



Koncepcja algorytmu antykolizyjnego bezzałogowych statków powietrznych

SEBASTIAN TATKO, STANISŁAW KONATOWSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa,
sebastian.tatko@wat.edu.pl, stanislaw.konatowski@wat.edu.pl

Streszczenie. Podstawą nowatorskiego algorytmu antykolizyjnego jest implementacja programowa umożliwiająca unikanie kolizji przez BSP z przeszkodami otoczenia, a także z innymi obiektami latającymi. W artykule wykorzystano uproszczone równania opisujące dynamikę czterowirnikowca ułatwiające modelowanie struktury symulacyjnej. Programowa realizacja modelu czterowirnikowca wraz z kontrolerem jest podstawą działania algorytmu antykolizyjnego. W układzie sterowania modelem zastosowano trójstopniowy kontroler proporcjonalno-całkująco-różniczkujący. Inspiracją powstałego programu jest oddziaływanie magnetyczne. Algorytm omijania przeszkód bazuje na pomiarze wartości kątowych i doborze proporcjonalnej siły wirtualnej. Siła odpychająca czterowirnikowiec od przeszkody jest parametrem zależnym od jego składowych prędkości liniowych, zamiaru na przeszkodę oraz odległości od niej. Uzyskane mapy ciepła odzwierciedlają skalowanie wartości oraz kierunku oddziaływania siły odpychającej. Po zdefiniowaniu punktu docelowego oraz położenia przeszkody na pokładzie czterowirnikowca dokonuje się pomiaru niezbędnych parametrów oraz doboru współrzędnych korygujących kurs kolizyjny. Analizie poddano parametry lotu czterowirnikowca oraz współczynniki kontroli algorytmu antykolizyjnego. Poprawność działania programu została sprawdzona w sposób symulacyjny z wykorzystaniem licznych charakterystyk.

Słowa kluczowe: BSP (bezzałogowy statek powietrzny), omijanie przeszkód, algorytm antykolizyjny, model dynamiki BSP, czterowirnikowiec

DOI: 10.5604/01.3001.0053.6747

1. Wprowadzenie

Unikanie przeszkód to jedna z podstawowych funkcji pojazdów autonomicznych, wykorzystywana w celu obniżenia ich awaryjności, a także wyeliminowania kolizji czy uniknięcia narażenia życia ludzkiego. W tym celu przeprowadzono liczne badania i opracowano wiele metod, z których kilka znalazło zastosowanie

w rzeczywistych systemach. Algorytmy omijania przeszkód to aktualnie niezbędna zdolność maszyn do uzyskiwania większej autonomii, elastycznego i bezpiecznego zachowania w zmiennych warunkach działania.

Artykuł przedstawia zarys nowatorskiego algorytmu omijania przeszkód przez bezzałogowy statek powietrzny, jakim jest czterowirnikowiec. Założeniem było opracowanie uniwersalnej koncepcji omijania przeszkód, która powinna być prosta w interpretacji oraz tania w realizacji. Istotą rozwiązania jest wykorzystanie danych telemetrycznych o odległości do przeszkody oraz parametrach kursowych BSP, aby oszacować siłę wirtualną przeciwdziałającą kolizji. Z kolei wirtualna siła steruje kontrolerem lotu w celu zmiany trajektorii BSP.

Artykuł składa się z siedmiu sekcji. W części teoretycznej zostały przedstawione różne koncepcje metod omijania przeszkód oraz matematyczny opis dynamiki czterowirnikowca. Informacje te wykorzystano w sekcji czwartej do implementacji programowej bezzałogowego statku powietrznego. Istotną częścią artykułu są części piąta i szósta poświęcone zaproponowanej koncepcji omijania przeszkód i badaniom symulacyjnym.

2. Charakterystyka metod omijania przeszkód

Ważnym zagadnieniem przy omijaniu przeszkód jest precyzyjne określenie położenia bezzałogowego statku powietrznego (BSP). Możliwość wykrycia przeszkody przez BSP z kilku centymetrów bez konieczności stosowania odbiornika nawigacji satelitarnej to kluczowy czynnik fazy lotu. Zdecydowana większość systemów mających zdolność omijania przeszkód bazuje na fuzji danych, ponieważ zdolności pojedynczych czujników, takich jak czujnik podczerwieni, kamera lub lidar, są ograniczone. Tak więc rozwiązania techniczne systemów omijania przeszkód bazują na połączeniu wielu czujników w celu zagwarantowania wysokiej skuteczności. Przykładem potwierdzającym tę strategię może być rozwiązanie [1], w którym algorytm unikania przeszkód bazuje na jej wstępnym wykryciu przez lidar, a do potwierdzenia wykonania manewru omijania przeszkody wykorzystuje obraz otrzymany z kamery. Spotykanym rozwiązaniem są także systemy wyposażone w dalmierz laserowy i czujniki podczerwieni do rozpoznawania przeszkód i ścian [2, 3], dzięki którym bezzałogowy statek powietrzny jest w stanie wykonać loty autonomiczne. Jednak czas ich pracy jest bardzo ograniczony ze względu na znaczne zużycie energii przez czujniki. Proces rozpoznawania przeszkód i lot autonomiczny mogą być realizowane przy użyciu tylko kamery stereoskopowej [4, 5]. Ze względu na wagę kamera stereofoniczna jest preferowana do montowania w miniaturowych systemach. W rozwiązaniach tych, gdy BSP porusza się z dużą prędkością, a także podczas startu i lądowania, występują nadmierne wibracje zmieniające położenie kamery na jego pokładzie i utrudniające sterowanie nim.

Istnieją również aplikacje, w których sterowanie BSP wykonywane jest za pomocą kamer [6, 7]. Algorytm stabilnego lotu autonomicznego w lesie [6] wykorzystuje pseudouczenie do kojarzenia danych wideo z kamery sterowanej przez człowieka. W rozwiązaniu [7] bezzałogowy statek powietrzny wyposażono w kamerę śledzącą ruch człowieka, a algorytm umożliwia wybór najlepszej trasy do tego zadania.

