

prof. dr hab. inż. Krzysztof Walczak
Katedra Technologii Informatycznych
Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu
al. Niepodległości 10, 61-875 Poznań
tel.: +48 61 639-2712
krzysztof.walczak@ue.poznan.pl
<http://www.kti.ue.poznan.pl/walczak>

Poznań, 2023-11-30

Recenzja
rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Piotra Kurowskiego
pt. „Metoda wizyjnego śledzenia trajektorii piłki w grach sportowych
z uwzględnieniem zmiennego tła”
Promotor: prof. dr hab. inż. Robert Sitnik

Zagadnienie naukowe rozpatrywane w rozprawie

Problematyka naukowa rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Kurowskiego dotyczy zagadnienia o bardzo dużym znaczeniu praktycznym w sporcie, jakim jest automatyczna analiza przebiegu wydarzeń sportowych i wspomaganie sędziów w podejmowaniu decyzji. Automatyczna analiza wydarzeń sportowych oferuje wiele korzyści. Umożliwia ona lepszą i bardziej obiektywną ocenę sytuacji przez sędziów, zwiększając przy tym wiarygodność wyników i zaufanie ze strony sportowców i widzów. Automatyczna analiza w połączeniu z odpowiednią wizualizacją umożliwia również przygotowywanie bardziej angażujących i interaktywnych transmisji telewizyjnych, co przyciąga większą liczbę widzów i przekłada się na wzrost przychodów z reklam i sponsoringu. Ponadto dokładne śledzenie przebiegu wydarzenia może być wykorzystane do usprawnienia procesów szkoleniowych i analizy gry, co jest istotne zarówno dla profesjonalnych drużyn, jak i amatorskich klubów sportowych.

W swoich badaniach mgr inż. Piotr Kurowski skupił się na śledzeniu trajektorii piłki w siatkówce za pomocą kamer wizyjnych. Automatyczna analiza trajektorii piłki w grach sportowych niesie za sobą szereg istotnych wyzwań o charakterze naukowym i technicznym. Przede wszystkim duże prędkości, jakie piłka osiąga w trakcie meczu, oraz trudno przewidywalne zmiany kierunku ruchu wywołane odbiciami i uderzeniami stanowią znaczące wyzwanie dla systemów śledzenia. Wymaga to od tego typu systemów nie tylko krótkiego czasu reakcji, ale również zdolności do precyzyjnego przewidywania trajektorii piłki. Częste przesłanianie piłki przez poruszających się zawodników stanowi kolejną trudność. Systemy muszą być zdolne do kontynuowania śledzenia piłki nawet wtedy, gdy jest ona czasowo niewidoczna, co wymaga zaawansowanych algorytmów. Zmienne tło, na którym odbywa się akcja sportowa, wprowadza dodatkowe komplikacje. System śledzenia musi być odporny na zmiany środowiska, takie jak różnorodne kolory i wzory na boisku lub hali, które mogą wpływać na dokładność detekcji piłki. Niewyraźny obraz z kamer, spowodowany szybkimi ruchami kamery lub niedoskonałościami sprzętu, wymaga zastosowania technik poprawiających jakość obrazu oraz algorytmów, które są w stanie radzić sobie z niską



rozdzielczością i rozmyciem obrazu. Ponadto trudne warunki oświetleniowe, w tym migoczące światła powszechnie używane w halach sportowych, mogą utrudniać wykrywanie i śledzenie piłki.

Te wyzwania wskazują na potrzebę rozwoju i ulepszania technologii wizyjnego śledzenia obiektów w sporcie, co stanowi ważny obszar badań z potencjalnie dużym wpływem na przyszłość branży sportowej. Rozwiązując problem wizyjnego śledzenia piłki, mgr inż. Piotr Kurowski musiał zmierzyć się z wyzwaniami dotyczącymi ogólnych metod pomiaru położenia i trajektorii poruszających się obiektów w trudnych warunkach, co stanowi istotny problem naukowy w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Zaproponowane w rozprawie rozwiązanie rozpatrywanego zagadnienia naukowego

W swojej rozprawie doktorskiej mgr inż. Piotr Kurowski przedstawił uniwersalną metodę wykrywania pozycji piłki w dwuwymiarowym obrazie na podstawie sekwencji obrazów przedstawiających rozgrywkę sportową. W swoich pracach mgr inż. Piotr Kurowski skupił się na siatkówce, jednak jak pokazują wyniki przeprowadzonych eksperymentów metoda może być stosowana w różnych dyscyplinach sportu (siatkówka, koszykówka, tenis).

