

RECENZJA

rozprawy doktorskiej kpt. mgr. inż. Piotra TURKA

**„Przetwarzanie sygnałów i danych topograficznych w głowicy
samonaprowadzania platformy latającej”**

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania recenzji rozprawy doktorskiej Pana kpt. mgr. inż. Piotra TURKA pt.: „Przetwarzanie sygnałów i danych topograficznych w głowicy samonaprowadzania platformy latającej” jest pismo z dnia 22.04.2024 r., otrzymane od Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” Wojskowej Akademii Technicznej Pana prof. dr. hab. inż. Jerzego Małachowskiego.

Przekazana do recenzji rozprawa doktorska została opublikowana przez Wojskową Akademię Techniczną (Wydział Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa, Warszawa, 2024) i obejmuje 116 stron. Promotorami rozprawy doktorskiej są: Pan dr hab. inż. Jan PIETRASIENSKI, prof. WAT oraz Pan ppłk dr inż. Witold BUŻANTOWICZ (promotor pomocniczy).

2. Przedmiot recenzji

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska obejmuje 8 ponumerowanych rozdziałów: Spis treści, Wstęp, cztery rozdziały główne stanowiące podstawę pracy (Opis problemu badawczego, Przegląd literatury, Założenia funkcjonowania głowicy samonaprowadzania platformy latającej, Realizacja badań), oraz Podsumowanie i Bibliografię.

W rozdziale 1. *Streszczenie*, Doktorant przedstawił syntetycznie zawartość rozprawy, w której główny wysiłek został skupiony na omówieniu podstaw matematycznych działania systemu wizyjnego, wspomagającego system nawigacji bezwładnościowej (inercyjnej) w określaniu parametrów ruchu platformy latającej, oraz przedstawieniu metod poprawy odporności tego systemu na zakłócenia w obrazach (otrzymywanych z kamery pokładowej) z wykorzystaniem filtracji Wienera oraz wysokościomierza laserowego (do określania głębi obrazu).

W rozdziale 2. *Wstęp*, Doktorant przedstawił główne argumenty przemawiające za potrzebą rozwoju metod zwiększających dokładność określania położenia (pozycji nawigacyjnej) obiektu latającego przez system nawigacji wizualno-bezwładnościowej, w szczególności szybko przemieszczających się dronów i rakiet manewrujących (z prędkością rzędu 200 m/s) na małej wysokości lotu ($50\text{ m} \div 150\text{ m}$), co generuje zakłócenia w postaci rozmycia obrazu.

W rozdziale 3. *Opis problemu badawczego*, Doktorant przedstawił do rozwiązania dwa problemy związane z przetwarzaniem sygnałów wizyjnych. Pierwszy dotyczy sformułowania formalnego opisu wpływu procesu filtracji rozmycia obrazów na dokładność określania położenia obiektu latającego oraz pojawiania się artefaktów związanych z filtracją. Drugi odnosi się do podatności układów wizyjnych na zakłócenia pasywne, pochodzące od ruchomych obiektów terenowych, których rzuty przedstawiają analizowane obrazy, oraz opracowania efektywnych metod minimalizacji tych błędów. W rozdziale tym, jako główny kierunek badawczy podjęty w pracy, Doktorant przedstawił przyjętą hipotezę oraz cele naukowe i użytkowe pracy, dotyczące minimalizacji negatywnego wpływu filtracji zakłóceń zawartych w przetwarzanych obrazach cyfrowych z wykorzystaniem filtracji Wienera.

W rozdziale 4. *Przegląd literatury*, Doktorant przedstawił opis algorytmów ukierunkowanych na wyznaczanie relacji pomiędzy obrazami pozyskiwanymi z głowicy obserwacyjnej, omówił wybrane zagadnienia z nawigacji wizualnej i bezwładnościowej wspomagające realizację pracy, oraz przedstawił uwarunkowania związane z rozmyciem obrazów terenu. Rozdział zawiera klasyfikację wybranych metod dopasowania obrazów (rys. 4.1.1.), opierających się na algorytmach wykorzystujących cechy lokalne obrazu, oraz szczegółowe opisy matematyczne ich działania. Na szczególną uwagę zasługuje opis metody KAZE [23] (wykorzystywanej w dalszej części pracy) oraz metody ORB, która wykorzystuje uczenie maszynowe (możliwości zastosowania sztucznej inteligencji do filtracji zakłóceń obrazu).

W rozdziale 5. *Założenia funkcjonowania głowicy samonaprowadzania platformy latającej*, Doktorant przedstawił układ samonaprowadzania platformy latającej, obejmujący blok nawigacji obrazowej, bank danych (zawierający cyfrową bazę obrazów referencyjnych) oraz blok nawigacji bezwładnościowej (rys. 5.1.). Przedstawił koncepcję funkcjonowania układu na etapie realizacji misji (w którym platforma latająca jest wyposażona w układ nawigacji wizualno-bezwładnościowej i wysokościomierz laserowy) oraz na etapie planowania misji (w którym ustalana jest trasa lotu platformy i wprowadzane są punkty nawigacyjne oraz dowiązane topograficznie do nich obrazy referencyjne). Rozdział zawiera schemat funkcjonowania układu (rys. 5.5.) oraz schemat funkcjonowania algorytmu KAZE (rys. 5.6.).

