

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

Poznań, 2022-06-08

Recenzja
rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Piotra Siekańskiego
pt. „Metoda lokalizacji kamery w złożonych warunkach
środowiskowych na potrzeby analizy danych 3D”
promotor: prof. dr hab. inż. Robert Sitnik

Zagadnienie naukowe rozpatrywane w rozprawie

Problematyka naukowa rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Siekańskiego dotyczy ważnej i aktualnej tematyki badawczej jaką jest lokalizacja kamer, w tym układów wielokamerowych, w różnych złożonych warunkach środowiskowych. Wraz ze wzrostem dostępności oraz jakości zarówno kamer wizyjnych, jak i kamer pracujących w innych zakresach spektralnych pojawiają się nowe ważne obszary zastosowań dla pozyskiwanych z nich obrazów. Przykładami mogą być systemy rozszerzonej rzeczywistości łączące widok świata rzeczywistego z wygenerowanymi komputerowo obrazami syntetycznymi, systemy monitoringu wizyjnego w przemyśle oraz coraz szerzej stosowane systemy monitoringu z użyciem obrazów pozyskiwanych za pomocą bezzałogowych statków powietrznych (dronów).

W prowadzonych przez siebie badaniach mgr inż. Piotr Siekański skupił się na istotnych zagadnieniach lokalizacji i kalibracji kamer oraz układów wielokamerowych w złożonych warunkach środowiskowych, takich jak obiekty dziedzictwa kulturowego, w których niemożliwe jest stosowanie dodatkowych znaczników ułatwiających lokalizację kamer, środowiska produkcyjne charakteryzujące się dużym stopniem zapylenia oraz przesłaniania kamer oraz bezzałogowe statki powietrzne, które wymagają kalibracji kamer w warunkach dużej niepewności na podstawie ograniczonego zbioru danych oraz przy dużej zmienności wynikającej z ruchu i wpływu czynników zewnętrznych.

Podsumowując, problematyka rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Siekańskiego dotyczy ważnego problemu naukowego w dyscyplinie inżynierii mechanicznej (budowy i eksploatacji maszyn).

Zaproponowane w rozprawie rozwiązanie rozpatrywanego zagadnienia naukowego

W swojej rozprawie doktorskiej mgr inż. Piotr Siekański przedstawił trzy metody rozwiązania problemu lokalizacji kamer, które mają zastosowanie w różnych warunkach środowiskowych.

Pierwsza z tych metod, opisana w rozdziale 5, ma na celu rozwiązanie problemu lokalizacji w czasie rzeczywistym ruchomej kamery obserwującej obiekt fizyczny na podstawie trójwymiarowej chmury punktów reprezentującej ten obiekt, uzyskanej za pomocą dowolnej

techniki skanowania. O ile w przypadku chmur punktów uzyskanych za pomocą technik fotogrametrycznych pozycje kamer są wyznaczone w procesie rekonstrukcji, o tyle w przypadku chmur punktów uzyskanych innymi technikami takich danych nie ma. Mgr inż. Piotr Siekański rozwiązał problem dla przypadku ogólnego, niezależnie od techniki pozyskania chmury punktów używanej do lokalizacji kamery, osiągając przy tym wydajność pozwalającą na pracę w czasie rzeczywistym (>15 FPS).

Istotą zaproponowanego w rozprawie nowego podejścia jest wyszukiwanie w chmurze punktów obszarów quasi-płaskich, które mogą zostać zamienione na obrazy, a następnie użyte do znalezienia odpowiadających sobie punktów charakterystycznych w obrazach wygenerowanych z chmury punktów oraz zdjęciach z wykonanych z ruchomej kamery. W zaproponowanej przez siebie metodzie mgr inż. Piotr Siekański użył zarówno dostosowanych do tego specyficznego problemu istniejących rozwiązań, jak i nowych oryginalnych rozwiązań autorskich. Do tych ostatnich można zaliczyć między innymi metodę wyznaczania pożądanej pozycji wirtualnej kamery dla obszaru quasi-płaskiego, metodę doboru rozdzielczości ortofotomap oraz metodę generowania masek dla ortofotomap pozyskanych z chmury punktów. W swojej rozprawie doktorskiej mgr inż. Piotr Siekański wyraźnie rozróżnia nowe rozwiązania od rozwiązań jedynie zaadoptowanych, co jest bardzo dobrą praktyką zwiększającą czytelność rozprawy.

W przedstawionej rozprawie doktorskiej mgr inż. Piotr Siekański zamieścił również wyniki walidacji opracowanego rozwiązania oraz zaprezentował dwie praktyczne aplikacje wzbogaconej rzeczywistości działające z użyciem zaproponowanego podejścia. Te elementy jednoznacznie wskazują na praktyczną użyteczność opisanych w rozprawie wyników badań naukowych.