Pomimo dużej popularności metod wykrywania obiektów opartych na sieciach neuronowych, mgr inż. Piotr Kurowski w swojej pracy zdecydował się na użycie algorytmów klasycznych. W mojej ocenie jest to dobre rozwiązanie biorąc pod uwagę bardzo zawężony obszar aplikacyjny (piłka w ruchu), wymaganą dużą przewidywalność i dokładność pomiaru, wymagania dotyczące krótkiego czasu analizy oraz brak odpowiednio dużych zbiorów wiarygodnych danych treningowych, które mogłyby służyć do uczenia algorytmów sieci neuronowych.

Główne cele naukowe, które zostały wskazane w rozprawie to opracowanie algorytmu detekcji pozycji piłki na klatkach 2D z sekwencji obrazów ze statycznej kamery, opracowanie algorytmu analizy trajektorii 2D pozwalającego na zwiększenie dokładności wyznaczania pozycji piłki i estymację jej położenia oraz opracowanie algorytmu minimalizacji wpływu migotania światła na pomiar. Opisane w rozprawie algorytmy były opracowywane w celu zastosowania ich jako elementów składowych systemu typu „challenge” wspierającego sędziów podczas meczów siatkówki.

Zaproponowana przez mgr. inż. Piotra Kurowskiego metoda składa się z sześciu głównych grup rozwiązań zaimplementowanych w poszczególnych modułach opracowywanego systemu: module zarządzającym, module modelu kamery, module detekcji pierwszego planu, module korekcji migotania światła, module detekcji pozycji obiektu oraz module analizy trajektorii.

Moduł zarządzający ma za zadanie optymalizację działania systemu. Zastosowane w tym module rozwiązania pozwalają skrócić czas potrzebny na analizę sekwencji dzięki wyznaczeniu zakresu klatek, dla których wykonywane jest wyznaczenie pozycji piłki oraz dzięki predykcji pozycji piłki i zawężeniu obszaru poszukiwań. Techniki zastosowane w tym module oceniam jako umiarkowanie nowatorskie, ale ważne z praktycznego punktu widzenia.



Moduł modelu kamery wykonuje operacje korygujące i minimalizujące szумы powstające przy akwizycji obrazu. W zaprezentowanym podejściu zastosowano techniki eliminacji szumu odczytu, szumu kwantyzacji, szumu prądu ciemnego oraz szumu stałego. Rozwiązania zastosowane w tym module oceniam jako standardowe.

Moduł detekcji pierwszego planu ma za zadanie detekcję na analizowanych klatkach poruszających się obiektów. Mgr inż. Piotr Kurowski wykorzystał w tym celu algorytm mikstur Gaussowskich, co jest właściwym podejściem ze względu na możliwości elastycznego modelowania tła, ciągłej aktualizacji i parametryzacji modelu. Jest to rozwiązanie typowe, dość często spotykane w algorytmach wykrywania obiektów pierwszego planu.

Moduł korekcji migotania światła ma za zadanie minimalizację wpływu zmienności natężenia oświetlenia na działanie pozostałych modułów. Oświetlenie o szybkozmiennym natężeniu jest dość powszechnie stosowane w obiektach sportowych, istotnie wpływając na rejestrowany obraz i działanie algorytmów analizy obrazu. W swojej pracy doktorskiej mgr inż. Piotr Kurowski zaproponował autorski algorytm korekcji migotania światła, który pozwala na znaczącą poprawę jakości detekcji pierwszego planu. Rozwiązania zastosowane w module korekcji migotania uważam za nowatorskie, choć z naukowego punktu widzenia problem nie jest trudny.

