

Karol BĘBEN, Norbert GRZESIK, Konrad KUŹMA
Polish Air Force University (Lotnicza Akademia Wojskowa)

USING FUZZY LOGIC TO STABILIZE THE POSITION OF A MULTI ROTOR

Zastosowanie logiki rozmytej do stabilizacji położenia wielowirnikowca

Abstract: *The article is a continuation of research into a stabilization system for the Unmanned Aerial Vehicle of vertical takeoff and landing. The stabilization system was designed on the basis of a fuzzy logic Mamdani type controller. In the framework of the research, the authors built a test stand with a Multi Rotor model, which allows "Hardware In The Loop" testing in real time. The control system was written in the Matlab/Simulink software and implemented to the Arduino microcontroller.*

Keywords: flight dynamics, unmanned aerial aircraft, embedded systems, fuzzy logic, MATLAB

Streszczenie: *Artykuł stanowi kontynuację badań nad układem stabilizacji do modelu Bezzałogowego Statku Powietrznego pionowego startu i lądowania. System stabilizacji zaprojektowany został w oparciu o regulator logiki rozmytej typu Mamdani. W ramach badań wykonane zostało stanowisko testowe z modelem quadcoptera pozwalające na wykonywanie testów HIL „Hardware In The Loop” w czasie rzeczywistym. System sterowania napisany został w oprogramowaniu Matlab/Simulink i zaimplementowany do mikrokontrolera Arduino.*

Słowa kluczowe: dynamika lotu, bezzałogowy statek powietrzny, systemy wbudowane, logika rozmyta, MATLAB

1. Introduction

For many, the fact that unmanned aviation is older than manned aviation might be quite surprising [5]. Some sources mention that the unmanned aerial vehicles were already being considered in 500 B.C. Archytas from Tarent is believed to be the forerunner of unmanned aerial vehicles. The projects of UAV appeared already at the beginning of the XX century, but they were developed by a very narrow group of aviation enthusiasts, in the shadow of manned aviation (GA - General Aviation). The designed projects were initially intended for military purposes. They were used in espionage, intelligence but their area of activity was constantly evolving and now, unmanned aerial vehicles (UAV) belong to a rapidly growing branch of industry.

The discovery and development of gyroscope devices as well as the development of radio electronics were the basis for the development of unmanned systems [3]. In the past, many attempts were undertaken to build unmanned vehicles mainly for military purposes. Initially, the focus was on the design of various, radio controlled armament or torpedoes. The designers also worked on unmanned aerial vehicles for air defence training. These two major concepts developed before World War II, mainly in the United States of America, Great Britain, France and Germany.

Unmanned aerial vehicles (UAVs) are developing very dynamically. Innovative technologies are being created in Poland followed by changes in legislation in relation to a professional and recreational use of UAVs.

The most popular manufacturer of Unmanned Aerial Vehicles, popularly referred to as drones, is a Chinese company DJI. The manufacturer launches a new model on average every 6 months. Each newly presented model is equipped with better functionalities or control systems and stabilization systems. In addition, the main sensor used for localizing is a GPS module. It is not immune to interference, therefore a loss of a GPS signal is one of the underlying causes of UAV damage. In view of the above, any action related to research, testing new stabilization and localizing systems faces approval on the part of state institutions, particularly those related to the state defence.

2. Testing platform and test stands

The stand is composed of three major elements [2]:

- a quadrocopter model,
- a PC computer with Matlab/Simulink software and an USB port,
- a base with a ball joint.

The considered model is an unmanned aerial vehicle, quadrocopter type in the + system.



Fig. 1. Quadcopter model

The quadcopter model, presented in photo, is equipped with: Microcontroller Arduino Mega 2560 Rev 3, Sensor IMU MPU6050 GY521, Battery Turnigy 2200mAh 3S 25C, Engine TAROT 2814 700KV, Frame Turnigy H.A.L 585 with shield and propeller Gemfan 11x4,7. The drone's arms were colour marked, which was also considered in the Simulink model design. The use of colour coding helps to quickly identify the orientation of the object.

The aim of the research was to design a compact, mobile test stand, which is characterized by small dimensions, thus, it was decided to use the handle with a ball joint. The designed test stand allows secure fixing of the UAV model. It also ensures freedom of movement within $\pm 30^\circ$. In its lower part, it has special rubber which, at the same time, serves as a suction cup at the ground. The area, on which the test stand is to be attached, must be clean and dry.



Fig. 2. Designed test stand

3. Three-dimensional stand model

The practically built test stand was modelled as a three-dimensional 3D model with all the functionalities of a physical test stand. The main reason why the authors undertook work linked with the creation of a 3D model was the fact that the use of a ball joint in the test stand introduces significant changes in the equations of spatial movement. An exact design of the test stand allowed determining a rotation matrix and an automatic calculation of moments of inertia around all the axes.

The working tool during the design work was CAD Dassault Systems SolidWorks 2017 software.

Each element was accurately dimensioned using a measure and callipers. The designed parts were used in the final assembly. All the necessary bonds in-between the individual elements of the design were considered, taking care of maintaining all the degrees of freedom.



Fig. 3. Model of designed test stand

4. Design of the control system

The project involved developing a fuzzy controller [1] and a series of simulations performed with its participation. The task of the fuzzy controller was to determine the corrective position of the quadcopter based on the current value of the angle (pitch or bank) and the set signal value. The fuzzy logic controller to stabilize the position of a quadcopter was designed in the Matlab environment, using Simulink and Fuzzy Logic Toolbox packages..

