

Gdańsk, 26.09.2023 r.

Dr hab. inż. Marcin Gnyba, prof. uczelni
Politechnika Gdańska
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Katedra Metrologii i Optoelektroniki

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
przygotowana dla Rady Dyscypliny Naukowej
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne
Politechniki Wrocławskiej

Tytuł rozprawy: „Technologie haptyczne w metrologii prowadzonej metodami mikroskopii bliskich oddziaływań”

Autor: mgr inż. Bartosz Michał Świadkowski

Promotor: prof. dr hab. inż. Teodor Paweł Gotszalk

Tematyka rozprawy

Rozprawa wpisuje się w tematykę rozwoju narzędzi dla metrologii elektronicznej dedykowanej do badania nanostruktur, która jest rozwijana w zespole badawczym Katedry Nanometrologii Politechniki Wrocławskiej pod kierownictwem promotora rozprawy - prof. dr hab. inż. Teodora Gotszalka. Rozprawa dotyczy opracowania innowacyjnego mikroskopu sił atomowych. Tematyka jest aktualna, ważna i wpisuje się w trendy rozwojowe mikroskopii coraz mniejszych nanostruktur, w której istotnymi parametrami są powiększenie, rozdzielczość i szybkość mapowania struktury. Mikroskopy bliskich oddziaływań umożliwiają wprawdzie obecnie pomiary z rozdzielczością nawet atomową, ale mapy badanych obiektów rejestrowane są punkt po punkcie, co wymusza kompromis między szybkością a jakością skanu. Autor rozprawy proponuje rozwiązanie tego problemu poprzez zastosowanie w mikroskopie sił atomowych innowacyjnego interfejsu haptycznego, a dzięki temu – bezpośrednio zaangażowanie użytkownika w proces skanowania przy wykorzystaniu ludzkich zmysłów i zdolności do wykrywania charakterystycznych obiektów.

Kryteria oceny

Podstawą formalną do przygotowania recenzji stanowiła uchwała nr 649/30/RDND02/2021-2024 Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej z 10 lipca 2023 r w sprawie wyznaczenia recenzentów w przewodzie

doktorskim Pana mgr inż. Bartosza Świadkowskiego. Recenzję pracy wykonano na podstawie wymagań odnośnie rozprawy doktorskiej przedstawionych w Art.187. Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”. Kierując się powyżej określonymi wymaganiami oceniono rozprawę według poniższych kryteriów.

1. Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej.

Tak, kryterium jest spełnione. Doktorant wykazał się szeroką wiedzą teoretyczną w dyscyplinie naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, w szczególności z obszaru nanotechnologii, mikroskopowych technik pomiarowych, interfejsów człowiek-maszyna, projektowania i realizacji systemów elektronicznych oraz historii techniki. Podczas realizacji pracy doktorskiej wykorzystał zbiór 394 publikacji, w tym 4 własnych. Z tego zbioru co najmniej 198 pozycji pochodzi z okresu od roku 2010, co świadczy że rozprawa obejmuje najnowocześniejsze osiągnięcia nauki i potwierdza znajomość przez Doktoranta współczesnej literatury z dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Bardzo ciekawe jest też odwołanie Doktoranta do znaczącej grupy klasycznych publikacji z XVII-XX wieku autorstwa wybitnych uczonych (m.in. J. Kepler, J. C. Maxwell, E. Abbe, L. Rayleigh, L. Euler, W. Schottky), co podkreśla, że Doktorant interesuje się nie tylko aktualnymi trendami w elektronice, mikroskopii i fotonice, ale także historią rozwoju tych dziedzin oraz kształtującymi je trendami rozwojowymi. Poprawny dobór literatury przedmiotu oznacza więc też w przypadku ocenianej rozprawy prawidłową proporcję pomiędzy starszymi publikacjami przedstawiającymi podstawy fizyczne wykorzystywanych zjawisk a najnowszymi, przedstawiającymi stan techniki, w tym aktualne rozwiązania konstrukcyjne. Na bazie powyższej literatury Doktorant dokonał we Wprowadzeniu wszechstronnej analizy trendów rozwojowych technik mikroskopowych, zarówno w kontekście historyczno-technologicznym jak i funkcjonalnym. Odniósł się zarówno do technik mikroskopii optycznej, jak i elektronicznej. Przedstawił kluczowe problemy związane z rozdzielczością, dostosowania do badania wrażliwych materiałów biologicznych czy skrócenia czasu pomiaru (także w przypadku szybkiego skanowania i rejestracji map badanych obiektów o złożonej budowie). Podkreślił także znaczenie poszerzenia potencjału aplikacyjnego technik mikroskopowych poprzez opracowanie urządzeń niskokosztowych i zminiaturyzowanych, takich jak Foldscope czy mikroskop bez soczewek oraz przełamania limitu dyfrakcji w metodach optycznych, poprzez zastosowanie mikroskopii fluorescencyjnej, mikroskopii konfokalnej ze skanowaniem laserowym czy mikroskopii Stochastycznej Rekonstrukcji Optycznej STORM (ang. Stochastic Optical Reconstruction Microscopy). Podstawowym aspektem, na którym skupił się Doktorant był problem szybkich pomiarów skanujących z bardzo dużą rozdzielczością i

