

Dr hab. inż. Krzysztof Walczak, prof. nadzw. UEP
Katedra Technologii Informatycznych
Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu
al. Niepodległości 10, 61-875 Poznań
tel.: +48 61 639-2712
walczak@kti.ue.poznan.pl
<http://www.kti.ue.poznan.pl/walczak>

Poznań, 2018-05-17

Recenzja
rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Macieja Karaszewskiego
pt. „Automated system for high resolution 3D shape digitization”
wykonanej pod kierunkiem
dr. hab. inż. Roberta Sitnika, prof. Politechniki Warszawskiej

Zagadnienie naukowe rozpatrywane w rozprawie

Problematyka badawcza rozprawy doktorskiej mgr. inż. Macieja Karaszewskiego dotyczy bardzo ważnej i aktualnej tematyki w dziedzinie metrologii, a mianowicie metod automatycznego pozyskiwania wysokiej rozdzielczości i wysokiej jakości trójwymiarowych modeli rzeczywistych obiektów – z uwzględnieniem zarówno ich kształtu jak i tekstury powierzchni.

Obecnie coraz powszechniej korzystamy z trójwymiarowych modeli obiektów, które mogą służyć do interaktywnej prezentacji rzeczywistych obiektów (np. w obszarach dziedzictwa kulturowego, handlu elektronicznego lub marketingu), do budowy syntetycznych środowisk (np. przy produkcji gier komputerowych lub filmów) oraz do tworzenia fizycznych kopii obiektów za pomocą drukarek 3D. We wszystkich tych zastosowaniach punktem wyjścia są wysokiej jakości modele rzeczywistych obiektów.

Istnieje wiele technik pozwalających na pozyskiwanie trójwymiarowych modeli rzeczywistych obiektów. Zalicza się do nich techniki kontaktowe (mechaniczne) i bezkontaktowe, takie jak pomiar czasu przelotu światła (ang. *time of flight*), triangulacyjne z użyciem lasera oraz techniki z użyciem światła strukturalnego. Ze względu na swoją specyfikę różne metody znajdują zastosowanie w różnych obszarach. Techniki kontaktowe najlepiej sprawdzają się przy dokładnym pomiarze niewielkiej liczby punktów (np. w celu weryfikacji dokładności produkcji), techniki mierzące czas przelotu światła dobrze sprawdzają się przy pomiarze dużych obiektów, np. architektonicznych lub przyrodniczych, techniki triangulacyjne z użyciem lasera dobrze sprawdzają się zarówno dla dużych, jak i mniejszych obiektów, ale nie dostarczają informacji o kolorze i teksturze powierzchni, podczas gdy techniki z użyciem światła strukturalnego dobrze sprawdzają się dla niewielkich obiektów – dostarczając wysokiej rozdzielczości dane dotyczące zarówno kształtu, jak i tekstury skanowanej powierzchni.

Nie wszystkie metody skanowania mogą być stosowane we wszystkich przypadkach. W obszarze głównego zainteresowania mgr. inż. Macieja Karaszewskiego znajdują się obiekty dziedzictwa kulturowego, w przypadku których skanowanie za pomocą technik

mechanicznych i laserowych nie jest możliwe ze względów konserwatorskich. W tym zastosowaniu metodą dającą najlepsze wyniki jest skanowanie z użyciem światła strukturalnego. Jednak ta technika ma również istotne wady, do których można zaliczyć dużą pracochłonność i czasochłonność procesu cyfryzacji oraz brak powtarzalności ze względu na wpływ operatora na proces skanowania.

Bardzo istotne są zatem próby opracowania metod cyfryzacji obiektów z użyciem światła strukturalnego, które pozwalałyby na skrócenie czasu i pracochłonności procesu skanowania, a w konsekwencji kosztu skanowania, przy jednoczesnym zwiększeniu rozdzielczości i powtarzalności procesu skanowania. Właśnie tym problemem w swojej pracy doktorskiej zajął się mgr inż. Maciej Karaszewski proponując metodę, która pozwala na automatyczne skanowanie z użyciem robota skanującego i skanera światła strukturalnego obiektów fizycznych o nieznanym kształcie, czyli nieposiadających jeszcze modeli 3D.

