



prof. dr hab. inż. Adam Wojciechowski
Instytut Informatyki
Wydział Fizyki Technicznej, Informatyki i Matematyki Stosowanej
Politechnika Łódźka
Al. Politechniki 8, 93-590 Łódź

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: Wspomaganie decyzji sędziów w zakresie miejsca upadku lotki względem pola gry podczas meczów badmintona

Autor rozprawy: mgr inż. Michał Kopania

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Artur Przelaskowski
Promotor pomocniczy: dr inż. Grzegorz Ostrek

Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrywane w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autora? Czy tematyka rozprawy jest aktualna lub dostatecznie ważna? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Pan mgr inż. Michał Kopania podjął w swojej pracy doktorskiej zagadnienie śledzenia toru lotki badmintonowej celem oszacowania miejsca jej upadku względem pola gry. Zagadnienie z pozoru proste stanowi istotne wyzwanie praktyczne podczas sędziowania meczów, gdyż dynamika gry w badmintonie, w połączeniu ze specyfiką ruchu lotki, stanowi wyzwanie dla oka ludzkiego i tym samym jej wspieranie systemami wizyjnymi jest współcześnie koniecznością. Większość systemów komercyjnych jest głównie profilowana do śledzenia obiektów okrągłych (piłek), przez co praktycznie są nieadaptowalne wprost do lotki badmintonowej. Systemy do badmintona są natomiast nieliczne, hermetyczne oraz bardzo drogie. Brakuje wiarygodnych badań potwierdzających rzeczywistą dokładność systemów do wspomaganie sędziów badmintona, a proces ich certyfikacji jest na tyle niedoskonały, że społeczność sportowców jest w pewnym sensie skazana na wynik działania systemów wizyjnych do śledzenia lotki, bazując na nominalnych parametrach, bez przekonania o ich rzeczywistej dokładności. Praca badawcza Pana mgr inż. Michała Kopania wpisuje się w niszę rynkową, opracowania dostępnego systemu wizyjnego śledzenia lotki badmintona o udokumentowanej dokładności i wiarygodności.

Doktorant zdekomponował zadanie praktyczne na zbiór problemów naukowych, które systematycznie podnosił w swoich badaniach. Wśród podjętych problemów naukowych znajduje się detekcja, segmentacja i śledzenie ruchu lotki w strumieniu wideo, względem podłoża pokrytego liniami referencyjnymi. Badania dotyczyły również wyznaczania kluczowej ramki najbliższej chwili upadku lotki, jak również samo szacowanie lokalizacji miejsca jej upadku. Celem nadrzędnym jest określenie czy w chwili upadku lotka znajdowała się w polu gry, czy poza nim. Warto podkreślić, że praca była realizowana w ramach tzw. doktoratu wdrożeniowego, co narzucało na badania dodatkowy reżim wdrożenia i tym samym Doktorant podjął się zarówno opracowania, implementacji oraz wdrożenia kompletnego systemu wspomaganie sędziów, umożliwiającego rzetelną weryfikację miejsca upadku lotki badmintonowej, uwiarygodnienie odpowiedzi i prezentację miejsca upadku publiczności.

Tematyka rozprawy jest dobrze postawiona i adresuje ważny aspekt wykorzystania technologii wizyjnej w badmintonie. Waga decyzji sędziowskich w meczach sportowych, w tym przypadku meczach

badmintona, jest krytyczna dla ducha rywalizacji sportowej, samych zawodników oraz sponsorów. Dynamiczny rozwój sztucznej inteligencji nie rozwiązuje wszystkich problemów w śledzeniu zachowań szybko poruszających się obiektów i dlatego podjęte badania są, moim zdaniem, udaną próbą znalezienia kompromisowego rozwiązania pomiędzy infrastrukturą sprzętową, algorytmami i wymaganiami konkretnej dyscypliny sportowej - badmintona.

