

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Jana Klimaszewskiego
„Metoda samokalibracji układu kamer: wizyjnej i termowizyjnej na podstawie
dopasowania obrazów”**

przygotowana na zlecenie Pani Dziekan Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej,
działającej na podstawie uchwały Rady Wydziału z dnia 25. 06. 2019.

PROBLEMATYKA PRACY

Fuzja informacji z różnych źródeł, stanowiąca podstawę działania systemów decyzyjnych, ma duże znaczenie w zastosowaniach układów wizyjnych. Jest to motywowane redukcją niepewności wynikającej z niedoskonałości sensorów, jak też z wpływu otoczenia, m. in. warunków oświetlenia, przysłonięcia, czy znacznego wzajemnego podobieństwa rozpoznawanych obiektów. Do ważnych i często stosowanych technik należy łączenie obrazów z kamer wizyjnych i termowizyjnych, a doskonalenie związanych z tym algorytmów wychodzi naprzeciw konkretnym zastosowaniom, rozszerzając jednocześnie potencjał badawczy w aspekcie nowych rozwiązań z wielospektralnymi kanałami informacji 2D.

Zagadnieniem szczególnie ważnym w systemach wizyjnych jest ich kalibracja, czyli wyznaczenie wartości parametrów opisujących przekształcenia z układu odniesienia sceny do układów odniesienia obrazów. Autor opiniowanej rozprawy zaproponował i praktycznie zweryfikował nowy sposób automatycznej kalibracji (samokalibracji) układu złożonego z dwóch kamer dalekiego zasięgu, wizyjnej i termowizyjnej, zainstalowanych w zestawie przeciwlotniczym Poprad. Klasyczne podejście z użyciem wzorca kalibracyjnego jest w tym przypadku praktycznie niemożliwe. Podstawę rozwiązania stanowi dopasowywanie obrazów z sekwencji rejestrowanych w trakcie przemieszczania się układu sensorów względem obserwowanej sceny, z wykorzystaniem oryginalnego ujęcia metody korelacji fazowej, bazującej na transformacji Fouriera. Kalibracja ukierunkowana na zastosowanie w przemyśle obronnym została z powodzeniem przebadana na ogólnodostępnej bazie scen w ruchu drogowym, co wskazuje na jej potencjalną przydatność także w sterowaniu pojazdami autonomicznymi.

Tematyka pracy jest ważna i aktualna oraz mieści się w obszarze **automatyki i robotyki**.

UKŁAD PRACY

Rozprawa licząca 153 strony składa się z sześciu rozdziałów oraz z wykazu oznaczeń i bibliografii.

Rozdział 1 „Wprowadzenie” przedstawia opis problemu, sformułowanie ograniczeń i tezę pracy oraz zwięzły przegląd jej zawartości.

Najważniejsze ograniczenia wiążą się z: (i) przeznaczeniem opracowanej metody dla obrotowej głowicy optoelektronicznej z wysokiej jakości kamerami dalekiego zasięgu, dostarczającymi obrazy bez zniekształceń optycznych; (ii) przetwarzaniem obrazów

w warunkach poligonowych; (iii) koniecznością dokonywania fuzji obrazów w celu prezentacji wynikowego obrazu operatorowi; (iv) jednostką obliczeniową dedykowaną do wykonywania zadania systemu wizyjnego.

Teza pracy jest następująca: *„Możliwa jest samokalibracja układu kamer: wizyjnej i termowizyjnej na podstawie automatycznego dopasowania obrazów z tych kamer, wyznaczonego z wykorzystaniem metody korelacji fazowej dla wielu obiektów jednocześnie widocznych na tych obrazach.*

W rozdziale 2 „Przegląd metod kalibracji układu dwóch kamer” scharakteryzowano znane metody i na tej podstawie sformułowano następujące wnioski ukierunkowujące przedstawione w rozprawie badania: (a) niemożność wykorzystania wzorca kalibracyjnego wymaga skupienia się na ogólniejszych metodach, wymagających większego nakładu obliczeń i mniej odpornych na błędy wyznaczenia cech wykorzystywanych do estymacji parametrów układu kamer; (b) w celu zwiększenia odporności zasadne jest stosowanie estymacji tylko wybranych parametrów układu kamer, koniecznych do poprawnego działania przyjętej aplikacji systemu wizyjnego; (c) w celu uproszczenia rozwiązania zadania identyfikacji parametrów wskazana jest dekompozycja metody na podzadania; (d) należy wyznaczać kluczowe zależności między szeregiem obrazów w sekwencji; (e) estymacja parametrów układu kamer wizyjnej i termowizyjnej wymaga odnajdywania na ich obrazach odpowiadających sobie obiektów.

