

dr hab. inż. Ksenia Ostrowska, Prof. PK  
Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej (M10)  
Wydział Mechaniczny  
Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki

## **Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Piotra Kurowskiego „Metoda wizyjnego śledzenia trajektorii piłki w grach sportowych z uwzględnieniem zmiennego tła”**

*Podstawa opracowania:  
Uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej z dnia 28.06.2023 zlecenie Dziekana Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej  
Prof.dr hab.inż.Gerarda Cybulskiego z dnia 19.07.2023 znak: WMt.521.3.2022*

### **1. Charakterystyka ogólna**

We współczesnym świecie, następuje bardzo szybki rozwój technologii, która zaczyna dominować większość dziedzin życia. Nie zamyka się już w obrębie nauki czy przemysłu, ale wchodzi w sfery życia codziennego, od rozpoznawania twarzy w telefonie, poprzez systemy „inteligentny dom”, po zastosowanie w dziedzinach sportowych. Dynamiczny rozwój widoczny jest szczególnie wśród urządzeń dedykowanych do pomiarów optycznych, zarówno 2D jak i 3D. Ich dokładność cały czas wzrasta, natomiast czas akwizycji danych maleje. Pomiar i obrazowanie realizowane jest poprzez wyznaczenie geometrii powierzchni reprezentowanej w postaci chmury punktów w określonym czasie. Dzięki temu systemy te mogą być z powodzeniem wykorzystywane do wizualizacji i pomiarów.

**Praca doktorska mgr inż. Piotra Kurowskiego poświęcona metodzie wizyjnego śledzenia trajektorii piłki w grach sportowych z uwzględnieniem zmiennego tła wpisuje się w obszar współczesnej metrologii współrzędnościowej mieszcząc się w dyscyplinie - inżynieria mechaniczna.**

### **2. Układ i obszar merytoryczny monografii:**

Recenzowana praca liczy 188 stron i składa się z 7 rozdziałów w tym spisu treści, spisu pojęć, rysunków i tabel używanych w pracy, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz bibliografii w której zamieszczono 149 pozycji.

**Rozdział 1 - Wprowadzenie** zawiera motywację oraz cele rozprawy, w których autor zwraca uwagę na zapotrzebowanie opracowania algorytmów przetwarzania obrazu wyznaczających pozycję piłki w sekwencji obrazów 2D, uzyskanych podczas nagrania meczu siatkówki z maksymalnym błędem 1 piksela dla minimum 95% klatek, gdzie piłka jest widoczna. Dodatkowym, ważnym aspektem jest czas analizy, który nie może przekroczyć średnio 1/20 sekundy, czyli 50 ms na klatkę.

Cele naukowe sformułowane przez autora:

- opracowanie algorytmu detekcji pozycji piłki na klatkach 2D z sekwencji obrazów z rzeczywistego meczu siatkówki dla statycznej kamery, który może być zastosowany również w innych dyscyplinach sportu,
- opracowanie algorytmu analizy trajektorii 2D, pozwalającego na zwiększenie dokładności wyznaczonych pozycji piłki oraz estymację jej położenia, gdy nie została wykryta,
- opracowanie algorytmu minimalizacji wpływu migotania światła na obrazach powstałego przy akwizycji obrazu przez kamery o dużej liczbie klatek na sekundę.

Cel aplikacyjny sformułowany przez autora:

- możliwość wykorzystania algorytmów jako jedną ze składowych autonomicznego systemu challenge do wsparcia sędziów podczas meczów siatkówki opracowanego przez firmę Smartracking Sp. z o. o. Wspomniany system pozwala na autonomiczną ocenę zdarzenia dla sytuacji: -in/out; sprawdzenie przez system czy piłka odbiła się w boisku czy poza nim, -antenki; sprawdzenie przez system czy piłka w siatkówce przeleciała między antenkami czy ponad lub na zewnątrz strefy wyznaczonej przez nie, -podłożenia ręki; sprawdzenie przez system czy piłka w siatkówce dotknęła ziemi przy odbiciu przez zawodnika blisko ziemi.

