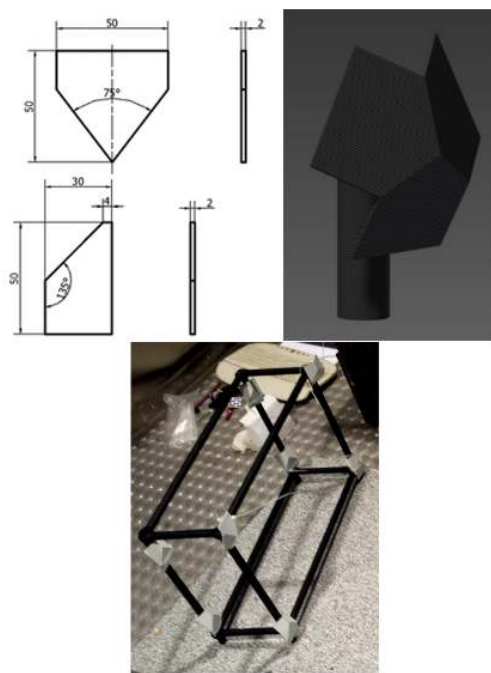
W dalszej części tego rozdziału opisałem stanowisko laboratoryjne oraz cały przeprowadzony eksperyment. Badania przedstawione w tym rozdziale zostały pierwotnie opublikowane w artykule *Effect of Temperature on Calibration Quality of Structured-Light Three-Dimensional Scanners* w czasopiśmie *Applied Optics*, w sierpniu 2014 roku [27].

6.1 Stanowisko pomiarowe do badania wpływu temperatury na skaner 3D z oświetleniem strukturalnym

Na potrzeby przeprowadzenia badań zbudowałem prototypowy skaner 3D z oświetleniem strukturalnym. Zdecydowałem się na konstrukcję belkową, chcąc osiągnąć anizotropowość deformacji termicznych. Użycie tak prostej formy bazy mechanicznej miało za zadanie wyeksponowanie wpływu temperatury na bazę mechaniczną, a także osiągnięcie wyraźniejszego efektu wpływu temperatury w jednym z kierunków (spodziewałem się największego udziału wydłużania/skracania się bazy na deformację). Bardziej zaawansowana forma bazy mechanicznej (np. przedstawiona w rozdziałach 1.1 i 2.1) mogłaby skutkować odkształceniami termicznymi o znacznej histerezie (podobny efekt obserwowałem podczas eksperymentów z samą kamerą, patrz rozdział 4.1 i 4.2). Do budowy bazy mechanicznej użyłem aluminiowej rury o przekroju okrągłym o długości 1m, średnicy zewnętrznej $\Phi = 40\text{mm}$ i ściance grubości 1mm. Jako detektor w skanerze użyta została szaroodcieniowa kamera FLIR Grasshopper GRAS-20S4M-C [137] z matrycą 2MPix. Do rzutowania rastrów pomiarowych użyłem zmodyfikowanego projektora CASIO XJ-A256 LED [138] (modyfikacje, którym poddana została konstrukcja projektora opisane zostały w rozdziale 5 i polegały na usztywnieniu optyki projekcyjnej a także usunięciu elektronicznego zoom'u i focus'a oraz podmianie fabrycznego chłodzenia na bardziej wydajne i pozbawione wibracji). Zarówno kamera jak i projektor przymocowane były bezpośrednio do bazy mechanicznej. Pozwoliło to maksymalnie zminimalizować obecność dodatkowych detali, które mogłyby się odkształcać pod wpływem temperatury. Do sterowania pracą skanera użyłem oprogramowania 3DMADMAC [56, 57], które odpowiadało za proces wyświetlania rastrów, akwizycji danych pomiarowych, a także przeliczania chmury punktów.

Do wyznaczenia deformacji objętości pomiarowej skanera użyłem specjalnego wzorca kształtowego pokazanego na rysunku 6.1. Zależało mi na zbadaniu trendu deformacji objętości pomiarowej w kilku punktach rozmieszczonych w całej objętości pomiarowej.

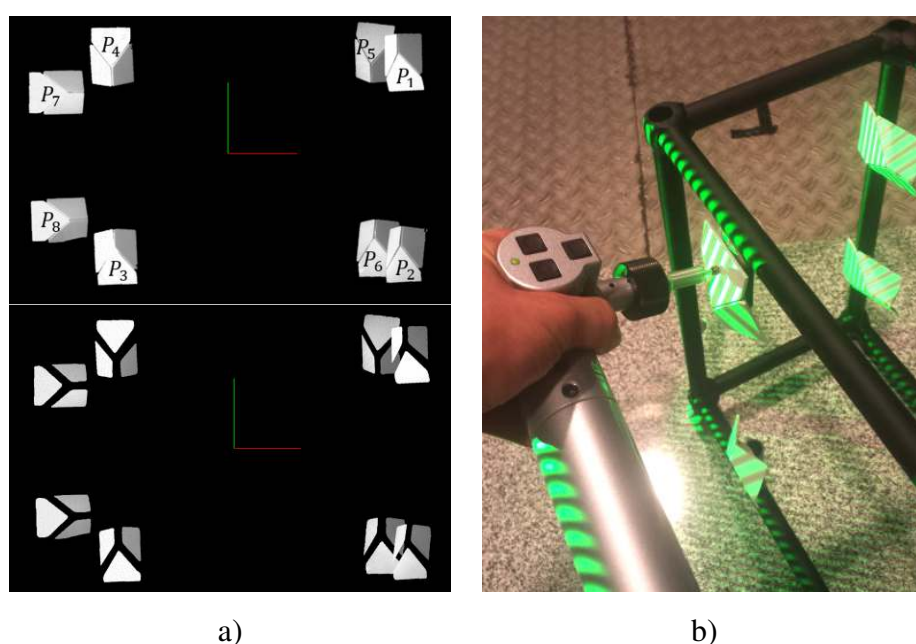
Skonstruowałem specjalny wzorzec kształtowy, składający się z 8 mniejszych wzorców trójpłaszczyznowych, rozmieszczonych wewnątrz objętości pomiarowej skanera. Konstrukcja nośna wzorca wykonana była w formie stelaża z rurek z włókna węglowego sklejonych specjalnym klejem dwuskładnikowym. Klejenie stelaża wykonane było w taki sposób, by ograniczyć wpływ ewentualnych deformacji termicznych spoiny klejowej na konstrukcję nośną. Każdy z ośmiu wzorców trójpłaszczyznowych wyznaczał jeden wirtualny punkt w przestrzeni roboczej skanera.



Rysunek 6.1: Wzorzec kształtowy składający się z ośmiu wzorców trójpłaszczyznowych. Wzorzec wykonany był z laminatu węglowego i odznaczał się bardzo wysoką stabilnością wymiarową w dużym zakresie temperatur. Źródło: [27].

Płaszczyzny wzorców trójpłaszczyznowych, także wykonane z laminatu z włókna węglowego, pokryte zostały matową, rozpraszającą powłoką malarską w kolorze białym. W efekcie kształt geometrii wzorca dawał się łatwo mierzyć za pomocą skanera 3D z oświetleniem strukturalnym (Rys. 6.2 a). W chmurze punktów reprezentującej pomiar wzorca można było łatwo wyróżnić poszczególne wzorce trójpłaszczyznowe. Po automatycznym usunięciu punktów szumowych i segmentacji, do każdej z 24 pomierzonych płaszczyzn dopasowałem równanie płaszczyzny i obliczyłem punkt przecięcia się 3 płaszczyzn tworzących jeden wzorzec trójpłaszczyznowy. W ten sposób obliczałem współrzędne ośmiu wirtualnych punktów $P_1 - P_8$ (Rys. 6.2 a).

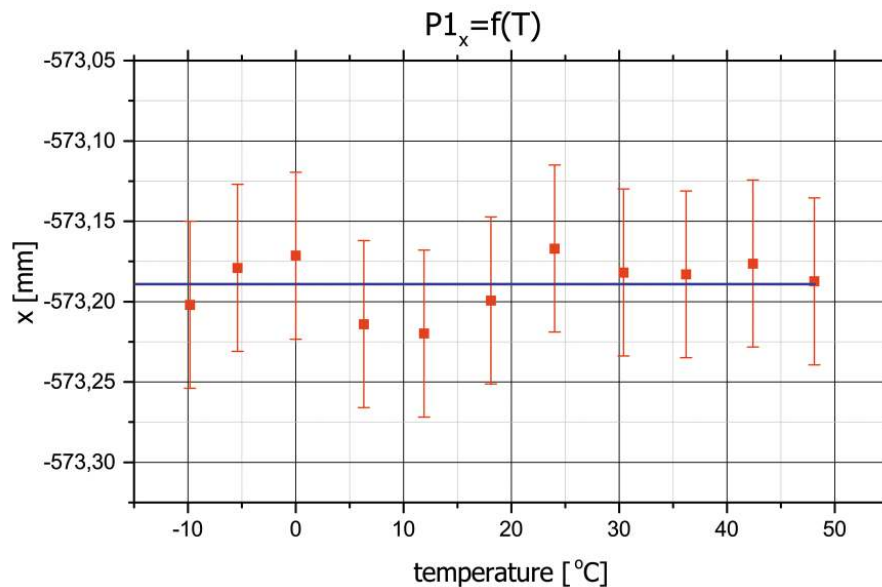
Do wykonania wzorca kształtowego używane są także kule wzorcowe, zamiast wzorców trójpłaszczyznowych. W moim eksperymencie zdecydowałem się jednak na użycie wzorców trójpłaszczyznowych ze względu na problemy technologiczne przy wytworzeniu kul wzorcowych o matowym i rozpraszającym wykończeniu powierzchni, a także wykonanych z materiału o bardzo niskiej wartości współczynnika rozszerzalności termicznej α . Płyty z laminatu z włókna węglowego, których używałem odznaczały się bardzo małą odchyłką płaskości, co idealnie odpowiadało moim zastosowaniom. Podobny wzorec, ale z formatek wycinanych ze szkła, został przeze mnie wytworzony na potrzeby walidacji metrologicznej skanera 3D z oświetleniem strukturalnym do dokumentacji miejsc zdarzeń kryminalnych (patrz [7]).



Rysunek 6.2: Pomiar wzorca trójpłaszczyznowego za pomocą ramienia pomiarowego oraz skanera 3D z oświetleniem strukturalnym; a) wynik pomiaru skanerem 3D z oświetleniem strukturalnym. Każdy z 8 wzorców trójpłaszczyznowych wyznacza jeden wirtualny punkt $P_1 - P_8$ w całej objętości pomiarowej skanera. Na rysunku pokazano chmurę punktów przed (na górze) i po usunięciu punktów szumowych (na dole), b) pomiar za pomocą ramienia pomiarowego Romer Sigma 2018. Źródło: [27].

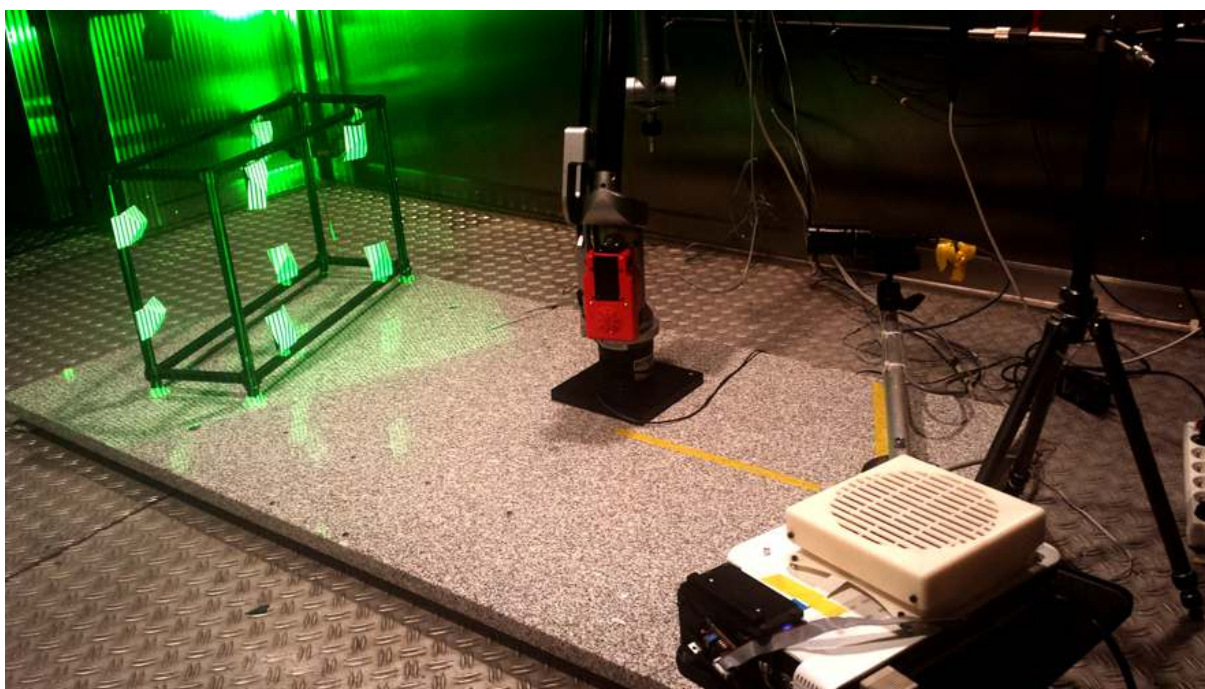
Producent laminatu, którego używałem do konstrukcji wzorca nie był w stanie udzielić mi informacji na temat stałości wymiarowej prefabrykatów w zmiennych temperaturach. Dlatego na początku eksperymentów przeprowadziłem wzorcowanie termiczne wzorca. Korzystając z komory termicznej znajdującej się w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy w Warszawie, zbadałem zachowanie się wzorca w szerokim zakresie temperatur zewnętrznych $-10^{\circ}\text{C} \div +50^{\circ}\text{C}$. Do pomiaru deformacji wzorca w różnych temperaturach użyłem ramienia pomiarowego

(Rys. 6.2 b)), wyposażonego w kompensację temperaturową: Sigma 2018 firmy ROMER [139] (niepewność przy pomiarze odległości: $\pm 0,025\text{mm}$). Na wykresie 6.3 pokazałem wartość składowej x obliczonych współrzędnych jednego z wirtualnych punktów P_1 w różnych temperaturach otoczenia. Pozostałe współrzędne charakteryzowały się bardzo podobnym rozrzutem wyników. Przebieg wykresu sugeruje, że w zbadanym zakresie temperatur, wytworzony wzorec kształtowy mógł być traktowany jako nieodkształcalny.