Zacytowane rozwiązania systemów omijania obejmują wiele różnych podejść technologicznych oraz sprzętowych. Potwierdzają także, że proces optymalizacji związany z autonomicznym sterowaniem bezzałogowymi statkami powietrznymi jest aktualny i stale rozwijany. Zaproponowane w artykule rozwiązanie jest odmienną formą wykorzystania danych pomiarowych o odległości do przeszkody oraz parametrach kursowych czterowirnikowca do bezpośredniego zarządzania jego dynamiką.

3. Opis matematyczny czterowirnikowca

W przyjętym układzie rozmieszczenia silników czterowirnikowca założono, że jego przód jest wyznaczony przez silnik pierwszy M1. Siła ciągu f_t (ang. *thrust*), która przeciwdziała sile grawitacji g , jest modelowana według zależności

$$f_t \geq 2 \cdot m_d \cdot g \quad (1)$$

gdzie: m_d stanowi masę czterowirnikowca.

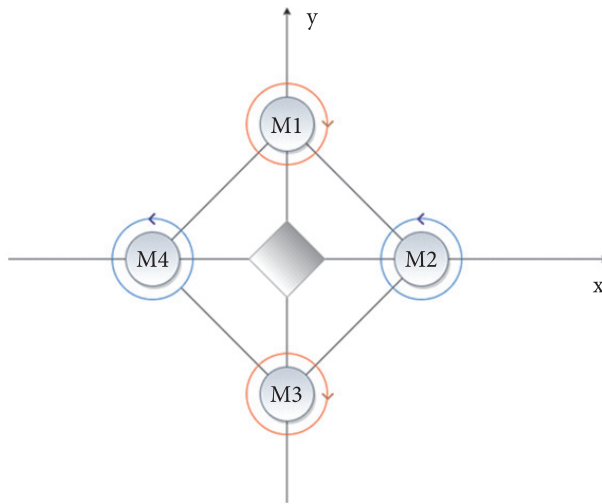
Obracający się wirnik powoduje również reakcję w postaci siły obrotowej, która chce wprawić silnik w ruch wokół własnej osi. Sytuację tę można porównać do śmigłowca, którego tylny wirnik jest niesprawny (umiejscowiony pionowo). Wtedy zasada zachowania sił w układzie nie jest spełniona, przez co śmigłowiec zaczyna obracać się wokół własnej osi. W czterowirnikowcu to niepożądane zjawisko jest zneutralizowane przez zmienne kierunki obrotu naprzemiennych par śmigieł. Wirniki silników M1 oraz M3 obracają się w prawą stronę, natomiast silników M2 i M4 w lewą.

Czterowirnikowiec to układ o sześciu stopniach swobody — trzech kierunkach ruchu postępowego (lewo, prawo, góra/dół) oraz trzech kierunkach obrotu (przechylenie, pochylenie i odchylenie). Jego przemieszczenie się w dowolnym kierunku jest możliwe dzięki sterowaniu niezależnymi czterema silnikami. Równania 2 i 3 przedstawiają sześć fundamentalnych praw ruchu czterowirnikowca [8]:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{f_t}{m_d} [s(\phi)s(\psi) + c(\phi)c(\psi)s(\theta)] \\ \ddot{y} = \frac{d^2 y}{dt^2} = -\frac{f_t}{m_d} [c(\phi)s(\psi)s(\theta) - c(\psi)s(\theta)], \\ \ddot{z} = \frac{d^2 z}{dt^2} = g - \frac{f_t}{m_d} \cdot [c(\phi)s(\theta)] \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \ddot{\phi} = \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{I_y - I_z}{I_x} \dot{\theta} \dot{\psi} + \frac{\tau_x}{I_x} \\ \ddot{\theta} = \frac{d^2y}{dt^2} = \frac{I_z - I_x}{I_y} \dot{\phi} \dot{\psi} + \frac{\tau_y}{I_y}, \\ \ddot{\psi} = \frac{d^2z}{dt^2} = \frac{I_x - I_y}{I_z} \dot{\phi} \dot{\theta} + \frac{\tau_z}{I_z} \end{cases} \quad (3)$$

gdzie: $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$ — drugie pochodne położenia w przestrzeni,
 f_t — siła ciągu,
 m_d — masa,
 ψ — kąt odchylenia (ang. *yaw*),
 θ — kąt pochylenia (ang. *pitch*),
 ϕ — kąt przechylenia (ang. *roll*),
 I_x, I_y, I_z — momenty bezwładności,
 τ_x, τ_y, τ_z — momenty obrotowe wzdłuż osi x, y, z .



Rys. 1. Przyjęty układ silników czterowirnikowca

Dane wejściowe, które bezpośrednio pozwalają na przemieszczanie czterowirnikowca, stanowią cztery prędkości obrotowe poszczególnych silników. Siła oddziałująca na czterowirnikowiec jest więc wynikiem sumy oddziaływania czterech niezależnych wirników [8, 9]:

$$\begin{cases} f_t = b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\ \tau_x = bl(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\ \tau_y = bl(\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \\ \tau_z = d(\Omega_2^2 + \Omega_4^2 - \Omega_1^2 - \Omega_3^2) \end{cases}, \quad (4)$$

gdzie: f_t — siła przyłożona do środka ciężkości BSP (ang. *finall trust*),
 b — współczynnik ciągu (ang. *thrust factor*),
 d — współczynnik oporu (ang. *drag factor*),
 l — odległość między silnikiem a środkiem ciężkości BSP,
 Ω_i — prędkość obrotowa i -tego silnika.

