

20 sierpnia 2019 r.

prof. dr hab. inż. Paweł Strumiłło
Instytut Elektroniki
Politechniki Łódzkiej

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA WYDZIAŁU PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Tytuł rozprawy: Development of video motion magnification techniques for biomedical applications

Autor rozprawy: mgr inż. Mateusz Popek

Promotor: prof. dr hab. inż. Robert Iskander

Promotor pomocniczy: dr inż. Monika Danielewska

I. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?

Przedłożona do recenzji, napisana w języku angielskim rozprawa podejmuje tematykę badawczą dotyczącą uwydatniania mikroprzemieszczeń elementów sceny obrazowanych w sekwencjach wizyjnych. W angielskojęzycznej literaturze tematu ten problem badawczy określa się mianem *Video Motion Magnification (VMM)*. Technika VMM podjęta w pracy jest inspirowana pracami grupy prof. Williama Freemana z Massachusetts Institute of Technology. Badania te koncentrowały się głównie na uzyskiwaniu jakościowej poprawy widoczności mikroprzemieszczeń, nie stosowano w nich miar ilościowych ani nie obejmowały one zastosowań biomedycznych. W szczególności zastosowania biomedyczne tej techniki uwydatniania ruchu mogą mieć duże znaczenie, a ilościowe miary uwydatniania ruchu mogą służyć jako istotne wskaźniki diagnostyczne. Właśnie ten kierunek badań został obrany w niniejszej rozprawie. Autor stawia w niej następującą hipotezę badawczą (zapisaną w oryginalnej wersji angielskiej oraz w tłumaczeniu recenzenta):

The improved motion-magnification algorithms are suitable for biomedical applications (pl. Ulepszone algorytmy uwydatniania ruchu są odpowiednie do zastosowań biomedycznych).

Hipoteza ta jest sformułowana bardzo ogólnie. Powinna ona być bardziej szczegółowo zapisana, tj. w hipotezie pracy nie uwzględniono informacji, że opracowane algorytmy dotyczą przemieszczeń rejestrowanych w obrazach filmów oraz, że dotyczą przemieszczeń okresowych. Nie ma też informacji zawężającej zakres zastosowań biomedycznych, mianowicie tych, dla których Autor rozprawy wskazał zastosowanie opracowanych algorytmów, tj. pomiaru pulsu rogówkowego w obrazach filmów oka. Również słowo *suitable*,

jest określeniem kolokwialnym nie precyzującym jakie są konkretne zalety opracowanych algorytmów.

Formułując powyższą krytyczną ocenę hipotezy badawczej, stwierdzam jednocześnie, że Autor wystarczająco jasno i szczegółowo sformułował podjęte zagadnienie naukowe w pierwszym rozdziale rozprawy.

II. Czy tematyka rozprawy jest aktualna lub dostatecznie ważna?

Tematyka rozprawy jest aktualna i ma duży potencjał aplikacyjny. Technika VMM umożliwia pomiar niewielkich przemieszczeń (mikroprzemieszczeń) w sposób bezkontaktowy i z dużej odległości (przy czym przez mikroprzemieszczenia należy rozumieć przemieszczenia o wielkości porównywalnej z rozmiarem piksela obrazu). Technika VMM jest dodatkowo niedroga gdyż wymaga zastosowania systemów wizyjnych o przeciętnych, jak na dzisiejsze standardy parametrach. Obszar zastosowań metod VMM, jak zaznaczono w niedawno publikowanych i cytowanych w rozprawie pracach [6-11] może obejmować różne dziedziny inżynierii (np. inżynierii materiałowej), nauki (mikroskopii) i medycyny. W pracy skupiono się na innowacyjnej metodzie diagnostycznej wykorzystującej pomiar pulsu rogówkowego, która może mieć istotne znaczenie dla diagnostyki okulistycznej i naczyniowej. Zaproponowana, ilościowa metoda pomiaru może stanowić konkurencyjną cenowo alternatywę do innych technik pomiaru mikroprzemieszczeń, w których wykorzystuje się ultradźwięki i promienie lasera.

III. Czy autor rozwiązał postawiony problem i czy użył to do tego właściwych metod?

Podstawowym celem naukowym pracy jest wykazanie, że techniki uwydatniania filmowanych mikroprzemieszczeń można projektować tak, aby uzyskać zadane ilościowe parametry uwydatnienia okresowych przemieszczeń, w szczególności Autor podjął problem zachowania częstotliwości drgań dla badanych przemieszczeń wielokresowych. Do rozwiązania postawionego celu Autor zastosował znane z literatury metody przetwarzania obrazów oraz zaproponował ich własne modyfikacje. Do weryfikacji opracowanych metod wizyjnych wykorzystał czujnik ultradźwiękowy o dużej dokładności pomiaru odległości. Zatem metodyka badań została właściwie zaplanowana.