**Rozdział 2 Wstęp teoretyczny** – to przegląd rozwiązań dotyczących powstawania obrazu w kamerach CCD oraz CMOS. Doktorant szeroko opisuje akwizycję obrazu cyfrowego za pomocą wspomnianych sensorów. Przedstawia też możliwe przyczyny i źródła powstawania szumów na obrazie, jednocześnie opisując ich kompensację. Rozdział zawiera też przegląd wybranych algorytmów opartych na śledzeniu obszarów wyszukujących zmiany pojawiające się w sekwencjach obrazów ( Mixture of Gaussians, The Pixel-Based Adaptive Segmenter, Sieci neuronowe).

**Rozdział 3 Przegląd rozwiązań** – zawiera szeroką analizę rozwiązań systemów i algorytmów wspomagających sędziów w różnych dyscyplinach sportowych. Autor opisał w nim zarówno istniejące algorytmy śledzenia piłki w sporcie, jak również rzeczywiste systemy. Przegląd istniejących technologii podzielony został ze względu na podstawę działania, a także rodzaju ułatwienia i utrudnienia w śledzeniu obiektu z podziałem na rodzaj sportu typu: duża prędkość piłeczki w golfie, migotanie światła w hokeju czy duża powierzchnia piłki w siatkówce. Opisane zostały również wykorzystywane algorytmy do wyznaczenia trajektorii ruchu, uwzględniając interpolację pozycji przy braku detekcji. Ostatni podrozdział przedstawia wybrane,



istniejące systemy wspierające sędziów, a oparte na: analizie obrazu 2D i stereowizji, indukcji magnetycznej, skanerach laserowych, analizie obrazu 2D, bez wykorzystania informacji 3D czy wideo powtórki.

**Rozdział 4 Koncepcja rozwiązania**– W rozdziale tym przedstawiona została koncepcja algorytmu detekcji 2D wspierającego sędziów w sporcie. Jej bazę stanowią takie elementy jak: wyznaczanie obrazu pierwszego planu, opartego na metodzie mikstur Gaussowskich, wyznaczanie konturu obiektu z obrazu pierwszego planu za pomocą cech: cyrkularności, wielkości, barwy oraz w szczególnych wypadkach dopasowywania wzorca (ang. template matching) czy analiza trajektorii za pomocą aproksymacji wielomianem. Dane wejściowe dla powstałego algorytmu to sekwencja klatek nagrana przez jedną statyczną kamerę, gdzie wraz ze wzrostem liczby klatek na sekundę rośnie końcowa dokładność algorytmu. Algorytm został podzielony na moduły: zarządzający (odpowiadający za zarządzanie kolejnymi krokami algorytmu), modelu kamery (odpowiadający za korekcję szumów związanych z akwizycją obrazu), detekcji pierwszego planu (odpowiadający za wyznaczanie obiektów należących do pierwszego planu), korekcji migotania światła (odpowiadający za korekcję szumów związanych z migotaniem światła), detekcji pozycji obiektu (odpowiadający za detekcję piłki na obrazie pierwszego planu), analizy trajektorii (odpowiadający za analizę trajektorii). Doktorant opisał każdy moduł oddzielnie, zarówno wykorzystane narzędzia programistyczne, implementacje jak i weryfikacje.

**Rozdział 5 Walidacja algorytmu** – rozdział zawiera analizę i weryfikację algorytmów opracowanych lub rozszerzonych przez dyplomanta. Według autora walidacja algorytmu została podzielona na trzy części: ilościową na sekwencjach syntetycznych, jakościową na nagraniach z rzeczywistych meczów siatkówki i jakościową dla innych dyscyplin sportowych: koszykówki i tenisa.

**Rozdział 6 System challenge**- W rozdziale został opisany i częściowo przeanalizowany system challenge do siatkówki, opracowany przez firmę Smarttracking Sp. z o. o.; którego jednym z modułów był algorytm zamodelowany w niniejszej rozprawie.

