

dr hab. inż. Radosław Mantiuk, prof. ZUT
Wydział Informatyki
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
ul. Żołnierska 52, 71-210, Szczecin
e-mail: radoslaw.mantiuk@zut.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej wykonana dla Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie

Tytuł recenzowanej rozprawy:

Możliwość estymacji pozycji źrenicy w goglach HMD ze skaningowym okulografem MEMS na podstawie badań fizycznych oraz in silico

Autor rozprawy:

Mgr inż. Mateusz Pomianek

Recenzja wykonana została na podstawie uchwały nr 32/RDN AEEiTK/2023 z dnia 21.06.2023 r.

1 Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

W rozprawie doktorskiej omawiane jest zagadnienie wykorzystania zwierciadła MEMS wraz z laserowym źródłem światła oraz detektorem do śledzenia położenia źrenicy ludzkiego oka. Autor przeprowadza symulacje in silico wymienionego układu testując go pod kątem dokładności wykrywania położenia środka źrenicy. Motywacją zajęcia się problemem jest chęć zbadania możliwości wykorzystania zwierciadeł MEMS w okulografii, a dokładniej do dynamicznego śledzenia kierunku patrzenia człowieka.

W pracy nie znalazłem jednoznacznie zdefiniowanej tezy badawczej. Sformułowany został natomiast główny cel rozprawy: "*Przeprowadzenie badań autorskiej metody estymacji pozycji źrenicy w oparciu o rozwiązanie techniczne bazujące na skanowaniu obszaru oka zwierciadłem MEMS 2D*" oraz cel szczegółowy: "*Opracowanie i walidacja wirtualnego symulatora układu pomiarowego oraz obiektów badań*".

Wymienione cele są zgodne z treścią pracy. Autor prezentuje wirtualny symulator okulografu opartego na zwierciadle MEMS oraz przeprowadza szczegółową analizę jego działania. W symulatorze brane są pod uwagę parametry techniczne komponentów okulografu oraz modelowane ich fizyczne działanie. Wykorzystany jest również realistyczny model oka człowieka.

Rozprawa ma charakter eksperymentalno-analityczny. Doktorant tworzy wirtualne stanowisko eksperymentalne, przeprowadza eksperymenty, a następnie analizuje ich rezultaty pod kątem poprawności wykrywania źrenicy. W pracy pojawiają się również elementy analityczne polegające na opracowaniu algorytmów detekcji źrenicy w danych rejestrowanych przez okulograf MEMS.

2 Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł / w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle / świadczący o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

W pierwszych rozdziałach rozprawy Autor omawia budowę oka człowieka oraz mechanizmy odpowiedzialne za poruszanie oczami (Rozdz. 1 i 2). Opisuje techniki śledzenia wzroku, omawia sposoby wykrywania położenia źrenicy oraz techniki identyfikacji fiksacji. Prezentuje również rodzaje eye trackerów, tzn. urządzeń do śledzenia ruchów oczu. Wymienione tematy opisane są w sposób świadczący o znajomości tematyki. Poparte zostały licznymi odwołaniami do literatury naukowej. Wspomniana część opisowa rozprawy mogłaby być nieco skrócona i skoncentrowana na zagadnieniach, których wprowadzenie jest istotne z punktu widzenia głównej tematyki pracy, tzn. okulografii opartej na lustrach MEMS. Przykładowo w dalszej części pracy nie mam odwołań do opisywanych w Rozdz. 2 technik obliczania fiksacji.

Mniej uwagi poświęcone zostało omówieniu artykułów dotyczących wykorzystaniu zwierciadeł MEMS w okulografii, co Autor uzasadnia ubogą literaturą na ten temat. Rzeczywiście technologia MEMS jako podstawowe źródło informacji o ruchu oczu była badana tylko w nielicznych przypadkach. Wykorzystywana jest natomiast, np. do wykrywania położenia odbić rogówkowych włączając w to aplikacje w komercyjnych eye trackerach (np. w Tobii Pro Eye).

Autor opisał w pracy narzędzia Matlab i Unity używane jako środowiska symulacyjne (Rozdział 6). W mojej ocenie ten ogólny i techniczny opis mógłby zostać ograniczony tylko do elementów bezpośrednio związanych z budową i testowaniem wirtualnego okulografu.

Prezentowane w rozprawie wnioski wynikające z zapoznania się z literaturą są w sposób czytelny i zasadny przełożone na bieżące problemy związane z budową okulografu MEMS. Autor trafnie wskazuje problemy, które następnie rozwiązywane są w pracy doktorskiej.