The authors built a fuzzy logic Mamdani-type model, whose principles have taken the following form:

$$\text{IF } (x_1=A_1) \text{ AND } (x_2=B_1) \text{ THEN } (y=C_1)$$

$$\text{IF } (x_1=A_2) \text{ AND } (x_2=B_1) \text{ THEN } (y=C_1)$$

where:

x_1 x_2 y - are linguistic variables

A_1 ... C_2 - are fuzzy logic sets

The controller (fig. 4) is made up of two input signals:

1. Current - input signal of a current value of the pitch angle or bank angle;
2. Set - input signal of the set pitch angle or bank angle;

and one output signal:

1. Corrective Signal - value of corrective signal

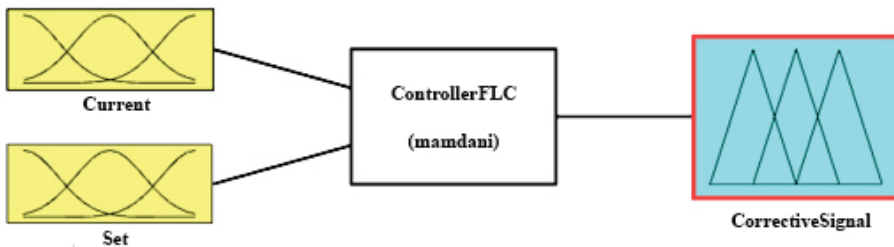


Fig. 4. Fuzzy logic controller model

On the basis of the current value of the angle (pitch or bank) and the set signal value, the value of the corrective signal is computed. The values of the angles are imported from the block “Data from IMU”. The output signal “CorrectiveSignal” is connected with the block - signal Mixer.

The method of sums - Bisector was selected for the defuzzification method. In this method, the output signal requires a calculation of two integrals, which requires a greater computational effort and takes up more memory.

Below there is a thorough characteristics of all signals.

Input signals

The first input signal was called *Current*. It is an actual angle value (pitch or bank). The parameter is expressed in units of angular degrees. The signal consists of five membership functions. Two function types: *gaussmf* and *gauss2mf*. Information about the scope of each function and its type has been illustrated in fig. 5.

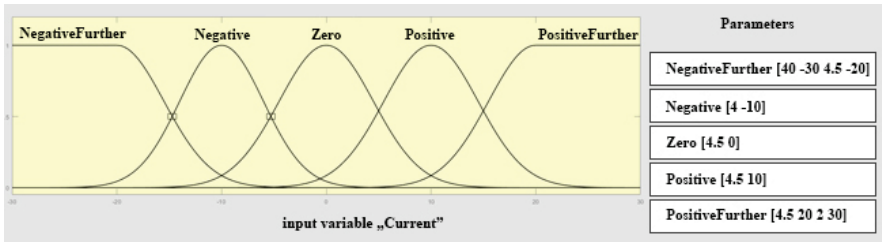


Fig. 5. Input signal "Current"

The second input signal is a set value of the angle. The signal is described in the controller as Set. The parameter is expressed in units of angular degrees. The signal consists of five membership functions. Two function types were used: *gaussmf* and *gauss2mf*. The information about the scope of each function and its type has been illustrated in fig. 6.

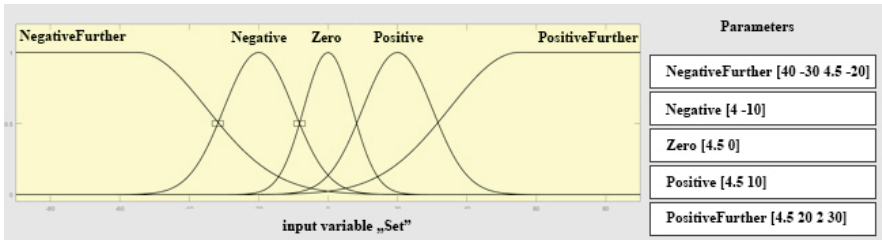


Fig. 6. Input signal "Set"

Output signal

The controller has one output signal which is a corrective signal. The controller was referred to as *CorrectiveSignal*. Percentage is the unit of the output signal. It refers to "how much percentage of the throttle must be added or deduced from the current position of the throttle". The signal consists of five membership functions. Two function types were used: *gaussmf* and *gauss2mf*. The information about the scope of each function and its type has been illustrated in fig. 7.

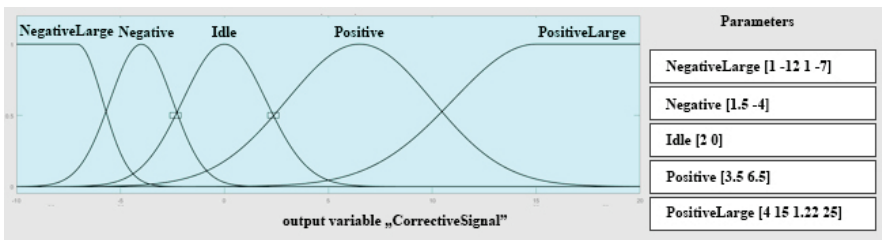


Fig. 7. Output signal "CorrectiveSignal"

On the basis of [4], the number of principles has been determined. The twenty-five deduction principles has been determined.

5. Sampling of the fuzzy logic controller

The investigation of the designed system was started with planning of the tests. They were divided into two stages. In the first stage, the authors performed sampling of the fuzzy logic controller, whereas in the second test, they made tests of the stabilization systems, using the test stand. The collected findings are presented in the form of graphs and analyses.

In order to conduct the test, the authors developed table (tab. 1), listing the parameters for twenty tests. Then, on its basis, data were entered in the system designed in the software Simulink and finally tests were performed. Out of twenty samples, five random ones were selected. Their results were featured on control surfaces. An example of the control surface is shown in fig. 8.

