

prof. dr hab. Jan Masajada
Katedra Optyki i Fotoniki
Politechnika Wrocławska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

Wrocław 02.12.2025

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej
mgr inż. Mikołaja Rogóż

Light-driven components and systems made of smart polymer materials

Rozprawa doktorska pana mgr. inż. Mikołaja Rogoża poświęcona jest rozwojowi urządzeń napędzanych światłem i wykonanych z ciekłokrystalicznych elastomerów domieszkowanych barwnikami (LCE). Praca dotyczy zarówno rozwoju metod wytwarzania i porządkowania materiałów LCE jak i ich wykorzystania do budowy maszyn w skali milimetrowej. Ruch uzyskuje się w wyniku przejścia fazowego między fazą anizotropową i izotropową. Przejście fazowe następuje na skutek podgrzania przez oświetlającą wiązkę laserową.

Rozprawa opiera się na pięciu publikacjach w czasopismach naukowych: dwie w Materials i po jednej w Scientific Reports, Advances Science News, Macromolecular Rapid Communications, ACS Applied Materials and Interfaces. W trzech publikacjach doktorant jest pierwszym autorem.

Doktorant uzyskał Diamentowy grant przyznawany początkującym naukowcom. Wśród młodych badaczy grant cieszył się dużym uznaniem. Brak jest informacji o udziale doktoranta w konferencjach.

Praca składa się z części opisowej oraz z pięciu kopii artykułów opublikowanych w czasopismach naukowych. Część opisowa zaczyna się od wstępu, w którym autor przedstawia stan wiedzy i techniki w zakresie istotnym dla własnych badań. Następnie autor przechodzi do omówienia własnych wyników przedstawionych w załączonych publikacjach.

Wyniki zaprezentowane w rozprawie

Ciekawym rozwiązaniem jest system do automatycznego przygotowania warstw LCE. Czasochłonny proces przygotowania próbek dał się zautomatyzować przez adaptację do tego celu drukarki 3D. Taki system może być wykorzystany do wytwarzania serii próbek o różnych parametrach, co umożliwia wybrania tych najbardziej optymalnych. Zwykle przygotowanie próbek jest najbardziej czasochłonną częścią procesu optymalizacji. Na tym etapie opracowany system automatyki traktuję jako pierwszą wersję wymagającą dopracowania. Nie mniej uzyskane wyniki wyraźnie wskazują na to, że taki system można zbudować przy stosunkowo małym nakładzie pracy finansów, przy użyciu dostępnych środków. Jest to jego duża zaleta. Autor pokazał próbki wykonane ręcznie i automatycznie. Z samego oglądu zdjęć wydaje się, że są one identyczne. Warto by jeszcze dodać, czy w konkretnych aplikacjach sprawują się tak samo dobrze. Robot został przedstawiony w publikacji oznaczonej numerem I.

Praca wpisuje się w obecnie silnie rozwijaną dziedzinę związaną z mini i mikro-robotyką, które mogą się poruszać i realizować określone zadania. Ponieważ doktorant bazuje na ciekłokrystalicznych elastomerach absorbujących energię świetlną, mikro urządzenia wykonane w tej technologii są napędzane i sterowane z zewnątrz wiązką światła. Podstawowe badania przedstawione w rozprawie koncentrują się na projektowaniu elementarnych pędników, które mogą posłużyć za odpowiednik mięśni żywych organizmów. Dzięki energii wiązki świetlnej LCEs przechodzą od fazy uporządkowanej do nieuporządkowanej zmieniając przy tym swoją objętość, długość lub sztywność. Przy odpowiedniej geometrii, zmiany te mogą generować wymagany ruch.