W aplikacjach programowych projektów opisanych w literaturze momenty bezwładności odzwierciedlające rzeczywisty model są wyliczane na podstawie pomiaru wagi i gęstości materiału, z jakiego wykonany jest wirnik. W artykule pracy przyjęto następujące wartości momentów [8]:

$$\begin{cases} I = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \\ I_x = 0,023 \\ I_y = 0,023 \\ I_z = 0,0478 \end{cases}. \quad (5)$$

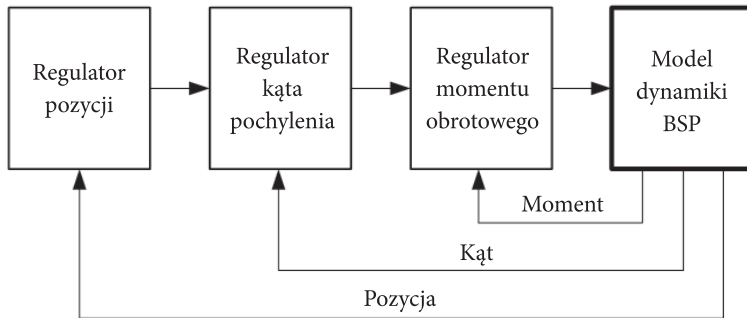
Przedstawione równania ruchu zostały uproszczone o aerodynamikę obiektu, siły i momenty żyroskopowe oraz dynamikę samego silnika.

4. Modelowanie czterowirnikowca w programie Matlab/Simulink

Zdefiniowane prawa ruchu bezzałogowego statku powietrznego umożliwiają opracowanie programu komputerowego do symulacji modelu czterowirnikowca. Nieodłączną częścią projektowanego obiektu dynamicznego jest także kontroler (rys. 2).

Uogólniając, kontroler to układ, który na podstawie wiedzy o dynamice systemu oraz obserwacji jego zachowania tak dobiera parametry sterowania, aby osiągnąć zdefiniowany cel. Efektem może być dokładna pozycja, prędkość, położenie lub każdy inny parametr kontrolowany przez użytkownika. Istnieje wiele metod oraz algorytmów

wykorzystywanych do sterowania bezpilotowymi statkami powietrznymi [3]. Przykładami mogą być sterowanie predykcyjne MPC (ang. *Model Predictive Control*) lub regulacja liniowo-kwadratowa LQR (ang. *Linear-Quadratic Regulator*). W praktyce najczęściej wykorzystywaną techniką sterowania obiektami jest regulacja PID (ang. *Proportional-Integral-Derivative controller*). Ten rodzaj sterowania proporcjonalno-całkująco-różniczkujący wykorzystano w artykule.



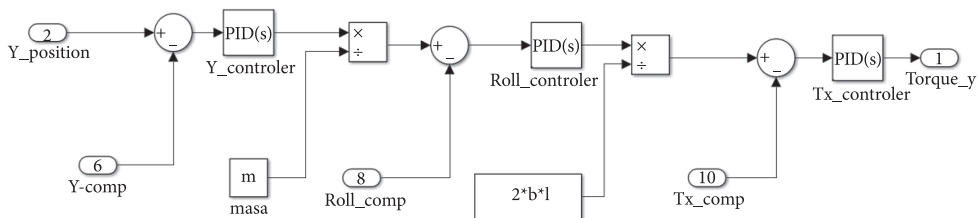
Rys. 2. Struktura zaprojektowanego kontrolera BSP

Zewnętrzna pętla sprzężenia zwrotnego pobiera informację o aktualnych współrzędnych czterowirnikowca. Porównanie tego sygnału z pożądanymi koordynatami skutkuje wypracowaniem uchybu regulacji pierwszego kontrolera. Celem tego regulatora jest sprowadzenie wartości błędu do zera, a więc osiągnięcie pożądanego lokalizacji. W kolejnym etapie procesu sterowania znaczącą rolę odgrywa regulator kątów przechyłu. Gdy czterowirnikowiec przemieszcza się, kontroler utrzymuje stały kąt przechyłu, aż do osiągnięcia zamierzonego celu. Na tym etapie nie jest możliwe bezpośrednie sterowanie czterowirnikowcem, gdyż z założeń projektu wynika, że do sterowania wykorzystywane są momenty obrotowe. Konieczne jest więc uruchomienie regulatora momentów obrotowych, który zapewnia płynne przejście między sygnałem sterującym otrzymywanym z regulatora kąta a sygnałem bezpośrednio podawanym na wejście modelu.

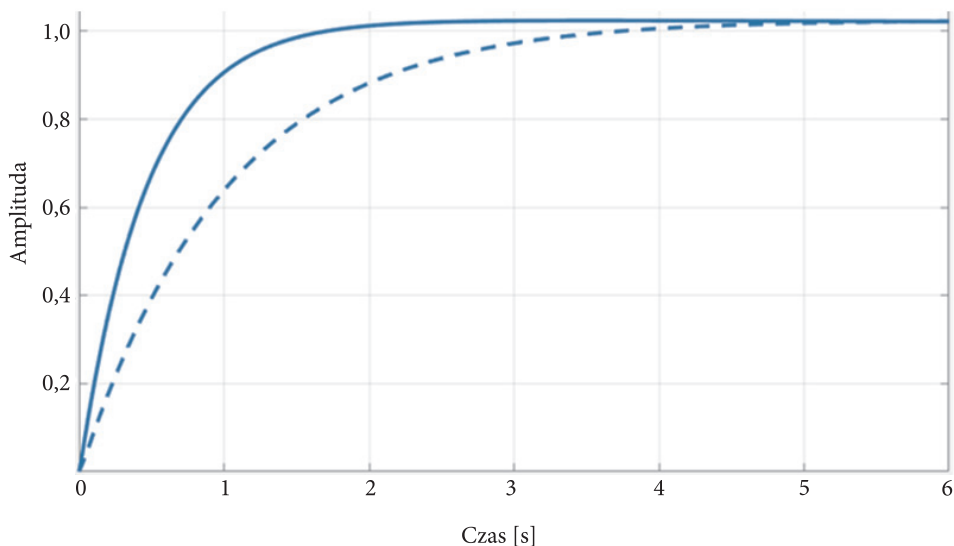
W programowej realizacji modelu kontroler zostaje uproszczony do trzech torów sterowania, z wykluczeniem kąta odchylenia (ang. *yaw*). Zabieg taki jest uzasadniony brakiem potrzeby wykonywania obrotu wokół osi Z w dalszej koncepcji programu. W przyjętej strukturze programowej wykorzystano siedem regulatorów PID. Rysunek 3 przedstawia wewnętrzną strukturę budowy kontrolera dla toru Y.

