

Roman CZYBA  
Grzegorz SZAFRAŃSKI  
Politechnika Śląska

## SZYBKIE PROTOTYPOWANIE ELEMENTÓW UKŁADU STEROWANIA DLA PLATFORMY LATAJĄCEJ TYPU QUADROTOR

W artykule przedstawiono strukturę układu regulacji opartego na dyskretniej realizacji algorytmu PID oraz etapy projektowania poszczególnych elementów układu sterowania dla platformy latającej VTOL (ang. *Vertical Take Off and Landing*) typu quadrotor. Przedstawiono również koncepcję budowy układu pomiarowego orientacji przestrzennej opartą na zintegrowanym czujniku AHRS (ang. *Attitude and Heading Reference System*). W procesie projektowania wykorzystano środowisko Matlab/Simulink wraz z systemem mikroprocesorowym opartym na mikrokontrolerze z rodziny PowerPC. Rozwiązanie w takiej konfiguracji umożliwia szybkie prototypowanie (ang. *Fast/Rapid Prototyping*) układu sterowania dla zadania sformułowanego jako podukład stabilizacji kątowej. Prezentowane podejście umożliwia również efektywną weryfikację poprawnego działania pojedynczych podukładów warstwy sprzętowej, wchodzących w skład całego systemu sterowania platformy latającej. Istotą komputerowo wspomaganego projektowania układów sterowania (ang. *Embedded System*) jest możliwość wielokrotnej modyfikacji wirtualnego prototypu, z zagwarantowaniem poprawności kodu wykonywalnego przy jednoczesnym zachowaniu elementów składowych, takich jak: elementy napędowe, czujniki wraz z układami pomiarowymi. Co więcej, możliwa jest rozbudowa systemu wbudowanego w bardziej złożony, pełniący funkcję sterowania, nie tylko w warstwie bezpośredniej, ale również w warstwie nadrzędnej, dla bezzałogowych obiektów latających.

### Wstęp

Wobec powszechnego zafascynowania możliwościami, jakie daje współczesna technika, w ostatnich latach wyraźnie widoczne jest zainteresowanie zagadnieniami komputerowo wspomaganego projektowania układów sterowania w strukturach dedykowanych (ang. *Embedded Systems*). Oprogramowanie Matlab/Simulink zdobyło dominującą pozycję w środowisku naukowców zajmujących się zagadnieniami automatyki i robotyki. W kontekście testów praktycznych firma The MathWorks zaproponowała użytkownikom wiele rozwiązań wspomagających i ułatwiających szybkie prototypowanie, a także testowanie

w czasie rzeczywistym. Głównym celem technologii szybkiego prototypowania jest synteza i testowanie projektowanych algorytmów regulacji zanim regulator zostanie zrealizowany sprzętowo.

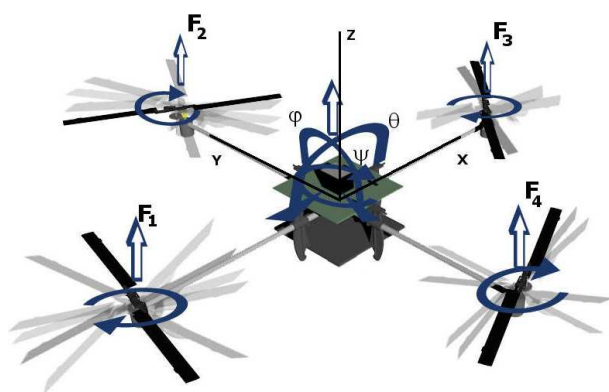
Intencją autorów jest wykorzystanie metod związanych z projektowaniem i prototypowaniem do budowy podukładów sterowania platformy latającej typu quadrotor, zarówno w warstwie bezpośredniej regulacji, jak i w warstwie nadrzędnej. W pracy zostało przedstawione podejście do prototypowania układu pomiarowego z czujnikiem bezwładnościowym oraz podukładu stabilizacji kątownej platformy latającej.

