

OPRACOWANIE ALGORYTMU STEROWANIA LOTEM MIKROSAMOŁOTU W NIEZNANYM TERENIE MIEJSKIM

Cezary KOWNACKI*

*Faculty of Mechanical Engineering, Białystok Technical University, ul. Wiejska 45 C, 15-351 Białystok

cezarkw@poczta.onet.pl

Streszczenie: Artykuł prezentuje koncepcję algorytmu autonomicznego sterowania lotem w kanionach ulic z wykorzystaniem dwóch laserowych czujników odległości oraz zaawansowanego układu autopilota. Czujniki laserowe zamontowane w układzie V monitorują odległość pomiędzy mikrosamolotem a budynkami tworzącymi kanion ulicy. Wbudowane w autopilota dodatkowe oprogramowanie realizujące opracowany algorytm sterowania oparty o regulatory PID przejmuje kontrolę nad lotem mikrosamolotu w momencie wykrycia zagrożenia. W celu analizy skuteczności proponowanego algorytmu opracowano symulację w środowisku MATLAB – SIMULINK, której wyniki prezentują bezkolizyjne trajektorie lotu w przykładowych kanionach ulic. Dlatego też implementacja opracowanego algorytmu pozwoli zbudować mikrosamolot zdolny do autonomicznego lotu w terenie miejskim.

1. WPROWADZENIE

Głównym celem algorytmów autonomicznego sterowania lotem bezzałogowego mikrosamolotu jest osiągnięcie jak największej jego samodzielności w wykonaniu misji w niepewnym i nieznanym otoczeniu. Teren miejski jest dla mikrosamolotu najbardziej trudnym i niepewnym otoczeniem, w jakim może się on poruszać. Wysoka zmienność i różnorodność obiektów, które mogą się znaleźć w polu manewrowym mikrosamolotu wymaga szybkiej i precyzyjnej ich lokalizacji. Poruszanie się w terenie miejskim według zaplanowanej trasy wymaga również planowania trajektorii z uwzględnieniem możliwości manewrowych w aktualnym otoczeniu. Dlatego też na skuteczność systemu autonomicznego sterowania wpływa przede wszystkim przyjęty algorytm sterowania i nawigacji, który wynika z zastosowanego systemu percepcji otoczenia.

Wiele ośrodków badawczych prowadzi prace nad skutecznymi systemami autonomicznego sterowania lotem małych bezzałogowych samolotów. Większość z nich opiera się na systemach wizyjnych i cyfrowym przetwarzaniu obrazu (Frew i Sengputa, 2004; Frew, 2004a, b; He i inni, 2006; Rathinam i inni, 2006). Takie rozwiązania pozwalają na obserwację znacznego obszaru przestrzeni, co pozwala na zbudowanie mapy otoczenia i wygenerowanie optymalnej bezkolizyjnej trajektorii (Frew i Langelan, 2005; He i inni, 2006). Jednakże poważną wadą systemów wizyjnych są skomplikowane algorytmy przetwarzania obrazu, które wymagają zastosowania wydajnych procesorów DSP. To z kolei znacząco wpływa na ilość energii elektrycznej, która powinna być zgromadzona w akumulatorach na pokładzie mikrosamolotu. Większa pojemność akumulatorów powoduje wzrost masy mikrosamolotu, co niekorzystnie wpływa na jego osiągi. Dodatkowym problemem, który należy rozwiązać to precyzyjna stabilizacja obrazu, gdyż wszystkie zakłócenia ruchu pławca są przenoszone na pokładową kamerę. Stabilizator mechaniczny jest dodatko-

wym obciążeniem mikrosamolotu, natomiast stabilizacja elektroniczna to dodatkowe obliczenia. System wizyjny jest optymalnym rozwiązaniem w autonomicznych układach nawigacji ze względu na możliwość dokładnej lokalizacji obiektów w szerszym otoczeniu mikrosamolotu, ich klasyfikację oraz wygenerowanie optymalnej trajektorii, a poprzez to wzrasta poziom bezpieczeństwa lotu. Niestety większość algorytmów autonomicznego sterowania lotem opartych na systemach wizyjnych została opracowana jedynie w postaci modeli symulacyjnych, bez ich weryfikacji na konkretnym mikrosamolocie w rzeczywistych warunkach lotu. Brak realizacji opracowanych algorytmów sterowania na rzeczywistych obiektach wynika z bariery technologicznej, jaką należy pokonać by wyposażyć mały mikrosamolot w wydajny system obliczeniowy.

W opracowywanych algorytmach autonomicznego sterowania wykorzystuje się również inne techniki percepcji, np. z wykorzystaniem miniaturowego laserowego dalmierza. Zaprezentowany w pracy He i innych (2006) algorytm dynamicznego skanowania wymaga jednak zbudowania precyzyjnego urządzenia naprowadzającego wiązkę lasera w przeszukiwany obszar otoczenia. Urządzenie to powinno również umożliwiać stabilizację wiązki lasera, aby wyeliminować zakłócenia wywołane drzaniem pławca. Zastosowanie takiego urządzenia do naprowadzania wiązki lasera wymagałoby jednak dodatkowej energii elektrycznej zasilającej serwowotory. Dodatkowo algorytm wymaga również złożonych obliczeń, zaś sama nawigacja wymaga generowania trajektorii z wykorzystaniem metody szybkiego przeszukiwania losowego drzewa na podstawie znanej a priori mapy terenu. Te cechy prezentowanego algorytmu również ograniczają jego zastosowanie na rzeczywistym mikrosamolocie. Autorzy pracy zbudowali owszem model mikrosamolotu ze nieruchomym czujnikiem laserowym, ale wszystkie prezentowane dane są wynikami komputerowej symulacji.