Moduł detekcji pozycji obiektu ma za zadanie wyznaczyć pozycję śledzonego obiektu na podstawie mapy pierwszego planu aktualnie analizowanej klatki. W tym celu kontury pierwszego planu są sprawdzane pod kątem cech charakterystycznych: wielkości, kształtu i barwy. W celu umożliwienia detekcji obiektu również wtedy, gdy jest on częściowo zakryty, algorytm został rozszerzony o drugi etap pozwalający na detekcję obiektu na podstawie jedynie jego fragmentu widocznego na obrazie. Rozwiązania zastosowane w module detekcji pozycji obiektu uważam za ciekawe z naukowego punktu widzenia.

Moduł analizy trajektorii ma za zadanie aproksymację współrzędnych obiektu za pomocą wielomianów. W celu realizacji tego zadania w warunkach dużej zmienności trajektorii obiektu poddawanego oddziaływaniom fizycznym, mgr inż. Piotr Kurowski zaproponował metodę zaawansowanej analizy trajektorii obejmującą identyfikację trajektorii cząstkowych, usuwanie zbyt krótkich trajektorii, wyliczanie punktów przecięć, interpolację oraz wygładzanie. Rozwiązania zastosowane w module analizy trajektorii uważam za bardzo ciekawe z naukowego punktu widzenia.

Istotną częścią rozprawy jest walidacja przedstawionej metody. Walidacja ilościowa została zrealizowana z użyciem syntetycznie wygenerowanych sekwencji. Walidacja jakościowa została wykonana na nagraniach z rzeczywistych meczów siatkówki oraz dwóch innych dyscyplin sportowych: koszykówki i tenisa. Walidacja ilościowa na danych syntetycznych wskazuje na średni błąd rzędu 0,5 piksela przy ponad 99% skuteczności, co z nadmiarem spełnia wymagania określone w celu rozprawy. Walidacja jakościowa na rzeczywistych danych wskazuje na skuteczność wykrycia piłki na poziomie ponad 97,7% i średni czas analizy ramki poniżej 50 ms, co również spełnia postawione wymagania. Wyniki uzyskane za pomocą zaproponowanej metody zostały porównane z wynikami uzyskanymi za pomocą kilku algorytmów opartych na sieciach neuronowych. Zarówno wyniki walidacji ilościowej,

jak i jakościowej wskazują na istotną przewagę rozwiązania zaproponowanego przez mgr. inż. Piotra Kurowskiego.

Na pozytywną uwagę zasługuje fakt, że zaproponowana w rozprawie metoda śledzenia trajektorii piłki w grach sportowych znalazła zastosowanie w komercyjnym systemie typu „challenge” firmy Smarttracking Sp. z o. o.

Podsumowując tę część opinii uważam, że mgr inż. Piotr Kurowski rozwiązał postawiony w rozprawie problem naukowy, opracowując metodę wizyjnego śledzenia trajektorii piłki w grach sportowych z uwzględnieniem zmiennego tła, spełniającą postawione wymagania odnośnie do skuteczności, szybkości i dokładności śledzenia.

Oryginalność zaproponowanego podejścia

Zaproponowaną przez mgr. inż. Piotra Kurowskiego metodę wizyjnego śledzenia trajektorii piłki w grach sportowych z uwzględnieniem zmiennego tła oceniam jako oryginalną. Potwierdzeniem oryginalności zaproponowanej metody są wysoko punktowane publikacje naukowe, w tym dwa artykuły w czasopiśmie *Opto-Electronics Review* (IF=1.6, 100 pkt. MEiN).

W przypadku pierwszego z tych artykułów pt. „*Accurate ball tracking in volleyball actions to support referees*” opisującego wcześniejszą wersję opisaną w rozprawie metody, mgr inż. Piotr Kurowski jest pierwszym autorem, co wskazuje na jego kluczową rolę w opracowaniu tego podejścia.

Analiza literatury i stanu wiedzy w rozpatrywanej dziedzinie

Mgr inż. Piotr Kurowski wykazał się w rozprawie dobrą znajomością teoretycznych podstaw wizualnego śledzenia obiektów, dostępnych rozwiązań praktycznych oraz współczesnych prac naukowych w tej dziedzinie. W rozdziale 2 rozprawy opisano model kamery oraz algorytmy śledzenia regionów. W rozdziale 3 natomiast przedstawiono algorytmy śledzenia trajektorii piłki oraz systemy wspierające pracę sędziów w sporcie. W obydwu rozdziałach znajdują się liczne odwołania do pozycji literaturowych opisujących obecny stan wiedzy.

