

Návrh a realizace samorozkládací automatické koptery

Bc. Petr Homolka

Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Bušek

Abstrakt

Tento článek popisuje dosavadní práci na autonomním dronu pro soutěž RescueBot. Požadavky na robota kladené pravidly soutěže vyžadují specifický přístup k mechanické konstrukci, elektronice a také k řídicímu softwaru. V práci se zaměřuji na pokročilé řídicí algoritmy a postupy.

Klíčová slova

Koptera, dron, autonomní řízení, Kalmánův filtr, PID regulátor, telemetrie

1. Úvod

Drony a droidi se stávají běžnou součástí dnešního světa. Těmito pojmy jsou označovány létající a pozemní roboti s nějakou minimální implementací samostatnosti či autonomie. Roboti tohoto druhu slouží nejenom pro vojenské účely nebo pro zábavní průmysl. Mohou mít velice důležitý význam pro zdravotnictví, především v případě záchranných misí na těžce přístupných místech. Tomuto zaměření je věnována i soutěž RescueBot.

2. DICEBot a soutěž RescueBot

V rámci studentského projektu DICEBot jsou navrhováni a vyvíjeni roboti především pro soutěž RescueBot. Tato soutěž probíhá každoročně v poušti Black Rock Desert, Nevada. Pravidla soutěže definují dvě kategorie robotů. CanSat pro roboty určené pouze pro sběr dat a OpenClass pro autonomně pohybující se roboty. Náš tým se rozhodl pro účast v kategorii OpenClass. Pro tuto kategorii jsou definována následující pravidla. Robot se musí vejít do nákladového prostoru o tvaru válce s průměrem 5,78 palce (146 mm) a výškou 10 palců (254 mm). Maximální hmotnost je stanovena na 1800 gramů. V této kapsli je robot vystřelen za pomoci rakety do výšky přibližně 10000 ft (3048 m). V okamžiku vrcholu letu rakety jsou otevřeny padáky nesoucí jednotlivé části rakety a robot vlastní vahou vypadne z kapsle. Následně se musí jakýmkoli způsobem, ale plně autonomně dostat na předem stanovené cílové místo. To je dáno přesnými GPS souřadnicemi. Cíl je definován jako okruh 10 metrů okolo této pozice. Vzdálenost mezi místem startu a cíle je proměnná a pohybuje se v rozsahu do šesti kilometrů. Pravidla nijak nedefinují, jakou musí mít robot podobu, či jakým způsobem se musí pohybovat. To je necháno čistě na úsudku tvůrců onoho robota. Vítězem se stává každý tým, jehož robot splňuje tyto požadavky a dosáhne stanoveného cíle.

Jak bylo řečeno, soutěž probíhá v solné poušti. To může evokovat dojem perfektně hladkého povrchu, a tudíž snadného úkolu pro rovery nebo ostatní kolové roboty. Z loňských zkušeností jsme ale vyzorovali naprosto odlišnou realitu. Jelikož přes soutěžní plochu jezdí mnoho automobilů, je v ní veliké množství brázd a zvrásněných ploch. Ty mají také často velmi odlišné povrchové vlastnosti. Proto pro kolové roboty je pohyb po této ploše velmi obtížný a často dojde k zapadnutí či uvíznutí robota. Přesto většina soutěžních týmů volila tuto koncepci pro její počáteční řešitelskou jednoduchost. Náš tým také vyvíjí jednoho takového robota.

Pro mou práci jsem ale zvolil zcela odlišný přístup. Jelikož pohyb po zemi není snadný, zbyla možnost pohybu vzduchem. Tím odpadají problémy pro překonávání pozemních překážek. Ovšem vstupují jiné obtíže, jako je například silný vítr. Létající dron je také mnohem víc ovlivněn celkovou hmotností, která u pozemního robota není příliš důležitá. Největší hmotnost se dá ušetřit na pohonných akumulátorech. Ovšem jejich zmenšením se snižuje i celkový dolet. Proto je velice důležité najít optimální kombinaci velikosti, hmotnosti a doletu. Návrh softwaru pro létajícího drona je také mnohem složitější než pro kolové vozítko. To je dáno především nutností řešit velmi přesně polohu a pozici v třírozměrném prostoru.

