

PROJEKT
ROBOTY MOBILNE 1

Symulacja bezzałogowego statku powietrznego w
środowisku Simulink –
sprawozdanie z finalnego projektu

Eryk Możdżeń, 259375

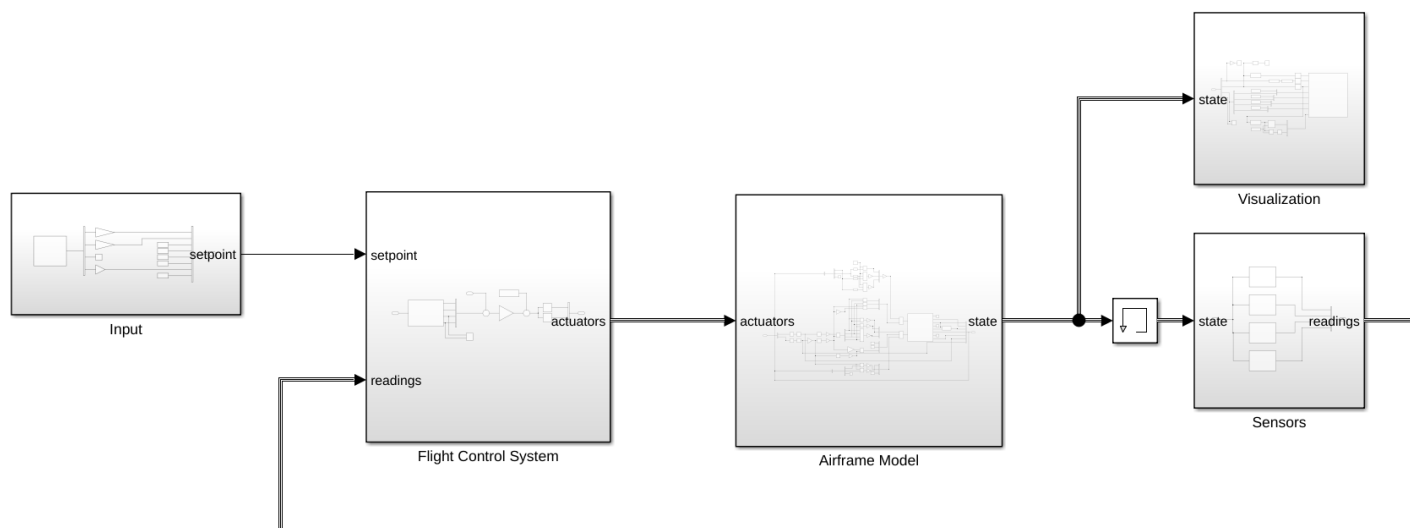
Prowadzący:
dr inż. Michał Błędowski

Katedra Teorii Pola, Układów
Elektronicznych i Optoelektroniki
Wydziału Elektroniki, Fotoniki i
Mikrosystemów
Politechniki Wrocławskiej

