

dr hab. inż. Krzysztof Falkowski, prof. WAT
Wojskowa Akademia Techniczna

Warszawa, 2022-08-16

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Chmielewskiego
„Modelowanie trajektorii ataku amunicji krążącej”

Niniejszą recenzję opracowano na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna prof. dr hab. inż. Roberta Sitnika – pismo nr RNDIM/521/29/2022 z dnia 13.06.2022 r.

1. Ogólna, formalna charakterystyka pracy

Recenzowana rozprawa została przedstawiona na 210 stronach maszynopisu i zawiera trzynaście rozdziałów, spis treści, wstęp, streszczenie i bibliografię. Rozdział trzynasty zawiera wnioski z pracy.

Autor rozprawy we wstępie przedstawił cel i trzy tezy pracy oraz scharakteryzował skalę problemu, który wiąże się z utratą zdolności obserwacji celu przed wejściem w lot nurkowy amunicji krążącej. Następnie przedstawił zakres tematyczny poszczególnych rozdziałów. Po zapoznaniu się z treścią rozprawy, można ją podzielić na trzy części. W pierwszej części omówione są podstawowe pojęcia związane z konstrukcją amunicji krążącej oraz metodyką modelowania i symulacji. Druga część rozprawy prezentuje model matematyczny bezzałogowego statku powietrznego. Natomiast w części trzeciej Autor rozprawy prezentuje oryginalne osiągnięcie naukowe. W tej części przedstawione są autorskie algorytmy i wyniki badań weryfikacyjnych układu rozpoznawania i naprowadzania amunicji krążącej na cel.

Część pierwsza obejmuje rozdziały od pierwszego do trzeciego. W rozdziałach tych Autor rozprawy zdefiniował pojęcie amunicji krążącej oraz przeprowadził analizę cech konstrukcyjnych bezzałogowych statków powietrznych (BSP) wykorzystywanych do jako amunicja krążąca. Analiza konstrukcji obejmuje ocenę napędu, układu aerodynamicznego oraz

wyposażenia optoelektronicznego BSP. Na podstawie przeprowadzanej analizy Doktorant określił konfigurację bezzałogowego statku powietrznego, który zostanie wykorzystany do zbudowania modelu matematycznego wykorzystanego w procesie weryfikacji algorytmów oraz przygotowanego oprogramowania do sterowania BSP podczas ataku stromotorowego.

W kolejnym rozdziale tej części rozprawy (rozdział drugi) zdefiniowane zostały podstawowe problemy występujące podczas ataku stromotorowego. Autor rozprawy wskazał na problem utraty widoczności celu, wpływ oddziaływania atmosfery podczas wykonania uderzenia na cel (wpływ wiatru) oraz utrata lub zanik sygnału z satelitarnego układu określania pozycji GPS. Dodatkowo uwzględnia ograniczenia związane z ingerencją w certyfikowany sprzęt, tak by zmiany nie obejmowały konstrukcji bezzałogowego statku powietrznego. Autor rozprawy przyjmuje założenie, że ingerencja nastąpi tylko na poziomie oprogramowania.

Trzeci rozdział, a zarazem ostatni w tej części, obszernie omawia środowisko wykorzystane do prowadzenia badań symulacyjnych oraz modele matematyczne poszczególnych elementów systemu. Autor rozprawy opracował modele matematyczne BSP, atmosfery i układów sterowania. Przygotowane modele matematyczne współpracują z komputerem pokładowym realizującym zadanie śledzenia celu oraz stacji naziemnej obsługiwanej przez operatora. Oprogramowanie komputera pokładowego zostało uruchomione z wykorzystaniem maszyny wirtualnej. Lot BSP został przedstawiony w środowisku graficznym FlightGear, które realistycznie przedstawia cele ataku, otoczenie oraz BSP.

Część druga pracy obejmuje rozdziały od czwartego do ósmego. W rozdziałach tych Autor szczegółowo omówił modele matematyczne wykorzystane do symulacji ruchu BSP – amunicji krążącej. Charakterystyki aerodynamiczne BSP oszacowane zostały w środowisku DATCOM, a następnie wykorzystane w Simulinku do zbudowania modelu matematycznego właściwości dynamicznych BSP.

Kolejne rozdziały w tej części pracy prezentują modele matematyczne:

- a) oddziaływania atmosfery na BSP (rozdział piąty),
- b) układu zarządzania lotem BSP (rozdział szósty),
- c) układu sterowania (rozdział siódmy),
- d) układu stabilizacji (rozdział ósmy).

