

Dr hab. inż. Cezary Kownacki, prof. PB

Białystok, dn. 20-11-2022

Katedra Robotyki i Mechatroniki

Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka

Ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

REDENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Patryka Szywalskiego

pt. Sterowanie zdecentralizowaną siecią bezzałogowych jednostek latających

1. Zagadnienia formalne

Przedstawiona recenzja została przygotowana na podstawie umowy o dzieło 17/AEiE/22 z dnia 28-10-2022 roku podpisanej przez przewodniczącego rady dyscypliny naukowej automatyka, elektronik i elektrotechnika prof. dr hab. inż. Dariusza Zmarzęłego. Przewód recenzowanej rozprawy doktorskiej został wszczęty w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika, a przynależność do wskazanej dyscypliny jest potwierdzona merytoryczną zawartością rozprawy przedstawionej do recenzji.

2. Wstęp i ocena tematyki oraz zawartości pracy

Zawartość merytoryczna rozprawy jednoznacznie wskazuje na jej praktyczno-eksperymentalny charakter, a zaprezentowane wyniki badań i rozważań analitycznych nad przyjętymi rozwiązaniami technicznymi są potwierdzeniem obszernej wiedzy Autora z zakresu bezzałogowych statków powietrznych. Rozważany problem budowy formacji bezzałogowych statków powietrznych został wężcz rozłożony na czynniki pierwsze, a prezentowane autorskie rozwiązania są bardzo szczegółowym opisem autorskiej realizacji całego systemu. Jest to niewątpliwy atut pracy i należy Autora pochwalić za umiejętności i wiedzę inżynierską. Jednakże ilość przeprowadzonych analiz i szeroki ich zakres często wykraczający poza zagadnienie zdecentralizowanych formacji BSP (bezzałogowe statki powietrzne) powoduje, że zasadniczy problem zdecentralizowanego sterowania formacją nie jest wiodącym tematem dyskusji.

W rozprawie przedstawionej do recenzji Autor podjął się rozwiązania dość złożonego problemu jakim jest zdecentralizowane sterowanie formacją BSP. Tematyka rozprawy jest wciąż aktualna, gdyż przykłady aplikacji związanych z zastosowaniem formacji BSP stają coraz bardziej powszechne, na co wskazuje sam Autor. Rozprawa dość szczegółowo i szeroko analizuje szereg problemów, które łącznie składają się i mają wpływ na funkcjonowanie formacji BSP, co pośrednio potwierdza i weryfikuje osiągnięcie założonych możliwości końcowego rozwiązania. Przyjęcie zdecentralizowanego podejścia do formacji BSP jest słusznym krokiem, gdyż zapewnia skalowalność struktury, układ sterowania nie jest sztywno zależny od roli nadzorca, ale z drugiej strony wymaga wysokiego lokalnego poziomu

automatyzacji i autonomii poszczególnych jednostek w formacji. Zastosowanie w proponowanym rozwiązaniu komputera pokładowego będącego elementem nadrzędnym w stosunku do lokalnego kontrolera lotu pełniącego rolę układu popularnie nazywanego autopilotem jest konsekwencją decentralizacji. Komputer pokładowy realizuje algorytm obliczający trajektorię lotu pomiędzy dwoma kolejnymi punktami przelotowymi, generuje punkty pośrednie, wyznacza wektor kierunkowy i steruje pozycją BSP niezależnie w osiach x i y z wykorzystaniem regulatorów PID. Autopilot z kolei jest sterownikiem opartym na oprogramowaniu inav 2.6, które bezpośrednio realizuje sterowanie BSP i lot po punktach przelotowych waypoint otrzymując dane z zaimplementowanego emulatora aparatury. Wymiana danych w proponowanej formacji BSP jest realizowana z wykorzystaniem radiomodemów 433MHz i autorskiego algorytmu kolejkwania transmisji, który zapobiega kolizjom a jednocześnie pozwala na dynamiczne dołączanie i rozłączanie kolejnych BSP. Ta zdecentralizowana struktura komunikacji, traktuje wszystkich uczestników jako równorzędnych członków sieci, łącznie z panelem operatorskim, będącym elementem stacji kontroli formacji BSP. Komputerowi stacji kontroli formacji Autor przypisał rolę systemu, który wyznacza parametry lotu poszczególnych BSP, niezbędnych dla komputera pokładowego w celu wyliczenia i realizacji trajektorii. Podział zadań systemu sterowania pomiędzy komputer stacji kontroli formacji, a komputery pokładowe poszczególnych BSP jest charakterystyczny dla zdecentralizowanych systemów sterowania.

