

Regulace kvadrokoptéry

Marek Provazník

Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology
Institute of Automation and Computer Science
Technicka 2896/2, Brno 616 69, Czech Republic
200640@vutbr.cz

Abstract: Práce se zabývá stabilním řízením kvadrokoptéry s ohledem na k tomu potřebné senzory. Popisuje dynamické rovnice pomocí Newton-Eulerovy metody. Srovnává výsledky simulací klasickéhé a kaskádové metody regulace pomocí PID regulátoru.

Keywords: Quadcopter, sensors, PID, cascade PID, regulation, stability

1 Úvod

Kvadrokoptéra je speciální druh koptéry, který si vysloužil svůj název díky čtyřem motorům, které používá ke svému pohybu v prostoru. Kvadrokoptéra je UAV (Unmanned Aerial Vehicle), tento pojem zahrnuje létající prostředky bez osoby na palubě, která by odtud mohla objekt ovládat. Termín je známý lidem z oblasti robotiky, informačních technologií a umělé inteligence, avšak pojmy jako RPV (Remotely Piloted Vehicle), RC-Helicopter (Remote Controlled Helicopter) nebo UVS (Unmanned Vehicle System) jsou také docela běžné [1]. Narozdíl od normální helikoptéry, která může měnit úhel náběhu své čepele, využívá kvadrokoptéra dvě skupiny pevně zabudovaných motorů.

1.1 Aplikace

Vývoj bezpilotních letounů byl a stále je silně podporován armádami pro vojenské aplikace. Po Druhé světové válce vzrostl u některých států zájem o letouny, které by byly schopné proniknout na nepřátelské území, prozkoumat ho a získat a doručit informace bez nasazení člověka. Příklad jednoho z těchto zařízení od Kanadské společnosti Aeryon Labs je dron "Aeryon Scout", který je schopen tiše létat nad danou oblastí a natáčet/pořizovat snímky lidí a objektů na zemi. Kvadrokoptéra jsou užitečný nástroj mnohých univerzit pro testování a výuku automatického řízení, navigace a mapování nebo robotiky. Díky své velikosti a váze se může kvadrokoptéra dostat do člověku nepřístupných míst. V roce 2014 byl díky dronům v Tamil Nadu v Indii odhalen tzv. granite scam (korupční kauza) [1, 2]. Obrovský potenciál mají bezpilotní letouny také v zeměděství, kde jsou zatím využívány jen u větších farmářů nebo v nejvyspělejších státech. Používá se například pro potřeby monitoringu, mapování zaplevelení, fenotypizaci pole, odhad biomasy nebo tvorbu digitálního modelu terénu [3]. V poslední době jsou drony čím dál populárnější a nacházejí své místo v komerční sféře. Zejména kvadrokoptéra a hexakoptéra jsou hojně využívané fotografy a ve filmovém průmyslu. Firmy jako Google nebo Amazon zřizují své doručovací systémy založené na přepravě pomocí dronů, projekty jsou známé jako "Amazon prime air" a "Google wing". V roce 2013 německá společnost Deutsche Post otestovala dopravu zdravotnických produktů v projektu "Parcelcopter". [2, 4].

2 Senzory

Drony obecně lze ovládat pomocí rádiového přenosu. Ovládáním se v teorii automatického řízení rozumí kontrolování procesu/systému bez zpětné vazby. Tuto zpětnou vazbu, respektive její funkci vykonává u ovládání člověk. Někdy se této formě kontroly také říká ruční ovládání. "Regulace je řízení se zpětnou vazbou. Regulace je udržování určité fyzikální veličiny na konstantní hodnotě nebo jinak podle nějakého pravidla se měnící hodnotě. Během regulace se zjišťují hodnoty této veličiny a srovnávají se s hodnotou, kterou má mít. Podle zjištěných odchylek se zasahuje do regulačního procesu v tom smyslu, aby se odchylky odstranily" [5]. Ovládání jako takové se využívá u závodních FPV dronů a obyčejných RC koptér určených na létání pro zábavu. Aby se dal dron uplatnit v komerční sféře, musí nést nejrůznější vybavení od videokamer, termokamer po různé postříky využívané v zemědělství a správně vykonávat svoji činnost. To je mnohdy možné pouze pokud bude dron stabilní, ať už se jedná o levitaci nebo rovnoměrný přímočarý pohyb. Stabilního stavu se docílí (při natáčení videa ve filmařském průmyslu s pomocí gimbalu nebo jiného stabilizátoru kamery) softwarem - speciálním algoritmem, který přijímá data ze senzorů, které vyhodnotí a na základě nich pomocí motorů uvede systém do požadovaného

stavu. Senzory převedou danou fyzikální veličinu na elektrický signál, obvykle obsahují čidlo, které reaguje na změnu fyzikální veličiny změnu napětí. Signál ze senzoru bývá většinou analogový, než se dostane do řídící jednotky, musí projít analogově-digitálním převodníkem. Takto je u většiny dronů realizována výše zmíněná zpětná vazba [5, 6, 7].