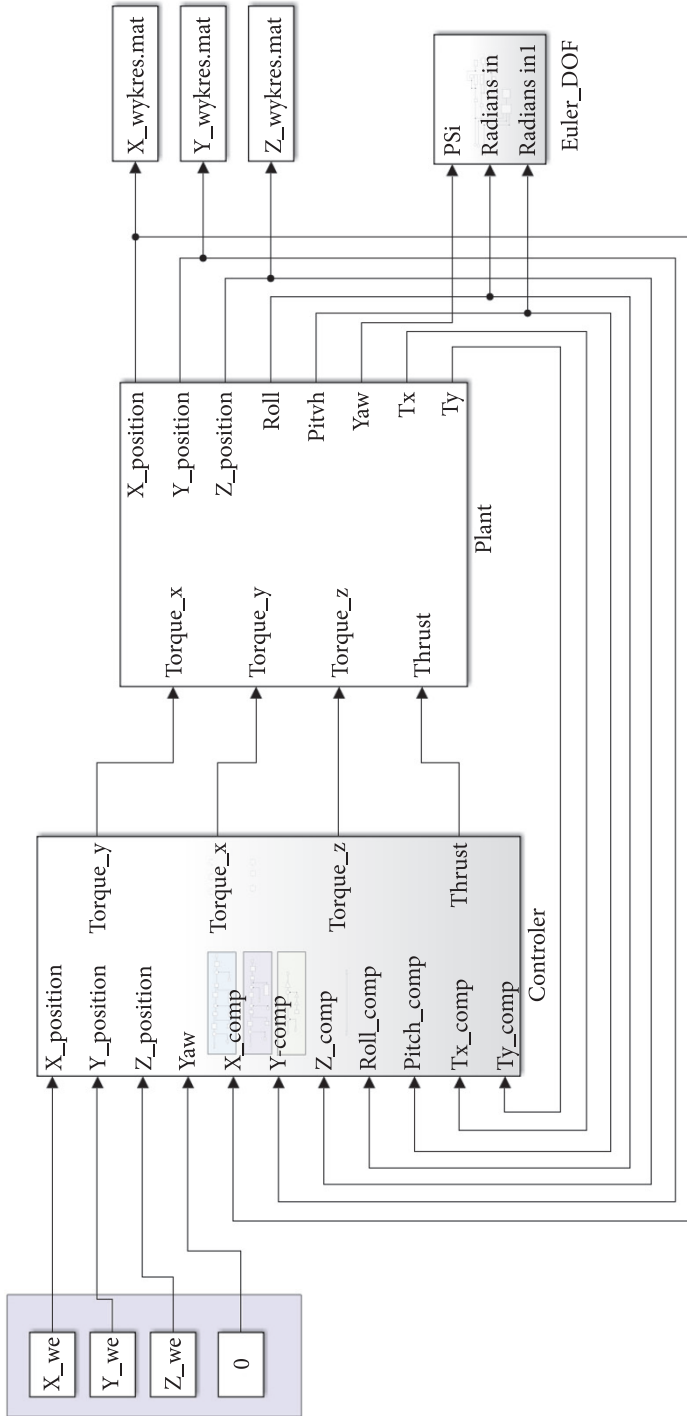
Dobór nastaw regulatorów jest zadaniem czasochłonnym, a strojenie układu można określić jako kompromis pomiędzy szybkością działania układu a dokładnością poszczególnych parametrów przy jak najmniejszym przeregulowaniu.

Proces strojenia przeprowadza się, zaczynając od wewnętrznej pętli regulacji momentu do pętli zewnętrznej, czyli sprzężenia zwrotnego pozycji. Proces doboru nastaw regulatorów został przeprowadzony w aplikacji *PID Tuner*, która umożliwia generację wykresów analizy zapewniających ocenę działania regulatora w dziedzinie czasu i częstotliwości. Strojenie układu pozwala na dobór odpowiedniego czasu odpowiedzi, przepustowości oraz marginesu fazy. Celem strojenia regulatorów (rys. 4) było uzyskanie maksymalnie płaskiej charakterystyki po czasie ustalenia danego parametru lotu.



Rys. 3. Tor Y kontrolera

Rys. 4. Efekt strojenia wybranych nastaw regulatora (linia ciągła) w aplikacji *PID Tuner*



Rys. 5. Struktura kontrolera połączonego z modelem czterowirnikowca

5. Koncepcja omijania przeszkód

Do funkcjonowania algorytmu antykolizyjnego niezbędne są dane o odległości bezzałogowego statku powietrznego od przeszkody oraz parametry kursowe czterowirnikowca. Do pomiaru odległości można zastosować dalmierze laserowe, ultradźwiękowe, sonary, a także kamery stereoskopowe. Jednak istotą artykułu nie jest omawianie sposobu pozyskiwania koniecznych parametrów. W algorytmie odległość od przeszkody jest szacowana na podstawie aktualnej pozycji czterowirnikowca w stosunku do znanego położenia przeszkody.

Pierwszym etapem algorytmu omijania przeszkody jest stwierdzenie, w jakim momencie BSP powinien wykonać ten manewr. Kryterium to jest dwustopniowe. Pierwsze ograniczenie, które musi być spełnione, wynika z przekroczenia zdefiniowanej z góry odległości detekcji (D_{det}). W każdej pętli program oblicza odległość BSP od przeszkody (D_p), następnie porównuje ją z odległością detekcji. Gdy jest ona większa od aktualnej odległości od przeszkody, to pierwsze kryterium jest spełnione.