Słabą stroną rozprawy jest to, że Autor nie poruszył kwestii lokalnych algorytmów unikania kolizji wewnątrz formacji BSP, co jest jednym z kluczowych elementów zdecentralizowanej formacji BSP, chociaż jak wynika ze strony 88 każdy BSP zna pozycję innych BSP i oblicza ich ścieżki lotu. Autor założył bowiem a priori, że pary BSP – punkt w formacji będą skojarzone tak, aby wygenerowane trajektorie nie były kolizyjne, a lot do kolejnego punktu przelotowego był realizowany, gdy wszystkie BSP w formacji osiągną własne bieżące punkty przelotowe, co ma zapewnić synchronizację lotu. Autor wprowadził również obszar zabroniony wokół BSP opisany przez macierz bezpieczeństwa podczas lotu w przestrzeni zamkniętej. Przy założeniu wysokiej dokładności lokalizacji BSP i dokładności w odtwarzaniu wygenerowanej ścieżki bezpieczny lot formacji BSP jest możliwy do uzyskania, a na pewno w symulacji. Jak pokazały badania eksperymentalne nawigacja z wykorzystaniem systemu Marvelmind nie gwarantuje deklarowanej w tabeli 1.2 precyzji na poziomie 1 cm (pozycja BSP zmienia się skokowo o ok. 20 cm, a ścieżki wychodzą poza przyjętą tolerancję. W tak złożonym systemie jak formacja BSP jest wiele źródeł błędów losowych takich jak systemy nawigacyjne, lokalne układy sterowania/pomiarowe, jak również opóźnienia aktualizacji danych z BSP, a kumulacja tych błędów może prowadzić do kolizji (np. badania eksperymentalne w trybie niezależnym). Dodatkowo zastosowane niezależne sterowanie w osi x i y powoduje problemy z utrzymaniem toru lotu wzdłuż odcinka linii prostej pomiędzy pozycją BSP a punktem docelowym. Problem ten Autor rozwiązał wprowadzając ograniczenie modułu wektora kierunkowego. Gdyby Autor sterował prędkością lotu i kierunkiem (kurselem), co da się wyznaczyć z wektora kierunkowego, problem rozprężnięcia sterowania w osi x i y nie miałby miejsca. Dlatego też proponowane rozwiązanie z punktu widzenia problemu unikania kolizji nie wydaje się być podejściem wystarczającym dla zdecentralizowanej formacji BSP, tym bardziej, że jak z rozprawy wynika kojarzeniem BSP z punktami w formacji, zajmuje się komputer operatora.

W rozprawie Autor proponuje również algorytm rozwiązania labiryntu tj. lotu pomiędzy przeszkodami w przestrzeni zamkniętej wzdłuż optymalnej ścieżki, który został zbadany wyłącznie symulacyjnie. Zatem trudno jest stwierdzić czy proponowane rozwiązanie sprawdzi się w locie formacji

BSP i czy algorytm rozwiązania labiryntu będzie realizowany lokalnie na komputerze pokładowym czy na komputerze kontroli formacji. Dotyczy się to również oceny czy zastosowanie różnych prędkości przelotowych w pierwszym etapie lotu, zmiana struktury formacji oraz macierz bezpieczeństwa gwarantuje bezpieczny bezkolizyjny lot. Nie dokonano również analizy optymalności wyznaczonej trajektorii co sam Autor potwierdza w tekście. Zbudowane BSP nie posiadały aparatury pozwalającej na mapowanie otoczenia a zatem uzależnione byłyby wyłącznie od wirtualnych przeszkód zadanych z komputera kontroli formacji. Należy ocenić zatem, że to rozwiązanie nie zostało do końca dopracowane i stanowi jedynie element sterowania pojedynczym BSP.

Zakres rozprawy znacznie wykracza poza jej temat, gdyż poruszono kwestie istotne, ale nie konieczne bezpośrednio odnoszące się do problemu zdecentralizowanego sterowania formacją BSP. Niektóre z nich dotyczą spraw oczywistych jak na przykład zależność dokładności pozycji GNSS od ilości obsługiwanych przez odbiornik systemów lokalizacji, wpływu zastosowania ferromagnetycznych materiałów mocujących magnetometr na jego wskazania czy też sposobów wyznaczenia kursu (ang. heading) gdzie jedynym wiarygodnym źródłem informacji w przypadku wielowirnikowców jest magnetometr. Dotyczy to również badań sposobów pomiaru wysokości, gdyż jak wiadomo wysokość barometryczna, wysokość AGL (Above Ground Level – nad poziomem gruntu) uzyskiwana z czujników typu LIDAR oraz składowa wertykalna pozycji GNSS są powszechnie stosowanymi technikami wyznaczania wysokości lotu BSP. Kolejnym przedstawionym ciekawym zagadnieniem jest ocena wpływu linii wysokiego napięcia na działanie anten urządzeń komunikacyjnych. Pojawia się zatem pytanie czy proponowane przez Autora zastosowanie formacji do oceny linii wysokiego napięcia oraz przeprowadzone badania mają sens, skoro magnetometr jest czuły na pole elektromagnetyczne? Natomiast potwierdzeniem słuszności wyboru magnetometru do pomiaru kursu jest wyznaczenie przez Autora rozkładu lokalnej dewiacji magnetycznej (współczynnika korekcyjnego) w pomieszczeniu laboratorium (LASL), co jest nowatorskim podejściem w zastosowaniu magnetometru w pomieszczeniach zamkniętych.

Szczegółowa analiza zagadnień z budowy BSP jest ważna, ale rozprawa powinna skupić się bardziej na analizie problemu zdecentralizowanego sterowania formacją, wyraźnie zdefiniować na czym ono będzie polegać, jakie zadania będą realizowane lokalnie przez BSP, a jakie centralnie w stacji kontroli formacji, czy będzie realizowana współpraca pomiędzy BSP. Dopiero w rozdziale 5.3.2 jest mowa o dwóch płaszczyznach decentralizacji. Ponadto stwierdzenie Autora, że system zdecentralizowany to taki, w którym nieprzerwana praca systemu jest niezależna od jego równouprawnionych członków, i który nie ma hierarchicznej struktury, nie jest wyczerpującą definicją. Decentralizacja sterowania wiąże się także z samodzielnością w wykonywaniu zadania wraz z dostosowywaniem się do warunków otoczenia i zachowaniem się pozostałych członków formacji. W proponowanym rozwiązaniu BSP wymieniają się informacją o swoich parametrach i położeniu, co wynika z topologii sieci komunikacyjnej, ale nie wskazano w jaki sposób te informacje mają wpływ na generowaną indywidualnie trajektorię. Natomiast rola komputera operatora jest tutaj znacząca, co wskazuje jednak na pewną hierarchię.