Rysunek 6.3: Wykres wartości współrzędnej x punktu P_1 w funkcji temperatury. Pozostałe współrzędne oraz pozostałe punkty $P_2 - P_8$ odznaczały się bardzo podobnym rozrzutem. Źródło: [27].

Tak skonstruowany skaner przymocowany został do jednego z krańców granitowej płyty o wymiarach $1,5\text{m} \times 0,8\text{m} \times 0,02\text{m}$ (Rys. 6.4). Na drugim krańcu płyty mogłem mocować wzorec kształtowy albo wzorec kalibracyjny do kalibracji skanera 3D. Wzorec kalibracyjny wykonany został w tej samej technologii, co inne wzorce opisywane przeze mnie w tej pracy. Użyłem wzorca wykonanego ze szkła z naklejonym wzorem kalibracyjnym w postaci siatki czarnych, okrągłych markerów na białym tle.



Rysunek 6.4: Widok stanowiska pomiarowego ustawionego wewnątrz komory termicznej. Po lewej stronie obrazka widać przytwierdzony do granitowej płyty wzorec kształtowy. Na pierwszym planie znajduje się badany skaner 3D. Źródło: [27].

Stanowisko wyposażone zostało w zestaw dodatkowych czujników temperatury, za pomocą których mierzyłem temperaturę granitowej płyty, wzorca kształtowego, bazy mechanicznej skanera, projektora oraz kamery. Dodatkowymi czujnikami były czujniki temperatury, wilgotności oraz prędkości przepływu powietrza, w które wyposażona była komora termiczna. Sama komora, znajdująca się w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy w Warszawie, miała bardzo duży obszar roboczy, o wymiarach $4\text{m} \times 3\text{m} \times 3\text{m}$. Tak duży obszar roboczy pozwalał na umieszczenie całego stanowiska pomiarowego wewnątrz komory i jednocześnie moją obecność wewnątrz komory (w celu przeprowadzenia pomiarów weryfikacyjnych przy użyciu ramienia pomiarowego) (Rys. 6.4). Komora termiczna pozwalała na wymuszanie zmian temperatur powietrza w zakresie, $-40^{\circ}\text{C} \div +70^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, przy wilgotności względnej regulowanej w zakresie $10\% \div 90\%$ ($\pm 2\%$) i wymuszonym obiegu powietrza z prędkością z zakresu $0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \div 4,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ($\pm 0,01 \frac{\text{m}}{\text{s}}$).

Granitowa płyta podstawy, a także sztywny i nieodkształcalny (w badanym zakresie temperatur) wzorec kształtowy pozwoliły na wyizolowanie deformacji termicznych związanych jedynie z badanym skanerem 3D z oświetleniem strukturalnym. Umieszczając skaner na statywie bądź innej głowicy, wykonałbym podobne doświadczenie, co Autorzy publikacji *Thermal Error Analysis and Compensation of an LED-CMOS Camera 3D Measuring*

System [26]. Zależało mi na wyznaczeniu modelu kompensacyjnego właściwego jedynie dla samego skanera 3D, a nie całego stanowiska pomiarowego.

6.2 Eksperymenty w komorze termicznej

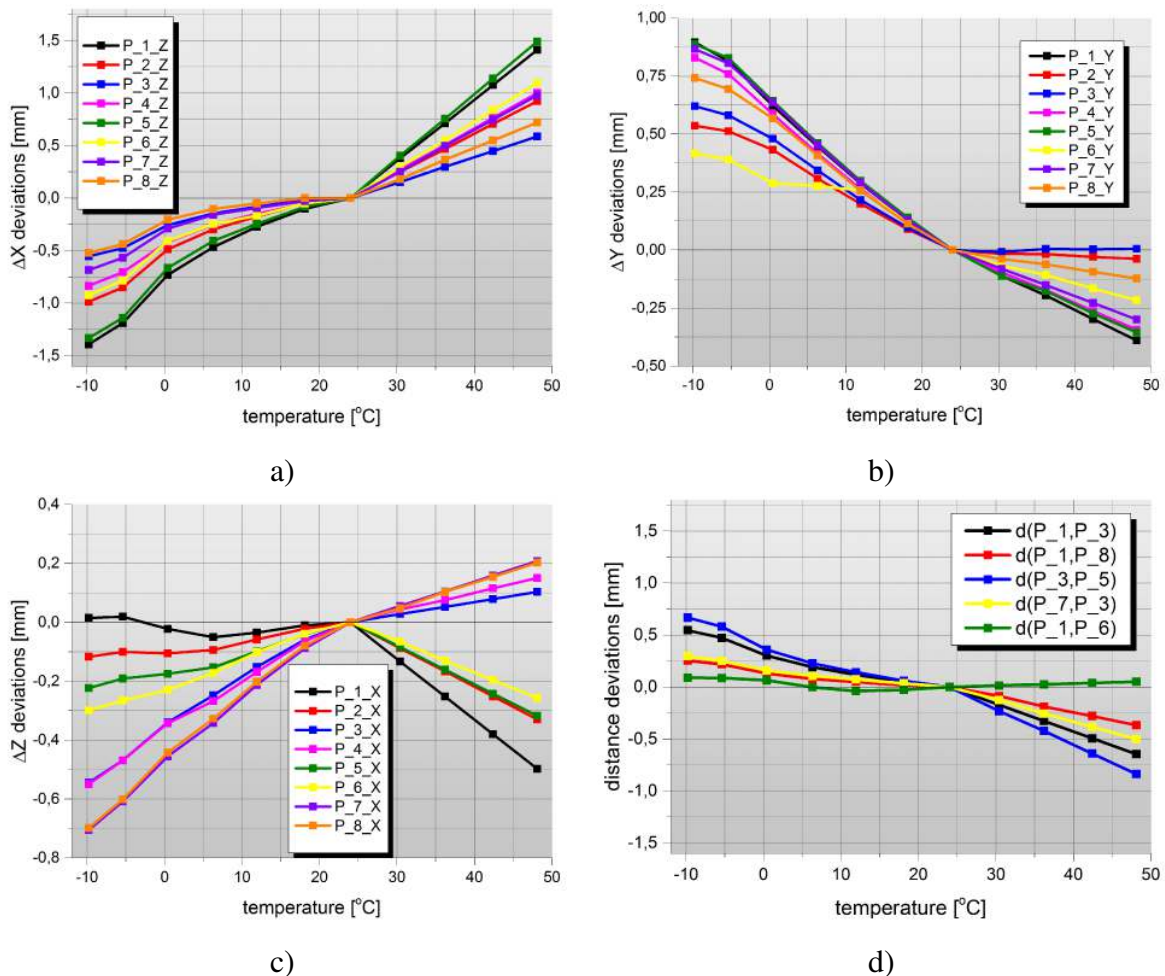
Na początku eksperymentu ustawiłem wewnątrz komory temperaturę 24°C . Następnie włączyłem zasilanie skanera i odczekałem około $\sim 2\text{h}$ na osiągnięcie termodynamicznego stanu ustalonego. Potem wykonałem kalibrację skanera 3D korzystając z płaskiego wzorca do kalibracji. Po skalibrowaniu, objętość pomiarową skanera można było opisać za pomocą prostopadłościanu o wymiarach $700\text{mm} \times 560\text{mm} \times 400\text{mm}$. Niepewność przy pomiarze odległości, dla skanera o takich parametrach nie powinna przekraczać $\pm 0,1\text{mm}$ ¹. Przed skanerem ustawiłem wzorec kształtowy i wykonałem pomiar referencyjny. Następnie zmieniałem temperaturę wewnątrz komory i za każdym razem wykonywałem pomiar wzorca kształtowego. Zebrałem w ten sposób zestaw pomiarów wzorca w całym zakresie temperatur $-9,8^{\circ}\text{C} \div 48,1^{\circ}\text{C}$. Prędkość zmian temperatury wewnątrz komory wynosiła około 1°C na minutę przy prędkości przepływu powietrza $0,5\frac{\text{m}}{\text{s}}$, ale na potrzeby ustabilizowania się temperatury skanera, pomiędzy pomiarami odczekiwałem co najmniej ~ 45 minut. Ponieważ wcześniej wykazałem (Rys. 6.3), że użyty wzorec kształtowy nie ulega odkształceniom podczas zmian temperatury (w zakresie $-10^{\circ}\text{C} \div 50^{\circ}\text{C}$), zatem dodatkowy pomiar referencyjny wzorca nie był wymagany.

Wynikiem pomiarów był zestaw 11 chmur punktów reprezentujących wzorec kształtowy w 11 różnych temperaturach otoczenia. Dla każdej z chmur punktów przeprowadzałem automatyczne przetwarzanie polegające na: usunięciu punktów szumowych, usunięciu punktów wyraźnie odległych od pozostałych punktów tworzących geometrię mierzonego kształtu (ang. *outliers*), segmentacji poszczególnych płaszczyzn tworzących wzorce trójpłaszczyznowe, dopasowaniu równania płaszczyzny do wysegmentowanych z chmury płaszczyzn i obliczeniu współrzędnych ośmiu wirtualnych punktów wzorca $P_1 - P_8$. Przetwarzanie chmur wykonane zostało w programie Mesh3D ver 5.5 [4]. Automatyzacja przetwarzania pozwoliła na usunięcie ewentualnych błędów związanych z operatorem podczas obliczania współrzędnych wirtualnych punktów.

Na rysunku 6.5 a), b) i c) przedstawiłem na wykresach zmienność współrzędnych punktów $P_1 - P_8$ w zależności od temperatury, w formie odchyłek od współrzędnych zmierzonych w temperaturze referencyjnej. Na rysunku 6.5 d) pokazałem błędy względne: pomiar odległości pomiędzy wybranymi parami punktów wirtualnych, odniesiony do pomiaru w temperaturze

¹wartość tę wyznaczyłem na podstawie publikacji *The hybrid coordinate measurement system as a response to industrial requirements* [15], wg. której względna niepewność przy pomiarze odległości poprawnie skalibrowanych skanerów 3D ze światłem strukturalnym jest w przybliżeniu równa $10^{-4} \times d$, gdzie d , to największy wymiar objętości pomiarowej - w tym przypadku przekątna prostopadłościanu objętości pomiarowej

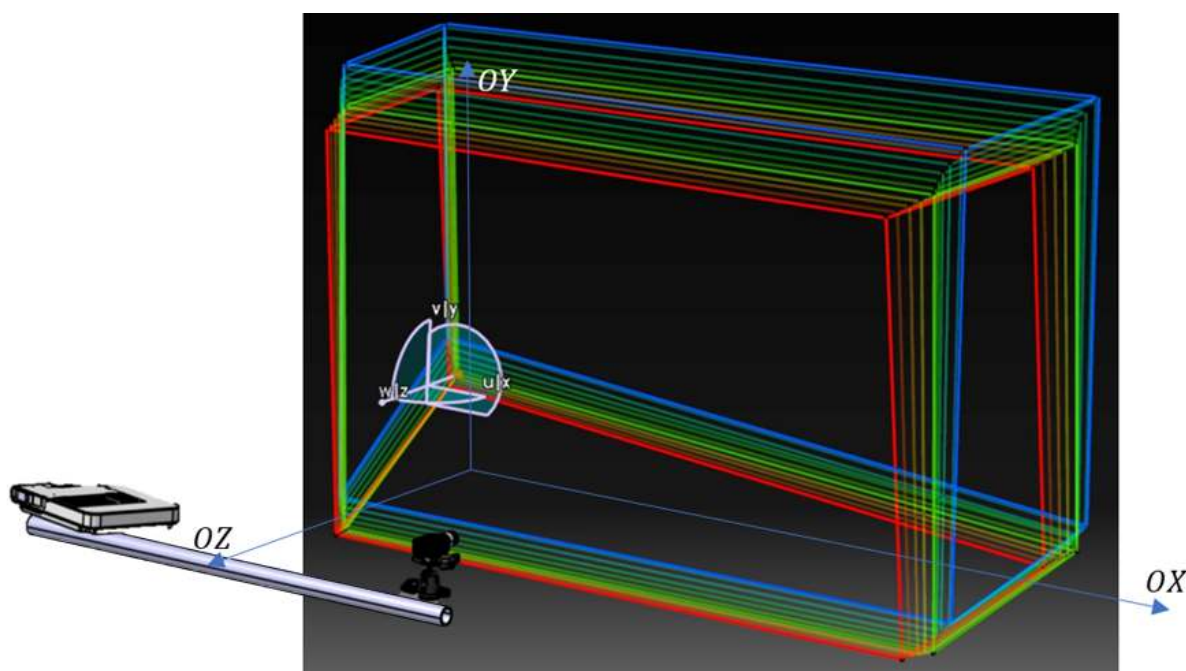
referencyjnej. Pary punktów zostały tak dobrane, by obliczone dystanse reprezentowały przekątne prostopadłościennego kształtu objętości pomiarowej.



