Projekt

Roboty Mobilne 1

Symulacja bezzałogowego statku powietrznego w środowisku Simulink – sprawozdanie z przeprowadzonych prac

Eryk Możdżeń, 259375

Prowadzący:
dr inż. Michał Błędowski

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

8 maja 2023

1 Modelowanie

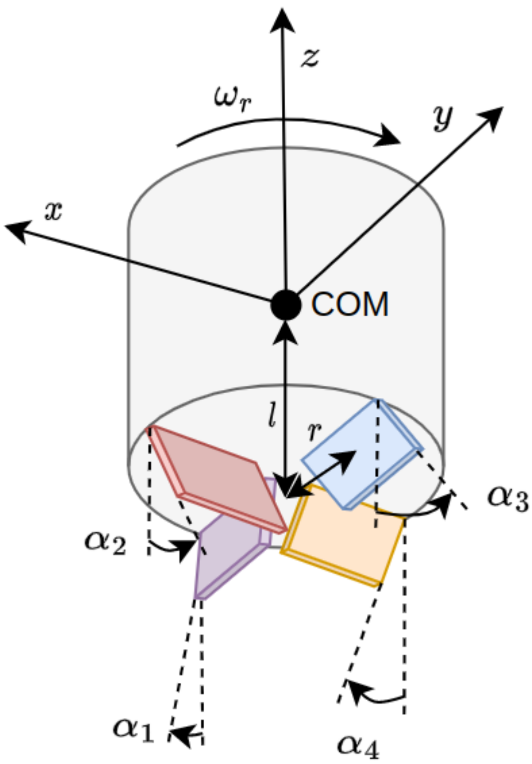
1.1 Siły zewnętrzne

Siłą unoszącą obiekt nad ziemią jest siła ciągu generowana przez wirnik. Tak jak w opisie [2] (wzór 3.9) siła ciągu jest proporcjonalna do kwadratu prędkości obrotowej wirnika ω_r. Stałą proporcjonalności jest K_t [Ns^2], która mieści w sobie takie czynniki jak napięcie zasilania, właściwości silnika, właściwości śmigła.

$$F_t = K_t \omega_r^2$$

Sterowanie wektorem ciągu realizowane jest poprzez sterownie wychyleniem czterech łopatek usytuowanych tak, aby przekierowywały fragment strumienia powietrza generowanego przez wirnik w bok. Skutkiem tego jest wytworzenie się sił działających prostopadle oraz równolegle do kierunku działania siły ciągu. Siły działające w bok F_1, F_2, F_3, i F_4 dla małych kątów można wyrazić jako proporcjonalne do sinusa kąta wychylenia łopatek. Siłę oporu areodynamicznego łopatki F_d można przybliżyć do stałej niezależnej od wychylenia łopatki.

$$\begin{aligned} F_n &= C_l F_t \sin \alpha_n \\ F_d &= C_d F_t \end{aligned}$$



Rysunek 1: Poglądowy schemat budowy obiektu i zaznaczenie dodatnich kierunków łopatek i wirnika

1.2 Ruch oborotwy

Opis dynamiki obiektu został podzielony na rotacje i translacje poprzez analizę momentów i sił działających na system. Do opisu rotacji wymagana jest macierzy bezwładności obiektu J, która może zostać obliczona na podstawie modelu 3D w programie CAD. Przyjęto założenie, że znaczące będą tylko elementy na głównej przekątnej J_{xx}, J_{yy} oraz J_{zz}. W celu opisania efektu żyroskopowego, należy znaleźć także moment bezwładności rotora w osi z J_r będący częścią J.

$$J \approx \begin{bmatrix} J_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & J_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & J_{zz} \end{bmatrix} \qquad J_{wirnik} \approx \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_r \end{bmatrix}$$

W roli opisu rotacji η zostały użyte kąty RPY w postaci wektora $[\phi, \theta, \psi]^T$. Prędkości kątowe ω zostały wyrażone w układzie ciała. Do wyznaczenia pochodnej po czasie kątów RPY została użyta macierz W_η.

$$\omega = W_\eta \cdot \dot{\eta} \qquad \dot{\eta} = W_\eta^{-1} \cdot \omega$$

$$W_\eta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s_\theta \\ 0 & c_\theta & c_\theta s_\phi \\ 0 & -c_\theta & c_\theta c_\phi \end{bmatrix} \qquad W_\eta^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & t_\theta s_\phi & t_\theta c_\phi \\ 0 & c_\phi & -s_\phi \\ 0 & \frac{s_\phi}{c_\theta} & \frac{c_\phi}{c_\theta} \end{bmatrix}$$