W odniesieniu do wspomnianego stwierdzenia o systemie zdecentralizowanym Autor postawił zatem tezę, że „**Możliwe jest zdecentralizowane sterowanie bezzałogowego systemu latającego z wykorzystaniem algorytmów deterministycznych**”. Ponadto wskazano również tezy pomocnicze: „**Wykorzystywanie sieci radiowej pozwala na komunikację w ramach zdecentralizowanej grupy**

bezzałogowych urządzeń latających” oraz „Możliwe jest użycie deterministycznych algorytmów do wyznaczenia trajektorii oraz rozwiązania problemu labiryntu tzn. znalezienia drogi wyjścia z labiryntu dla bezzałogowego systemu latającego”. Pod pojęciem systemu Autor rozumie formację BSP, natomiast algorytmy deterministyczne dotyczą algorytmów wyznaczających ściśle określone rozwiązanie na podstawie przyjętych parametrów.

Należy tutaj podkreślić, że Autor w sposób szczegółowy, konsekwentnie i metodycznie przedstawia zbudowany system formacji BSP, a wykonując analizy, badania eksperymentalne i symulacyjne na każdym etapie projektowania proponowanego rozwiązania oraz potwierdzając działanie systemu w warunkach rzeczywistych udowadnia, że postawiona teza w przyjętym rozumieniu zdecentralizowanego systemu sterowania jest prawdziwa.

Rozważane w recenzowanej rozprawie zagadnienia są wciąż aktualne dla technologii BSP i ważne przede wszystkim z praktycznego punktu widzenia, gdyż zbudowany system formacji BSP będzie wykorzystany w zbudowanym laboratorium „Laboratorium Autonomicznych Systemów Latających”. Laboratorium umożliwi prowadzenie dalszych prac na algorytmami sterowania BSP. Zastosowane w budowie BSP i całego systemu autorskie rozwiązania, technologia oraz algorytmy są poprawne. **Zbudowany zdecentralizowany system sterowania formacją BSP, uzyskane wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych mogą być podstawą do ubiegania się o stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika.**

3. Struktura rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa liczy aż 168 stron i została napisana w j. polskim. Rozprawę podzielono na 12 rozdziałów, wliczając w to wykaz wykorzystanej literatury. Na początku rozprawy umieszczono wykaz najważniejszych skrótów i oznaczeń. Rozprawa nie zawiera załączników ani dokumentacji technicznej przedstawionych rozwiązań. Wykaz literatury (bibliografia) zawiera 138 pozycji, w tym 28 linków do stron internetowych. Ponadto Autor przedstawił listę 16 publikacji własnego autorstwa lub współautorstwa, w tym również swoją pracę inżynierską i magisterską. Literatura jest poprawnie cytowana, a jej poziom odpowiada rozprawie doktorskiej.

Wstęp do rozprawy Autor poświęcił przybliżeniu problematyki BSP. Rozdział ten rozpoczyna się od rysu historycznego, a następnie przedstawia różne koncepcje konstrukcji BSP, klasyfikację BSP i wykorzystywane technologie komunikacji radiowej. W dalszej kolejności przedstawiono oprogramowanie typu open-source, które może być wykorzystywane przy budowie BSP, gdyż Autor w swojej pracy wykorzystał oprogramowanie inav 2.6. Problematyka projektowania BSP jest dość krótkim opisem konstrukcji czterowirnikowca, przyłożonych sił ciągu wirników, generowania ruchu i definicji kątów orientacji przestrzennej i współrzędnych położenia. W tym miejscu Autor powinien poświęcić więcej miejsca przynajmniej na model kinematyczny czterowirnikowca, a najlepiej model matematyczny z uwzględnieniem wszystkich sił i momentów. Jest to istotna wiedza przy projektowaniu tego typu BSP. Problematyka projektowania formacji czy rojów BSP jest równie krótkim opisem i nie odnosi się bezpośrednio do celu pracy. Odnośniki literaturowe dotyczą głównie artykułów dotyczących rzeczywistych aplikacji oraz algorytmów rozwiązania labiryntu czy dokładności pozycjonowania. Z kolei podrozdział dotyczący formacji ogranicza się do opisu 4 różnych ich struktur. Brak dokładnej analizy literaturowej w zakresie zdecentralizowanych struktur sterowania formacją/rojem BSP jest

istotnym mankamentem rozprawy. W dalszej kolejności we wstępie przedstawiono poziomej autonomii, ale nie wskazano który z nich jest istotny w zdecentralizowanej formacji BSP. Wstęp kończy się przeglądem systemów nawigacji i orientacji oraz przykładowymi zastosowaniami formacji BSP, które były inspiracją dla Autora.