## 1. Quadrotor

### Opis bezzałogowej platformy latającej

Jednym z coraz częściej spotykanych bezzałogowych obiektów latających (*ang. Unmanned Aerial Vehicle*) jest platforma pionowego startu i lądowania (*ang. Vertical Take Off and Landing*), składająca się z czterech jednostek napędowych, umiejscowionych w równoodległych punktach od środka przecięcia się dwóch ortogonalnych osi. Każda jednostka napędowa składa się z silnika elektrycznego, przekładni oraz śmigła. Jedna para naprzemianległych silników obraca się w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara, natomiast druga w kierunku przeciwnym. Eliminuje się w ten sposób efekt żyroskopowy oraz momenty aerodynamiczne w płaskim ruchu platformy.

Zmiany prędkości obrotowej silników zespołu napędowego powodują zmiany siły ciągu. W wyniku tych zmian następuje ruch platformy (rys. 1.). Przy zwiększaniu lub zmniejszaniu prędkości obrotowej napędów elektrycznych platforma porusza się w kierunku pionowym. Obrót wokół osi  $y$  o kąt  $\theta$ , a także ruch wzdłużny realizuje się poprzez zmianę prędkości obrotowej pary napędowej przód–tył. Wartość prędkości jednego ze śmigieł wzrasta, natomiast drugiego ulega zmniejszeniu.

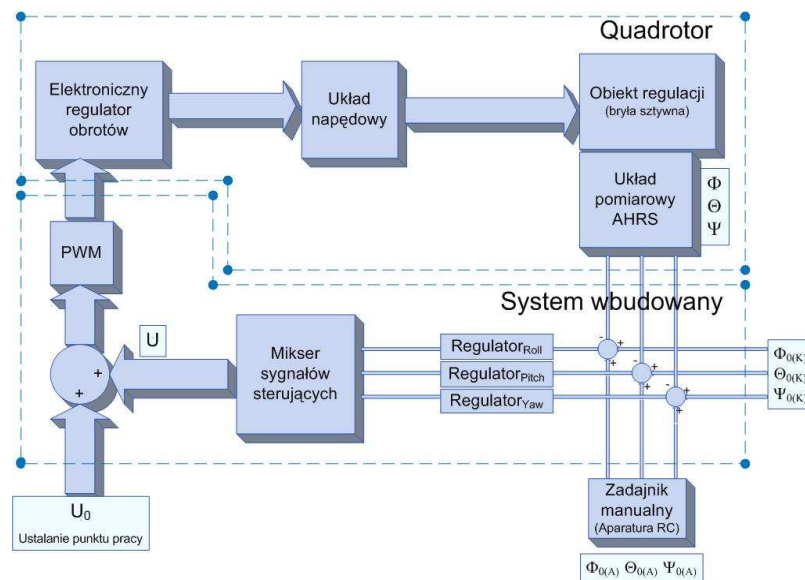


Rys. 1. Platforma latająca quadrotor

W podobny sposób realizuje się obrót wokół osi  $x$  o kąt  $\varphi$ , wpływając tym samym na ruch poprzeczny. Obrót wokół osi  $z$  o kąt  $\psi$  realizuje się przy zmianie prędkości obrotowej jednej pary silników w stosunku do drugiej, tak aby sumaryczny moment był równy stałej wielkości [2]. Modele fenomenologiczne opisujące dynamikę platformy latającej typu quadrotor oparte są na równaniach sił i momentów oddziałujących na bryłę sztywną [1, 2, 7, 8].

### Struktura układu sterowania

Strukturę układu sterowania dla podukładu stabilizacji orientacji platformy latającej przedstawiono na rys. 2. Na schemacie wyszczególniono bloki funkcjonalne, z których składa się quadrotor. Wszystkie operacje związane z algorytmem sterującym wykonywane są w systemie komputerowym specjalnego przeznaczenia. Rolę tę pełni mikroprocesor wraz z peryferiami o odpowiedniej mocy obliczeniowej. Wypracowane sygnały sterujące podawane są na elektroniczne regulatory prędkości obrotowej, które bezpośrednio sterują pracą jednostek napędowych.