Poszczególne modele wykonane zostały z wykorzystaniem Aerospace Toolbox, który jest dostępny w środowisku Matlab-Simulink. Model układu zarządzania lotem wykonany został



jako maszyna stanów w Matlab State-Flow. W modelu oddziaływania atmosfery Doktorant wykorzystał model atmosfery wzorcowej, model wiatru wraz z uwzględnieniem turbulencji oraz odwzorowanie WGS84 do wyznaczenia natężenia pola grawitacyjnego Ziemi.

Trzecia część rozprawy obejmuje zagadnienia związane z modelowaniem trajektorii ruchu BSP podczas wykonywania ataku stromotorowego. W tej części omawiane są algorytmy zabezpieczające proces automatycznego naprowadzania amunicji krążącej na cel. Autor rozprawy przedstawił w rozdziale dziewiątym metodę określania położenia celu względem BSP z wykorzystaniem przypisania jego położenia względem matrycy kamery obserwacyjnej. Proces ten obejmuje analizę położenia środka ciężkości BSP względem ogniskowej kamery i wyznaczenie odległości do punktu celu.

Kolejny etap procesu naprowadzania BSP na cel przedstawiony został w rozdziale dziesiątym. Autor rozprawy szczegółowo omawia metodę rozpoznania celu po wejściu w lot nurkowy BSP na podstawie ostatniego zapamiętanego przez kamerę obrazu. Omawiany proces uwzględnia proces uczenia sieci neuronowej na podstawie cech geometrycznych obiektu, natomiast Doktorant zaproponował dodatkowo zastosowanie algorytmu wykorzystującego wykrywanie cech koloru obiektu i otoczenia (algorytm CBTR – Color Based Target Return). Natomiast w rozdziale jedenastym przedstawione zostały algorytmy zapewniające skuteczne przeprowadzenie ataku przy braku lub zaniku sygnału GPS. W rozdziale tym przedstawiony został algorytm estymatora prędkości i dryfu spowodowanego oddziaływaniem atmosfery na BSP podczas lotu nurkowego. Rozdział dwunasty obejmuje badania symulacyjne oraz eksperymentalne (wykonane loty) mające na celu weryfikację opracowanych algorytmów. Należy zauważyć, że trzecia część pracy stanowi prezentację oryginalnego osiągnięcia Doktoranta.

Ostatni trzynasty rozdział obejmuje wnioski i podsumowanie wykonanej w ramach doktoratu wdrożeniowej pracy. Recenzowana praca kończy się bibliografią, która zawiera 62 pozycje, w tym 8 odwołań dotyczy stron internetowych i 14 to odwołania do materiałów firmy Mathworks dostawcy oprogramowania Matlab-Simulink. W pracy umieszczono odwołania do wszystkich pozycji literatury. Poszczególne odwołania są adekwatne do prezentowanej w pracy treści.

2. Ocena tematu i zakresu pracy

Recenzowana rozprawa porusza bardzo istotną i aktualną problematykę. Obecnie obserwujemy dynamiczny rozwój systemów bezzałogowych, które wprowadzają nową jakość w obszarze wykorzystania wojskowego i cywilnego. Wprowadzenie robotów latających na wyposażenie pododdziałów wojska staje się koniecznością. Roboty latające prowadzą rozpoznanie na poziomie taktyczno-operacyjnym, wspierają naprowadzanie i celowanie pododdziałów artylerii i lotnictwa oraz wykonują bezpośrednie ataki na pododdziały nieprzyjaciela. Bojowe roboty mobilne, jako bezzałogowe statki powietrzne o masie poniżej 50 kg, prędkości lotu w zakresie 10÷20 m/s oraz pułapie operacyjnym do 1000 m, zmieniły sposób prowadzenia działań przez wojsko na poziomie taktycznym i operacyjnym. Obiekty o wskazanych parametrach są bardzo trudne do wykrycia i unieszkodliwienia przez współczesne środki obrony przeciwlotniczej. Konflikty zbrojne z ostatnich dwóch lat wykazują regularne wykorzystanie latających robotów mobilnych wykorzystywanych do rozpoznania i wsparcia oddziałów wojskowych.

W grupie bezzałogowych statków powietrznych wykorzystywanych przez pododdziały wojska jest amunicja krążąca. Małe bezzałogowe statki powietrzne mogą przebywać w powietrzu przez kilka godzin i po wykryciu celu przeprowadzić atak bezpośredni lub stromotorowy. Atak stromotorowy umożliwia wykonanie uderzenia w słabe miejsca celu, dodatkowo w wyniku gwałtownego wytracania wysokości bezzałogowy statek powietrzny uzyskuje bardzo dużą prędkość w momencie uderzenia w cel.

