QUADROCOPTER – STABILISATION AND CONTROL

Petr Gábrlík

Master Degree Programme (1), FEEC BUT

E-mail: xgabrl00@stud.feec.vutbr.cz

Supervised by: Luděk Žalud

E-mail: zalud@feec.vutbr.cz

Abstract: This article describes the design and implementation of program management and operational service for a flying robot, quadrotor concept. The first part deals with used components and the program structure. Next, the sensory subsystem and processing data from sensors are described. The last part is focused on stabilisation and the way of the control of fly.

Keywords: Quadrotor, UAV, Gyroscope, Accelerometer, Stabilization

1. ÚVOD

Quadrocopterem rozumíme experimentální, čtyř vrtulový létající stroj, často označovaný jako quadrotor. Obecně lze zařadit do kategorie UAV, nebo do kategorie mobilních, dálkově řízených, airborn robotů. Letovými vlastnostmi se podobá vrtulníkům, odlišuje se ovšem konstrukcí a způsobem řízení letu. Právě konstrukční jednoduchost je velkou výhodou této koncepce.

Cílem projektu Quadrocopter je zkonstruovat letuschopný robot zmíněné koncepce, který bude vykazovat dostatečnou stabilitu a ovladatelnost. Měl by být také schopen letu s přídavným zařízením, např. digitálním fotoaparátem pro pořizování leteckých snímků. Tato práce se zabývá především programovou obsluhou robotu a jeho periferií, dále zpracováním dat ze senzorů a samotnou stabilizací.

2. KOMPONENTY

Hlavní řídicí prvek robotu tvoří 8-bitový mikrokontrolér ATmega16 od firmy Atmel, který disponuje všemi potřebnými komunikačními rozhraními a periferiemi. Pomocí 16-bitového SPI rozhraní je k němu připojena inerciální jednotka Analog Devices ADIS16405, která tvoří základní prvek senzorického subsystému. Robot je vybaven čtveřicí synchronních motorů AXi 2212/32, které jsou jedinými akčními členy robotu. K jejich řízení slouží čtveřice frekvenčních měničů Brushless-Ctrl, komunikujících s mikrokontrolérem pomocí I^2C rozhraní. Dálkové řízení probíhá rádiově pomocí modelářského vysílače a přijímače, komunikující na frekvenci 35 MHz. PPM výstup z přijímače je zpracováván programově. Letová data jsou v reálném čase odesílána na základnu tvořící PC. K tomu slouží moduly ZigBee, pracující v pásmu 2,4 GHz. Data mohou sloužit jako zpětná vazba za letu, nebo jsou ukládána pro pozdější analýzu.

Řídicí program je psán v jazyce C ve vývojovém prostředí AVR Studio 4.17. Cyklicky je vykonávána následující posloupnost: 1. dekódování PPM signálu dálkového řízení, 2. načtení a zpracování dat ze senzorů, 3. výpočet tahu a stabilizace náklonů a výpočet otáček jednotlivých motorů, 4. aktualizace otáček motorů, 5. odeslání dat na základnu. Celý cyklus řízení robotu se opakuje s frekvencí 45 Hz.

3. SENZORICKÝ SUBSYSTÉM

Senzorický subsystém poskytuje základní údaje o poloze a pohybech robotu, které jsou nezbytné pro jeho stabilizaci. Jedná se především o trojici rotačních pohybů, jejichž manuální stabilizace je

téměř nemožná. Základní prvek senzorického subsystému tvoří inerciální jednotka (IMU) ADIS16405 od firmy Analog Devices, která obsahuje tříosý gyroskop, tříosý akcelerometr a tříosý magnetometr.

Nejdůležitější je znalost náklonu robotu vůči zemi a jeho kurz. Určení náklonů měřením tíhového zrychlení akcelerometry je dlouhodobě spolehlivé, ale selhává ve chvílích, kdy se robot pohybuje a do měření se zanáší také dynamické zrychlení. Naopak využití gyroskopů pro měření úhlových rychlostí a jejich integrací pro získání náklonů je nezávislé na akceleraci, ovšem údaj je dlouhodobě nespolehlivý. I přes počáteční kalibraci gyroskopů, neboli eliminaci offsetů, se zde projevuje integrální chyba. Řešením je kompenzace integrální chyby gyroskopů pomocí údaje z akcelerometrů. Tento postup vhodně kombinuje přednosti obou metod a je získán přesný údaj o náklonech po celou dobu letu.

Údaj o kurzu robotu je získáván pouhou integrací rotačního pohybu kolem svislé osy, jelikož nemá na stabilitu tak zásadní vliv. Dále je robot vybaven tlakovým senzorem pro měření letové výšky.