Mała masa oraz rozmiary mikrosamolotu są istotnymi ograniczeniami przekładającymi się na wagę, objętość

i energochłonność wymaganych urządzeń pokładowych. Dlatego też w mikrosamolotach są stosowane jedynie zaawansowane technologicznie urządzenia o małej masie i niskim poborze energii np. autopiloty MP2128heli oraz Kestrel. Jednakże nawet te urządzenia posiadają ograniczoną moc obliczeniową. To z kolei znacząco wpływa na możliwości autonomicznego sterowania lotem mikrosamolotu. Dlatego też wyzwaniem dla badaczy jest opracowanie skutecznego systemu autonomicznego sterowania lotem, którego budowa byłaby możliwa z wykorzystaniem obecnie dostępnych technologii.

W związku z tym autor wykonał badania w celu opracowania algorytmu autonomicznego sterowania lotem mikrosamolotu w terenie miejskim, którego podstawowym założeniem jest możliwość jego realizacji na dostępnych urządzeniach spełniających wcześniej wymienione ograniczenia. Opracowany algorytm autonomicznego sterowania lotem mikrosamolotu w terenie miejskim musi realizować dwa podstawowe zadania: omijanie przeszkód oraz lot w kanionie ulic.

2. AUTONOMICZNY SYSTEM STEROWANIA

Podstawą opracowanego algorytmu autonomicznego sterowania lotem mikrosamolotu są dwa miniaturowe laserowe sensory odległości (Rys. 1), których zadaniem jest ciągle śledzenie odległości pomiędzy mikrosamolotem a przeszkodami pojawiającymi się po jego obu stronach. Kontrolowanie odległości po obu stronach mikrosamolotu z użyciem standardowych regulatorów PID oraz dodatkowych funkcji logicznych pozwoli na ominięcie przeszkody oraz na lot w kanionie ulicy.

Głównymi zaletami miniaturowych laserowych czujników odległości są ich właściwości pozwalające na ich montaż właśnie na pokładzie mikrosamolotów. Dane techniczne miniaturowych laserowych czujników odległości MRL100 są przedstawione w Tab. 1.

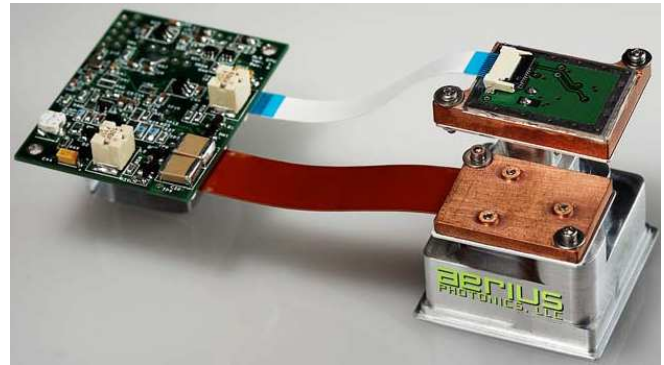
Tab. 1. Dane techniczne miniaturowego laserowego czujnika odległości MRL100

Cecha	Wartość
Waga	26 g
Zużycie energii	<400mW
Wymiary	1,25''x1,5''x1,6''
Częstotliwość pomiaru	500Hz
Rozdzielczość	<0,2 m
Zasięg	~0.1m do >100m
Kąt dywergencji	10x10 mrad

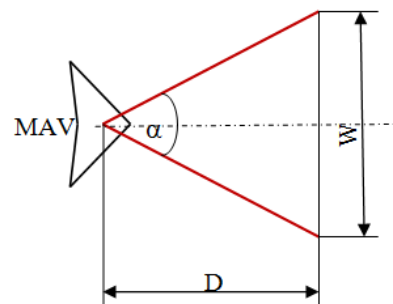
Do najważniejszych cech czujnika MRL100 należą jego mała waga, małe rozmiary, niski pobór energii oraz wysoka częstotliwość powtarzalności pomiaru. Zasięg pomiarowy czujnika również odpowiada wymaganiom lotu w kanionach ulic.

Istotnym aspektem wykorzystania laserowych czujników odległości w autonomicznym systemie sterania lotem

jest ich właściwy montaż oraz konfiguracja, która decyduje o jego użyteczności oraz wiarygodności. Na podstawie przeprowadzonych badań autor zaproponował najlepszą jego zdaniem konfigurację czujników, która jest następująca. Obie wiązki laserowe leżą w płaszczyźnie płatowca mikrosamolotu, a pomiędzy nimi znajduje się stały kąt rozwarcia. Stąd też wiązki lasera będą ukierunkowane na kształt litery „V” (Rys. 2).



Rys. 1. Miniaturowy laserowy czujnik odległości MRL100 firmy Aerilus Photonics



Rys. 2. Konfiguracja czujników laserowych w kształcie litery „V”; α – kąt rozwarcia wiązek laserowych, D – minimalna odległość od przeszkody zapewniająca bezpieczny manewr ominięcia, W – szerokość najmniejszej przeszkody, którą mikrosamolot będzie w stanie ominąć (Kownacki, 2009)

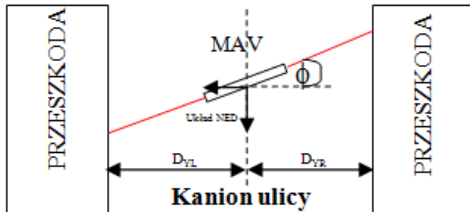
Zaproponowana konfiguracja czujników laserowych pozwala autonomicznemu systemowi sterowania lotem spełnić jednocześnie oba wymagane zadania tj. omijanie przeszkód oraz lot w kanionie ulicy. Kąt rozwarcia wiązek laserowych jest wyznaczany na podstawie wyrażenia (Kownacki, 2009):

$$\alpha = 2 \cdot \arctan\left(\frac{W}{2 \cdot D}\right), \quad (1)$$

gdzie: W – minimalna szerokość przeszkody, jaka może się pojawić podczas lotu mikrosamolotu w terenie miejskim, D – minimalna odległość zapewniająca ominięcie przeszkody.