Przyśpieszenia kątowe w układzie ciała $\dot{\omega}$ definiowane są przez momenty obrotowe działające na układ. Równania oparto na równaniu Newtona-Eulera. Składnikiem o największym znaczeniu jest suma momentów pochodzących z sił generowanych przez lotki (siła $\times$ ramię). Stałe l oraz r to odległości środków łopatek odpowiednio w pionie oraz poziomie. Do osi x i y zostały dodane składniki reprezentujące efekt żyroskopowy, tak jak w pracy [1] (równanie 6). Proporcjonalnie do bezwładności rotora rośnie powiązanie między prędkościami i przyśpieszeniami w osiach x i y na krzyż. Do osi z zostały dodane dwa składniki: jeden odpowiada za moment obrotowy, który wirnik wywiera na resztę drona podczas pracy (zmusza go do kręcenia się wokół własnej osi). Drugi natomiast to reakcja układu na nagłe zwiększenie prędkości obrotowej wirnika (nagłe skręcenie przy podaniu skoku na przepustnicę). Z wyżej wymienionych własności został utworzony model rotacji bezzałogowego statku powietrznego 1.

$$
\begin{cases}
\dot{\phi} = \omega_x + \omega_y s_\phi t_\theta + \omega_z c_\phi t_\theta \\
\dot{\theta} = \omega_y c_\phi - \omega_z s_\phi \\
\dot{\psi} = \omega_y \dfrac{s_\phi}{c_\theta} + \omega_z \dfrac{c_\phi}{c_\theta} \\
\dot{\omega}_x = \dfrac{1}{J_{xx}}(J_{yy} - J_{zz}) w_y w_z + \dfrac{1}{J_{xx}} l(F_2 - F_4) \qquad + \dfrac{J_r}{J_{xx}} \omega_r \omega_y \\
\dot{\omega}_y = \dfrac{1}{J_{yy}}(J_{zz} - J_{xx}) w_x w_z + \dfrac{1}{J_{yy}} l(F_1 - F_3) \qquad - \dfrac{J_r}{J_{yy}} \omega_r \omega_x \\
\dot{\omega}_z = \dfrac{1}{J_{zz}}(J_{xx} - J_{yy}) w_x w_y - \dfrac{1}{J_{zz}} r(F_1 + F_2 + F_3 + F_4) \qquad + \dfrac{C_\tau}{J_{zz}} F_t + \dfrac{J_r}{J_{zz}} \dot{\omega}_r
\end{cases}
\tag{1}
$$

1.3 Ruch postępowy

Do przejścia pomiędzy układami ciała i przestrzeni używana jest macierz rotacji R_b^w. Istnieją trzy źródła przyśpieszeń ciała – grawitacja skierowana w dół (odpowiednio obrócony wektor o długości g), siły generowane przez łopatki oraz siła ciągu pomniejszona o opór areodynamiczny lotek. Równanie 2 przedstawia model opisujący poruszanie się środka masy bezzałogowca.

$$\dot{p} = R_b^w v$$

$$R_b^w = rot(z, \psi) \cdot rot(y, \theta) \cdot rot(x, \phi)$$

$$
\begin{cases}
\dot{x} = \quad v_x c_\theta c_\psi \quad + v_y (s_\phi s_\theta c_\psi - c_\phi s_\psi) \quad + v_z (c_\phi s_\theta c_\psi + s_\phi s_\psi) \\
\dot{y} = \quad v_x c_\theta s_\psi \quad + v_y (s_\phi s_\theta s_\psi + c_\phi c_\psi) \quad + v_z (c_\phi s_\theta s_\psi - s_\phi c_\psi) \\
\dot{z} = -v_x s_\theta \quad + v_y s_\phi c_\theta \quad + v_z c_\phi c_\theta \\
\dot{v}_x = \dfrac{1}{m}(-F_1 + F_3) \quad + g s_\theta \\
\dot{v}_y = \dfrac{1}{m}(-F_2 + F_4) \quad - g c_\theta s_\phi \\
\dot{v}_z = \dfrac{1}{m}(F_t - F_d) \quad - g c_\theta c_\phi
\end{cases}
\tag{2}
$$

1.4 Punkty równowagi

W celu znalezienia stabilnych punktów równowagi przedstawionego obiektu należy przyrównać wszystkie pochodne elementów wektora stanu do zera tak jak przedstawiono poniżej.

$$\begin{cases} \dot{\phi} =0 = \omega_x + \omega_y s_\phi t_\theta + \omega_z c_\phi t_\theta \\ \dot{\theta} =0 = \omega_y c_\phi - \omega_z s_\phi \\ \dot{\psi} =0 = \omega_y \frac{s_\phi}{c_\theta} + \omega_z \frac{c_\phi}{c_\theta} \rightarrow \theta \neq \frac{\pi}{2} \wedge \theta \neq \frac{3\pi}{2} \end{cases}$$

Podstawiając pod drugą linię:

$$\omega_y s_\phi = \omega_z c_\phi$$

$$\begin{cases} \omega_y = 0 \\ \omega_z = 0 \end{cases} \qquad \vee \qquad \phi = \frac{\pi}{4}$$

Podstawiając pod trzecią linię:

$$\omega_y \frac{s_\phi}{c_\theta} = -\omega_z \frac{c_\phi}{c_\theta}$$

$$\omega_y s_\phi = -\omega_z c_\phi$$

$$\begin{cases} \omega_y = 0 \\ \omega_z = 0 \end{cases} \qquad \vee \qquad \phi = \frac{3\pi}{4}$$