Pomimo pewnych uproszczeń i ograniczeń w stosowalności, które zostaną omówione w dalszej części tej recenzji, tę część osiągnięć naukowych mgr. inż. Piotra Siekańskiego oceniam bardzo wysoko.

Druga metoda, zaprezentowana w rozdziale 6 omawianej rozprawy doktorskiej, dotyczy wyznaczania względnej pozycji kamer w wielokamerowym systemie skanującym pracującym w warunkach przemysłowych, w których występują istotne utrudnienia lokalizacji kamer ze względu na brak kontroli oświetlenia, duży stopień zapylenia środowiska oraz przesłanianie obiektów skanowanych i wzorców przez elementy konstrukcyjne maszyn. Mgr inż. Piotr Siekański opracował projekt skanera składającego się z sześciu niezależnych, wewnętrznie skalibrowanych modułów skanujących. W celu umożliwienia względnej lokalizacji kamer w tym układzie mgr inż. Piotr Siekański opracował nowy typ wzorca kalibracyjnego w formie graniastopuła prawidłowego z nałożonymi na ścianach planszami kalibracyjnymi ChArUco, które są znane w literaturze przedmiotu. Mgr inż. Piotr Siekański zastosował również technikę korekcji orientacji modułów mającą na celu poprawę dokładności pomiarów w przypadku długich obiektów. Jednak ta metoda nie została wyczerpująco opisana w rozprawie. Opracowany przez mgr. inż. Piotra Siekańskiego skaner został poddany wnikliwej walidacji. Jego dokładność należy określić jako umiarkowaną, lecz wystarczającą w zastosowaniu, do którego został zaprojektowany.

W zaproponowanym w tej części rozprawy rozwiązaniu osiągnięcia mgr. inż. Piotra Siekańskiego mają głównie charakter techniczno-konstrukcyjny z zastosowaniem najnowszych, ale już opisanych w literaturze osiągnięć naukowych. Za nowy element z punktu widzenia naukowego można uznać uogólniony model wzorca kalibracyjnego, który

może być stosowany dla pewnej klasy systemów niezależnie od liczby użytych modułów skanujących. Tę część osiągnięć naukowych oceniam umiarkowanie wysoko, choć należy podkreślić praktyczną użyteczność zaproponowanego podejścia w działającym produkcyjnie systemie.

Trzecia metoda opisana w rozdziale 7 rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Siekańskiego dotyczy lokalizacji we wspólnym układzie współrzędnych zestawów kamer pracujących w różnych modalnościach. Jako przypadek szczególny mgr inż. Piotr Siekański przyjął kamery zamontowane na dronie pracujące w zakresie światła widzialnego oraz w zakresie dalekiej podczerwieni, przy czym kamera światła widzialnego służy również za źródło danych 3D generowanych przy użyciu techniki SfM (ang. *structure from motion*).

W celu umożliwienia kalibracji kamer niezależnie od warunków zewnętrznych mgr inż. Piotr Siekański zaproponował nowatorską konstrukcję podgrzewanego wzorca kalibracyjnego, który dobrze sprawdza się zarówno w świetle widzialnym, jak i w dalekiej podczerwieni.

Mapowanie obrazów widzialnych i obrazów w podczerwieni w skalibrowanym układzie jest dokonywane za pomocą zaproponowanej przez mgr inż. Piotra Siekańskiego autorskiej metody badania punktów przecięcia promieni z wirtualną płaszczyzną. Metoda jest przybliżona, ale ma niewielką złożoność obliczeniową i dzięki temu może być używana w czasie rzeczywistym podczas lotu drona. Możliwe jest zastąpienie płaszczyzny właściwymi mapami głębi sceny, lecz ich pozyskanie wymaga złożonych obliczeń, które nie mogą być wykonane w czasie rzeczywistym.

Mgr inż. Piotr Siekański zaproponował w swojej rozprawie również metody detekcji rozkalibrowania układu kamer i korekcji mapowania obrazów. W celu detekcji rozkalibrowania układu obrazy z obu kamer są sprowadzane do wspólnej przestrzeni za pomocą filtracji, a następnie jest wyznaczane ich względne przesunięcie. Jeżeli wielkość przesunięcia przekracza przyjęty próg, oznacza to, że układ uległ rozkalibrowaniu. Zarówno w przypadku filtracji, jak i obliczania przesunięcia mgr inż. Piotr Siekański przetestował różne algorytmy.

Korekcja złożenia obrazów jest wykonywana na podstawie porównania obrazów z poprzednimi obrazami z tych samych kamer. Dzięki temu nie ma potrzeby wyszukiwania odpowiadających sobie punktów charakterystycznych w obrazach w różnych modalnościach. Jeżeli wyznaczone macierze transformacji dla kolejnych obrazów są wiarygodne, a różnice między nimi przekraczają przyjętą minimalną wartość progową, następuje korekcja mapowania. Mgr inż. Piotr Siekański dokonał weryfikacji zaproponowanych w tej części pracy algorytmów w warunkach symulowanych. Tę część rozprawy doktorskiej oceniam wysoko.