Rys. 2. Struktura blokowa układu sterowania

W geometrycznym środku platformy latającej znajduje się układ pomiarowy orientacji przestrzennej. Moduł AHRS (ang. *Attitude and Heading Reference System*) składa się z trzech czujników prędkości kątowej (żyroskopów), trzech czujników przyspieszeń liniowych oraz trzech magnetometrów wykorzystywanych do pomiaru kierunku ziemskiego pola magnetycznego. Na podstawie wy-

mienionych wielkości fizycznych dokonuje się fuzji danych i wyznacza orientację obiektu.

Do popularnych metod estymacji kątów Eulera można zaliczyć filtr Kalmana [4] oraz algorytmy oparte na metodzie najmniejszych kwadratów [4], a także *fuzzy logic* [5].

## 2. Projektowanie i prototypowanie układu sterowania

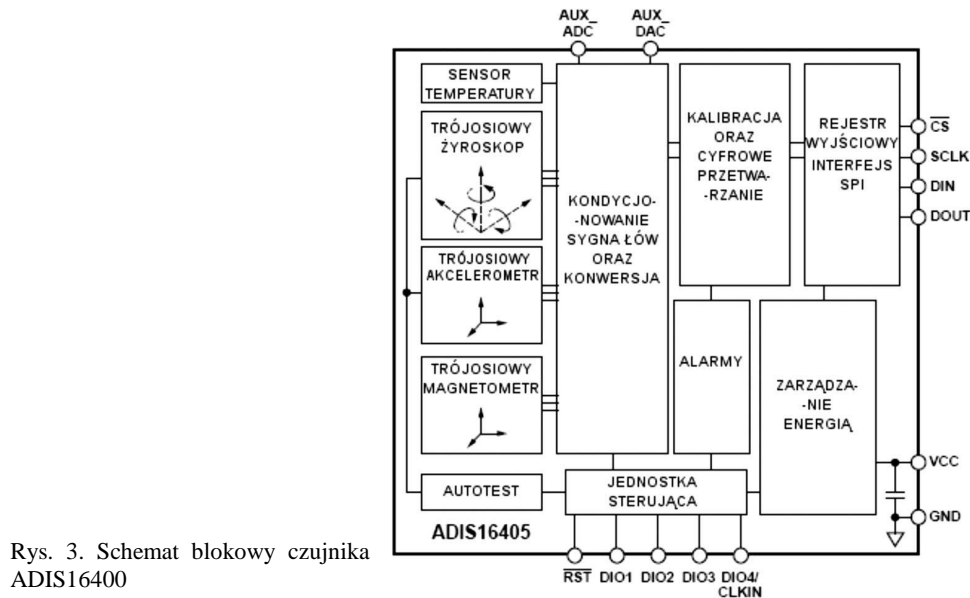
Szybkie prototypowanie systemów mechatronicznych jest ważnym elementem procesu projektowania. Znaczącą cechą prototypowania jest szybkie i wygodne przetwarzanie nowych koncepcji wyrobu na prototyp, który może być użyty do testowania i weryfikacji w czasie rzeczywistym. Metoda szybkiego prototypowania polega na tym, że wirtualny prototyp jest badany i dostrajany z wykorzystaniem współdziałającego z nim rzeczywistego obiektu lub też jego modelu fizycznego. Sprzęt i oprogramowanie do szybkiego prototypowania wykorzystuje się również w identyfikacji, symulacji HIL (ang. *Hardware In the Loop*) oraz projektowaniu systemów przetwarzania sygnałów w czasie rzeczywistym [6]. W wyniku szybkiego prototypowania kod implementowanego algorytmu generowany jest na kontroler, który działa w systemie czasu rzeczywistego i jest podłączony do rzeczywistego obiektu. W podejściu HIL kod generowany jest zarówno z modelu fenomenologicznego obiektu, jak też ze sterownika. Kod modelu obiektu uruchomiony jest na systemie czasu rzeczywistego, a kod algorytmu – na docelowej platformie sprzętowej. Zastosowane podejście charakteryzuje się eliminowaniem błędów sprzętowych bądź programowych już we wczesnym stadium projektowania i implementacji.