W wyniku ataku amunicji krążącej destrukcji ulega bezzałogowy statek powietrzny, dlatego cechą charakterystyczną tego typu robotów mobilnych jest ich niski koszt wykonania. W konstrukcji amunicji krążącej wprowadza się proste i tanie rozwiązania. Przykładem takiego podejścia jest zamocowanie kamery, która jest zaklinowana w stałym położeniu. Położenie kamery jest tak dobrane, by pole obserwacji FOV kamery umożliwiała wykrycie celu przed amunicją krążącą. Jednak podczas przechodzenia w lot nurkowy kamera traci cel z pola widzenia. Dlatego amunicja krążąca w większości rozwiązań wykonuje uderzenie bezpośrednie w cel. Wykonanie ataku stromotorowego przez amunicję krążącą wymaga nadania bezzałogowemu statkowi powietrznemu cech autonomii. Statek powietrzny, po poleceniu wykonania ataku, estymuje punkt wejścia w lot nurkujący. Ponieważ cel wychodzi z pola widzenia kamery, to po rozpoczęciu lotu nurkującego musi ponownie wykryć cel i przechodzi w tryb jego śledzenia. Zrzucenie zadania na pilota amunicji krążącej nie zapewnia

odpowiedniej skuteczności, ponieważ czas lotu nurkowego jest bardzo krótki i pilot ma ograniczone możliwości reakcji (Autor porusza ten problem w rozdziale 2.2.2 rysunek 2.2). Dlatego niezbędnym jest nadanie amunicji krążącej cech autonomii, która zapewni niezależne od pilota działanie systemu.

Doktorant Pan Piotr Chmielewski w rozprawie doktorskiej przedstawił autorski algorytm odszukania celu po wejściu w lot nurkowy. Przywrócenie procesu śledzenia celu polega na analizie ostatniej zapisanej ramki obrazu przed utratą widoczności celu. Algorytm ten opiera się o analizę cech kolorów obiektu. Obraz zapisany w ostatniej ramce poddany jest przetwarzaniu i wyznaczana jest maska binarna na podstawie oceny barw zapisanych w obrazie. Ocena sprowadza się do analizy cech barw zgodnie z paletą HSV. Wynikiem jest wyznaczenie średniej HSV i określenie cech celu. Cechy geometryczne wyznaczone przez program śledzenia celu (TLD) przechowywane są w komputerze pokładowym i wykorzystywane przez układ przywracania śledzenia celu po wejściu w lot nurkowy. Proces jest ponownie powtarzany i wyznaczane są cechy kolorów obrazu, na którym poszukiwany jest cel. Operacja ta wykonywana jest w czasie rzeczywistym przez komputer pokładowy.

Kolejnym autorskim elementem pracy jest algorytm przeciwdziałania dryfowi linii celowania spowodowany oddziaływaniem atmosfery przy utracie lub zaniku sygnału GPS. Przy niezakłóconym dostępie do informacji o położeniu amunicji krążącej podczas ataku z systemów nawigacji satelitarnej, można łatwo korygować położenie BSP. Natomiast utrata sygnału może doprowadzić do obniżenia skuteczności ataku. Autor rozprawy zaproponował algorytm, który estymuje prędkość i dryf amunicji krążącej względem Ziemi. Wykorzystując metody optyczne, algorytm szacuje ujęcie statku powietrznego, a wartość dryfu uwzględniana jest podczas wykonywania ataku.

Dlatego uważam, że przyjęty w pracy cel został osiągnięty, jak również potwierdzone zostały tezy założone w rozprawie doktorskiej.

3. Ocena rozprawy

Do podstawowych zalet rozprawy pod względem wyboru metod, zakresu badań, opracowania i prezentacji wyników oraz badawczego wkładu Doktoranta zaliczam:

- a) podjętą tematykę,
- b) opracowanie algorytmu wyznaczania georeferencji położenia wykrytego celu przed atakiem amunicji krążącej,

- c) opracowanie algorytmu przywracania śledzenia celu w locie nurkowym amunicji krążącej z wykorzystaniem cech koloru (algorytm CBTR),
- d) opracowanie algorytmu estymowania prędkości i dryfu statku powietrznego po zaniku lub utracie sygnału GNSS,
- e) wykonanie modelu matematycznego amunicji krążącej i integracja z oprogramowaniem komputera pokładowego, stacji bazowej i środowiska 3D do prezentacji ruchu BSP w wirtualnym otoczeniu,
- f) opracowanie i wykonanie badań symulacyjnych weryfikujących opracowane algorytmy,
- g) opracowanie i przeprowadzenie badań poligonowych z wykorzystaniem BSP markującego wykonanie ataków w locie nurkującym.