Rozprawa ma charakter badawczo-eksperymentalny i nosi w sobie istotny potencjał praktyczny. Przedstawione w pracy rozważania koncentrują się na systemowym doborze oraz eksperymentalnej adaptacji algorytmów, a także ich hiperparametrów, przy uwzględnieniu uwarunkowań dziedzinowych oraz sprzętowych. Przedstawione analizy są pogłębione i profesjonalne. Praca z racji podjętej problematyki, zakresu oraz metodologii badawczej jest pełnoprawnym osiągnięciem o charakterze naukowym w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja.

Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej i stanu zagadnień w przemyśle) świadczącą o dostatecznej wiedzy Autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

W przedstawionej do oceny rozprawie doktorskiej, odniesienia do aktualnego stanu wiedzy pojawiają się głównie w rozdziale drugim, chociaż szeroko przeprowadzona dyskusja dziedzinowa, w rozdziale pierwszym, stanowi nierozłączne uzupełnienie uwarunkowań prowadzonych badań. W podjętym problemie badawczym rozpoznanie uwarunkowań dziedzinowych jest niezbędne dla określenia wymagań funkcjonalnych i pozafunkcjonalnych tworzonego systemu. Ograniczenia dziedzinowe stanowią zatem podstawę selekcji referencyjnych rozwiązań, które ostatecznie zawężono do niewielkiego podzbioru metod, mogących konkurować w mocno wyśrubowanych aspektach wydajnościowych (czas, dokładność, in.). W każdym z podjętych problemów wyselekcjonowano rozwiązania referencyjne, rzetelnie opisano ich funkcjonalność, wydajność oraz dokładność, po czym zarysowano kompilację metod i algorytmów, na bazie których Doktorant zbudował autorskie rozwiązanie.

Bibliografia jest obszerna i liczy nominalnie 118 pozycji, z czego ponad 25% stanowią linki do źródeł internetowych. Chociaż Doktorant nie uwypukla w rozprawie swoich publikacji to w bibliografii można odszukać 2 prace opublikowane z udziałem Doktoranta w czasopiśmie *Multimedia Tools and Applications* (IF=3.0) oraz w czasopiśmie *Sensors* (IF=3.4). Prace ukazały się odpowiednio w 2021 i 2022 roku, a Doktorant jest ich pierwszym lub drugim współautorem. Całokształt dokonań publikacyjnych Doktoranta jest zauważalny i wystarczający z punktu widzenia postępowania o nadanie stopnia doktora.

Czy Autor rozwiązał postawione zagadnienie, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

W obszarze podjętej problematyki, Doktorant opracował zbiór autorskich rozwiązań i przeprowadził serię eksperymentów, każdorazowo rzetelnie dokumentując prowadzone badania poprawnie opracowanymi wynikami i odpowiednią dyskusją. Wnioski są spójne z wynikami eksperymentu i uściślają kontrybucje Doktoranta.

W pierwszej kolejności Doktorant skoncentrował się na zgromadzeniu niezbędnych danych obrazowych, których powszechna dostępność jest ograniczona. Doświadczenie dziedzinowe Doktoranta było zapewne kluczowym aspektem umożliwiającym zebranie niezbędnych danych. Tym bardziej należy docenić, że pozyskał bardzo wartościowe materiały i udostępnił je środowisku naukowemu. Obrazy wideo zostały zarejestrowane przez autorskie środowisko akwizycji, w którym, w odróżnieniu od rozwiązań dostępnych na runku, wysokoklatkowe kamery są ustawione wzdłuż linii

referencyjnych boiska. Materiał wideo został odpowiednio wyselekcjonowany, ręcznie anotowany przez dwóch niezależnych specjalistów oraz zweryfikowany przez licencjonowanego sędziego badmintonu.

