

# DEVELOPMENT OF PLATFORM FOR THREE-ROTOR HELICOPTER

**Martin Votava**

Master Degree Programme (2), FIT BUT

E-mail: xvotav01@stud.fit.vutbr.cz

**Josef Hájek**

E-mail: ihajek@fit.vutbr.cz

**Abstract:** This paper describes development of platform for three-rotor helicopter known as tri-copter and flight stabilization system. System uses accelerometer, gyroscope, magnetometer and ultrasound altimeter to measure and calculate flight data such as attitude, heading, speed, altitude and position. System is based on PID regulator and built on 8-bit AVR Atmega microcontroller.

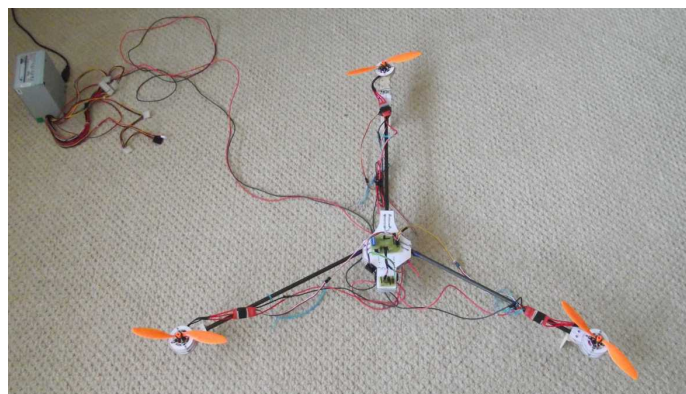
**Keywords:** copter, tri-copter, PID, flight stabilization

## 1. ÚVOD

V současné době se čím dál více nasazují automatizovaní roboti do míst, kam člověk nemůže nebo by to bylo pro něj nebezpečné. Mezi takové roboty patří i vícerotorová létající vznášedla, která se označují jako coptery. Výhodou těchto copterů je především jejich nižší pořizovací cena oproti vrtulníkům (díky jednodušší konstrukci), lepší ovladatelnost a také větší stabilita. Ačkoliv je ovládání jednodušší, není možné, aby operátor ovládal copter přímo. Je nutné navrhnout jednoduchý řídicí systém, který bude za použití senzorů stabilizovat let a převádět příkazy operátora (náklon, klopení, rotace) na povely pro jednotlivé akční prvky.

## 2. TRICOPTER

Tricopter je třírotorové vznášedlo, jehož rotory jsou uspořádány do tvaru písmene Y. Rotory jsou umístěny ve stejné vzdálenosti od těžiště tak, aby každé dvě spojnice os rotorů s těžištěm svíraly úhel  $120^\circ$ . Pro zlepšení letových vlastností tricopteru je vhodné, aby jeden z rotorů měl opačný směr otáčení než zbylé dva. Částečně by tak došlo ke zmírnění účinků točivého momentu rotorů.



**Obrázek 1:** Sestavený tricopter

Řízení tricopteru se provádí změnou tahu jednotlivých rotorů. Na rozdíl od běžných vrtulníků používá tricopter vrtule s pevným náklonem listů, které jsou levnější. Změna tahu je pak přímo závislá na změně otáček. Tah každého rotoru lze rozdělit do dvou složek. První složka, jejíž velikost lze

vypočítat jako aritmetický průměr tahu všech rotorů, vytváří sílu působící na těžiště ve směru kolmém na rovinu vytvořenou rotory. Druhá složka, jejíž velikost je rozdílem průměru tahů a velikosti tahu každého motoru, vytváří rotační momenty. Princip naklánění lze přirovnat k dvojitě vratné páce. Pro vyrovnání rotačních momentů rotorů je nutné natáčet zadní rotor kolem podélné osy modelu. K tomu slouží speciální servomechanismus. Nakloněním rotoru se zároveň změní vektor tahu rotoru a proto je nutné současně zvýšit tah, aby pozice copteru zůstala nezměněná.