Warunki na ϕ się wykluczają więc wniosek:

$$\begin{cases} \omega_y = 0 \\ \omega_z = 0 \end{cases}$$

Podstawiając pod pierwszą linię:

$$0 = \omega_x + 0 \cdot s_\phi t_\theta + 0 \cdot c_{t\theta}$$

$$0 = \omega_x$$

Podstawiając ω_x, ω_y, ω_z pod równania przyśpieszeń kątowych:

$$\begin{cases} 0 = \frac{1}{J_{xx}}(J_{yy} - J_{zz}) \cdot 0 \cdot 0 + \frac{1}{J_{xx}} l(F_2 - F_4) + \frac{J_r}{J_{xx}} \omega_r \cdot 0 \\ 0 = \frac{1}{J_{yy}}(J_{zz} - J_{xx}) \cdot 0 \cdot 0 + \frac{1}{J_{yy}} l(F_1 - F_3) - \frac{J_r}{J_{yy}} \omega_r \cdot 0 \\ 0 = \frac{1}{J_{zz}}(J_{xx} - J_{yy}) \cdot 0 \cdot 0 - \frac{1}{J_{zz}} r(F_1 + F_2 + F_3 + F_4) + \frac{C_\tau}{J_{zz}} F_t + \frac{J_r}{J_{zz}} \dot{\omega}_r \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0 = \frac{1}{J_{xx}} l(F_2 - F_4) \to F_2 = F_4 \\ 0 = \frac{1}{J_{yy}} l(F_1 - F_3) \to F_1 = F_3 \\ 0 = \frac{1}{J_{zz}} r(F_1 + F_2 + F_3 + F_4) + \frac{C_\tau}{J_{zz}} F_t + \frac{J_r}{J_{zz}} \dot{\omega}_r \end{cases}$$

Podstawiając siły F_1, F_2, F_3, F_4 pod równania przyśpieszeń liniowych:

$$\begin{cases} \dot{v}_x = 0 = \frac{1}{m} \cdot 0 & + g s_\theta \to \theta = 0 \lor \theta = \pi \\ \dot{v}_y = 0 = \frac{1}{m} \cdot 0 & - g c_\theta s_\phi \\ \dot{v}_z = 0 = \frac{1}{m}(F_t - F_d) & - g c_\theta c_\phi \end{cases}$$

Rozpatrując drugie równanie:

$$0 = -g c_\theta s_\phi$$
$$0 = c_\theta s_\phi$$
$$c_\theta = 0 \quad \lor \quad s_\phi = 0$$
$$\underbrace{\left(\theta = \frac{\pi}{2} \lor \theta = \frac{3\pi}{2}\right)}_{\text{nie spełnia warunku z początku}} \quad \lor \quad (\phi = 0 \lor \phi = \pi)$$

W ten sposób uzyskujemy następujące możliwości:

$$\begin{cases} \phi = 0 \\ \theta = 0 \end{cases} \lor \begin{cases} \phi = \pi \\ \theta = 0 \end{cases} \lor \begin{cases} \phi = 0 \\ \theta = \pi \end{cases} \lor \begin{cases} \phi = \pi \\ \theta = \pi \end{cases}$$

Rozpatrując trzecie równanie:

$$0 = \frac{1}{m}(F_t - F_d) - g c_\theta c_\phi$$
$$F_t - F_d = m g c_\theta c_\phi$$
$$0 < m g c_\theta c_\phi$$
$$0 < c_\theta c_\phi$$

Co odrzuca środkowe możliwości, zostają:

$$\begin{cases} \phi = 0 \\ \theta = 0 \end{cases} \lor \begin{cases} \phi = \pi \\ \theta = \pi \end{cases}$$

Podstawiając $s_\phi = 0$, $s_\theta = 0$, $c_\theta c_\phi = 1$ pod równania prędkości liniowych:

$$\begin{cases} \dot{x} = 0 = & v_x c_\theta c_\psi & +v_y(0 \cdot 0 \cdot c_\psi - c_\phi s_\psi) & +v_z(c_\phi \cdot 0 \cdot c_\psi + 0 \cdot s_\psi) \\ \dot{y} = 0 = & v_x c_\theta s_\psi & +v_y(0 \cdot 0 \cdot s_\psi + c_\phi c_\psi) & +v_z(c_\phi \cdot 0 \cdot s_\psi - 0 \cdot c_\psi) \\ \dot{z} = 0 = & -v_x \cdot 0 & +v_y \cdot 0 \cdot c_\theta & +v_z \cdot 1 \end{cases}$$

Wynika z tego, że $v_z = 0$. Podstawiając oba przypadki (w praktyce takie same):

$$\begin{cases} 0 = v_x c_\psi - v_y s_\psi \\ 0 = v_x s_\psi + v_y c_\psi \end{cases} \vee \begin{cases} 0 = -v_x c_\psi + v_y s_\psi \\ 0 = -v_x s_\psi - v_y c_\psi \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0 = v_x c_\psi - v_y s_\psi \\ 0 = v_x s_\psi + v_y c_\psi \end{cases}$$