Pierwszym podjętym problemem badawczym była detekcja i śledzenie lotki. Podstawowym mechanizmem wykrywania lotki w sekwencji szarodcieniowych obrazów, pochodzących z wysokoklatkowej kamery (ok. 200 fps), były tzw. ramki różnicowe oraz akumulacyjne ramki różnicowe. Charakterystyczny kształt lotki, segmentowany na skumulowanych ramkach różnicowych, pozwala na stwierdzenie obecności lotki w kadrze (wykrycie) oraz określenie jej toru ruchu. Ostateczne wykrycie konturu lotki odbywa się drogą eliminacji spośród wykrytych kandydatów, na podstawie autorsko dobranych cech segmentowanego obszaru. Autorski dobór wartości progowych cech był możliwy przy założeniu konkretnych parametrów sprzętu akwizycyjnego (np. rozdzielczości czasowej, rozdzielczości obrazu), czy standaryzacji sprzętu do badmintonu (np. wielkości lotki). Heurystyki określające kryteria odrzucenia i selekcji wywodzą się z przekonującej analizy samej rozgrywki i unikalnych doświadczeń Autora rozprawy. Dla nierozstrzygniętych ramek Doktorant opracował moduł bazujący na sieci neuronowej – zmodyfikowany model *Tiny Yolo3*, który analizując wektor cech obrazu miał za zadanie przeprowadzić pogłębioną analizę pozostałych ramek obrazu.

Kolejnym etapem było wyznaczenie w strumieniu wideo kluczowej ramki, w której, lub w pobliżu której, nastąpiło odbicie lotki o podłoże. Punktem wyjścia do określenia tej ramki była zmiana w skumulowanej ramce różnicowej, ale uzyskany w ten sposób model podstawowy nie dawał zadowalających rezultatów i Doktorant postanowił wesprzeć metodę technikami uczenia maszynowego. Opracował zbiór cech ramek różnicowych, spośród których nadzorowaną metodą rekursywnego usuwania cech wyselekcjonował cechy kluczowe, które dla wybranych klasyfikatorów (m.in. *BalancedRandomForest*, *BalancedBaggingClassifier*) uzyskały najlepsze wyniki. Problemem w klasyfikacji było mocne niezbalansowanie zbioru danych, które zostało odpowiednio zaadresowane modelem klasyfikatora jak i miarami dokładności klasyfikacji (np. *Balanced Accuracy*).

Ostatni z podjętych problemów dotyczył wyznaczenia miejsca odbicia lotki o podłoże w stosunku do referencyjnych linii kortu. Można powiedzieć, że jest to kluczowy problem z punktu widzenia sędziowania meczu, a uwarunkowania brzegowe przy odbiciu lotki generują szereg wyzwań (np.: pokrycie linii kortu i lotki, rozmycie lotki, in.). W tym zakresie Autor oparł swoją metodę o wykrywanie charakterystycznego obszaru/punktu lotki (środką P czarnego paska lotki), względem którego możliwe jest szacowanie dokładnego punktu styku lotki z podłożem. W podejściu analitycznym bazował na określeniu linii głównej lotki (L) i charakterystycznego punktu (P), względem którego określana była pozycja korka lotki i potencjalnych punktów styku z podłożem. Podejście analityczne rozstało rozszerzone o analizę maszynową zbioru punktów leżących na wycinku prostej L względem punktu P. Szereg autorskich cech obrazu, dla których zweryfikowano istotność cech pikseli obrazu (współczynnik korelacji liniowej Pearsona) i ich wpływ na skuteczność trenowanych modeli (*SHapley Additive exPlanations*) pozwoliło na opracowanie algorytmu szacującego pozycję korka lotki i tym samym pozycję styku korka z podłożem względem linii referencyjnych boiska. Opracowane modele musiały uwzględniać mocne niezbalansowanie zbioru uczącego i tym samym weryfikacja dokładności rozwiązania mogła również odbywać się według miar dedykowanych niezbalansowanym zbiorom danych. Uzyskane dla najlepszych modeli klasyfikatorów wartości błędów osiągają rząd 10-11 mm, co czyni rozwiązanie zgodne z wymaganiami dziedzinowymi (maksymalnie 13 mm) i pozwala na obniżenie odsetka błędnych decyzji sędziowskich do niemalże 5%, co jest wielkością nieosiągalną nawet dla wprawnego oka sędziego - zwyczajowo, bez wspomagania metodami wizji komputerowej, pomyłki sięgają 25%. Porównanie z rozwiązaniem referencyjnym (*Segment Anything Model*) nie pozostawia złudzeń co do jakości opracowanego przez Doktoranta rozwiązania.