powiększeniem, w związku z tym dokonał w szczególności przeglądu porównawczego takich metod jak: elektronowa mikroskopia skaningowa SEM (ang. Scanning Electron Microscopy), transmisyjna mikroskopia elektronowa TEM (ang. Transmission Electron Microscopy), czy spektroskopia dyspersji energii EDS (ang. Energy-dispersive X-ray spectroscopy). Przedstawił poprawnie ograniczenia nakładane na próbki w tych metodach i z tego powodu skupił się w dalszych rozważaniach na metodach mikroskopii ze skanującą sondą SPM (ang. Scanning Probe Microscopy), gdzie poddał analizie takie metody jak skaningowa mikroskopia tunelową STM (ang. Scanning Tunneling Microscopy) czy mikroskopia sił atomowych AFM (ang. Atomic Force Microscopy) oraz dedykowane metody mikroskopowe bliskich oddziaływań różnego rodzaju, tj. mikroskopia sił ścinających ShFM (ang. Shear Force Microscopy), mikroskopia właściwości magnetycznych MFM (ang. Magnetic Force Microscopy), mikroskopia potencjałów chemicznych SCPM (ang. Scanning Chemical Potential Microscopy) oraz mikroskopia z sondą Kelvina KPFM (ang. Kelvin Probe Force Microscopy). W technikach bliskiego oddziaływania wyróżnił też odmiany metody, w których przyspieszono proces skanowania, tj. mikroskopia AFM o dużej szybkości HS-AFM (ang. High-Speed AFM) oraz Video Rate AFM. Analiza została poszerzona w Rozdziale 2. „Mikroskopia bliskich oddziaływań”. Szeroka analiza metod mikroskopowych o wysokiej szybkości, powiększeniu i rozdzielczości jest poprawna i wskazuje na odpowiednią wiedzę teoretyczną Doktoranta w obszarze pomiarów mikroskopowych i umiejętność ich dostosowywania do wymagań nanotechnologii. W oparciu o tą analizę Doktorant dokonał analizy ograniczeń związanych z szybkim mapowaniem nanostruktur. Oprócz szerokiej wiedzy z obszaru pomiarów mikroskopowych i nanonotechnologii wykazał także wiedzę z obszaru interfejsów „człowiek-maszyna”, w szczególności systemów dotykowych (haptycznych), które szczegółowo przedstawił i przeanalizował w Rozdziale 3. „Technologie haptyczne” oraz w Rozdziale 4. „Manipulatory haptyczne”. Wykazana w rozprawie wiedza obejmuje zarówno podstawy biologiczne procesów związanych ze zmysłami, w z dotykem (w tym budowę receptorów, rodzaje i właściwości skóry, parametry charakteryzujące dotyk), jak i wynikające z nich wymagania na układy haptyczne, ich budowę (w szczególności manipulatorów) oraz podstawowe cechy. Doktorant wykazał się też kluczową dla dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne wiedzą i umiejętnościami z obszaru projektowania i realizacji układów elektronicznych, co potwierdza Podrozdział 5.3 „Konstrukcja elektroniczna” oraz Rozdział 6 „Konstrukcja mikroskopu Peppaskop”, w których Doktorant wykazał się odpowiednią wiedzą i umiejętnościami dotyczącymi poprawnego projektowania układów i płytek PCB, w szczególności: mikrokontrolera, stabilizatorów i przetwornic napięć zasilających, sterowników, regulatorów, wzmacniaczy i przetworników sygnałów, a także silników i interfejsów. Wykazał się też znajomością analizy szumowej aparatury elektronicznej, krytycznej wobec pomiaru słabych sygnałów. W Rozdziale 7 „Sonda mikroskopowa – MetMoIMEMS” Doktorant wykazał odpowiednią wiedzę o zasadach działania i konstrukcji sond mikroskopu sił