Rysunek 6.5: Wyniki pomiarów wzorca kształtowego przy pomocy ramienia pomiarowego, obrazujące wpływu temperatury na skaner 3D z oświetleniem strukturalnym. Na wykresach a), b) i c) przedstawiłem zmienność współrzędnych x , y i z ośmiu wirtualnych punktów $P_1 - P_8$ w funkcji temperatury, w formie odchyłek od wartości referencyjnych. Na wykresie d) pokazałem zmienność dystansów pomiędzy parami punktów w funkcji temperatury, także w formie odchyłek od wartości tych dystansów w temperaturze referencyjnej. Źródło: [28].

Zaprezentowane wykresy pokazują, że błędy pomiarowe, spowodowane narażeniem skanera na zmienną temperaturę mogą osiągać znaczące wartości, aż do 1,6mm dla pojedynczej współrzędnej (z) oraz do 0,8mm dla obliczonych dystansów pomiędzy punktami (błędy względne). Jednocześnie zauważyć można, że wpływ temperatury na poszczególne współrzędne nie jest jednorodny. Punkty znajdujące się bliżej prawej ściany prostopadłościennego kształtu objętości pomiarowej (P_1, P_2, P_5, P_6 , patrz Rys. 6.2 a) wraz ze wzrastającą temperaturą przesuwają się w kierunku środka objętości, podobnie jak punkty po lewej stronie

(P_3, P_4, P_7, P_8 , patrz Rys. 6.2 a)). W efekcie wraz ze wzrastającą temperaturą, cała objętość pomiarowa nieznacznie się kurczy, przesuwa w kierunku detektora i nieznacznie "opada" (w kierunku malejących wartości współrzędnej y). Podczas ochładzania skanera obserwowany był odwrotny efekt. Deformacje objętości pomiarowej przedstawiłem na rysunku 6.6. Kolorowe prostopadłościany na rysunku 6.6 rozpięte są na punktach $P_1 - P_8$ i odzwierciedlają deformację objętości pomiarowej wraz ze zmianami temperatur. Kolory prostopadłościanów związane są z temperaturą: na czerwono zaznaczono pomiary wykonane w najwyższej temperaturze, na zielono pomiary wykonane w temperaturze referencyjnej, a na niebiesko w najniższej temperaturze.



Rysunek 6.6: Deformacja objętości pomiarowej skanera wywołana zmianami temperatury. Na czerwono zaznaczono pomiary wzorca kształtowego wykonane w najwyższej temperaturze, na zielono pomiary wykonane w temperaturze referencyjnej, a na niebiesko w najniższej temperaturze. Źródło: [27].

W badaniach, które opisałem w tym rozdziale nie zetknąłem się z problemem braku powtarzalności, który obserwowałem podczas testów z samą kamerą (rozdział 4). Badania przeprowadziłem w dwóch seriach, powtarzając cały eksperyment i ustawiając w komorze te same temperatury. Każdą z serii pomiarowych zaczynałem od temperatury referencyjnej, następnie zwiększałem stopniowo temperaturę (co $+6^{\circ}\text{C}$), aż do temperatury maksymalnej ($\sim 50^{\circ}\text{C}$). W dalszej kolejności zmniejszałem temperaturę, przechodząc przez temperaturę referencyjną, dochodziłem do temperatury minimalnej i ponownie wracałem do temperatury referencyjnej. W zarejestrowanych wynikach nie zauważyłem błędu wynikającego z braku powtarzalności w zachowaniu się kamery narażonej na zmienną temperaturę. Co prawda

rejestrowane dane miały innych charakter- nie badałem temperaturowego dryftu na obrazach 2D w dziedzinie obrazu, ale gdyby występował problem braku powtarzalności obrazów rejestrowanych na kamerze, powinien być on także widoczny w chmurze punktów. Źródłem takiego stanu rzeczy może być fakt, że w badaniach w komorze termicznej używałem kamery ze starszej generacji (w badaniach opisanych w rozdziale 4 używałem kamery Grasshopper 2.0 [101], a w badaniach w komorze używałem kamery Grasshopper 1.0 [137]). Miała ona zdecydowanie mniejszy rozmiar matrycy (2MPix, wobec 5MPix) i wydzielala mniej mocy (3,5W wobec 4,7W wg. danych katalogowych [101, 137]). Jeśli chodzi o konstrukcję mechaniczną kamery, to wydaje się że była ona taka sama, ale nie jestem w stanie zweryfikować konstrukcji wewnętrznej. Jest możliwe, że kamera starszego typu zbudowana była w ten sposób, że odznaczała się większą stabilnością podczas zmiany temperatur. Inna hipoteza jest taka, że deformacja objętości pomiarowej wywołana ewentualnym brakiem powtarzalności był niewielka w stosunku do innych źródeł deformacji. Istotą przeprowadzonego eksperymentu było obserwowanie skutku, w postaci deformacji skanów, wywołanego przez wpływ temperatury na cały skaner, bez możliwości wskazania które składowe (wpływ temperatury na bazę mechaniczną, na projektor i na kamerę) i w jakim stopniu wpłynęły na wielkość deformacji.

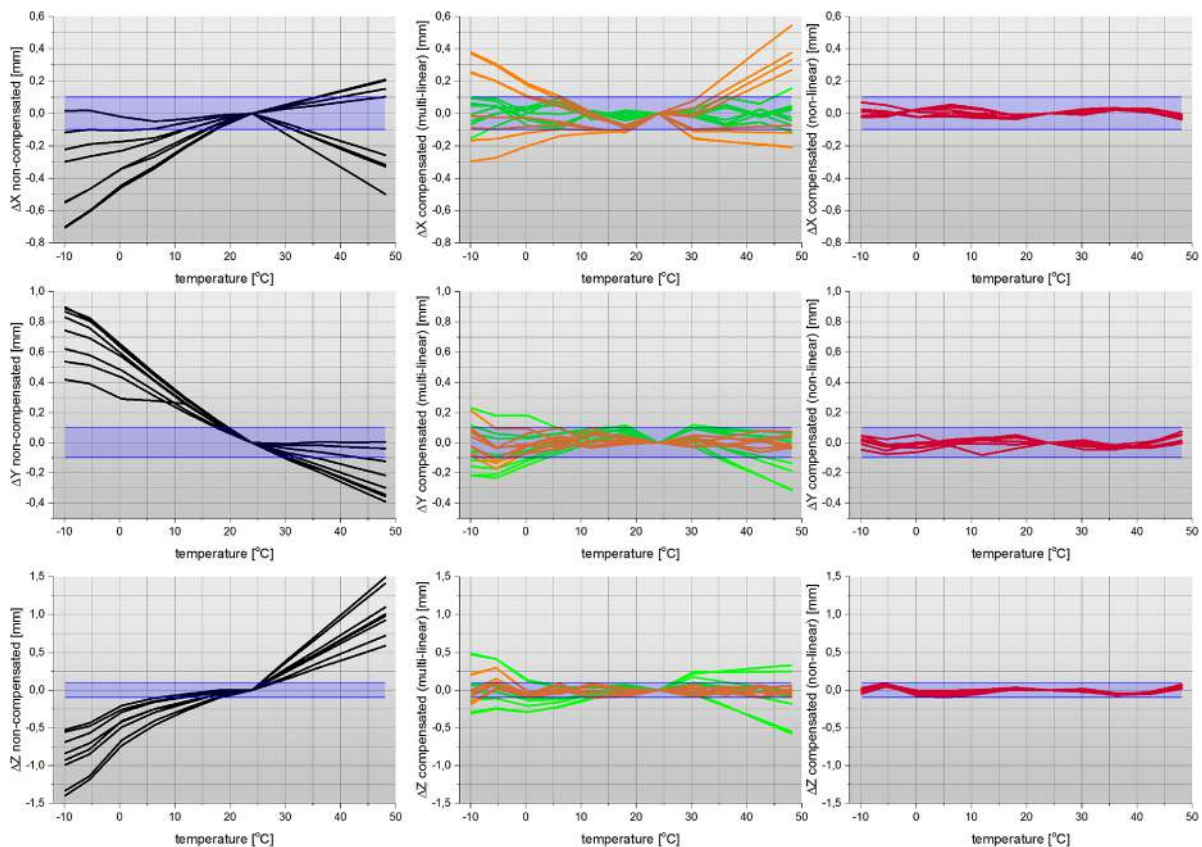
6.3 Model kompensacji wpływu temperatury na skaner 3D z oświetleniem strukturalnym

Zestaw zebranych danych eksperymentalnych posłużył do wyznaczenia modelu kompensacyjnego. Wejściem do modelu był zestaw współrzędnych wirtualnych punktów oraz temperatura: $[P_{1-8}(x,y,z), T]$. Wyjściem z modelu była wartość odchyłki $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$, o jaką należy skorygować każdą współrzędną punktu w obliczonej chmurze $P(x,y,z)$ w danej temperaturze zewnętrznej. Zatem w celu skorygowania współrzędnych punktów w chmurze $P_{niekompensowany} = (x,y,z)$, do każdego punktu należało dodać wartość odchyłki, wyznaczonej z modelu $P_{skompensowany} = (x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z)$. Wartość odchyłki, osobno dla każdej współrzędnej, zależała od temperatury oraz od umiejscowienia w objętości pomiarowej skanera $\Delta x = f(x,y,z,T)$, $\Delta y = f(x,y,z,T)$ oraz $\Delta z = f(x,y,z,T)$.

Na początku posłużyłem się regresją liniową i wyznaczyłem model liniowy dla całego zakresu temperatur, dla każdej współrzędnej osobno (Równanie 6.1).

$$\begin{aligned}\Delta x &= A_x x + B_x y + C_x z + D_x T + E_x \\ \Delta y &= A_y x + B_y y + C_y z + D_y T + E_y \\ \Delta z &= A_z x + B_z y + C_z z + D_z T + E_z\end{aligned}\tag{6.1}$$

Dopasowując model liniowy do danych z całego zakresu temperatur obserwowałem poprawę wyników, ale poprawa nie była znacząca (Rys. 6.7 kolor pomarańczowy). Związane to było między innymi z faktem, że deformacja objętości pomiarowej (patrz Rys. 6.5 i 6.6) nie jest jednorodna i np. ma inny charakter dla rosnącej oraz malejącej temperatury (np. odchyłki Δz dla punktów P_1, P_2, P_5, P_6 na wykresie z rysunku 6.5). Żeby poprawić działanie modelu, podzieliłem dziedzinę temperatury na 4 zakresy i w każdym z tych 4 zakresów ponownie dopasowałem model liniowy. W efekcie współrzędne punktów $P_1 - P_8$ z różnych temperatur znacznie zbliżyły się do wartości z temperatury referencyjnej (Rys. 6.7 kolor zielony).



Rysunek 6.7: Rezultaty działania różnych modeli kompensacji. Obliczone odchyłki współrzędnych dla punktów $P_1 - P_8$ przed i po kompensacji. ■ - wartości odchyłek przed kompensacją, ■ - wartości odchyłek po kompensacji przy użyciu modelu liniowego wyznaczonego dla całego zakresu temperatury, ■ - wartości odchyłek po kompensacji przy użyciu modelu liniowego wyznaczonego w 4 mniejszych zakresach temperatury, ■ - wartości odchyłek po kompensacji przy użyciu modelu wielomianowego, ■ - zakres ($\pm 0,1$)mm niepewności pomiarowej skanera w temperaturze referencyjnej, na podstawie [15]. Źródło: [27].