Podsumowując tę część opinii uważam, że mgr inż. Piotr Siekański rozwiązał postawiony w rozprawie problem naukowy, opracowując metody lokalizacji kamer w różnych złożonych warunkach środowiskowych.

Oryginalność zaproponowanego przez autora zagadnienia naukowego

Zaproponowane przez mgr. inż. Piotra Siekańskiego metody lokalizacji kamer w różnych złożonych warunkach środowiskowych oceniam jako wysoce oryginalne. Potwierdzeniem oryginalności zaproponowanych metod są wysoko punktowane publikacje naukowe, w tym artykuł w czasopiśmie *ISPRS International Journal of Geo-Information* (IF 1.723), artykuł w czasopiśmie *Sensors* (IF=2.475) oraz artykuł w czasopiśmie *Remote Sensing* (IF=4.118), które wprost opisują wyniki naukowe przedstawione w omawianej rozprawie doktorskiej.

Charakter rozprawy

Rozprawa mgr. inż. Piotra Siekańskiego ma charakter teoretyczno-praktyczny. Wszystkie trzy zaproponowane w rozprawie rozwiązania są szczegółowo opisane w sposób teoretyczny, natomiast na podstawie dwóch z tych rozwiązań zbudowano również działające i używane w praktyce systemy.

Analiza literatury i stanu wiedzy w rozpatrywanej dziedzinie

Rozprawa doktorska mgr. inż. Piotra Siekańskiego świadczy o głębokiej wiedzy teoretycznej Autora oraz znajomości wyników najnowszych badań naukowych w dziedzinie wizyjnych systemów pomiarowych, skanowania trójwymiarowego oraz systemów wzbogaconej rzeczywistości. W rozdziale 2 rozprawy szczegółowo omówiono metody wyznaczania punktów charakterystycznych w obrazach, w tym metody znacznikowe oraz bezznacznikowe. W rozdziale 3 opisano metody wyznaczania pozycji i orientacji kamer, a w rozdziale 4 techniki skanowania trójwymiarowego. Przedstawione opisy obecnego stanu wiedzy oceniam jako aktualne i wyczerpujące.

Omawiając w rozdziałach 5, 6 i 7 rozprawy zaproponowane przez siebie nowe metody wyznaczania pozycji kamer, mgr. inż. Piotr Siekański z jednej strony porównuje je z rozwiązaniami opisanymi wcześniej w literaturze naukowej, a z drugiej strony z dużą sprawnością korzysta z dostępnych opublikowanych wyników badań naukowych do rozwiązania wybranych problemów w proponowanych przez siebie metodach.

Umiejętność autora samodzielnego prowadzenia badań naukowych

Wszystkie trzy zaproponowane przez mgr. inż. Piotra Siekańskiego metody naukowe zostały opublikowane w prestiżowych czasopismach: *ISPRS International Journal of Geo-Information* (IF 1.723), *Sensors* (IF=2.475) oraz *Remote Sensing* (IF=4.118). W każdym z tych artykułów mgr. inż. Piotr Siekański jest pierwszym autorem, co wskazuje na jego kluczową rolę w osiągnięciu wyników naukowych opisanych w artykułach oraz rozprawie doktorskiej.

Poprawność językowa i redakcyjna

Rozprawa jest napisana w języku polskim, a styl wypowiedzi jest bardzo dobry. Pomyłki pisarskie i błędy interpunkcyjne występują jedynie sporadycznie. Choć struktura pracy jest w ogólności jasna i zrozumiała, w rozdziałach 5, 6 i 7 mgr. inż. Piotr Siekański przeplata do pewnego stopnia opisy własnych rozwiązań z opisami obecnego stanu wiedzy. To nieco utrudnia zrozumienie pracy, ale jest o tyle uzasadnione, że zaproponowane przez mgr. inż. Piotra Siekańskiego metody są używane łącznie z innymi znanymi z literatury podejściami, tworząc razem złożone ciągi przetwarzania danych.

Uwagi o charakterze krytycznym i dyskusyjnym

Przedstawiona rozprawa doktorska jest napisana przekonująco, wskazuje na głęboką i aktualną wiedzę mgr. inż. Piotra Siekańskiego, a wyniki walidacji zaproponowanych metod oraz zbudowane praktyczne systemy demonstrują praktyczną wartość osiągniętych wyników. Rozprawa ma jednak również pewne wady i słabe strony.