### Układ pomiarowy orientacji przestrzennej

Układ pomiarowy orientacji obiektu w przestrzeni jest niezbędnym elementem funkcjonalnym całego systemu sterowania dla bezzałogowych obiektów latających, zapewnia poprawny start, lądowanie oraz manewrowanie platformą latającą. W wielu rozwiązaniach stosuje się automatyczny podukład sterowania zapewniający stabilizację kątową, natomiast pozostałe manewry (np. lądowanie) wykonywane są przez operatora z wykorzystaniem informacji wizyjnej lub kontaktu wzrokowego, o ile jest to możliwe. Szybki rozwój technologii MEMS (ang. *Micro Elektro-Mechanical System*) znacząco wpływa na rozwój systemów sensorycznych, w tym także układów nawigacji inercyjnej, które odgrywają ogromną rolę w aplikacjach związanych z bezzałogowymi obiektami latającymi.

W przypadku opisywanej platformy latającej typu quadrotor, aby określić orientację w przestrzeni, zastosowano zintegrowany sensor bezwładnościowy firmy Analog Devices ADIS16400. Moduł łączy w sobie trójosiowy cyfrowy akcelerometr, żyroskop oraz magnetometr. Posiada on również wiele dodatkowych funkcji, np. automatyczną korekcję offsetu poszczególnych sensorów czy

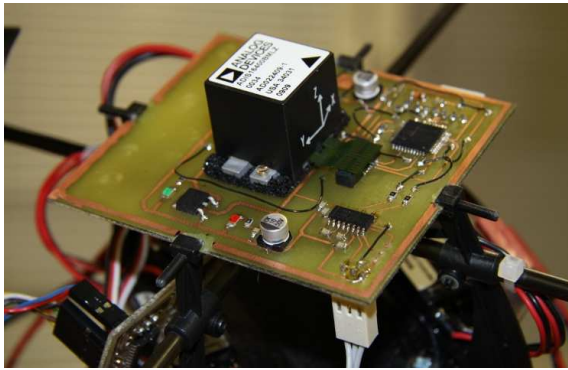
programowalny filtr dolnoprzepustowy. Schemat funkcjonalny modułu zamieszczono na rys. 3. Wymiana danych z czujnikiem odbywa się za pomocą szeregowego interfejsu urządzeń peryferyjnych SPI (ang. *Serial Peripheral Interface*).



Rys. 3. Schemat blokowy czujnika ADIS16400

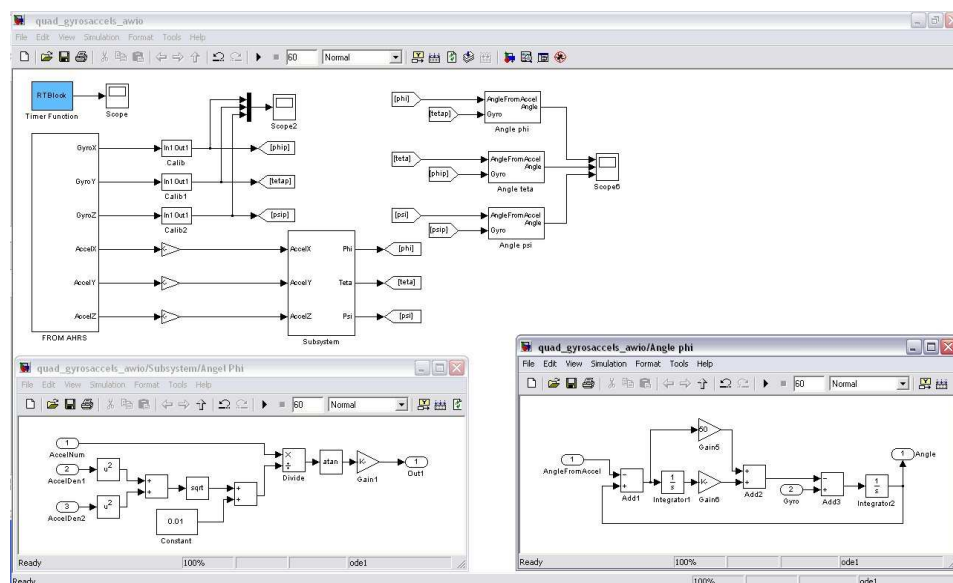
W przypadku ADIS16400 otrzymywane informacje są wartościami odczytanymi bezpośrednio z poszczególnych czujników modułu AHRS. W celu wyznaczenia orientacji obiektu uzyskane dane należy odpowiednio przetworzyć, tak aby otrzymać ważne dla badania wielkości, w tym przypadku kąty  $\phi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$ . Algorytmy, o których jest mowa w kolejnych akapitach, wymagają często większego nakładu mocy obliczeniowej. Do szybkiej analizy, weryfikacji oraz porównania wspomnianych algorytmów rozsądne jest zastosowanie metod szybkiego prototypowania z wykorzystaniem komputera klasy PC wraz z odpowiednim oprogramowaniem. Implementacja wprost na konkretnej platformie sprzętowej (tworzenie firmware'u) może pochłaniać sporo czasu, a jej efektywność może nie doprowadzić do oczekiwanych rezultatów.

