

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, 2023-08-31

Recenzja
rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Pawła Liberadzkiego
pt. „Wielokierunkowy system do pomiaru geometrii ciała człowieka
w ruchu z zastosowaniem metody z oświetleniem strukturalnym”
promotor: prof. dr hab. inż. Robert Sitnik

Zagadnienie naukowe rozpatrywane w rozprawie

Problematyka naukowa rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Liberadzkiego dotyczy ważnej i bardzo aktualnej tematyki badawczej, jaką jest pomiar geometrii ciała człowieka w ruchu. Tego typu pomiary znajdują zastosowanie między innymi w produkcji filmowej, gdzie cyfrowe modele postaci ludzkich są używane coraz powszechniej, pozwalając z jednej strony na osiągnięcie nowych efektów wizualnych, a z drugiej strony na znaczące obniżenie kosztów produkcji. Drugim obszarem zastosowań cyfrowych modeli ciała ludzkiego jest prężnie rozwijający się przemysł gier komputerowych. We współczesnych wysokobudżetowych produkcjach, coraz częściej zamiast sztucznie animowanych postaci są wykorzystywane skany rzeczywistych aktorów obejmujące zarówno geometrię, jak i ruch ciała. Precyzyjne pomiary ruchu ciała człowieka znajdują również zastosowanie w medycynie oraz rehabilitacji, gdzie pozwalają na bardziej efektywną diagnostykę i monitorowanie stanów patologicznych i zaburzeń ruchowych. Na przykład, dokładne dane o geometrii ciała mogą być kluczowe w ocenie postępów w terapii po urazach ortopedycznych lub chirurgicznych. Dzięki możliwości śledzenia drobnych zmian w geometrii i ruchach ciała, te metody pomiarowe mogą również pomóc w dostosowywaniu i optymalizacji planów rehabilitacyjnych, zwiększając szanse na skuteczną terapię i szybszy powrót do pełnej sprawności.

W prowadzonych przez siebie badaniach mgr inż. Paweł Liberadzki skupił się na opracowaniu metody pozwalającej na skanowanie ruchu całego ciała człowieka, przy zachowaniu wysokiej rozdzielczości i częstotliwości skanowania, bez stosowania znaczników. Te wymagania, w połączeniu z przyjętym założeniem niskiego kosztu aparatury skanującej, powodują, że problem staje się trudny z naukowego i technicznego punktu widzenia. Opracowanie takiej metody stanowiłoby istotny wkład w rozwój technik skanowania ludzi w ruchu.

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

Zaproponowane w rozprawie rozwiązanie rozpatrywanego zagadnienia naukowego

Rozwiązanie rozpatrywanego zagadnienia wiąże się z dwoma kluczowymi wyzwaniami: precyzyjnym pomiarem geometrii ciała z wielu kierunków w celu właściwego odwzorowania jego złożonej struktury oraz synchronizacją tychże pomiarów, aby umożliwić rekonstrukcję geometrii ciała w dynamicznych warunkach ruchu.

W swojej rozprawie doktorskiej mgr inż. Paweł Liberadzki przedstawił metodę wielokierunkowego aktywnego skanowania ciała człowieka z użyciem światła strukturalnego. W zaproponowanym podejściu zastosowano rozwiązanie modułowe wykorzystujące szereg zsynchronizowanych skanerów kierunkowych o konstrukcji, która pozwala każdemu z modułów kierunkowych również na akwizycję z różnych kierunków.

W rozprawie, poza ogólną koncepcją rozwiązania, opisano konstrukcję systemu 4DBody działającego zgodnie z przedstawioną metodą pomiarową. W systemie 4DBody zastosowano cztery moduły kierunkowe, każdy skanujący z dwóch kierunków: z góry i z dołu, co pozwala na właściwe pokrycie powierzchni ciała człowieka. Separacja pomiarów kierunkowych jest możliwa dzięki zastosowaniu projektorów światła strukturalnego o hybrydowej budowie źródeł światła pozwalającej na ich stosunkowo łatwe rozdzielanie spektralne. Projektory są sterowane za pomocą układów FPGA sterowanych za pomocą mikrokontrolera. Takie rozwiązanie łączy zalety szybkości działania i stosunkowo niskiego kosztu wytworzenia. Nadrzędnymi urządzeniami sterującymi są trzy komputery PC.