Zastosowanie tylko takiego warunku byłoby nieefektywne, a program działałby nawet po ominięciu przeszkody, gdyby BSP znajdował się w odległości detekcji. W takim przypadku na podstawie zamiaru na przeszkodę i aktualnego kursu lotu wyliczany jest współczynnik kąta W_k (rys. 6). Pojawienie się siły wirtualnej odpychającej BSP jest uwarunkowane wcześniejszym kryterium oraz warunkami [9]:

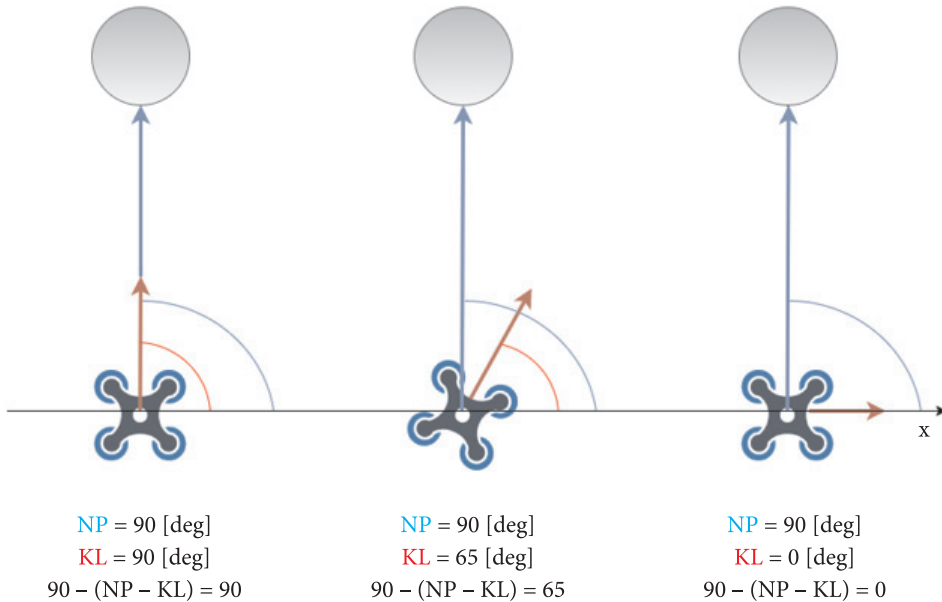
$$0^\circ \leq |90^\circ - (NP - KL)| \leq \sim 90^\circ, \quad (6)$$

$$W_k = \frac{90^\circ - (NP - KL)}{90^\circ}, \quad (7)$$

gdzie: NP — zamiar na przeszkodę,
 KL — kurs lotu BSP,
 W_k — współczynnik kąta.

Współczynnik kąta znajduje więc swoje zastosowanie również w skalowaniu siły maksymalnej, którą algorytm dysponuje do zmiany kursu. Siła, która w danym momencie spycha BSP na kurs bezkolizyjny, jest uzależniona także od współczynnika odległości (W_o)

$$W_o = \frac{D_{det} - D_p}{D_{det}}. \quad (8)$$



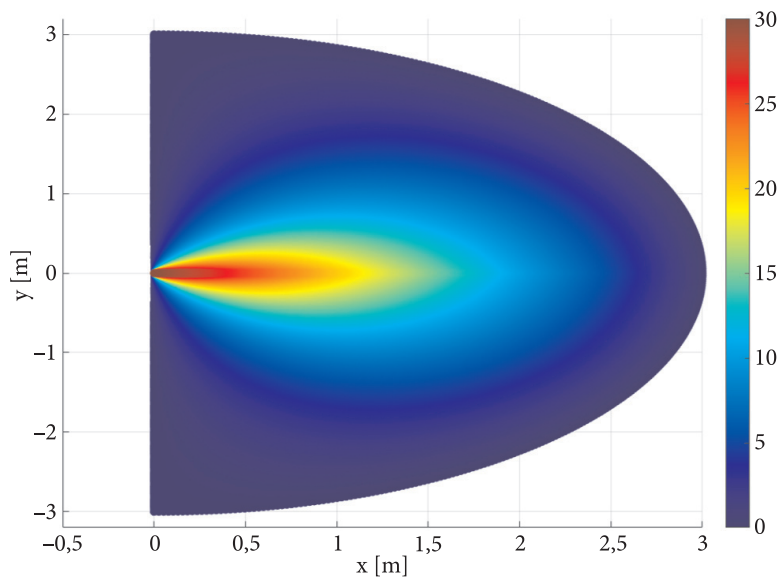
Rys. 6. Warunki działania siły wirtualnej

Współczynniki kąta i odległości przybierają wartości z przedziału [0-1]. Mogą one przeskalowywać wartość siły maksymalnej F_{\max} , którą przyjęto na poziomie 30 N. Wartość ta jest uzasadniona założeniem, że przy projektowaniu czterowirnikowca silniki powinny mieć siłę co najmniej dwukrotnie większą niż ciężar obiektu sterowanego

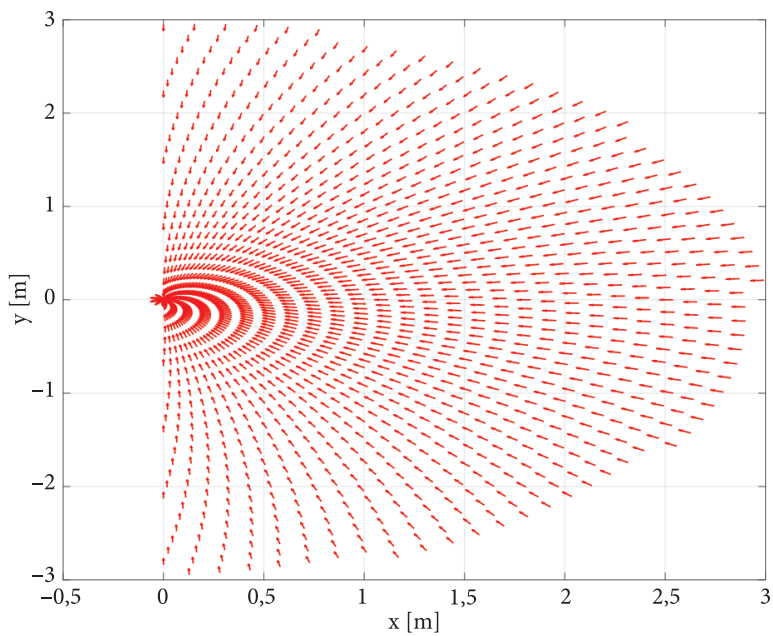
$$F = F_{\max} \cdot W_k \cdot W_o. \quad (9)$$

Na podstawie wzoru na siłę wirtualną wykreślono mapę ciepła (rys. 7). Dobór kilkudziesięciu tysięcy punktów, w zależności od odległości do przeszkody oraz zamiaru na przeszkodę, obrazuje w czytelny sposób miarę siły.