**Rozdział 7 Podsumowanie**- stanowi podsumowanie rozprawy, w której stwierdzono, że opracowane metody oraz algorytmy zostały z powodzeniem zaimplementowane do rzeczywistych rozwiązań czy systemów oraz że podjęto skuteczną próbę implementacji uniwersalnego algorytmu detekcji pozycji piłki na klatkach 2D z sekwencji obrazów z meczów w różnych dyscyplinach sportowych. W rozdziale tym autor wyznacza też kierunki dalszych prac.

Układ pracy, język oraz sposób prezentacji treści merytorycznych w niej zawartych jest zazwyczaj zrozumiały. Ponadto stronę graficzną i edytorską należy ocenić dobrze. Autor jednak czasami nadinterpretuje i nadużywa pewnych stwierdzeń, które nie są do końca zgodne z ich definicją tj. walidacja czy dokładność. Ma pewne



problemy z formułowaniem stwierdzeń technicznych czy inżynierskich, co jednak nie umniejsza jego dużej wiedzy praktycznej.

### **3. Ocena przyjętej przez Autora koncepcji naukowej oraz sposobu jej realizacji**

Zainteresowanie tematem integracji sportu z technologią rośnie z roku na rok. Wraz z dostępem do coraz nowocześniejszych technologii, w XXI wieku nastąpił znaczny rozwój różnego rodzaju systemów stosowanych w sporcie. Wykorzystanie rzeczywistości wirtualnej czy rozszerzonej wraz z analizą danych uzyskanych podczas rozgrywek sportowych, pozwala na odtworzenie i przedstawienie praktycznie każdej sytuacji podczas zawodów w wielu dyscyplinach sportowych. Wiele z tych systemów działa na zasadzie analizy obrazu, gdzie występują zakłócenia w postaci nierównomiernego tła, oświetlenia czy przesłoneń rozpoznawanych elementów.

Praca Pana mgr inż. Piotra Kurowskiego skupia się na rozwiązaniu tego problemu poprzez opracowanie nowych metod i algorytmów korekcji szumów związanych z akwizycją obrazu. Zaimplementował algorytm śledzenia trajektorii piłki 2D, gdzie w jego ramach powstały trzy podmoduły: detekcji piłki, analizy trajektorii oraz korekcji zmian intensywności światła na kolejnych klatkach.

Przedstawione w pracy zagadnienia zostały zaimplementowane z powodzeniem w rzeczywistym środowisku i w sposób empiryczny udowodniono ich skuteczność.

Analizując jednak opracowane przez autora metody i ich możliwe wykorzystanie praktyczne, narzuciły się recenzentce pewne kwestie polemiczne, które wymagają wyjaśnienia:

- Proszę przedstawić źródło podziału walidacji na ilościową i jakościową. Co rozumie Pan pod hasłem walidacji i jak się ma ono do weryfikacji, porównania czy analizy metody? Czy spotkał się Pan z walidacją metody np. modelem statystycznej spójności?
- Czy zweryfikowano system zwymiarowanym wzorcem? W rozdziale 6 podano, iż „Jako końcową dokładność całego systemu przyjęto +/- 2 mm.” W jaki sposób wyznaczono tą dokładność i co rozumiane jest tu jako dokładność?
- W jaki sposób można zagwarantować powiązanie z jednostką miar całego systemu?
- Czy podejście do meczów sportowych w dyscyplinach gdzie wykorzystywane są piłki, stosuje się inne techniki pomiarowe niż optyczne?
- Sieci neuronowe mają obecnie bardzo dużo zastosowań i są szeroko wykorzystywane niemalże w każdej dziedzinie techniki. W Pana pracy wykazał Pan, ich małą przydatność do rozwiązania postawionych celów. Jakie czynniki wpłynęły by na zmianę tej sytuacji?

