

dr hab. inż. Mikołaj Leszczuk, prof. AGH
Instytut Telekomunikacji
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
mikolaj.leszczuk@agh.edu.pl

Kraków, dn. 30 grudnia 2024 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Michała Kopani

„Wspomaganie decyzji sędziów w zakresie miejsca upadku
lotki względem pola gry podczas meczów badmintona”

Promotor: prof. dr hab. inż. Artur Przelaskowski

Promotor pomocniczy: dr inż. Grzegorz Ostrek

Politechnika Warszawska

Dziedzina: nauki inżynierjno-techniczne

Dyscyplina: informatyka techniczna i telekomunikacja

Aktualność i znaczenie rozprawy doktorskiej

Aktualność i znaczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. **Michała Kopani** pt. „**Wspomaganie decyzji sędziów w zakresie miejsca upadku lotki względem pola gry podczas meczów badmintona**” są bezsprzecznie istotne, ponieważ dotyczą rozwiązań w obszarze technik analizy i przetwarzania obrazu, które znajdują zastosowanie w coraz liczniejszych dziedzinach praktycznych, w tym w sporcie wyczynowym. Autor skupia się na opracowaniu metod detekcji, śledzenia i precyzyjnego modelowania położenia lotki w czasie rzeczywistym, przyczyniając się tym samym do poprawy dokładności i szybkości wideo-weryfikacji decyzji sędziowskich. Istotność podejmowanych zagadnień wzrasta wraz z rosnącym znaczeniem technologii wspierających sędziów w wielu dyscyplinach sportowych; rozprawa jest zatem odpowiedzią na faktyczne potrzeby współczesnego sportu i rynku technologicznego.

Rozprawa mgr inż. Michała Kopani stanowi ważny wkład w rozwój i zrozumienie nowoczesnych systemów wspomagania decyzyjnego opartych na wizyjnych algorytmach analizy obiektów poruszających się z dużą prędkością. Autor koncentruje się na istotnych kwestiach związanych z detekcją ruchu i interpretacją obrazów w warunkach wysokiej dynamiki – co ma kluczowe znaczenie choćby w badmintonie, uznawanym za najszybszy sport rakietowy. Proponowane w rozprawie metody analizy i interpretacji wideo korzystają z nowoczesnych podejść obliczeniowych, w tym metod uczenia maszynowego i algorytmów czasu rzeczywistego, odpowiadając na krytyczne problemy w dziedzinie sportowej analizy danych. Rozprawa łączy teoretyczne fundamenty z praktyczną implementacją i testami w warunkach rzeczywistych, potwierdzając duże znaczenie prezentowanych badań zarówno dla rozwoju nauki o przetwarzaniu obrazu, jak i dla efektywnego zastosowania technologii wspomagających sędziów liniowych. Dzięki temu praca mgr inż. Kopani stanowi wartościowy przykład, jak innowacyjne rozwiązania informatyczne można skutecznie łączyć z realnymi

potrzebami użytkowników – w tym przypadku całego środowiska badmintonowego – prowadząc do znaczącej poprawy jakości i obiektywizmu rozstrzygnięć sędziowskich.

Problem naukowy w zakresie wspomagania decyzji sędziowskich

Problem naukowy podejmowany przez mgr inż. Michała Kopanię dotyczy opracowania wydajnych i skutecznych metod wspomagania decyzji sędziów liniowych w badmintonie, gdzie kluczowe znaczenie ma automatyczna i precyzyjna lokalizacja miejsca upadku lotki względem pola gry. Autor koncentruje się na wyzwaniach związanych z wysoką dynamiką ruchu lotki (prędkość przekraczająca 400 km/h), specyficznym kształtem i zachowaniem lotki, a także niekorzystnymi warunkami oświetleniowymi występującymi często w halach sportowych.

Rozprawa dotyczy szeroko rozumianej analizy i interpretacji obrazu w czasie rzeczywistym, obejmującej:

- detekcję i śledzenie małych, szybko poruszających się obiektów (lotka),
- wyznaczenie kluczowych momentów (odbicia lotki od podłoża),
- dokładną lokalizację w kontekście referencyjnych linii kortu (decyzja „in/out”).

Przedstawione przez Autora metody łączą w sobie różnorodne podejścia – od klasycznych algorytmów usuwania tła i użycia akumulacyjnych ramek różnicowych po elementy uczenia maszynowego i analizę trajektorii lotki. Badania mgr inż. Kopani wypełniają lukę w dotychczasowych systemach wizyjnych tworzonych dla celów sportowych, skupiając się na minimalizacji błędów detekcji i śledzenia lotki w warunkach ograniczonych zasobów sprzętowych, a zarazem zapewnieniu wystarczającej szybkości przetwarzania, niezbędnej do praktycznego zastosowania podczas meczów badmintonowych.