Sposób komunikowania się z czujnikiem bezwładnościowym uniemożliwia podłączenie go wprost do portów wejściowych komputera PC. Na rysunku 4. przedstawiono układ elektroniczny, który spełnia rolę konwertera. W układzie do konwersji pomiędzy interfejsami szeregowymi zastosowano mikrokontroler 8-bitowy. Do komputera PC wysyłane są dane otrzymane z czujnika. Tak zmodyfikowany układ pomiarowy umożliwia podłączenie go do różnorodnych systemów wbudowanych posiadających sprzętowy port szeregowy (UART).



Rys. 4. Układ elektroniczny z modulem AHRS

Fuzja danych z czujników odbywa się w środowisku Matlab/Simulink. Przykład programu w postaci schematu blokowego przedstawiono na rys. 5.

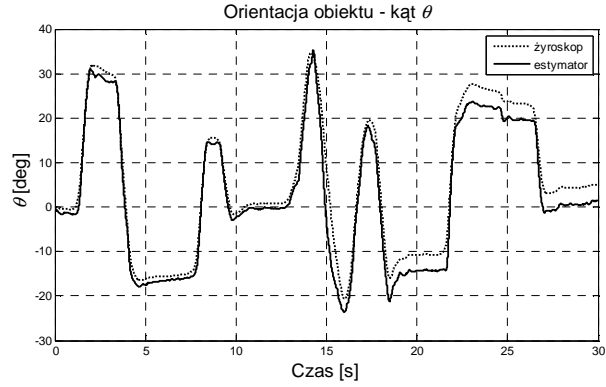


Rys. 5. Schemat blokowy programu wyznaczającego kąty Eulera

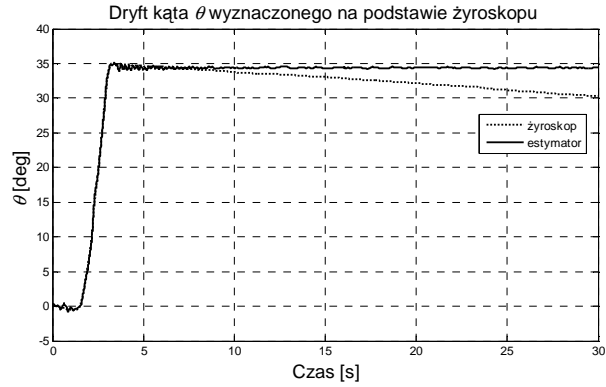
Wykresy przedstawione na rys. 6÷8. prezentują przykładowe przebiegi kąta przechylenia  $\theta$ , wyznaczonego na podstawie całkowania wartości pomiarowej z żyroskopu oraz obliczeń trygonometrycznych z zastosowaniem estymatora konwencjonalnego [3].

$$\theta_Q = \frac{1}{s} \left[ \dot{\theta}_{Gyro} - \left( k_p + \frac{k_i}{s} \right) (\theta_Q - \theta_{Accel}) \right]$$