Table 1

Sampling parameters. Stage one

No.	Set angle [°]	Current angle [°]	Corrective signal [%]
1.	0	0	0.5
2.	0	5	4.7
3.	0	-5	-0.7
4.	0	10	6.2
5.	0	-10	-3.7
6.	0	20	6.2
7.	0	-20	-7.9
8.	5	-5	-1
9.	10	0	-2.5
10.	-10	0	5.9
11.	-10	10	6.8
12.	10	-10	-4
13.	24.9	-6.18	-4.6
14.	-9	11.1	6.8
15.	28.1	13.9	-2.8
16.	-14.3	-10.2	0.5
17.	-18.5	30	6.5
18.	-13.2	-30	-6.1
19.	19.6	7.59	-1.6
20.	-16.4	-9.35	0.5

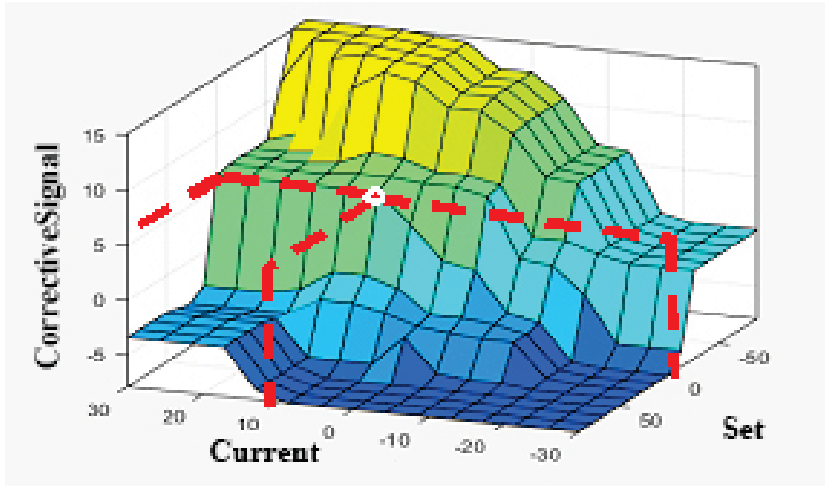


Fig. 8. The control surface with Set angle 0° and Current angle 10° and Corrective signal answer

Below are the results of the second stage of the tests. During this test, the designed stabilization system was checked. In order to execute the test, the parameters of angles of pitch and bank were set gradually. During the tests in real-time, graphs were generated.

The Simulink programme was set in the simulation mode "Hardware In The Loop", thus each time the system set new parameters and uploaded them to the Arduino microcontroller.

Each time stabilization was sampled using the designed fuzzy logic controller. The samples of results for controller are shown in fig. 9, 10 and 11.

Set angle of pitch = 10°, Set angle of bank = 0°

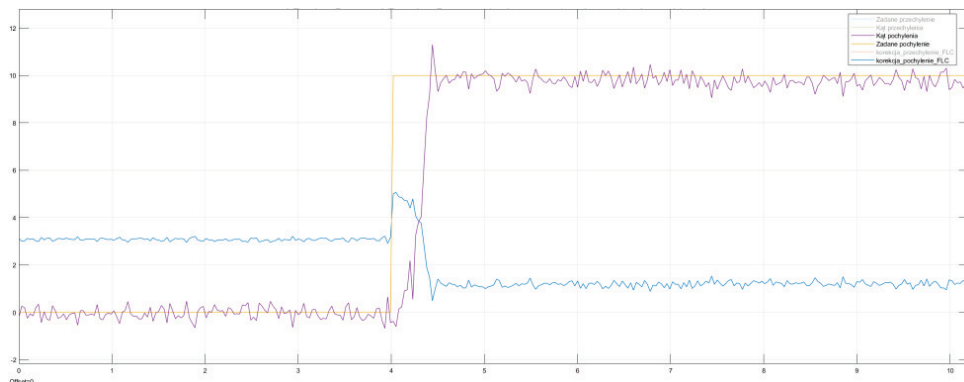


Fig. 9. Response of fuzzy logic controller to set parameters Attempt 2

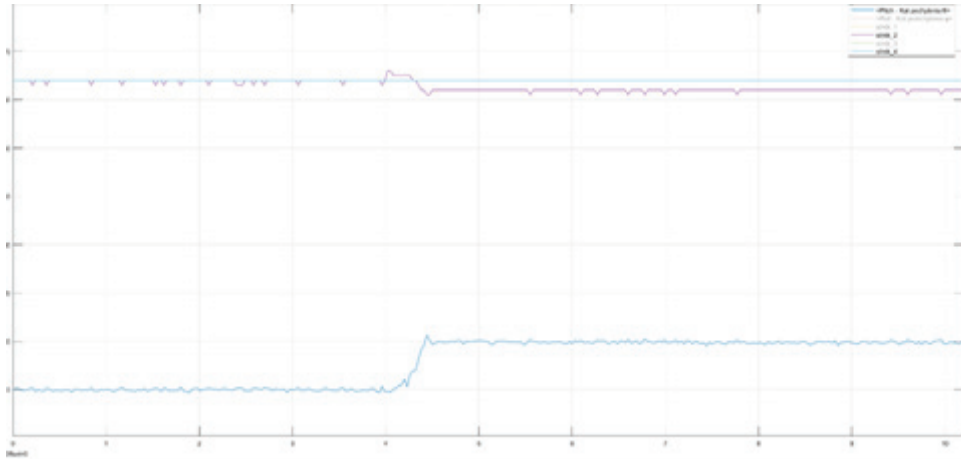


Fig. 10. Motor control signals Attempt 2

Set angle of pitch = 0°, Set angle of bank = 0°

The graph below (fig. 11) shows a response of controllers to inducing manually the angle of pitch, after 2 s of simulation, for approximately -30 and then, in 5 s of simulation to 30°. The inducing was made by raising an arm.