Nowatorstwo podejścia przejawia się szczególnie w:

1. Zastosowaniu wielokamerowego układu pomiarowego, który obserwuje wybrane linie kortu (zamiast całego pola gry), znacząco upraszczając montaż i konfigurację w warunkach turniejowych.
2. Dedykowanych algorytmach segmentacji uwzględniających stożkowy kształt lotki i jej ruch wirowy (co wyraźnie utrudnia klasyczną analizę wizyjną).
3. Integracji modelu ruchu lotki z rzeczywistymi danymi z hal sportowych, w tym kompensacji migotania oświetlenia oraz zróżnicowanej konfiguracji kamer i okablowania.

Podjęty problem został sformułowany precyzyjnie jako odpowiedź na realne wyzwania sędziowskie i organizacyjne w badmintonie (częste protesty zawodników i wysoki odsetek błędnych ocen w okolicach linii). Rozwiązania zawarte w rozprawie mają znaczący potencjał wdrożeniowy: mogą realnie podnieść jakość decyzji sędziowskich, wpływając na transparentność i sprawiedliwość rywalizacji w tej szybko rozwijającej się dyscyplinie.

Sformułowanie hipotezy

Hipoteza rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Kopani koncentruje się na założeniu, że zastosowanie precyzyjnie zaprojektowanych i odpowiednio zoptymalizowanych algorytmów przetwarzania wideo oraz metod uczenia maszynowego umożliwi automatyczną i obiektywną weryfikację miejsca upadku lotki w badmintonie z dokładnością wystarczającą do praktycznego wsparcia decyzji sędziowskich w czasie rzeczywistym. Autor zakłada, że:

1. Wielokamerowy układ pomiarowy dostosowany do obserwowania wybranych obszarów (linii pola gry) pozwoli na znaczne ograniczenie złożoności przetwarzania w porównaniu z tradycyjnymi systemami obejmującymi cały kort.

2. Autorskie algorytmy detekcji i śledzenia lotki – opierające się na akumulacyjnych ramkach różnicowych, metodach segmentacji uwzględniających stożkowy kształt lotki oraz wybranych filtrach ruchu – dadzą się wydajnie zaimplementować nawet przy ograniczonych zasobach sprzętowych, zapewniając odpowiednio szybką analizę w czasie trwania akcji meczowej.
3. Dokładna segmentacja korka lotki i wyznaczenie kluczowego momentu odbicia mogą zostać osiągnięte dzięki odpowiedniej integracji podejść klasycznych (usuwanie tła, analiza różnicowa) z modelami uczenia maszynowego, co ostatecznie pozwoli na nieomal automatyczne ustalenie wyniku „in/out” z błędem mniejszym niż typowy błąd ludzkich sędziów liniowych.

W ten sposób formułowana hipoteza wpisuje się w nurt badań nad usprawnianiem procesu sędziowania w sporcie przy użyciu nowoczesnych technologii wizyjnych. Jej weryfikacja uwzględnia zarówno dostępne rozwiązania komercyjne, jak i realne testy prototypu systemu w warunkach turniejowych, potwierdzające możliwość poprawienia skuteczności i szybkości decyzyjnej w ocenie spornych zagrań. Dzięki temu proponowane rozwiązania mają szansę nie tylko znaleźć zastosowanie w badmintonie, ale również stanowić podstawę dla innych dyscyplin wymagających szczególnie wysokiej dokładności analiz wideo.

Rozwiązania problemów w zakresie wspomaganie decyzji sędziowskich

W rozprawie doktorskiej mgr inż. Michała Kopani przedstawiono szeroki zakres metod opracowanych z myślą o możliwie efektywnym i wiarygodnym wsparciu sędziów badmintonowych w precyzyjnym określaniu miejsca upadku lotki. Autor w sposób kompleksowy zidentyfikował trudności towarzyszące analizie wideo w czasie rzeczywistym, a następnie zaproponował rozwiązania, które skutecznie rozwiązywały postawione problemy badawcze. Najważniejsze z nich obejmują:

1. Zunifikowany system śledzenia lotki – łączący w sobie odejmowanie tła i ramki różnicowe (pozwalające na szybkie wydzielenie ruchomej lotki z tła kortu, nawet w warunkach zmiennego oświetlenia i przy przesuwających się w polu widzenia zawodnikach) oraz akumulacyjne ramki różnicowe (akcentujące trajektorię lotki poprzez sumowanie kolejnych ramek, co wspomaga detekcję obiektu przy wysokich prędkościach lotu i chwilowych okluzjach).
2. Moduł podejmowania decyzji o momencie odbicia (kluczowa klatka). Autor opracował model uczenia maszynowego, który na podstawie rozmaitych cech (np. rozmycia obiektu, kąta nachylenia lotu, zmian liczby pikseli w ramkach różnicowych) pozwala z dużą skutecznością wyznaczyć moment faktycznego kontaktu lotki z podłożem. Jest to krytyczne dla dalszego etapu wyznaczenia pozycji „in/out”.
3. Precyzyjna segmentacja korka i weryfikacja „in/out”. Szczególnie innowacyjnym elementem jest rozpoznawanie charakterystycznego ciemnego paska oddzielającego korek lotki od piór, co wyraźnie poprawia dokładność zlokalizowania punktu styku lotki z kortem. Dodatkowo zaproponowano geometrię kamer oraz procedury kalibracyjne, dzięki którym system skutecznie minimalizuje błędy wynikające z perspektywy i zniekształceń optycznych, pozwalając w konsekwencji na przedstawienie operatorowi i sędziemu jednoznacznej informacji o tym, czy lotka spadła w granicach kortu.

Badania empiryczne zaprezentowane w rozprawie potwierdzają, że zaproponowane rozwiązania wyraźnie poprawiają efektywność i skuteczność analizy sytuacji spornych, w porównaniu z dotychczasowym subiektywnym osądem sędziego liniowego. Dzięki testom terenowym (m.in. w trakcie turniejów) wykazano, że poszczególne składowe systemu —

detekcja, śledzenie i ostateczna ocena „in/out” — współdziałają stabilnie, a ich czas przetwarzania jest na tyle krótki, aby uzasadnić praktyczne zastosowanie w realiach meczowych.

Zaproponowane w dysertacji metody wnoszą istotny wkład w dziedzinę szeroko pojętej automatycznej analizy wizyjnej i stanowią zarazem solidną bazę do dalszych badań nad algorytmicznym oraz sprzętowym wspieraniem sędziów nie tylko w badmintonie, ale i w innych sportach.

Innowacyjny wkład w rozwój automatycznych systemów wizyjnych

Rozprawa mgr inż. Michała Kopani wnosi znaczący wkład w dziedzinę automatycznej analizy wizyjnej i wspomagania decyzji sędziowskich, poprzez rozwój i implementację nowatorskich metod detekcji oraz śledzenia obiektów poruszających się z bardzo dużą prędkością. Szczególnie istotne jest opracowanie skutecznych algorytmów rozróżniania i segmentacji szybkiego obiektu (lotki) na tle zmiennego i potencjalnie złożonego tła kortu, z użyciem przetwarzania wielostrumieniowego i elementów uczenia maszynowego.

Autor nie tylko przyczynił się do lepszego zrozumienia złożonych aspektów obróbki wideo w czasie rzeczywistym (m.in. kompensacja migotania oświetlenia, obsługa częściowych zasłoneń lotki czy szybkie wyznaczenie kluczowej klatki odbicia), ale również dowiódł skuteczności zaproponowanych metod w praktyce, podczas rzeczywistych zawodów sportowych. Dzięki temu przedstawione w pracy rozwiązania stanowią nie tylko teoretyczny fundament do dalszych badań nad algorytmami czasu rzeczywistego, lecz także konkretny produkt – wdrożony system może pomagać sędziom w badmintonie w rozstrzyganiu sytuacji spornych typu „in/out”.

Zaproponowane w rozprawie innowacje dotyczą:

1. Rzadkiej konfiguracji kamer – każda obserwuje inną linię pola gry, co redukuje koszty sprzętowe i usprawnia montaż w hali.
2. Użycia hybrydowego podejścia – akumulacyjnych ramek różnicowych (odpornych na ruch tła) oraz sieci neuronowej (do szybkiej weryfikacji, gdy standardowe metody mogą zawieść).
3. Precyzyjnych technik segmentacji korka lotki z użyciem charakterystycznego ciemnego paska, co znacząco podnosi wiarygodność wskazania punktu odbicia.
4. Integracji modułu decyzyjnego, w którym – w czasie krótszym niż kilkanaście sekund – prezentowana jest sugestia „in/out” wraz z animacją wizualizującą tor lotki.

Dzięki tym rozwiązaniom automatyczne systemy wizyjne mogą być bardziej uniwersalne i skalowalne, co w przyszłości otwiera szersze możliwości adaptacji technologii w innych dziedzinach sportu (siatkówka, tenis, squash), a nawet poza nim (np. w śledzeniu obiektów przemysłowych czy dronów). Można zatem uznać, że praca mgr inż. Kopani nie tylko wyznacza nowy kierunek badań w obszarze wspomagania sędziowskiego, ale też umożliwia lepsze zrozumienie wyzwań i ograniczeń wiążących się z analizą obrazu na żywo w najbardziej dynamicznych dyscyplinach sportowych.