Przykładem konstrukcji wykorzystującej LCE jest urządzenie którego ruch naśladuje ślimaka. Jego wyróżniającą zdolnością jest pokonywanie różnych przeszkód terenowych. Zgodnie z twierdzeniem autora jest to prawdopodobnie pierwsza demonstracja tego typu urządzenia. Ślimak napędzany jest przez wiązkę lasera, która ślizga się wzdłuż jego korpusu. Oświetlony obszar kurczy się a gdy wiązka laserowa przesunie się dalej, materiał rozkurcza się. Efekt ten wywołuje ruch przypominający ruch ślimaka. Autor przebadął zależność prędkości ślimaka od wybranych parametrów, takich jak moc lasera, tempo skanowania korpusu ślimaka przez wiązkę laserową, materiał z którego wykonano wydzielinę pokrywającą powierzchnię, po której ślizgał się ślimak. W przeciwieństwie do swojego żywego odpowiednika, ślimak LCE potrafi poruszać się do tyłu gdy zmieni się kierunek skanowanej wiązki. Ruch ślimaka był modelowany z użyciem pakietu COMSOL Multiphysics, który wykorzystuje metodę elementów skończonych. Numeryczny model ilustrował zasadę ruchu ślimaka. W pracy nie ma informacji na ile ruch modelowego ślimaka wiernie odwzorowywał ruch realnego ślimaka przy założeniu, że zadane parametry modelu ślimaka odpowiadają parametrom modelowanego układu. Urządzenie jest bardzo wolne, nawet jak na ślimaka, więc pojawia się pytanie czy istnieje szansa na to, że przy dalszej optymalizacji będzie mogło dogonić swój żywy wzór. Układ został przedstawiony w publikacjach opatrzonych numerem II i III.

Innym rozwiązaniem z zakresu urządzeń naśladujących naturę jest gąsienica (ang. inchworm). Dla uzyskania oczekiwanych właściwości doktorant zmodyfikował technikę czesania (rubbing) podkładów z warstwami LCEs. Tak przygotowany układ pozwalał na zbudowanie silnika liniowego naśladującego ruch gąsienicy. Działanie silnika złożonego z dwóch tak przygotowany pasków zademonstrowano w układzie, w którym posłużył on do liniowego przesuwu taśmy. Energię dostarczała laserowa skanująca wiązka. Odwrócenie biegu wiązki powodowało działanie silnika w drugą stronę. Działanie silnika zostało również zasumulowane metodą elementów skończonych w systemie SIMULIA. Analiza działania modelu ze względu na szybkość skanowania wiązką laserową oraz moc lasera wykazała, że prędkości przesuwu taśmy zależy liniowo od tych parametrów tylko w pewnym przedziale ich zmienności. Jeżeli chce się uzyskać precyzję ruchu bez dalszego komplikowania układu, to należy ograniczyć się do takich liniowych zakresów parametrów. Ich wyznaczenie pozostaje w gestii eksperymentu.

Nartnik jest przykładem maszyny, która jest rozwijana, przez doktoranta od czasu studiów licencjackich. Wymagania stojące przed zbudowaniem nartników są większe niż w przypadku gąsienicy i ślimaka. Obecne wersje choć działają można uznać za częściowo udane. Należy je traktować jak etapy na drodze do bardziej satysfakcjonujących konstrukcji.

Warte podkreślenia jest to, że budowanie tych maszyn musiało zostać poprzedzone studiowaniem materiałów dotyczących mechaniki ich ruchu ich żywych wzorów, oraz próbą ich modelowania, a następnie przeniesienia na realne układy. Na podstawie przedstawionych materiałów trudno jest ocenić do jakiego stopnia udało się skopiować ruch żywych wzorców a do jakiego stopnia żywe organizmy stanowiły inspirację na bazie której powstały maszyny, który ruch ma jednak sporą dozę unikalnych cech.

W kontekście wstępu o robotyce, w którym autor pisze o nieudolności obecnie produkowanych robotów, nieco dziwnym wydaje się nazywanie przedstawionych urządzeń robotami. Zapewne nazwa robot została zapożyczona przez autora z literatury fachowej, więc nie czynię z tego istotnego zarzutu. Trudno jednak uznać te urządzenia za roboty. Są to raczej proste maszyny napędzane światłem.