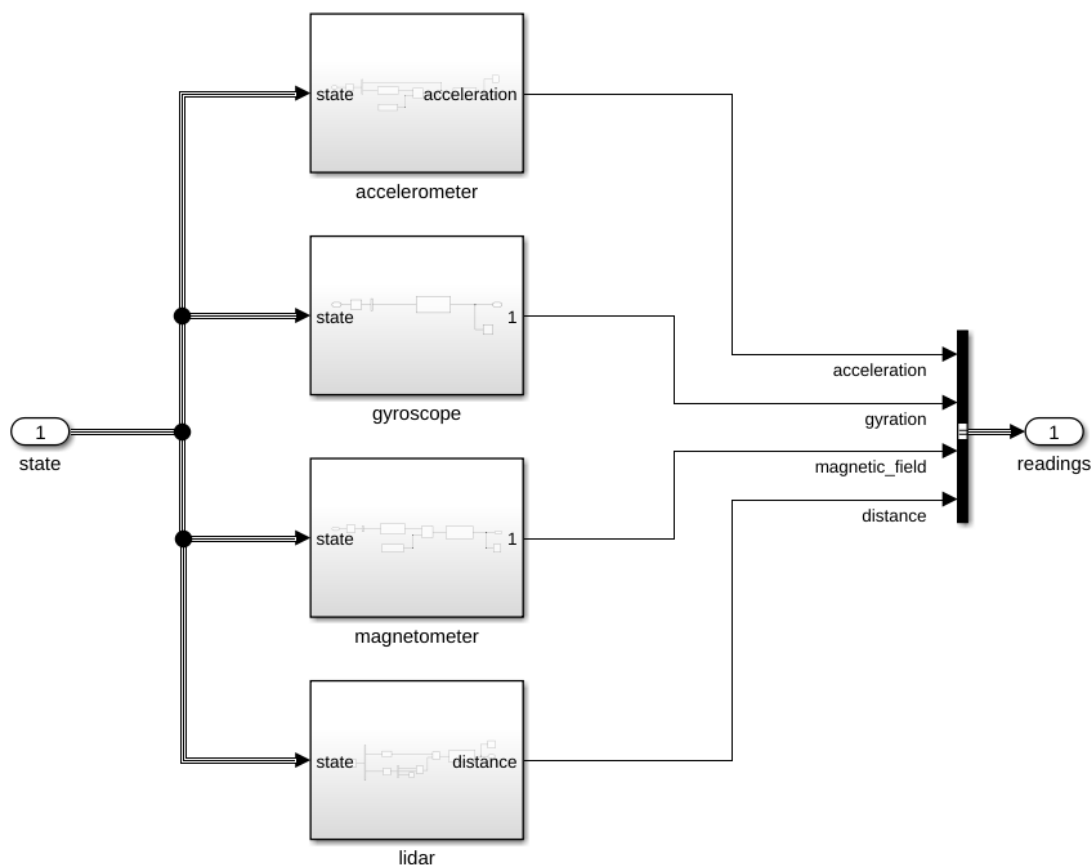
15 czerwca 2023

1 Symulacja czujników

Blok czujników przekształca stan obiektu na dane możliwe do uzyskania z czujników. Odczyty są zgrupowane w szynę ułatwiającą manipulację danymi na schemacie tak jak pokazano na rys. 1. Odczyty z czujników są dostarczane do bloku kontrolera lotu wyposażonemu w estymator stanu. Rys. 2 przedstawia blok czujników. Zawiera on zbiór mniejszych podsystemów odpowiedzialnych niezależnie za każdy z czujników.



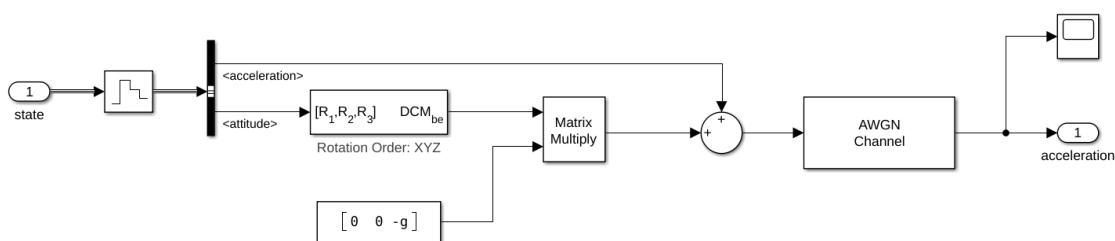
Rysunek 1: Zaktualizowany szkielet symulacji, widoczny dodany blok czujników



Rysunek 2: Zawartość bloku symulującego czujniki, od góry: akcelerometr, żyroskop, magnetometr, laserowy czujnik odległości 1D

1.1 Akcelerometr

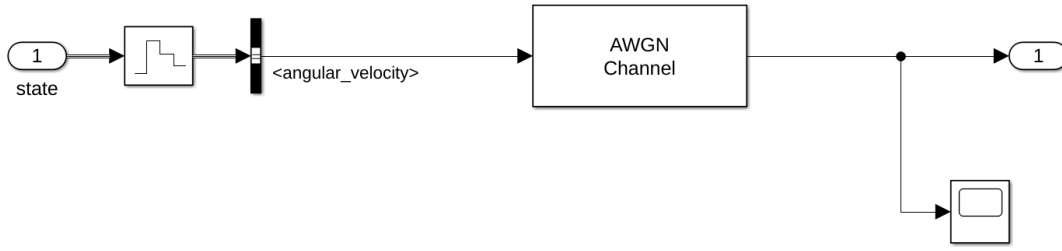
Symulacja odczytów akcelerometru zawiera w sobie sumę przyspieszenia grawitacyjnego skierowanego pionowo w dół względem układu świata oraz przyspieszeń liniowych z którymi porusza się układ. Blok „AWGN Channel” z „Communication Toolbox” dodaje do sygnału szum o rozkładzie Gaussa o konkretnej zdefiniowanej wariancji. Blok „Zero-Order Hold” przekształca sygnał ciągły na schodkowy symulując częstotliwość pomiaru. Rys. 3 przedstawia opisywany blok.