Problematyce zasygnalizowanej w punkcie (e) poświęcono rozdział 3 „Przegląd metod automatycznego dopasowania obrazów”. Trudności dopasowania obrazów wizyjnych i termowizyjnych wiążą się ze znacznymi różnicami ich kontrastu oraz dużymi zakresami wartości parametrów dopasowania. Wśród algorytmów na szczególną uwagę zasługują metody korelacji fazowej, które bazują na obliczeniach w dziedzinie częstotliwości na podstawie transformacji Fouriera i nie wymagają bezpośredniego wykrywania cech obserwowanych obiektów. Znane są różne podejścia dotyczące oceny jakości dopasowania tą metodą. Standardowo wykorzystuje się wysokość znalezionej maksimum w macierzy korelacji fazowej wyznaczonej przez odwrotną transformację Fouriera.

Rozdział 4 „Opracowana metoda samokalibracji układu kamer: wizyjnej i termowizyjnej” stanowi najważniejszą część rozprawy. Opisuje sposób zrealizowania jej celu z uwzględnieniem sformułowanych w rozdziale 1 ograniczeń. Przedstawiono teoretyczne i algorytmiczne aspekty opracowanej metody. Pokazano, że kalibrację można podzielić na dwa etapy: (1) wyznaczenie parametrów skali obrazu termowizyjnego względem wizyjnego, (2) wyznaczenie parametrów opisujących zależność wiążącą dopasowanie odpowiadających sobie punktów obrazu wizyjnego i przeskalowanego obrazu termowizyjnego w osi X i w osi Y, nazwaną linią dopasowania. Estymacja w etapie pierwszym odbywa się na podstawie automatycznego dopasowania w trybie kalibracji obrazów z chwili bieżącej do obrazów z chwili poprzedniej, niezależnie dla kamery wizyjnej i termowizyjnej (dopasowanie jednomodalne). W etapie drugim następuje automatyczne dopasowanie w trybie kalibracji odpowiadających sobie obiektów z obrazów wizyjnego i termowizyjnego (dopasowanie dwumodalne). Przedstawiono opracowaną metodę wraz z uzasadnieniem wykorzystania korelacji fazowej do wyznaczenia dopasowania dla wielu obiektów jednocześnie widocznych na obrazach z obu kamer. Wyznaczanie dopasowania poprzedza filtracja krawędziowa obrazów wizyjnego i termowizyjnego. Zaproponowana metoda kalibracji wykorzystuje zalety metody korelacji fazowej (szybkość działania oraz odporność na jednorodne zmiany intensywności pomiędzy dopasowywanymi obrazami). W znanych zastosowaniach metody korelacji fazowej w zakresie dopasowania obrazów multimodalnych wyznaczana jest tylko

jedna wartość dopasowania. Zastosowane w pracy wyznaczenie wielu wartości dopasowania dla jednej pary obrazów poprawia jakość kalibracji.

W rozdziale 5 „Przeprowadzone badania” opisano wyniki działania metody kalibracji zaprojektowanej dla potrzeb przemysłu obronnego. Opracowane podstawy teoretyczne i analizy zweryfikowano w warunkach laboratoryjnych, a następnie zaimplementowano na dedykowanym komputerze mobilnym Jetson TK1 i przetestowano działanie metody w warunkach zbliżonych do poligonowych na głowicy zestawu przeciwlotniczego Poprad. Opisano stanowisko badawcze oraz przygotowane zestawy par obrazów wizyjnych i termowizyjnych odpowiadających sobie pod względem czasu akwizycji. Eksperymenty przeprowadzono także na ogólnodostępnej bazie obrazów KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology), dotyczącej ruchu drogowego. Potwierdzono skuteczność metody i przedstawiono warunki jej stosowania w zakresie obserwowanych scen. Zarówno dla zbioru sekwencji testowych Poprad, jak i dla bazy danych KAIST zastosowanie korelacji fazowej do wyznaczania dopasowania dla wielu obiektów jednocześnie widocznych na obrazach wizyjnym i termowizyjnym pozwoliło poprawić dokładność działania zaproponowanej metody w stosunku do klasycznie wykorzystywanego dopasowania dla jednego obiektu. Przeprowadzone testy dla bazy KAIST, gdzie układ kamer i ich wykorzystanie nie spełniają przyjętych w rozprawie założeń, pokazały, że opracowana metoda automatycznej kalibracji ma charakter ogólniejszy i może także znaleźć zastosowanie do multimodalnego układu kamer samochodu autonomicznego.

Pozostałą część rozprawy stanowi zwięzłe podsumowanie (rozdział 6) wskazujące najważniejsze osiągnięcia pracy i kierunki jej kontynuacji oraz wyczerpujący spis literatury obejmujący 176 reprezentatywnych pozycji.

OCENA PRACY

Praca dotyczy aktualnych i ważnych problemów automatycznej kalibracji wielomodalnych układów kamer oraz fuzji obrazów w takich układach.