Zastosowana w systemie 4DBody metoda odwzorowania skanowanej powierzchni jest zmodyfikowaną wersją wcześniej opublikowanej w literaturze metody jednoramkowego pomiaru z użyciem światła strukturalnego o rozkładzie sinusoidalnym. W rozprawie zaproponowano nowy sposób oznaczania markera w naświetlanym obrazie. W zaproponowanej metodzie, markerem jest jeden z prążków wypełniony również rozkładem sinusoidalnym, ale w kierunku prostopadłym do prążków w całym rastrze. Dzięki temu jest możliwe wykorzystanie metod analizy widma do lokalizacji markera w zbieranych obrazach. W rozprawie omówiono szczegółowo poszczególne etapy procesu przetwarzania danych. Są to kolejno: detekcja mierzonego obiektu w obrazie wejściowym, wyznaczenie mapy okresu prążków, wyznaczenie rozkładu fazy modulo- 2π , wyznaczenie mapy jakości prążków, wyznaczenie ciągłego rozkładu fazy, wyznaczenie pozycji markera oraz wyznaczenie absolutnego rozkładu fazy.

W dalszej części rozprawy opisano procedurę kalibracji omawianego systemu pomiarowego. Składa się ona z trzech etapów: lokalnej kalibracji detektorów w modułach kierunkowych, lokalnej kalibracji fazy dla każdej pary projektor-detektor oraz globalnej kalibracji pomiędzy lokalnymi układami współrzędnych poszczególnych modułów kierunkowych. Dwa pierwsze etapy kalibracji wykonywane są zgodnie z metodą znaną z literatury naukowej. Trzeci etap jest autorskim rozwiązaniem doktoranta dostosowanym do specyficznej konstrukcji skanera w zaproponowanej metodzie skanowania. W rozprawie zaproponowano też metodę korekcji wyznaczonych lokalnych i globalnych transformacji układów współrzędnych przez akwizycję i rekonstrukcję pojedynczego obiektu widocznego przez wszystkie moduły kierunkowe.

W rozprawie opisano również aplikację Optimizer4D umożliwiającą wizualizację i sterowanie procesem rekonstrukcji skanowanego obiektu, w tym wprowadzanie ręcznych korekcji. Podane w rozprawie dane sugerują konieczność ręcznej korekcji w przypadku 10% sekwencji. Wynik ten należy uznać za bardzo dobry.

Istotną częścią rozprawy jest walidacja przedstawionego systemu pomiarowego. Wstępną walidację systemu wykonano przy użyciu wzorca zamontowanego na obrotowym stoliku. Wykonano pomiary w warunkach nieruchomego wzorca oraz w warunkach ruchu obrotowego wzorca z różnymi prędkościami. Wyniki wskazują na nieco większe wartości błędów w przypadku ruchu obrotowego, jednak w obserwowanym zakresie prędkości wartości błędów nie rosną przy wzroście prędkości. Walidacja jakościowa została przeprowadzona na podstawie pomiarów ludzi, w których punktem odniesienia był istniejący system pomiarowy przeznaczony do pomiarów statycznych, a do porównania wyników wykorzystano trzy wybrane wymiary ciała. Analiza wyników wskazuje na średnią różnicę na poziomie 0,74 mm i maksymalną różnicę 3,21 mm dla ciała człowieka i odpowiednio 0,27 mm i 0,38 mm dla manekina. Dodatkowo wykonano pomiary ludzi wykonujących podstawowe ruchy. Pomiary zostały wykonane z częstotliwością 120 Hz. Średnia odległość pomiędzy punktami dla wynikowych chmur punktów wynosiła 1,0 mm. Na podstawie uzyskanych wartości błędów, osiągniętej częstotliwości pomiaru i gęstości chmur punktów, system 4DBody należy ocenić jako wysokiej klasy system pomiarowy, spełniający wymagania jakościowe określone we wstępie rozprawy.