Rysunek 3: Blok symulujący akcelerometr

1.2 Żyroskop cyfrowy

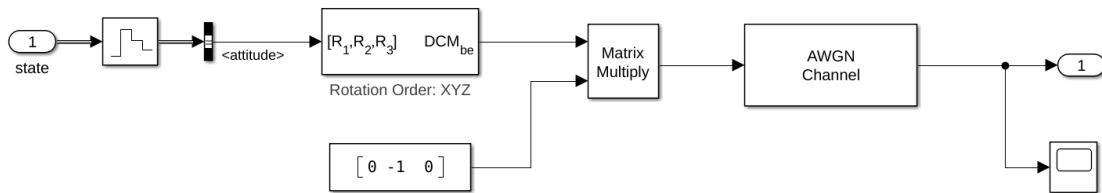
Blok symulacji obiektu opisuje prędkości kątowe w układzie odniesienia ciała czyli tak, jak symulowany żyroskop. Dodane zostały bloki „Zero-Order Hold” oraz „AWGN Channel” w celu symulacji fizycznych aspektów i ograniczeń czujnika tak jak pokazano na rys. 4.



Rysunek 4: Blok symulujący cyfrowy żyroskop

1.3 Magnetometr

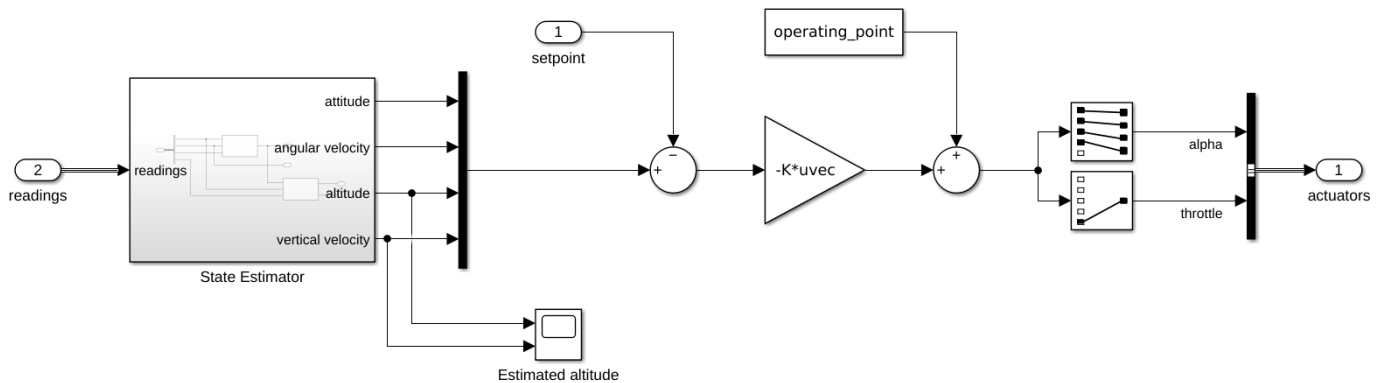
Blok symulacji magnetometru (rys. 5) wykonany jest analogicznie jak blok akcelerometru. Także obraca wektor pola magnetycznego. W tym wypadku skierowany jest on prosto w kierunku północnym (brak zjawiska deklinacji magnetycznej). Także dodane zostały bloki ograniczające częstotliwość pomiaru oraz dodanie do pomiaru sygnału o zdefiniowanej wariancji.