Mimo wyrażonych przez recenzentkę wątpliwości wymagających wyjaśnienia praca doktorska Piotra Kurowskiego zasługuje na pozytywną ocenę, ponieważ:

- doktorant sformułował oryginalny problem badawczy polegający na opracowaniu metody wizyjnego śledzenia trajektorii piłki w grach sportowych z uwzględnieniem zmiennego tła,
- opracował algorytm detekcji pozycji piłki na klatkach 2D z sekwencji obrazów z rzeczywistego meczu siatkówki dla statycznej kamery, który może być zastosowany również w innych dyscyplinach sportu,
- opracował algorytm analizy trajektorii 2D, pozwalający na zwiększenie precyzji wyznaczonych pozycji piłki oraz estymację jej położenia, gdy nie została wykryta,
- opracował algorytm minimalizacji wpływu migotania światła na obrazach przy akwizycji obrazu przez kamery o dużej liczbie klatek na sekundę,
- zaimplementował opisane algorytmy w realnych aplikacjach i przeprowadził testy poprawności ich działania.

Powyższe dokonania dowodzą, że doktorant posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia prac badawczych oraz że rozwiązał postawiony w pracy doktorskiej problem badawczy i sformułował kierunki dalszych badań nad rozwojem zaproponowanych metod.

Autor uznał że możliwy jest dalszy rozwój przedstawionej w niniejszej pracy metody poprzez optymalizację czasową, pozwalającą na działanie w czasie rzeczywistym. Takie udoskonalenie mogłoby pozwolić na wykonywanie analiz przez system challenge w trybie ciągłym, dodatkowo szybkie śledzenie piłki mogłoby pozwolić na wyznaczanie przybliżonej trajektorii 3D w czasie rzeczywistym. Optymalizacja mogłaby się opierać na wykorzystaniu w większym stopniu implementacji na karcie graficznej, częściowej implementacji kluczowych modułów z wykorzystaniem innego, szybszego, języka programowania. Kolejnym elementem dalszych prac autor widział w uproszczeniu procedury kalibracji barwnej w celu jej automatyzacji poprzez opracowanie algorytmu automatycznego wyznaczania barw śledzonego obiektu na podstawie sekwencji z ruchem tego obiektu lub przez wykorzystanie wzorca barwnego i automatyczne wyznaczanie względem referencji macierzy transformacji barwnej kamery CCD. Zadania te powinny być zatem przedmiotem dalszych prac nad doskonaleniem proponowanych metod przez autora.

#### **4. Podsumowanie i wnioski końcowe**

Recenzowana praca ma znaczną wartość poznawczą i praktyczną w dyscyplinie Inżynieria mechaniczna. Wnosi ważne treści do problematyki metody wizyjnego śledzenia trajektorii piłki w grach sportowych. Na podstawie recenzowanej rozprawy mogę stwierdzić, że mgr inż. Piotr Kurowski zaprezentował się jako dojrzały pracownik naukowy i jest w pełni przygotowany do pracy naukowo-badawczej. Doktorant wykazał się dużą wiedzą z zakresu programowania. Rozwiązania Autora



zaimplementowano w rzeczywistym systemie challenge do siatkówki opracowanego przez firmę Smartracking Sp. z o. o. i z powodzeniem jest on wykorzystywany w sporcie do wspierania sędziów, trenerów czy zawodników.

Na wyróżnienie zasługuje też fakt, że wyniki pracy zostały opublikowane w postaci artykułów w czasopiśmie recenzowanych o zasięgu międzynarodowym: „Real-time camera pose estimation based on volleyball court view” oraz „Real-time camera pose estimation based on volleyball court view” w czasopiśmie Opto-Electronics Review

Podsumowując ocenę rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Kurowskiego pt.: „Metoda wizyjnego śledzenia trajektorii piłki w grach sportowych z uwzględnieniem zmiennego tła” stwierdzam, że:

- tematyka rozprawy kwalifikuje ją do dyscypliny naukowej Inżynieria mechaniczna,
- **praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim** zgodnie z art. 179 ust. 2 ustawy z dnia 3 lipca 2018 roku - Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669), w związku z art. 11 ust. 1, art. 14 ust. 1 pkt 1, ust. 2 pkt 1 oraz art. 20 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (tekst jednolity Dz. U. z 2017 r., poz. 1789 z późn. zm.) i **może być dopuszczona do publicznej obrony.**

Kraków 30.10.2023



*dr hab. inż. Ksenia Ostrowska, prof. PK*