atomowych, a w Rozdziale 8 „Metody aktuacji dźwigni” – znajomość metodyki sterowania położeniem sondy pomiarowej w mikroskopie sił atomowych.

Należy też podkreślić, że Doktorant wykazał umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, gdyż wykazał się znajomością metodologii prowadzenia prac badawczych oraz starannością w realizacji tychże prac. Poprawnie zidentyfikował problem badawczy – potrzebę szybkich pomiarów skanujących nanostruktury z bardzo wysoką rozdzielczością i powiększeniem, dokonał pogłębionej analizy istniejących publikacji naukowych i rozwiązań technicznych, opracował na ich podstawie specyfikację techniczną oraz zrealizował znacząco ulepszone konstrukcje mikroskopu AFM z manipulatorem haptycznym i dedykowanym układami elektronicznymi. Dla zrealizowanej aparatury prawidłowo zaplanował i zrealizował program badań, w tym analiz szumowych i termicznych, wyznaczenia rozdzielczości systemu oraz charakteryzacji sond pomiarowych. Finalnie, poprawność realizacji pracy naukowej została potwierdzona za pomocą testowego mapowania nanostruktur. Otrzymane wyniki zostały poddane prawidłowej analizie i interpretacji. Otrzymane rezultaty zostały opublikowane w 4 artykułach w czasopismach z listy JCR, przy czym w dwóch artykułach Doktorant jest pierwszym autorem:

- **B. Świadkowski**, T. Piasecki, M. Rudek, M. Świątkowski, K. Gajewski, W. Majstrzyk, M. Babij, A. Dzierka, and T. Gotszalk, “Armscope—the versatile platform for scanning probe microscopy systems,” *Metrology and Measurement Systems*, vol. 27, no. 1, 2020 (lista MEiN - 100 pkt.) .
- **B. Świadkowski**, W. Majstrzyk, P. Kunicki, A. Sierakowski, and T. Gotszalk, “Near-zero contact force atomic force microscopy investigations using active electromagnetic cantilevers,” *Nanotechnology*, vol. 31, no. 42, p. 425706, 2020 (lista MEiN - 100 pkt.).
- K. Orłowska, **B. Świadkowski**, A. Sierakowski, and T. Gotszalk, “Photon force microelectromechanical system cantilever combined with a fibre optic system as a measurement technique for optomechanical studies,” *Measurement Science and Technology*, vol. 33, no. 2, p. 027001, 2021 (lista MEiN - 100 pkt.).
- B. Pruchnik, K. Orłowska, **B. Świadkowski**, E. Gacka, A. Sierakowski, P. Janus, and T. Gotszalk, “Microcantilever-based current balance for precise measurement of the photon force,” *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, p. 466, 2023 (lista MEiN - 140 pkt).

Potwierdza to posiadanie przez Doktoranta odpowiednich kompetencji także w obszarze odpowiedniej prezentacji wyników własnych prac środowisku naukowemu. Umiejętność samodzielnego formułowania i rozwiązywania problemów badawczych nie przekreśla umiejętności Doktoranta efektywnej współpracy w zespole badawczym. W rozprawie precyzyjnie wskazano zakres współpracy z pozostałymi członkami zespołu badawczego, np. w obszarze rozwoju sterownika mikroskopu ze skanującą sondą, która nie przekreśla samodzielnego i oryginalnego charakteru ocenianego

osiągnięcia. Wskazano także, w szczególności za pomocą odwołania do publikacji, z jakich uprzednich osiągnięć zespołu badawczego prof. Gotszalka Doktorant korzystał.

2. Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne.