Doktorant, niezależnie od prowadzonych eksperymentów, przeprowadzał przy każdym scenariuszu analizę błędów algorytmów systemu, wskazując ich własności oraz wypracowując kolejne funkcjonalności wspomagające sędziów w podejmowaniu właściwych decyzji podczas meczów badmintonu. Opracowane rozwiązanie wieńczy system, który umożliwia kompilację wyników algorytmu symulacyjnego, obrazu z kamer i doświadczenia sędziowskiego w precyzowaniu werdyktów sędziowskich. System został zintegrowany z systemami *live scoring* i *live streaming*. Jest to niezwykle kompromisowe i profesjonalne podejście. Tym samym nie dziwi fakt, że opracowany przez Doktoranta system został wdrożony podczas różnych zawodów sportowych, również klasy międzynarodowej.

Podsumowując, przedstawione rozwiązania, eksperymenty oraz wyniki są ciekawe i nowatorskie. Szczególnie warto podkreślić kompleksowość rozwiązania i fakt drożenia systemu w zawodach klasy międzynarodowej.

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?

Oryginalność rozprawy doktorskiej leży w zbiorze metod i algorytmów, które w reżimie efektywnej analizy strumienia obrazów pozwalają z dużą dokładnością (poniżej 13 mm) określić punkt kontaktu lotki z podłożem dla tak wymagającego obiektu jakim jest lotka badmintonu. O wartości rozprawy stanowi również przygotowanie zbioru danych oraz wdrożenie opracowanego rozwiązania w prawdziwych zawodach badmintonu szczebla międzynarodowego oraz uzyskanie certyfikacje. W szczególności najważniejszymi, moim zdaniem, osiągnięciami badawczymi są:

- efektywna metoda wykrywania i śledzenia lotki, która bazuje na wyjaśnialnych kryteriach odrzucenia błędnych obszarów (kandydatów na obszar obrazu z poruszającą się lotką);
- efektywna metoda wyznaczania ramki kluczowej niezbędnej do szacowania punktu uderzenia lotki o podłoże;
- szybka metoda segmentacji korka lotki i wyznaczania punktu dotknięcia podłoża przez korek lotki;

Osiągnięciem badań jest też bezsprzecznie opracowanie kompleksowego, efektywnego kosztowo i działającego w czasie rzeczywistym systemu wspierania sędziów. Wymienione osiągnięcia stanowią bezsprzecznie oryginalny wkład Doktoranta w rozwój dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja.

Czy Autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Wszystkie opracowane przez Doktoranta metody zostały udokumentowane w sposób poprawny, zgodnie z przyjętymi w dziedzinie badań zasadami oraz należytą drobiazgowością, chociaż wielość empirycznych parametrów może pozostać dla czytelnika niejasna z racji, że Autor posługiwał się w opisach ogólnymi wzorami, a konkretne wartości liczbowe wynikały z konkretnych parametrów wykorzystywanych urządzeń i ich ustawień. Praca jest zredagowana w spójny i logiczny sposób. W pracy, przy kluczowych metodach, umieszczone zostały cenne schematy, które stanowiły istotne uzupełnienie opisów. Niestety ciemne zdjęcia powodowały, że nie wszystkie elementy opisywane przez Doktoranta były czytelne na obrazach. Same eksperymenty były zrealizowane poprawnie, chociaż niejasności związane z autorską selekcją podzbiorów danych i brak wzmianki o liczbie powtórzeń eksperymentów oraz ewentualnej krosvalidacji, mogą rodzić pytania odnośnie wiarygodności wyników i ich opracowania statystycznego. Praca została zredagowana starannie, zawiera odpowiednie spisy, odwołania i odsyłacze do literatury, chociaż umieszczanie w bibliografii samych