2.1 IMU

Inertial measurement unit, v překladu incerciální měřící jednotka je nejdůležitější článek ve stabilizaci dronu. Je to jednotka, která svým názvem zastřešuje gyroskopy, akcelerometry a magnetometry pracující dohromady. Kombinací těchto senzorů je jednotka schopná detektovat změny natočení, rychlosti a polohy objektu. Díky této vlastnosti je možné určit polohu tělesa pomocí metodou dead reckoning (například při výpadku GPS). Metoda dead reckoning dokáže určit polohu z počátečních podmínek (souřadnic) pomocí neustálé integrace zrychlení, ze kterého vypočítává rychlosť a polohu. Nevýhoda této metody je nepřesnost způsobená neustálé se zvyšující chybou při integrování [7, 8, 9].

2.1.1 Gyroskop

Gyroskop je zařízení, které se používá k navigaci a orientaci v prostoru nejen u dronů, ale i v letadlech, torpédech, balistických raketách a vesmírných lodích. PID regulátor udržuje otáčky setrvačníku, který díky tomu udržuje osu své rotace na stále steném místě. Pomocí něj lze určit úhel náklonu a úhlovou rychlosť zařízení kolem všech třech os x, y a z. Údaje z gyroskopu jsou klíčové pro získání dat o orientaci dronu v prostoru a při jeho poruše je tak velmi pravděpodobné, že dron nebude schopen pokračovat v letu a dojde k havárii [7, 8, 9, 10].

2.1.2 Akcelerometr

Akcelerometr slouží k určení zrychlení objektu v dané ose. Spolu s gyroskopem představují základní senzory pro stabilizaci dronu v prostoru (gyroskop stabilizuje natočení a akcelerometr translaci rychlosť/zrychlení). Existuje více druhů akcelerometrů, ale u dronů a koptér se však využívají třojrozměrné (pracuje ve třech osách), protože je potřeba měřit zmíněné veličiny v prostoru. Zrychlení je určeno měřením rychlosť, díky její derivace podle času je následně možné zjistit zrychlení [7, 9, 10].

2.1.3 Magnetometr

Magnetometr je velmi malý, elektronický snímač magnetické indukce, který funguje díky lineární závislosti magnetické indukce a intenzity magnetického pole. Při výpadku GPS signálu je možné ho použít jako nahradu k určení zeměpisné šířky z naměřených hodnot síly a směru magnetického pole Země [7, 11].

2.2 Barometr

Barometr nebo také tlakoměr se často používá u létajících prostředků jako senzor pro určení nadmořské výšky. Funguje na principu měření atmosférického tlaku, který je nadmořské výšce nepřímo úsměrný a podle zjištěné hodnoty může být následně spočítána [7].

2.3 GPS

Global positioning system je satelitní systém sloužící pro určování polohy, směru a rychlosť objektů. Pro spolehlivou funkci systému musí být objekt spojen minimálně se čtyřmi satelity na oběžné dráze. Družice vysílají signál s časovým údajem, na základě kterého může být díky trilateraci určena poloha [7, 12].

3 Stabilizace

Existuje několik způsobů jak dosáhnout stabilního letu dronů. Tato práce se konkrétně zaměří na regulaci pomocí PID regulátoru. PID je spojitý proporcionalně-itegračně-derivační regulátor. Vstupem je regulační odchylka, která vznikne odečtením regulované veličiny (změřené senzory) od žádané hodnoty (nastavená uživatelem nebo jiným regulátorem při kaskádovém zapojení). Výstup regulátoru se nazývá akční zásah a představuje signál, který v tomto případě upraví otáčky motoru. Cílem regulátoru je pomocí akčních zásahů minimalizovat regulační odchylku. Obecně platí, že jeden regulátor může regulovat jednu veličinu. Pro stabilizaci kvadroopterů se bude počet použitých regulátorů lišit v závislosti na požadavcích kladených na systém a také na zvoleném způsobu řešení [2, 5, 6, 9].