Wartości parametrów W i D powinny być wyznaczone dla każdego mikrosamolotu oddzielnie, gdyż są one zależne od wielkości mikrosamolotu oraz od jego zdolności manewrowych. Miniaturowe czujniki laserowe będą nieruchomo przymocowane do płatowca mikrosamolotu, dlatego też mierzone odległości powinny być niezależne od orientacji przestrzennej mikrosamolotu, co pozwoli na określenie

faktycznego dystansu do przeszkody (ściany budynku). Aby to uzyskać należy transformować współrzędne przeszkody wyrażone w układzie związanym z płaszczyzną mikrosamolotu do współrzędnych wyrażonych w układzie normalnym do powierzchni kuli ziemskiej o początku w środku ciężkości Mikrosamolotu (układ NED – oś y wyznacza północ, oś x wyznacza wschód, oś z skierowana jest w dół prostopadłe do powierzchni) (Rys. 3). Niezbędne do przekształcenia kąty pochylenia i przechylenia mogą być odczytane z układu autopilota.



Rys. 3. Lot mikrosamolotu w kanionie ulicy, ϕ – kąt przechylenia, DY_L – rzeczywista współrzędna y przeszkody po lewej stronie, DY_R – rzeczywista współrzędna y przeszkody po prawej stronie (Kownacki, 2009)

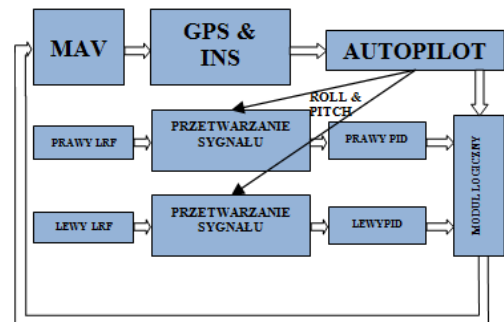
Aby miniaturowe laserowe czujniki odległości mogły sterować lotem mikrosamolotu w kanionie ulic, niezbędne jest opracowanie odpowiedniego algorytmu sterowania. Okazuje się, że taki algorytm może być zbudowany w oparciu o tradycyjne regulatory PID, moduł logiczny oraz odpowiednie przetwarzanie sygnałów pomiarowych. Do prawidłowego działania proponowanego systemu autonomicznego sterowania lotem w terenie miejskim potrzebne jednak będzie wykorzystanie układu autopilota, który pozwoli uzyskać informację o orientacji przestrzennej mikrosamolotu oraz pozwoli jednocześnie zrealizować nawigację według punktów przelotowych. Moduł logiczny będzie decydował o aktualnym priorytecie zadań sterowania tj. lotu według wyznaczonej trasy i omijaniu przeszkód z możliwością lotu w kanionach ulic. Schemat proponowanego algorytmu autonomicznego sterowania lotem mikrosamolotu jest przedstawiony na Rys. 4.

Przedstawione na Rys. 4 układy nawigacyjne: GPS (Global Positioning System) i INS (Inertial Navigation System) wbudowane w autopilota, zostaną wykorzystane w standardowym sterowaniu dynamiką lotu mikrosamolotu oraz będą realizować zadanie lotu według zaplanowanych punktów przelotowych. Pozostałe elementy algorytmu są odpowiedzialne za zadanie omijania przeszkód z możliwością lotu w kanionach ulic.

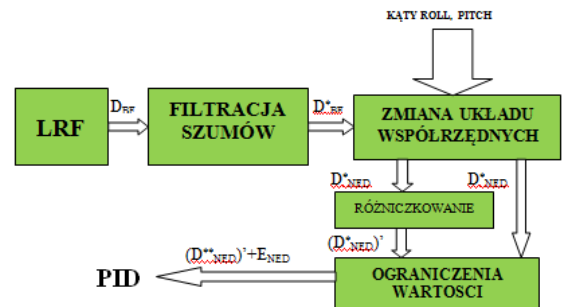
Właściwym zadaniem miniaturowych czujników laserowych jest pomiar odległości pomiędzy mikrosamolotem a budynkami, które go otaczają w czasie lotu w kanionie ulicy. Jednakże podczas lotu mikrosamolot może znaleźć się w pobliżu przeszkód znacznie mniejszych, tj. latarni ulicznych, drzew, znaków drogowych, które mogą być źle rozpoznane przez algorytm. Jest to istotne ograniczenie algorytmu. Z drugiej strony wszystkie małe obiekty mogą być rejestrowane, jako chwilowe gwałtowne zmiany odległości lub też mogą mieć charakter zakłóceń sygnału, co może niekorzystnie wpłynąć na zachowanie mikrosamolotu. Wówczas lot mikrosamolotu może stać się nawet nerwowy i niestabilny. Dlatego też proponuje się zastoso-

wanie filtracji sygnału pomiarowego czujników laserowych z użyciem fitów dolnoprzepustowych. W ten sposób wyeliminuje się chwilowe i szybkie zmiany sygnałów odległości generowane przez małe obiekty. Jednocześnie wymusza to przyjęcie następującego założenia, że mikrosamolot będzie w stanie omijać większe przeszkody, tj. budynki i będzie mógł kontynuować lot w kanionie ulicy na odpowiednio bezpiecznej wysokości.

Jak już wcześniej wspomniano przetwarzanie sygnałów jest jednym z koniecznych elementów proponowanego algorytmu, między innymi ze względu na filtrację zakłóceń i transformację układów współrzędnych. Proces przetwarzania sygnału może zostać podzielony na następujące etapy (Rys. 5).