Drugi rozdział jest poświęcony celowi, zakresowi oraz tezie rozprawy. Zakres rozprawy jest obszerny i odpowiada zawartości merytorycznej rozprawy. Zakres podzielono na 3 główne obszary. Pierwszy z nich dotyczy konstrukcji BSP, drugi odnosi się do „Laboratorium Autonomicznych Systemów Latających” a trzeci skupia się na zasadniczym problemie – sterownia grupą BSP. Tezę i tezę pomocnicze rozprawy wskazano już wcześniej. Tutaj należy podkreślić, że postawione tezy są dość ogólne i nie wskazują konkretnego rozwiązania i przy szczegółowym przedstawieniu autorskiego rozwiązania formacji BSP ich udowodnienie jest oczywiste.

Trzeci rozdział jest poświęcony konstrukcji formacji BSP. Jej opis Autor rozpoczął od opisu konstrukcji pojedynczego BSP skupiając się na dwóch klasach tj. 130 i 300. Dla klasy 130 przedstawiono również badania obciążenia ramy konstrukcyjnej oraz analizę różnych wykorzystanych materiałów pod kątem ich zastosowania w BSP. Klasa 300 została opisana bardziej szczegółowo, omówiono elementy składowe konstrukcji mechanicznej, strukturę i budowę systemu sterownia, przedstawiono schemat elektryczny i wskazano wykorzystywane czujniki. Przeprowadzono analizy charakterystyk poszczególnych elementów systemu pomiarowego BSP, a w szczególności: systemu GNSS ze względu na rodzaj i klasę odbiornika, systemu LNS firmy Marvelmind, metod i technologii do pomiaru wysokości lotu, urządzeń pomiarowych do wyznaczania orientacji w płaszczyźnie horyzontalnej zwracając uwagę na sposób montażu magnetometru i dryft giroskopu.

W rozdziale czwartym został zaprezentowany autorski system sieci radiowej opartej o moduły radiomodemów 433MHz. W topologii sieci zastosowano nadawanie typu broadcast, przeprowadzono analizę charakterystyk statycznych i dynamicznych sygnałów radiowych (parametr RSSI). Następnie przedstawiono podstawowe założenia projektowanej sieci, opracowano ramkę danych, która będzie wysyłana przez wszystkie węzły sieci. Następnie opisano zasady oraz fazy działania zdecentralizowanej sieci radiowej: uruchomienie, wejście do sieci, praca sieci, opuszczenie sieci. Rozdział kończy się testami sieci pod kątem ilości jej węzłów w celu oceny zmiany częstotliwości aktualizacji / wysyłania ramki danych.

W rozdziale piątym przedstawiono testy z udziałem pojedynczego BSP. Opisano sposób wyboru sterowania BSP pomiędzy sterowaniem manualnym aparaturą typu RC z wykorzystaniem oprogramowania inav 2.6 oraz sterowaniem automatycznym z wykorzystaniem panelu operatorskiego i komputera pokładowego. Dwukanałowy sposób komunikacji zapewnia redundancję, co zabezpiecza BSP przed rozbiciem w razie zerwania komunikacji. Następnie zostały zdefiniowane układy odniesienia, względem których wyznaczone były parametry nawigacyjne tj. układ związany z lokalizacją GNSS, z lokalizacją LNS i ramą BSP. Określono również zależność na wektor kierunkowy oraz wprowadzono ideę blokady jego modułu, ale nie zdefiniowano na czym ta blokada polegała ani nie wyjaśniono na czym polega uzależnienie sterowania w osi x i y. Przedstawiono również algorytm generowania trajektorii polegający na wyznaczeniu punktów pośrednich pomiędzy pozycją BSP a punktem docelowym zgodnie z wybranym kształtem: linią prostą, okręgiem lub helisą. Rozdział zakończony jest opisem algorytmów sterowania uzupełnionym przez odpowiednie schematy blokowe pracy BSP i formacji BSP.

W rozdziale 7 przedstawiono wyniki badań algorytmu sterowania BSP. Testy rozpoczęto od określenia wpływu pracującego BSP na wskazania magnetometru oraz wartość RSSI. Następnie oceniono wpływ sieci wysokiego napięcia na poziom sygnału (RSSI) sieci komunikacyjnej w zależności od odległości od przewodów linii. W następnym podrozdziale przedstawiono ścieżki lotu BSP z wykorzystaniem GNSS i oprogramowania inav 2.6. Nie uwzględniono jednak dyskusji, dlaczego tylko na wybranych segmentach trasy rzeczywista ścieżka lotu nie pokrywa się z zadaną. W dalszej kolejności wykonano testy BSP bazując na lokalizacji LNS (Marvelmind) i przebadano fazy lotu: wznoszenie, lot po punktach przelotowych. Rozdział jest zakończony opisem pokazu świetlnego w wykonaniu BSP, gdzie kształt poszczególnych odcinków ścieżki nie jest również linią prostą.

Następny rozdział jest poświęcony budowie „Laboratorium autonomicznych systemów latających”. Na wstępie przedstawiono konstrukcję sali a następnie omówiono projekt implementacji systemu nawigacji LNS opartego o technologię firmy Marvelmind, który będzie w tym laboratorium wykorzystywany. Kolejnym etapem była analiza możliwości wyznaczenia horyzontalnego kąta orientacji BSP, czyli kursu magnetycznego wewnątrz pomieszczenia. W wyniku badań ustalono kąt β pomiędzy układem odniesienia GNSS i LNS, a następnie wykonano mapę lokalnej dewiacji magnetycznej. Na podstawie niej opracowano współczynnik korekcyjny umożliwiający wyznaczenie kursu magnetycznego w pomieszczeniu zamkniętym. W ostatnich dwóch podrozdziałach zostały odpowiednio zaprezentowane: panel operatora – urządzenie do kontroli BSP z wykorzystaniem manetek oraz oprogramowanie kontroli BSP i formacji BSP komputera operatora wykonane z wykorzystaniem środowiska MATLAB firmy Mathworks.