W celu dalszej poprawy działania modelu kompensacyjnego, do danych eksperymentalnych dopasowałem także model wielomianowy. Posłużyłem się takim samym mechanizmem, co w

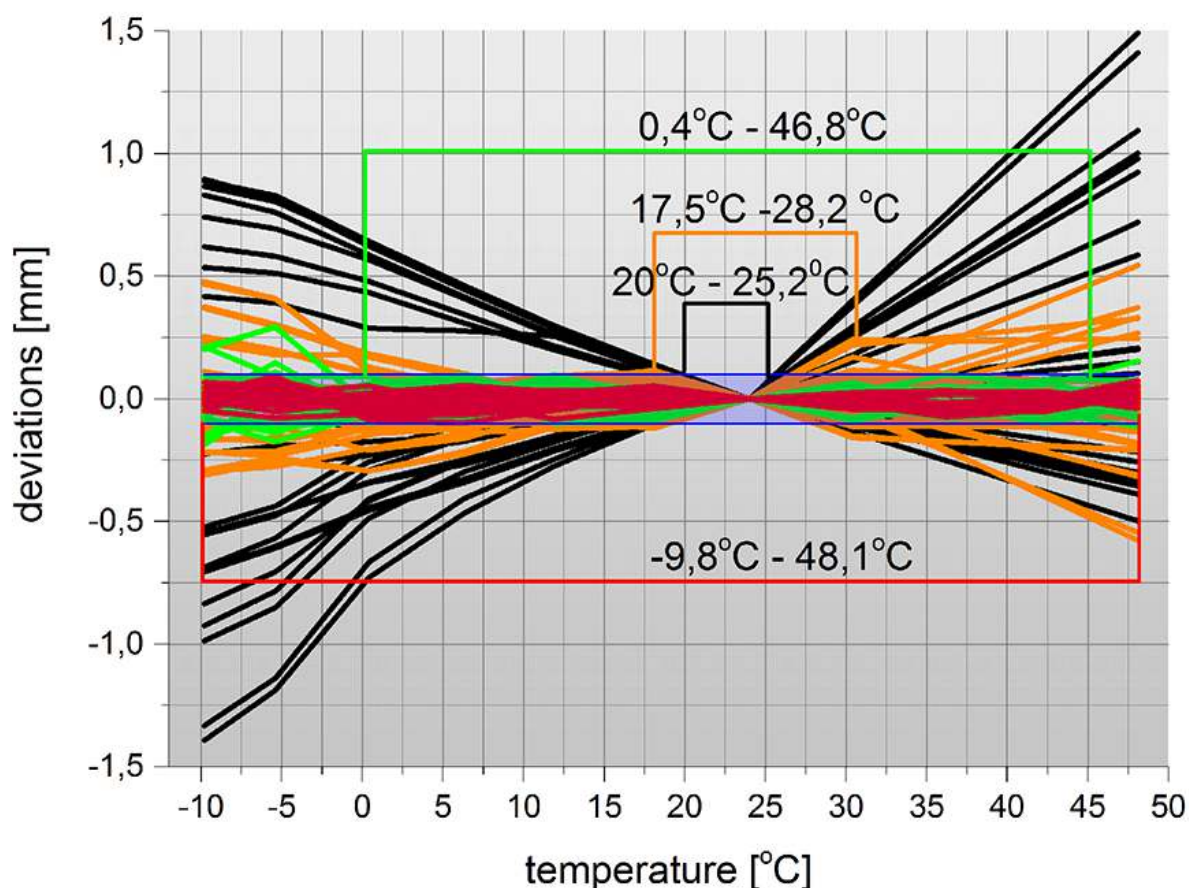
przypadku modelu kompensacji wpływu temperatury na bazę mechaniczną (rozdział 3) oraz kompensacji wpływu temperatury na kamerę cyfrową (rozdział 4). Dla każdej ze współrzędnych punktów w chmurze $P(x,y,z)$ posłużyłem się interpolacją wielomianową, żeby wyznaczyć wartości odchyłek kompensacyjnych (6.2 kolor czerwony). Najlepsze wyniki obserwowałem dla wielomianu 3-go stopnia.

$$\begin{aligned}\Delta x &= P_x^3(x,y,z,T) \\ \Delta y &= P_y^3(x,y,z,T) \\ \Delta z &= P_z^3(x,y,z,T)\end{aligned}\tag{6.2}$$

Na rysunku (Rys. 6.7) przedstawiłem efekty działania poszczególnych modeli kompensacyjnych. Wykresy, dla każdej współrzędnej osobno, pokazują obliczone współrzędne punktów $P_1 - P_8$ w różnych temperaturach odniesione do wartości tych współrzędnych w temperaturze referencyjnych (wyniki w formie odchyłek).

6.4 Podsumowanie i wnioski

Na rysunku 6.8 zaprezentowałem wykres zbiorczy pokazujący wyniki zastosowania poszczególnych modeli kompensacyjnych. Wykresy odchyłek odniosłem do zakresu temperatur, w których błąd przy pomiarze odległości pomiędzy poszczególnymi punktami nie przekraczał wartości $\pm 0,1\text{mm}$. Przy braku kompensacji, skaner mógł wykonywać poprawne pomiary w zakresie $+20,0^\circ\text{C} \div + 25,2^\circ\text{C}$. Zastosowanie liniowego modelu kompensacji, obliczonego dla całego zakresu temperatur, pozwala na zwiększenie tego zakresu do $+17,5^\circ\text{C} \div + 28,2^\circ\text{C}$. Użycie modelu liniowego, obliczonego dla 4 różnych przedziałów temperatury pozwala na dalsze rozszerzenie temperaturowego zakresu poprawnej pracy, do $+0,4^\circ\text{C} \div +46,8^\circ\text{C}$. Najlepsze wyniki kompensacji daje model wielomianowy, który pozwala na rozszerzenie zakresu do całego zakresu badanych temperatur $-9,8^\circ\text{C} \div + 48,1^\circ\text{C}$. W tabeli 6.1 zebrałem także wyniki obliczonego błędu średniokwadratowego RMS dla każdej współrzędnej osobno, dla różnych modeli kompensacyjnych.



Rysunek 6.8: Rezultaty działania różnych modeli kompensacji odniesione do temperaturowego zakresu poprawnej pracy skanera 3D. ■ - wartości odchyłek przed kompensacją, ■ - wartości odchyłek po kompensacji przy użyciu modelu liniowego wyznaczonego dla całego zakresu temperatury, ■ - wartości odchyłek po kompensacji przy użyciu modelu liniowego wyznaczonego w 4 mniejszych zakresach temperatury, ■ - wartości odchyłek po kompensacji przy użyciu modelu wielomianowego, ■ - zakres $(-0,1 \div +0,1)$ mm niepewności pomiarowej skanera w temperaturze referencyjnej, na podstawie [15]. Źródło: [27].

Tabela 6.1: Błąd średniokwadratowy RMS pomiaru odchyłek dla różnych modeli kompensacyjnych.

Model kompensacyjny	RMS [mm]		
	Δx	Δy	Δz
bez modelu	0.252	0.393	0.608
model liniowy	0.082	0.092	0.111
model liniowy z podziałem zakresu temperatury	0.053	0.051	0.074
model wielomianowy	0.023	0.030	0.042

W przeprowadzonym eksperymencie nie badałem efektów wpływu temperatury na poszczególne elementy składowe skanera, a skupiłem się na skanerze 3D jako całości. Takie podejście z jednej strony było dużo prostsze, bo nie jest wymagane przeprowadzanie skomplikowanych analiz związanych z wpływem temperatury na projektor, kamerę i bazę mechaniczną, a następnie połączenie ich ze sobą w jedną, spójną całość. Z drugiej zaś strony, zaproponowana metoda ma szereg wad. Do największej należy konieczność dysponowania odpowiednio dużą komorą termiczną, w której zmieści się stanowisko pomiarowe. Ze względu na tę trudność, w dalszych badaniach (chronologicznie, opisane w tym rozdziale eksperymenty przeprowadzone były na samym początku moich badań, w 2014 roku) skupiałem się na zaplanowaniu eksperymentów, w których nie były wymagane dostęp do tak zaawansowanej komory. Kolejną trudnością, była konieczność posiadania wzorca kształtowego, odpornego na zmiany temperatury. W moim przypadku zbudowałem wzorzec z kompozytów węglowych, co przyniosło bardzo dobre efekty. Należy mieć jednak świadomość, że produkcja takiego wzorca jest pracochłonna i kosztowna.

Pomimo przedstawionych wad, zaprezentowana metoda kompensacji pozwoliła na niemalże jedenastokrotne zwiększenie temperaturowego zakresu pracy badanego prototypu skanera. Bardzo istotny jest także fakt, że wyznaczony model kompensacji jest właściwy jedynie dla układu skanera 3D (baza mechaniczna, kamera i projektor) i nie jest związany z całą sceną pomiarową oraz wzorcem. Oznacza to, że wyznaczone odchyłki kompensacyjne będą działały poprawnie także poza laboratorium i skaner faktycznie będzie wyposażony w kompensację temperaturową.

Rozdział 7

Podsumowanie

Technika skanowania 3D przy wykorzystaniu metody projekcji z oświetleniem strukturalnym jest obecnie realizowana na wiele sposobów. Bardzo intensywnie rozwijane są algorytmy, które pozwalają na szybsze i bardziej dokładne przeprowadzanie digitalizacji kształtu powierzchni obiektów przestrzennych. Skanery 3D z oświetleniem strukturalnym są obecnie uznawane za w pełni funkcjonalne urządzenia pomiarowe. Jest to po części konsekwencją faktu, że opracowane zostały międzynarodowe normy definiujące w jaki sposób należy przeprowadzać ich walidację metrologiczną. Dzięki temu można oszacować błąd graniczny dopuszczalny przy pomiarze odległości E_{MPE} . Należy jednak mieć świadomość, że oszacowanie budżetu niepewności skanera 3D z oświetleniem strukturalnym jest zagadnieniem bardzo złożonym. Istotną kwestią jest także fakt, że zalecane procedury walidacji nakazują, by skaner kalibrowany i walidowany był w stałej i tej samej temperaturze. Brakuje badań, które stwierdzałyby, jak zmienia się wartość błędu pomiarowego wraz ze zmianą temperatury, w której skaner prowadzi pomiary.

W tej pracy podjąłem próbę zbadania zjawisk termicznych, które występują w skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym. Przeprowadziłem badania, które ukierunkowane były na ilościowe opisanie tych zjawisk, a także na opracowanie modelu kompensacji termicznej. Badania prowadziłem w 4 odrębnych blokach. Badałem wpływ temperatury na bazę mechaniczną skanera, na detektory polowe używane w skanerach, na projektory rastra używane w skanerach oraz na cały skaner 3D z oświetleniem strukturalnym. Eksperymenty ukierunkowane były na opisanie oraz skompensowanie efektów zjawisk termicznych, których konsekwencją były deformacje geometryczne skanów, rejestrowanych obrazów bądź też projektowanych wzorów.

Na początku rozprawy, postawiłem sobie następujące cele naukowe i badawcze:

1. Przedstawić metody kompensacji wpływu temperatury na polowe, optyczne przyrządy pomiarowe. Ocenić je w kontekście zastosowania w skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym.

By zrealizować ten cel wykonałem przegląd literatury dostępnej w badanym przedmiocie (Rozdział 2). Starłem się poszukiwać rozwiązań sprzętowych (Rozdział 2.1) oraz programowych (Rozdział 2.2), które są obecnie stosowane w celu kompensacji wpływu temperatury na pomiary przeprowadzane przy użyciu optycznych metod polowych. Skupiłem się na materiałach o niskiej wartości współczynnika rozszerzalności termicznej, z których potencjalnie można skonstruować bazę mechaniczną i obudowę skanerów 3D i w ten sposób ograniczyć niekorzystny wpływ odkształceń termicznych. Zaprezentowałem metody służące do kompensacji temperaturowej stosowanej w układach optycznych. Przedstawiłem także szereg metod kompensacji programowej, a także zreferowałem znalezione przeze mnie publikacje, których treść odnosiła się do kompensowania zjawisk termicznych w kamerach oraz systemach pomiarowych wykorzystujących detektory polowe. Wreszcie, oceniłem poszczególne metody pod kątem możliwości zastosowania ich w skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym (Rozdział 2.1.6, 2.2.4 oraz 2.3).

2. Zaprezentować wyniki własnych badań i eksperymentów dotyczących wpływu temperatury na skanery 3D z oświetleniem strukturalnym oraz ich komponenty składowe (bazę mechaniczną, detektor oraz projektor rastra).

By zrealizować ten cel wykonałem szereg badań w komorze termicznej oraz na zbudowanym przez siebie stanowisku pomiarowym. Badania ukierunkowane były na wyznaczenie efektów deformacji termicznych bazy mechanicznej, kamery, projektora oraz całego skanera 3D. Na potrzeby eksperymentów z wpływem temperatury na bazę mechaniczną zbudowałem model skanera 3D i wyposażyłem go w system do podwyższania temperatury bazy (Rozdział 3).

W badaniach nad efektami termicznymi obserwowanymi w kamerach przebadałem 5 modeli kamer, które są stosowane w skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym (Rozdział 4). Badałem wpływ procesu rozgrzewania się kamer na temperaturowy dryft obrazu (Rozdział 4.1). Badałem także jaki wpływ na deformacje termiczne ma prędkość akwizycji danych (Rozdział 4.1). Udało mi się przeprowadzić testy i wyznaczyć temperaturowy dryft obrazu dla wysokiej jakości kamery przeznaczonej do zastosowań naukowych, wyposażonej w system do stabilizowania temperatury sensora (Rozdział 4.1.5). Udowodniłem eksperymentalnie, że pomimo stabilizowanej temperatury sensora, taka kamera nadal narażona jest na występowanie temperaturowego dryftu obrazu wraz ze zmieniającą się temperaturą otoczenia. Na potrzeby testów ze zmienną temperaturą zewnętrzną zbudowałem stanowisko eksperymentalne z komorą termiczną oraz specjalnym stojakiem z Robaxu, które pozwalało na wyizolowanie wpływu temperatury jedynie na badaną kamerę i obiektyw (Rozdział 4.2).

W badaniach związanych z efektami termicznymi obserwowanymi w projektorach rastra, przebadalem dwa modele projektorow z matryca DMD. Podobnie, jak w przypadku kamer, badalem wplyw procesu rozgrzewania na temperaturowy dryft projektowanego obrazu. Zbadalem takze, czy istnieje zaleznosc pomiedzy temperatura, do jakiej rozgrzewa sie projektor oraz wyswietlanym przez niego obrazem (Rozdzial 5.1 i 5.2).