W rozdziale 6. *Realizacja badań*, Doktorant w pierwszym etapie przedstawił sposób i wyniki badań w zakresie wpływu wysokości obiektów terenowych na dokładność określania położenia dla płaskiego modelu terenu oraz odporności metod nawigacji wizualno-bezwładnościowych na zakłócenia pasywne, spowodowane ruchem obiektów terenowych. Następnie, w ramach badania wpływu ruchu platformy latającej oraz parametrów filtracji Wienera na dokładność określania położenia, Doktorant przedstawił wyniki badań dla: wpływu rozmycia (spowodowanego lotem platformy na małej wysokości z dużą prędkością), wpływu błędu oszacowania rzeczywistego kąta rozmycia ($\Delta\Theta$) oraz wpływu błędu oszacowania rzeczywistej liczby pikseli ulegających rozmyciu (ΔL) na dokładność dopasowania obrazów po ich rekonstrukcji (po filtracji rozmycia za pomocą filtra Wienera z funkcją PSF). Rozdział zawiera zidentyfikowane przez Doktoranta parametry macierzy wewnętrznej kamery (tab. 6.1), wartości kątowych i położenia kamery w układzie globalnym (tabl. 6.2) oraz wartości średniego błędu reprojekcji (rys. 6.1.) uzyskane w procesie kalibracji.

W rozdziale 7. *Podsumowanie*, Doktorant ocenił problem badawczy związany z dwoma zagadnieniami podjętymi w dysertacji: wpływem zjawiska rozmycia obrazu (przy wykorzystaniu metod dopasowania obrazów z wykorzystaniem ich cech lokalnych i filtracji Wienera) oraz wpływem obserwacji ruchomych obiektów terenowych na dokładność określania położenia platformy latającej. Wskazał na zaproponowane w pracy autorskie rozwiązanie sprzętowo-programowe, które zmniejsza wpływ zjawiska rozmycia obrazu i jego zmian przez ruchome obiekty terenowe, przez co zwiększa dokładność określania położenia. Jako istotne utrudnienie dla działania algorytmów porównywania i dopasowania obrazów Doktorant wskazał rejestrację obrazów bieżących w warunkach środowiskowych odmiennych od obrazów stanowiących wzorzec terenowy. Do rekonstrukcji obrazów rozmytych wykorzystał on algorytm z filtrem Wienera i jego funkcją PSF, której parametry estymowane są na podstawie parametrów kinematycznych platformy latającej (m.in. prędkości, wysokości i kierunku lotu). Doktorant ocenił, że jego autorska metoda, bazująca na estymacji wariancji danych wejściowych, pozwala w procesie iteracyjnym na wyznaczanie najkorzystniejszych parametrów filtra Wienera. Otrzymane wyniki pracy potwierdzają przyjętą hipotezę pracy.

W rozdziale 8. *Bibliografia*, Doktorant umieścił 71 pozycji według kolejności cytowania w rozprawie, w tym 1 pozycja internetowa (ścieżka <https>). Bibliografia obejmuje tylko 18 pozycji wydanych przed 2000 rokiem oraz 53 pozycje po 2000 roku. Bibliografia zawiera 4 pozycje polskojęzyczne (w tym 2 publikacje Doktoranta) oraz aż 67 pozycji zagranicznych.

3. Uwagi ogólne

Rozprawa doktorska dotyczy wizyjno-bezwładnościowych systemów nawigacji VINS (ang. Visual Inertial Navigation System), obecnie dynamicznie rozwijanych dla bezpilotowych statków powietrznych (dronów transportowych i bojowych). Głównym elementem naukowym pracy jest opracowanie metody polepszenia jakości obrazów terenu otrzymywanych z kamery pokładowej (obciążonymi zakłóceniami w postaci m.in. rozmycia) i wykorzystywanych do dopasowania z obrazami wzorcowymi, dowiązanymi topograficznie do współrzędnych mapy.

Opracowana przez Doktoranta metoda wchodzi w obszar systemów nawigacji wizualno-porównawczej i jest dedykowana do korekcy bazowego systemu nawigacji w postaci systemu nawigacji bezwładnościowej (inercjalnej). Stanowi ona rozwinięcie dotychczas stosowanych metod w postaci korelacyjno-ekstremalnych systemów nawigacji (KENS). W typowej konfiguracji, stosowanej m.in. w postaci systemu TERCOM (pociski manewrujące typu Tomahawk), systemy te wykorzystują informacje o polu ukształtowania terenu wyznaczone na podstawie sygnałów z radiowysokościomierza i wysokościomierza barometrycznego. W zależności od wykorzystywanych metod analizy rozróżnia się systemy punktowe (KENS-1), liniowe (KENS-2) i obszarowe (KENS-3). Pod względem sposobu przetwarzania danych rozróżnia się systemy analogowe i cyfrowe (bez pamięci i z pamięcią), zawierające wzorce odniesienia. Systemy KENS mogą wykorzystywać informację o rzeźbie terenu, rozkładzie anomalii pola grawitacyjnego i pola magnetycznego, a także innych źródeł. Jednym ze źródeł informacji jest informacja obrazowa, która jest obecnie dynamicznie rozwijającą się dziedziną systemów VINS z uwagi na przydatność w zmiennych warunkach m.in. działań zbrojnych.