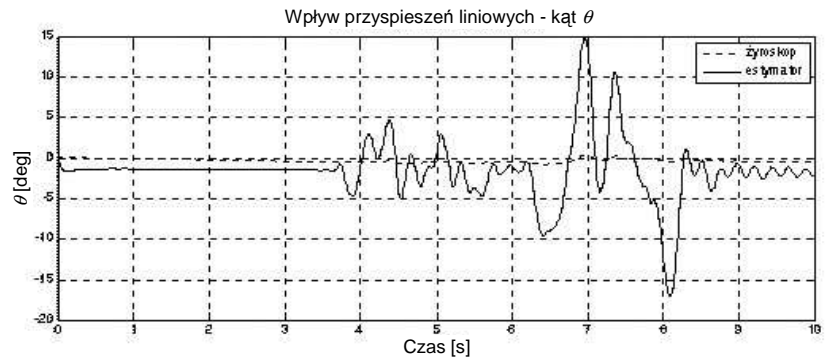
gdzie:  $\theta_Q$  – kąt przechylenia quadrotora,  $\theta_{Gyro}$  – prędkość kątowna,  $\theta_{Accel}$  – kąt wyznaczony na podstawie przyspieszeń.



Rys. 6. Orientacja obiektu – kąt  $\theta$



Rys. 7. Dryft kąta wyznaczonego za pomocą żyroskopu

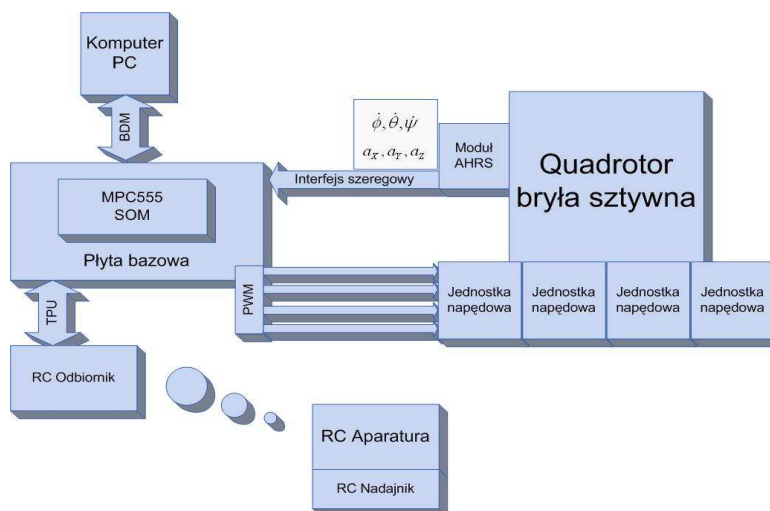


Rys. 8. Wpływ przyspieszeń liniowych na estymator kąta  $\theta$

Przedstawione rozwiązanie umożliwia projektowanie i prototypowanie różnych koncepcji algorytmów wyznaczania orientacji obiektu w przestrzeni. Wykresy mają charakter poglądowy i pokazują zastosowanie prostego estymatora kątów Eulera. Zaletą proponowanego podejścia jest możliwość przystąpienia do fazy testów już w trakcie implementacji. Użytkownik w sposób iteracyjny może poprawiać wirtualny prototyp. Ważną zaletę stanowi również natychmiastowa wizualizacja danych, która często jest utrudniona w przypadku tworzenia oprogramowania dedykowanego i wymaga dodatkowych aplikacji na komputerze PC.

### Prototypowanie algorytmu sterowania

Realizację zadania sterowania, sformułowanego jako podukład stabilizacji katowej platformy, oparto na architekturze sprzętowej zawierającej mikrokontroler z rodziny PowerPC. Zestaw developerski z mikrokontrolerem MPC555 wraz z toolboxem Embedded Target for Freescale MPC5xx umożliwia prototypowanie układów na podstawie schematu blokowego tworzonego w oprogramowaniu Matlab/Simulink. Generowanie kodu wykonywalnego na mikroprocesor odbywa się automatycznie, co znacznie przyspiesza i ułatwia procesy projektowe. W zestawie developerskim wyróżnia się moduł SOM (ang. *System On Module*). Jest to płytki z procesorem rozbudowana o dodatkowe układy peryferyjne.



Rys. 9. Struktura sprzętowa układu sterowania dla quadrotora

Moduł po zaprogramowaniu można usunąć z zestawu developerskiego i przenieść do urządzenia docelowego, w którym będzie spełniał zaimplemento-



wane w procesie projektowania funkcje. Schemat ideowy połączeń dla podukładu stabilizacji kątowej przedstawiono na rys. 9.