linków, bez opisów co pod nimi się znajduje, nie jest częstą praktyką. W pracy można znaleźć nieliczne błędy językowe i interpunkcyjne, które są nieuniknione przy takiej objętości rozprawy, np. „nie oferował w sprzętu” (str. 19); „dzięki modelowanie” (str. 37); „rozwiązanie nie są” (str. 52); „z inny przykładem” (str. 52); „też rozwiązać też” (str. 55); „podobnie ze jest ze” (str. 72); „undersampling” (str. 81); „ze względu swój” (str. 93); odwołanie do rysunku 47 na str. 100 chyba powinno wskazywać na rysunek 48; „są mają” (str. 111); „w wyznaczony obszarze” (str. 119);

Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Rozprawa doktorska nie zawiera istotnych uchybień, a poniższe uwagi mają przede wszystkim charakter dyskusyjny. Przykładowe kwestie, które mogłyby zostać przedyskutowane, lecz nie ujmują pozytywnej oceny rozprawy, dotyczą:

- doprecyzowania opisu zbioru danych, na którym prowadzono eksperymenty. Z jednej strony w rozdziale 3.1, na stronie 54 wspomniano, że na 1793 obrazach operator zaznaczył pozycję lotki, zaś z drugiej strony w rozdziale 3.3, na stronie 75 napisano, że dla 1524 ramek operator zaznaczył lotkę. Ponadto spośród 1524 ramek, na 1250 ramkach algorytm znalazł lotkę, a na 137 nie znalazł lotki, przy czym nie znany jest status pozostałych 137 ramek. Prawdopodobnie wynika to ze swobodnego żonglowania podzbiorami zbioru pełnego, ale warto wyjaśnić te kwestie;
- wyjaśnienia zasad przyjmowania wartości progowych dla opracowanych algorytmów (np. 0,7 czy 15 cm na str. 67, 16 pikseli na str. 75, $D_{\min}=0.88$ na str. 80, in.). Intuicyjnie zrozumiałe jest przyjmowanie wartości progowych, które dla rozważanego zbioru danych pozwalają przeprowadzić możliwie skuteczną segmentację, czy klasyfikację, ale czy wartości progowe mają cechy uniwersalne, które dla innych zbiorów danych obrazowych, również będą skuteczne? Jak przyjęte parametry zależą od odległości kamery od lotki? Może istnieje jakieś bardziej uogólnione podejście do wyznaczania tych wartości?
- doprecyzowania wiarygodności eksperymentów z punktu widzenia niedeterministyczności modeli sieci neuronowych, które były uczone i testowane na autorskim zbiorze danych. Nie doprecyzowano liczby powtórzeń ani zastosowania mechanizmu krosvalidacji, który podniósłby zapewne wiarygodność otrzymanych wyników.

Konkluzja

Uważam, że cele rozprawy doktorskiej zostały w pełni zrealizowane, a postawione hipotezy, wykazujące przewagę opracowanego rozwiązania nad referencyjnymi, udowodnione. Doktorant przedstawił w rozprawie nowe i oryginalne metody wykrywania i śledzenia lotki badmintonowej oraz metody określania/szacowania jej punktu styku z podłożem. Uzyskane przez Doktoranta wyniki uważam za oryginalne, wartościowe i ciekawe poznawczo. Zakres prowadzonych badań był wystarczający, analiza opracowanych rozwiązań wszechstronna, a warsztat badawczy Doktoranta odpowiedni. Doktorant może poszczycić się dwoma publikacjami w czasopiśmie z listy JCR, o wysokim współczynniku wpływu.

Tym samym rozprawa prezentuje wartościowe osiągnięcia naukowe w obszarze dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja oraz potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia przez Doktoranta pracy naukowej.

Bez najmniejszej wątpliwości stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Michała Kopani spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, przez obowiązującą ustawę. Wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

Adam Wojanowski