Wszystkie rozwiązania równania $v_x c_\psi = v_y s_\psi$:

$$\begin{cases} v_x = 0 \\ v_y = 0 \end{cases} \vee \begin{cases} v_x = 0 \\ \psi = 0 \end{cases} \vee \begin{cases} v_x = 0 \\ \psi = \pi \end{cases} \vee \begin{cases} v_y = 0 \\ \psi = \frac{\pi}{2} \end{cases} \vee \begin{cases} v_y = 0 \\ \psi = \frac{3\pi}{2} \end{cases}$$

Wszystkie rozwiązania równania $v_x s_\psi = -v_y c_\psi$:

$$\begin{cases} v_x = 0 \\ v_y = 0 \end{cases} \vee \begin{cases} v_x = 0 \\ \psi = \frac{\pi}{2} \end{cases} \vee \begin{cases} v_x = 0 \\ \psi = \frac{3\pi}{2} \end{cases} \vee \begin{cases} v_y = 0 \\ \psi = 0 \end{cases} \vee \begin{cases} v_y = 0 \\ \psi = \pi \end{cases}$$

Jedyną częścią wspólną jest warunek: $v_x = 0 \wedge v_y = 0$. Podsumowując znaleziono dwa punkty stabilności, które po prostej analizie można uznać za ten sam. Obrót w osi Y i X o 180° jest równoznaczny z obrotem w osi Z o 180°, a jeżeli położenie kątowe w z jest dowolne oznacza to, że oba opisy przedstawiają jeden przypadek.

$$\begin{cases} \phi = 0 \\ \theta = 0 \\ \psi \in \mathbb{R} \\ \omega_x = 0 \\ \omega_y = 0 \\ \omega_z = 0 \\ x \in \mathbb{R} \\ y \in \mathbb{R} \\ z \in \mathbb{R} \\ v_x = 0 \\ v_y = 0 \\ v_z = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} \phi = \pi \\ \theta = \pi \\ \psi \in \mathbb{R} \\ \omega_x = 0 \\ \omega_y = 0 \\ \omega_z = 0 \\ x \in \mathbb{R} \\ y \in \mathbb{R} \\ z \in \mathbb{R} \\ v_x = 0 \\ v_y = 0 \\ v_z = 0 \end{cases} \tag{3}$$

Aby taki punkt stabilności mógł się utrzymać, wejścia układu muszą spełniać warunki:

$$\begin{aligned} \frac{1}{m}(F_t - F_d) &= g c_\theta c_\phi \\ F_t - C_d F_t &= mg \cdot 1 \cdot 1 \\ K_t \omega_{r0}^2 &= \frac{mg}{1 - C_d} \\ \omega_{r0} &= \sqrt{\frac{mg}{K_t(1 - C_d)}} \end{aligned} \qquad \begin{aligned} F_1 = F_3 &\to s_{\alpha_{10}} = s_{\alpha_{30}} \\ F_2 = F_4 &\to s_{\alpha_{20}} = s_{\alpha_{40}} \\ r(F_1 + F_2 + F_3 + F_4) &= C_\tau F_t \\ (s_{\alpha_{10}} + s_{\alpha_{20}} + s_{\alpha_{30}} + s_{\alpha_{40}}) C_l F_t &= \frac{C_\tau}{r} F_t \\ \alpha_{n0} &= \arcsin \frac{C_\tau}{4 r C_l} \end{aligned} \tag{4}$$

1.5 Model liniowy

W celu znalezienia liniowego regulatora dla opisanego układu należy zlinearyzować równania dynamiki 1 2 tak, aby dobrze opisywały układ w punkcie pracy i jego okolicach. Punktem pracy będzie znaleziony wcześniej punkt stabilności 3. Należy sprowadzć opsi systemu z postaci:

$$\dot{x} = f(x, u)$$

Do postaci:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

Rozpatrywanym wektorem stanu x będzie pełny opis rotacji oraz położenie i prędkość w osi Z. Wektorem sterowań jest zbiór wychyleń łopatek oraz prędkości obrotowej rotora.

$$x = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \\ z \\ v_z \end{bmatrix} \qquad u = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \omega_r \end{bmatrix}$$

Na podstawie równań 3 oraz 4 wiemy, że punkt pracy będą stanowić:

$$x_0 = 0_{8\times 1} \qquad u_0 = \begin{bmatrix} \arcsin \frac{C_\tau}{4rC_l} \\ \arcsin \frac{C_\tau}{4rC_l} \\ \arcsin \frac{C_\tau}{4rC_l} \\ \arcsin \frac{C_\tau}{4rC_l} \\ \sqrt{\frac{mg}{K_t(1-C_d)}} \end{bmatrix}$$

W celu zlinearyzowania układu należy obliczyć pochodne cząstkowe po x oraz u w punkcie x_0, u_0:

$$A = \left.\frac{\partial f(x,u)}{\partial x}\right|_{x_0,u_0} \qquad B = \left.\frac{\partial f(x,u)}{\partial u}\right|_{x_0,u_0}$$

Układ po linaryzacji:

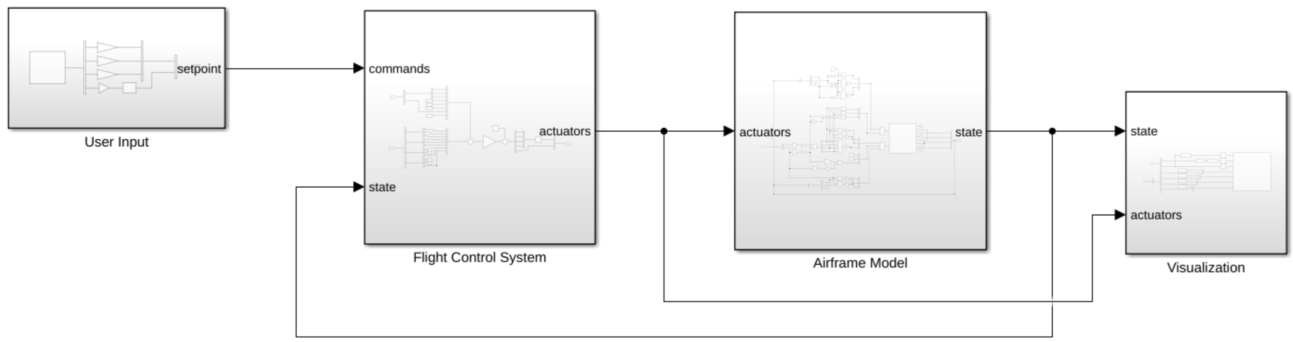
$$\begin{cases} \dot{\phi} = \omega_x \\ \dot{\theta} = \omega_y \\ \dot{\psi} = \omega_z \\ \dot{\omega}_x = \dfrac{2K_t\omega_{t0}^2 C_l l}{J_{xx}}(\alpha_2 - \alpha_4) + \dfrac{J_r\omega_{r0}}{J_{xx}}\omega_y \\ \dot{\omega}_y = \dfrac{2K_t\omega_{t0}^2 C_l l}{J_{yy}}(\alpha_1 - \alpha_3) - \dfrac{J_r\omega_{r0}}{J_{yy}}\omega_x \\ \dot{\omega}_z = -\dfrac{2K_t\omega_{t0}^2 C_l r}{J_{zz}}(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) + \dfrac{2K_t\omega_{t0} C_\tau}{J_{zz}}\omega_t \\ \dot{z} = v_z \\ \dot{v}_z = \dfrac{2K_t\omega_{t0}(1 - C_d)}{m}\omega_t \end{cases}$$

Poszukiwane macierze A i B:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{J_r}{J_{xx}}\omega_{r0} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{J_r}{J_{yy}}\omega_{r0} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{8\times 8}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_t\omega_{t0}^2 C_l l}{J_{xx}} & 0 & -\frac{K_t\omega_{t0}^2 C_l l}{J_{xx}} & 0 \\ \frac{K_t\omega_{t0}^2 C_l l}{J_{yy}} & 0 & -\frac{K_t\omega_{t0}^2 C_l l}{J_{yy}} & 0 & 0 \\ -\frac{K_t\omega_{t0}^2 C_l r}{J_{zz}} & -\frac{K_t\omega_{t0}^2 C_l r}{J_{zz}} & -\frac{K_t\omega_{t0}^2 C_l r}{J_{zz}} & -\frac{K_t\omega_{t0}^2 C_l r}{J_{zz}} & \frac{2K_t\omega_{t0} C_\tau}{J_{zz}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2K_t\omega_{t0}(1-C_d)}{m} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{8\times 5}$$