1. Zaproponowana przez mgr. inż. Piotra Siekańskiego metoda wyznaczania pozycji kamery opiera się na poszukiwaniu w chmurze punktów reprezentującej zeskanowany obiekt rzeczywisty obszarów quasi-płaskich, dzięki czemu ułatwione jest porównywanie punktów charakterystycznych na zdjęciach i powierzchniach w chmurze. Jednak założenie, że w chmurze punktów reprezentującej obiekt rzeczywisty można polegać na identyfikacji obszarów quasi-płaskich zawęża zastosowanie zaproponowanej metody. O ile będzie się ona sprawdzała w przypadku w przypadku wewnątrz o płaskich ścianach, o tyle nie jest możliwe jej zastosowanie do wyznaczania pozycji kamery w przypadku ogólnym, np. do obiektów takich jak rzeźby, meble, urządzenia AGD lub maszyny w fabryce. W rozprawie zabrakło rzetelnej dyskusji obszarów zastosowań zaproponowanej metody wyznaczania pozycji kamery.
2. W celu wygenerowania obrazu z punktów chmury tworzących powierzchnię quasi-płaską wykonywany jest rzut prostokątny punktów chmury na płaszczyznę równoległą do tej powierzchni. W zależności od doboru odległości płaszczyzny rzutu od powierzchni w chmurze, różne elementy modelu 3D zostaną ujęte w wygenerowanym obrazie, co ma kluczowe znaczenie dla działania zaproponowanej metody. W swojej rozprawie doktorskiej mgr inż. Piotr Siekański zaproponował podejście polegające na znalezieniu najszerszej doliny między pikami na histogramie odległości punktów w kierunku prostopadłym do analizowanej powierzchni i tam umieszczenie płaszczyzny rzutu. O ile ta technika dobrze sprawdza się w przedstawionym w rozprawie przykładzie, może ona być nieefektywna w przypadku bardziej złożonych modeli, w szczególności obejmujących więcej niż jedno pomieszczenie.
3. W rozdziale 6 opisano problem dotyczący kalibracji złożonych systemów korzystających z wielu kamer, polegający na tym, że każdorazowo konieczne jest projektowanie dla nich specjalnych wzorców uwzględniających geometrię układu pomiarowego. Mgr inż. Piotr Siekański zaproponował konstrukcję nowego wzorca, którego geometria może być łatwo dostosowana do dowolnej liczby kamer. Jednak taka konstrukcja wzorca może być stosowana tylko, gdy lokalizowane kamery są umieszczone na okręgu. Trudno zatem mówić, że jest to rozwiązanie w pełni ogólne.
4. W opisie metody korekcji orientacji modułów w podrozdziale 6.1.2 zabrakło informacji w jaki sposób jest wyznaczana dodatkowa macierz rotacji R używana do korekcji macierzy parametrów zewnętrznych poszczególnych modułów skanujących.
5. Wyniki walidacji skanera zaprezentowane w podrozdziale 6.2.3 wskazują, że w przypadku skanowania długich obiektów pojawiają się skumulowane błędy wynikające z niedokładności wyznaczenia względnych transformacji pomiędzy poszczególnymi kamerami, co jest głównym celem zaproponowanej metody. Choć występujące błędy są na tyle małe, że nie zmniejszają użyteczności zaproponowanej metody w opisanym w rozprawie zastosowaniu, być może inna konstrukcja wzorca, na przykład złożonego z dwóch połączonych i oddalonych od siebie elementów kalibracyjnych, pomogłaby rozwiązać ten problem.
6. Metoda lokalizacji pary kamer pracujących w różnych zakresach widmowych, przedstawiona w rozdziale 7 została zaprojektowana tak, aby umożliwić jej działanie w czasie rzeczywistym, bez konieczności przetwarzania danych po zakończeniu nagrania. Takie założenie narzuca silne ograniczenia na złożoność algorytmów mapowania, identyfikacji rozkalibrowania i korekcji złożenia obrazów, prowadząc do rozwiązań suboptymalnych. Zabrakło w pracy wyczerpującego uzasadnienia dlaczego ten algorytm

musi działać w czasie rzeczywistym. Ponadto kamera, dla której przeprowadzono symulowane testy przedstawionej metody jest kamerą zintegrowaną, dla której rozkalibrowanie nie wydaje się prawdopodobne.

Przedstawione powyżej uwagi mają charakter jedynie dyskusyjny i nie zmniejszają mojej ogólnie wysokiej oceny wyników naukowych osiągniętych przez mgr. inż. Piotra Siekańskiego.

Konkluzja

Biorąc pod uwagę istotność i aktualność tematyki doktoratu, osiągnięte wyniki naukowe oraz ich bardzo duże znaczenie praktyczne stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Piotra Siekańskiego **spełnia wymagania obowiązującej ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce** i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony. Natomiast na podstawie samej rozprawy, jak i znaczących publikacji Autora w prestiżowych czasopismach, wnoszę o jej **wyróżnienie**.