Rys. 4. Schemat opracowanego algorytmu autonomicznego sterowania lotem mikrosamolotu w terenie miejskim. LRF – miniaturowy laserowy czujnik odległości (Laser Range Finder) (Kownacki, 2009)



Rys. 5. Schemat procesu przetwarzania sygnałów dystansu, D_{BF} – dystans pomiędzy mikrosamolotem a przeszkodą wyrażony w układzie współrzędnych związanym z mikrosamolotem (BF), D_{BF}^* – odfiltrowany sygnał dystansu w układzie współrzędnych związanym z mikrosamolotem (BF), D_{NED}^* – sygnał dystansu wyrażony w układzie współrzędnych normalnym do powierzchni kuli ziemskiej o początku w środku ciężkości mikrosamolotu (NED), $(D_{NED}^*)' = d(D_{NED}^*)/dt$ – prędkość zbliżania się przeszkody, $E_{NED} + (D_{NED}^*)'$ – sygnał wejściowy regulatorów PID (Kownacki, 2009)

Pierwszym etapem procesu przetwarzania sygnałów dystansu jest filtracja, która wyeliminuje zakłócenia generowane przez niestabilny ruch mikrosamolotu oraz przez małe przeszkody pojawiające się w miejskim otoczeniu mikrosamolotu. W tym celu można wykorzystać filtr dolnoprzepustowy lub filtr Kalmana, który ze względu na swoje właściwości zapewni lepszy rezultat filtracji losowych zakłóceń o właściwościach szumu białego.

Następnym etapem przetwarzania sygnałów pomiarowych jest transformacja układu współrzędnych. Współ-

rzędne przeszkody wyrażone w układzie związanym z płatowcem mikrosamolotu można wyznaczyć na podstawie sygnału dystansu D_{BF}^* oraz kąta α (Równanie 1) (Kownacki, 2009).

$$\begin{pmatrix} x_{BF} \\ y_{BF} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \end{pmatrix} \cdot D_{BF}^*, \quad (2)$$

gdzie: D_{BF}^* – odfiltrowany sygnał dystansu do przeszkody wyrażony w układzie współrzędnych związanym z mikrosamolotem, α – kąt pomiędzy wiązkami czujników laserowych, x_{BF} , y_{BF} – współrzędne przeszkody wyrażone w układzie współrzędnych związanym z płatowcem mikrosamolotu.

Współrzędne przeszkody wyrażone w układzie współrzędnych związanym z płatowcem mikrosamolotu (BF) muszą być przekształcone do współrzędnych wyrażonych w układzie normalnym do powierzchni kuli ziemskiej o początku w środku ciężkości mikrosamolotu (NED) tak, aby faktyczna odległość do przeszkody mogła być wyznaczona. Przekształcenie jest opisane następującą zależnością (Kownacki, 2009):

$$\begin{pmatrix} x_{NED} \\ y_{NED} \\ z_{NED} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{BF} \\ y_{BF} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

gdzie: x_{BF} , y_{BF} – współrzędne przeszkody w układzie współrzędnych związanym z płatowcem mikrosamolotu, x_{NED} , y_{NED} – współrzędne przeszkody w układzie współrzędnych normalnym do powierzchni kuli ziemskiej o początku w środku ciężkości mikrosamolotu, ϕ – kąt przechylenia, θ – kąt pochylenia.

Posiadając współrzędne przeszkody wyrażone w układzie normalnym do powierzchni kuli ziemskiej można wyznaczyć faktyczny dystans dzielący mikrosamolot od przeszkody (Kownacki, 2009).

$$D_{NED}^* = \sqrt{(x_{NED}^2 + y_{NED}^2)}, \quad (4)$$

gdzie: x_{NED} , y_{NED} – współrzędne przeszkody w układzie współrzędnych normalnym do powierzchni kuli ziemskiej o początku w środku ciężkości mikrosamolotu,

Wykorzystanie w algorytmie sterowania sygnału pochodnej D_{NED}^* sprawi, że opracowany algorytm będzie również wrażliwy na prędkość i kierunek zbliżania się przeszkody. Jeżeli bowiem $d(D_{NED}^*)/dt$ będzie równe zero, oznacza to, że mikrosamolot leci równoległe do przeszkody. Natomiast wartość maksymalna $d(D_{NED}^*)/dt$ równa $V/\cos(\alpha)$, gdzie V jest prędkością mikrosamolotu oznacza, że mikrosamolot leci prostopadle do przeszkody i prawdopodobieństwo kolizji jest bardzo duże.

Ostatnim etapem procesu przetwarzania sygnałów dystansu jest nałożenie właściwych ograniczeń (progów) na minimalną i maksymalną wartość D_{NED}^* oraz $d(D_{NED}^*)/dt$. Określenie progu D_{safe} wartości D_{NED}^* pozwoli na ignorowanie przez algorytm bezpiecznych odległości od przeszkody, które będą większe niż zadana wartość progowa. Z kolei ignorowanie dodatnich wartości $d(D_{NED}^*)/dt$ spo-

woduje, że algorytm przestanie reagować na przeszkody oddalające się od mikrosamolotu (Równanie 5). W powyższych przypadkach sygnał wejściowy prawego lub lewego regulatora PID będzie równy zero (Kownacki, 2009).

$$\begin{cases} E_{NED} = D_{NED}^* - D_{safe} & D_{NED}^* - D_{safe} < 0 \\ E_{NED} = 0 & D_{NED}^* - D_{safe} \geq 0 \\ \frac{d(D_{NED}^{**})}{dt} = \frac{d(D_{NED}^*)}{dt} & \frac{d(D_{NED}^*)}{dt} < 0 \\ \frac{d(D_{NED}^{**})}{dt} = 0 & \frac{d(D_{NED}^*)}{dt} \geq 0 \end{cases}, \quad (5)$$

gdzie: E_{NED} – pierwszy element sygnału sterującego regulatorem PID – uchyb odległości – różnica pomiędzy aktualnym dystansem do przeszkody a wartością graniczną bezpiecznej odległości D_{safe} , D_{safe} – granica bezpiecznej odległości od przeszkody, D_{NED}^* – dystans do przeszkody wyznaczony w układzie współrzędnych normalnym do powierzchni kuli ziemskiej o początku w środku ciężkości mikrosamolotu, $d(D_{NED}^{**})/dt$ – prędkość zbliżania się przeszkody drugi element sygnału sterującego regulatorem PID.