Oryginalny dorobek Autora i jego znaczenie

Oryginalny dorobek naukowy mgr inż. Michała Kopani, przedstawiony w recenzowanej rozprawie, koncentruje się na projektowaniu i implementacji nowatorskich rozwiązań z zakresu analizy wizyjnej i wspomagania decyzji sędziowskich w badmintonie. W swoich badaniach Autor wykazał się szerokim spojrzeniem na zagadnienia detekcji, śledzenia oraz segmentacji obiektów poruszających się z dużą prędkością, połączonym z praktycznymi

wdrożeniami i eksperymentami w realnych warunkach turniejowych. Kluczowe osiągnięcia, składające się na dorobek naukowy Autora, można podsumować następująco:

1. Rozwój nowatorskich metod usprawniających automatyczną analizę wideo i segmentację lotki:
 - a. Autor opracował hybrydowy sposób śledzenia szybkich obiektów (lotki) z wykorzystaniem akumulacyjnych ramek różnicowych, metod uczenia maszynowego i odpowiednio zaprojektowanych procedur kalibracji układu kamer.
 - b. Podkreślić należy innowacyjne podejście do wyznaczania kluczowej klatki odbicia lotki od podłoża, co jest fundamentem do dalszej interpretacji „in/out” w sytuacjach spornych.
2. Zastosowanie wyników w praktyce:
 - a. Rozwiązania zaprezentowane w rozprawie były weryfikowane w warunkach rzeczywistych (m.in. na turniejach o randze mistrzowskiej), co świadczy o dużym potencjale wdrożeniowym i przydatności opracowanych algorytmów w codziennej pracy sędziów.
 - b. Dzięki modułowej konstrukcji i zestandaryzowanym interfejsom komunikacyjnym, system może być rozbudowywany lub adaptowany do innych dyscyplin sportowych, co dodatkowo zwiększa znaczenie zaproponowanych koncepcji.
3. Współautorstwo w publikacjach naukowych prezentujących wyniki badań:

Przedstawione w rozprawie efekty prac zostały również opublikowane w cenionych czasopismach naukowych z listy Journal Citation Reports (JCR), co pozwoliło na konfrontację wyników Autora z aktualnymi trendami w badaniach nad komputerowym przetwarzaniem obrazu i analizą w czasie rzeczywistym. W szczególności warto wymienić dwa artykuły, współautorstwa M. Kopani, w których zawarto główne wyniki i idee badawcze:

 - a. Kopania M., Nowisz J., Przelaskowski A.: “Automatic Shuttlecock Fall Detection System in or out of a Court in Badminton Games—Challenges, Problems, and Solutions from a Practical Point of View”, *Sensors*, 2022, 100 pkt, IF (3,900). Artykuł szczegółowo omawia zaproponowany system detekcji miejsca upadku lotki, jego architekturę, algorytmy analizy wideo oraz wyzwania pojawiające się podczas wdrożeń.
 - b. Nowisz J., Kopania M., Przelaskowski A.: “Realtime flicker removal for fast video streaming and detection of moving objects”, *Multimedia Tools and Applications*, 2021, 70 pkt, IF (2,577). W pracy przedstawiono efektywny algorytm kompensacji migotania oświetlenia (ang. *flicker removal*), kluczowy dla poprawnej detekcji i śledzenia obiektów w halach sportowych wyposażonych w klasyczne lampy wywołujące niestabilne oświetlenie.
4. Praktyczne znaczenie badań i ich wpływ na rozwój dziedziny:
 - a. Opracowane rozwiązania znacząco przyczyniają się do rozwoju technologii wspomagających sędziowanie w sporcie, pokazując, że automatyczna analiza wideo w czasie rzeczywistym może dorównać, a nawet przewyższyć

skutecznością obserwacje ludzkie w kwestiach precyzyjnego ustalenia miejsca kontaktu lotki z podłożem.

- b. Dzięki temu dysertacja ma zarówno wysoką wartość naukową – jako zbiór oryginalnych metod analitycznych – jak i praktyczną, wskazując drogę do dalszych ulepszeń i potencjalnej adaptacji systemu w innych dyscyplinach sportowych, a nawet w obszarze monitoringu ruchu obiektów w kontekście przemysłowym lub transportowym.

Podsumowując, dorobek mgr inż. Michała Kopani wnosi nową jakość do dziedziny komputerowego przetwarzania obrazu i analizy wizyjnej ukierunkowanej na dynamiczne sytuacje sportowe. Oryginalne algorytmy śledzenia lotki, metody segmentacji i wnioski wdrożeniowe stanowią cenny wkład w rozwój badań nad systemami komputerowego wspomaganie sędziów, a zaprezentowane w rozprawie przykłady aplikacji praktycznej potwierdzają, że Autor z powodzeniem połączył teoretyczne podstawy z rzeczywistymi potrzebami współczesnego sportu.