3 Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Głównymi osiągnięciami prezentowanymi w rozprawie są:

1. Opracowanie trzech różnych algorytmów estymujących położenie środka źrenicy na podstawie pomiarów wykonywanych za pomocą okulografu opartego na zwierciadle MEMS.

Specyfiką działania lustra MEMS jest skanowanie oka próbkami rozkładającymi się wzdłuż ścieżki o kształcie będącym złożeniem dwóch funkcji sinusoidalnych. W efekcie wykrycie krawędzi źrenicy będzie uzależnione od rozkładu próbek w okolicy tej krawędzi. Przy czym rozkład próbek będzie zależał od nachylenia lustra i detektora względem oka. Wykrycie krawędzi źrenicy prowadzi do końcowego celu jakim jest poprawne obliczenie położenia środka źrenicy w układzie współrzędnych związanych z płaszczyzną prostopadłą do osi optycznej detektora.

Autor opisuje w rozprawie trzy różne techniki wykrywania położenia środka źrenicy: *technikę lokalnego skupienia* – obliczającą środek masy próbek należących do źrenicy, *technikę dopasowania elipsy* – aproksymującą parametry elipsy w oparciu o wykryte próbki na krawędzi źrenicy oraz *technikę linii detekcyjnych* – wykorzystującą symetrię rozkładu próbek krawędziowych na poziomych liniach wyznaczanych okresowymi ruchami zwierciadła.

Wszystkie trzy techniki prawidłowo wykrywają źrenicę w warunkach symulacyjnych. Doktorant przeprowadził szczegółową analizę ich dokładności warunkowanej rozkładem próbek skanujących w różnych układach geometrycznych lustra względem oka. Zbadał również wpływ ruchu oka na dokładność opisywanych technik.

2. Wykonanie wirtualnego modelu okulo grafu MEMS oraz wirtualnego środowiska służącego do testowania funkcjonowania tego okulo grafu.

Komponenty okulo grafu zamodelowane zostały w środowisku Unity. Autor zaimplementował algorytmy symulujące działanie okulo grafu, w tym techniki wykrywania środka źrenicy oka. Model okulo grafu MEMS uruchomiony został w wirtualnym środowisku symulującym propagację promienia generowanego przez laser, odbijającego się od lustra MEMS, lustra pośredniczącego oraz oka i docierającego do detektora. W środowisku umieszczony został model głowy człowieka ze szczegółowym modelem oka.

Środowisko Unity to środowisko do tworzenia gier komputerowych, w którym algorytmy syntezy obrazów wykorzystują biblioteki graficzne czasu rzeczywistego. Tego typu rozwiązanie nie pozwala na prawidłowe modelowanie załamania światła na powierzchni obiektów przezroczystych. Nie są modelowane odbicia światła od powierzchni rozpraszających. Nie są prawidłowo obliczane kaustyki oraz transmitancja światła. Obliczenia wykonywane są dla światła widzialnego, dlatego np. trudno jest symulować załamanie światła podczerwonego na powierzchni rogówki. W efekcie tych ograniczeń trudno jest uzyskać realistyczny obraz źrenicy oka, a co za tym idzie wykonać testy dokładności jej wykrywania porównywalne z warunkami rzeczywistymi. Z drugiej strony w środowisku Unity rozwijane jest narzędzie nazywane *Eye shader*, które symuluje zjawiska optyczne zachodzące na widocznych elementach oka. Oceny wymaga realizm tych symulacji w przypadku wykorzystania podczerwieni.

Przyjęte w pracy doktorskiej rozwiązanie jest prawidłowe przy założeniu uproszczenia modelu propagacji światła lasera oraz modelu oka. Na pewno pozwala na wiarygodną analizę niedokładności wykrywania źrenicy spowodowanych różnymi orientacjami oka i luster okulo grafu. Większym problemem jest natomiast realistyczne odwzorowanie wyglądu źrenicy, w szczególności artefaktów pojawiających się na jej krawędziach.

Proszę Doktoranta o precyzyjne omówienie w czasie obrony ograniczeń w symulacji odbicia światła lasera od różnych powierzchni oka wynikających z zastosowanego algorytmu syntezy obrazów w Unity. Proszę również o sprecyzowanie jak obliczane były wartości poszczególnych próbek, tzn. czy uzyskiwano wartości wyrażone liczbami zmiennoprzecinkowymi w następstwie śledzenia pojedynczego promienia lasera.