Suma uchybu dystansu E_{NED} i prędkości zbliżania się przeszkody $d(D_{NED}^{**})/dt$ definiuje sygnał wejściowy regulatorów PID. Takie podejście pozwoli układowi autonomicznego sterowania reagować jedynie na najbliższe przeszkody zbliżające się do mikrosamolotu.

Kontroler logiczny jest modułem zarządzającym autonomicznym systemem sterowania, gdyż decyduje on, które zadanie autonomicznego lotu powinno być aktualnie realizowane. W tym celu kontroler logiczny potrzebuje niezbędnych informacji o stanie mikrosamolotu i jego otoczenia w postaci sygnałów wyjściowych regulatorów PID, autopilota oraz wartości odległości D_{NED}^* z prawego i lewego czujnika laserowego. Kontroler logiczny pracuje na zasadzie elementu przełączającego. Bowiem przełącza on sterowanie mikrosamolotu pomiędzy autopilotem a regulatorami PID w zależności od bieżącego stanu otoczenia mikrosamolotu. Kierunek lotu mikrosamolotu o układzie delta jest kontrolowany poprzez zmianę kąta przechylenia. Stąd też równanie opisujące algorytm kontrolera logicznego jest następujące (Kownacki, 2009):

$$\phi^C = \begin{cases} \phi_{autopilot} & ; \phi_{PIDright} = 0 \cap \phi_{PIDleft} = 0 \\ \phi_{PIDright} + \phi_{PIDleft} & ; \phi_{PIDright} \neq 0 \cap \phi_{PIDleft} \neq 0 \cap \phi_{PIDright} \neq \phi_{PIDleft} \\ \phi_{PIDright} & ; (\phi_{PIDright} \neq 0 \cap \phi_{PIDleft} = 0) \cup \\ & \left(\phi_{PIDright} \neq 0 \cap \phi_{PIDleft} \neq 0 \cap \phi_{PIDright} = \phi_{PIDleft} \cap \right. \\ & \left. D_{NEDleft}^{**} > D_{NEDright}^{**} \right) \\ \phi_{PIDleft} & ; (\phi_{PIDright} = 0 \cap \phi_{PIDleft} \neq 0) \cup \\ & \left(\phi_{PIDright} \neq 0 \cap \phi_{PIDleft} \neq 0 \cap \phi_{PIDright} = \phi_{PIDleft} \cap \right. \\ & \left. D_{NEDleft}^{**} \leq D_{NEDright}^{**} \right) \end{cases} \quad (6)$$

gdzie: ϕ^C – zadany kąt przechylenia, $\phi_{autopilot}$ – zadany kąt przechylenia wyznaczony przez autopilota, $\phi_{PIDleft}$ – zadany kąt przechylenia wyznaczony przez regulator PID lewego czujnika laserowego, $\phi_{PIDright}$ – zadany kąt przechylenia wyznaczony przez regulator PID prawego czujnika laserowego.

Jeśli wyjścia obu regulatorów PID tzn. lewego i prawego czujnika laserowego są równe zero wówczas autopilot steruje kierunkiem lotu mikrosamolotu. W przypadku,

gdy te sygnały są różne od zera oraz posiadają różne wartości – sygnał sterujący kątem przechylenia jest sumą sygnałów wyjściowych obu regulatorów PID. W tym momencie należy wspomnieć, że oba regulatory mają identyczne nastawy, zaś sygnały wyjściowe obu regulatorów PID różnią się znakiem, gdyż każdy regulator kontroluje skręt mikrosamolotu w przeciwnych kierunkach – dodatnie lub ujemne wartości kąta przechylenia. Kolejnym przypadkiem jest sytuacja, gdy sygnał wyjściowy lewego regulatora PID jest równy zero lub gdy sygnały obu regulatorów mają inne wartości różne od zera i jednocześnie dystans D_{NED}^* z lewego czujnika jest większy niż z prawego. Wówczas kątem przechylenia będzie sterował regulator PID prawego czujnika. W odwrotnej sytuacji, gdy sygnał wyjściowy z prawego PID jest równy zero lub sygnały z obu regulatorów mają inne wartości różne od zera i jednocześnie dystans D_{NED}^* z prawego czujnika laserowego jest większy niż dystans D_{NED}^* z lewego, kątem przechylenia jest kontrolowany przez regulator lewego czujnika laserowego. Należy zwrócić uwagę na fakt, że sygnały wejściowe regulatorów mogą być równe zero ze względu na wcześniej nałożone ograniczenia na sygnały wejściowe dystansu oraz prędkości zbliżania się przeszkody (równanie 5).