W rozdziale ósmym zaprezentowano i omówiono algorytm lotu formacji BSP w przestrzeni otwartej. Polegał on na klasyfikacji par punktów aktualnych pozycji BSP w formacji i punktów docelowych. Dobór punktów w pary był wykonywany iteracyjnie, aż suma odległości pomiędzy wszystkimi parami była minimalna. W ten sposób uzyskano warunek, aby ścieżki lotu łączące BSP z punktem docelowym nie przecinały się ze ścieżkami innych BSP, a algorytm zapewnia wówczas a priori bezkolizyjne ścieżki lotu. Na podstawie dobranych par lokalnie w komputerze pokładowym generowane są ścieżki lotu wraz z punktami pośrednimi, przy czym ilość punktów pośrednich jest taka sama dla każdego BSP, a prędkość lotu dla każdego BSP jest wyznaczana tak, aby każde BSP pokonało swoją ścieżkę w tym samym czasie. Przy czym lot do kolejnego punktu pośredniego/przelotowego jest możliwy, gdy wszystkie BSP zaliczą własne aktualne punkty docelowe. Zapewnia to synchronizację lotu całej formacji, gdyż wszystkie BSP osiągną punkt docelowy w tym samym czasie. Algorytm przetestowano poprzez test krzyżowania się dróg cząstkowych dla 10.000 BSP w formacji. Rozdział zakończony jest symulacjami formacji 100 BSP o strukturze siatki kwadratowej i dwóch o okręgów.

Dziewiąty rozdział przedstawia algorytm lotu BSP w przestrzeni zamkniętej. Algorytm jest przykładem algorytmu rozwiązania labiryntu. W pierwszym podrozdziale opisano wybrany sposób dyskretyzacji przestrzeni z podstawą trójkąta równobocznego oraz dwie macierze wzorcowe, które korygowały przesunięcie punktów należących do tego samego obszaru w kolejnych wierszach mapy. Nie opisano jednak algorytmu, który określałby oddziaływanie macierzy wzorcowych na mapę. Przedstawiono jedynie schemat wyboru odpowiedniej macierzy wzorcowej. W kolejnym podrozdziale opisano wyznaczanie punktów charakterystycznych jako wierzchołków przeszkód leżących przy kącie otwartym. Punkty charakterystyczne są wyznaczane tak, aby 3 strefy wokół nich wylapywały załamanie się granic przestrzeni. Jest to istotne, gdyż granica obszaru wyznaczona przez czujniki detekcji

przeszkód nie musi pokrywać się z siatką mapy. Następnie zaproponowano wprowadzenie punktów charakterystycznych pośrednich by wyeliminować problem zamknięcia przejścia i przedstawiono algorytm rozwiązana labiryntu. Zaprezentowana analityczna metoda wyznaczania ścieżki przypomina metodę grafu widoczności z mechanizmem optymalizacji opartym na wyborze najkrótszej ścieżki. Przy czym przyjęte kryteria eliminacji poszczególnych odcinków nie są jasno wyjaśnione (tab. 9.4). Zaproponowana iteracyjna eliminacja dróg na podstawie lokalnego porównania długości odcinków może usuwać również odcinek będący elementem globalnego optymalnego rozwiązania. Problem ten Autor rozwiązał stosując dodatkową optymalizację. Ten sam efekt uzyskano by metodą grafu widoczności, wybierając najkrótszą możliwą ścieżkę łączącą punkt startowy z docelowym spośród wszystkich możliwych rozwiązań po warunkiem, że rozważano by odcinki łączące tylko punkty widoczne dla siebie nawzajem. Wówczas optymalizacja ścieżki z podrozdziału 9.5 nie byłaby konieczna.

Rozdział 10 poświęcono badaniom eksperymentalnym. W badaniach eksperymentalnych wykorzystano 5 BSP i wykonano loty w trybie niezależnym i w trybie zależnym ($n=2 - 5$ BSP), a zadane ścieżki formacji były okręgami lub kwadratami. Warto tu zaznaczyć, że maksymalna rozbieżność ścieżki lotu BSP w trybie zależnym od zadanej wynosiła 50 cm horyzontalnie jak i wertykalnie (rys. 10.5), co przy średnicy okręgu 600 cm daje błąd prawie 10%. W dalszej kolejności przedstawiono wyniki testów w trybie zależnym. W ramach testów szczególnie w trybie zależnym Autor powinien zarejestrować odległości pomiędzy poszczególnymi BSP, co pozwoliłoby oszacować ryzyko kolizji. Tym bardziej, że w lotach niezależnych Autor wspomina o zaobserwowaniu kolizji. Brakuje również dyskusji jak wyeliminować błędy systemu pozycjonowania oraz brak synchronizacji ruchu.

Rozdział 11 stanowią wnioski i uwagi, a rozdział 12 jest wykazem literatury.

4. Szczegółowe uwagi krytyczne

Do przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Patryka Szywalskiego zgłaszam następujące zagadnienia i uwagi, podlegające wyjaśnieniu lub dyskusji.