Rotaci okolo podélné osy copteru ovlivňují pouze motory na předních nosnících, protože zadní motor je umístěn přímo v ose rotace (rovnice 1). Rotace se dosáhne tak, že se zvýší otáčky jednoho z motorů a zároveň se sníží otáčky druhého stejným dílem. Výsledkem pak je rotaci při zachování stabilní polohy.

$$M_x = F_l \cdot l \cdot \sin(60^\circ) - F_r \cdot l \cdot \sin(60^\circ) \quad (1)$$

Rotaci podél příčné osy způsobuje rozdílný tah předních a zadního motoru (rovnice 2). Při zvýšení tahu zadního rotoru a současném snížení tahu předních rotorů bude stroj rotovat kolem příčné osy.

$$M_y = F_l \cdot l \cdot \cos(60^\circ) + F_r \cdot l \cdot \cos(60^\circ) - F_z \cdot l \cdot \cos(\alpha) \quad (2)$$

Rotace okolo svislé osy se dá dosáhnout nakloněním zadního rotoru podél příčné osy. Tím vznikne rozdíl mezi točivým momentem jednotlivých rotorů a momentem, který působí nakloněním zadního rotoru (viz rovnice 3). Znaménka jednotlivých členů závisí na směru otáčení jednotlivých rotorů. V případě, že rotor bude mít opačný smysl otáčení, změní se u jeho momentu znaménko.

$$M_z = M_l + M_r + M_z - F_z \cdot l \cdot \sin(\alpha) \quad (3)$$

Pro vytvoření zrychlení v libovolném směru je nutné nejprve naklonit celý stroj. Ve vodorovné pozici působí tah motorů pouze proti gravitačnímu zrychlení a udržuje tak stabilní pozici. Při naklonění dojde k rozdělení tahu. Část síly bude působit ve směru naklonění copteru. Vzhledem k tomuto rozdělení sil je následně nutné upravit tah motorů, aby nedošlo k ovlivnění svislého pohybu.

## 2.1. SENZORICKÝ SYSTÉM TRICOPTERU

Pro určení polohy využívá navržený tricopter čtveřici senzorů – akcelerometr, gyroskop, magnetometr a ultrazvukový dálkoměr. Pomocí těchto senzorů lze určit zrychlení, úhlové rychlosti a vzdálenost povrchu pod copterem. Integrací a použitím goniometrických funkcí lze dopočítat i další údaje jako rychlost pohybu, úhel náklonu nebo poloha vůči místu startu.

Gyroskop slouží k měření úhlových rychlostí, tj. rotaci podle os modelu. Matematickou integrací těchto veličin lze určit i úhly náklonů vůči vodorovné rovině. K měření úhlů také slouží magnetometr. Zatímco gyroskop měří úhlovou rychlost, magnetometr měří rozložení vektoru magnetického pole Země. Z principu měření tak vyplývá, že senzor je schopen dodávat údaj o dvou úhlech odklonu od magnetického pole, tzn. není možné z údaje rozlišit, zda-li je úhel  $10^\circ$  nebo  $350^\circ$ . Údaj magnetometru umožňuje pouze zpřesnit vypočtené úhly.

Akcelerometr měří gravitační a dynamické zrychlení modelu. Během inicializace před startem bude na akcelerometr působit pouze gravitační zrychlení Země. Toto se rozloží do jednotlivých os senzoru a z těchto hodnot je možné vypočítat počáteční úhly náklonu. Během letu odpovídají naměřené hodnoty vektorovému součtu gravitačního zrychlení a změny vektoru rychlosti. Jelikož je senzor pevně přichycen k tělu copteru, natáčí se zároveň s ním a tedy naměřené hodnoty v jednotlivých osách nesouhlasí se souřadným systémem copteru. Aby byly hodnoty použitelné, je nutné je nejprve přepočítat pomocí goniometrických funkcí do správného souřadného systému. K tomu je nutné znát přesné úhly natočení. Tyto úhly jsou primárně určovány integrací hodnot gyroskopu. Bohužel s úhlovými rychlostmi se zároveň integruje i chyba měření.