Znaczenie poznawcze i praktyczne wkładu w dyscyplinę

Wkład mgr inż. Michała Kopani w dyscyplinę informatyki technicznej i telekomunikacji (a w szerszym ujęciu także i w inne dyscypliny związane z zaawansowaną analizą i interpretacją danych wizyjnych) ma istotne znaczenie zarówno z perspektywy poznawczej, jak i praktycznej. Praca Autora koncentruje się na rozwoju automatycznych metod detekcji i śledzenia szybko poruszających się obiektów (lotki w badmintonie) w czasie rzeczywistym, kładąc nacisk na zdefiniowanie precyzyjnych technik akwizycji i przetwarzania obrazu, w warunkach trudnych oświetleniowo, co przekłada się na lepsze zrozumienie problemów związanych z wysoką dynamiką sceny i koniecznością zachowania wysokiej dokładności pomiarowej oraz opracowanie kompletnego procesu decyzyjnego („in/out”), obejmującego kalibrację kamer, detekcję kluczowej klatki, a następnie segmentację korka lotki i wyznaczenie obszaru jej upadku w stosunku do linii referencyjnych.

Znaczenie poznawcze:

- Autor dogłębnie analizuje problemy związane z detekcją niewielkich, szybko przemieszczających się obiektów i wskazuje, jak złożone mogą być efekty rozmycia ruchu czy migotania oświetlenia w halach sportowych.
- Proponowane w pracy rozwiązania łączą techniki klasyczne (odejmowanie tła, ramki różnicowe) z wybranymi elementami uczenia maszynowego, co wzbogaca dorobek naukowy w obszarze wizyjnych systemów czasu rzeczywistego.
- Przeprowadzone badania ukazują mechanizmy weryfikacji obliczonego wyniku, zwłaszcza jeśli system ma działać w rygorze kilkunastu sekund. Dzięki temu dysertacja wnosi nowy wymiar do rozważań nad interakcją człowiek–system komputerowy.

Znaczenie praktyczne:

- Dzięki zaprojektowanej architekturze kamer, modularnemu oprogramowaniu i interfejsowi użytkownika, system może być instalowany podczas meczów i turniejów, a jego zastosowanie obniża ryzyko błędnych decyzji sędziowskich w badmintonie.
- Ponieważ metody analizy ruchu i detekcji wideo są w dużej mierze uniwersalne, istnieje potencjał użycia rozwiązań mgr inż. Kopani w sportach, w których śledzi się

niewielkie, szybko poruszające się objekty (np. piłki do squasha, tenisa stołowego czy baseballa).

- Autor pokazuje, że poprawa wiarygodności w sporze o poprawność zagrań („in/out”) przekłada się nie tylko na wyższy poziom widowiska, ale i na ograniczenie konfliktów pomiędzy zawodnikami, sędziami i kibicami.

Praca mgr inż. Michała Kopani przyczynia się zatem do ulepszenia procesów przetwarzania danych wideo w wymagających zastosowaniach sportowych, poszerzając równocześnie wiedzę o algorytmach i możliwościach technologii wizyjnych w obszarze informatyki technicznej i telekomunikacji. Dzięki temu stanowi ważny krok naprzód zarówno w badaniach akademickich, jak i w praktycznych wdrożeniach, które mają realny wpływ na rozwój systemów wspomagania decyzyjnego w sporcie.

Poziom wiedzy technicznej w rozprawie doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr inż. Michała Kopani wykracza daleko poza podstawowy zakres wiedzy technicznej, prezentując śmiało i dogłębne podejście do problematyki komputerowej analizy wideo w sporcie (badminton). Autor nie tylko kompleksowo analizuje znane wyzwania w dziedzinie przetwarzania obrazu w czasie rzeczywistym, ale również rozwija innowacyjne metody detekcji i śledzenia szybko poruszającej się lotki, efektywnie łącząc rozproszone elementy uczenia maszynowego z klasycznymi technikami wizji komputerowej.

W pracy wyraźnie widoczne jest głębokie zrozumienie aspektów praktycznych (jak choćby kompensacja migotania oświetlenia czy adaptacja systemu do zróżnicowanych hal sportowych), jak i teoretycznych (modelowanie trajektorii lotki, definiowanie kluczowej ramki z odbiciem). Rozwijane przez Autora metody podkreślają wysoki poziom zaawansowania technicznego, zwłaszcza w zakresie projektowania układów akwizycji danych (właściwe rozmieszczenie i kalibracja kamer w celu uzyskania maksymalnej dokładności przy minimalnym nakładzie sprzętowym), opracowania algorytmów śledzenia obiektu (hybrydowe połączenie akumulacyjnych ramek różnicowych i odrębnego modułu uczenia maszynowego do szybkiej walidacji bądź korekcji wyników), a także i implementacji procedur decyzyjnych w czasie rzeczywistym (weryfikacja spornych sytuacji – „in/out” – w ciągu kilkunastu sekund, z zachowaniem wysokiej niezawodności i dokładności pomiaru).