Uwagi ogólne:

1. Jak już wcześniej wspomniano rozprawa bardzo szczegółowo analizuje problemy związane z budową BSP, które nie odnoszą się bezpośrednio do tematu rozprawy i nie są z sobą jednoznacznie powiązane, lecz stanowią osobne wątki (przykładem jest rozdział 6.2 oraz 3.6.1). Stąd wrażenie, że rozprawa jest zbiorem osobnych badań oraz analiz zagadnień, które nie tworzą jednolitej logicznej całości z punktu widzenia tematu, który powinien być zagadnieniem wiodącym. Oczywiście to nie umniejsza nakładu pracy i wiedzy, którą Autor się wykazał,
2. Praca przedstawia wiele algorytmów: generowania trajektorii, algorytm kojarzenia par, algorytm wyznaczania rozwiązania labiryntu, algorytm pracy BSP, algorytm pracy formacji BSP, algorytm doboru macierzy wzorcowej, algorytm pracy sieci radiowej. Wszystkie algorytmy zostały przedstawione jedynie w postaci schematów blokowych i opisu w tekście, który do końca nie jest czytelny. Brakuje rozdziału, który połączyłby te wszystkie algorytmy w jedną całość,

3. W pracy zabrakło jasnego przeglądu literatury dotyczącej bezpośrednio problemu formacji BSP o rozproszonej strukturze sterowania, przedstawiającej rozwiązania algorytmów umożliwiających tworzenie spójnej struktury formacji BSP i wykluczających kolizje pomiędzy uczestnikami formacji,
4. Pewne zwroty użyte w rozprawie nie są prawidłowe. Zgodnie z polską literaturą powinno używać się terminu bezzałogowe statki powietrzne (BSP), a nie bezzałogowe aparaty latające, bezzałogowe urządzenia latające, bezzałogowe jednostki latające czy z ang. UAV. Z kolei „bezzałogowe systemy latające” określające formację, powinny być zastąpione po prostu terminem „formacja BSP”. Brakuje konsekwencji w terminologii parametrów nawigacyjnych BSP tj. kurs magnetyczny, kurs geograficzny, kąt obrotu własnego, kąt pochylenia, kąt przechylenia czy kąt drogi. Autor powinien jednoznacznie wskazać, który z kątów tj. kurs magnetyczny, kurs rzeczywisty czy kąt drogi jest używany do określania orientacji BSP w płaszczyźnie horyzontalnej układu R_{31} . Termin „zwrot w układzie współrzędnych” jest niedopuszczalny,
5. Termin trajektoria odnosi się do ścieżki, po której porusza się BSP rozpatrywanej łącznie z prędkością poruszania się. Oznacza to, że każdy punkt trajektorii ma ściśle określoną chwilę czasową. Jeśli rozpatrujemy trasę BSP bez uwzględniania prędkości lub czasu to wówczas mamy do czynienia ze ścieżką lotu. W większości przypadków Autor używa terminu trajektoria bez wskazywania zależności opisujących chwilową prędkość w każdym punkcie ścieżki. Owszem przy generowaniu punktów pośrednich barana jest pod uwagę prędkość w osiach x , y i z , ale układ lokalnego sterowania nie obejmuje kontroli prędkości podczas lotu. Prędkość we wzorze 5.2 decyduje jedynie o gęstości punktów tworzących ścieżkę lotu. Ale już we wzorze 5.3 nie ma prędkości tylko czas t – mający znaczenie wartości kąta łuku opartego na aktualnym punkcie pośrednim a punktem początkowym.

Uwagi szczegółowe:

1. W rozdziale 1.3 przydałoby się omówić dynamikę i kinematykę BSP w układzie czterowirnikowca,
2. Rozdział 1.4 i 1.5 powinny stanowić przegląd literatury z zakresu formacji BSP i zdecentralizowanych struktur formacji BSP,
3. Zależności 1.1 – 1.6 powinny uwzględniać orientację przestrzenną obiektu, jeśli wykorzystywana jest bezkardanowa nawigacja inercjalna. A jeśli problem nawigacji inercjalnej powinien być przedstawiony szerzej trzeba by było zdefiniować równania różniczkowe orientacji przestrzennej i pozycji w wybranym układzie odniesienia,
4. Skąd pochodzą dane do porównania wad i zalet wybranych systemów nawigacji, np. dlaczego nawigacja inercjalna posiada dokładność 10 cm?
5. System LNS firmy Marvelmind wykorzystuje czujniki ultradźwiękowe. Czy przeanalizowano wpływ podciśnienia nad wirnikami na wskazania systemu? Czujniki te znajdują się też dość blisko wirników. Ponadto, czy autor analizował wpływ kątów przechylenia i pochylenia na wskazania pozycji LNS?
6. Schemat elektryczny ze strony 46 jest na poziomie pracy inżynierskiej. Są dedykowane aplikacje np. EPLAN, które umożliwiają tworzenie profesjonalnych schematów,