Tak, kryterium jest spełnione. **Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.** Doktorant poprawnie zidentyfikował problem badawczy – potrzebę opracowania narzędzi metrologicznych dla mikroskopii sił atomowych, pozwalających na połączenie przeciwstawnych wymagań: szybkich pomiarów skanujących nanostruktury z bardzo wysoką rozdzielczością i powiększeniem. W rozprawie przedstawiono następnie oryginalne rozwiązanie tak sformułowanego problemu, tj. technikę skanowania metodami mikroskopii bliskich oddziaływań z użyciem interfejsu haptycznego zastosowaną w roli podstawowego trybu skanowania. Ma ona umożliwić istotne skrócenie procedur mapowania nanostruktur dzięki szybkiej i precyzyjnej identyfikacji potencjalnie interesujących dla użytkownika miejsc, w których pomiar powinien być realizowany dokładniej – z większą rozdzielczością. Doktorant zaproponował algorytm selektywnego, nierastrowego sterowania skanem, w którym użytkownik operuje sondą bezpośrednio wskazując jej przesuw i odczuwając oddziaływania między sondą a próbką. Należy zwrócić uwagę, że zastosowanie interfejsów haptycznych w AFM jest już opisywane w literaturze przedmiotu (np. <https://labs.wsu.edu/robotics-and-automation/haptic-afm/> czy L. M. Fok, Y. H. Liu and W. J. Li, "Haptic Sensing and Modeling of Nanomanipulation with an AFM," 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Shenyang, China, 2004, pp. 452-457, doi: 10.1109/ROBIO.2004.1521821), ale prace Doktoranta pozwoliły na optymalizację parametrów i funkcjonalności systemu mikroskopu bliskich oddziaływań pod kątem dostosowanie do użycia interfejsu haptycznego w roli podstawowego trybu skanowania. Doktorant prawidłowo sformułował w tym celu założenia dot. opracowanego rozwiązania, które, co bardzo ważne, obejmują swym zakresem zestaw mierzalnych i weryfikowanych parametrów oraz funkcjonalności, takich jak :

- system metrologiczny z sondą skanującą, tj. o przeliczalnych uzyskiwanych wartościach na wartości wielkości fizycznych ze znaną dokładnością pomiarową,
- rozdzielczość kontroli siły kontaktu - poniżej 1 nN,
- rozdzielczość aktuacji – lepsza niż 100 nm,
- opracowanie systemu haptycznego ze sprzętowym interfejsem o linearyzowanych i wyskalowanych w jednostkach SI wartościach zadawanego przemieszczenia i oddziałującej na użytkownika siły.

W odparciu o powyższą specyfikację Doktorant skonstruował manipulator haptyczny o 6 stopniach swobody i zintegrował go z opracowanym przez siebie, dedykowanym sterownikiem mikroskopu bliskich oddziaływań. Rozwiązanie to oferuje wysoki stosunek sygnału do szumu danych pomiarowych (cały system wraz z optyczną detekcją ugięcia, w zależności od częstotliwości próbkowania - od 77 do 128 dB). System pracuje w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego i jest kalibrowany z użyciem wibrometru laserowego. Doktorant wykorzystywał zarówno aktuację optyczną, jak i elektromagnetyczną, które są odniesieniem do wagi prądowej czy odległości przez odniesienie do znanej długości fali (w wibrometrze laserowym oraz interferometrze). Na potrzeby skanowania struktur delikatnych i niskowymiarowych Doktorant opracował metodę sterowania dźwigniami aktywnymi. Uzyskał w ten sposób możliwość skanowania z kontrolą siły kontaktu nad ostrzem, w tym także z kontaktem sondy utrzymywanym przez siły adhezji. Do pomiarów bardzo małych wartości siły wykorzystano ciśnienie fotonów do aktuacji dźwigni. Doktorant poprawnie założył też, że przyjęte rozwiązanie wymaga, aby zmiana siły oddziałującej na zmysł dotyku użytkownika związana była wyłącznie z profilem badanej nanostruktury a nie z nierównomiernością ruchu lub wibracjami manipulatora. W związku z tym zaproponował i przeprowadził test idealności manipulatora, tak aby nie byłby on wyczuwalny dla człowieka – nie wywierałby na ciało żadnych dodatkowych sił, w tym sił tarcia, i nie generowałby żadnych wibracji. Należy też podkreślić, że do rozwiązania problemu naukowego i dostosowania mikroskopu do współpracy z manipulatorem Doktorant zaprojektował poprawnie i zrealizował szereg dedykowanych modułów elektronicznych. Poprawność konstrukcji i działania systemu została zweryfikowana eksperymentalnie, czego wyniki przedstawiono w Rozdziale 8.1 „Skanowanie z kontrolą siły kontaktu”, w którym zademonstrowano mapy próbki kalibracyjnej zarejestrowane z różnymi siłami kontaktu oraz mapy próbki wysoko zorientowanego grafitu pirolitycznego. Ilość badanych próbek była ograniczona, ale może to wynikać z ograniczeń czasowych i finansowych realizowanej pracy doktorskiej. Podsumowując, weryfikację eksperymentalną należy uznać za wystarczającą do potwierdzenia rozwiązania problemu naukowego.