Tak szerokie i spójne potraktowanie problemu analizy wideo świadczy o dużej biegłości Autora w dyscyplinie informatyki technicznej i telekomunikacji, obejmującej zarówno elementy programistyczne (implementacje algorytmów), jak i zagadnienia stricte inżynierskie (konfiguracja sprzętu, protokoły komunikacji w systemach wielokamerowych). Trudno nie docenić przy tym faktu, że praca uwzględnia wyniki testów w warunkach rzeczywistych, potwierdzając jednocześnie trafność proponowanych rozwiązań oraz skalowalność ich wdrożenia. W efekcie rozprawa mgr inż. Michała Kopani stanowi istotny krok naprzód w wykorzystaniu zaawansowanych metod wizji komputerowej i uczenia maszynowego na potrzeby szybkiej, wiarygodnej analizy dynamicznych zjawisk w sporcie, co przekłada się na wymierne korzyści nie tylko w obszarze czysto naukowym, ale i praktycznym.

Ograniczenia i wyzwania w rozprawie doktorskiej

W rozprawie doktorskiej mgr inż. Michała Kopani można wyróżnić kilka obszarów, w których pojawiają się potencjalne ograniczenia lub wyzwania, wpływające na pełną uniwersalność i

skalę zastosowania proponowanego systemu wspomagania decyzji sędziowskich w badmintonie.

Zakres praktycznego zastosowania i adaptacji:

- Choć zaprezentowane metody i algorytmy zostały pomyślnie przetestowane w warunkach turniejowych (co potwierdza ich dojrzałość), nie wszystkie scenariusze meczowe czy różnorodne konfiguracje hal sportowych zostały w pracy omówione równie wyczerpująco. Istnieje ryzyko, że w środowiskach mocno odbiegających od typowych (np. w bardzo ciemnych halach, przy wyjątkowo nietypowym układzie kortów) wydajność systemu może odbiegać od wyników prezentowanych w rozprawie.
- Trudności może sprawiać również skalowanie rozwiązania do sytuacji, w których jednocześnie obsługuje się wiele meczów na różnych kortach, z uwzględnieniem silnych wzajemnych zakłóceń i konieczności szybkiej kalibracji kamer.

Wyzwania związane z implementacją i obsługą systemu:

- Proponowane rozwiązania są stosunkowo złożone (obejmują zarówno zaawansowaną wizję komputerową, jak i elementy uczenia maszynowego), co może być utrudnieniem dla osób niebędących ekspertami w dziedzinie przetwarzania obrazu.
- Choć Autor podkreśla interfejs dla sędziego technicznego, w rozprawie nie zostały szerzej zaprezentowane wszystkie aspekty ewentualnej dalszej komercjalizacji i obsługi systemu (np. konserwacji sprzętu, szybkich aktualizacji oprogramowania).

Ograniczenia wynikające z zakresu badań i uwarunkowań sprzętowych:

- W sekcji 4. praca zawiera pojedynczą podsekcję (4.1) dotyczącą weryfikacji wyniku przez sędziego technicznego, lecz brakuje np. dodatkowych rozdziałów opisujących holistycznie cały proces testowy (z uwzględnieniem scenariuszy awaryjnych czy błędów konfiguracji).
- W rozprawie brakuje również akapitów wprowadzających w niektórych miejscach (np. rozdz. 1 nie posiada 1.1 „Motywacja” w formie samodzielnej sekcji wprowadzającej), co sprawia, że czytelnik może wymagać dodatkowych wyjaśnień lub kontekstu.

Jakość i kompletność elementów redakcyjnych:

- Ilustracje rastrowe (np. Rys. 1 z różnymi trajektoriami uderzeń) są nierzadko niskiej jakości, co utrudnia odczytanie szczegółów.
- W niektórych rycinach występują ucięte fragmenty tekstu (np. w Rys. 16), co może wprowadzać w błąd lub wymusza domyślanie się znaczenia.
- Nieczytelnie małe czcionki w wybranych schematach (np. Rys. 30) ograniczają możliwość wygodnej analizy przez czytelnika.
- Zdarzają się fragmenty z niepełnym opisem bibliograficznym (brak konkretnych danych o wydawnictwie, numerach stron, redakcji itp.).
- Część tekstu w rozprawie nie jest wyjustowana do obu marginesów, co negatywnie wpływa na estetykę i spójność stylu redakcyjnego.