7. Porównanie modułów odbiorników GNSS jest zbyteczne i niewiele wnosi. Wiadomo im więcej odbiornik ma kanałów i więcej systemów GNSS obsługuje tym lepsza jest dokładność wyznaczania pozycji,
8. W zależności 3.1 parametr p – oznacza zmierzone ciśnienie statyczne a p_0 – powinien oznaczać ciśnienie statyczne na poziomie morza?
9. W rozdziale 5.5 powinien być zaproponowany algorytm fuzji danych z kilku źródeł informacji o wysokości lotu, a nie tylko ich porównanie, gdyż każde źródło podaje ten parametr w innym układzie – czujnik ciśnienia statycznego pozwala wyznaczyć wysokość barometryczną n.p.m. w układzie $R3_1$, a dopiero po kalibracji wysokości odniesienia w układzie $R3_2$, zaś LIDAR wysokość na powierzchni terenu, a system LNS w układzie $R3_2$,
10. Podobnie jak w przypadku wyznaczania wysokości lotu w rozdziale 3.5, w rozdziale 3.6 zamiast porównywać metody wyznaczania kursu Autor powinien zaproponować algorytm fuzji danych ze wskazanych systemów. Każdy z wymienionych systemów mierzy co innego: magnetometr – kurs magnetyczny w $R3_1$, system LNS - kurs w układzie $R3_2$, a giroskop prędkość kątową obrotu własnego yaw tj. układu $R3_3$ względem przestrzeni inercjalnej.
11. Tabela 4.4 przedstawia częstotliwość wymiany danych w sieci. Jaka ona byłaby, gdyby $n=10, 100, 1000$? Te dane pokazałyby faktyczną skalowalność architektury,
12. Kąt β opisuje obrót układu LNS $R3_2$ względem GNSS $R3_1$, a α jest zatem kursem?
13. W zależności 5.1 trzeba wskazać w jakim układzie odniesienia podawane są współrzędne punktów, a w jakim układzie współrzędne wektora kierunkowego? Można się domyślić, że wektor kierunkowy jest wyrażone w lokalnym układzie BSP, czyli $R3_3$.
14. Na rysunku 5.6 coś się nie zgadza. Przy założeniu, że α jest kursem w układzie $R3_1$, to, gdy $\alpha=0^0$ osie układu $R3_3$ powinny się pokryć z osiami $R3_1$. Owszem osie się pokrywają, ale dla osi y zmienia się znak na przeciwny. Stąd rozbieżność pomiędzy punktem celu a wektorem kierunkowym na rysunku 5.5. Zarówno punkt celu jak i wektor kierunkowy powinny znajdować z tyłu po prawej stronie BSP, zmienia się jedynie układ odniesienia,
15. Sterowanie pozycją BSP na podstawie współrzędnych x i y wektora kierunkowego z wykorzystaniem dwóch różnych torów PID powoduje rozdzielanie sterowania w osi x i y , co skutkuje, że BSP nie porusza się po linii prostej. Sterowanie w osi x jest zależne od osi y poprzez wartość kąta α . Zatem wystarczyłby jeden regulator PID dla osi x , a sygnał dla osi y byłby wyznaczany z wykorzystaniem funkcji $\tan(2\alpha)$. Innym podejściem jest sterowanie ruchem BSP poprzez niezależne pętle PID dla prędkości przelotowej i kursu,
16. Problem zbaczania z linii prostej pod wpływem wiatru (rys. 5.8 a)) został rozwiązany poprzez wyznaczenie serii punktów pośrednich. Takie podejście zmniejsza średnią prędkość przelotową pomiędzy punktem startowym i końcowym – wektory kierunkowe są krótsze. Dodatkowo przy blisko położonych punktach pośrednich i szerokiej strefie zezwalającej na zaliczenie punktu, w momencie przełączenia się sterowania na kolejny punkt pośredni może dochodzić do gwałtownych zmian wektora kierunkowego, co może wprowadzać oscylacje w pętlach PID. W takich sytuacjach zazwyczaj stosuje się algorytm dociągania do trasy zmieniający składową wektora prędkości BSP normalną do linii ścieżki lotu. Jak widać na rysunku 6.15 problem zbaczania z linii prostej nadal występuje i widać pewną zależność pomiędzy ścieżkami a) – d). Podobna uwaga dotyczy badań eksperymentalnych,
17. Na czym polega generowanie trajektorii formacji BSP, skoro trajektorie dla każdego BSP są wyznaczane równolegle na każdym BSP?