Z punktu widzenia trajektorii lotu BSP istotny jest kierunek oddziaływania siły wirtualnej (rys. 8). Aktualny kurs lotu statku powietrznego definiuje funkcja arcus tangens stosunku prędkości BSP w kierunku osi Y do prędkości BSP wzdłuż osi X. Kierunek siły wirtualnej jest zawsze prostopadły do aktualnego kursu. Łatwo więc stwierdzić, że w sytuacjach, gdy $NP > KL$, statek powietrzny wykona manewr omijania z prawej strony (względem kursu lotu). Natomiast gdy sytuacja jest odwrotna, to BSP przechylą się w kierunku przeciwnym.



Rys. 7. Mapa ciepła obrazująca działanie siły wirtualnej w funkcji odległości i namiaru na przeszkodę



Rys. 8. Opcje możliwych kursów lotu

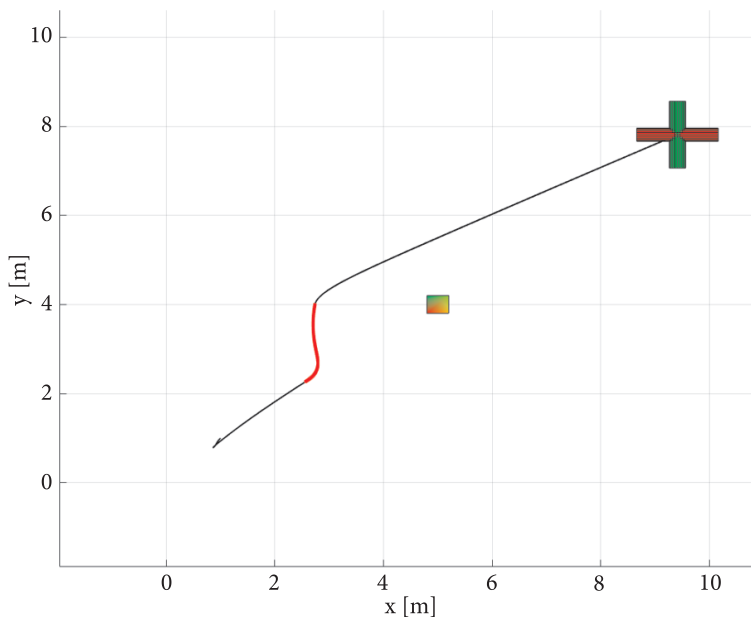
6. Wyniki badań symulacyjnych

Opracowany algorytm ma nieskończoną liczbę kombinacji współrzędnych początkowych przeszkody, pozycji startu oraz lądowania BSP. Algorytm był testowany eksperymentalnie przez dobór wielu zestawów współrzędnych z dyskretnością czasową równą 10 ms. Do zaprezentowania uzyskanych efektów posłużono się w artykule jedną z możliwych opcji konfiguracji o parametrach jak w tabeli 1.

TABELA 1

Współrzędne lotu testowego

Pozycja						Wysokość lotu
startu		lądowania		przeszkody		
x [m]	y [m]	x_{we} [m]	y_{we} [m]	X_p [m]	Y_p [m]	z [m]
1	1	10	8	5	4	5

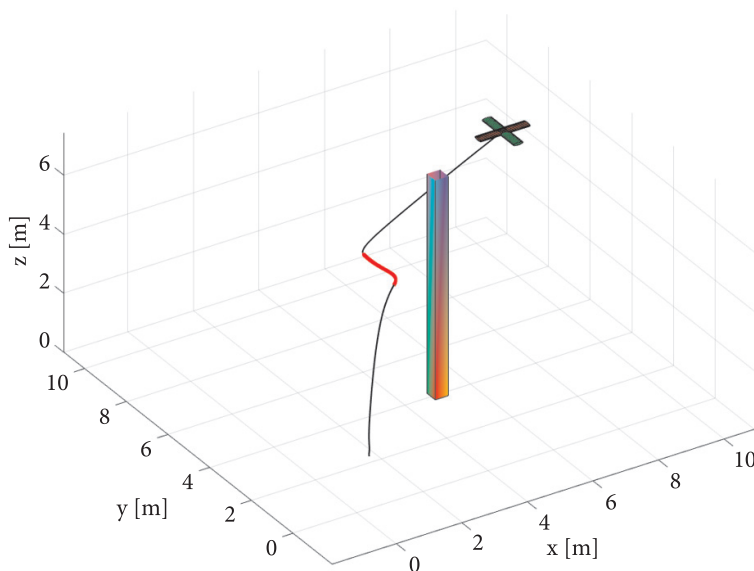


Rys. 9. Efekt działania algorytmu omijania przeszkody na płaszczyźnie

Program efektywnie współdziała z wcześniej zamodelowanym układem, a jego skuteczność jest wysoka. Przeszkodę reprezentuje graniastosłup prawidłowy czworokątny o długościach krawędzi podstawy równych 40 cm. Pogrubiony kolor czerwony