Podsumowując, do najważniejszych osiągnięć oryginalnych Doktoranta zaliczam:

- Opracowanie i sprecyzowanie koncepcji pomiarów haptycznych jako podstawowego trybu pracy mikroskopu.
- Zaprojektowanie i realizację innowacyjnego manipulatora oraz dedykowanych układów elektronicznych do sterowania mikroskopem bliskich oddziaływań z interfejsem haptycznym.
- Uruchomienie stanowiska pomiarowego i wykazanie możliwości mapowania nanostruktur w trybie haptycznym.
- Poszerzony opis zjawisk fizycznych zachodzących podczas pomiaru.

3. Rozprawę doktorską może stanowić praca pisemna, w tym monografia naukowa, zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, praca projektowa, konstrukcyjna, technologiczna, wdrożeniowa lub artystyczna, a także samodzielna i wyodrębniona część pracy zbiorowej.

Tak, kryterium jest spełnione. Oceniana rozprawa ma postać pracy pisemnej o objętości 169 stron, składającej się z Wprowadzenia, 9 rozdziałów numerowanych oraz spisu literatury. Do rozprawy doktorskiej dołączono wymagane streszczenie w języku angielskim. Ponadto, jak wspomniano powyżej, wyniki prac przedstawionych w rozprawie zostały opublikowane w 4 artykułach w czasopiśmie z listy JCR, przy czym w dwóch artykułach doktorant jest pierwszym autorem. Według bazy Scopus prace Doktoranta cytowane były 11 razy, a indeks Hirscha jest równy 2.

Wady i słabe strony rozprawy wraz z prośbą o wyjaśnienia.

Pomimo poprawnego rozwiązania problemu naukowego w pracy zidentyfikowałem pewną ilość usterek i niejasności.

1. W rozprawie stwierdzono dość liczne drobne błędy językowe typu „literówki” lub nieodpowiednia wielkość liter.
2. Brak jest odpowiednich odwołań do literatury w obszarze haptycznego AFM przy opisie w rozdziale 2.4.4.
3. W opisie pozycji literaturowej [126] (K. Y. J. Bark, Rotational skin stretch feedback: A new approach to wearable haptic display. PhD thesis, 2009) brak jest podania jednostki naukowej, w której powstała praca.
4. W opisie pozycji literaturowej [189] Intuitive.com, “da vinci | robotic surgical systems.” <https://www.intuitive.com/enus/products-and-services/da-vinci> brak jest daty dostępu do strony lub innych informacji pozwalających na weryfikację aktualności publikacji.
5. W opisie pozycji literaturowej [204] S. Bezek, “Smartknob: Haptic input knob with software-defined endstops and virtualdetents.” <https://github.com/scottbez1/smartknob> brak jest daty dostępu do strony lub innych informacji pozwalających na weryfikację aktualności publikacji.
6. W opisie pozycji literaturowej [216] Ultraleap, “Haptics: Ultraleap.” <https://www.ultraleap.com/haptics/> brak jest daty dostępu do strony lub innych informacji pozwalających na weryfikację aktualności publikacji.
7. W opisie pozycji literaturowej [284] H. DYNAMICS, “Haddington dynamics.” <https://www.hdrobotic.com/> brak jest daty dostępu do strony lub innych informacji pozwalających na weryfikację aktualności publikacji.