18. W jaki sposób Autor wewnątrz laboratorium wyznacza położenie BSP w układzie R_{3_1} , skoro jest to układ odniesienia nawigacji GNSS i magnetometru? Położenie to jest potrzebne w zależnościach na współczynnik korekcyjny. Czy wyznaczony rozkład współczynnika korekcyjnego nie stanowi opis lokalnej dewiacji magnetycznej?
19. Z opisu algorytmu lotu w przestrzeni otwartej opisującego dobór par BSP i punktu w formacji wynika, że jest on wykorzystywany podczas startu formacji i podczas zmiany jej struktury. BSP i punkty w formacji są tak dopasowywane, aby uniemożliwić przecinanie się ścieżek lotu BSP. Pojawia się zatem pytanie co się dzieje w sytuacji, gdy struktura formacji obróci się o 180° ? Czy zmienia się przypisanie BSP do punktu w formacji, czy dochodzi do skrzyżowania się ścieżek lotu? Po przypisaniu punktów w formacji poszczególnym BSP generowane ścieżki lotu muszą być równoległe. Jak jest to zrealizowane?
20. W rozdziale 9 przedstawiona jest dyskretyzacja przestrzeni i wybrano podejście oparte o trójkąt równoboczny. Dlaczego wierzchołki przeszkód i punkty należące do krawędzi nie podlegają dyskretyzacji tak jak reszta przestrzeni i wypadają pomiędzy punktami siatki? Dyskretyzacja przeszkód zgodnie z przyjętą siatką rozwiązałaby problem zamknięcia przejścia pomiędzy punktami charakterystycznymi z rysunku 9.11 i uprościłoby algorytm,
21. Dygresja ze strony 133 jest zbyteczna, jeśli Autor nie wyposażył BSP w układ skanowania otoczenia,
22. Zaprezentowany algorytm rozwiązania labiryntu, a przynajmniej wyznaczania ścieżki pomiędzy przeszkodami od punktu startowego do punktu docelowego można by było uprościć do algorytmu grafu widoczności z wyborem odcinków trasy tak, aby ona była najkrótsza. Eliminacja odcinków w sensie lokalnym, którą przedstawił Autor prowadzi do nieoptymalnego rozwiązania, gdyż jak sam zauważył może być usunięty odcinek będący częścią najkrótszej trasy,
23. Proponowany algorytm lotu w przestrzeni zamkniętej nie był dedykowany dla formacji BSP. Dopiero w rozdziale 9.6 algorytm został zasymulowany dla formacji 4 BSP, ale w celu uniknięcia kolizji zmieniono prędkości początkowe tak, aby BSP pomiędzy punktami charakterystycznymi poruszały się jeden za drugim, przy założeniu, że pierwszeństwo ma BSP znajdujący się najbliżej punktu przelotowego. Pojawia się pytanie czy formacja BSP byłaby w stanie przelecieć przez labirynt bez zmiany struktury. Może dobrym pomysłem byłby algorytm zmieniający dowolną strukturę formacji w łańcuch zależności przywódca – podążający pomiędzy parami BSP, z zdefiniowaną bezpieczną odległością pomiędzy przywódcą a podążającym,
24. Z wyników badań eksperymentalnych zarówno w trybie zależnym i niezależnym wynika, że ścieżki lotu znacząco odbiegają od zadanych ścieżek, a wahania pozycji BSP wykraczają znacząco poza zdefiniowany margines tolerancji LNS. Jedynie przy dwóch BSP i sterowaniu zależnym ścieżki lotu mieszczą się w tolerancji. Czy Autor zidentyfikował źródło tych błędów? Czy jest nim sam system LNS czy też zaimplementowane sterowanie, a w szczególności odwrócony znak osi y układu R_{3_3} względem R_{3_1} , niezależne sterowanie w osiach x , y , ograniczanie modułu czy mechanizm generowania punktów pośrednich?
25. Co Autor rozumie pod pojęciem „czysty lot”? Czy lot może być brudny? (str. 161 9 linijka)?

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Pomimo dość długiej listy uwag chciałbym podkreślić, że Doktorant wykonał niezwykle dużą ilość badań, a do tematyki podszedł dość szczegółowo. Dlatego też w tym miejscu chciałbym wymienić osiągnięcia Doktoranta:

1. Budowa dwóch klas tj. 130 i 300 bezzałogowych statków powietrznych,
2. Przeanalizowanie możliwości i parametrów układów sensorycznych stosowanych w BSP: GNSS, LNS (Marvelmind), magnetometr, czujnik ciśnienia statycznego, giroskop, akcelerometry, LIDAR jako wysokościomierz,
3. Przeprowadził oryginalne badania lokalnego systemu pozycjonowania LNS oraz wpływ sieci wysokiego napięcia na działanie urządzeń komunikacyjnych,
4. Eksperymentalnie zweryfikował działanie magnetometru w pomieszczeniu laboratorium i wyznaczył funkcję współczynnika korekcyjnego opisującej lokalną dewiację magnetyczną,
5. Zaprojektował laboratorium „Laboratorium Autonomicznych Systemów latających” wraz z montażem wyposażenia w postaci modułów systemu LNS (Marvelmind),
6. Zaprojektował autorski algorytm zdecentralizowanej sieci komunikacyjnej z wykorzystaniem radiomodemów 433MHz, do której mogą dynamicznie dołączać się lub ją upuszczać kolejne BSP,
7. Zaimplementował autorskie algorytmy sterowania pojedynczym BSP umożliwiające realizację skomplikowanych ścieżek lotu, a następnie wykonał badania eksperymentalne lotu BSP,
8. Opracował panel sterowania i oprogramowanie kontroli formacji na bazie środowiska Mathworks,
9. Opracował i zaimplementował autorskie algorytmy lotu w przestrzeni otwartej i zamkniętej oraz przeprowadził badania symulacyjne i eksperymentalne w zbudowanym laboratorium,
10. Doktorant wyniki związane z prowadzonymi badaniami opublikował w 16 artykułach naukowych i referatach na konferencjach.

Najważniejszym atutem pracy Doktoranta jest fakt, że wszystkie urządzenia i BSP zostały zbudowane od podstaw, łącznie z panelem operatora i oprogramowaniem komputera kontroli formacji. Przeprowadzone badania eksperymentalne udowadniają postawioną tezę, a w szczególności weryfikują zaimplementowane algorytmy z sukcesem.

Mając na uwadze wymienione powyżej osiągnięcia oraz fakt, że wymienione uwagi krytyczne nie są uwagami podważającymi zaproponowane rozwiązanie, lecz mające na celu wyjaśnienie pewnych kwestii z całym przekonaniem stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Patryka Szywańskiego pt. „Sterowanie zdecentralizowaną siecią bezzałogowych jednostek latających” spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim określone w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity: Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.). Wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.



Dr hab. inż. Cezary Kownacki, prof. PB