Jelikož již mám zkušenosti z konstrukcí a částečně i návrhem softwaru pro koptery, rozhodl jsem se jít touto cestou. Řešení koptery je také výhodné z hlediska možnosti složení do definované kapsle rakety. Kvůli rozměrovému omezení jsem zvolil quadrokopteru pro její mechanickou jednoduchost.

3. Mechanická konstrukce

Mechanickou konstrukci jsem navrhoval s ohledem na co nejvyšší účinnost celé koncepce robota v kontextu kompromisu mezi jeho velikostí a hmotností. Jelikož je koptera omezena její velikostí ve složené podobě, snažil jsem se vytvořit konstrukci, která dovoluje použít co největší vrtule. Jelikož čím větší vrtule jsou použity, tím je dosaženo delšího doletu při stejných napájecích akumulátorech. Důležitým aspektem konstrukce je také její jednoduché a spolehlivé rozevření. V tomto případě je spolehlivost na prvním místě, jelikož pokud nedojde ke správnému rozevření celého rámu, koptera s velkou pravděpodobností havaruje.

Konstrukce prošla mnoha návrhy a simulacemi v 3D modelovacím programu. Nakonec jsem vybral řešení, které splňuje veškeré důležité požadavky na něj kladené a také zachovává celkovou výslednou jednoduchost a potřebnou nízkou hmotnost. S jednoduchým řešením zároveň roste potenciál spolehlivosti. U návrhu jsem musel myslet i na přetížení při startu. Jak bylo řečeno, start probíhá za pomoci rakety, tudíž musí být počítáno s velkým přetížením v počátku startu. K tomu musí být dimenzováno hlavně uchycení pohonných akumulátorů, které jsou nejtěžší součástí drona a mají tedy největší hybnost.

Celá konstrukce je vyrobena z duralových profilů a desek a některé části z uhlíkových trubiček a desek. Je kladen důraz na vyrobitelnost celého rámu na základních výrobních strojích. Koncepce rozevírání je založena na principu deštníku. Ramena jsou spojena vzpěrami a ty jsou uprostřed kluzně uchyceny na posuvném táhle. Na středové části jsou shora neodymové magnety zabezpečující zajištění v rozevřené poloze. Pro otevírací aktuátor jsem uvažoval mnoho řešení. Jako nejlepší jsem zvolil využít sílu od stabilizačního padáku. Toto řešení je konstrukčně nejlhčí

a také nejspolehlivější ze všech uvažovaných. Jelikož padák působí na kopteru silou po celou dobu do jeho odpálení, rám má dostatečné množství času pro správné rozevření.