8. W opisie pozycji literaturowej [287] Hapkit, "Hapkit: Two-degree-of-freedom devices." <http://hapkit.stanford.edu/twoDOF.html> brak jest daty dostępu do strony lub innych informacji pozwalających na weryfikację aktualności publikacji.
9. W opisie pozycji literaturowej [311] C. of Friction | Engineering Library, "Coefficient of friction." <https://engineeringlibrary.org/reference/coefficient-of-friction> brak jest daty dostępu do strony lub innych informacji pozwalających na weryfikację aktualności publikacji.
10. W opisie pozycji literaturowej [348] NTi Audio AG, Technical Data XL2 brak jest daty wydania lub innych informacji pozwalających na weryfikację aktualności publikacji.
11. W opisie pozycji literaturowej [372] NT-MDT Spectrum Instruments Co., AFM Probes & Accessories Catalogue brak jest daty wydania lub innych informacji pozwalających na weryfikację aktualności publikacji.
12. Pojęcie „moc optyczna” (str. 130, 133, 137) jest nieprecyzyjną kalką językową z angielskiego. W polskiej terminologii odnosi się do soczewek i oznacza ich zdolność skupiającą.
13. Strona 12 – fragment „w 1941 r. władze Wehrmachtu nakazały produkcję mikroskopów z uwzględnieniem modyfikacji F. Zernike” – kolejna kalka językowa; pojęcie „władze Wehrmachtu” nie jest raczej używane w języku polskim.
14. Strona 12 - fragment „z mikroskopem pracował też L. Pasteur wynajdując penicylinę” – błąd merytoryczny i ortograficzny” - penicylinę odkrył Alexander Fleming w roku 1928 r. W akapicie tym nie podano też odniesienia do źródła literaturowego.
15. W podsumowaniu znalazło się stwierdzenie cyt. „Opis konstrukcji zarówno sterownika mikroskopu, jak i samego manipulatora ukazuje, że opracowanie kompletnego systemu sterowanego manipulatorem haptycznym nie jest zagadnieniem trywialnym. Każdy z elementów składowych, od mechaniki, przez układy elektroniczne po oprogramowanie, pozostawia nadal duże pole do dalszych prac i może stanowić osobny przedmiot badań”. Sformułowanie to jest ogólnikiem, który w zasadzie nie wymagał dowodu, a ponadto zawiera błąd typu literówka. Proszę, aby Doktorant wyjaśnił precyzyjnie, jakie jest pole do dalszych prac i jakie są dalsze wyzwania w obszarze tematycznym rozprawy w wymienionych powyżej aspektach.
16. W podsumowaniu znalazło się stwierdzenie cyt. „Zaangażowanie człowieka bezpośrednio w proces skanowania powoduje, że jakość uzyskiwanych efektów i stopień przyspieszenia (zysk czasowy) w dużej mierze zależą od wprawy operatora”. Jest to tylko ogólne rozważanie. Proszę o doprecyzowanie czy Doktorant badał wpływ wprawy operatora na jakość uzyskiwanych efektów i stopień przyspieszenia (zysk czasowy), w szczególności – ile i jak dobranych osób, a także w jakim zakresie było zaangażowanych w testy opracowanego systemu. Czy badana była zmienność osobnicza operatorów? Czy uwzględniana była wilgotność (dłoni, palców, powietrza)?