Rysunek 5: Blok symulujący magnetometr

2 Estymator stanu

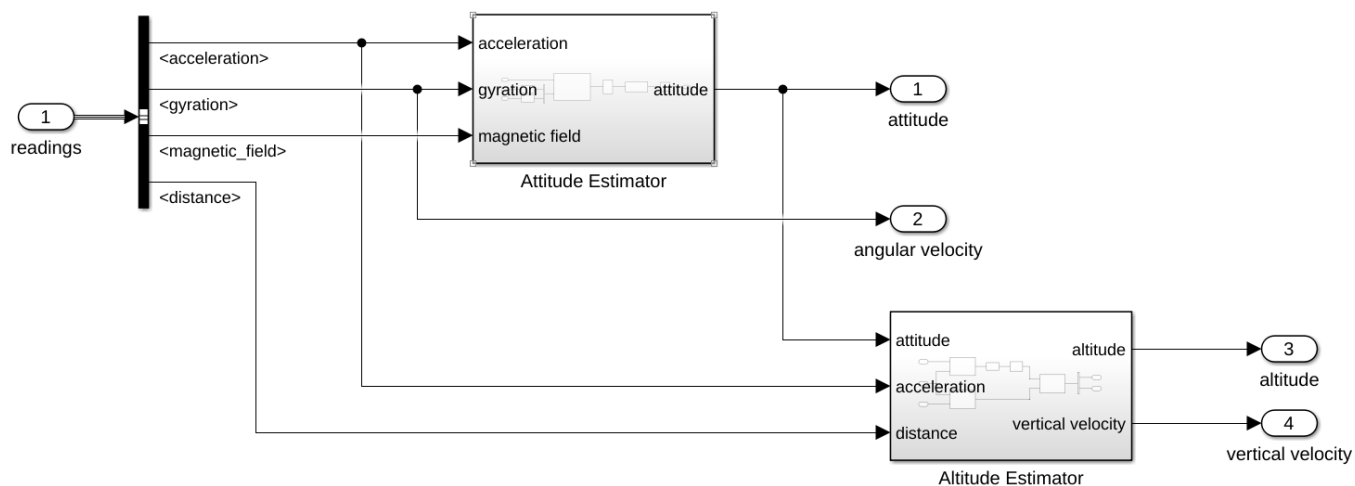
Blok kontrolera lotu został wyposażony w podzespół estymatora stanu. Jego zadaniem jest określenie możliwie jak najlepszej estymaty ukrytego stanu drona. Uchyb od wartości zadanej kontrolerem USB jest podawany na regulator LQR. Opisane działanie przedstawione jest na rys. 6.



Rysunek 6: Schemat sterownika lotu

Na estymator stanu składają się dwa mniejsze estymatory połączone kaskadowo. Pierwszy z nich odpowiada za estymację orientacji w przestrzeni obiektu. Prędkości kątowe pochodzą bezpośrednio ze wskazań

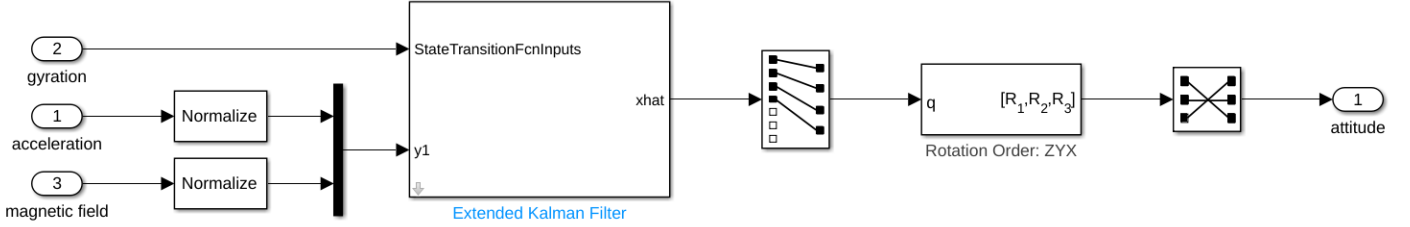
żyroskopu (brak innych źródeł danych). Estymowana orientacja jest istotnym wejściem drugiego estymatora – wysokości. Określa on wysokość na której znajduje się dron oraz składową pionową wektora jego prędkości.