3.1 Model

V knize [5] a další odborné literatuře je popsáno mnoho způsobů, kterými se dá nastavit PID regulátor. Jeden z nich je sestavení matematicko-fyzikálního modelu systému, podle kterého se dají hodnoty zesílení jednotlivých složek určit výpočtem nebo experimentálně v simulaci. Jeden z oblíbených a často používaných softwarových nástrojů v oboru řídící techniky je Matlab/Simulink, ve kterém se dá vytvořit model v grafickém prostředí. Čím přesnější model, tím víc odpovídá simulace skutečnosti. Prakticky nelze vytvořit přesný model, ale pro uspokojivé nastavení a simulaci je přibližný model dostačující. Na základě [13, 14, 15, 16] budou níže sestaveny diferenciální rovnice popisující zkoumaný systém.

3.1.1 Vliv vrtulí na dynamiku

Při sestavování modelu je potřeba zvážit, které fyzikální a mechanické jevy zahrnout a které zanedbat. Uvažováním různých mechanických vlastností se celý systém stane mnohem komplexnější, avšak jejich přínos nemusí být podstatný nebo nemusí hrát velkou roli z hlediska regulace. Model kvadrokoptéry byl sestaven za předpokladů shrnutých v následujících bodech .

- Konstrukce kvadrokoptéry a vrtule jsou uvažovány jako tuhé těleso
- Těžiště modelu je totožné s jeho středem
- Kvadrokoptéra je osově symetrická (kolem osy z)
- Odpor vzduchu a další aerodynamické jevy jsou zanedbány

Výše uvedené podmínky byly vyhodnoceny jako nepodstatné a nepočítá se s nimi při modelování systému [13]. Vrtule kvadrokoptéry svým rotačním pohybem generují točivý moment a díky úhlu náběhu svých listů také vztlakovou sílu. Nechť je F_i vztlaková síla, τ_i moment síly, k_f a k_m vztlakový a momentový koeficient a ω_i značí úhlovou rychlosť vrtulí, pak platí:

$$F_i = k_f \omega_i^2 \quad (1)$$

$$\tau_i = k_m \omega_i^2 \quad (2)$$

Hodnoty koeficientů k_f a k_m lze určit experimentálně [13]. Pro sestavení dalších rovnic je nutné zavést tzv. Eulerovy úhly, které určují natočení os souřadného systému modelu od globálního souřadnicového systému. Nechť ϕ , θ a ψ představují úhly natočení os modelu e_1 , e_2 , e_3 od globálního souřadnicového systému x , y , z . Z rovnic (1) a (2) lze sestavit vztahy pro určení celkové vztlakové síly a celkového momentu.

$$T = k_f(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \quad (3)$$

$$\tau_\phi = lk_f[(\omega_2^2 + \omega_3^2) - (\omega_1^2 + \omega_4^2)] \quad (4)$$

$$\tau_\theta = lk_f[(\omega_3^2 + \omega_4^2) - (\omega_1^2 + \omega_2^2)] \quad (5)$$

$$\tau_\psi = k_m[(\omega_1^2 + \omega_3^2) - (\omega_2^2 + \omega_4^2)] \quad (6)$$

Ve výrazech (3), (4), (5) a (6) jsou momenty a vztlaková síla vyjádřeny jako funkce otáček vrtulí kvadrokoptéry, kde l značí kolmici od příslušné osy ke středu otáčení vrtule (rameno při výpočtu momentu) a ty jsou díky symetrii totožné pro všechny čtyři motory [13, 14, 15, 16].

3.1.2 Newtonův druhý zákon

K určení diferenciálních rovnic popisujících translační pohyb využijeme druhého newtonova zákona, ve kterém bude třeba využít matici rotace R pro trojrozměrný prostor. Pro zjednodušení a zpřehlednění matice zde platí $\cos(\alpha) = c(\alpha)$ a $\sin(\alpha) = s(\alpha)$.