Algorytmy wykorzystujące cechy lokalne opisane w pracy są obecnie podstawą analizy obrazowej w układach nawigacji wizyjnej i wizualno-bezwładnościowej. Stosowany jest w nich statystyczny proces dopasowywania cech lokalnych, którego przeznaczeniem jest wyznaczenie relacji pomiędzy płaszczyzną obrazową i obserwowanym terenem. Pomimo wielu zalet algorytmy te narażone są na ograniczenie ich skuteczności. Ograniczenie to objawiać się może poprzez niedostateczną dla zadania nawigacji precyzję dopasowania obrazów, brak możliwości dopasowania lub dopasowania niepoprawne. Z analizy wykonanej przez Doktoranta wynika, że czynnikami ograniczającymi skuteczność są m.in. zmiana kontrastu wynikająca z obserwacji w różnych warunkach nasłonecznienia, rozmycie obrazu wynikające z ruchu głowicy samonaprowadzania w czasie nawigacji, zmiany w topologii obiektów w terenie będące następstwem ich wzajemnego ruchu.

4. Ocena merytoryczna osiągnięć przedstawionych w pracy

Oceniam, że cenną zaletą recenzowanej pracy jest prezentacja uporządkowanej wiedzy w zakresie algorytmów wyznaczania relacji między obrazami terenu, wykorzystywanych w procesie ich dopasowania i określenia parametrów nawigacyjnych platformy latającej (położenia i prędkości lotu). Klasyfikację współcześnie stosowanych metod dopasowania obrazów Doktorant przedstawił na rys. 4.1.1. Do rozwiązania problemu przyjętego w pracy Doktorant wykorzystał algorytm KAZE, w którym uogólnianie obrazu oparte jest na nieliniowej dyfuzji w kolejnych oktawach skali, a anizotropowe rozmywanie obrazu uzależnione jest od lokalnego rozkładu luminancji. Funkcja ta umożliwia rozmywanie obrazu z zachowaniem krawędzi struktur, co daje możliwość wykrywania większej liczby cech charakterystycznych w różnych skalach obrazu. Elementem wspólnym opisanych metod jest etap porównania określonych cech charakterystycznych, wykrytych na obrazie rejestrowanym i referencyjnym. Prawidłowa lokalizacja dopasowanych do siebie tych cech jest podstawą wyznaczenia poprawnej macierzy transformacji pomiędzy obrazami. Do weryfikacji tej poprawności Doktorant użył metody statystycznej RANSAC. W ten sposób Doktorant zbudował model pozwalający na wykrywanie cech lokalnych w rejestrowanych obrazach oraz ich dopasowanie i dowiązanie topograficzne, co stanowi podstawę analizy obrazowej wykorzystywanej w wizualno-bezwładnościowych systemach nawigacji. Doktorant wskazał na czynniki ograniczające skuteczność wykrywania cech charakterystycznych, do których zaliczył m.in. zmiany kontrastu wynikające z różnych warunków nasłonecznienia dla obrazów rejestrowanych i referencyjnych, rozmycie obrazu wynikające z ruchu platformy powietrznej w zakresie kierunku i prędkości lotu na małej wysokości nad terenem, zmiany w topologii obiektów w terenie wynikające z ruchu tych obiektów.

W rozprawie Doktorant wykazał, że na podstawie zbioru wydzielonych cech i dopasowanych punktów w porównywanych obrazach możliwe jest wyznaczenie parametrów transformacji pomiędzy obrazami oraz określenie współrzędnych położenia kamery zabudowanej na platformie latającej. Znając bowiem parametry modelu opisującego transformację obrazu w kamerze systemu wizyjnego oraz jej położenie i orientację względem terenu możliwe jest przypisanie punktom obrazu referencyjnego współrzędnych położenia kamery w układzie związanym z terenem, a o to chodzi w systemach nawigacji wizualno-bezwładnościowej.

Jako osiągnięcie Doktoranta zaliczam określenie i podanie w pracy macierzy wewnętrznej kamery (tabela 6.1), charakteryzującej zniekształcenia obrazowe wprowadzane przez kamerę, oraz macierzy zewnętrznej kamery (tabela 6.2), charakteryzującej jej położenie i orientację

w układzie odniesienia związanym z terenem. Model procesu kalibracji, poprzez oszacowanie błędów reprojekcji obrazu (rys. 6.1), umożliwia poprawę dokładności odwzorowania rzeczywistych obiektów na ich rzuty na płaszczyznę obrazu. Dzięki parametrom zawartym w macierzy wewnętrznej możliwe jest korygowanie zniekształceń, co ma istotny wpływ na możliwość wyznaczenia homografii pomiędzy analizowanymi obrazami.