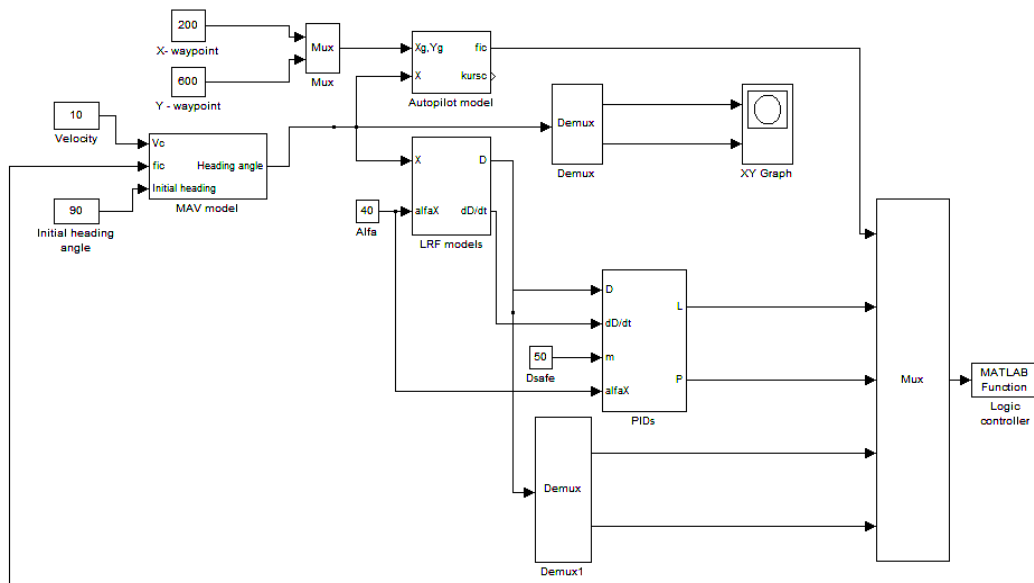
Podsumowując kontroler logiczny decyduje o sposobie sterowania lotem mikrosamolotu w zależności od aktualnego stanu otoczenia. Oczywiście proponowane rozwiązanie może być zastąpione innymi rodzajami sterowania na przykład bardziej zaawansowanym regulatorem rozmytym.

3. SYMULACJA ALGORYTMU AUTONOMICZNEGO STEROWANIA LOTEM MIKROSAMOLOTU

Badania i symulacje zaprojektowanego algorytmu autonomicznego sterowania lotem mikrosamolotu w środowisku miejskim przeprowadzono w środowisku MATLAB - SIMULINK. W celu wizualizacji symulowanej trajektorii lotu wykorzystano model mikrosamolotu o układzie delta. Model ten jest zdefiniowany następującymi równaniami (Kownacki, 2009; Saunders i inni, 2005):

$$\begin{aligned} \dot{x} &= V \cdot \cos \psi, \\ \dot{y} &= V \cdot \sin \psi, \\ \psi &= \frac{g}{V} \cdot \tan \phi, \\ \dot{V} &= \alpha_v (V^C - V), \\ \phi &= \alpha_\phi (\phi^C - \phi). \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie: x, y – aktualne współrzędne mikrosamolotu, V – aktualna prędkość mikrosamolotu, V^C – zadana prędkość mikrosamolotu, ψ – aktualny kurs mikrosamolotu, ϕ – aktualny kąt przechylenia, ϕ^C – zadany kąt przechylenia, α_ϕ, α_v – stałe czasowe dynamiki mikrosamolotu, g – stała grawitacyjna.



Rys. 6. Model opracowanego algorytmu autonomicznego sterowania lotem mikrosamolotu w środowisku miejskim wykonany w SIMULINKU (Kownacki, 2009)

Model zakłada, że lot mikrosamolotu jest kontrolowany przez dwa parametry: prędkość lotu V^C oraz kąt przechylenia ϕ^C . Kąt przechylenia jest odpowiedzialny za zmianę kierunku lotu. W przeprowadzonych symulacjach założono, że prędkość lotu stała, zaś algorytm kontroluje jedynie kierunek lotu.

Do przeprowadzania symulacji niezbędny był również model autopilota. Przyjęty model autopilot oparty był na regulatorze PID, który kontrolował kierunek lotu przez minimalizację uchybu pomiędzy aktualnym zadanym kur-

sem na kolejny punkt przelotowy, a aktualnym kursem mikrosamolotu. Model autopilota opisują równania 8 (Kownacki, 2009).

$$\begin{aligned} \psi_{err} &= \psi_{WP} - \psi, \\ \psi_{WP} &= \arctan\left(\frac{y_{WP} - y}{x_{WP} - x}\right), \\ \phi_{autopilot} &= PID \cdot \psi_{err} \end{aligned} \quad (8)$$

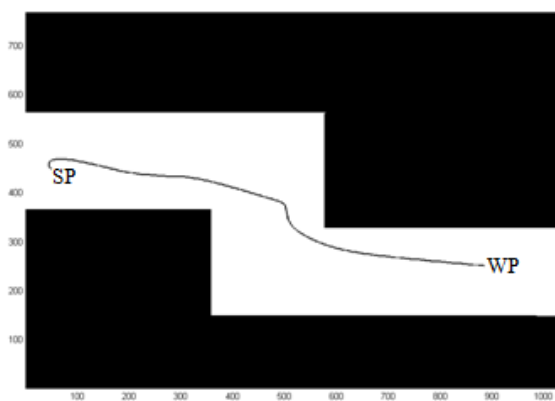
gdzie: ψ_{err} – uchyb kursu, ψ – aktualny kurs mikrosamolotu, ψ_{WP} – aktualny kurs na kolejny punkt przelotowy, x, y – aktualne współrzędne mikrosamolotu, x_{WP}, y_{WP} – współrzędne kolejnego punktu przelotowego, PID – transmitancja regulatora PID, $\phi_{autopilot}$ – zadany kąt przechylenia wyznaczony przez autopilota.

Zadany kąt przechylenia wyznaczony przez autopilota jest wykorzystany jedynie w sytuacji, gdy kontroler logiczny (równanie 6) wykryje, że sygnały wyjściowe prawego i lewego regulatora PID są równe zero (rysunek 4). Model opracowanego algorytmu autonomicznego sterowania lotem mikrosamolotu w środowisku miejskim wykonany w SIMUKINKU jest przedstawiony na Rys. 6.