Pro měření výšky se používají dva principy. První využívá závislosti atmosférického tlaku vzduchu na nadmořské výšce. Rozlišení tlakových senzorů není dostatečně vysoké, aby bylo přesně možné určit výšku v rámci předpokládaného letového rozsahu. Druhý princip měří výšku jako vzdálenost

od povrchu pod strojem na základě doby mezi vysláním signálu a jeho odrazu. Tento systém má sice vyšší přesnost ale omezený dosah (cca do 6 metrů). Pro let ve vyšších výškách se buďto bude muset výška počítat z rychlosti pohybu nebo použít tlakový výškoměr. Problémem ultrazvukového systému je vyzařovací úhel. Pokud bude tricopter nakloněn o více než tento úhel, bude vzdálenost a tedy výška změřena nepřesně, protože signál nepůjde přímo k povrchu. Také v blízkosti u stěn se bude signál odrážet od stěn namísto od podlahy. Posledním problémem jsou objekty na povrchu. Vhodným filtrováním hodnot musí být tyto hazardní stavy odstraněny.

## 2.2. ŘÍDÍCÍ SYSTÉM TRICOPTERU

Řídicí systém tricopteru je postaven na 8 bitovém mikrokontroléru ATmega128A. Systém periodicky čte data ze vstupních senzorů a dekodéru řídicího signálu přicházejícího z RC přijímače. Z odchylky mezi řídicím signálem a údaji ze senzorů je vypočtena korekce pro jednotlivé motory. Během jedné iterace stabilizace musí systém několikrát načíst data ze senzorů a aplikovat na ně jednoduchý filtr typu dolní propust' pro odstranění šumu, který senzory generují, a vibrací způsobených motory. Řízení je založeno na PID regulátoru. Pro každý akční prvek je v systému jeden regulátor. Primárně je výstupní hodnota vypočítána z linearizované závislosti, z výše uvedených rovnic. Následně jsou všechny hodnoty upraveny na základě rozdílu naměřených hodnot a povelů operátora. Pro zvýšení účinnosti stabilizace je vhodné počítat nejen s aktuální hodnotou rozdílu ale zahrnout i rychlost změny rozdílu, čímž dojde k omezení kmitání okolo stabilní hodnoty.

Příkazy operátora mohou být systému předávány buďto pomocí modelářské soupravy nebo pomocí bezdrátové emulace sběrnic USART nebo SPI. V případě použití modelářské soupravy je nutné k přijímači soupravy připojit dekodér, který bude převádět PWM signál na 16 bitovou hodnotu délky impulsu, protože mikrokontrolér nemá dostatečný počet volných přerušovacích vstupů a použití poolingu není možné. Všechny použité senzory umožňují komunikace po sběrnici I<sup>2</sup>C, kterou sice mikrokontrolér není vybaven, ale má kompatibilní rozhraní TWI. K řízení regulátorů motorů a serva se používá puls o délce 1000 – 2000  $\mu$ S, který se opakuje každých 20 ms. Jedná se tedy o signál s pulzně šířkovou modulací, který dokáže generovat vnitřní hardware mikrokontroléru.

## 3. ZÁVĚR

V této práci byl popsán návrh řídicího systému pro tricopter. Z návrhu a analýzy vyplývá, že pomocí použitých senzorů je možné vytvořit jednoduchý řídicí systém. Pro účely základní stabilizace polohy jsou použité senzory i mikrokontrolér dostačující, pokud by bylo požadováno přesné řízení rychlosti pohybu, výšky a podobných veličin, bylo by nutné použít senzory s mnohem vyšší přesností a mikrokontrolér s FPU jednotkou.

## PODĚKOVÁNÍ

Tato práce vznikla částečně za podpory výzkumného záměru MSM0021630528.

## REFERENCE

- [1] WINDESTÁL, David. RCExplorer [online]. © 2011 - 2012 [cit. 2012-01-08]. Dostupné z: <http://rcexplorer.se>
- [2] BORENSTEIN, J., H. EVERET., L. FENG., Where am I? Sensors and Methods
- [3] Autonomous quadcopter. LAOROSA [online]. 31.5.2010 [cit. 2011-12-27]. Dostupné z: <http://www.design-laorosa.com/2010/05/autonomous-quadcopter.html>
- [4] ŠVARC, I., M. ŠEDA a M. VÍTEČKOVÁ. Automatické řízení. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 78-80-214-3491-2.