17. Nieprecyzyjnie opisano, w jaki sposób korzystano z pozycji literaturowych niepolsko- i nieanglojęzycznych, szczególnie XX-wiecznych i starszych. Proszę o wyjaśnienie czy Doktorant posiadał dostęp do tekstów publikacji w tych językach oraz czy posiada odpowiednie kompetencje językowe. Jeżeli korzystał w oparciu z tych publikacji w opracowania lub tłumaczenia polsko- lub angielskojęzyczne, informacja o źródłach powinna być odpowiednio uzupełniona.
18. Niedostatecznie precyzyjnie opisano sam sposób użycia mikroskopu podczas pomiarów nanostruktur przedstawionych w rozprawie. Proszę o uzupełnienie informacji. Brak jest jednoznacznego stwierdzenia czy wszystkie pomiary realizowano za pomocą interfejsu haptycznego. W jaki sposób operuje się manipulatorem za pomocą ręki? W jakich sposób operator odczuwa oddziaływanie i jak odbywa się sterowanie - palcem czy całą dłońią?
19. Proszę o porównanie na podstawie opracowanego rozwiązania układu napędowego do istniejących komercyjnych rozwiązań. Jakie korzyści funkcjonalne lub parametryczne uzyskano we własnej konstrukcji w stosunku do stanu techniki?
20. Proszę o wskazanie, jakie korzyści z zastosowania pomiarów haptycznych (np. wpływ na ryzyko uszkodzenia, czas pomiaru) zidentyfikowano podczas prac konstrukcyjnych i testów, a także oszacowanie na ile wpływa to na potencjalny zakres zastosowań. W szczególności proszę o informację czy Doktorant porównał czas mapowania struktury za pomocą interfejsu haptycznego oraz za pomocą klasycznego mapowania rastrowego?
21. W rozprawie wskazano założenia idealnego manipulatora (odpowiednika testu Turinga). Proszę doprecyzować, czy system przeszedł test pozytywnie oraz jakie były warunki realizacji testu (np. ilość i dobór testerów, ilość prób).
22. Doktorant uzyskał wysokie wartości sygnału do szumu. Proszę o określenie, na ile liczbowo wartość ta lepsza niż u konkurencji lub w literaturze przedmiotu.
23. Rozwiązanie wagi prądowej realizowano we współpracy z innym członkiem zespołu badawczego, czego efektem jest między innymi wspólna publikacja. Co nowego i lepszego? Pomysł i realizacja optyczna
24. Doktorant wprowadził we wzorze 7.10 pojęcie siły F_{\min} , której następnie przypisuje jednostkę $(\text{fN}/\text{Hz}^{0.5})$ a nie niuton (N). Czy należy tą wielkość traktować jako siłę, czy rozkład częstotliwościowy. Proszę o wyjaśnienia, w szczególności, że w publikacji źródłowej [359] wartości tej siły podawane są w niutonach.
25. Proszę o doprecyzowanie czy w Rozdziale 7 dźwignię modelowano jako strukturę jednorodną materiałowo czy hybrydową (złożoną z kilku warstw struktur z różnych materiałów – metal, tlenek, diament), a także jaką dźwignię wykorzystywano w praktyce i poddano testom, a także jaki miało to wpływ na dokładność i praktyczną użyteczność modelowania.

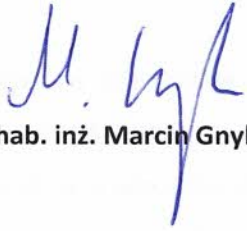
26. Rekomenduję wyjaśnienie, czy i dlaczego w aktuatorze optomechanicznym wykorzystano długość fali z zakresu podczerwieni.

Przedstawione powyżej uwagi 1-15 można potraktować jako błędy głównie edytorskie, które nie wpływają na pozytywną ogólnie ocenę pracy. W odniesieniu do uwag 16-26 proszę Doktoranta o dodatkowe wyjaśnienia w formie pisemnej.

Podsumowanie i wnioski końcowe

Pomimo zastrzeżeń przedstawionych powyżej **uznam, że praca została przygotowana starannie, jest na wysokim poziomie merytorycznym i spełnia wymagania stawiane ustawowo pracom doktorskim.** Doktorant prawidłowo rozwiązał zidentyfikowany problem badawczy używając do tego celu zaawansowanych technik pomiarowych, wszechstronnych analiz, własnych rozwiązań konstrukcyjnych oraz eksperymentów pomiarowych. Mocne strony pracy to innowacyjna koncepcja haptycznej metodologii pomiarowej dla mikroskopii bliskich oddziaływań, a przede wszystkim jej praktyczna implementacja od poziomu modułów elektronicznych po kompletne stanowisko pomiarowe. Opracowany system może stanowić rozwinięcie mikroskopii bliskich oddziaływań znacząco zwiększając przepustowość tego typu systemów przy zachowaniu ich możliwości pomiarowych. Słabsze strony to ograniczony jeszcze program testów całego systemu oraz pewna ilość raczej drobnych błędów.

W związku z powyższym wnioskuję o skierowanie rozprawy doktorskiej pana mgr inż. Bartosza Świadkowskiego do publicznej obrony. Rekomenduję też wyróżnienie rozprawy wobec posiadania przed Doktoranta czterech publikacji w czasopismach z listy JCR o punktacji 100 pkt. i wyższej w obszarze tematycznym rozprawy.


dr hab. inż. Marcin Gnyba