Opis metod badawczych jakie Autor zastosował do rozwiązania postawionego w hipotezie badawczej problemu oraz uzyskane oryginalne wyniki badań zostały opisane odpowiednio w rozdziałach 2., 3. i 4. rozprawy. Rozdziały te zostały ułożone w logicznej kolejności, w której najpierw opisano podstawy teoretyczne metod badawczych (rozd. 2.), potem eksperyment badawczy oraz techniki VMM wraz z własnymi modyfikacjami (rozd. 3.), a następnie przedyskutowano uzyskane wyniki (rozd. 4.). Wnioski z badań sformułował w ostatnim, 5. rozdziale rozprawy.

Podstawy teoretyczne metod badawczych

Dla skutecznego uwydatniania ruchów okresowych o różnych częstotliwościach zastosowano tzw. piramidy obrazowe. Piramidy obrazowe polegają na budowaniu wieloskalowej reprezentacji obrazu poprzez wielokrotne, kaskadowe dolnoprzepustowe filtrowanie obrazu

(piramidy gaussowskie) lub filtrowanie pasmowo-przepustowe (piramidy Laplace'a). Autor definiuje również tzw. sterowalne piramidy, w których charakterystyka widmowa zastosowanych filtrów obrazowych nie jest symetryczna, i którą można odpowiednio sterować (wybierać) kierunek zadanej filtracji obrazu. Kolejnym narzędziem przetwarzania obrazów, które zostało zdefiniowane i zastosowane w pracy to tzw. sygnał analityczny, uzyskiwany za pomocą przekształcenia Hilberta. Charakterystyka widmowa Fouriera sygnału analitycznego nie zawiera ujemnych częstotliwości. Właściwość ta jest bardzo przydatna w wielu zastosowaniach metod przetwarzania i analizy sygnałów. Autor rozszerza pojęcie sygnału analitycznego do dwóch wymiarów. Definiuje radialne, uogólnione ułamkowe przekształcenie Hilberta oraz przekształcenie Rieszsa. Wprowadza też, analogicznie do sygnału analitycznego, pojęcie obrazu analitycznego zwanego obrazem monogenicznym. Autor uzyskuje taki obraz przez zastosowanie zwierciadlanych filtrów kwadraturowych, w szczególności dla uzyskania efektu „kierunkowości” filtracji stosuje wieloskalowe reprezentacje obrazów monogenicznych.

Metody badawcze i opis badań

Dla wykazania hipotezy badawczej Autor zaplanował eksperyment, w którym zastosował:

- trzy urządzenia do rejestracji obrazów: (1) webcam Logitech HD Pro 920, (2) fotograficzny aparat cyfrowy Canon EOS Rebel oraz (3) wysokiej klasy fotograficzny aparat cyfrowy Sony RX100 Mark V; dwa pierwsze z wymienionych urządzeń umożliwiają rejestrację filmów z szybkością 30 obrazów na sekundę, a ostatnie 1000 obrazów na sekundę,
- przetwornik ultradźwiękowy, wytwarzający pakiety sygnałów o częstotliwości 0,8 MHz z częstością repetycji 400 Hz, umożliwiający pomiar odległości z dokładnością 1 μm .
- szereg urządzeń elektronicznych, na które składają się oscyloskop, generator funkcyjny, wzmacniacz akustyczny, głośnik niskotonowy oraz oprogramowanie *VirtualDub* do edytowania nagrań filmowych.

Autor dostrzegł konieczność korekcji zniekształceń geometrycznych torów optycznych kamer, co jest uzasadnione dla zapewnienia dokładnego pomiaru przemieszczeń w rejestrowanych obrazach. Zastosował do tego celu aplikację pakietu matematycznego MATLAB.

Eksperyment badawczy polegał na wytworzeniu drgań membrany głośnika, rejestracji obrazów membrany przez urządzenia optyczne oraz jednoczesny pomiar przemieszczeń membrany przez przetwornik ultradźwiękowy. Jest to prawidłowo zaplanowany eksperyment badawczy, w którym metody optyczne pomiaru przemieszczeń są weryfikowane przez inną niezależną i bardzo dokładną metodę pomiaru (stanowisko pomiarowe zobrazowano na zdjęciu 3.4). Wyniki pomiarów są porównywane za pomocą tzw. dywergencji Kullbacka-Leiblera, która jest miarą stosowaną do porównywania rozkładów statystycznych nazywaną też entropią względną.

Poddane weryfikacji metody uwydatniania ruchu Autor zastosował do pomiaru pulsu rogówki. Schemat eksperymentu był analogiczny do opisanego poprzednio, pośredni pomiar pulsu rogówki wykonywano za pomocą metody wizyjnej oraz jednocześnie za pomocą przetwornika ultradźwiękowego. Badanie to przeprowadzono dla jednego pacjenta.