4. STABILIZACE

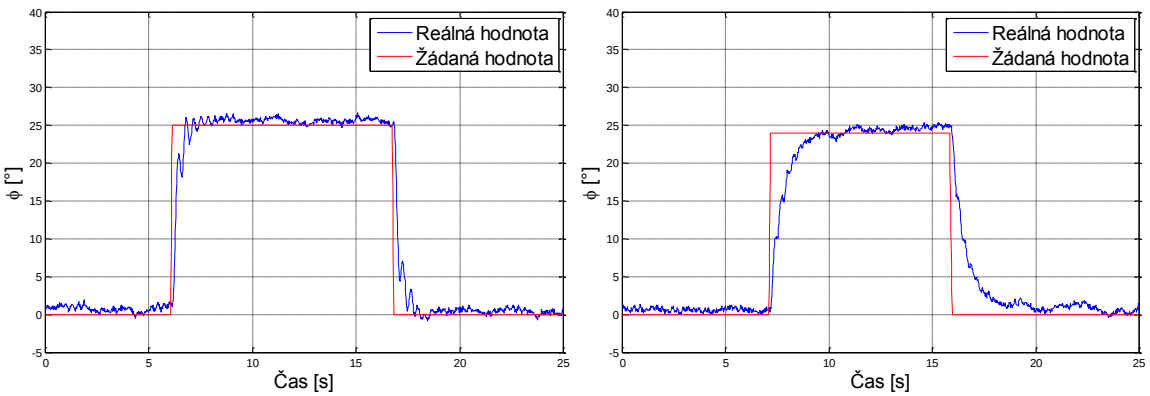
Robot má 6 stupňů volnosti a velmi rychlou dynamiku, z čehož vyplývá, že dálkové řízení bez podpory jisté stabilizace je téměř nemožné. To doplňuje také fakt, že veškeré pohyby jsou způsobeny vhodnou změnou otáček jednotlivých vrtulí, tj. změnou tahů. Takový druh řízení je pro člověka nepřirozený.

Pro dosažení dostatečné ovladatelnosti jsou zavedeny regulátory náklonu pro podélné osy robotu (roll a pitch). V případě osy *x* je vstupní hodnotou regulátoru požadovaný náklon $\phi_{\check{Z}}$ z dálkového řízení, akční veličinou jsou tahy vrtulí, které způsobují moment síly $\mathbf{M_X}$ a tím rotační pohyb v dané ose. Spojitost mezi úhlovým natočením ϕ a momentem síly popisuje rovnice (1).

$$\frac{\mathbf{M_X}}{J_X} = \boldsymbol{\varepsilon}_\mathbf{X} = \frac{d\boldsymbol{\omega}_\mathbf{X}}{dt} = \frac{d^2\phi}{dt^2} \tag{1}$$

Vzniklá soustava obsahuje astatismus druhého řádu a je velmi náchylná k nestabilitě. V takových případech je vhodné použít regulační obvod s pomocnou regulovanou veličinou. Mimo zpětné vazby od výstupu (úhlové natočení) je zavedena pomocná vazba od úhlové rychlosti $\boldsymbol{\omega}_\mathbf{X}$. Jejich vliv je dán vektorem $\mathbf{K} = \{k_1, k_2\}$, viz. rovnice (2).

$$\mathbf{M_X} = (\phi_{\check{Z}} - \phi) \cdot k_2 - \boldsymbol{\omega}_\mathbf{X} k_1 \tag{2}$$



Obrázek 1: Rychlý a přetlumený průběh stabilizace náklonu v ose *x*.

Na **Obrázku 1** jsou znázorněny průběhy odezvy jednotkového skoku $\phi = 0° - 25°$ pro dvě různá nastavení $\mathbf{K}$. Stabilizace náklonu v ose *y* probíhá obdobným způsobem.

Na stabilizaci kurzu (yaw) již nejsou kladeny tak vysoké požadavky, proto byla realizována pouhým zavedením zpětné vazby z výstupu. Umožňuje tak nastavení požadovaného kurzu a zároveň zabraňuje samovolné rotaci.

Celá stabilizace se skládá z trojice regulátorů běžících paralelně. Výstupem každého z nich je požadovaný moment v dané ose, který je dále přepočten na otáčky vrtulí. Na závěr jsou vypočteny individuální otáčky každé vrtule, sestávající se z výstupů všech regulátorů.

5. ZÁVĚR

Výše popsaný způsob řízení a stabilizace robotu byl implementován na reálný model a byly ověřeny jeho vlastnosti. Robot je plně letuschopný a dálkově řiditelný, podpůrná stabilizace se stará o jeho tři stupně volnosti, představující rotační pohyby. Dálkové řízení robotu tak spočívá pouze v řízení posuvných pohybů, které jsou pro člověka intuitivnější. Při letu ve vhodném prostředí, především bez přítomnosti větru, je robot schopen držet pozici bez zásahu do řízení.

Koncepce quadrotoru se ukázala pro tento druh robotu jako vhodná především díky své jednoduchosti a spolehlivosti. Obsahuje pouze čtyři pohyblivé prvky, jimiž jsou synchronní elektromotory bez převodovky, tvořící akční členy robotu. Finální podoba Quadrocopteru je zobrazena na **Obrázku 2.** V základní konfiguraci robot váží 840 g a za použití akumulátorů o kapacitě 2500 mAh je schopen letu okolo 15 minut. Z testování také vyplývá, že pro pořizování leteckých snímků by bylo vhodné robot vybavit stabilizací fotoaparátu.

Kvůli své rozsáhlosti vznikl projekt Quadrocopter ve spolupráci dalších dvou osob, dále se zabývající hardwarem, komunikací a systémem GPS. Právě systém GPS by měl v budoucnu přispět k vyšší stabilitě a autonomnosti robotu.

Obrázek 2: Finální podoba Quadrocopteru

PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek vznikl za podpory Skupiny robotiky Ústavu automatizace a měřicí techniky Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně.

REFERENCE

[1] SKULA, D. *Datová fúze pro určování rotace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 80 s. 3 přílohy. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

[2] ŠOLC, F.; ŽALUD, L. *Robotika*. Brno : VUT Brno, 2002. 144 s.

[3] BLAHA, P., VAVŘÍN, P. *Řízení a regulace 1*. Brno: VUT Brno: 2005. 214 s.

[4] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fyzika : Část 1, Mechanika*. Brno : VUT Brno - VUTIUM, PROMETHEUS, 1999. 366 s.