Następnym osiągnięciem Doktoranta, wysoko ocenianym przeze mnie, jest określenie wpływu wysokości obiektów terenowych na dokładność określania położenia dla płaskiego modelu terenu, poprzez wykorzystanie wzorców obrazu w środowisku symulacyjnym ze strukturami Voronoi, które generowane były losowo i stanowiły źródło cech obrazowych w procesie ich dopasowywania na obrazach rejestrowanym i referencyjnym. Wynikiem tych badań jest określona przez Doktoranta charakterystyka znormalizowanego współczynnika zniekształcenia pomiaru przemieszczenia dla różnej wysokości obiektów terenowych (rys. 6.1.3). Wyznaczenie tej charakterystyki umożliwia opracowanie metody filtracji cech odpowiadających obiektom terenowym o wysokości przekraczającej wyznaczony próg i zwiększenia dokładności określania położenia platformy latającej przy wykorzystaniu modelu transformacji homograficznej. Otrzymane wyniki badań Doktorant zweryfikował w badaniach rzeczywistych, przy wykorzystaniu układu wizyjnego umieszczonego na platformie latającej, którego oś optyczna była skierowana wzdłuż wektora przyspieszenia ziemskiego.

Kolejnym osiągnięciem Doktoranta jest opracowanie modelu rozszerzonego filtra Kalmana, w którym zaproponował ocenę dystansu Mahalanobisa do odrzucania pomiarów odstających dla wysokościomierza laserowego zamontowanego na platformie latającej, oraz metody rzutowania obrazu z kamery na powierzchnię wirtualnej płaszczyzny obserwacji, która umożliwia odrzucanie cech dla obiektów poruszających się szybciej niż wynika to z rzutu prędkości platformy latającej na płaszczyznę obserwacji przy wykorzystaniu zależności (97).

Istotnym dla pracy osiągnięciem Doktoranta jest określenie przebiegu znormalizowanej liczby wykrywanych cech obrazowych w funkcji wielkości rozmycia (rys. 6.3.6) oraz przebiegu znormalizowanej liczby wykrywanych cech obrazowych w funkcji rozmiaru parametrów filtra Wienera wykorzystywanego do ponownego wyostrenia obrazu (rys. 6.3.4) jako wyników badań wpływu ruchu platformy latającej na dokładność określania jej położenia. Wyniki tych badań zaowocowały opracowaniem przez Doktoranta autorskiego algorytmu wyznaczania parametrów filtra Wienera w postaci funkcji PSF w oparciu o estymowane w układzie bezwładnościowym parametry ruchu platformy latającej (tabela 6.3.1). Jego zastosowanie umożliwia filtrację rozmycia obrazu i jego rekonstrukcję do postaci

umożliwiającej dalsze jego przetwarzanie w procesie dopasowania obrazów. Wybór filtra Wienera do korekcji rozmycia obrazu Doktorant uzasadnił jego prostotą oraz możliwością zastosowania w układzie działającym w czasie rzeczywistym, co jest niezwykle ważne dla nawigacji pocisków manewrujących przemieszczających się z prędkościami rzędu 200 m/s.

W ramach badania wpływu parametrów funkcji filtracji PSF na dokładność dopasowania obrazów rozmytych Doktorant wyznaczył aproksymacje charakterystyk błędu dopasowania (rys. 6.3.2.6) wywołanego błędem oszacowania kierunku rozmycia w postaci zależności (128) i (129) oraz charakterystyk błędu dopasowania (rys. 6.3.3.10) wywołanego błędem oszacowania liczby rozmytych pikseli w postaci zależności (134) i (135). Uogólnione postaci tych charakterystyk Doktorant przedstawił w postaci zależności (143) i (144). Określenie przez Doktoranta rozkładu funkcji błędu dopasowania obrazów (w zakresie mediany i średniego błędu dopasowania) oraz wariancji estymat parametrów filtra Wienera umożliwia minimalizację otrzymywanego błędu dopasowania przy wykorzystaniu zależności (153). Zaprezentowane w pracy przypadki potwierdziły możliwość optymalizacji parametrów filtra Wienera dla danych wejściowych w postaci estymowanych zmiennych losowych opisujących parametry ruchu platformy latającej. Doktorant, jako kryterium optymalizacji, przedstawił poszukiwanie minimum zależności (153), zaś ostateczną postać ogólnego opisu mediany błędu dopasowania obrazów przed i po filtracji korygującej rozmycie opisuje zależność (157). Otrzymane wyniki potwierdziły hipotezę naukową pracy, że możliwa jest minimalizacja negatywnego wpływu zastosowania filtracji Wienera na dokładność dopasowania obrazów przy obciążonych błędem danych wejściowych do tego procesu.

Do najistotniejszych wyników pracy, stanowiących jednocześnie najważniejsze dokonania Doktoranta, zaliczam:

1. Opracowanie metody kompensacji błędów określania położenia platformy latającej przy niepełnej informacji o głębi obserwowanej sceny przedstawiającej obraz terenu. Metoda może być stosowana do nawigacji lotniczej w terenie względnie płaskim i pozwala na użycie wysokościomierzy, które są zazwyczaj tańsze od radarów i lidarów.