Na koncu rozprawy opisalem eksperymenty, ktore dotyczyly zbadania efektow termicznych w calym skanerze 3D. Na potrzeby tych badan takze zbudowalem dedykowane stanowisko, ktore pozwalalo na prowadzenie badan w komorze termicznej. Zaprojektowalem i wykonalem specjalny wzorzec ksztaltowy, ktory umozliwial wyznaczenie deformacji termicznych objemosci pomiarowej (Rozdzial 6).

3. Przedstawic metode kompensacji wplywu temperatury na skaner 3D z oswietleniem strukturalnym, a takze na jego poszczegolne elementy skladowe: baze mechaniczna, detektor oraz projektor rastra.

Realizacja tego zadania byla bezposrednia konsekwencja zrealizowania poprzedniego celu. Na kazdym etapie badan nad wplywem zmiennej temperatury na baze mechaniczna, kamere, projektor oraz skaner, proponowalem metode kompensacji wplywu temperaturowego. W przypadku kompensacji wplywu temperatury na baze mechaniczna, zaproponowalem metode, ktora bazowala na przeprowadzaniu symulacji wplywu temperatury i wykorzystaniu wynikow symulacji do deformacji wirtualnego modelu skanera 3D opracowanego w srodowisku 3DsMax. Poprawnosc zaproponowanej metody zostala zweryfikowana eksperymentalnie. Pomiarzy przy uzyciu wzorca typu ball-bar wykazaly, ze po zastosowaniu modelu kompensacyjnego, odchytki przy pomiarze odleglosci pomiedzy kulami wzorcowymi nie przekraczaly wartosci dopuszczalnych dla szerokiego zakresu zadawanych temperatur bazy mechanicznej (Rozdzial 3).

Kolejnym etapem bylo opracowanie metody kompensacji wplywu temperatury na kamery cyfrowe. By opracowac ta metode, musialem zmodyfikowac konstrukcje kamery w ten sposob, by osiagnac powtarzalne zachowanie kamery w roznych temperaturach. Zaproponowana przeze mnie metoda kompensacji bazowala na obrazach 2D, a jej poprawnosc zostala potwierdzona eksperymentalnie takze dla aplikacji 3D. Dzieki zastosowaniu modelu kompensacyjnego, udalo mi sie znacznie rozszerzyc zakres temperatur, w ktorym kamera moze rejestrowac ramki bez ryzyka wystapienia termicznych deformacji obrazu. Przeprowadzona weryfikacja potwierdzila skutecznosc opracowanego modelu kompensacyjnego (Rozdzial 4).

Opracowalem model kompensacji wplywu temperatury na projektor. Metodyka postepowania podczas opracowywania tego modelu byla bardzo podobna jak w

przypadku kamer. Przeprowadzony eksperyment weryfikacyjny pokazał, że dla użytego modelu projektora, zastosowana metoda kompensacyjna pozwoliła ograniczyć temperaturowy dryft obrazu o ponad 90%. Opracowana metoda nie wymaga żadnych ingerencji w budowę projektora (Rozdział 5).

W efekcie badań ukierunkowanych na wyznaczenie i opisanie wpływu temperatury na cały skaner 3D z oświetleniem strukturalnym także opracowałem model kompensacji. Przeprowadzone eksperymenty weryfikacyjne pokazały, że zastosowanie modelu pozwoliło na niemalże jedenastokrotne zwiększenie temperaturowego zakresu pracy badanego prototypu skanera.

Podczas realizacji badań, których wyniki zostały opisane w tej rozprawie, ukazały się następujące artykuły, których byłem autorem lub współautorem:

- 2014 - jako główny autor, artykuł w czasopiśmie Applied Optics (IF 1,791 o tytule "Effect of temperature on calibration quality of structured-light three-dimensional scanners" [27], opublikowane w tym artykule wyniki badań zostały opisane w rozdziale 6,
- 2016 - jako drugi autor, artykuł w czasopiśmie ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (IF 5,994) o tytule "Assessment of next-best-view algorithms performance with various 3D scanners and manipulator" [9], w artykule opisano efekty badań związanych z digitalizacją obiektów za pomocą skanera 3D z oświetleniem strukturalnym zainstalowanym na manipulatorze, pozwalającym na automatyzację całego procesu,
- 2017 - jako główny autor, artykuł w czasopiśmie Journal of Forensic Sciences (IF 1,184) o tytule "Hierarchical, Three-Dimensional Measurement System for Crime Scene Scanning" [7], w artykule opisano system skanujący powstały w efekcie realizacji grantu badawczo-rozwojowego "Rekonstrukcja przebiegu zdarzenia na podstawie śladów krwawych", zbudowany system skanujący zawierał dwa skanery 3D z oświetleniem strukturalnym (mojej konstrukcji), w publikacji opisano także efekty przeprowadzonej walidacji metrologicznej skanerów, zrealizowanej przy użyciu specjalnego wzorca kształtowego,
- 2017 - jako główny autor, artykuł konferencyjny w czasopiśmie SPIE o tytule "Three-dimensional measurement system for crime scene documentation" [29] oraz wystąpienie na konferencji "Counterterrorism, Crime Fighting, Forensics, and Surveillance Technologies" - artykuł oraz wystąpienie były rozszerzeniem artykułu z czasopisma Journal of Forensic Sciences,
- 2018 - jako główny autor, artykuł w czasopiśmie Sensors (IF 2,475) o tytule "Temperature Compensation Method for Digital Cameras in 2D and 3D Measurement Applications"

[28], opublikowane w tym artykule wyniki badań zostały opisane w rozdziale 4, badania opisane w tym artykule były częściowo finansowane z grantu PRELUDIUM o tytule: "Badania wpływu temperatury na jakość kalibracji skanera 3D wykorzystującego metodę projekcji z oświetleniem strukturalnym" 2014/15/N/ST7/00735 [54], finansowanym przez Narodowe Centrum Nauki, byłem kierownikiem tego grantu,

- 2018 - jako drugi autor, artykuł w czasopiśmie Sensors (IF 2,475) o tytule "Structured-Light-Based System for Shape Measurement of the Human Body in Motion" [12], w artykule opisano efekty prac zrealizowane w ramach grantu PBS3/B9/43/2015 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, których efektem był system z oświetleniem strukturalnym do skanowania 3D ciała ludzkiego w ruchu, w artykule opisano powstały system skanujący, innowacyjną ścieżkę przetwarzania oraz efekty walidacji systemu skanującego,

Biorąc po uwagę opisane powyżej fakty uznaję, że wypełniłem cele naukowe i badawcze postawione w rozprawie.

7.1 Kierunki dalszych prac

Mając świadomość, jak obszernym zagadnieniem jest wpływ zjawisk termicznych na jakość odwzorowania kształtu geometrii powierzchni przez skanery 3D z oświetleniem strukturalnym, planuję dalej prowadzić badania naukowe w tej materii. Poniżej opisałem najważniejsze kierunki badawcze, które zamierzam rozwijać w najbliższej przyszłości:

1. W rozprawie skupiłem się na termicznych deformacjach obserwowanych w rejestrowanych ramkach, projektowanych obrazach i wyznaczonych chmurach punktów. Całkowicie pominąłem efekty termiczne dotyczące zjawisk związanych z elementami elektronicznymi i półprzewodnikowymi (np. odwzorowanie barwy, kontrast, SNR etc.). Zjawiska te są częściowo opisane w literaturze, ale nie znalazłem prac, które odnosiłyby się konkretnie do wpływu efektów tych zjawisk na właściwości metrologiczne skanerów 3D z oświetleniem strukturalnym. Planuję zająć się badaniem tych zjawisk w przyszłości.
2. W rozprawie zaprezentowałem metody kompensacji wpływu temperatury na bazę mechaniczną, kamerę, projektor oraz na cały skaner 3D. Z wyjątkiem ostatniej metody, odnoszącej się bezpośrednio do całego skanera, opisane metody kompensują wpływ zmiennej temperatury na poszczególne elementy składowe skanera. Brakuje natomiast techniki, która pozwoliłaby na połączenie opisanych metod w jedną, spójną metodę kompensacji wpływu temperatury na skaner 3D z oświetleniem strukturalnym. Metoda opisana w rozdziale 6, nie jest takim połączeniem. Można ją porównać do wzorcowania

termicznego konkretnego modelu skanera 3D z oświetleniem strukturalnym. Podstawową cechą tej techniki jest fakt obserwowania deformacji termicznych całej objętości pomiarowej skanera, bez rozróżniania źródeł tych deformacji. Jest to metoda dość skuteczna, co pokazały przeprowadzone eksperymenty weryfikacyjne. Posiada też szereg wad, z których największą jest fakt, że wymaga dostępu do komory termicznej oraz specjalnego stanowiska pomiarowego wyposażonego w dedykowany do objętości pomiarowej skanera i nieodkształcalny termicznie wzorec kształtowy. Jednym z najważniejszych kierunków, w których chciałbym rozwijać dalsze badania, jest połączenie opracowanych modeli kompensacyjnych kamery, projektora oraz bazy mechanicznej i opracowanie jednego, spójnego modelu dla całego skanera 3D.

3. Swoje badania chciałbym rozwijać także w kierunku opracowania projektu kamery, której zachowanie byłoby powtarzalne w szerokim zakresie temperatur zewnętrznych. Opisane w rozdziale 4.2 modyfikacje kamery Grasshopper 2.0 miały charakter czysto badawczy i służyły pokazaniu, że taką kamerę da się zbudować. Z oczywistych względów wprowadzone przeze mnie modyfikacje nie mogłyby zostać wdrożone w produkcji kamer na szerszą skalę. Opracowanie konstrukcji takiej kamery jest jednak niezbędne w punktu widzenia możliwości stworzenia modelu kompensacji wpływu temperatury na cały skaner 3D, dlatego jednym z kierunków moich dalszych prac naukowych jest opracowanie takiego projektu.

Spis rysunków

1.1	Rozmieszczenie elementów składowych skanera 3D z oświetleniem strukturalnym oraz definicja układu współrzędnych	13
1.2	Obrazy pomiarowe z prążkami, kodami Graya oraz teksturą.	14
1.3	Przykładowy wzorzec do kalibracji skanera 3D z oświetleniem strukturalnym.	15
1.4	Różne konfiguracje skanerów 3D ze światłem strukturalnym.	16
1.5	Pomiar otworów za pomocą skanera 3D z oświetleniem strukturalnym.	17
1.6	Sugerowane przez normy położenia wzorców podczas walidacji metrologicznej skanera ze światłem strukturalnym	21
1.7	Schematyczne przedstawienie skanera światła strukturalnego.	22
1.8	Odchyłki Δx oraz Δz spowodowane odkształceniem termicznym bazy skanera w zależności od temperatury T oraz kąta bazowego γ dla różnych materiałów bazy.	23
2.1	Skaner 3D z oświetleniem strukturalnym wykonany w technologii sklejanie formatek z laminatu węglowego wyciętych na maszynie CNC typu <i>water-jet</i>	32
2.2	Dwa sposoby realizacji kompensatora bimetalicznego, wg. [83]	36
2.3	Kompensacja różnicowa bazy mechanicznej skanera 3D z oświetleniem strukturalnym.	38
2.4	Sposób realizacji różnicowej kompensacji temperaturowej dla bazy skanera 3D ze światłem strukturalnym	39
2.5	Koncepcja skanera 3D z bazą mechaniczną, w której zrealizowana jest kompensacja różnicowa	40
2.6	Skaner 3D ze światłem strukturalnym, z dwoma detektorami oraz mikrokomputerem klasy PC.	42
2.7	Skaner 3D SLS podczas rozgrzewania się - widok z kamery termowizyjnej	43
2.8	Wzorzec do kalibracji skanera 3D z oświetleniem strukturalnym	45
2.9	Różne efekty termiczne obserwowane na kamerze: dryft obrazu spowodowany rozgrzewaniem się kamery oraz dryft obrazu spowodowany zmianą temperatury zewnętrznej	52

2.10	Schemat geometryczny modelu kamery otworkowej	53
2.11	Stanowisko pomiarowe użyte do weryfikacji założeń oraz modelu kompensacyjnego opisanego w publikacji. [25]	57
2.12	Symulacja pokazująca efekty niewielkich zmian parametrów wewnętrznych i zewnętrznych kamery na dryft cech obserwowany w obrazie.	59
2.13	Rozmieszczenie czujników temperatury oraz schematyczne przedstawienie inwarowego wzorca.	62
2.14	Efekty działania kompensacji z modelem liniowym na dwu-kamerowy fotogrametryczny system pomiarowy Krypton K100 System.	62
3.1	System skanujący 3D do zastosowań medycznych, wykorzystujący skanery z oświetleniem strukturalnym.	68
3.2	Typowa głowica kulowa wykorzystywana do justowania wzajemnego położenia kamery oraz projektora w skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym.	69
3.3	Prototypowa głowica do sprawdzenia poprawności zaproponowanej metody kompensacji wpływu temperatury na bazę mechaniczną skanera 3D z oświetleniem strukturalnym.	72
3.4	Wzorzec kalibracyjny użyty do kalibracji skanera 3D z oświetleniem strukturalnym w eksperymencie z kompensacją bazy mechanicznej.	73
3.5	Pozycje wzorca do kalibracji geometrycznej oraz fazy.	74
3.6	Wzorzec typu ball-bar użyty do sprawdzenia kalibracji skanera 3D. Rozmieszczenie wzorca typu ball-bar w objętości skanera podczas walidacji. Wynik dopasowania wirtualnej płaszczyzny do pomiaru wzorca kalibracyjnego.	75
3.7	Wzorzec do wyznaczenia pozycji projektora w objętości pomiarowej skanera.	77
3.8	Pomiar położenia bazy mechanicznej w objętości pomiarowej skanera.	78
3.9	Symulacja wpływu temperatury na bazę mechaniczną skanera 3D z oświetleniem strukturalnym.	79
3.10	Wirtualny skaner stworzony w środowisku 3DsMAX 2018.	81
3.11	Porównanie ramki zebranej przez kamerę oraz renderowanej w programie 3DsMAX 2018.	82
3.12	Pomiar wirtualnego wzorca - 140 kulek równo rozmieszczonych w objętości pomiarowej skanera. Wyniki pomiarów dla różnych temperatur.	83
3.13	Wyniki pomiarów odległości pomiędzy kulkami wzorcowymi po kompensacji.	85
3.14	Stanowisko do weryfikacji modelu kompensującego wpływ temperatury na bazę mechaniczną skanera 3D.	87
3.15	Wyniki pomiarów wzorca ball-bar przed i po kompensacji temperaturowej.	89
4.1	Kamera Grasshopper 2.0 użyta w testach.	96