Na pozytywną uwagę zasługuje fakt, że zaproponowana przez mgr. inż. Pawła Liberadzkiego metoda pomiarowa znalazła zastosowanie w badaniach przy ocenie rezultatów rehabilitacji pacjentów oraz w komercyjnym rozwiązaniu w systemie Mnemosis.

Podsumowując tę część opinii uważam, że mgr inż. Paweł Liberadzki rozwiązał postawiony w rozprawie problem naukowy, opracowując metodę nieinwazyjnego pomiaru geometrii ciała człowieka w ruchu, przy zachowaniu wymogów wysokiej rozdzielczości i wysokiej częstotliwości pomiaru.

Oryginalność zaproponowanego przez autora zagadnienia naukowego

Zaproponowaną przez mgr. inż. Pawła Liberadzkiego metodę nieinwazyjnego pomiaru geometrii ciała człowieka w ruchu oceniam jako oryginalną, pomimo tego, że zastosowano w niektórych etapach wcześniej istniejące rozwiązania. Potwierdzeniem oryginalności zaproponowanej metody są wysoko punktowane publikacje naukowe, w tym dwa artykuły w czasopiśmie *Sensors* (IF 3.9, 100 pkt. MEiN). Jeden z tych artykułów wprost opisuje wyniki naukowe przedstawione w omawianej rozprawie doktorskiej.

Charakter rozprawy

Rozprawa mgr. inż. Pawła Liberadzkiego ma charakter teoretyczno-praktyczny.

Analiza literatury i stanu wiedzy w rozpatrywanej dziedzinie

Rozprawa doktorska mgr. inż. Pawła Liberadzkiego świadczy o głębokiej wiedzy teoretycznej Autora oraz znajomości wyników aktualnych badań naukowych w dziedzinie skanowania trójwymiarowego. W rozdziale 2 rozprawy omówiono istniejące metody skanowania trójwymiarowego, w tym skanery typu SfM (ang. *Structure-from-Motion*), SfS (ang. *Shape-from-Silhouette*), SL (ang. *Structured Light*) oraz sensory głębi, w każdym przypadku podając zasadę działania oraz przykłady dostępnych rozwiązań. Natomiast w rozdziale 4, opisując zaproponowane przez siebie rozwiązanie, mgr inż. Paweł Liberadzki wielokrotnie powołuje się na wcześniejsze wyniki badań opisane w literaturze naukowej, które zostały wykorzystane w zaproponowanej metodzie skanowania.

Umiejętność autora samodzielnego prowadzenia badań naukowych

Opisana w rozprawie metoda trójwymiarowego skanowania ciała człowieka w ruchu została opublikowana w artykule „*Structured-Light-Based System for Shape Measurement of the Human Body in Motion*”, który ukazał się w czasopiśmie *Sensors* (IF 3.9, 100 pkt. MEiN). Mgr inż. Paweł Liberadzki jest pierwszym autorem tego artykułu. Jest również współautorem 7 innych powiązanych tematycznie publikacji naukowych, w których dwukrotnie wymieniony jest jako pierwszy autor. Wskazuje to na jego kluczową rolę w osiągnięciu opisanych wyników naukowych.

Poprawność językowa i redakcyjna

Rozprawa jest napisana w języku polskim, a styl wypowiedzi jest dobry. Pomyłki pisarskie i błędy interpunkcyjne występują sporadycznie.

Uwagi o charakterze krytycznym i dyskusyjnym

Przedstawiona rozprawa doktorska jest dobrze napisana, wskazuje na głęboką i aktualną wiedzę Autora, a zbudowany system 4DBody i wyniki walidacji zaproponowanego podejścia demonstrowają praktyczną wartość osiągniętych wyników. Rozprawa ma jednak również pewne wady i słabe strony.