Znaczenie tego osiągnięcia wynika z faktu, że nawet punktowa znajomość głębi sceny oraz dostęp do aktualnie estymowanych w układzie wizualno-bezwładnościowym parametrów ruchu platformy latającej pozwala na filtrację cech obrazowych w odniesieniu do prędkości obserwowanych na aproksymowanej płaszczyźnie obiektów naziemnych i prędkości samego układu obserwacji. Autorski algorytm oparty jest o rozszerzony filtr Kalmana. Pozwala on na estymowanie odległości do terenu z uwzględnieniem możliwości występowania zakłóceń

w postaci elementów pokrycia terenowego, które ze względu na swoją wysokość są odrzucane. Uzyskiwana płaszczyzna odniesienia, stanowiąca model terenu, wykorzystywana jest także w procesie odrzucania cech obrazowych przypisanych obiektom naziemnym poruszającym się w przestrzeni między kamerą a obserwowanym terenem.

2. Sformułowanie autorskiego modelu opisu wpływu błędów przyjętych parametrów filtra Wienera na jakość dopasowania obrazów. Jako kryterium oceny jakości Doktorant zaproponował średnią odległość cech na dwóch porównywanych obrazach.

Znaczenie tego osiągnięcia wynika z faktu, że w sytuacji, gdy obraz rozmyty odwzorowuje ten sam fragment przestrzeni i położenie kamery jest tożsame dla obu obrazów, to wartość średniej odległości cech na dwóch porównywanych obrazach w przypadku dopasowania powinna wynosić zero. Błędy w parametrach filtra Wienera wynikają z niepewności parametrów nawigacyjnych uzyskiwanych z układu bazowego. Niepewność ta zwiększa się w czasie lotu. Opracowany model pozwala na analizę zagadnienia wpływu błędów przyjętych parametrów filtra Wienera na jakość dopasowania obrazów dla różnych niepewności oszacowania parametrów nawigacyjnych (błąd kąta kursu, błąd modułu prędkości) oraz różnych wartości rozmycia pierwotnego. Błąd modułu prędkości wpływa na wartość estymowanej liczby pikseli podlegającej rozmyciu. Błąd kursu wpływa na kierunek rozmycia.

3. Opracowanie metody minimalizacji negatywnego wpływu błędów modułu prędkości i błędów kursu na jakość dopasowania obrazów. Zwiększanie dokładności dopasowania obrazów pozwala na zwiększenie precyzji korekt nawigacyjnych. Autorska metoda pozwala w procesie iteracyjnym na wyznaczenie najkorzystniejszych parametrów filtra Wienera przy dostępnej informacji o wariancji danych wejściowych.

Znaczenie tego osiągnięcia wynika z faktu, że ze względu na asymetrię wyznaczonej w pracy charakterystyki błędu dopasowania dla różnych wartości argumentów ΔL i $\Delta \theta$ możliwe jest dostosowanie parametrów funkcji korekcji PSF (stanowiącej jądro filtra Wienera) korygującej efekt rozmycia do aktualnej niepewności oszacowania parametrów wektora prędkości platformy latającej, uzyskiwanej z układu bezwładnościowego. Niepewność oszacowania można przewidywać na podstawie opisów katalogowych wykorzystywanych czujników. Jednym z typowych parametrów, które opisują błędy takich czujników jest „dryf” sygnału wyjściowego w czasie. Dzięki zaproponowanemu rozwiązaniu (modelowi optymalizacji) możliwe jest efektywne wykorzystanie filtra Wienera dla szerszego zakresu niepewności, przy kontrolowanym poziomie błędu dopasowania obrazów.

5. Mankamenty i niedociągnięcia pracy

Rozprawa doktorska posiada także nieznaczące mankamenty i niedociągnięcia, które nie umniejszają jednak wartości merytorycznej całej pracy, która jest jednoznacznie pozytywna.

Do głównych niedociągnięć i mankamentów pracy zaliczam: dominowanie wyników symulacyjnych nad wynikami z badań rzeczywistych (co może wynikać z faktu, że Doktorant posiadał ograniczone możliwości organizacyjne realizacji przedstawionych badań w warunkach rzeczywistych), brak wyników badań z realizacji na platformie rzeczywistej (ograniczenia mogą wynikać z faktu, że Doktorant zaimplementował filtr Wienera bazujący na stałych wartościach funkcji PSF na wykorzystywanej platformie sprzętowej), brak rozszerzenia optymalizacji o przypadki, w których stosunek sygnału do szumu nie jest stały i bardziej zbliżony do warunków rzeczywistych (opracowana metoda optymalizacji wartości PSF zakładała stały stosunek sygnału do szumu), brak testów w układzie sprzężenia zwrotnego z platformą latającą realizującą zakładany proces samonaprowadzania (zastosowane w pracy modele nawigacji wymagają przyszłych testów w układzie sprzężenia zwrotnego z platformą latającą realizującą zakładany proces samonaprowadzania).

Szczegółowe moje uwagi merytoryczne dotyczą zaprezentowanych w pracy wzorów: dla metody SIFT, do opisu cechy charakteryzującej kierunek rozmycia obrazu, Doktorant przedstawił nieprawidłową postać zależności matematycznej opisującej funkcję arcus tangens orientacji (wzór (9), str. 12 – wyraz wolny powinien być w liczniku).