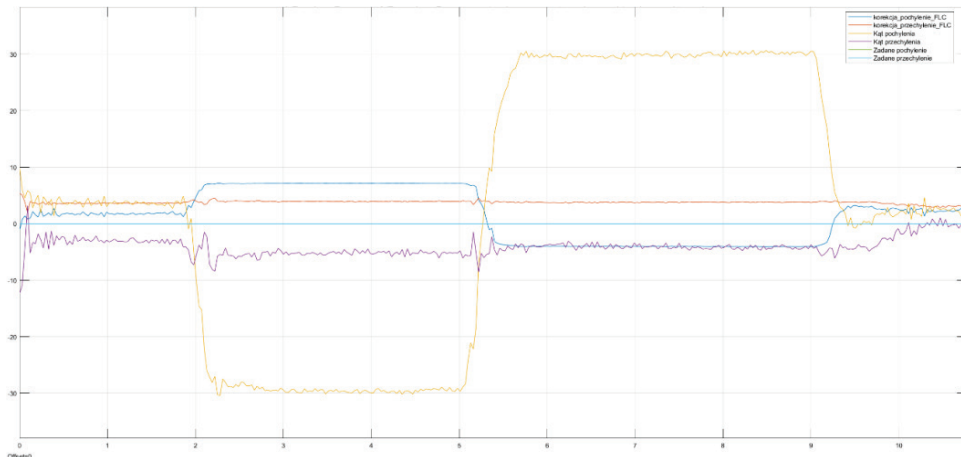


Fig. 11. Response of fuzzy logic regulators to inducing of pitch and bank.

The above graphs present the behaviour of the designed stabilization system on a practical platform. Generated characteristics illustrate a correct operation of the stabilization

system. Changing the pitch or bank angle causes a decrease or an increase in the “the percentage of the throttle”, which translates into changing the engine rotational speed.

On the characteristics, there are noticeable large fluctuations of the readings from the IMU sensor and variations of stabilization systems.

The fluctuations are most presumably caused by:

- an inaccurate balancing of the platform,
- resistance generated by a ball joint of the test stand,
- by emerging the so-called "coefficient of air flow" since the flowing air streams are "bounced back from the table on which the platform is placed", causing improper erroneous readings from the IMU sensor,
- an inaccurate selection of the filter parameters of IMU signals.

6. Conclusions

The article presents a concept of a stabilization system of the Unmanned Aerial Vehicle based on fuzzy logic controllers. The scope of the research included a modification of a UAV model, building a test stand and a design of a test stand model with a quadcopter in the CAD software, programming the fuzzy logic controller and creation of the stabilization system in the Simulink software. The presented graphs differ in their accuracy from the advanced stabilization systems, however, they indicate a high potential of possibilities of fuzzy logic controllers. The designed position consisting of a physical object, i.e. an unmanned aerial vehicle, a quadcopter, may serve as a basic platform to conduct research related to:

- teaching the basics of construction and steering of a Multi Rotor,
- investigating the dynamics of a Multi Rotor,
- investigating stabilization systems,
- investigating cases, in which there is a failure, e.g. loss of a propeller,
- investigating the use of a quadcopter in specific atmospheric conditions.

Equipping the microcontroller with the popular Arduino Mega 2560 Rev 3 controller allows an easy implementation of new control algorithms. The microcontroller has a lot of free input/output pins so that it is possible to connect additional sensors or actuators.

7. References

1. Babuška R.: Fuzzy modeling – a control engineering perspective. Proc. Inter. Conf. FUZZ-IEEE/IFES'95. Yokohama 1995.
2. Bęben K., Grzesik N.: Fuzzy based roll and pitch stabilizer control system for Quadcopter. International Conference On Scientific Aspects Concerning

- Operation Of Manned And Unmanned Aerial Vehicles. Proceedings, 20-22.05.2015, Dęblin 2015.
3. Bouabdallah S.: Design and control of quadrotors with application to autonomous flying, Disertation. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2007.
 4. Grzesik N.: Podstawy sterowania rozmytego, Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych, Dęblinie 2012.
 5. Polkowski P.: Bezzałogowe Statki Powietrzne, Unmanned Aerial Vehicles. Rocznik Bezpieczeństwa Międzynarodowego, vol. 10, nr 1, Wrocław 2016.

ZASTOSOWANIE LOGIKI ROZMYTEJ DO STABILIZACJI POŁOŻENIA WIELOWIRNIKOWCA

1. Wstęp

Dla wielu zaskakujący może być fakt, że lotnictwo bezzałogowego jest starsze od załogowego [5]. Niektóre źródła podają, że o bezzałogowych statkach powietrznych myślano już nawet 500 lat p.n.e. Za prekursora tematyki bezzałogowych urządzeń uważany jest Archytas z Tarentu. Udokumentowane wizje samolotów bezzałogowych pojawiły się już na początku XX w., lecz rozwijane były przez bardzo wąską grupę entuzjastów lotnictwa, w cieniu dużego lotnictwa załogowego (GA – General Aviation). Tworzone konstrukcje początkowo wykorzystywane były przede wszystkim do celów militarnych. Urządzenia te miały znaleźć zastosowanie w działaniach szpiegowskich, wywiadowczych jednak obszar ich zastosowania ciągle się rozwijał i obecnie BSP są prężnie rozwijającą się gałęzią przemysłu.

Odkrycie i opracowanie urządzeń żyroskopowych oraz rozwój elektroniki radiowej stanowiły podstawę w rozwoju bezzałogowych systemów [3]. W przeszłości podejmowanych było dużo prób budowania obiektów bezpilotowych głównie dla celów militarnych. Początkowo skupiano się na projektowaniu różnorodnych, kierowanych za pośrednictwem sygnałów radiowych bomb lub torped. Konstruktorzy pracowali również nad obiektami bezzałogowymi w celu szkolenia obrony przeciwlotniczej. Te dwie główne koncepcje rozwijały się przed II wojną światową zwłaszcza w USA, Wielkiej Brytanii, Francji oraz Niemczech.