Wyniki badań i dyskusja

Weryfikacje opracowanej metody VMM przeprowadzono dla ruchów (drgań) jedno- i wieloczęstotliwościowych.

Dla drgań jednoczęstotliwościowych membrany głośnika (dla częstotliwości 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz, 4 Hz i 5 Hz) wyznaczono współczynniki korelacji dla przemieszczeń zmierzonych za pomocą metody VMM oraz za pomocą ultradźwięków. Uzyskano istotnie statystycznie współczynniki korelacji nie mniejsze niż 0,89 (dla obrazów rejestrowanych kamerą internetową) oraz nie mniejsze niż 0,97 (dla obrazów rejestrowanych aparatem cyfrowym Canon). Uzyskano ponadto bardzo dobrą dokładność odtworzenia częstotliwości o wartości błędu średniokwadratowego mniejszej niż 0,1 Hz.

Badania dla przemieszczeń wieloczęstotliwościowych (generowanych za pomocą głośnika) przeprowadzono dla dwóch pakietów częstotliwości: 20 Hz, 25 Hz i 28 Hz oraz dla 100 Hz, 105 Hz i 108 Hz. Obrazy w tym przypadku nagrano za pomocą kamery rejestrującej 1000 obrazów na sekundę. Metody VMM z zastosowaniem transformacji Hilberta i transformacji Riesz porównano z pomiarami ultradźwiękowymi za pomocą dywergencji Kullbacka-Leiblera (K-L). Wyniki te odniesiono również do wyników uzyskanych za pomocą transformacji Gabora jako metody referencyjnej. Wyniki porównania metod wypadły przede wszystkim na korzyść zaproponowanej przez Autora transformacji Hilberta oraz transformacji Gabora. Potwierdzono te wyniki ilościowo na podstawie obliczonych wartości miary K-L dla różnych współczynników uwydatnienia ruchu α oraz jakościowo na podstawie porównania estymowanych zapisów czasowych rejestrowanych przemieszczeń wieloczęstotliwościowych.

Pewien niedosyt pozostawiają wyniki badań dla podstawowego zastosowania zaproponowanej techniki VMM, tj. dla badań pulsu rogówkowego. Wyniki uwydatniania ruchu pokazano jedynie dla danych rejestrowanych u jednego pacjenta. Uzyskano co prawda dość dobrą zgodność przebiegu czasowego, charakterystyki widmowej oraz reprezentacji czasowo-częstotliwościowej (dla proponowanej techniki VMM i pomiarów ultradźwiękowych) to jednak wyników tych nie potwierdzono ilościowo dla stosowanych wcześniej miar, np. dla współczynnika korelacji lub dywergencji K-L. W szczególności zauważalna jest rozbieżność amplitud widm gęstości mocy dla częstotliwości ok. 0.8 Hz, tj. zbliżonej do częstości uderzeń serca. Wątek ten wymaga bardziej szczegółowej dyskusji.

IV. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora? Jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Podstawowym osiągnięciem rozprawy jest rozwinięcie technik VMM to etapu, w którym mogą być one zastosowane do pomiarów ilościowych mikroprzemieszczeń. Jest to szczególnie ważny problem w aspekcie przewidywanych zastosowań biomedycznych. W pracy zbadano właściwości trzech technik VMM, tj. wykorzystujących transformację Gabora, Riesz oraz zaproponowaną przez Autora metodę GFRHT (*Generalized Fractional Radial Hilbert Transform*). Na drodze eksperymentalnej potwierdzono właściwości tych metod w zadaniach uwydatniania jedno i wieloczęstotliwościowych przemieszczeń. Pokazano, że metoda GFRHT

charakteryzuje się większą dokładnością odwzorowywanych mikroprzemieszczeń. W literaturze tematu osiągnięcia badawcze Autora rozprawy należy uznać za nowatorskie. O wartości tych prac świadczą dwa artykuły współautorskie opublikowane w roku 2017 w wysoko punktowanych czasopismach z listy JCR.

Warto też podkreślić, że zaproponowane w pracy zastosowanie technik VMM ma bardzo duży potencjał aplikacyjny, w szczególności w diagnostyce medycznej. W technikach VMM nie wymaga się emitowania energii do otoczenia. Jest to zatem technika nieinwazyjna i bezpieczna w zastosowaniach medycznych.

V. Czy rozprawa świadczy o dostatecznej wiedzy autora i znajomości współczesnej literatury z dyscypliny naukowej, której dotyczy?