Rozpatrywane zagadnienie jest ważnym problemem naukowym w dziedzinie **budowy i eksploatacji maszyn**, ale praktyczne zastosowania rozwiązań tego problemu daleko wykraczają poza tę dziedzinę, obejmując szeroko rozumiane procesy cyfryzacji obiektów materialnych, stosowane w szczególności w obszarze konserwacji i prezentacji dziedzictwa kulturowego.

Zaproponowane w rozprawie rozwiązanie rozpatrywanego zagadnienia naukowego

W swojej rozprawie mgr inż. Maciej Karaszewski przedstawił nową metodę skanowania obiektów o nieznanym kształcie. Metoda ta polega na dwuetapowym skanowaniu za pomocą skanera 3D o nowej konstrukcji, w którym zastosowano zaproponowane przez mgr. inż. Macieja Karaszewskiego rozwiązania, w tym specjalną głowicę pomiarową, nową metodę kalibracji, algorytm kinematyki odwrotnej, algorytm unikania kolizji oraz – przede wszystkim – nowy dwuetapowy algorytm NBV (ang. *Next Best View*).

Zaproponowana przez mgr. inż. Macieja Karaszewskiego konstrukcja głowicy skanującej wyróżnia się przede wszystkim użyciem dwóch różnych kamer, które pozwalają na wykonywanie pomiarów w różnych objętościach pomiarowych i z różną rozdzielczością przestrzenną. Taka konstrukcja głowicy umożliwia automatyzację dwuetapowego procesu skanowania, bez potrzeby zmiany głowicy lub jej ustawień.

Nowa metoda kalibracji polega na użyciu wzorca o specyficznej budowie – trójkąta z trzema kulami o różnych rozmiarach i kolorach. O ile zastosowanie tego wzorca pozwala na istotną poprawę dokładności kalibracji w stosunku do wcześniej stosowanych wzorców, zaproponowana metoda kalibracji nie cechuje się zasadniczą nowością w stosunku do metod używanych w innych urządzeniach pomiarowych. Należy ją zatem traktować jako praktyczną innowację, a nie istotny wynik naukowy.

Opracowany przez mgr. inż. Macieja Karaszewskiego algorytm kinematyki odwrotnej (IK) ma na celu minimalizację ruchu ramienia robota, przy jednoczesnej maksymalizacji ruchu obrotowego stolika, na którym jest umieszczony skanowany obiekt. Taka konstrukcja algorytmu IK minimalizuje prawdopodobieństwo kolizji między głowicą skanującą i obiektem, skraca drogę przebytą przez głowicę, redukuje czas potrzebny na skanowanie oraz zmniejsza mechaniczne zużycie robota i zużycie energii elektrycznej.

Zaproponowany przez mgr. inż. Macieja Karaszewskiego nowy algorytm określania trajektorii głowicy z unikaniem kolizji pozwala na wykonywanie serii prób omięcia punktu kolizji

zamiast odrzucenia całej trajektorii powodującej kolizję. Ma to niewątpliwy wpływ na zwiększenie efektywności procesu skanowania.

Za najważniejsze opisane w rozprawie osiągnięcie naukowe mgr. inż. Macieja Karaszewskiego należy uznać nowy dwuetapowy algorytm NBV (ang. *Next Best View*). W zaproponowanym podejściu, w pierwszym etapie skanowania jest tworzony zgrubny trójwymiarowy model obiektu, który w drugim etapie służy do określenia sekwencji widoków pomiarowych dla skanowania dokładnego. Na etapie dokładnego skanowania mgr. inż. Maciej Karaszewski uwzględnił takie elementy funkcjonalne, jak zmiana kąta ustawienia głowicy oraz wykrywanie przesłaniania i korektę wektora obserwacji. Istotną cechą zaproponowanego algorytmu NBV jest możliwość szeregowania poszczególnych widoków pomiarowych na podstawie wektorów normalnych skanowanej powierzchni. Dzięki temu można uszeregować widoki pomiarowe minimalizując obroty stolika, ścieżkę ruchu głowicy lub występowanie kolizji, wpływając na efektywność procesu skanowania.