Branża Bezzałogowych Statków Powietrznych (BSP, ang. UAV- Unmanned Aerial Vehicle) rozwija się w dynamicznym tempie. W Polsce powstają innowacyjne technologie, a także rozwijane jest prawodawstwo związane z profesjonalnym oraz rekreacyjnym użytkowaniem UAV. Najbardziej popularnym producentem bezzałogowych statków powietrznych, popularnie nazywanych dronami jest chińska firma DJI, która średnio co 6 miesięcy dostarcza na rynek nowy model urządzenia. Każdy, świeżo zaprezentowany model wyposażony jest w coraz lepsze funkcjonalności lub układy sterownia i stabilizacji. Ponadto, głównym sensorem służącym lokalizacji jest moduł GPS. Nie jest on odporny na zakłócenia, przez co utrata sygnału GPS jest jedną z zasadnych przyczyn uszkodzenia BSP.

W związku z powyższym, wszelkie działania związane z badaniem, testowaniem nowych układów stabilizacji i lokalizacji spotykają się z bardzo dużą aprobatą instytucji państwowych, szczególnie związanych z obronnością państwa.

2. Platforma testowa i stanowisko testowe

Stanowisko składa się z trzech głównych elementów [2]:

- modelu quadcoptera,
- komputera PC z oprogramowaniem Matlab/Simulink oraz portem USB,
- podstawy z przegubem kulistym.

Rozpatrywany model to bezzałogowy statek powietrzny typu quadcopter w układzie +.



Rys. 1. Model quadcoptera

Zaprezentowany na zdjęciu model quadcoptera wyposażony jest w: mikrokontroler Arduino Mega 2560 Rev 3, czujnik IMU MPU6050 GY521, akumulator Turnigy 2200mAh 3S 25C, silnik TAROT 2814 700KV, ramę Turnigy H.A.L 585 wraz z osłoną oraz śmigło Gemfan 11x4,7. Ramiona drona zostały oznaczone kolorami co uwzględnione zostało również w projekcie modelu Simulink. Zastosowanie kolorowych oznaczeń pomaga w szybkim określeniu orientacji obiektu.

Celem badań było zaprojektowanie kompaktowego, mobilnego stanowiska testowego charakteryzującego się małymi gabarytami. W związku z powyższym, postanowiono użyć uchwytu z przegubem kulowym. Wykonane stanowisko testowe pozwala na bezpieczne umieszczenie modelu BSP oraz zapewnia swobodę ruchów w zakresie $\pm 30^\circ$. Stanowisko w dolnej części posiada specjalną gumę stanowiącą jednocześnie przyssawkę do podłoża. Powierzchnia, do której przymocowane ma zostać stanowisko badawcze musi być czysta i sucha.



Rys. 2. Zaprojektowane stanowisko testowe

3. Trójwymiarowy model stanowiska

Zbudowane praktycznie stanowisko testowe zostało zamodelowane jako trójwymiarowy model 3D, posiadający wszystkie funkcjonalności stanowiska fizycznego. Głównym powodem, dla którego podjęte zostały prace związane z tworzeniem modelu 3D był fakt, iż zastosowanie przegubu kulistego w stanowisku wprowadza istotne zmiany w równaniach ruchu przestrzennego. Dokładny projekt stanowiska pozwolił na wyznaczenie macierzy obrotu oraz automatyczne obliczenie momentów bezwładności wokół wszystkich osi.

Narzędziem pracy podczas prac projektowania było oprogramowanie CAD Dassault Systems SolidWorks 2017. Każdy element został dokładnie zwymiarowany przy pomocy miary oraz suwmiarki. Zaprojektowane części wykorzystane zostały w ostatecznym złożeniu. Uwzględniono niezbędne wiązania pomiędzy poszczególnymi elementami, przy czym dbano, aby projekt posiadał wszystkie stopnie swobody.



Rys. 3. Model zaprojektowanego stanowiska testowego

4. Projekt systemu sterowania

Projekt polegał na opracowaniu rozmytego sterownika [1] oraz wykonaniu wielu symulacji z jego udziałem. Zadaniem sterownika rozmytego z założenia było wyznaczenie sygnału korygującego położenie quadcoptera na podstawie aktualnej wartości kąta (pochylenia lub przechylenia) oraz wartości sygnału zadanego.

Regulator rozmyty do stabilizacji położenia wielowirnikowca zaprojektowany został w środowisku Matlab, z wykorzystaniem pakietów Simulink oraz Fuzzy Logic Toolbox.

Zbudowano model rozmyty typu Mamdani, którego reguły mają postać:

$$\text{JEŚLI } (x1=A1) \text{ I } (x2=B1) \text{ TO } (y=C1)$$
$$\text{JEŚLI } (x1=A2) \text{ I } (x2=B1) \text{ TO } (y=C1)$$

gdzie:

$x1, x2, y$ - są zmiennymi lingwistycznymi

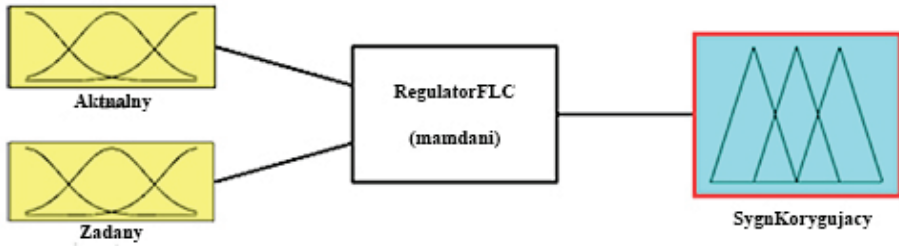
$A1, \dots, C2$ - są zbiorami rozmytymi

Regulator (rys. 4) złożony jest z dwóch sygnałów wejściowych:

1. Aktualny – sygnał wejściowy aktualnej wartości kąta pochylenia lub przechylenia;
2. Zadany – sygnał wejściowy zadanej wartości kąta pochylenia lub przechylenia;

oraz jednego sygnału wyjściowego:

1. SygnKorygujący – wartość sygnału korygującego.



Rys. 4. Model sterownika rozmytego

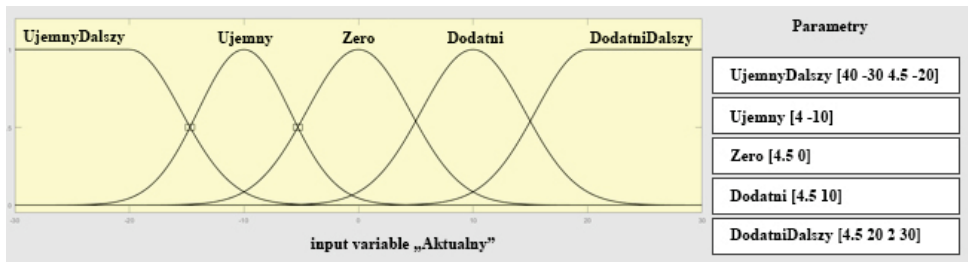
Na podstawie aktualnej wartości kąta (pochylenia lub przechylenia) oraz wartości sygnału zadanego obliczana jest wartość sygnału korygującego. Wartości kątów importowane są z bloku „Dane z IMU”. Wyjściowy sygnał „SygnKorygujący” połączony jest z blokiem Mikser sygnałów.

Jako metodę defuzyfikacji wybrano Bisector – metodę środka sum. W tej metodzie, sygnał wyjściowy wymaga obliczenia dwóch całek, co wymaga większych nakładów obliczeniowych oraz zajmuje więcej pamięci.

Poniżej dokładnie scharakteryzowano wszystkie sygnały.

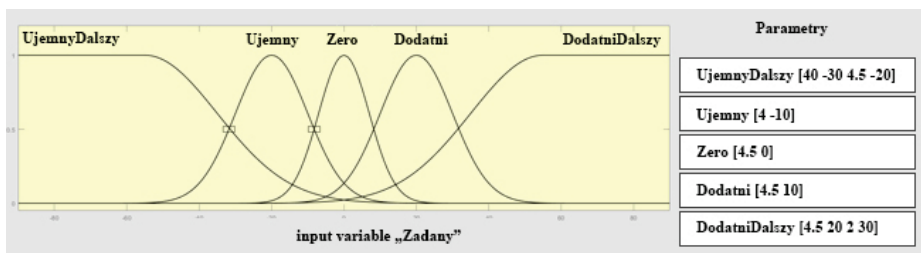
Sygnały wejściowe

Pierwszy sygnał wejściowy nazwano *Aktualny* i jest to aktualna wartość kąta (pochylenia lub przechylenia). Parametr wyrażony jest w jednostkach stopni kątowych. Sygnał składa się z pięciu funkcji przynależności. Zastosowano dwa typy funkcji: *gaussmf* oraz *gauss2mf*. Informacje o zakresie wartości każdej funkcji przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Sygnał wejściowy aktualnej wartości kąta

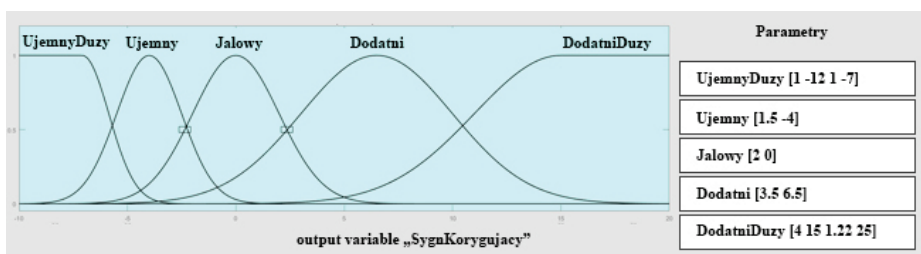
Drugi sygnał wejściowy to zadana wartość kąta. Sygnał opisany został w sterowniku jako *Zadany*. Parametr wyrażony jest w jednostkach stopni kątowych. Sygnał składa się z pięciu funkcji przynależności. Zastosowano dwa typy funkcji: *gaussmf* oraz *gauss2mf*. Informacje o zakresie wartości każdej funkcji przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Sygnał wejściowy zadanej wartości kąta

Sygnał wyjściowy

Regulator posiada jeden sygnał wyjściowy, będący sygnałem korekcji. W sterowniku określony został skrót *SygnKorygujący*. Jednostką sygnału wyjściowego są procenty. Oznaczają „ile procent przepustnicy ma zostać dodane lub odjęte od aktualnej pozycji przepustnicy”. Sygnał składa się z pięciu funkcji przynależności. Zastosowano dwa typy funkcji: *gaussmf* oraz *gauss2mf*. Informacje o zakresie wartości każdej funkcji przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Sygnał wyjściowy korygujący

Na podstawie [4] określono ilość reguł. W projektowanym regulatorze wyznaczono 25 reguł wnioskowania.