W pracy jako model referencyjny opisujący estymowane parametry nawigacyjne platformy latającej, w tym błędy czujników bezwładnościowych, Doktorant przyjął model nie własny, ale oparty o estymatory podane w publikacji [42]. Jest to wystarczające, choć prace wzbogaciłyby rzeczywiste pomiary wykonane w ramach badań własnych. Zauważalny jest też ograniczony zakres badań eksperymentalnych, a przedstawione w pracy wnioski bazują przede wszystkim na wynikach badań symulacyjnych. Skutkiem takich ograniczeń jest przyjęcie uproszczonego modelu błędów systemu nawigacji inercyjnej (jako systemu bazowego), określonego zależnością (37). Przyjęty w pracy model błędów ma charakter liniowy, choć rzeczywiste systemy nawigacji bezwładnościowej posiadają błędy o charakterze nieliniowym, których przebiegi zawierają oscylacje związane z oddziaływaniem wahadła Schulera (zarówno w systemach kardanowych jak i bezkardanowych).

Wykorzystanie w pracy metody filtracji Wienera, zamiast nowszych algorytmów, wymagało od Doktoranta określenia modelu rozmycia obrazu, co wymagało dodatkowych badań.

Skutkiem takiego wyboru było pojawienie się zjawiska występowania jasnych i ciemnych plam wokół krawędzi elementów analizowanego obrazu, co jest następstwem przetwarzania sygnału z wykorzystaniem prostokątnego filtra dolnoprzepustowego w analizie widmowej.

Zbyt ubogo Doktorant przedstawił układ samonaprowadzania platformy latającej (jako głowicy samonaprowadzania), w szczególności w odniesieniu do całego procesu przetwarzania informacji w systemie nawigacji wizualno-bezwładnościowej (podany został tylko schemat funkcjonowania algorytmu wizyjnego KAZE na rys. 5.6), a przedstawiony schemat funkcjonowania układu jako głowicy (rys. 5.5) byłby bardziej czytelny, gdyby został opatrzony szczegółowym komentarzem.

Doktorant nie rozszerzył też w rozprawie opisu swojego istotnego udziału w projekcie NCBiR realizowanym w latach 2018÷2021, dotyczącym opracowania i budowy układu przetwarzania i rozpoznawania obrazów terenu w czasie rzeczywistym do systemów rozpoznania i samonaprowadzania (jest tylko wzmianka na str. 38, że Doktorant był współautorem oprogramowania w zakresie planowania tras, przetwarzania obrazów cyfrowych i generacji danych referencyjnych, ale bez przedstawienia szczegółów istotnych z punktu widzenia wkładu własnego Doktoranta w aspekcie naukowym i użytkowym).

Dodatkowym, dającym się łatwo zauważyć, ograniczeniem pracy jest brak wyników badań rzeczywistych (eksperymentalnych) w odniesieniu do całego algorytmu przetwarzania informacji obrazowej, przedstawionego na schemacie funkcjonowania układu nawigacji wizualno-bezwładnościowej i korekcyjnej (Rys. 5.5).

Zauważone przeze mnie błędy edycyjne występujące w pracy, nie mające istotnego wpływu na jej ocenę merytoryczną, obejmują następujące uwagi:

- na stronie 29 została użyta forma osobowa „wyznaczamy” zamiast formy bezosobowej;
- na stronie 32 błędnie wpisany numer rysunku w tekście (Rys. 4.2.1);
- na stronie 42 błędnie wpisany numer rysunku w tekście (Rys. 6.1);
- na stronie 38 niepoprawne oznaczenia kątów orientacji przestrzennej platformy latającej (pochylenia, przechylenia i odchylenia);
- na stronie 39 (Rys. 5.5) niepoprawna nazwa dla algorytmu nawigacji obrazowej, która nie jest nawigacją zliczeniową;
- na stronie 48 występuje określenie „ilość” zamiast „liczba” cech (cechy są policzalne);

- na stronie 50 występuje błędna numeracja tabeli (jest 6.2 a powinno być 6.2.1);
- na stronie 51 występuje błędna numeracja tabeli (jest 6.2 a powinno być 6.2.1);
- na stronie 53 występuje błędny opis do zależności (110) (jest „Wariancja prędkości” a powinno być „Wariancja położenia”);
- na stronie 56 została użyta forma osobowa „tworzymy” zamiast formy bezosobowej;
- na stronie 58 występuje błędna numeracja tabeli (jest 6.2.1 a powinno być 6.2.2);
- na stronie 59 występuje błędna numeracja tabeli (jest 6.2.1 a powinno być 6.2.2);
- na stronie 60 występuje błędna numeracja tabeli (jest 6.2.2 a powinno być 6.2.3);
- na stronie 60 brak przywołania tabeli 6.2.2 (6.2.3) w tekście rozprawy;
- na stronie 67 występuje określenie „ilość” zamiast „liczba” cech (cechy są policzalne);
- na stronie 71 występuje określenie „ilość” zamiast „liczba” cech (cechy są policzalne);
- na stronie 81 występuje błąd w zależności (128) – drugi człon w równaniu powinien być liniowy a jest kwadratowy (tj. podniesiony do potęgi drugiej);
- na stronie 84 niepotrzebny wyraz „oraz” w ostatnim akapicie;
- na stronie 87 w opisie rys. 6.3.3.6 prawidłowe wartości błędu to 6, 9 i 14 (jest 1 i 3);
- na stronie 88 występuje błędna numeracja rysunku (jest 6.3.3.9 a powinno być 6.3.3.8);
- na stronie 90 występuje błędna numeracja przywołania tabeli w tekście (jest 6.3.3 a powinno być 6.3.3.1);
- na stronie 92 występuje niejasny opis danych przedstawionych na rysunku 6.3.3.10;
- na stronie 107 występuje błędna numeracja przywołanych tabel (jest 1-10 a powinno być 6.3.3.4 ÷ 6.3.3.13).