Interdyscyplinarność i prezentacja wyników:

- Wprawdzie rozprawa koncentruje się przede wszystkim na badmintonie, jednak interdyscyplinarne korzyści płynące z pracy mogłoby wzmocnić szersze omówienie potencjalnej adaptacji metod do innych dyscyplin sportowych lub innych dziedzin (np. zastosowania przemysłowe, bezpieczeństwo).
- Zaproponowane rozwiązania opierają się na konkretnych modelach dynamicznych lotki i konfiguracjach kamer, więc przeniesienie ich w niezmienionej formie do innych sportów (piłka nożna, koszykówka) czy innych obiektów (np. drony w przestrzeni

otwartej) wymagałoby wyjaśnienia różnic w kształcie, trajektorii czy prędkościach obiektów.

Możliwość rozbudowy procedur testowania i ewaluacji:

- Choć zaproponowane algorytmy zostały ocenione na reprezentatywnej próbie nagrań (zawierających sytuacje sporne), praca mogłaby zostać wzmocniona o bardziej rozbudowane badania statystyczne nad różnymi rodzajami uderzeń (z uwzględnieniem wielu poziomów rozgrywek, typów hal czy stylów gry).
- Brakuje rozbudowanej dyskusji (oprócz sekcji 4.1) na temat mechanizmów ew. debugowania i postępowania w razie błędów. Cennym dodatkiem byłoby również przedstawienie przypadków nieskutecznej detekcji i wniosków płynących z tych niepowodzeń.

Pomimo wspomnianych ograniczeń i niedostatków redakcyjnych, rozprawa mgr inż. Michała Kopani stanowi wartościowy i innowacyjny wkład w obszarze automatycznego wspomagania decyzji sędziowskich w badmintonie, oferując przy tym potencjalne rozszerzenia do innych zastosowań sportowych. Uwzględnienie powyższych uwag i rozwinięcie wskazanych aspektów podczas obrony i w kolejnych pracach badawczych pozwoliłoby na jeszcze pełniejszą prezentację oraz skalowalność zaproponowanych rozwiązań, a także uczyniłoby wyniki badań bardziej przystępnymi i uniwersalnymi dla szerszego grona odbiorców.

Ocena rozprawy w kontekście spełniania wymagań naukowych

Recenzowana rozprawa mgr inż. Michała Kopani w pełni spełnia wymagania naukowe stawiane pracom doktorskim w dyscyplinie informatyki technicznej i telekomunikacji. Dysertacja prezentuje wysoki poziom merytoryczny, co przejawia się w dogłębnym zrozumieniu zagadnień przetwarzania obrazu w czasie rzeczywistym, w szczególności w kontekście szybkiego śledzenia i segmentacji niewielkich, dynamicznych obiektów (lotek) w trudnych warunkach oświetleniowych, oryginalności zaproponowanych metod analizy wizyjnej, które znacząco usprawniają proces decyzyjny sędziów liniowych w badmintonie – cechuje je zarówno solidna podbudowa teoretyczna, jak i praktyczna weryfikacja w środowisku turniejowym, a także i umiejętnym połączeniu aspektów teoretycznych (analiza trajektorii, modelowanie momentu odbicia lotki) z praktycznymi wdrożeniami (konfiguracja wielokamerowych układów pomiarowych, kompensacja migotania oświetlenia, integracja z systemami live scoring).

Na szczególną uwagę zasługuje innowacyjny charakter pracy – Autor nie tylko rozszerzył stan wiedzy o nowe algorytmy i modele segmentacji czy śledzenia, ale też zaprezentował konkretne zastosowanie, które może przyczynić się do znacznej poprawy jakości i szybkości podejmowania decyzji w sporach typu „in/out”. Istotny wkład naukowy przejawia się także w publikacjach Autora w czasopiśmie o uznanej pozycji (m.in. *Sensors, Multimedia Tools and Applications*), gdzie opisuje on elementy systemu i uzyskane wyniki wraz z analizą ich skuteczności i potencjału rozwojowego.

Rozprawa świadczy o zaawansowanych umiejętnościach badawczych Autora: od formułowania hipotez i przeprowadzania eksperymentów w laboratorium oraz w rzeczywistych warunkach turniejowych, po opracowanie wniosków na temat dalszej adaptacji i rozwoju systemu. W rezultacie praca nie tylko stanowi wartościowy wkład w rozwój metod wizji komputerowej i uczenia maszynowego, lecz także otwiera drogę do szerszego zastosowania prezentowanych rozwiązań w innych dyscyplinach sportowych.