Charakter i struktura rozprawy oraz poprawność językowa i redakcyjna

Rozprawa mgr. inż. Piotra Kurowskiego ma charakter teoretyczno-praktyczny. Struktura rozprawy jest właściwa. Na część nieoryginalną pracy składają się wprowadzenie, wstęp teoretyczny oraz przegląd dostępnych rozwiązań śledzenia piłki. Część oryginalna rozprawy obejmuje opis koncepcji rozwiązania, opis wyników walidacji ilościowej i jakościowej algorytmów oraz opis wykorzystania zaproponowanej metody w systemie typu „challenge”. Rozprawę kończy podsumowanie, w którym omówiono osiągnięte cele oraz przedstawiono dalsze kierunki prac.

Rozprawa jest napisana w języku polskim, a styl wypowiedzi jest zasadniczo dobry. Dość często zdarzają się jednak drobne błędy gramatyczne i pomyłki pisarskie. Niepotrzebnie Autor używa również kalek z języka angielskiego, np. „detektowany” w znaczeniu „wykrywany”.



Uwagi o charakterze krytycznym i dyskusyjnym

Analiza przedstawionej rozprawy doktorskiej rodzi pewne pytania i wątpliwości, które opisano poniżej.

1. W zaproponowanym przez mgr. inż. Piotra Kurowskiego podejściu trajektoria piłki jest aproksymowana w modelu 2D, w sposób który nieuchronnie prowadzi do utraty części informacji. Następnie trajektorie 2D z różnych kamer są łączone w systemie „challenge” w trajektorię 3D, która polega podobnej obróbce. Czy aproksymacja trajektorii od razu w formie 3D na podstawie oryginalnych zarejestrowanych danych przed obróbką nie prowadziłoby do poprawy dokładności działania systemu?
2. Zaproponowana metoda bazuje na szeregu rozwiązań, których celem jest skrócenie czasu analizy sekwencji wideo. O ile w niektórych przypadkach nie ma to wpływu na jakość, w innych może taki wpływ mieć. Dla przykładu, detekcja obiektu następuje na co k-tej klatce. Następnie zakres klatek do dokładnej analizy (i-j) jest wyznaczany na podstawie pierwszej i ostatniej klatki, na których śledzony obiekt został znaleziony. Przy k=4 może to oznaczać utratę nawet 6 klatek, na których obiekt jest widoczny. Czy wobec obserwowanego szybkiego wzrostu mocy obliczeniowej sprzętu komputerowego (w tym przede wszystkim kart graficznych) tego typu optymalizacje wydajności są nadal uzasadnione?
3. Moduł zarządzający przesyła pierwszych N klatek (N=20) do modułów detekcji pierwszego planu oraz korekcji migotania światła w celu nauki modeli. Dlaczego dla tych klatek wyznaczanie pozycji śledzonego obiektu nie jest wykonywane?
4. Zaproponowana przez mgr. inż. Piotra Kurowskiego metoda pozwala na parametryzację zastosowanych algorytmów. W tabeli 4.1 wymieniono 14 różnych parametrów wraz z dobranymi eksperymentalnie wartościami. Powstaje pytanie w jakich sytuacjach należy zmieniać wartości tych parametrów i czy jest możliwa pełna automatyzacja procesu doboru parametrów dla konkretnych warunków rejestracji meczu?
5. Kluczowym krokiem w zaproponowanym w rozprawie podejściu jest wyznaczenie obiektów pierwszego planu. Negatywny wpływ na ten proces może mieć zmienne w czasie oświetlenie obiektów sportowych. Czy w celu poprawy działania algorytmu i częściowego uniezależnienia się od oświetlenia nie warto rozważyć zastosowania na tym etapie kamer głębi (np. LiDAR) jako elementu wspomagającego wyznaczanie pierwszego planu?

Przedstawione powyżej uwagi mają charakter dyskusyjny i nie zmniejszają mojej ogólnie wysokiej oceny wyników naukowych osiągniętych przez mgr. inż. Piotra Kurowskiego.

Konkluzja

Biorąc pod uwagę osiągnięte wyniki naukowe oraz ich bardzo duże znaczenie praktyczne stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Piotra Kurowskiego **spełnia wymagania obowiązującej ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce** i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