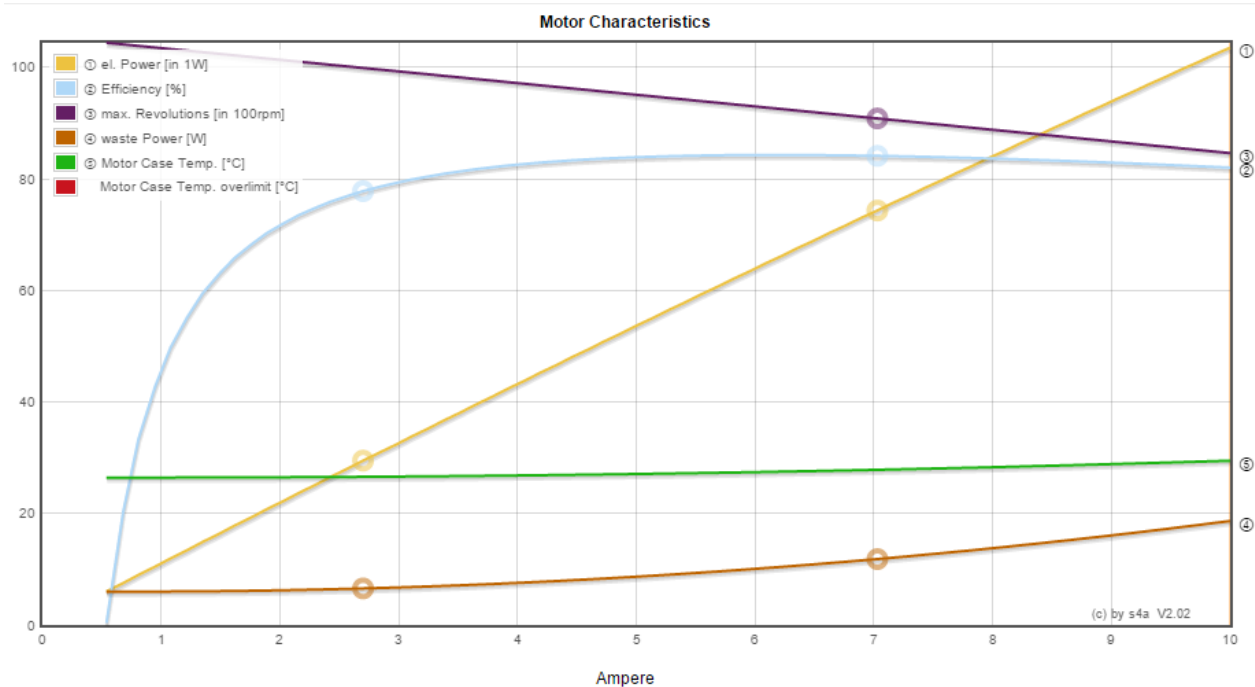
Obr. 1. Rozkládací mechanismus rámu koptery

Největší průměr vrtulí, který se mi povedlo do konstrukce zakomponovat je osm palců. To je již dostatečná velikost pro požadovaný dolet. Účinnost vrtulí se také hodně mění u jednotlivých výrobců a provedení. Pro počáteční testy dostačují levné plastové vrtule. Ovšem pro maximální efektivitu jsou nutné vrtule uhlíkové, vyrobené v přesných formách a precizně vyvážené. Kvůli velkým nárokům na přesnost a výrobní složitost jsou takové vrtule také patřičně drahé.

4. Pohonná elektronika

Po návrhu mechanické části jsem musel navrhnout optimální pohonnou elektroniku odpovídající mechanickému návrhu. Jelikož jsou dnes koptery velmi populární i mezi širokou veřejností, je dostupných komponent velké množství.

K navrženým vrtulím jsem dle zkušeností vybral vhodné přibližné otáčky, které jsem stanovil kolem 1000 kv (otáček na volt). Snaha je dosáhnout co nejmenšího stoupání na vrtuli a co nejnižších pracovních otáček potřebných pro let. Tyto parametry jdou proti sobě, a tudíž je nutné najít vhodný kompromis. K návrhu lze použít některou z volně šířených aplikací, nebo vycházet z tabulek porovnávající jednotlivé varianty. Dle návrhové aplikace, kterou jsem využil, se blíží zvolená konfigurace požadovanému letovému času kolem 10 minut. Dle zkušeností s touto aplikací ale v reálu tato čísla vycházejí lépe. Kontrolery otáček motorů dostačují 10 A, jelikož dlouhodobá zatížení jednotlivých motorů jsou mnohem menší. Kapacita zvolených LiPol akumulátorů v porovnání s hmotností vyšla nejlépe na 4800 mAh pro tříčláňkové zapojení.