5. Badanie regulatora rozmytego

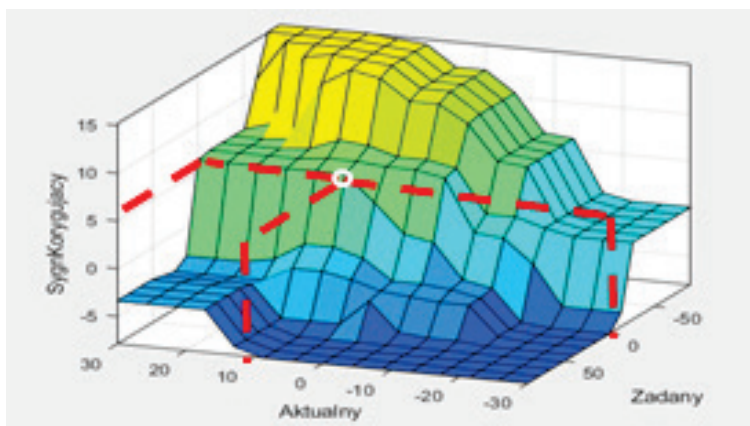
Badanie zaprojektowanego systemu rozpoczęto od zaplanowania testów. Zostały one podzielone na dwa etapy. W pierwszym przeprowadzono próbkowanie regulatora rozmytego, natomiast w drugim testy układu stabilizacji z wykorzystaniem stanowiska testowego. Zebrane wyniki przedstawiono w formie wykresów oraz przeprowadzono ich analizy.

W celu przeprowadzenia testu, opracowano tabelę (tab. 1), w której zebrano parametry dla 20 prób. Następnie na jej podstawie wprowadzono dane do systemu zaprojektowanego w oprogramowaniu Simulink i uruchomiono testy. Spośród 20 próbek, wybrano 5 dowolnych, dla których wyniki zostały zaprezentowane na płaszczyznach sterowania. Przykładową płaszczyznę sterownia przedstawia rys. 8.

Tabela 1

Wyniki badania próbek testowych

Lp.	Kąt zadany	Kąt aktualny	Sygnal korygujący [%]
1.	0	0	0.5
2.	0	5	4.7
3.	0	-5	-0.7
4.	0	10	6.2
5.	0	-10	-3.7
6.	0	20	6.2
7.	0	-20	-7.9
8.	5	-5	-1
9.	10	0	-2.5
10.	-10	0	5.9
11.	-10	10	6.8
12.	10	-10	-4
13.	24.9	-6.18	-4.6
14.	-9	11.1	6.8
15.	28.1	13.9	-2.8
16.	-14.3	-10.2	0.5
17.	-18.5	30	6.5
18.	-13.2	-30	-6.1
19.	19.6	7.59	-1.6
20.	-16.4	-9.35	0.5



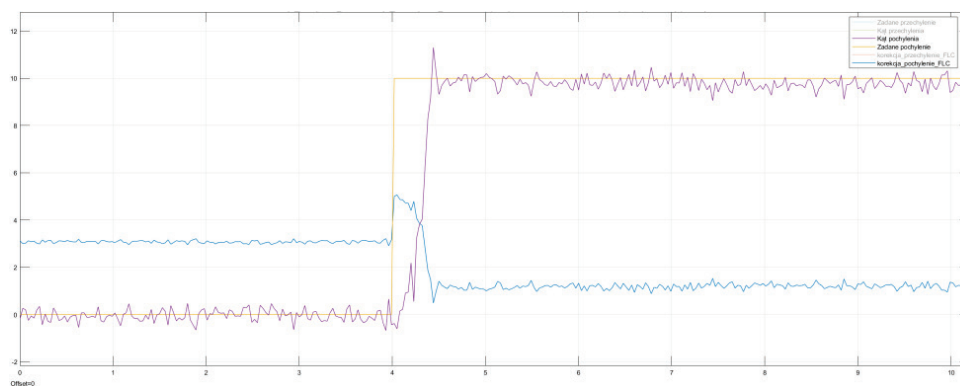
Rys. 8. Płaszczyzna sterownia z zaznaczonym kątem zadany 0° i kątem aktualny 10° oraz odpowiedzią sygnału korygującego

W drugim etapie badań przeprowadzono symulacje w pakiecie Simulink, których zadaniem było sprawdzenie układu stabilizacji. W celu realizacji testu, stopniowo zadawane były parametry kątów pochylenia i przechylenia. Podczas testów w czasie rzeczywistym generowane były wykresy.

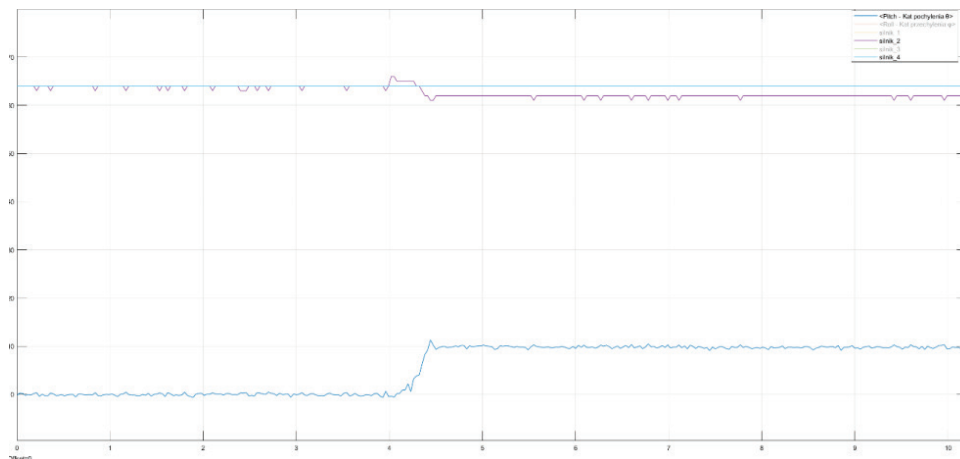
Program Simulink ustawiony został w tryb symulacji „Hardware In The Loop”, dzięki czemu system za każdym razem ustawiał nowe parametry i wgrywał je do mikrokontrolera Arduino.