$$R = \begin{bmatrix} c(\theta)c(\psi) & c(\psi)s(\theta)s(\phi) - s(\psi)s(\phi) & c(\psi)s(\theta)c(\phi) + s(\psi)s(\phi) \\ c(\theta)s(\psi) & s(\psi)s(\theta)s(\phi) + c(\psi)c(\phi) & s(\psi)s(\theta)c(\phi) - c(\psi)s(\phi) \\ -s(\theta) & c(\theta)s(\phi) & c(\theta)c(\phi) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Celková síla působící na model se rovná součtu všech sil na model působících. V tomto případě je to těhová síla, která směruje v záporném směru osy z globálního souřadného systému a vztlaková síla T popsána v (3),

která však působí v kladném směru osy e_3 modelu. Správnou vzájemnou orientaci souřadného systému modelu s globálním zajišťuje matice rotace R ve vztahu (8).

$$m \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ T \end{bmatrix} \quad (8)$$

Kde m značí celkovou hmotnost soustavy a g tělové zrychlení. Po roznásobení matic, úpravách a vyjádření zrychlení (jako druhé derivace polohy) získáme z (8) následující soustavu diferenciálních rovnic [13, 15].

$$\ddot{x} = \frac{T}{m}(c(\psi)s(\theta)c(\phi) + s(\psi)s(\phi)) \quad (9)$$

$$\ddot{y} = \frac{T}{m}(s(\psi)s(\theta)c(\phi) - c(\psi)s(\phi)) \quad (10)$$

$$\ddot{z} = -g + \frac{T}{m}c(\theta)c(\phi) \quad (11)$$

3.1.3 Eulerovy dynamické rovnice

Tato kapitola se zaměřuje na vyjádření diferenciálních rovnic popisujících natočení kvadrokoptéry kolem jednotlivých os. Důležité je spočítat moment hybnosti podle (12).

$$\vec{L} = I\vec{\omega} \quad (12)$$

Pokud chceme spočítat moment setrvačnosti \vec{L} , musíme tak učinit v souřadnicovém systému modelu (body frame), protože se model v globálním souřadnicovém systému neustále natáčí, hodnoty momentu hybnosti I by se neustále měnily. Pro body frame platí, že matice momentu hybnosti I je díky symetrii diagonální a hodnoty v ní jsou konstantní (13).

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Dosadíme-li matici (13) do vztahu (12), získáme (14), kde je pro přehlednost nahrazeno značení úhlové rychlosti $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ za ϕ, θ, ψ .

$$\vec{L} = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx}\phi \\ I_{yy}\theta \\ I_{zz}\psi \end{bmatrix} \quad (14)$$

Chceme-li popsat natočení tělesa v prostoru, musíme vztáhnout derivaci momentu setrvačnosti podle času ke globálnímu souřadnému systému (15).

$$(\frac{d\vec{L}}{dt})_{global} = \vec{\tau} \quad (15)$$

Podle eulerovy dynamické rovnice lze vyjádřit vztah (15) v závislosti na momentu hybnosti vztázenému k souřadnému systému modelu (body frame) následovně.

$$(\frac{d\vec{L}}{dt})_{global} = (\frac{d\vec{L}}{dt})_{body} + \vec{\omega} \times \vec{L} \quad (16)$$

$$\vec{\tau} = \vec{L} + \vec{\omega} \times \vec{L} \quad (17)$$

Po zderivování vektoru \vec{L} , provedením vektorového součinu $\vec{\omega} \times \vec{L}$ a dosazením do (17) je získána (18).

$$\begin{bmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx}\ddot{\phi} \\ I_{yy}\dot{\theta} \\ I_{zz}\ddot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\theta}\dot{\psi}(I_{zz} - I_{yy}) \\ \dot{\phi}\dot{\psi}(I_{xx} - I_{zz}) \\ \dot{\phi}\dot{\theta}(I_{yy} - I_{xx}) \end{bmatrix} \quad (18)$$

Dalšími úpravami a vyjádřením jsou získány finální diferenciální rovnice popisující natočení systému kolem globálních os x, y, z [13, 15].

$$\ddot{\phi} = \frac{\tau_\phi}{I_{xx}} + \frac{\dot{\theta}\dot{\psi}}{I_{xx}}(I_{zz} - I_{yy}) \quad (19)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{\tau_\theta}{I_{yy}} + \frac{\dot{\phi}\dot{\psi}}{I_{xx}}(I_{xx} - I_{zz}) \quad (20)$$

$$\ddot{\psi} = \frac{\tau_\psi}{I_{zz}} + \frac{\dot{\phi}\dot{\theta}}{I_{xx}}(I_{yy} - I_{xx}) \quad (21)$$