Zaproponowana przez mgr. inż. Macieja Karaszewskiego metoda automatycznego skanowania obiektów o nieznanym kształcie została zaimplementowana w postaci prototypu o nazwie HD3D|AUTO i poddana weryfikacji empirycznej. Wykonane pomiary wskazują na to, że zaproponowana metoda jest znacząco bardziej efektywna niż metoda używana we wcześniejszym systemie 3DMADMAC|AUTOMATED. Uwzględnione w ocenie parametry to liczba wykonanych skanów, pokrycie powierzchni oraz czas skanowania. Zwiększona efektywność zaproponowanej metody jest zwłaszcza widoczna w przypadku obiektów o skomplikowanych kształtach, dla których dodatkowy czas potrzebny na wstępne skanowanie ma mniejsze znaczenie wobec istotnego skrócenia czasu skanowania dokładnego.

Podsumowując tę część opinii uważam, że mgr. inż. Maciej Karaszewski rozwiązał postawiony problem naukowy proponując nową metodę automatycznego skanowania obiektów trójwymiarowych o nieznanym kształcie i zweryfikował jej działanie wykonując szereg pomiarów testowych.

Oryginalność zaproponowanego przez autora zagadnienia naukowego

Zaproponowane przez mgr. inż. Macieja Karaszewskiego podejście do automatycznego skanowania obiektów fizycznych o nieznanym kształcie oceniam jako wysoce oryginalne. Potwierdzeniem oryginalności zaproponowanego podejścia jest seria artykułów naukowych opisujących poszczególne jego elementy. W rozprawie zacytowano 8 współautorskich artykułów naukowych mgr. inż. Macieja Karaszewskiego, w tym 3 opublikowane w czasopiśmie posiadającym współczynnik wpływu (ang. *Impact Factor*).

Charakter rozprawy

Rozprawa mgr. inż. Macieja Karaszewskiego ma charakter praktyczny. Dotyczy to zarówno rozdziału 4, który zawiera opis zaproponowanego przez mgr. inż. Macieja Karaszewskiego podejścia, jak i rozdziału 5, który stanowi ewaluację tego podejścia. Podejście opisane w rozdziale 4 posłużyło do budowy działającego systemu HD3D|AUTO. Natomiast w rozdziale 5 przedstawiono pogłębioną ewaluację systemu HD3D|AUTO na trzech przykładowych obiektach muzealnych i trzech obiektach mechanicznych. Przedstawiono również symulowane porównanie wybranych parametrów procesu cyfryzacji za pomocą systemu HD3D|AUTO z cyfryzacją wykonywaną przez doświadczonego operatora. Możliwość

praktycznego zastosowania i pozytywna weryfikacja otrzymanych wyników badań naukowych na rzeczywistych przykładach stanowi potwierdzenie ich autentycznej wartości.

Analiza literatury i stanu wiedzy w rozpatrywanej dziedzinie

Rozprawa świadczy o głębokiej i aktualnej wiedzy mgr. inż. Macieja Karaszewskiego w dziedzinie technik pozyskiwania trójwymiarowych modeli obiektów rzeczywistych, w tym technik automatycznych. Rozdział 2 rozprawy stanowi przegląd istniejących systemów automatycznej cyfryzacji obiektów trójwymiarowych, w podziale na systemy komercyjne oraz systemy badawcze. Mgr inż. Maciej Karaszewski przeanalizował i opisał działanie 13 różnych systemów. Natomiast w rozdziale 3 opisał szczegółowo techniki skanowania oraz poszczególne komponenty systemów skanowania 3D, ze szczególnym uwzględnieniem bezdotykowych głowic skanujących, systemów pozycjonujących oraz metod określania widoków pomiarowych (algorytmów NBV). W bibliografii przytoczono aż 238 pozycji (pomijając współautorskie prace mgr. inż. Macieja Karaszewskiego).