Rysunek 7: Schemat estymatora stanu, widoczne dwa główne podsystemy: estymator orientacji oraz estymator wysokości

2.1 Estymator orientacji

Estymacja orientacji jest oparta o rozszerzony filtr Kalmana. Dokonuje on etapu predykcji na podstawie pomiarów prędkości kątowych z żyroskopu, natomiast etapu korekcji z użyciem danych pochodzących z akcelerometru oraz magnetometru tak jak pokazano na rys. 8. Wzory opisujące układ zostały pokazane w równ. 1 oraz 2. Model został oparty o [1].



Rysunek 8: Schemat estymatora orientacji

$$x_k = f(x_{k-1}, u_k)$$

$$y_k = h(x_k)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{q}_{wk} \\ \hat{q}_{ik} \\ \hat{q}_{jk} \\ \hat{q}_{kk} \\ \hat{b}_{xk} \\ \hat{b}_{yk} \\ \hat{b}_{zk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \frac{\Delta t}{2} q_{ik-1} & \frac{\Delta t}{2} q_{jk-1} & \frac{\Delta t}{2} q_{kk-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -\frac{\Delta t}{2} q_{wk-1} & \frac{\Delta t}{2} q_{kk-1} & -\frac{\Delta t}{2} q_{jk-1} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -\frac{\Delta t}{2} q_{kk-1} & -\frac{\Delta t}{2} q_{wk-1} & \frac{\Delta t}{2} q_{ik-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \frac{\Delta t}{2} q_{jk-1} & -\frac{\Delta t}{2} q_{ik-1} & -\frac{\Delta t}{2} q_{wk-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{q}_{wk-1} \\ \hat{q}_{ik-1} \\ \hat{q}_{jk-1} \\ \hat{q}_{kk-1} \\ \hat{b}_{xk-1} \\ \hat{b}_{yk-1} \\ \hat{b}_{zk-1} \end{bmatrix} + \frac{\Delta t}{2} \begin{bmatrix} -\hat{q}_{ik-1} & -\hat{q}_{jk-1} & -\hat{q}_{kk-1} \\ \hat{q}_{wk-1} & -\hat{q}_{kk-1} & \hat{q}_{jk-1} \\ \hat{q}_{kk-1} & \hat{q}_{wk-1} & -\hat{q}_{ik-1} \\ -\hat{q}_{jk-1} & \hat{q}_{ik-1} & \hat{q}_{wk-1} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{xk} \\ \omega_{yk} \\ \omega_{zk} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} a_{xk} \\ a_{yk} \\ a_{zk} \\ m_{xk} \\ m_{yk} \\ m_{zk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\hat{q}_{jk-1} & -2\hat{q}_{ik-1} & 2\hat{q}_{wk-1} & -2\hat{q}_{kk-1} & 0 & 0 & 0 \\ -2\hat{q}_{ik-1} & -2\hat{q}_{wk-1} & -2\hat{q}_{kk-1} & -2\hat{q}_{jk-1} & 0 & 0 & 0 \\ -2\hat{q}_{wk-1} & 2\hat{q}_{ik-1} & 2\hat{q}_{jk-1} & -2\hat{q}_{kk-1} & 0 & 0 & 0 \\ -2\hat{q}_{kk-1} & -2\hat{q}_{jk-1} & -2\hat{q}_{ik-1} & -2\hat{q}_{wk-1} & 0 & 0 & 0 \\ -2\hat{q}_{wk-1} & 2\hat{q}_{ik-1} & -2\hat{q}_{jk-1} & 2\hat{q}_{kk-1} & 0 & 0 & 0 \\ 2\hat{q}_{ik-1} & 2\hat{q}_{wk-1} & -2\hat{q}_{kk-1} & -2\hat{q}_{jk-1} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{q}_{wk} \\ \hat{q}_{ik} \\ \hat{q}_{jk} \\ \hat{q}_{kk} \\ \hat{b}_{xk} \\ \hat{b}_{yk} \\ \hat{b}_{zk} \end{bmatrix} \quad (2)$$