3.2 Regulace

Diferenciální rovnice (9), (10), (11), (19), (20) a (21) popisují dynamiku modelu v prostoru a (3), (4), (5), (6) určují, jaký vliv na ni má působení vrtulí. Podle [5] se jedná o tzv. mnohorozměrový regulační obvod s více regulovanými a akčními veličinami, které se navzájem různě ovlivňují a k jejich regulaci je obvykle potřeba použít více regulátorů. Systém je podregulovaný (motory jsou čtyři vstupní veličiny a regulují šest výstupních veličin, které reprezentují stupně volnosti), vysoce nelineární a jeho jednotlivé veličiny jsou silně provázány [13, 16]. V [13] je tento problém vyřešen zvolením vhodného pracovního bodu (v rovnovážné poloze) a provedením linearizace. Autoři navíc rovnice zjednodušili na:

$$\begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \\ \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\tau_\phi}{I_{xx}} \\ \frac{\tau_\theta}{I_{yy}} \\ \frac{\tau_\psi}{I_{zz}} \\ -g\theta \\ g\phi \\ g - \frac{T}{m} \end{bmatrix} \quad (22)$$

V [13] jsou τ_ϕ , τ_θ , τ_ψ uvažovány jako vstupní veličiny systému, které jsou však ovlivňovány úhlovými rychlostmi motorů ω_i , jak už bylo popsáno výš. Z (22) lze vyčíst, že \ddot{x} , \ddot{y} jsou regulovány nepřímo skrz $\ddot{\phi}$, $\ddot{\theta}$, $\ddot{\psi}$, \ddot{z} .

3.2.1 PID regulace

Řešení problému v [14] je provedeno klasickou PID regulací, viz schéma na Fig. 1. Regulace výšky není realizována. Řešení umožnuje pouze nastavit požadované úhlové rychlosti $\dot{\phi}$, $\dot{\theta}$, $\dot{\psi}$, které se odečtou se skutečnými (naměřenými) hodnotami. Tak se vytvoří regulační odchylky vstupující do regulátorů, jejichž výstupem jsou akční zásahy, na základě kterých se upraví úhlové rychlosti/otáčky vrtulí [14].

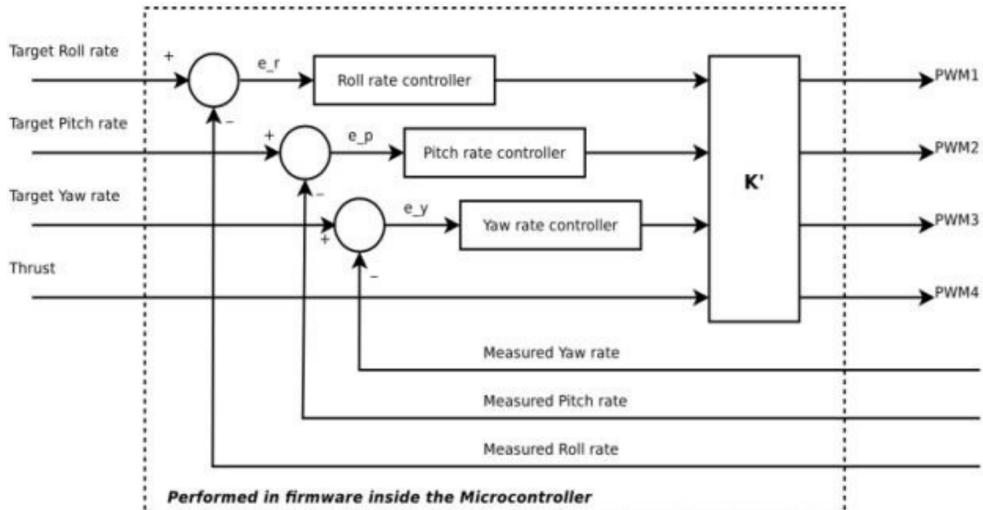


Figure 1: Schéma klasické PID regulace [14]

3.2.2 Kaskádová PID regulace

Kaskádová PID regulace, jak název napovídá, spočívá v zapojení více regulátorů za sebe do tzv. kaskády. Na Fig. 2 lze vidět dvoustupňovou kaskádovou regulaci. Každý z regulátorů reguluje jinou veličinu, jeden úhel natočení a druhou úhlovou rychlosť, přičemž každý z nich přijímá ve zpětné vazbě informaci o skutečné (měřené) hodnotě příslušné regulované veličiny. Akční zásah vnějšího regulátoru (regulace úhlu) reprezentuje žádanou hodnotu pro vnitřní regulátor (regulace úhlové rychlosti). U této metody je velmi důležité, aby byla rychlost regulace vnitřní smyčky několikanásobně rychlejší než u smyčky vnější [13].