Obok maszyn doktorant rozwijał również elementy napędzające nazywane dalej silnikami. Wzorując się na silniku obrotowym wykorzystującym efekt piezoelektryczny i napędzanym falą ultradźwiękową doktorant opracował podobne urządzenie wykorzystując LCE. Jako źródło energii posłużyło światło lasera oświetlające urządzenie. Wiązka lasera wędrowała wzdłuż krążka z LCE generując w ten sposób pożądany ruch. Odpowiednio dobrane podłoże pozwoliło zamienić wędrującą wzdłuż pierścienia falę naprężenia na jego ruch obrotowy. Projekt został przetestowany w pakiecie COMSOL MultiPhysics. Pozostaje pytanie na ile przyjęte w modelu parametry układu odpowiadają parametrom rzeczywistego materiału. Działanie rotora zostało przetestowane dla dwóch orientacji molekuł na pierścieniu, przy różnych prędkościach przemieszczania wiązki skanującej i dla różnych jej mocy. Kwestia

tempa oddawania ciepła przez lokalnie podgrzaną partię pierścienia została również przeanalizowana. Czas stygnięcia jest rzędu setek milisekund, co jest wartością niższą od tempa skanowania. Warunek ten jest niezbędny dla efektywnego działania rotora. Zbyt szybki ruch wiązki skanującej powoduje problemy związane z krótkim czasem depozycji energii na dany obszar, przez co energia pochłonięta jest zbyt niska do wywołania zamierzonego ruchu. Obrót pierścienia jest wolny. Ćwierć obrotu trwa 688s przy orientacji A-A molekuł i 64 s, przy orientacji A-R, jednakże autor stwierdził, że obrót przy orientacji A-A molekuł jest bardziej jednorodny. Układ został opisany w publikacjach opatrzonych numerem II i IV.

Zrealizowany został również własny projekt silnika liniowego, który został wykorzystany do maszyny o nazwie gąsienica. Układ został opisany w publikacjach opatrzonych numerem II i V. Autor istotnie uprościł sposób wytwarzania warstw LCE, potrzebnych do budowy tego silnika.

Autor zidentyfikował dwa istotne problemy związane z użytkowaniem pędników bazujących na LCE. Pierwszym z nich jest słabnąca z czasem reakcja na światło, drugim mechaniczne zużycie systemów. Zaproponował również potencjalne rozwiązania tych problemów w przyszłych projektach.

Uwagi końcowe

Rozprawa przedstawia wyniki wieloletniej pracy doktoranta nad urządzeniami opartymi na LCE. Obejmuje opis podstawowych elementów pędnych, jak i prostych urządzeń, które te elementy wykorzystują. Głównym wkładem doktoranta w przedstawione w załączonych publikacjach wyniki jest praca nad opracowaniem i przygotowaniem pędników, ich zastosowania do budowy maszyn oraz przeprowadzenie testów tychże pędników i maszyn. Wiązało się to z zaproponowaniem oryginalnych geometrii ułożenia LCE na odpowiednio dobranych podkładach. Oryginalne jest również część rozwiązań związana z budową maszyn, w szczególności nartnika i gąsienicy. Również budowa maszyny do czesnia (rubbingu) materiałów LCE stanowi oryginalny wkład doktoranta do rozwoju dyscypliny. Jak widać z powyższego pracę należy zakwalifikować do prac eksperymentalnych.

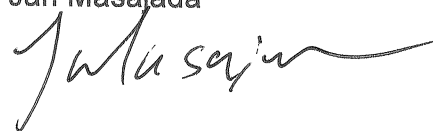
Przedstawione rozwiązania nie zaskakują swoimi osiągnięciami. Jednakże praca stanowi wkład w nową dziedzinę nauki i technologii więc taki stan rzeczy nie zaskakuje. Trudno też przewidzieć czy i na ile materiały LCE zostaną w przyszłości wykorzystane w urządzeniach komercyjnych lub do budowy nowej aparatury badawczej. Jeżeli tak się stanie, to w mojej ocenie wyniki osiągnięte przez doktoranta będą widoczną cegiełką dołożone do potencjalnego sukcesu tej technologii.

Konkluzja

Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska, w świetle obowiązującej ustawy o tytule naukowym i stopniach naukowych, spełnia

wynikające z tejże ustawy kryteria i może być podstawą do ubiegania się o stopień doktora nauk fizycznych. Wnoszę o dopuszczenie rozprawy do obrony publicznej.

Jan Masajada

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Jan Masajada', with a long, sweeping horizontal stroke at the end.