Recenzowana praca wnosi istotny wkład w rozwój inżynierii mechanicznej, za który uważam opracowanie algorytmów oraz przygotowanie programów umożliwiających przywracanie śledzenia celu po wejściu w lot nurkowy i estymację dryfu toru lotu podczas nurkowania. Jak zaznaczono wcześniej temat pracy jest aktualny i bardzo ważny z punktu widzenia obronności i bezpieczeństwa państwa. Posiadanie systemów uderzeniowych tej klasy daje przewagę na współczesnym polu walki.

O przewadze systemu amunicji krążącej świadczy wiele czynników, jednym z nich jest oprogramowanie realizujące podstawowe funkcjonalności systemu. Przez optymalizację i modyfikację oprogramowania można uzyskać nowe możliwości układu mechatronicznego bez ingerencji w jego konstrukcję. Do testowania algorytmów coraz częściej wykorzystuje się podejście Software in the Loop i taką metodykę postępowania zastosował Autor rozprawy.

Pan Piotr Chmielewski opracował algorytmy, które w istotny sposób mogą wpłynąć na poprawę celności systemów amunicji krążącej. Tego typu systemy obecnie są rozwijane przez przedsiębiorstwa z różnych krajów. Szczegóły rozwiązań są pilnie strzeżone z oczywistych względów. Dlatego tak ważne i istotne są prace badawcze w obszarze systemów umożliwiających wykonywanie autonomicznego ataku przez amunicję krążącą. Metodyka prowadzenia badań nie budzi zastrzeżeń. Zaprezentowane wyniki badań w locie potwierdzają zdolność Doktoranta do prowadzenia samodzielnej pracy badawczej. Ponadto uważam, że opracowane stanowisko do prowadzenia badań symulacyjnych z powodzeniem można wykorzystać jako symulator do szkolenia pilotów amunicji krążącej.

Rozprawa jest zaprezentowana w sposób przejrzysty i logiczny. Nie mam również uwag co do prowadzonego eksperymentu oraz poprawności wnioskowania. W ramach dyskusji publicznej chciałbym dowiedzieć się więcej o wynikach stromotorowego ataku z wykorzystaniem amunicji krążącej. O takim eksperymencie wspomina Autor rozprawy w rozdziale 13. W wyniku przeprowadzanego ataku amunicja krążąca uderzyła 0.5 m od środka celu.

W trakcie lektury rozprawy zauważyłem pomyłki i niedociągnięcia redakcyjne, które nie mają istotnego wpływu na pozytywny odbiór pracy, ale wykazanie ich może mieć pozytywny wpływ na przygotowywanie kolejnych pisemnych opracowań przez Autora rozprawy.

Uwagi merytoryczne.

1. W pracy jest używane pojęcie „*Atak wizyjny*”. Atak to coś nagłego i w wojsku wiąże się aktywnym działaniem mającym na celu zniszczenie przeciwnika. Układ optyczny wykorzystany w pracy służy do określania położenia celu względem bezzałogowego statku powietrznego. „*Video aiming*” raczej należy określić jako celowanie z wykorzystaniem układu rejestracji obrazu. Uważam, że „*Atak wizyjny*” nie jest szczęśliwym terminem (str. 21).
2. „*Algorytmy nawigacyjne amunicji krążącej w czasie ataku dążą do niwelacji wskazanego uchybu.*” (str. 25). Autor recenzowanej pracy zamiennie używa pojęć z obszaru nawigacji i sterowania. Zgodnie z teorią sterowania pojęcie uchybu dotyczy układów automatycznej regulacji. Natomiast nawigacja i związane z tym układy odpowiadają za określanie pozycji i wyznaczanie kierunku dalszego poruszania się bezzałogowego statku powietrznego. Proszę o wyjaśnienie.
3. „*logika autopilota*” (str. 29). Pojęcie używane potocznie. System sterowania statków powietrznych obejmuje trzy główne układy. Pierwszy odpowiedzialny jest za stabilizację położenia przestrzennego statku powietrznego, drugi to układ stabilizacji kierunku, wysokości i prędkości lotu, natomiast trzeci zajmuje się zarządzaniem lotem. Trzeci układ zbudowany jest w oparciu o maszyny stanu, które zmieniają konfigurację układu sterowania zależnie od zakresu i konfiguracji statku powietrznego. Dlatego powinno się używać określenia układ zarządzania lotem.