Syntetyczne mapy przedstawiające symulowane środowisko miejskie, które wykorzystano w badaniach symulacyjnych, zostały przygotowane w postaci plików graficznych w formacie bitmapy wczytywanych do przestrzeni roboczej programu MATLAB. Ponieważ mapy przedstawiały środowisko miejskie w przestrzeni dwuwymiarowej, filtracja sygnałów oraz przekształcenie układów współrzędnych nie zostały uwzględnione w modelu programu SIMULINK.

4. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

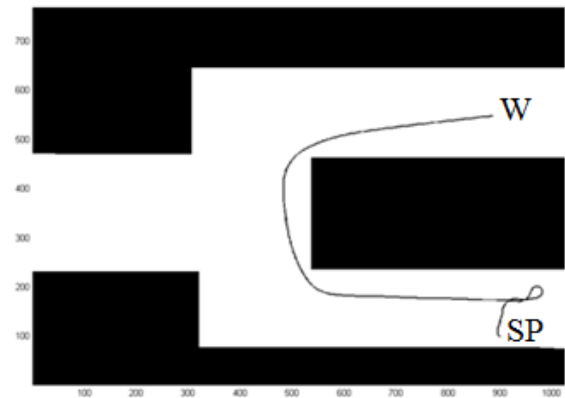
W celu sprawdzenia poprawności i efektywności działania opracowanego algorytmu autonomicznego sterowania lotem mikrosamolotu przygotowano cztery mapy opisujące różne sytuacje, które mogą pojawić się podczas lotu w terenie miejskim. Dwie z nich dotyczą możliwości lotu mikrosamolotu w kanionach ulic, zaś kolejne dwie przedstawiają sytuację kolizyjną, gdy na trajektorii lotu pojawia się przeszkoda. Samodzielne wyznaczenie bezkolizyjnej trajektorii lotu we wszystkich przypadkach będzie stanowił kryterium jakości algorytmu autonomicznego sterowania lotem mikrosamolotu.



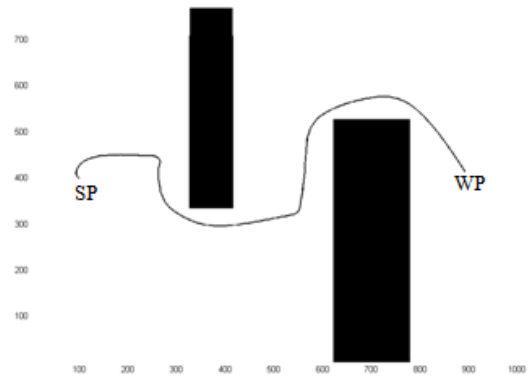
Rys. 7. Trajektoria lotu mikrosamolotu w pierwszej symulacji. Początkowy kurs 1800, punkt startu SP – $x=50, y=450$, kolejny punkt przelotowy WP – $x=900, y=250$ (Kownacki, 2009)

W każdym z przypadków symulowany lot mikrosamolotu rozpoczyna się w punkcie startowym SP z ustalonym początkowym kursem, a kończy się w kolejnym punkcie przelotowym WP. Wyniki symulacji w postaci bezkolizyjnych trajektorii lotu są przedstawione na Rys. 7-10.

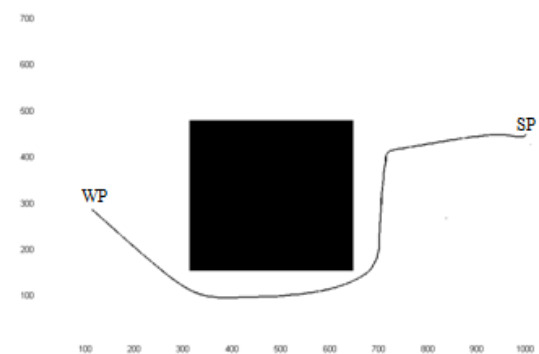
Przeszkody zostały przedstawione w postaci czarnych obszarów na rysunkach.



Rys. 8. Trajektoria lotu mikrosamolotu w drugiej symulacji lotu w kanionie ulicy. Początkowy kurs 1800, punkt startu SP – $x=900, y=100$, kolejny punkt przelotowy WP – $x=900, y=550$ (Kownacki, 2009)



Rys. 9. Trajektoria lotu mikrosamolotu w pierwszej symulacji zadania omijania przeszkody. Początkowy kurs 1800, punkt startu SP – $x=100, y=400$, kolejny punkt przelotowy WP – $x=900, y=400$ (Kownacki, 2009)



Rys. 10. Trajektoria lotu mikrosamolotu w drugiej symulacji zadania omijania przeszkody. Początkowy kurs – 900, punkt startu SP – $x=1000, y=450$, kolejny punkt przelotowy WP – $x=100, y=300$ (Kownacki, 2009)

Wyniki symulacji z Rys. 7 – 10 przedstawiają lot mikrosamolotu, którego trajektoria znajduje się zawsze w bezpiecznej odległości od przeszkody. Oczywiście istotnym założeniem symulacji jest to, że wymiary przeszkody są znacznie większe od wymiarów mikrosamolotu. Stąd

mikrosamolot jest przedstawiony na rysunkach w postaci pojedynczego punktu na trajektorii lotu.

Na podstawie otrzymanych wyników symulacji można łatwo zauważyć, że przedstawione trajektorie nie są najkrótszymi możliwymi trajektoriami lotu (na przykład trajektoria z rysunku 10). Wyznaczenie optymalnych trajektorii lotu wymagałoby jednak zastosowania dodatkowego algorytmu planowania trajektorii lotu. Jak już wcześniej wspomniano algorytm planowania trajektorii lotu spowoduje wzrost złożoności całego algorytmu autonomicznego sterowania lotem. A to jest sprzeczne z przyjętym celem badań, jakim było opracowanie algorytmu autonomicznego sterowania, który będzie można zrealizować z użyciem dostępnych urządzeń pokładowych mikrosamolotu.