4.2	Proces rozgrzewania się kamery Grasshopper 2.0, bez rejestracji obrazów.	97
4.3	Proces rozgrzewania się kamery Grasshopper 2.0, z rejestracją obrazów.	99
4.4	Test powtarzalności dryftu temperaturowego dla kamery Grasshopper 2.0.	100
4.5	Kamera IDS UI-62180SE użyta w testach.	102
4.6	Proces rozgrzewania się kamery IDS UI-62180SE, bez rejestracji ramek.	102
4.7	Wykres temperatury kamery IDS UI-62180SE rozgrzewającej się początkowo bez rejestracji ramek i potem z rejestracją ramek.	103
4.8	Proces rozgrzewania się kamery IDS UI-62180SE, z rejestracją ramek.	104
4.9	Temperatura kamery IDS UI-62180SE zarejestrowana podczas testu rozgrzewania z rejestracją ramek.	105
4.10	Test powtarzalności temperaturowego dryftu obrazu kamery IDS UI-6280SE.	106
4.11	Kamera ArduCam użyta w testach.	107
4.12	Proces rozgrzewania się kamery ArduCam, z rejestracją obrazów	108
4.13	Proces rozgrzewania się kamery ArduCam, z rejestracją obrazów	109
4.14	Trajektorie środków markerów na obrazach zarejestrowanych przez rozgrzewającą się kamerę ArduCam	110
4.15	Test powtarzalności dryftu temperaturowego dla kamery ArduCam	111
4.16	Kamera RaspberryPi Camera użyta w testach.	112
4.17	Trajektorie środków markerów na obrazach zarejestrowanych przez rozgrzewającą się kamerę RaspberryPi Camera	113
4.18	Proces rozgrzewania się kamery RaspberryPi Camera, z rejestracją obrazów	114
4.19	Test powtarzalności dryftu temperaturowego dla kamery RaspberryPi Camera	116
4.20	Kamera VP-8MC M16A0.	117
4.21	Trajektorie środków markerów na obrazach zarejestrowanych przez rozgrzewającą się kamerę VP-8MC.	118
4.22	Trajektoria wyróżnionego markera dla kamery VP-8MC podczas testu rozgrzewania.	119
4.23	Temperatura zarejestrowana podczas eksperymentu ze zmianą temperatury sensora kamery VP-8MC.	120
4.24	Trajektorie środków markerów na obrazach zarejestrowanych przez kamerę VP-8MC podczas eksperymentu ze zmianą temperatury sensora.	122
4.25	Trajektoria wyróżnionego markera dla kamery VP-8MC podczas testu ze zmianą temperatury sensora.	123
4.26	Przeskalowanie macierzy znaczników na skutek zmiany temperatury zewnętrznej kamery o +5°C.	124
4.27	Stanowisko pomiarowe z komorą termiczną.	128
4.28	Sposób łączenia formatek z Robaxu	129

4.29	Zarejestrowany podczas początkowych eksperymentów temperaturowy dryft obrazu.	131
4.30	Modyfikacja konstrukcji kamery Grasshopper 2.0.	133
4.31	Zarejestrowany temperaturowy dryft obrazu zmodyfikowanej kamery.	134
4.32	Temperaturowy dryft obrazu zmodyfikowanej kamery - dane do modelu kompensacyjnego.	136
4.33	Histogram odchyłek wartości współrzędnych I oraz J dla różnych temperatur od wartości współrzędnych w temperaturze referencyjnej przed i po kompensacji.	137
4.34	Model kompensacyjny dla jednej płaszczyzny będzie także działał dla innych płaszczyzn.	138
4.35	Pozycje wzorca podczas eksperymentu weryfikującego działanie modelu kompensacyjnego dla zastosowań 3D.	140
4.36	Wartości odchyłek od transformacji w temperaturze referencyjnej dla wszystkich temperatur przed i po kompensacji dla 4 położenia walidacyjnych wzorca $V0 - V3$	142
5.1	Wypełnienie piksela w projektorach.	147
5.2	Układ optyczny projektora z matrycami LCD.	148
5.3	Matryca DMD wykorzystywana w projektorach DLP.	149
5.4	Projektor DLP LightCrafter 4500.	151
5.5	Wzorzec użyty w eksperymencie z rozgrzewaniem projektora.	153
5.6	Budowa projektora DLP LightCrafter4500.	154
5.7	Układ optyczny projektora DLP LightCrafter4500.	155
5.8	Rozgrzewanie się projektora Casio XJ-A252 obserwowane przez kamerę termowizyjną.	156
5.9	Temperatura zarejestrowana przez zewnętrzny czujnik podczas testu rozgrzewania się projektora DLP LightCrafter 4500 przy różnych wyświetlanych obrazach.	157
5.10	Temperaturowy dryft obrazu wyświetlanego przez projektor DLP LightCrafter 4500 podczas rozgrzewania.	158
5.11	Projektor Casio XJ-A252.	159
5.12	Układ optyczny projektora Casio XJ-A252.	160
5.13	Rozgrzewanie się projektora Casio XJ-A252 obserwowane przez kamerę termowizyjną.	162
5.14	Temperatura zarejestrowana przez zewnętrzny czujnik podczas testu rozgrzewania się projektora Casio XJ-A252 przy różnych wyświetlanych obrazach.	163

5.15	Temperaturowy dryft obrazu wyświetlanego przez projektor Casio XJ-A252 podczas rozgrzewania.	164
5.16	Temperaturowy dryft jednego z markerów projektowanych przez projektor Casio XJ-A252.	165
5.17	Temperatura projektora DLP LightCrafter 4500, zarejestrowana przez zewnętrzny czujnik, podczas eksperymentu ze zmianą temperatury zewnętrznej.	168
5.18	Temperaturowy dryft obrazu wyświetlanego przez projektor DLP LightCrafter 4500, zarejestrowany podczas eksperymentu ze zmianą temperatury zewnętrznej.	169
5.19	Temperaturowy dryft obrazu wyświetlanego przez projektor DLP LightCrafter 4500, zarejestrowany podczas eksperymentu ze zmianą temperatury zewnętrznej, we współrzędnych związanych z wyświetlanym obrazem.	170
5.20	Histogram odchyłek współrzędnych markerów przed i po kompensacji.	171
5.21	Zarejestrowana temperatura projektora podczas eksperymentu weryfikującego wyznaczone modele kompensacyjne.	172
5.22	Wyniki eksperymentu weryfikacyjnego, projekcja bez zastosowania modelu kompensacyjnego.	173
5.23	Wyniki eksperymentu weryfikacyjnego, projekcja z zastosowaniem modelu kompensacyjnego.	174
5.24	Jakościowe pokazanie działania modelu kompensacyjnego- bez kompensacji.	175
5.25	Jakościowe pokazanie działania modelu kompensacyjnego- z kompensacją.	176
6.1	Wzorzec kształtowy składający się z ośmiu wzorców trójpłaszczyznowych.	180
6.2	Pomiar wzorca trójpłaszczyznowego za pomocą ramienia pomiarowego oraz skanera 3D z oświetleniem strukturalnym.	181
6.3	Wykres wartości współrzędnej x punktu P_1 w funkcji temperatury.	182
6.4	Widok stanowiska pomiarowego ustawionego wewnątrz komory termicznej.	183
6.5	Wyniki pomiarów wzorca kształtowego przy pomocy ramienia pomiarowego, obrazujące wpływu temperatury na skaner 3D z oświetleniem strukturalnym.	185
6.6	Deformacja objętości pomiarowej skanera 3D z oświetleniem strukturalnym wywołana zmienną temperaturą zewnętrzną.	186
6.7	Rezultaty działania różnych modeli kompensacji. Obliczone odchyłki współrzędnych dla punktów $P_1 - P_8$ przed i po kompensacji.	188
6.8	Rezultaty działania różnych modeli kompensacji odniesione do temperaturowego zakresu poprawnej pracy skanera 3D.	190

Spis tabel

2.1	Właściwości materiałowe (moduł Younga E , gęstość ρ) niektórych materiałów o niskiej wartości liniowego współczynnika rozszerzalności termicznej α	29
2.2	Ocena sprzętowych metod kompensacji temperaturowej możliwych do zastosowania w skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym	48
2.3	Porównanie różnych metod kompensacji kalibracji kamery	64
3.1	Wyniki pomiaru wzorca typu ball-bar w temperaturze referencyjnej $24^{\circ}C$	76
3.2	Wyniki symulacji wpływu temperatury na bazę mechaniczną skanera 3D. Tabela zawiera kolejne pozycje (pos) detektora (D) i projektora (P) odniesione do pozycji z temperatury referencyjnej, a także wektor wyznaczający kierunek (dir) odniesiony do kierunku w temperaturze referencyjnej, dla 6 różnych temperatur bazy mechanicznej. Wartości podane są w milimetrach.	80
3.3	Dystans pomiędzy kulami wzorcowymi dla różnych temperatur bazy mechanicznej przed kompensacją i po zastosowaniu modelu kompensacyjnego. Odchyłka odnoszona do wymiaru nominalnego mierzonego metodą referencyjną $d_{ref} = 107,0162\text{mm} \pm 1,8\mu\text{m}$	88
4.1	Przebadane modele kamer	94
4.2	Podsumowanie testów rozgrzewania się kamer	126
4.3	Odchyłki translacji dla dwóch temperatur przed i po kompensacji.	141
6.1	Błąd średniokwadratowy RMS pomiaru odchyłek dla różnych modeli kompensacyjnych.	190

Bibliografia

- [1] Elias N. Malamas, Euripides G M Petrakis, Michalis Zervakis, Laurent Petit, and Jean Didier Legat. A survey on industrial vision systems, applications and tools. *Image and Vision Computing*, 21(2):171–188, 2003.
- [2] Robert Sitnik. New method of structure light measurement system calibration based on adaptive and effective evaluation of 3d-phase distribution. *Proc. SPIE, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IV*, 5856:109–117, 2005.
- [3] Sai Siva Gorthi and Pramod Rastogi. Fringe projection techniques: Whither we are? *Optics and Lasers in Engineering*, 48:133–140, feb 2010.
- [4] Robert Sitnik and Małgorzata Kujawińska. From cloud-of-point coordinates to three-dimensional virtual environment: the data conversion system. *Optical Engineering*, 41:41 – 41 – 12, 2002.
- [5] Robert Sitnik. *Odwzorowanie kształtu obiektów trójwymiarowych z wykorzystaniem oświetlenia strukturalnego*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2010.
- [6] Maciej Karaszewski, Marcin Adamczyk, Robert Sitnik, Jakub Michoński, Wojciech Załuski, Eryk Bunsch, and Paweł Bolewicki. Automated full-3D digitization system for documentation of paintings. *Proc. SPIE 8790*, 87900X(IV), 2013.
- [7] Marcin Adamczyk, Maciej Sieniło, Robert Sitnik, and Adam Woźniak. Hierarchical, Three-Dimensional Measurement System for Crime Scene Scanning. *Journal of Forensic Sciences*, 62(4):889 – 899, 2017.
- [8] Maciej Karaszewski, Krzysztof Lech, Eryk Bunsch, and Robert Sitnik. In the pursuit of perfect 3d digitization of surfaces of paintings : Geometry and color optimization. In Marinos Ioannides, Nadia Magnenat-Thalmann, Eleanor Fink, Roko Žarnić, Alex-Yianing Yen, and Ewald Quak, editors, *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection*, pages 25–34, Cham, 2014. Springer International Publishing.