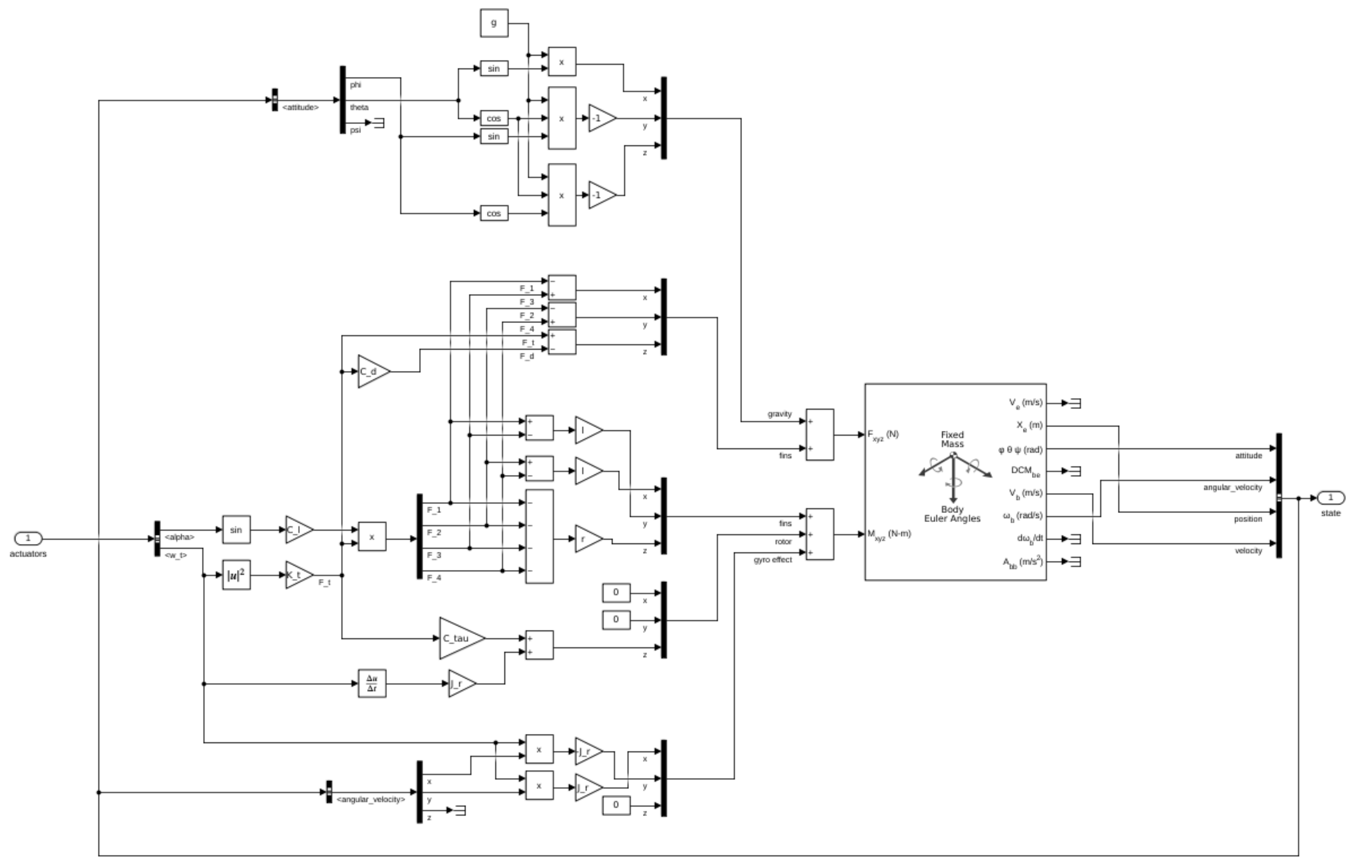
2 Symulacja



Rysunek 2: Symulacja w środowisku Symulink, widoczne odseparowane bloki

2.1 Model obiektu

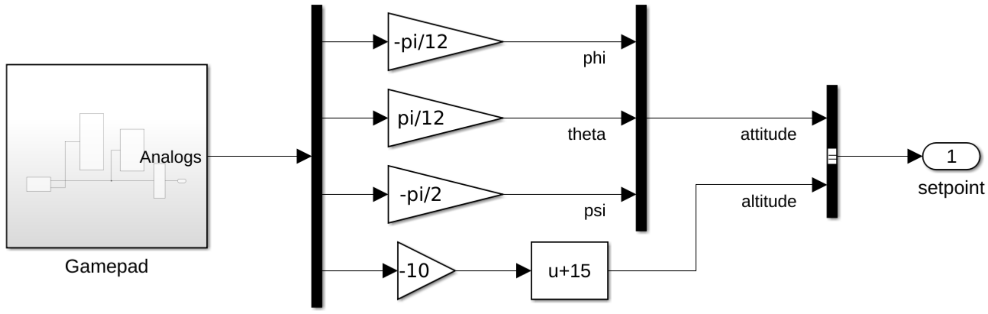
Sercem jest blok modelu obiektu bezzałogowego obiektu latającego, zawierający w sobie nieliniowe równania ruchu 1 oraz 2. W celu symulacji obiektu o 6 stopniach swobody został użyty specjalny blok z „Areospace Blockset”. Wychylenia łopatek oraz prędkość wirnika przeliczana jest na siły generowane przez lotki, a te następnie na siły i momenty obrotowe przykładane do bezzałogowca. Wszelkie stałe liczbowe są generowane do przestrzeni roboczej poprzez skrypt Matlab.