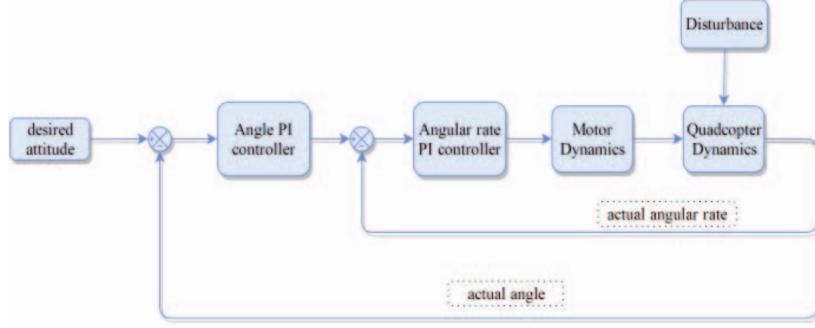


Figure 2: Schéma kaskádové PID regulace [13]

3.3 Simulace

Ve [13, 14] byla provedena simulace stabilizace. Viz průběh a srovnání výsledků stabilizace klasického PID regulátoru na Fig. 3 se stabilizací kaskádového PID regulátoru Fig. 4. Na Fig. 5 a Fig. 6 lze porovnat vlivy poruchové veličiny klasický a kaskádový PID regulátor [13].

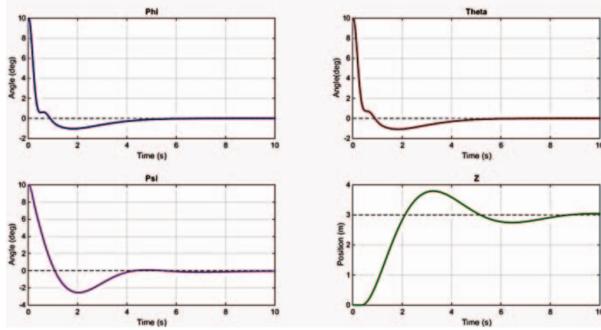


Figure 3: Stabilizace PID [13]

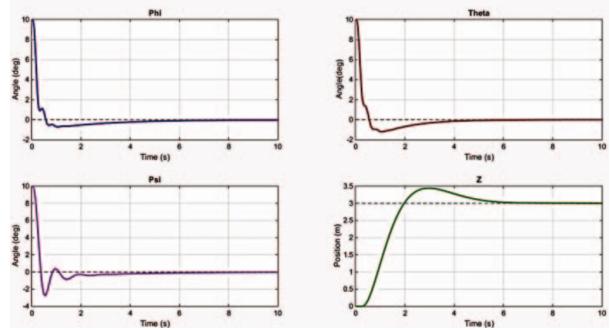


Figure 4: Stabilizace kaskádového PID [13]

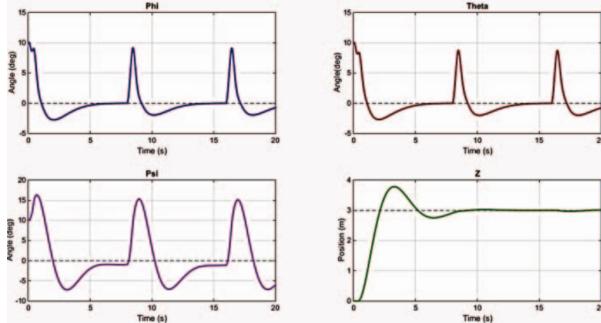


Figure 5: Vliv poruchové veličiny na PID [13]

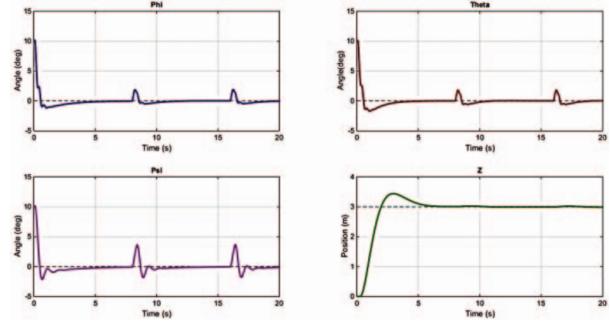


Figure 6: Vliv poruchové veličiny na kaskádový PID [13]