1. Rozprawa doktorska mgr. inż. Pawła Liberadzkiego przedstawia nową metodę pomiaru zaproponowaną jako rozwiązanie problemu nieinwazyjnego skanowania ciała człowieka w ruchu, przy zachowaniu wysokiej częstotliwości akwizycji i wysokiej rozdzielczości wyników chmur punktów. Jednak ta metoda, poza krótkim omówieniem ogólnej koncepcji w rozdziale 3, jest w rozprawie przedstawiona jako element zbudowanego przez Autora systemu 4DBody. Chociaż nie umniejsza to wartości uzyskanych wyników naukowych, z metodologicznego punktu widzenia nie jest właściwe. Analiza rozdziału 4 opisującego implementację systemu 4DBody rodzi wiele pytań dotyczących ogólnych cech metody. Na przykład, czy możliwe jest skonstruowanie systemu o innej liczbie i konfiguracji modułów? Czy moduły kierunkowe muszą zawsze zawierać dwie kamery? Jakie są wymagania dotyczące zastosowanego sprzętu?
2. Wynikowa objętość pomiarowa zbudowanego systemu wynosi $2,0 \times 1,5 \times 1,5 \text{ m}^3$. Oznacza to, że system nie ma wystarczającej objętości do swobodnego skanowania dorosłego człowieka z rozpiętymi ramionami nawet wtedy, gdy skanowana postać nie porusza się. Skanowanie chodu lub biegu jest tym bardziej niemożliwe. Biorąc pod uwagę fakt, że system został zaprojektowany specjalnie do skanowania ciała człowieka w ruchu nasuwa się pytanie, dlaczego Autor zdecydował się na skonstruowanie urządzenia o tak małej objętości pomiarowej. Czy wynikało to z ograniczeń metody, ograniczeń komponentów, czy być może innych specyficznych wymagań? Czy jest możliwe zbudowanie w oparciu o zaproponowaną metodę skanera o większej objętości pomiarowej?
3. W opisanym w rozprawie systemie 4DBody mgr inż. Paweł Liberadzki użył projektorów o specyficznej konstrukcji z hybrydowym układem dwóch źródeł światła. To ułatwia spektralne rozdzielenie sygnałów pochodzących z różnych kierunków. Powstaje jednak pytanie, do jakiego stopnia zaproponowana metoda zależy od takiej konstrukcji projektora i w jaki sposób należy zapewnić separację kierunkową w przypadku, gdyby takie projektory nie były dostępne w przyszłości. Czy różne długości fali świetlnej zastosowane w poszczególnych modułach kierunkowych wpływają na wyniki pomiaru, biorąc pod uwagę charakterystykę spektralną powierzchni ciała człowieka?

4. Opisana w rozprawie aplikacja Optimizer4D zawiera wiele możliwości sterowania procesem rekonstrukcji ciała człowieka. Na etapie konstruowania systemu i prowadzonych przez Autora badań naukowych jest to zaleta. Jednak w zastosowaniach produkcyjnych korzystna byłaby daleko idąca automatyzacja procesu skanowania. Nasuwa się zatem pytanie do jakiego stopnia zaproponowana metoda może być w pełni zautomatyzowana?
5. W swojej rozprawie doktorskiej mgr inż. Paweł Liberadzki podkreśla, że opracowana metoda została zoptymalizowana pod kątem rekonstrukcji ciała człowieka. Jest to zgodne z wymaganiami i założeniami określonymi we wstępie do pracy. Nasuwa się jednak pytanie, do jakiego stopnia zaproponowana metoda jest ogólna i czy może służyć do pomiaru innych obiektów – statycznych lub w ruchu. Jakie zmiany byłyby konieczne, aby takie uogólnienie osiągnąć?

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

Konkluzja

Biorąc pod uwagę istotność i aktualność tematyki doktoratu, osiągnięte wyniki naukowe oraz ich bardzo duże znaczenie praktyczne stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Pawła Liberadzkiego **spełnia wymagania obowiązującej ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce** i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