Rysunek 3: Implementacja równań ruchu

2.2 Odczyt z kontrolera do gier

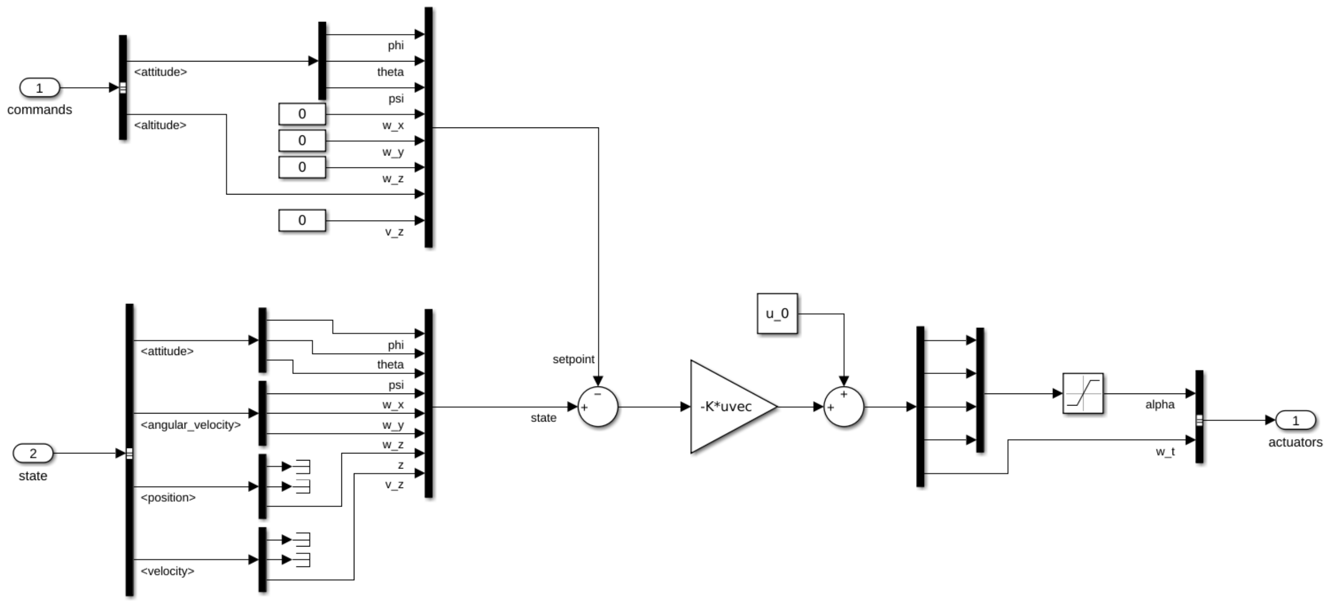
Jako wejście użytkownika do symulacji zostały zastosowane wyjścia analogowe popularne kontrolera PS3/XBox360 połączonego do komuptera za pomocą USB. Do jego odczytu używany jest blok „Joystik Input" z „Symulink 3D Animation". Lewa gałka odpowiada za wartości ϕ oraz θ, natomiast prawa za ψ i z.



Rysunek 4: Kontrola zachowania drona w symulacji za pomocą „analogów".

2.3 Sterowanie w zamkniętej pętli

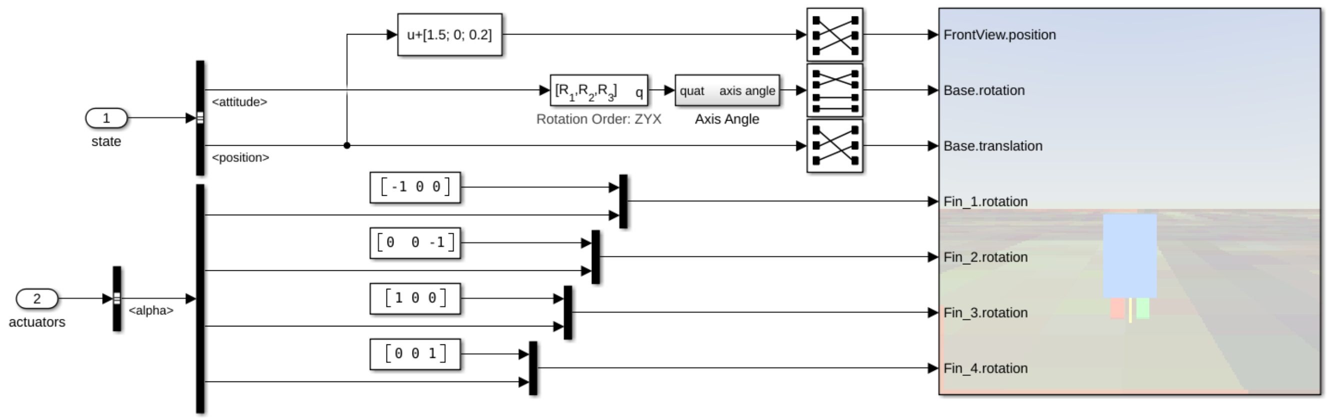
Do sterowania dronem w zamkniętej pętli został zaimplementowany regulator LQR oraz wymagane do jego działania układy formujące obecny wektor stanu x oraz zadany wektor x_{sp} w pełni zależny od wejści użytkownika. Następuje obliczenie uchybu regulacji, przemnożenie przez macierz K oraz przesunięcie wyniku do punktu pracy.



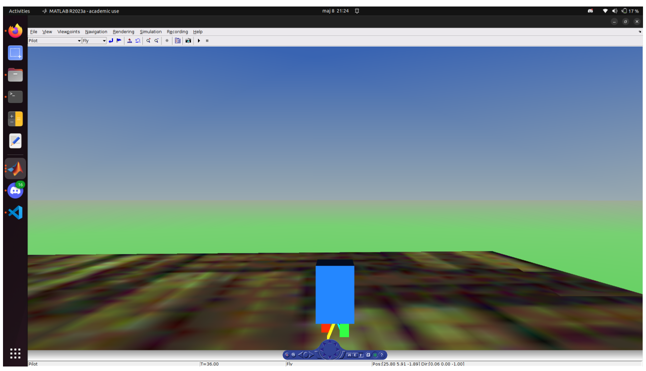
Rysunek 5: Regulator LQR wykorzystujący idealne dane z symulacji