Algorytm zrealizowany w ramach prototypowania układu pomiarowego można wprost przenieść do schematu blokowego prototypowanego układu sterowania. Ze względu na realizację na jednej platformie programistycznej uzyskuje się kompatybilność projektowanych podukładów, składających się na realizowany układ stabilizacji kątowej.

### 3. Podsumowanie

W pracy zaprezentowano i wykorzystano metodę szybkiego prototypowania jako efektywne podejście do syntezy podukładu stabilizacji kątowej dla platformy quadrotor. Do budowy bezwładnościowego układu pomiarowego wykorzystano najnowszy zintegrowany czujnik AHRS firmy Analog Devices ADIS16400. Prototypowanie algorytmu określającego orientację obiektu w postaci diagramów blokowych jest niezwykle efektywne, pozwala bowiem skrócić czas pracy potrzebny do uzyskania odpowiednich wyników. Co więcej, umożliwia weryfikację implementowanego programu w każdym etapie jego tworzenia. Zastosowanie platformy sprzętowej z mikroprocesorem, w którym proces generacji kodu odbywa się również w środowisku Matlab/Simulink, umożliwia przeprowadzenie procesu projektowania w sposób spójny i bardzo elastyczny w przypadku kolejnych modyfikacji bądź też rozbudowy systemu sterowania o inne podukłady sterowania (np. automatyczną regulację wysokości).

Obecne prace autorów skupiają się nad poprawą algorytmu wyznaczającego kąty Eulera z czujnika ADIS16400 oraz optymalizowaniem parametrów regulatorów PID.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010-2012 jako projekt rozwojowy Nr OR 00011811.*

### Literatura

- [1] Bouabdallah S., Siegwart R.: Full control of a quadrotor, International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Diego, USA 2007, s. 153÷158.
- [2] Castillo P., Lozano R., Dzul A.E.: Modelling and control of mini-flying machines, Springer, 2005.
- [3] Hong S.K.: Fuzzy logic based closed-loop strapdown attitude system for unmanned aerial vehicle (UAV), Sensors and Actuators A, 2003, s. 109÷118.
- [4] Kang C.W., Park C.G.: Attitude estimation with accelerometers and gyros using fuzzy tuned Kalman filter, European Control Conference, Budapest 2009, s. 3713÷3718.

- [5] Kim J.H., Min H.G., Cho J.D., Jang J.H., Kwon S., Jeung E.T.: Design of angular estimator of inertial sensor using the least square method, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2006, s. 510÷513.
- [6] Mrozek Z.: *Komputerowo wspomagane projektowanie systemów mechatronicznych*, Wydaw. PK, 2002.
- [7] Soumelidis A., Gaspar P., Regula G., Lantos B.: Control of an experimental mini quad-rotor UAV, *Proc. 16<sup>th</sup> Mediterranean Conference on Control and Automation*, Ajaccio, France 2008, s. 1252÷1257.
- [8] Tayebi A., McGilvray S.: Attitude stabilization of a quadrotor aircraft, *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, vol. 14, no 3, 2006, s. 562÷571.

## **FAST PROTOTYPING OF THE FLYING PLATFORM CONTROL SYSTEM COMPONENTS**

### **A b s t r a c t**

In this paper we focus on the fast prototyping of the attitude stabilization control subsystem of an indoor unmanned aerial vehicle (UAV), known as a quadrotor. The attitude measurement circuit is based on the ADIS16400 sensor, which is a complete inertial system that includes a triaxial gyroscope, a triaxial accelerometer, and a triaxial magnetometer. The design and the initial realization of the control system on an experimental aerial platform have been described. The practical realization of the attitude stabilization system is an important step in the development process of a more advanced capabilities of autonomous flying vehicles. Thus, we use the fast prototyping method together with the Matlab/Simulink software and rapid prototyping kit based on the PowerPC microcontroller. User can manage the peripherals of the microcontroller and implement various of control and data processing algorithms by means of the Simulink block diagrams. The controller can be tuned in real-time simulations jointly with the real plant or its phenomenological model.

*Złożono w Oficynie Wydawniczej w sierpniu 2011 r.*