Biorąc pod uwagę solidne podstawy teoretyczne, nowatorskie wyniki, a także głęboką analizę praktycznych wdrożeń, można stwierdzić, że rozprawa mgr inż. Michała Kopani w pełni

realizuje cele i kryteria przewidziane dla rozpraw doktorskich: przedstawia oryginalne wyniki badań, istotne dla dalszego rozwoju nauki i praktyki inżynierskiej, a zarazem wpisuje się w globalne trendy rozwoju technologii wizji komputerowej.

Końcowe wnioski recenzji (konkluzja)

Pomimo pewnych uwag i ograniczeń przedstawionych wcześniej, oświadczam, że:

1. **Cel rozprawy** został generalnie osiągnięty. Przedstawione w pracy badania, poparte analizą wyników eksperymentów i opublikowane w recenzowanych czasopismach naukowych, potwierdzają zasadność postawionych w rozprawie hipotez i uwiarygodniają główne tezy Autora.
2. **Osiągnięcia doktoranta** zostały ujęte w rozprawie, która stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego z dziedziny nauk inżynierjno-technicznych, w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja. Zaproponowane metody i algorytmy wykazują nowatorski charakter, a ich skuteczność została potwierdzona nie tylko w warunkach laboratoryjnych, lecz także w praktycznych testach.
3. **Tematyka rozprawy** jest wyraźnie znana doktorantowi, o czym świadczy staranny dobór materiału i pogłębiona analiza zagadnień dotyczących wizji komputerowej, przetwarzania obrazu w czasie rzeczywistym i systemów wspomagania decyzji w sporcie. Dowodzą tego także publikacje związane z tematem rozprawy, w których mgr inż. Michał Kopania występuje jako współautor, co potwierdza jego dorobek naukowy w tym obszarze.
4. **Rozprawa** pokazuje również zdolność doktoranta do samodzielnego prowadzenia badań. Zaprezentowane w niej procesy projektowania, implementacji oraz ewaluacji opracowanych algorytmów świadczą o umiejętności kompleksowego rozwiązywania złożonych problemów inżynierskich i badawczych.

Dodatkowo, pragnę podkreślić **osiągnięcia mgr inż. Michała Kopani** w zakresie publikacji naukowych, które znacząco wzmacniają naukową wartość jego pracy doktorskiej. Współautorstwo (jako jeden z głównych autorów) publikacji w recenzowanych czasopismach międzynarodowych, w tym w czasopiśmie *Sensors* (100 punktów MNiSW, IF powyżej 3) i *Multimedia Tools and Applications* (70 punktów, IF powyżej 2), dowodzi wysokiego poziomu merytorycznego i aktualności prowadzonych badań. Ponadto wskazuje na umiejętność przekraczania tradycyjnych granic dyscyplin, co przekłada się na **innowacyjny charakter** zaprezentowanego rozwiązania i potencjał dla szerokich zastosowań w przyszłości.

Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2003 nr 65, poz. 595, art. 13, ust. 1) stanowi:

Rozprawa doktorska, przygotowywana pod opieką promotora, powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego lub artystycznego oraz wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej lub artystycznej, a także umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej.

Na podstawie powyższych punktów i zgodnie z wymogami art. 13 ust. 1 ww. Ustawy stwierdzam, że przedstawiona przez **mgr inż. Michała Kopanię** rozprawa doktorska spełnia wymagania określone w przepisach dotyczących nadawania stopni naukowych. Wnoszę o **przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony**.

Biorąc pod uwagę **wkład naukowy mgr inż. Michała Kopani, jego aktywny udział w życiu naukowym oraz osiągnięcia publikacyjne (w tym artykuły w czasopismach JCR, z których jeden ukazał się z Doktorantem jako pierwszym autorem), rekomenduję przyznanie wyróżnienia** jego rozprawie doktorskiej. Jestem przekonany, że takie uhonorowanie nie tylko

podkreśli dotychczasowy wkład Doktoranta w rozwój nauk inżynierjno-technicznych (szczególnie w obszarze wizji komputerowej i systemów wspomagania decyzji w sporcie), ale także zachęci go do dalszego, równie twórczego prowadzenia prac badawczych i wdrożeniowych.

Praca doktorska mgr inż. Michała Kopani – wraz z dorobkiem publikacyjnym i wykazanymi rezultatami wdrożeń – stanowi przykład ponadprzeciętnej doskonałości naukowej i praktycznej, odzwierciedlający wysokie standardy badawcze w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja. W sposób przekonujący ukazuje oryginalność rozwiązań, ich wartość aplikacyjną oraz rozległość kompetencji badawczych Autora. Tym samym rekomenduję przyznanie wyróżnienia rozprawie doktorskiej mgr inż. Michała Kopani, podkreślając jego wkład w rozwój metod komputerowego wspomagania decyzji, zwłaszcza w kontekście szybko poruszających się obiektów w sporcie.

dr hab. inż. Mikołaj Leszczuk, prof. AGH