- [9] M. Karaszewski, M. Adamczyk, and R. Sitnik. Assessment of next-best-view algorithms performance with various 3d scanners and manipulator. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 119:320 – 333, 2016.
- [10] Jakub Michoński, Wojciech Glinkowski, Marcin Witkowski, and Robert Sitnik. Automatic recognition of surface landmarks of anatomical structures of back and posture. *Journal of biomedical optics*, 17(5):056015, 2012.
- [11] Jakub Lenar, Marcin Witkowski, Vincenzo Carbone, Sjoerd Kolk, Marcin Adamczyk, Robert Sitnik, Marjolein van der Krogt, and Nico Verdonshot. Lower body kinematics evaluation based on a multidirectional four-dimensional structured light measurement. *Journal of Biomedical Optics*, 18(5):056014–056014, 2013.
- [12] Paweł Liberadzki, Marcin Adamczyk, Marcin Witkowski, and Robert Sitnik. Structured-light-based system for shape measurement of the human body in motion. *Sensors*, 18(9), 2018.
- [13] Wojciech M. Glinkowski, Paweł Tomasik, Katarzyna Walesiak, Michał Głuszak, Karolina Krawczak, Jakub Michoński, Anna Czyżewska, Agnieszka Żukowska, Robert Sitnik, and Mirosław Wielgoś. Posture and low back pain during pregnancy — 3d study. *Ginekologia Polska*, 87(8):575–580, 2016.
- [14] Octavian Ciobanu, Wei Xu, and Gabriela Ciobanu. The Use of 3D Scanning and Rapid Prototyping In Medical Engineering. *Academica Brâncuși*, 1(1):241–247, 2013.
- [15] Jerzy Śladek, Robert Sitnik, Magdalena Kupiec, and Paweł Błaszczuk. The hybrid coordinate measurement system as a response to industrial requirements. *Metrology and Measurement Systems*, XVII(4):537–547, 2010.
- [16] Eryk Bunsch and Robert Sitnik. Method for visualization and presentation of priceless old prints based on precise 3d scan. In *IS&T/SPIE Electronic Imaging, 2014, San Francisco, California, United States*, volume 9018, pages 9018 – 9018 – 9, 2014.
- [17] Mumin Song Fang Chen, Gordon M. Brown. Overview of 3-d shape measurement using optical methods. *Optical Engineering*, 39:39 – 39 – 13, 2000.
- [18] J. E. Greivenkamp. Generalized data reduction for heterodyne interferometry. *Optical Engineering*, 23(4):350–352, 7 1984.
- [19] J. Schwider, R. Burow, K.-E. Elssner, J. Grzanna, R. Spolaczyk, and K. Merkel. Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources. *Appl. Opt.*, 22(21):3421–3432, Nov 1983.

- [20] W. Osten, W. Nadeborn, and P. Andrae. General hierarchical approach in absolute phase measurement. In *Proc.SPIE*, volume 2860, pages 2860 – 2860, 1996.
- [21] Holger Handel. Compensation of thermal errors in vision based measurement systems using a system identification approach. In *2008 9th International Conference on Signal Processing*, pages 1329–1333, Oct 2008.
- [22] Holder Handel. Analyzing the influence of camera temperature on the image acquisition process. In *SPIE*, volume 6805, pages 1–8, 2008.
- [23] Holder Handel. Analyzing the influences of camera warm-up effects on image acquisition. In *Computer Vision–ACCV 2007*, number Icm in 1, pages 258–268, 2007.
- [24] Qifeng Yu, Zhichao Chao, Guangwen Jiang, Yang Shang, Sihua Fu, Xiaolin Liu, Xianwei Zhu, and Haibo Liu. The effects of temperature variation on videometric measurement and a compensation method. *Image and Vision Computing*, 32(12):1021 – 1029, 2014.
- [25] Peter Podbreznik and Božidar Potočnik. Assessing the influence of temperature variations on the geometrical properties of a low-cost calibrated camera system by using computer vision procedures. *Machine Vision and Applications*, 23(5):953–966, 2012.
- [26] Kruth, J-P and Zhou, L and Vanherck, P. Thermal Error Analysis and Compensation of an LED-CMOS Camera 3D Measuring System. *Measurement Science Review*, 3:5–8, 2003.
- [27] Marcin Adamczyk, Michał Kamiński, Robert Sitnik, Anna Bogdan, and Maciej Karaszewski. Effect of temperature on calibration quality of structured-light three-dimensional scanners. *Applied Optics*, 53(23):5154, 2014.
- [28] Marcin Adamczyk, Paweł Liberadzki, and Robert Sitnik. Temperature Compensation Method for Digital Cameras in 2D and 3D Measurement Applications. *Sensors*, 18(11):1 – 17, 2018.
- [29] Krzysztof Lech Jakub Michoński Grzegorz Mączkowski Paweł Bolewicki Kamil Januszkiewicz Robert Sitnik Marcin Adamczyk, Elwira Hołowko. Three-dimensional measurement system for crime scene documentation. In *SPIE Security + Defence, 2017, Warsaw, Poland*, volume 10441, pages 10441 – 10441 – 12, 2017.
- [30] HP 3D Structured Light Scanner Pro S3 - ulotka producenta. URL <http://www8.hp.com/h20195/v2/GetDocument.aspx?docname=4AA6-9360ENW>. [online, dostęp: 08.01.2018.

- [31] Atos Triple Scan - strona producenta. URL <http://www.gom.com/metrology-systems/atos/atos-triple-scan.html>. [online, dostęp: 08.01.2018].
- [32] ScanBright archeo - strona producenta skanera, firmy Smarttech3D Sp. z o.o. URL <http://www.smarttech.pl/skanery-3d/dla-muzealnictwa-i-archeologii/scanbright-archeo/>. [online, dostęp: 08.01.2018].
- [33] Song Zhang. Recent progresses on real-time 3d shape measurement using digital fringe projection techniques. *Optics and Lasers in Engineering*, 48(2):149 – 158, 2010. Fringe Projection Techniques.
- [34] VDI / VDE 2634 blatt 3 the guideline applies to optical 3-d-measuring systems based on area scanning, whose function is based on triangulation and applies to the measuring of three-dimensional objects in multi views. URL http://www.vdi.eu/guidelines/vdivde_2634_blat_3-optische_3_d_messsysteme_bildgebende_systeme_mit_flaechenhafter_antastung//.
- [35] K. Ostrowska, D. Szewczyk, and J. Sładek. Wzorcowanie systemów optycznych zgodnie z normami iso i zaleceniami vdi/vde. *Czasopismo Techniczne. Mechanika*, R. 109, z. 9-M:167–179, 2012.
- [36] Geometrical product specifications (GPS) – acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) – Part 8: CMMs with optical distance sensors. URL https://docs.opencv.org/2.4/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html. [online, dostęp: 14.02.2018].
- [37] C. Bernal, B. de Agustina, M.M. Marín, and A.M. Camacho. Performance Evaluation of Optical Scanner Based on blue LED Structured Light. *Procedia Engineering*, 63:591 – 598, 2013. The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2013.
- [38] Danuta Owczarek. *Model niepewności we współrzędnościowych pomiarach optycznych*. Wydawnictwo PK - Monografie Politechniki Krakowskiej, 2017.
- [39] Magdalena Kupiec. *Optyczno-stykowa metoda pomiarów współrzędnościowych*. PhD thesis, Politechnika Krakowska, 12 2007.
- [40] Danuta Owczarek, Ksenia Ostrowska, and Jerzy Sładek. Examination of optical coordinate measurement systems in the conditions of their operation. *Maintenance Problems*, (no. 4 (107)):7–19, 2017.

- [41] ISO 15530-3:2011: Geometrical product specifications (GPS) - coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement - part 3: Use of calibrated workpieces or measurement standards. URL <https://www.iso.org/standard/53627.html>.
- [42] Certyfikacja według zaleceń niemieckiego PTB zgodnie z normą VDI/VDE 2634. URL <http://www.smarttech.pl/skanery-3d/certyfikaty-dokladnosci/>. Strona internetowa producenta skanerów 3D światła strukturalnego firmy Smarttech3D sp. z o.o., opisująca metodę certyfikacji. [online, dostęp: 05.01.2018].
- [43] Stuart Robson, Lindsay MacDonald, Stephen Kyle, and Mark R. Shortis. Close Range Calibration of Long Focal Length Lenses in a Changing Environment. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B5(September):115–122, 2016.
- [44] Shaopeng Ma, Jiazhi Pang, and Qinwei Ma. The systematic error in digital image correlation induced by self-heating of a digital camera. *Measurement Science and Technology*, 23(2):025403, 2012.
- [45] GOM GmbH. What's new 2017 – 3D metrology. Technical report, GOM GmbH, 2017. Prezentacja dostępna online: https://support.gom.com/download/attachments/28184481/whats-new-gom-software-2017_3D-metrology_EN_without-videos.pdf?version=2&modificationDate=1504536291000.
- [46] Zhen Liu, Qun Wu, Xu Chen, and Yang Yin. High-accuracy calibration of low-cost camera using image disturbance factor. *Optics Express*, 24(21):24321–24336, Oct 2016.
- [47] G. Zhou and C. Lee. *Optical MEMS, Nanophotonics, and Their Applications*. Series in Optics and Optoelectronics. CRC Press, 2017.
- [48] A.B. Sontheimer and D.J. Mehrl. Effects of Operating Conditions on DMD Hinge Memory Lifetime. In *Reliability Physics Symposium Proceedings*, pages 473–477. IEEE International, 2003.
- [49] M. R. Douglass. Lifetime estimates and unique failure mechanisms of the digital micromirror device (dmd). In *1998 IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings. 36th Annual (Cat. No.98CH36173)*, pages 9–16, March 1998.
- [50] Yang Qiao, Xiping Xu, Yue Pan, and Yandi Li. Research on dmd infrared scene projector with a high contrast ratio infrared prism design. *Optik*, 125(22):6854 – 6859, 2014.

- [51] Y Kwak and L MacDonald. Characterisation of a desktop lcd projector. *Displays*, 21(5):179 – 194, 2000.
- [52] Rainer Hain, Christian J. Kähler, and Cam Tropea. Comparison of ccd, cmos and intensified cameras. *Experiments in Fluids*, 42(3):403–411, Mar 2007.
- [53] Fei Xing Songsong Ji, Ting Sun. Thermal effect on star sensor. In *Proc.SPIE*, volume 10821, pages 10821 – 10821 – 10, 2018.
- [54] Badania wpływu temperatury na jakość kalibracji skanera 3d wykorzystującego metodę projekcji z oświetleniem strukturalnym. URL <https://projekty.ncn.gov.pl/index.php?s=9703/>. 2014/15/N/ST7/00735 grant PRELUDIUM NCN.
- [55] Budowa stanowiska do badań nad wpływem temperatury na elementy składowe skanerów z oświetleniem strukturalnym oraz samych skanerów. Grant Dziekana Wydziału Mechatroniki.
- [56] OGXIOPTOGRAPHX 3DMADMAC - strona internetowa projektu. URL http://ogx.mchtr.pw.edu.pl/visit.php?h=ogx.mchtr.pw.edu.pl/index.php&l=pl&p=projects_3dmadmac&url=projects/3dmadmac. [online, dostęp: 21.06.2018].
- [57] Jerzy M. Woznicki Robert Sitnik, Malgorzata Kujawinska. Digital fringe projection system for large-volume 360-deg shape measurement. *Optical Engineering*, 41:41 – 41 – 7, 2002.
- [58] Jerzy Arendarski. *Niepewność pomiarów. Wydanie 3.* 3. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2013.
- [59] Jerzy Sładek. *Dokładność pomiarów współrzędnościowych.* 1. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2011.
- [60] Nael Barakat. Thermal Error Modelling And Compensation For A Coordinate Measuring Machine - PHD Thesis. Technical report, McMaster University, 2000.
- [61] Jorge Santolaria, José-Antonio Yagüe, Roberto Jiménez, and Juan-José Aguilar. Calibration-based thermal error model for articulated arm coordinate measuring machines. *Precision Engineering*, 33(4):476 – 485, 2009.
- [62] Igor Kovač and Adolf Frank. Testing and calibration of coordinate measuring arms. *Precision Engineering*, 25(2):90 – 99, 2001.

- [63] M.H. Attia and S. Fraser. A generalized modelling methodology for optimized real-time compensation of thermal deformation of machine tools and cmm structures. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39(6):1001 – 1016, 1999.
- [64] A. Balsamo, D. Marques, and S. Sartori. A method for thermal-deformation corrections of cmms. *CIRP Annals*, 39(1):557 – 560, 1990.
- [65] Adam Gąska, Wiktor Harmatys, Piotr Gąska, Ksenia Ostrowska, Maciej Gruza, Danuta Owczarek, and Jerzy Śladek. Modeling of the thermal influences on the cmm kinematic system. In *21st IMEKO World Congress 2015 : Measurement in Research and Industry, 30 August-4 September 2015, Prague, Czech Republic : proceedings. Vol. 2*, pages 1365–1368, Budapest, Hungary, 2015. IMEKO The International Measurement Confederation, IMEKO-International Measurement Federation Secretariat.
- [66] Wiktor Harmatys, Piotr Gąska, Adam Gąska, Maciej Gruza, and Jerzy Śladek. Determination of temperature impact on cmm residual kinematic errors distribution. *Advances in Science and Technology Research Journal*, (Vol. 9, No. 26):113–117, 2015.
- [67] Robert Kupiec. *Korekcja oddziaływań termicznych we współrzędnościowych maszynach pomiarowych*. PhD thesis, Politechnika Krakowska, 2007.
- [68] ZERODUR - Extremely low Expansion Glass Ceramic - ulotka producenta. URL http://www.schott.com/d/advanced_optics/e532f55f-d6c1-4748-8c60-886eaca1daf5/1.2/schott-zero-dur-general-may-2013-eng.pdf. [online, dostęp: 13.01.2018].
- [69] J. W. Berthold and S. F. Jacobs. Ultraprecise thermal expansion measurements of seven low expansion materials. *Applied Optics*, 15(10):2344–2347, Oct 1976.
- [70] D. Krause and H. Bach. *Low Thermal Expansion Glass Ceramics*. Schott Series on Glass and Glass Ceramics. Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [71] Andrzej Szwedowski and Ryszard Romaniuk. *Szko optyczne i foniczne*. 1. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Sp. z o.o., 2009.
- [72] ROBAX - strona producenta szkła typu ROBAX. URL <http://www.wegierglass.com.pl/uslugi/szklo-kominkowe/robax-kominkowe-plaskie.html>. [online, dostęp: 13.01.2018].
- [73] ROBAX - strona producenta szkła typu ROBAX. URL <http://robax.pl/dane-techniczne,4.html>. [online, dostęp: 13.01.2018].