4 Závěr

V simulacích se ukázalo, že obě varianty stabilizace jsou schopny kvadrokoptéru stabilizovat. Klasický PID regulátor se běžně používá, ale není zdaleka tak robustní. Rozdílem je, že kaskádová metoda má mnohem kratší čas regulace, nižší překmit a tím pádem i menší regulační plochu. Na Fig. 5 a Fig. 6 je zřejmý obrovský rozdíl průběhu regulované veličiny při působení poruchové veličiny. Je to způsobeno hlavně tím, že u klasického PID regulátoru se bere v potaz jen regulační odchylka natočení a úplně se zanedbává vliv úhlové rychlosti na přechodovou charakteristiku. Kaskádová metoda regulace vyžaduje vyšší počet regulátorů (pro konkrétní řešení uvedené ve [13] dvojnásobný). Vzhledem k faktu, že většina kvadrokoptér používá k řízení mikrokotrolery, jedná se o diskrétní řízení pomocí PSD regulátoru, který je v takových případech realizován softwarově. Z toho vyplývá, že metoda kaskádové regulace vychází ve srovnání jednoznačně lépe, jelikož se při její implementaci zvýší pouze komplexnost softwaru (tzv. flight code), který lze za předpokladu dostatečné výpočetní kapacity (při úrovni dnešní techniky se nepředpokládá problém) implementovat na totožném hardwaru.

References

- [1] Henri Eisenbeiss et al. A mini unmanned aerial vehicle (uav): system overview and image acquisition. *International Archives of Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5/W1):1–7, 2004.
- [2] Eswarmurthi Gopalakrishnan. Quadcopter flight mechanics model and control algorithms. *Czech Technical University*, 69, 2017.
- [3] Katerina Fialová. Využití bezpilotních leteckých prostředků v precizním zemědělství. *Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta*, 2017.
- [4] Seyed Mahdi Shavarani, Mazyar Ghadiri Nejad, Farhood Rismanchian, and Gokhan Izbirak. Application of hierarchical facility location problem for optimization of a drone delivery system: a case study of amazon prime air in the city of san francisco. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(9):3141–3153, 2018.
- [5] Ivan Švarc. Základy automatizace. *Akademické nakladatelství CERM, Brno*, 2002.
- [6] Jaroslav Balátě. Automatické řízení. *Praha: BEN - technická literatura*, 2003.
- [7] Martin Žanda. Drony a jejich využití. *Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky*, 2020.
- [8] Václav Červenka, Ondřej Šimek. Systém řízení charakteristik autonomního dronu. *Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií, Ústav počítačových systémů*, 2016.
- [9] Adam Uhlíř. Konstrukce a řízení kvadrokoptéry. *Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra řízení procesů*, 2013.
- [10] Lucie Lintnerová. Využití gyro-akcelerometrických senzorů phidgetspatial k hodnocení kinematických dat vestibulárního aparátu v klinické neurologii. Bachelor's thesis, České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum., 2016.
- [11] Michal Kuchař. Návrh aplikace s implementací algoritmu kalibrace mems magnetometru. Bachelor's thesis, České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum, 2017.
- [12] Slavomír Mládek. Využití gps systému při monitorování vozidel. *Vysoká škola báňská, Fakulta bezpečnostního inženýrství, Katedra bezpečnostních služeb*, 2015.
- [13] Pengcheng Wang, Zhihong Man, Zhenwei Cao, Jinchuan Zheng, and Yong Zhao. Dynamics modelling and linear control of quadcopter. In *2016 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS)*, pages 498–503. IEEE, 2016.
- [14] Kyaw Myat Thu and AI Gavrilov. Designing and modeling of quadcopter control system using l1 adaptive control. *Procedia Computer Science*, 103:528–535, 2017.
- [15] Teppo Luukkonen. Modelling and control of quadcopter. *Independent research project in applied mathematics, Espoo*, 22:22, 2011.
- [16] Kadda Meguenni Zemalache, Lotfi Beji, and H Marref. Control of an under-actuated system: application a four rotors rotorcraft. In *2005 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics-ROBIO*, pages 404–409. IEEE, 2005.