4. Podrozdział 4.3 błędnie opisane są równania ruchu. W równiach ruchu liniowego i obrotowego (4.1) i (4.6) brakuje pochodnych (str. 57).
5. Autor używa określenia „nurkowanie” np. „Przejście do kontrolera nurkowania” (str. 69). W lotnictwie używa się określenia „lot nurkowy”.
6. W podpunkcie 7.2.1 przedstawiony jest kontroler kursu. W punkcie tym Autor rozprawy pisze o doborze nastaw regulatora P, I i D. Natomiast na rysunku 7.11 przedstawiony jest schemat z regulatorami zawierającymi tylko człony P i I (str. 84). Proszę to wyjaśnić.
7. Kontroler stabilizacji pochylenia (str. 93), niezrozumiałe jest wprowadzenie wzmocnienia Feed Forward. Wartość tego wzmocnienia jest włączona równolegle z wzmocnieniem proporcjonalnym. W takim przypadku otrzymuje się efekt sumowania wartości wzmocnień i nie ma efektu Feed Forward. Problem jest powielany na stronie 94 w podpunkcie 8.2. Proszę o wyjaśnienie.
8. Wzory (9.7) ÷ (9.11) zostały powtórzone. Wcześniej występowały jako (7.4) ÷ (7.8) (str. 100).
9. „Wykres prędkości i wysokości lotu również przycięto do tego zakresu” (str. 104). Kolejny przykład potocznego języka. Raczej powinno być określono/ograniczono analizowany zakres odległości do celu na wykresie. Sformułowanie „przycinanie wykresu” jest używane również w innych miejscach pracy np. str. 107. Przypadków użycia języka potocznego jest więcej np. „wycinając nowa klatkę do nauki” (str. 107).
10. Niezrozumiałe jest określenie „wysyłają współrzędne w zakresie od 0 do 1000%” (str. 114). Proszę o wyjaśnienie.
11. W pracy wstępuje nieszczęśliwe sformułowanie „Układ współrzędnych o sześciu stopniach swobody, związany z BSP oznaczono”. Raczej BSP posiada stopnie swobody, a nie układ współrzędnych (str. 147).
12. Uwaga ogólna dotyczy braku definicji układów współrzędnych. W pracy występują różne układy współrzędnych. Autor nazywa te układy, często używając terminologii lotniczej, jednak definicje są niezgodne z obowiązującymi normami. Dopuszczam używanie własnych układów współrzędnych, jednak niezbędna jest ich wcześniejsza definicja.

Uwagi redakcyjne.

1. W rozprawie nagminnie używane jest słowo „stworzyć”. W akapicie na stronie 15 „stworzone” użyte zostało 6 razy w różnej formie. W dalszej części pracy Autor nadmiernie wykorzystuje słowo „stworzyć”. Proponuje używać zamiennie „opracować”, „wykonać” itd.
2. Błędne podpisy pod rysunkami 1.3 i 1.4 (str. 19).
3. Opis rysunku 3.8. Brak opisu sygnałów na rysunku (str. 38).
4. Powielony akapit ze strony 54 na stronie 55. Ten sam opis w punkcie 4.2.3 „*Wpływ lotek*” w punkcie 4.2.4 „*Wpływ steru kierunku*”.
5. Odwołanie do rysunku 3.2 na stronie 68 jest niezasadne. Błąd odwołania.
6. Błędne odwołanie do rysunku jest „*Rys. 11.1*” powinno być „*Rys. 10.1*” (str. 113).
7. Uwaga ogólna dotyczy braku wykazu skrótów i oznaczeń. Wskazane jest umieszczenie na początku pracy takiego wykazu. Autor w pracy wprowadza skrót *CBTR* na stronie 15. Wy tłumaczenie skrótu znalazłem na stronie 112. Umieszczenie wykazu ułatwi czytanie i zgłębienie rozprawy doktorskiej.

4. Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę zakres i poziom recenzowanej pracy doktorskiej, przedstawione wyniki, badania eksperymentalne oraz jej bezpośredni związek z praktyką inżynierską oraz brak poważnych uwag merytorycznych stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, Dziennik Ustaw nr 65, poz. 595. Wniosuję zatem o dopuszczenie mgr inż. Piotra Chmielewskiego do publicznej obrony Jego rozprawy.