Przegląd literatury związanej z tematyką rozprawy zawarto w dwóch miejscach pracy. W sekcji 2.1 Autor omówił rozwój technik VMM, poczynając od pierwszej pracy Liu z roku 2005. Autor zacytował 11 prac związanych z uwydatnianiem ruchu w obrazach, w tym aktualne prace opublikowane w ostatnich kilku latach. Pogrupował techniki VMM na metody wykorzystujące informacje o kolorze i luminancji obrazu oraz na metody wykorzystujące lokalną fazę ruchu. Zaznaczył, że w omawianych metodach nie stosuje się metod ilościowych do oceny zarówno jakości jak i stopnia uwydatniania przemieszczeń.

W sekcji 2.6 zaś Autor skupił się na przeglądzie różnych technik (pasywnych i aktywnych) wykorzystywanych do pomiaru mikroprzemieszczeń, w tym omówił techniki wykorzystujące metody pojemnościowe, indukcyjne, radowe i ultradźwiękowe. W przeglądzie tym powołał się na 12 pozycji literatury. Wskazał na technikę VMM jako konkurencyjną, która jest techniką pasywną.

Podsumowując ten zamieszczony w pracy przegląd literatury należy stwierdzić, że Autor posiada szeroką wiedzę w zakresie tematycznym pracy, choć przegląd ten mógłby być bardziej szczegółowy. Tabela 2.1 zamieszczona na str. 12 pracy jest bardzo dobrym zestawieniem, ale podającym tylko jakościowe parametry omawianych technik pomiaru mikroprzemieszczeń.

VI. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Praca jest napisana bardzo dobrym językiem angielskim. Tylko w kilku miejscach rozprawy zauważono drobne błędy gramatyczne. Praca jest przygotowana bardzo starannie pod względem edycyjnym i graficznym oraz wydana w wygodnym dla czytelnika formacie książkowym

Punkty dyskusyjne (niepodważające mojej pozytywnej oceny całości pracy), na które chciałbym zwrócić uwagę są następujące:

1. Jak wspomniałem, hipoteza badawcza zdefiniowana w pracy ma charakter ogólny. Czy Autor mógłby podjąć próbę sformułowania bardziej konkretnej tezy pracy?
2. W części wstępnej pracy nie zdefiniowano dokładnie co Autor rozumie przez mikroprzemieszczenia, ich skala podana w mikrometrach nie jest odpowiednią definicją gdyż zależy to od parametrów układu optycznego układu akwizycji obrazów, np.

przemieszczenie o wielkości kilku metrów obserwowane z dużej odległości może również być interpretowane jako mikroprzemieszczenie.

3. Autor wielokrotnie powołuje się na własność liniowej charakterystyki częstotliwościowej badanych metod uwydatniania ruchu. Jak należy rozumieć tę własność i jakie ma ona znaczenie dla prezentowanych technik VMM? Czy możliwe byłoby wykreślenie takiej charakterystyki i pokazanie jej własności geometrycznych?
4. W części eksperymentalnej pracy jest mowa o wytwarzaniu częstotliwości z zakresu od 1 do 5 Hz. Częstotliwości te leżą poza pasmem przenoszenia wzmacniaczy akustycznych. Czy czyniono specjalne zabiegi aby wytworzyć tak niskie częstotliwości oraz czy wytwarzane częstotliwości dla tego pasma miały przebieg funkcji mono-harmonicznej?
5. W aspekcie postawionej hipotezy badawczej, w której jest mowa o zastosowaniach biomedycznych, zbyt skrótowo jest opisany wątek badawczy dotyczący zastosowania zaproponowanej techniki VMM w diagnostyce medycznej. W tym zakresie wskazano na główne, innowacyjne zastosowanie tej techniki w badaniach pulsu rogówkowego. Pokazano przykładowy wynik takiego badania, ale nie wyznaczono miar ilościowych dla tych badań, a skomentowano tylko w sposób jakościowy prezentowane wyniki. Czy Autor dysponuje wynikami ilościowymi dla tego zastosowania?

VII. Wniosek końcowy

Bardzo dobrze oceniam poziom merytoryczny rozprawy. Autor opracował metodykę techniki VMM umożliwiającej pomiar przemieszczeń okresowych na podstawie rejestracji sekwencji obrazów wideo. Oryginalną, zaproponowaną w pracy technikę VMM o nazwie *Generalized Fractional Radial Hilbert Transform* poddał weryfikacji z wykorzystaniem pomiarów ultradźwiękowych oraz porównał z innymi technikami VMM. Wskazał na innowacyjne zastosowanie technik VMM w medycynie. Uzyskał wyniki pomiaru pulsu rogówkowego i wskazał na potencjalnie ważne zastosowanie tej techniki w diagnostyce okulistycznej. Zatem rozprawa wnosi oryginalny wkład do dyscypliny inżynieria biomedyczna w zakresie diagnostyki obrazowej.

Stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgra inż. Mateusza Popka spełnia wymagania Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym z 14 marca 2003 roku, Dziennik Ustaw Nr 65, poz. 595 z późn. zm. oraz Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora. Wnioskuje o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