Za każdym razem próbkowano stabilizację przy użyciu zaprojektowanego regulatora logiki rozmytej. Przykładowe wyniki dla każdego regulatora zostały przedstawiono na rysunkach 9, 10 oraz 11.

Kąt pochylenia zadany = 10° , Kąt przechylenia zadany = 0°



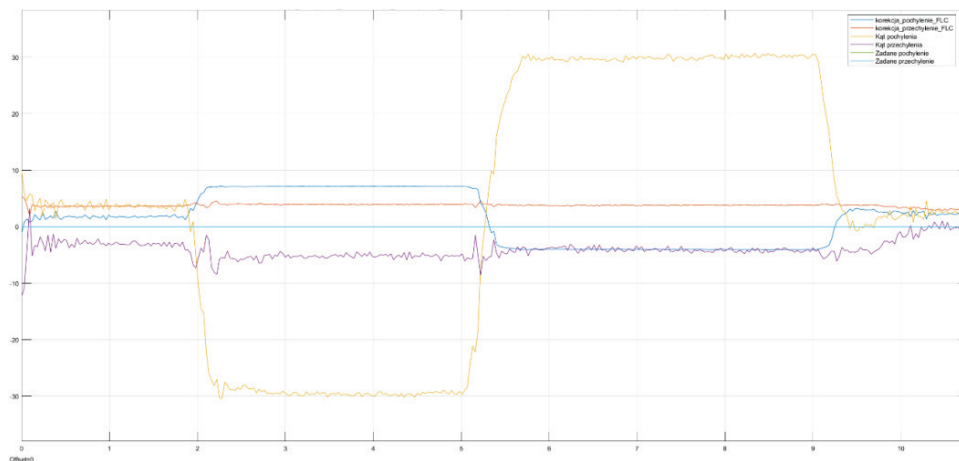
Rys. 9. Odpowiedź regulatora rozmytego na zadane parametry. Próba 2



Rys. 10. Sygnały sterujące silników. Próba 2

Kąt pochylenia zadany = 0° , Kąt przechylenia zadany = 0°

Wykres poniżej przedstawia odpowiedź regulatorów na ręczne, po 2 s symulacji, wymuszenie kąta pochylenia na około -30 oraz następnie, w 5 s symulacji na 30° . Wymuszenie wykonane zostało przez podnienie ramienia.



Rys. 11. Odpowiedź regulatorów rozmytych na wymuszenie pochylenie i przechylenie

Powyżej wykresy przedstawiają zachowanie zaprojektowanego systemu stabilizacji na praktycznej platformie. Wygenerowane charakterystyki obrazują prawidłowe działanie systemu stabilizacji. Zmiana kąta pochylenia lub przechylenia powoduje zmniejszenie lub zwiększenie „procentu przepustnicy” co przekłada się na zmianę prędkości obrotowej odpowiednich silników.

Na charakterystykach zauważalne są duże wahania odczytów z czujnika IMU oraz wahania systemów stabilizacji.

Wahania spowodowane są prawdopodobnie:

- niedokładnym wyważeniem platformy,
- oporem generowanym przez kulisty przegub stanowiska testowego,
- pojawiającym się tzw. „współczynnikiem wpływu powietrza”, ponieważ przepływające strugi powietrza „odbijają się od stołu na którym umieszczona” jest platforma i wprowadzają błędy do odczytów czujnika IMU
- niedokładnym doborem parametrów filtra sygnałów IMU.

6. Wnioski

W niniejszym artykule zaprezentowano koncepcję układu stabilizacji bezałogowego statku powietrznego opartego o regulator logiki rozmytej. Zakres badań obejmował

modyfikację konstrukcji modelu BSP, budowę stanowiska testowego, projekt modelu stanowiska z quadcopterem w oprogramowniu CAD, programowanie sterownika logiki rozmytej oraz stworzenie układu stabilizacji w oprogramowaniu Simulink.

Zaprezentowane wykresy odbiegają dokładnością od zaawansowanych układów stabilizacji, ale świadczą o dużym potencjale możliwości regulatorów rozmytych.

Zaprojektowane stanowisko, składające się z fizycznego obiektu będącego bezałogowym statkiem powietrznym, quadcopterem może służyć jako podstawowa platforma do prowadzenia badań związanych z:

- nauczaniem podstaw budowy i sterowania wielowirnikowca,
- badaniem dynamiki wielowirnikowca,
- badaniem systemów stabilizacji,
- badaniem przypadków podczas których następuje usterka, np. utrata śmigła,
- badaniem użytkowania quadcoptera w specyficznych warunkach atmosferycznych.

Wyposażenie stanowiska w popularny mikrokontroler Arduino Mega 2560 Rev 3 pozwala na łatwą implementację nowych algorytmów sterowania. Mikrokontroler posiada wiele wolnych pinów wejście/wyjście dzięki czemu istnieje możliwość podłączania dodatkowych czujników lub układów wykonawczych.

7. Literatura

1. Babuška R.: Fuzzy modeling – a control engineering perspective. Proc. Inter. Conf. FUZZ-IEEE/IFES'95. Yokohama. 1995. Japan. pp. 1897-1902.
2. Bęben K., Grzesik N.: Fuzzy based roll and pitch stabilizer control system for Quadcopter. International Conference On Scientific Aspects Concerning Operation Of Manned And Unmanned Aerial Vehicles. Proceedings. 20-22.05.2015, Dęblin 2015.
3. Bouabdallah S.: Design and control of quadrotors with application to autonomous flying, Dissertation. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2007.
4. Grzesik N.: Podstawy sterowania rozmytego. Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych, Dęblin 2012.
5. Polkowski P.: Bezałogowe Statki Powietrzne, Unmanned Aerial Vehicles. Rocznik Bezpieczeństwa Międzynarodowego, vol. 10, nr 1, Wrocław 2016.