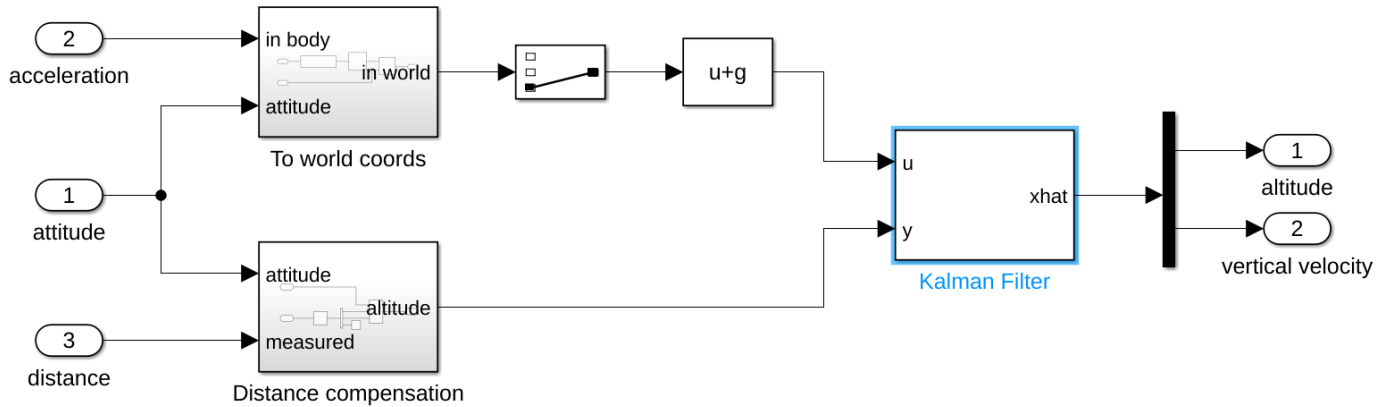
2.2 Estymator wysokości

Do estymacji wysokości lotu został zastosowany filtr Kalmana sumujący odczyty akcelerometru, estymacji orientacji oraz laserowego czujnika odległości. Wektor mierzonego przyspieszenia liniowego zostaje obrócony tak, aby współrzędne wektora były zdefiniowane we współrzędnych świata. Od osi z odejmowana jest wartość przyspieszenia grawitacyjnego $g = 9.81 \frac{m}{s}$. Dzięki temu uzyskiwane jest przyspieszenie liniowe w pionie a_z . Równania zostały wyrażone tak jak w równ. 3 i 4. Efektem ubocznym jest estymata prędkości w pionie wymagana do realizacji sterowania. Implementacja pokazana została na rys. 9.

$$\begin{aligned} x_k &= Ax_{k-1} + Bu_k \\ y_k &= Cx_k \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{z}_k \\ \hat{v}_{zk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{z}_{k-1} \\ \hat{v}_{zk-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\Delta t^2 \\ \Delta t \end{bmatrix} \cdot [a_{zk}] \quad (3)$$

$$[z_k] = [1 \ 0] \cdot \begin{bmatrix} \hat{z}_k \\ \hat{v}_{zk} \end{bmatrix} \quad (4)$$



Rysunek 9: Schemat estymatora wysokości

W celu kompensacji wpływu orientacji na pomiar odległości od ziemi, pomiar jest mnożony przez cosinus kąt wychylenia od pionu zgodnie ze zworem poniżej.

$$h_{altitude} = d_{measured} \cdot \cos \phi \cos \theta$$

3 Podsumowanie i wnioski

Symulacja jednowirnikowego bezzałogowego pojazdu latającego stanowi punkt wyjścia w procesie tworzeniu tak niełatwego do sterowania obiektu. Podczas testów sprzecznie z początkowymi przewidywaniami najcięższym zadaniem okazała się być estymacja stanu drona (a nie sterowanie nim). Symulacja podkreśliła niestacjonarność badanego obiektu pod względem parametrów fizycznych, których dobór ma szczególnie wysokie znaczenie pod względem stabilności. Zaskoczeniem okazały się być także niektóre własności dynamiki drona tj. poruszanie się po niewielkiej paraboli podczas przechyłu.

Uważam, że wykonana symulacja posiada aspekty praktyczne oraz pozytywnie wpłynie na dalszy rozwój projektu. Zakładam, że bardzo ułatwi proces projektowania konstrukcji mechanicznej opisywanego urządzenia. Pozwoli także na początkowy dobór nastaw regulatora metodą offline co zmniejszy potrzebną ilość testów oraz potencjalnych uszkodzeń konstrukcji.

Bibliografia

- [1] *Extended Kalman Filter Implementation*. 2018. URL: <https://thepoorengineer.com/en/ekf-impl/>.