Główne osiągnięcia Autora polegają na:

1. Wykazaniu, że kalibrację układu kamer wizyjnej i termowizyjnej dalekiego zasięgu można podzielić na dwa etapy: (I) ustalenie parametrów skali obrazu termowizyjnego względem wizyjnego oraz (II) ustalenie liniowej zależności wiążącej parametry dopasowania odpowiadających sobie obiektów obrazu wizyjnego i termowizyjnego.
2. Oparciu estymacji parametrów układu kamer w trakcie kalibracji na automatycznym dopasowaniu obrazów w sekwencji wideo.
3. Przedstawieniu sposobu wykorzystania metody korelacji fazowej do wyznaczenia wartości dopasowania dla wielu obiektów jednocześnie widocznych na obrazach z kamery wizyjnej i termowizyjnej.
4. Zaprojektowaniu metody kalibracji wykorzystującej zalety metody korelacji fazowej (szybkość działania oraz odporność na jednorodne zmiany intensywności pomiędzy dopasowywanymi obrazami) unikając wady związanej z tym, że wyznaczone w dziedzinie częstotliwości dopasowania trudno przyporządkować do konkretnych obszarów w dziedzinie obrazu. Opracowana w rozprawie metoda nie wymaga takiego przyporządkowania, co stanowi jej istotną zaletę.
5. Weryfikacji działania opracowanej metody na sekwencjach obrazów z głowicy Poprad oraz na ogólnodostępnej bazie obrazów KAIST. Testy potwierdziły skuteczność metody i ogólniejszy zakres jej zastosowania.

Przedstawione oryginalne rezultaty wzbogacają dotychczasową wiedzę w zakresie metod fuzji obrazów i automatycznej kalibracji systemów wizyjnych. Kalibracja układu kamer wizyjnej i termowizyjnej dalekiego zasięgu oraz nowe ujęcie metody korelacji fazowej i wykorzystanie wyznaczonego za jej pomocą dopasowania w procesie kalibracji są oryginalnym wkładem autora w dziedzinie przetwarzania obrazów. Testy przeprowadzone dla bazy danych KAIST świadczą o tym, że opracowana metoda samokalibracji może znaleźć szersze zastosowanie. Rozdziały opisujące problematykę kalibracji systemów wizyjnych w świetle studiów literaturowych stanowią wartościowy element rozprawy.

Pan mgr inż. Jan Klimaszewski osiągnął założony cel pracy związany z wykazaniem przedstawionej na wstępie tezy, rozwiązując tym samym jasno postawione zagadnienie naukowe. Praca ma charakter teoretyczny i doświadczalny, a wyniki eksperymentów zostały poprawnie opracowane. Autor biegle opanował niezbędne podstawy teoretyczne i pokazał umiejętność ich zastosowania do samodzielnego rozwiązywania zagadnień naukowych. Przedstawione w pracy nowe metody i wyniki eksperymentów mają wartości poznawcze oraz praktyczne znaczenie w obszarze automatycznej kalibracji systemów kamer wizyjnych i termowizyjnych. Były one przedmiotem publikacji Autora w materiałach międzynarodowej konferencji Image Processing and Communications Challenges (Springer). Praca jest ciekawa w sensie sformułowania i rozwiązania problemu. Została poprawnie skonstruowana i starannie zredagowana. Upoważnia to do stwierdzenia, że Autor opanował warsztat pisania rozpraw naukowych. Odnośniki literaturowe wskazują zaś, że Autor posiada niezbędną orientację w bibliografii przedmiotu.

Przedstawione dalej komentarze nie zmieniają mojej pozytywnej oceny pracy.

KOMENTARZE

1. W odniesieniu do systemu Poprad interesujące byłyby dodatkowe informacje, np.: (i) objaśnienie do rysunków 5.17, 5.18, na których wyraźnie widać grupy punktów; (ii) jak często w praktyce konieczna jest kalibracja systemu i jakie są główne powody jej uruchamiania; (iii) czy obrazy z obu kamer są zsynchronizowane; (iv) czy układ kamer może być traktowany jako układ stereowizyjny i czy istnieje możliwość wykorzystania dalmierza laserowego do wspomaganie kalibracji lub oceny jej jakości;
2. Uzupełnieniem cytowanych prac O. Faugerasa i Q.-T. Luonga mogłaby być książka O. Faugeras, Q.-T. Luong, T. Papadopoulos: The Geometry of Multiple Images; The Laws That Govern the Formation of Multiple Images of a Scene and Some of Their Applications, The MIT Press, 2001.

PODSUMOWANIE

Recenzowana praca doktorska Pana **mgr. inż. Jana Klimaszewskiego** dotyczy ciekawego i aktualnego zagadnienia badawczego, stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego o znaczeniu praktycznym z udokumentowanym aspektem nowości i **spełnia wymagania obowiązującej Ustawy**. Rozprawa należy do dyscypliny naukowej **automatyka i robotyka**, mieszczącej się wg. nowej klasyfikacji w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika

Wnioskuje do Wysokiej Komisji wyłonionej decyzją Rady Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej o przyjęcie pracy oraz dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

Tawian Wysocki