3. Porównanie wyników działania modelu okulo grafu z wynikami uzyskiwanymi w rzeczywistym środowisku pomiarowym wykorzystującym fizyczne lustro MEMS.

Wartościowym elementem pracy jest eksperyment porównujący wyniki uzyskiwane w symulatorze z rzeczywistym działaniem fizycznego okulo grafu. Testy polegały na zeskanowaniu tarczy USAF 1951, a następnie zamodelowaniu tej tarczy w symulatorze i przeprowadzeniu symulacji zwracającej obraz tarczy. Oba wyniki są do siebie zbliżone co potwierdza prawidłowość działania wirtualnego okulo grafu w przypadku skanowania płaskiej tarczy wzornika.

4. Opracowanie oraz wykonanie eksperymentów, których celem jest znalezienie najlepszej orientacji komponentów okulo grafu MEMS.

Głównym osiągnięciem eksperymentalnym opisanym w pracy jest zbadanie jaki wpływ na dokładność detekcji środka źrenicy ma położenie lustra pośredniczącego okulo grafu. Przy czym brane są pod uwagę fizyczne ograniczenia w budowie okulo grafu, tzn. testy miały na celu znalezienie takiego położenia jego komponentów, które mogłyby zostać zastosowane w docelowym fizycznym urządzeniu. Lustro pośredniczące przemieszczane było po okręgu wokół oka. Dla każdego położenia obliczano dokładność technik detekcji środka źrenicy dla oka skierowanego w różnych kierunkach. Wynikiem eksperymentów jest wskazanie najlepszego położenia lustra pośredniczącego, tzn. położenia, które minimalizuje błąd wykrycia

żrenicy. Rezultaty eksperymentu przedstawione są w postaci wykresów zależności błędu detekcji żrenicy od położenia zwierciadła pośredniczącego na obwodzie oka. Błąd wyrażony jest w mierze kątowej, którą utożsamiam z odległością kątową pomiędzy wektorem od położenia detektora do środka żrenicy w trójwymiarowym modelu oka a wektorem od detektora do środka wykrytej żrenicy. Przy czym żrenica wykrywana jest dla próbek położonych na płaszczyźnie prostopadłej do osi optycznej detektora. Proszę Autora o potwierdzeniu lub skorygowanie moich przypuszczeń, ponieważ miara błędu nie została czytelnie zdefiniowana w treści pracy.

Moim zdaniem eksperyment został dobrze zaprojektowany i pozwala na znalezienie optymalnych położenia komponentów okulografu przy założeniu, że stosowany jest uproszczony model oka oraz uproszczony model śledzenia wiązki lasera. Na wykresach (Rys. 8.18-24) widać szum pomiaru, który może wynikać z niejednorodnych odbić światła w pobliżu krawędzi żrenicy. Szum ten ma niewielkie amplitudy w stosunku do sygnału (położenia zwierciadła), dlatego należy sądzić, że jego analiza nie była przedmiotem badań w eksperymencie. Proszę Autora o odniesienie się do tego stwierdzenia.

5. Wykonanie analizy bezpieczeństwa skanowania oka wiązką laserową odbijaną od zwierciadła.

Ciekawym wątkiem podjęty w jednym z podrozdziałów pracy (Rozdz. 5.3) jest analiza bezpieczeństwa wykorzystania światła lasera o zadanej częstotliwości i mocy do budowy okulografu MEMS. Analiza podparta została szczegółowymi danymi i jest ciekawym źródłem informacji na temat bezpieczeństwa użycia laserów do zastosowań związanych z analizą parametrów oka.

- 4 **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?**

Autor w systematyczny sposób analizuje działanie okulografu opartego na zwierciadle MEMS. Eksperymenty oparte zostały na symulacji w środowisku wirtualnym co jednak nie umniejsza wartości ich wyników. Środowisko symulacyjne w znacznym stopniu przybliża działanie komponentów eye trackera opierając się na ich parametrach technicznych. Wyniki badań eksperymentalnych wskazują na ograniczenia dokładności okulografu wynikające ze specyfiki działania lusterek MEMS oraz z budowy przestrzennej urządzenia. Definiują również źródła tych ograniczeń. Za oryginalne można uznać prezentowane metody detekcji położenia żrenicy, bazujące na prostych i znanych technikach, jednak dopasowanych do danych o specyficznej charakterystyce wynikających z działania zwierciadła.