Dodatkowo stwierdziłem w pracy nieliczne błędy literowe a także: brak streszczenia w języku angielskim, brak wykazu najważniejszych skrótów i oznaczeń użytych w pracy (które ułatwiłyby czytelność całej pracy), brak wykazu rysunków i wykazu tabel (zalecane), stosowanie różnych szablonów numeracji wzorów matematycznych, brak podsumowania podrozdziałów 6.3.1, 6.3.2, 6.3.3 (jeśli Doktorant chciałby zachować konsekwentnie przyjętą w pracy zasadę podsumowania każdego podrozdziału).

Zagadnienia wymagające wyjaśnienia podczas obrony publicznej:

1. Omówić klasyfikację wybranych metod dopasowania obrazów z uwzględnieniem ich zalet i wad (w których z nich jest możliwość zastosowania technologii sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego).
2. Omówić główne etapy przetwarzania informacji (sygnałów nawigacyjnych i obrazów) w opracowanej metodzie wykorzystującej algorytm KAZE oraz filtrację Wienera (podać kolejne etapy i główne funkcje w procesie korekcji błędów dopasowania obrazów).
3. Omówić możliwości realizacji badań rzeczywistych (eksperymentalnych) w odniesieniu do całego algorytmu przetwarzania informacji obrazowej, przedstawionego na schemacie funkcjonowania układu nawigacji wizualno-bezwładnościowej i korekcyjnej (rys. 5.5).
4. Omówić zalety i wady filtracji Wienera w odniesieniu do filtracji rozmycia obrazów rejestrowanych w układzie nawigacji wizualno-bezwładnościowej, dedykowanego dla szybko przemieszczających się platform latających (rakiet manewrujących i dronów).
5. Omówić możliwość zbudowania zasobnika nawigacyjnego z systemem nawigacji wizualno-bezwładnościowej oraz porównać z podobnymi systemami stosowanymi w lotnictwie wojskowym (m.in. zasobnikiem LANTIRN na samolotach F-16).
6. Omówić możliwość zastosowania systemu nawigacji wizualno-bezwładnościowej w lotnictwie cywilnym (m.in. drony medyczne, drony transportowe, drony bojowe).
7. Wyjaśnić dane zaprezentowane na rys. 6.3.3.10 oraz najważniejsze wnioski z nich wynikające w odniesieniu do opisu podanego w tekście pracy (na stronach 92 i 93).

Szczególnie ciekawe byłoby ustosunkowanie się Doktoranta do możliwości i sposobu wykorzystania lidarów do nawigacji wizualno-porównawczej dla platformy latającej z układem samonaprowadzania. Według dostępnych danych, ta metoda teledetekcji, wykorzystująca światło w postaci pulsacyjnego lasera do pomiaru odległości od wybranego obiektu, umożliwia otrzymywanie precyzyjnych, trójwymiarowych zbiorów informacji m.in. o kształcie terenu i charakterystyce jego powierzchni. Jest ona wykorzystywana do tworzenia dokładniejszych map linii brzegowych, cyfrowych modeli wysokości do zastosowania w systemach informacji geograficznej, do pomocy w operacjach reagowania kryzysowego i do wielu innych zastosowań. Obecnie jest ona wykorzystywana w szerokim zakresie działań związanych z zarządzaniem gruntami i planowaniem, w ocenie różnego rodzaju zagrożeń geologicznych (m.in. osuwisk i powodzi), w leśnictwie, kartografowaniu geologicznym oraz badaniach rozlewisk i rzek. Czy dla tej technologii zachodzi zjawisko rozmycia oraz jakie mogłyby być algorytmy określania położenia i prędkości platformy latającej?