Umiejętność autora samodzielnego prowadzenia badań naukowych

Mgr inż. Maciej Karaszewski podczas prowadzenia prac naukowych nad systemem automatycznego skanowania obiektów 3D pracował w zespole naukowym, który opracował i wdrożył do praktycznego użycia szereg prototypów zaawansowanych automatycznych systemów skanujących. Trudno jest oczekiwać, żeby można było tak zaawansowane wyniki naukowe i wdrożeniowe osiągnąć samodzielnie. Na pozytywne podkreślenie zasługuje jednak fakt, że mgr inż. Maciej Karaszewski w swojej rozprawie wyraźnie wskazał komponenty, które są jego autorstwa, tj. opracowanie nowej głowicy skanującej, nową metodę kalibracji, algorytm kinematyki odwrotnej, algorytm wyznaczania trajektorii z unikaniem kolizji oraz algorytm NBV. Mgr inż. Maciej Karaszewski przedstawił również porównanie systemu skanującego przed i po wprowadzeniu tych zmian.

12 artykułów Autora znajduje się w prestiżowej bazie danych Web of Science i zostały one zacytowane 47 razy dając sumaryczny indeks Hirscha = 3. W rozprawie mgr inż. Maciej Karaszewski powołał się na 8 swoich współautorskich artykułów naukowych, w tym 3 opublikowanych w czasopismach posiadających współczynnik wpływu (tzw. *Impact Factor*). Na uwagę zasługuje fakt, że w 6 spośród tych publikacji (również artykułu w prestiżowym czasopiśmie *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, IF (2016) = 6.387, 45 punktów MNiSW) mgr inż. Maciej Karaszewski jest pierwszym autorem. Świadczy to o jego kluczowej roli w opracowaniu prezentowanego podejścia.

Poprawność językowa i redakcyjna

Rozprawa jest napisana w języku angielskim, a styl wypowiedzi jest zasadniczo dobry i zrozumiały. Zdarzają się jednak w rozprawie dość częste błędy gramatyczne (np. „*digitization of objects which does not have*” i interpunkcyjne (np. częsty brak przecinka przed słowem „*but*”). W tekstach naukowych lepiej jest również nie używać formy gramatycznej pierwszej osoby (np. „*I wanted*”, „*I was*”). Użycie tej formy w rozprawie jest jednak o tyle uzasadnione, że mgr inż. Maciej Karaszewski w ten sposób wskazywał na elementy, które opracował samodzielnie pracując jednocześnie w zespole naukowym.

Wady i słabe strony rozprawy

Przedstawiona rozprawa jest dobrze i przekonująco napisana, wykazuje wysokie kompetencje mgr. inż. Macieja Karaszewskiego w dziedzinie skanowania 3D, a przedstawione wyniki eksperymentów wskazują na dużą wartość osiągniętych wyników. Praca ma jednak również pewne wady i słabe strony.

1) Teza sformułowana w rozprawie brzmi następująco:

The claim of this research is that automated 3D digitization system will make it possible to obtain high resolution 3D models of objects, simultaneously lowering cost, shortening time of such process and eliminating influence of operator on measurement result.

Użycie określenia „high resolution” wskazuje na to, że otrzymywane modele są wysokiej rozdzielczości. Rozdzielczość jest ważna, ale ważniejsza jest dokładność pomiarów. Mgr inż. Maciej Karaszewski nie wskazuje w rozprawie jednoznacznie na ile dokładne są pomiary osiągnięte za pomocą zaproponowanej metody pomiarowej.

Kolejny element tezy wskazuje na to, że koszt cyfryzacji obiektów jest niższy. O ile intuicyjnie można się z tym zgodzić, zabrakło mi w pracy przynajmniej próby analizy kosztów cyfryzacji. Na takie koszty składają się różne elementy, w tym koszt zakupu i utrzymania aparatury, koszt pracy ekspertów i pracowników technicznych, koszt transportu (obiektów lub skanera) oraz koszt ubezpieczenia.

Pewne wątpliwości budzi również stwierdzenie mówiące o eliminacji wpływu operatora na wynik pomiaru. Pełna automatyzacja rzeczywiście ten wpływ eliminuje. Jednak – po pierwsze – w zaproponowanej w rozprawie metodzie skanowania operator może ustawiać wiele parametrów wpływających na proces skanowania. To powoduje, że ten wpływ występuje, choć (co jak sądzę było intencją mgr. inż. Macieja Karaszewskiego) występuje tu powtarzalność tego wpływu. Po drugie, eliminacja wpływu operatora nie oznacza jeszcze obiektywizacji pomiaru, ponieważ występuje wpływ metody pomiarowej i wpływ danego egzemplarza urządzenia pomiarowego.