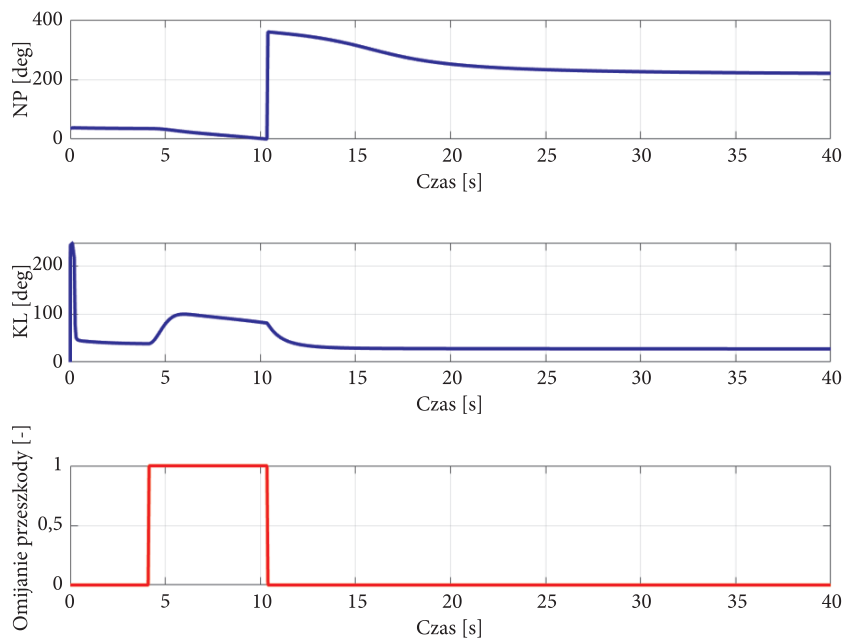
na trajektorii lotu czterowirnikowca (rys. 9) informuje o działaniu algorytmu. W trakcie badań symulacyjnych BSP osiąga swoją założoną wysokość w czasie około trzech sekund.

Gdy płynnie przemieszczający się statek powietrzny wykrywa przeszkodę, to w tym momencie prędkość przemieszczania się nieznacznie maleje z powodu działania algorytmu omijania przeszkody (rys. 10). Po osiągnięciu współrzędnych $x = 2,4$ m oraz $y = 4$ m program kończy swoją ingerencję, a regulatory PID korygują trajektorię lotu. Ponieważ przeszkoda w prowadzonych rozważaniach jest traktowana jako punkt w przestrzeni, zmiana jej wymiarów wymagałaby zwiększenia siły oddziaływania lub zmiany sposobu pomiaru odległości.

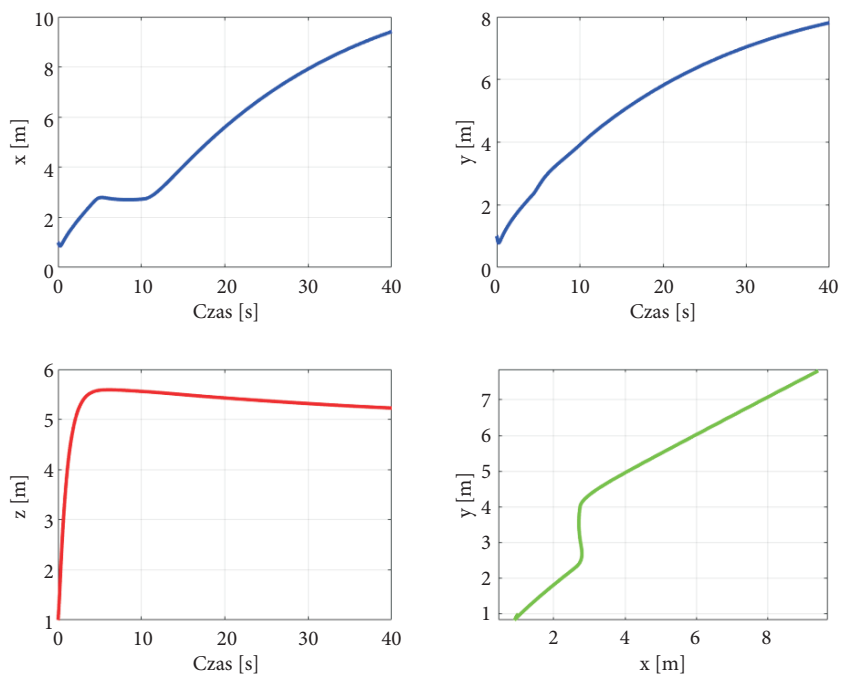


Rys. 10. Efekt działania algorytmu omijania przeszkody w przestrzeni

Siła wirtualna dzięki funkcjom trygonometrycznym rozkładana jest na składowe ortogonalne. W prezentowanych wynikach symulacji z maksymalnej siły wykorzystywane jest w momencie szczytowym około 0,85 N wzdłuż osi X oraz 0,5 N wzdłuż osi Y. Teoretycznie maksymalne oddziaływanie na BSP wystąpiłoby wtedy, gdy unosiłby się on przy przeszkodzie. W badanych konfiguracjach wartości składowych sił nie osiągały maksymalnych wartości. Spowodowane jest to faktem, że z każdą kolejną pętlą dodanie małych wartości może zastąpić jednorazowe działanie dużą siłą. Program automatycznie zapisuje dane pomiarowe, które następnie są wykorzystywane do wykreślania charakterystyk podstawowych parametrów lotu (rys. 11-12).



Rys. 11. Wykresy zmian parametrów kursowych BSP podczas omijania przeszkody



Rys. 12. Wykresy zmian położenia BSP

7. Podsumowanie

Przeprowadzone badania symulacyjne, a w szczególności ich efekty w postaci uzyskanych wykresów potwierdzają możliwość wirtualnego sterowania bezzałogowym statkiem powietrznym. Do jego manewrowania wykorzystano regulację proporcjonalno-całkująco-różniczkującą PID. Opracowany algorytm omijania przeszkód skutecznie oddziaływał na czterowirnikowiec, korygując jego trajektorię kolizyjną. Skuteczność tę sprawdzano dla różnych konfiguracji położenia przeszkody przez procentowe określanie liczby udanych ominięć przeszkody w stosunku do nieznacznej liczby porażek.