6. Podsumowanie i wnioski

Podsumowując, należy stwierdzić, że recenzowana rozprawa doktorska ma charakter głównie teoretyczny, choć bazuje także na pomiarach eksperymentalnych. Zajmuje się tematyką wizyjno-bezwładnościowych systemów nawigacji. Zagadnieniem badawczym analizowanym w pracy stanowi rozmycie obrazu terenu w funkcji prędkości ruchu platformy latającej (w postaci manewrującego pocisku raketowego lub szybko poruszającego się drona), które stanowi istotny czynnik zmniejszający dokładność nawigacji wizualno-porównawczej. Przyjęte zadanie badawcze stanowi opracowanie metody korekcji systemu bazowego (np. systemu INS) w zakresie wyznaczania położenia i prędkości ruchu platformy latającej. Propozycją Doktoranta, zaprezentowaną i przebadaną w ramach pracy, jest zastosowanie filtracji Wienera do minimalizacji rozmycia obrazów pozyskanych z kamery pokładowej.

W recenzowanej rozprawie doktorskiej zostały określone i rozwiązane dwa główne problemy badawcze. Pierwszy problem dotyczył wpływu rozmycia obrazu, spowodowanego ruchem platformy latającej, na dokładność określania położenia platformy przy wykorzystaniu filtracji Wienera do korekcji rozmycia i algorytmów dopasowania obrazów na podstawie ich cech lokalnych. Drugi problem dotyczył wpływu ruchomych obiektów terenowych na zniekształcenia obrazu i dokładność określania położenia platformy latającej z kamerą. Oba problemy Doktorant rozwiązał osiągając pozytywne wyniki w postaci algorytmu filtracji i dopasowania obrazów dedykowanego dla układu nawigacji wizualno-bezwładnościowej.

W zrealizowanej pracy Doktorant osiągnął przyjęte cele naukowe i użytkowe, w tym:

- opracował metodę kompensacji błędów określania położenia platformy latającej przy niepełnej informacji o głębi obserwowanej sceny przedstawiającej obraz terenu poprzez opracowanie rozszerzonego filtra Kalmana i zastosowanie wysokościomierza laserowego;
- sformułował ogólny model opisu wpływu różnych filtrów Wienera na dokładność dopasowania obrazów z zastosowaniem metod statystycznych opartych o cechy lokalne obrazu terenu przy występowaniu efektu rozmycia poprzez określenie zależności matematycznych opisujących charakterystyki wpływu błędu kąta rozmycia i liczby rozmytych pikseli wykorzystywanych do estymowania parametrów filtra Wienera;
- opracował metodę minimalizacji negatywnego wpływu filtracji Wienera, bazującej na danych wejściowych obciążonych niepewnością pomiarową, na dokładność dopasowania obrazów poprzez określenie rozkładu funkcji błędu dopasowania obrazów i wyszukanie wartości parametrów filtra Wienera zapewniających osiągnięcie minimum tej funkcji.

Opracowany przez Doktoranta model opisu wpływu błędów estymowanych parametrów filtra Wienera, zastosowanego do korekcji rozmycia obrazów, pozwala na analizę efektywności filtracji dla różnych niepewności pomiarowych oraz różnych wartości rozmycia pierwotnego. Opracowana przez Doktoranta autorska metoda analizy, w oparciu o estymowane wartości wariancji błędów danych wejściowych, pozwala na wyznaczanie w procesie iteracyjnym najkorzystniejszych wartości parametrów filtra Wienera, umożliwiających osiągnięcie minimum błędów określania położenia platformy latającej. Wyznaczone przez Doktoranta charakterystyki błędów pozwalają na minimalizację wpływu błędów rozmycia na jakość dopasowania obrazów. Tym samym Doktorant udowodnił przyjętą w pracy hipotezę.

Zaproponowane w pracy rozwiązanie przyczynia się do zwiększenia odporności układów nawigacji wizualno-bezwładnościowej na zjawiska rozmycia obrazu i jego zniekształcenia wywołane ruchem obiektów terenowych, pojawiających się w kadrze kamery. Przedstawiona w pracy metoda odnosi się do nawigacji wizualnej na obszarach względnie płaskich, pozwalających na wykorzystanie radiowysokościomierzy lub wysokościomierzy laserowych. Autorski algorytm wykorzystuje rozszerzony filtr Kalmana do estymowania odległości do terenu i odrzucania zakłóceń w postaci elementów pokrycia terenowego.

Biorąc powyższe pod uwagę oceniam, że Doktorant w stopniu wysokim wykazał się umiejętnością poprawnego formułowania problemu badawczego w zakresie metod filtracji i dopasowania obrazów zniekształconych, jego samodzielnego rozwiązania oraz zbadania przydatności opracowanego algorytmu korekcji z filtracją Wienera dla układu nawigacji wizualno-bezwładnościowej platformy latającej. Ponadto Doktorant wykazał się dużą wiedzą specjalistyczną oraz umiejętnością samodzielnego rozwiązywania problemów badawczych.

Reasumując uważam, że recenzowana rozprawa doktorska **kpt. mgr. inż. Piotra Turka pt.: „Przetwarzanie sygnałów i danych topograficznych w głowicy samonaprowadzania platformy latającej”** spełnia wymagania stawiane pracom promocyjnym na stopień doktora nauk inżynieryjno-technicznych w rozumieniu ustawy „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” z dnia 20 lipca 2018 roku (z późniejszymi zmianami) i wnioskuję o dopuszczenie Doktoranta do jej publicznej obrony.



dr hab. inż. Andrzej Szelmanowski, prof. ITWL