- [74] Ralph W. Dietz and Jean M. Bennett. Smoothness and Thermal Stability of Cer-Vit Optical Material. *Applied Optics*, 6(7):1275–1276, Jul 1967.
- [75] Dobrzański Leszek. *Metalowe materiały inżynierskie*. 1. WNT Warszawa, 2004.
- [76] Nickel Development Institute. URL <https://www.nickelinstitute.org/>. [online, dostęp: 08.01.2018].
- [77] German Janusz. Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych. Technical report, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, 2001.
- [78] Janusz German. *Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych: skrypt dla studentów wyższych szkół technicznych*. Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, 2001.
- [79] R Roy, D K Agrawal, and H A McKinstry. Very low thermal expansion coefficient materials. *Annual Review of Materials Science*, 19(1):59–81, 1989.
- [80] J W Berthold, S F Jacobs, and M A Norton. Dimensional stability of fused silica, invar, and several ultra-low thermal expansion materials. *Metrologia*, 13(1):9, 1977.
- [81] Michał Wojtewicz, Krzysztof Nadolny, and Walery Sienicki. Analiza stanu wiedzy i techniki w zakresie szlifowalności stopów na bazie niklu. *Mechanik. Miesięcznik Naukowo-Techniczny*, 9(8):330–339, 2015.
- [82] Zheng Yi-jun Wan Lai, Zhu Neng-hong, Wang Lan-juen, Yang Zheng-hua. Design Characteristics of the 1.56m Astrometric Telescope and its Usage in Astrometry. In H.K. Eichhorn and R.J. Leacock, editor, *Astrometric Techniques, Proceedings of IAU Symposium No. 109*, pages 275–287, Gainesville, 1984.
- [83] Daniel Vukobratovich. *Optomechanical Design Principles*. Handbook of Optomechanical Engineering, Second Edition. CRC Press LLC, 1999.
- [84] G.E. Zurmehly and R.A. Hookman. Thermal/optical test setup for the geostationary operational environmental telescope. In *Precision Engineering and Optomechanics, 33rd Annual Technical Symposium*, volume 1167, page 360, San Diego, 1989.
- [85] P. Yoder and D. Vukobratovich. *Opto-Mechanical Systems Design, Fourth Edition*. Number t. 2 in 1. CRC Press, 2017.
- [86] Chensong Dong. Development of a model for predicting the transverse coefficients of thermal expansion of unidirectional carbon fibre reinforced composites. *Applied Composite Materials*, 15(3):171–182, May 2008.

- [87] Leszek Wawrzyniuk. Athermalization - wykład w ramach przedmiotu: Konstrukcja Przyrządów Optomechanicznych. Technical report, Wydział Mechatroniki Politechniki Warszawskiej, 2010.
- [88] Jeffrey Daiker. Athermalization Techniques in Infrared Systems - instrukcja do ćwiczenia laboratoryjnego. URL <https://wp.optics.arizona.edu/optomech/tutorials-in-optomechanics/>, 2010. [online, dostęp: 05.01.2018].
- [89] Erickson, David J. and Johnston, Roger A. and B. Hull, Anthony. Optimization of the optomechanical interface employing diamond machining in a concurrent engineering environment. In *Proc.SPIE*, volume 10265, pages 10265 – 10265, 1992.
- [90] Hyun Sook Kim, Chang Woo Kim, and Seok Min Hong. Compact mid-wavelength infrared zoom camera with 20:1 zoom range and automatic athermalization. *Optical Engineering*, 41(7):1661, 2002.
- [91] CATIA 3D EXPERIENCE - Dassault Systemes. URL <https://www.3ds.com/products-services/catia/>. [online, dostęp: 21.06.2018].
- [92] 3D SLSSCAN - strona internetowa producenta skanera, firmy PragmaVision Sp. z o.o. URL <http://pragmavision.pl/slscan/>. [online, dostęp: 08.01.2018].
- [93] IntelNUC - strona internetowa producenta mikrokomputerów, firmy Intel. URL <https://www.intel.pl/content/www/pl/pl/products/boards-kits/nuc.html>. [online, dostęp: 18.01.2018].
- [94] Modules Tams and Marc Hodes. On One-Dimensional Analysis of Thermoelectric. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 28(2):218–229, 2005.
- [95] S.C. Quarre. Thermally efficient CCD camera housing, October 9 2007. US Patent 7,278,268.
- [96] Thermoelectric Cooled Camera - VP Series|Area Scan Camera|Vieworks. URL <http://www.vieworks.com/eng/product.html?pid=32>. [online, dostęp: 15.12.2018].
- [97] Flir Exx series datasheet. URL http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography_USA/Products/Product_Literature/flir-e-series-datasheet.pdf.
- [98] Christian Bräuer-Burchardt, Peter Kühmstedt, and Gunther Notni. Error compensation by sensor re-calibration in fringe projection based optical 3D stereo scanners. *Lecture*

Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 6979 LNCS(PART 2):363–373, 2011.

- [99] ViScan głowica optyczna - strona producenta. URL <https://www.zeiss.com/metrology/products/sensors/viscan.html>. [online, dostęp: 13.01.2018].
- [100] Tadeusz Chmielewski. *Metoda przemieszczeń i podstawy MES Obliczenia w środowisku MatLab*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2016.
- [101] Flir Grasshopper 2 GigE vision datasheet. URL <https://www.ptgrey.com/support/downloads/10309>.
- [102] Photogrammetry I Course - zapis cyfrowy cyklu wykładów prof. dr cyrilla stachnissa z university of bonn, 2015 bonn. URL https://www.youtube.com/watch?v=_mOG_lpPnpY&list=PLgnQpQtFTOGRsi5vzy9PiQpNWHjq-bKN1. [online, dostęp: 04.11.2017].
- [103] Camera Calibration and 3D Reconstruction - opencv 2.4.13.5 documentation. URL <https://www.iso.org/standard/54522.html>. [online, dostęp: 05.01.2018].
- [104] What Is Camera Calibration? - mathworks, matlab documentation. URL <https://www.mathworks.com/help/vision/ug/camera-calibration.html?requestedDomain=true>. [online, dostęp: 05.01.2018].
- [105] Zhengyou Zhang. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11):1330–1334, Nov 2000.
- [106] UI-6280SE-C-HQ Rev.3. URL <https://www.1stvision.com/cameras/IDS/dataman/UI-6280SE-C-HQ%20Rev.3.pdf>.
- [107] Mechanikus Gottlieb KERN - strona producenta. URL <https://www.kern-sohn.com/shop/en/optical-instruments/>. [online, dostęp: 23.05.2018].
- [108] G Bönsch and E Potulski. Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlén's formulae. *Metrologia*, 35(2):133, 1998.
- [109] Kruth, J-P and Zhou, L and Vanherck, P. Behaviour And Accuracy Specification - Study On An LED-CMOS Camera 3D Measuring System. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 44:10, 2003.
- [110] Ogniwo Peltiera TEC1 - 12706 12V/6A. URL <https://botland.com.pl/ogniwa-peltiera/2613-ogniwo-peltiera-tec1-12706-12v-6a.html>. [online, dostęp: 30.07.2018].

- [111] Werner P.O. Jüptner Ricardo Legarda-Sáenz, Thorsten Bothe. Accurate procedure for the calibration of a structured light system. *Optical Engineering*, 43:43 – 43 – 8, 2004.
- [112] Hafeez Anwar, Irfanud Din, and Kang Park. Projector calibration for 3d scanning using virtual target images. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13(1):125–131, Jan 2012.
- [113] 3Ds MAX| Oprogramowanie do animacji, wizualizacji, renderowania i modelowania 3D| Autodesk . URL <https://www.autodesk.pl/products/3ds-max/overview>. [online, dostęp: 21.06.2018].
- [114] Basic mechanic elements - Bosch Rexroth AG - katalog on-line elementów złącznych. URL <https://www.boschrexroth.com/en/xc/products/product-groups/assembly-technology/basic-mechanic-elements>. [online, dostęp: 21.06.2018].
- [115] Factory Automation/Machine Vision- Fixed Focal. URL <http://www.fujifilmusa.com/shared/bin/1.5Mega-Pixel%202.3%201.2.pdf>.
- [116] ML750|OPTOMA USA . URL <https://www.optoma.com/us/product/ml750/>. [online, dostęp: 21.06.2018].
- [117] ZEISS ViScan - 2D OpticalProbe - strona producenta . URL <https://www.zeiss.com/metrology/products/sensors/on-cmm/optical-sensors-cmm/viscan.html>. [online, dostęp: 21.06.2018].
- [118] 8MT160-300 - Motorized Delay Line. URL http://www.standa.lt/products/catalog/motorised_positioners?item=61&prod=motorized_delay_line&print=1.
- [119] 8MR151 - Motorized Rotation Stages. URL http://www.standa.lt/products/catalog/motorised_positioners?item=9&prod=motorized_rotation_stages&print=1.
- [120] Rui Chen, Jing Xu, Heping Chen, Jianhua Su, Zonghua Zhang, and Ken Chen. Accurate calibration method for camera and projector in fringe patterns measurement system. *Appl. Opt.*, 55(16):4293–4300, Jun 2016.
- [121] Creating Rigid Virtual Part - dokumentacja oprogramowania Catia V5 online. URL http://catiadoc.free.fr/online/estug_C2/estugbt0701.htm. [online, dostęp: 21.06.2018].

- [122] MATLAB - MathWorks - MATLAB & Simulink. URL <https://uk.mathworks.com/products/matlab.html>. [online, dostęp: 21.06.2018].
- [123] polyfitn - Polynomial modelling in 1 or n dimensions. URL <https://uk.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/34765-polyfitn>. [online, dostęp: 21.06.2018].
- [124] MultiCon CMC-99 - simex.pl - strona produktu MultiCon CMC-99. URL <https://www.simex.pl/produkt/1285>. [online, dostęp: 21.06.2018].
- [125] Raspberry Pi 3 Model B - Raspberry Pi. URL <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>. [online, dostęp: 03.07.2018].
- [126] Arduino Based Camera. URL <http://www.arducam.com/>. [online, dostęp: 03.07.2018].
- [127] New 8-megapixel camera board on sale at 25\$ - Raspberry Pi. URL <https://www.raspberrypi.org/blog/new-8-megapixel-camera-board-sale-25/>. [online, dostęp: 03.07.2018].
- [128] Standard C-mount. URL <http://www.avicon.pl/en/c-mount-standard-industrial-cameras.html/>. [online, dostęp: 16.07.2018].
- [129] IMX219PQI Sony Semiconductor Solutions. URL https://www.sony-semicon.co.jp/products_en/new_pro/april_2014/imx219_e.html/. [online, dostęp: 19.07.2018].
- [130] D. Halliday, J. Walker, and R. Resnick. *Podstawy fizyki*. Number t. 1-5 in 1. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2015.
- [131] 3lcd. URL <http://www.3lcd.com/>. [online, dostęp: 10.10.2018].
- [132] Analog, Embedded Processing, Semiconductor Company, Texas Instruments - TI.com. URL <http://www.ti.com>. [online, dostęp: 03.10.2018].
- [133] Dlp1cr4500evm dlp lightcrafter 4500 | ti.com. URL <http://www.ti.com/tool/dlp1cr4500evm>. [online, dostęp: 21.11.2018].
- [134] Xj-a252 - slim projectors | casio usa. URL <https://www.casio.com/products/projectors/slim-projectors/xj-a252>. [online, dostęp: 21.11.2018].

- [135] Micron3d green - smarttech 3d optyczne systemy pomiarowe i drukarki 3d. URL <http://www.smarttech.pl/skanery-3d/dla-przemyslu/micron3d/>. Strona internetowa producenta skanerów 3D światła strukturalnego firmy Smarttech3D sp. z o.o., opisująca skaner MICRON3D green. [online, dostęp: 05.01.2018].
- [136] Apply geometric transofmration to image - MATLAB imwarp- MathWorks United Kingdom. URL <https://uk.mathworks.com/help/images/ref/imwarp.html>. [online, dostęp: 08.12.2018].
- [137] Grasshopper 2.0 Mp Mono FireWire 1394b (Sony ICX274). URL <https://www.ptgrey.com/grasshopper-2mp-mono-firewire-1394b-sony-icx274-camera>. [online, dostęp: 03.09.2018].
- [138] XJ-A256 - Green Slim Models - Projectors - CASIO. URL http://arch.casio-intl.com/asia-mea/en/projector/greenslim/xj_a256/. [online, dostęp: 03.09.2018].
- [139] ROMER Sigma 2018 - broszura infromacyjna. URL https://w3.leica-geosystems.com/downloads123/hxmt/romer/romer-sigma/brochures/ROMER%20Sigma_en.pdf. [online, dostęp: 03.09.2018].