- 5 **Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników / zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy/?**

Praca napisana jest w sposób staranny i zrozumiały. Opisy ilustrowane są licznymi rysunkami oraz zdjęciami efektywnie wspierającymi prezentację rezultatów. Więcej uwagi można było poświęcić prezentacji rezultatów liczbowych (np. w Rozdz. 8). Tabele byłyby tu lepszą formą niż wymienianie wielu liczb w treści pracy. W Rozdz. 7.1 rozdzielczość kątowa 28.8 stopnia określona jest jako „zbliżona do rozdzielczości narządu wzroku człowieka”. W rzeczywistości maksymalna rozdzielczość układu wzrokowego przekracza 60 cykli na stopień kątowy co jest wartością znacznie większą.

Doceniam wkład pracy Autora w staranne zredagowanie rozprawy, jednak znalazłem w niej dość liczne błędy redakcyjne. Najprawdopodobniej ich przyczyną jest wykorzystanie popularnego

edytora tekstów, który, moim zdaniem, nie powinien być stosowany do pisania prac naukowych. Edytor nie dzieli wyrazów na końcach wierszy, dlatego nie kontroluje liczby głosek w wierszach oraz odstępów pomiędzy wyrazami. Na stronie 74 znalazłem odnośnik do nieistniejącego rysunku 4.3 co sugeruje „ręczną” numerację rysunków i referencji (podobnie str. 82, rys. 4.21). W pracy znajdują się nieliczne przypadki zapożyczeń z języka angielskiego, które nie zostały przyjęte jeszcze w polskim piśmiennictwie (np. „zwalidowane”). W pracy zauważyłem kilka literówek i błędów interpunkcyjnych. Na wielu rysunkach wykresy zamieszczane są w formie obrazu rastrowego o zbyt małej rozdzielczości. Takie postępowanie jest zrozumiałe w przypadku rysunków zaczerpnięty z materiałów źródłowych. Jednak wykresy wykonywane przez Autora powinny być zamieszczane w formie obrazów wektorowych. Wspomniane błędy redakcyjne nie utrudniają zrozumienia treści pracy.

6 Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

W pracy nie znalazłem jasnego opisu ograniczeń wirtualnego modelu okulografu oraz środowiska eksperymentalnego. W szczególności nie sprecyzowano w jakim stopniu odbicie lasera od powierzchni oka modeluje rzeczywiste zjawisko fizyczne. Wspomniana analiza pozwoliłaby na określenie jakie elementy budowy okulografu są precyzyjnie testowane oraz jakich parametrów nie można było przetestować i gdzie można się spodziewać różnic w stosunku do działania fizycznego urządzenia. Proszę autora o odniesienie się do tych zagadnień.

Prezentowana w pracy analiza dokładności algorytmów wykrywania środka źrenicy w systemie dynamicznym, tzn. z uwzględnieniem ruchu oka, sprowadza się do modelowania przesunięcia środka w odniesieniu do prędkości ruchu źrenicy. W przypadku mikrosakad większe znaczenie ma ich częstotliwość, a nie prędkość, ponieważ błąd detekcji może być wynikiem zmiany kierunku ruchu. Uważam, że analiza dokładności detekcji w systemie dynamicznym powinna dotyczyć tej cechy, ponieważ ma ona zasadnicze znaczenie dla poprawności wykrywania ruchów mikrosakadycznych. Proszę Autora o komentarz do tego stwierdzenia.

7 Jaka jest przydatność rozprawy do nauk technicznych?

Rozprawa oparta została na pracach inżynierskich związanych z projektowaniem okulografu opartego na lustrze MEMS oraz implementacji oprogramowania do tego okulografu. Autor wykorzystuje w projekcie fizyczne parametry komponentów eye trackera, rozmiesza te komponenty w sposób zakładający przyszłą budowę urządzenia. Wszystkie te prace są silnie i poprawnie umiejscowione w naukach technicznych. Opracowany symulator jest wartościowym rozwiązaniem, ponieważ umożliwia testowania działania okulografu MEMS w różnych konfiguracjach sprzętowych i w różnych środowiskach pracy. Tworzenie podobnych symulatorów jest obecnie przyjętym sposobem realizacji projektów technicznych z uwagi na możliwość ograniczenia kosztów projektowania oraz możliwość wykorzystania symulowanych rezultatów działania urządzenia do kalibracji jego oprogramowania.

Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy
- wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania
- **spełniająca wymagania**
- spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem
- wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie

Stwierdzam, że Autor wniósł istotny wkład do dziedziny nauk inżynierijno-technicznych w zakresie rozwoju technik śledzenia wzroku. Uważam, że przedłożona do recenzji rozprawa spełnia wymagania właściwej Ustawy i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.