Jednak zastosowanie regulacji PID w procesie sterowania lotem czterowirnikowca nie należało do prostych zagadnień. Powodem jest złożoność tego procesu, a także duża liczba regulatorów. Istotnym objawem niedoskonałości strojenia PID jest utrata wysokości czterowirnikowca podczas wykonywania manewrów przechylenia i/lub pochylenia. Pomimo tego przyjęty w badaniach model czterowirnikowca wraz z trójstopniowym kontrolerem potwierdził poprawność założeń zaproponowanych w algorytmie omijania przeszkód. Skalowanie siły wirtualnej odbywa się w sposób proporcjonalny do odległości oraz namiaru czterowirnikowca na przeszkodę. Omawiany algorytm omijania przeszkód można ulepszać i rozwijać o nowe dane telemetryczne.

Skuteczność algorytmu poprawiłoby opracowanie dokładniejszego modelu czterowirnikowca. Pomogłyby w tym specjalistyczne pomiary parametrów silników, składowych przyspieszeń, czasów inercji, masy oraz środka ciężkości obiektu.

Praca została sfinansowana przez Wojskową Akademię Techniczną w ramach uczelnianego projektu badawczego UGB 866/2023.

Artykuł opracowany na podstawie referatu wygłoszonego na XXXVI Konferencji Elektroniki, Telekomunikacji i Energetyki Studentów i Młodych Naukowców SECON 2022 – zorganizowanej przez Wydział Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie w dniach 26-27 kwietnia 2022 r.

Artykuł wpłynął do redakcji 7.06.2022. Zatwierdzono do publikacji 8.03.2023.

Sebastian Tatko <https://orcid.org/0000-0001-9603-427X>

Stanisław Konatowski <https://orcid.org/0000-0002-3871-926X>

BIBLIOGRAFIA

- [1] MYUNGSEOK K., JIHUN CH., HYEONSU L., *Detect and Avoid System Based on Multi Sensor Fusion for UAV*, 2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), 2018.
- [2] ROBERTS J.F., STIRLING T., ZUFFEREY J.-C., FLOREANO D., *Quadrotor Using Minimal Sensing for Autonomous Indoor Flight*, *European Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition (EMAV)*, 2007.
- [3] BRY A., BACHRACH A., ROY N., *State Estimation for Aggressive Fight in GPS-denied Environments Using Onboard Sensing*, *Proceedings – IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2012.

- [4] ACHELNIK M., BACHRACH A., HE R., PRENTICE S., ROY N., *Stereo Vision and Laser Odometry for Autonomous Helicopters in GPS-denied Indoor Environments*, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2009.
- [5] FRAUNDORFER F., HENG L., HONEGGER D., LEE G.H., MEIER L., TANSKANEN P., et al., *Vision-based Autonomous Mapping and Exploration Using a Quadrotor MAV*, Conference: Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012.
- [6] ROSS S., MELIK-BARKHUDAROV N., SHANKAR K.S., WENDEL A., DEY D., BAGNELL J.A., et al., *Learning Monocular Reactive UAV Control in Cluttered Natural Environments*, International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2012.
- [7] GIUSTI A., GUZZI J., CIREŞAN D.C., HE FANG-LIN, RODRÍGUEZ J.P., FONTANA F., FAESSLER M., FORSTER C., SCHMIDHUBER J., DI CARO G., SCARAMUZZA D., GAMBARDELLA L.M., *A Machine Learning Approach to Visual Perception of Forest Trails for Mobile Robots*, IEEE Robotics and Automation Letters, 1, 2, July 2016.
- [8] SABATINO F., *Quadrotor Control: Modelling, Nonlinear Control Design, and Simulation*, Master's Degree Project, Stockholm, 2015.
- [9] TATKO S., *Projekt układu sterowania bezpilotowym statkiem powietrznym*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2021.
- [10] JINEC T., *Stabilization and Control of Unmanned Quadcopter*, Master Thesis, Luleå University of Technology, 2011.
- [11] GRUSZKA M., *DJI Mavic Pro: przetestowaliśmy dron idealny*, Mobility News, <https://mobilitynews.pl/dji-mavic-pro-test-recenzja/>, [dostęp: 10.01.2022].
- [12] CORRIGAN F., *12 Top Collision Avoidance Drones and Obstacle Detection Explained*, 9.05.2020, Dronezon.com, <https://www.dronezon.com/learn-about-drones-quadcopters/top-drones-with-obstacle-detection-collision-avoidance-sensors-explained/>, [dostęp: 10.01.2022].
- [13] AGRAWAL M., *What is Model Predictive Control (MPC)?*, 10.08.2020, <https://control.com/technical-articles/what-is-model-predictive-control-mpc/>, [dostęp: 10.01.2022].

S. TATKO, S. KONATOWSKI

Concept of anti-collision algorithm for unmanned aerial vehicles

Abstract. The basis of the novel anti-collision algorithm is a software implementation that allows the UAV to avoid collisions with environmental obstacles, as well as with other flying objects. The paper uses simplified equations describing the dynamics of the quadcopter to facilitate the modelling of the simulation structure. The software implementation of the quadcopter model together with the controller is the basis for the operation of the anti-collision algorithm. The model control system uses a three-stage proportional-integral-differential controller. The inspiration of the resulting program is magnetic interaction. The obstacle avoidance algorithm is based on the measurement of angular values and the selection of a proportional virtual force. The force repelling a quadcopter from an obstacle is a parameter that depends on its linear velocity, bearing on the obstacle and distance to the obstacle. The heat maps obtained reflect the scaling of the value and direction of the repulsive force. After defining the target point and the position of the obstacle, the necessary parameters are measured and the collision course correcting coordinates are selected onboard the quadcopter. The flight parameters of the quadcopter and the control coefficients of the anti-collision algorithm were analysed. The correctness of the program's operation was checked by simulation using numerous characteristics.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle, obstacle avoidance, anti-collision algorithm, UAV dynamics model, quadcopter

DOI: 10.5604/01.3001.0053.6747