- 2) Mgr inż. Maciej Karaszewski w swojej rozprawie opisuje szereg istniejących urządzeń pomiarowych. Jest to cenna część rozprawy, gdyż pozwala na poznanie stanu wiedzy w tej dziedzinie, umożliwia odniesienie opisanych w rozprawie wyników do istniejących urządzeń oraz wykazuje kompetencje Autora w tej dziedzinie. Jednak w kilku przypadkach mgr inż. Maciej Karaszewski wskazuje na brak kluczowych informacji. Dla przykładu w sekcji 2.1.1 brakuje informacji, czy skaner LaserDesign Rexcan DS3 przechwytuje informację o kolorze powierzchni. Tego typu dane wydają się nietrudne do zdobycia, a zamieszczenie ich w rozprawie znacząco podniosłoby jej wartość.
- 3) W niektórych fragmentach rozprawa nie dość precyzyjnie wskazuje na to, co jest osiągnięciem przedstawionym w rozprawie jako nowy wynik naukowy, a co jest osiągnięciem mgr. inż. Macieja Karaszewskiego dokonany w zespole podczas pracy nad wcześniejszymi wersjami systemu skanującego (np. opis modułu IK na stronie 81).
- 4) Pewne wątpliwości budzi możliwość pełnej automatyzacji procesu skanowania w powiązaniu z wymogiem bezkolizyjności. O ile pomijając ew. błędy skanowania ostrych wystających elementów w pierwszej fazie, bezkolizyjność drugiej fazy jest do uzyskania, to bezkolizyjność pierwszej fazy wymaga jednak od operatora prawidłowego ustawienia i nadzorowania tego procesu. W sekcji 4.2.5.1 mgr inż. Maciej Karaszewski twierdzi, że w przypadku „typowych obiektów” do skanowania w pierwszej fazie można użyć

predefiniowany zbiór pozycji skanowania. Dla nietypowych obiektów ten zbiór musi być zmieniony, co wyklucza pełną automatyzację (np. o charakterze masowym).

- 5) Metoda wykrywania przesłania opisana w sekcji 4.2.5.2.2 wydaje się być raczej pragmatycznym uproszczeniem niż ogólnym rozwiązaniem problemu. Mogą być przecież punkty, które leżą między powierzchniami P_{near} i P_{far} , i które przesłaniają inne punkty skanowanej powierzchni.
- 6) Podana przez mgr. inż. Macieja Karaszewskiego wartość optymalnej rozdzielczości skanowania obiektów dziedzictwa kulturowego na poziomie 2500 punktów/mm², do której często się odnosi w rozprawie, jest dyskusyjna. Po pierwsze optymalna rozdzielczość zależy od cech i wielkości obiektu oraz sposobu korzystania z modelu cyfrowego. Po drugie, z modelu o większej rozdzielczości zawsze można utworzyć model o mniejszej rozdzielczości.
- 7) W rozprawie zdarzają się niedociągnięcia o charakterze technicznym na poziomie przygotowania tekstu do druku, takie jak niepoprawne wyrównywanie tekstu i pomyłki w odsyłaczach do rysunków. Pięciopozomowy system numerowania nagłówków utrudnia miejscami zrozumienie struktury tekstu. Elementy te jednak nie zaburzają istotnie ogólnie pozytywnego wrażenia, które robi rozprawa.

Przedstawione powyżej uwagi mają jedynie charakter dyskusyjny i nie zmniejszają mojej bardzo wysokiej oceny wyników naukowych osiągniętych przez mgr. inż. Macieja Karaszewskiego.

Konkluzja

Biorąc pod uwagę istotność i aktualność tematyki doktoratu, osiągnięte wyniki badawcze oraz ich duże znaczenie praktyczne stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Macieja Karaszewskiego **spełnia wymagania obowiązującej ustawy o stopniach i tytule naukowym** i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony. Natomiast na podstawie samej rozprawy, jak i znaczących publikacji Autora, w tym w prestiżowych czasopismach, wnioskuję o jej **wyróżnienie**.