5. PODSUMOWANIE

Rys. 7-10 przedstawiają cztery różne symulacje algorytmu autonomicznego sterowania lotem mikrosamolotu. W sposób oczywisty dowodzą one, że przyjęte rozwiązanie jest skuteczne i pozwala sterować lotem mikrosamolotu w sposób autonomiczny. W każdym przypadku lot mikrosamolotu kończył się sukcesem, jakim było osiągnięcie zadanego celu, którym był kolejny punkt przelotowy. Rys. 7-8 potwierdzają możliwość zastosowania algorytmu do autonomicznego sterowania mikrosamolotem podczas lotu w kanionach ulic. Jest to ważna właściwość opracowanego algorytmu, szczególnie istotna podczas lotu w niepewnym miejskim otoczeniu. Opracowany algorytm spełnia również podstawowe wymagania stawiane autonomicznym systemom sterowania, tzn. w sposób skuteczny realizuje zadanie autonomicznego omięcia przeszkody, co jest przedstawione na Rys. 9-10.

Podsumowując należy podkreślić, że cel przeprowadzonych badań nad autonomicznym systemem sterowania lotem mikrosamolotu został osiągnięty. Opracowany algorytm jest bowiem skuteczny, wiarygodny oraz jednocześnie nie jest on zbyt złożony. Dlatego też możliwa jest jego realizacja z wykorzystaniem dostępnych zaawansowanych układów autopilota przeznaczonych do wykorzystania w mikrosamolotach. Ważną zaletą opracowanego algorytmu jest wykonywanie obliczeń oraz przewarżanie sygnałów pomiarowych praktycznie w czasie rzeczywistym z niewielkim opóźnieniem. Pozostałe metody szczególnie te oparte na algorytmach planowania trajektorii lotu wprowadzają znaczne opóźnienia ze względu na skomplikowane i czasochłonne obliczenia.

Następnym etapem badań będzie implementacja opracowanego algorytmu autonomicznego sterowania lotem w rzeczywistym układzie mikrosamolotu. Szczególnie trudnym i pracochłonnym zadaniem będzie wówczas dobór nastaw regulatorów PID, ponieważ symulacja dynamiki mikrosamolotu jest dość trudna do realizacji. Stąd też większość badań trzeba będzie przeprowadzić z wykorzystaniem rzeczywistego mikrosamolotu.

LITERATURA

1. **Anderson E.** (2002), *Extremal control and unmanned air vehicle trajectory generation*, Master's thesis, Brigham Young University.
2. **Dong T., Liao X. H., Zhang R., Sun Z., Song Y. D.** (2005), Path Tracking and Obstacle Avoidance of UAVs - Fuzzy Logic Approach, *FUZZ '05, The 14th IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Reno, 43-48.
3. **Frew E., Langelan J.** (2005), Receding Time Horizon Control for Passive, Non-cooperative UAV See-and-Avoid, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain.
4. **Frew E., Sengupta R.** (2004), Obstacle Avoidance with Sensor Uncertainty for Small Unmanned Aircraft, *43rd IEEE Conference on Decision and Control*, Paradise Island, Bahamas.
5. **Frew E., Spry S., Howell A., Hedrick J. K., Sengupta R.** (2004), Flight Demonstrations of Self-Directed Collaborative Navigation of Small Unmanned Aircraft, *AIAA 3rd Unmanned Unlimited Technical Conference, Workshop, & Exhibit*, Chicago, IL.
6. **Frew E.** (2004a), Vision-Based Road Following Using a Small Autonomous Aircraft, *IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT.
7. **Frew W.** (2004b), Stereo-Vision-Based Control of a Small Autonomous Aircraft Following a Road, *Second Annual Swarming Conference*, Crystal City, MD.
8. **He Z.** (2006), Venkataraman Iyer R., Chandler P.R.: Vision-based UAV flight control and obstacle avoidance, *IEEE Automatic Control Conference*.
9. **Kownacki C.** (2009), Guidance and obstacle avoidance of MAV in uncertain urban environment, *European Micro Aerial Vehicle Conference and Flight Competition 2009: EMAV'2009*, Delft Holandia.
10. **Rathinam S., Kim Z., Sengupta R.** (2006), *Vision-Based Following of Structures Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV)*, RESEARCH REPORT UCB-ITS-RR-2006-1, Institute of Transportation Studies University of California at Berkeley.
11. **Saunders J. B., Call B., Curtis A., Beard R. W., McLain T. W.** (2005), Static and Dynamic Obstacle Avoidance in Miniature Air Vehicles, *Infotech@Aerospace, AIAA*, Arlington, Virginia.
12. **Zufferey J.-C., Beyeler A., Floreano D.** (2009), *Optic Flow to Steer and Avoid Collisions in 3D in Flying Insects and Robots*, Berlin, Springer.
13. **Zufferey J.-C., Klapotocz A., Beyeler A., Nicoud J.-D., Floreano, D.** (2007), A 10-gram Vision-based Flying Robot, *Advanced Robotics*, 21(14), 1671-1684.

STUDY ON FLIGHT CONTROL ALGORITHM OF MICRO AERIAL VEHICLE IN UNKNOWN URBAN ENVIRONMENT

Abstract: The paper describes the idea of autonomous flight control of micro aerial vehicle in streets' canyons, which is based on two laser rangefinders and advanced autopilot. The sensors are mounted so as to create plane V shape of laser beams and they are scanning distance between micro aerial vehicle and buildings creating street canyon. The additional routine realizing conducted algorithm based on PID controllers can be built in the autopilot firmware and it will take charge of flight control when critical distance is detected. To analyze effectiveness of proposed algorithm, the simulation experiment was prepared in MATLAB – SIMULINK software and its results present collision free flight trajectories. So the realization of proposed algorithm allows creating autonomous micro aerial vehicle which will be able to fly in urban environment.

Pracę wykonano w ramach realizacji projektu rozwojowego nr 0059/R/T00/2008/06 finansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.