2.4 Wizualizacja

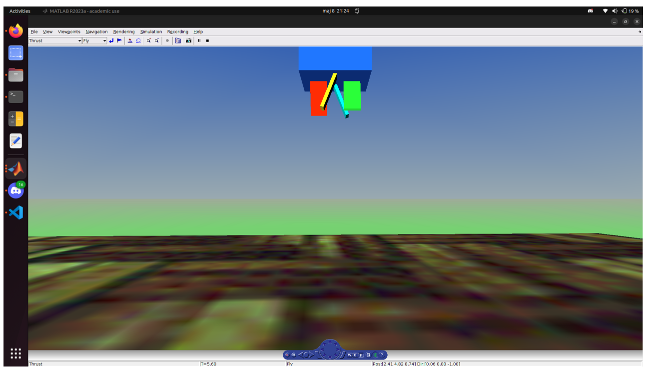
Wizualizacja finalnie została zrealizowana za pomocą bloku „VR” z „Symulink 3D Animation Toolbox”. Pozwala to na stworzenie sceny 3D z prostymi bryłami geometrycznymi połączynymi w hierarchię drzewa. Do zwizualizowania stanu drona użyto prostopadłościanu z czterema drobnymi prostokątami u dołu reprezentującymi łopatki. Zdefiniowano trzy widoki kamery dla sceny aby wspomóc wyobraźnię przestrzenną pilota.



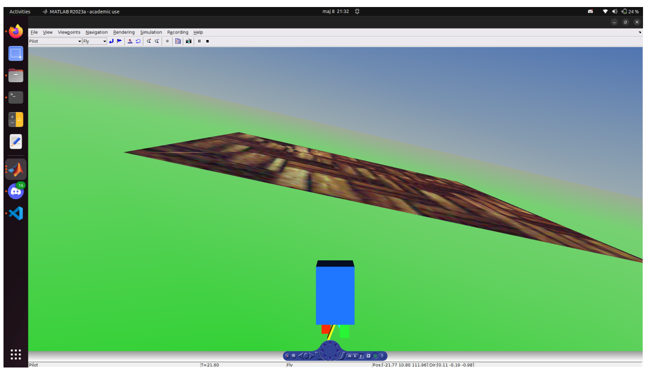
Rysunek 6: Dopasowanie układów współrzędnych do Symulink VR



(a) widok podążający za środkiem masy



(b) widok na lotki



(c) widok w układzie współrzędnych korpusu

Rysunek 7: Predefiniowane widoki w symulacji

3 Przeprowadzone testy

Do testów użyto następujących danych:

$$
\begin{aligned}
K_t &= 0.0001\,\mathrm{Ns}^2 \\
C_l &= 0.2 \\
C_d &= 0.1 \\
C_\tau &= 0.03 \\
J_{xx} &= 0.1\,\mathrm{mkg} \\
J_{yy} &= 0.1\,\mathrm{mkg} \\
J_{zz} &= 0.1\,\mathrm{mkg} \\
J_r &= 0.001\,\mathrm{mkg} \\
m &= 0.5\,\mathrm{kg} \\
l &= 0.1\,\mathrm{m} \\
r &= 0.1\,\mathrm{m} \\
g &= 9.81\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}
\end{aligned}
$$

Metodą prób i błędów zostały znalezione nastawy regulatora o akceptowalnych wynikach:

$$
\begin{aligned}
Q &= diag([10, 10, 100, 1, 1, 100, 1000, 100]) \\
R &= diag([1, 1, 1, 1, 10])
\end{aligned}
$$

```
Command Window
Nominalna prędkość obrotowa wirnika:   2229 obr/min
Nominalne wychylenie łopatek:          22.0 deg

K =

    1.3173    1.8069   -5.0000   -0.0000    1.4689   -5.2243    0.0312    0.0501
    1.8069   -1.3173   -5.0000    1.4689   -0.0000   -5.2243    0.0312    0.0501
   -1.3173   -1.8069   -5.0000    0.0000   -1.4689   -5.2243    0.0312    0.0501
   -1.8069    1.3173   -5.0000   -1.4689    0.0000   -5.2243    0.0312    0.0501
   -0.0000   -0.0000    0.0062   -0.0000   -0.0000    0.0063   10.0000   15.7472

fx >>
```

Rysunek 8: Wynik działania skryptu, widoczny punkt pracy oraz macierz regulatora

Bibliografia

[1] Victor H. Dominguez i in. "Micro Coaxial Drone: Flight Dynamics, Simulation and Ground Testing". W: *Aerospace* 9.5 (2022). ISSN: 2226-4310. DOI: 10.3390/aerospace9050245. URL: https://www.mdpi.com/2226-4310/9/5/245.

[2] Emil Bjerregaard Jacobsen. *Modelling and Control of Thrust Vectoring Mono-copter*. 2020. URL: https://projekter.aau.dk/projekter/files/421577367/Master_Thesis_Emil_Jacobsen_v5.pdf.