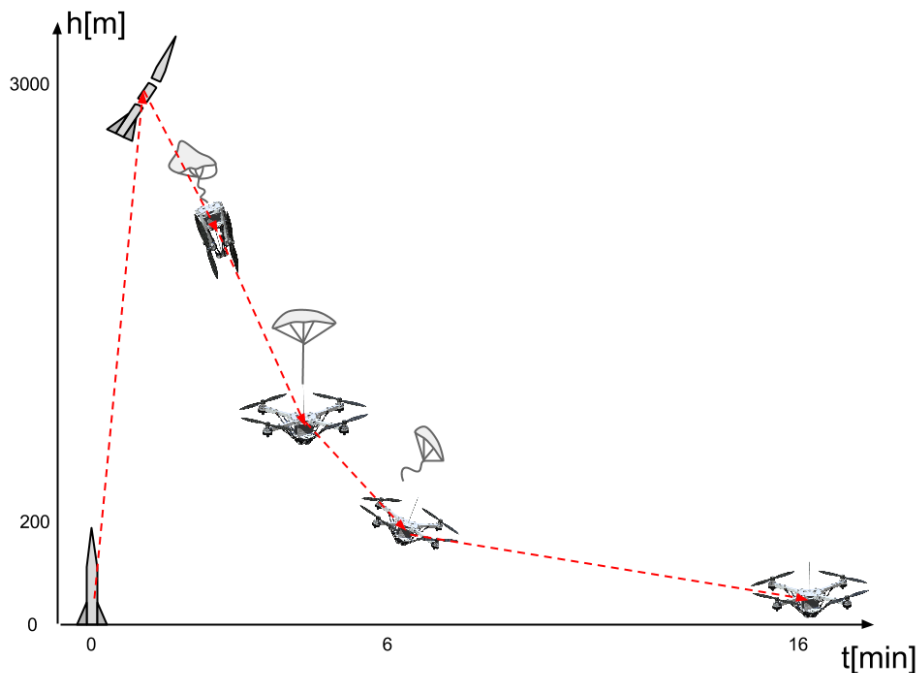


Obr. 2. Charakteristiky z programu eCalc.ch

5. Plán letu

Jelikož efektivnost letu koptery je ovlivněna mnoha vnějšími vlivy, je třeba jeho fáze správně naplánovat. Jak již bylo řečeno, let začíná ve výšce přibližně 10000 ft (3000 m) nad zemí. Poušť se nachází v nadmořské výšce 3907 ft (1191 m). Startovní pozice letu je tedy nad 4000 m nad mořem. V této výšce je již mnohem menší hustota vzduchu než nad zemí. Ve výšce 5 km nad mořem je hustota vzduchu přibližně o čtvrtinu menší než v 1 km nad mořem. Let v této výšce by byl tedy velmi neefektivní. Proto jsem navrhl řešení, kdy celý let za pomoci vlastních motorů koptery se odehrává v blízkosti země, a tedy v místě s nejvyšší možnou hustotou vzduchu.

Ihned po vypadnutí koptery z tubusu rakety se začne nafukovat stabilizační padák. Díky síle v lanku od padáku, působící na posuvné táhlo otevíracího mechanismu, se začne rozevírat rám. Po dosažení výsledné pozice rámu je mechanismus zafixován dosednutím neodýmových magnetů na sebe. Ty poté již nedovolí opětovné složení rámu. Takto rozložená koptera klesá velkou rychlostí bržděná pouze stabilizačním padáčkem do výšky přibližně 200 m nad zemí. V této výšce se využívají data z barometru, který má velký rozsah. Rychlost klesání s padáčkem je volena vyšší z důvodu nebezpečí zanesení větrem dále od požadované cílové pozice. V této výšce jsou softwarově odjištěny a roztočeny motory v minimálních otáčkách. Dále je za pomoci odporového drátu přepáleno nosné lanko padáku. Následuje již samostatný let koptery až nad cílovou polohu. Výška je postupně snižována až k dosahu ultrazvukového senzoru. To znamená let ve výšce pod 10 m nad zemí. Ultrazvukový senzor je volen hlavně kvůli mnohem větší přesnosti oproti barometrickému senzoru. Po příletu nad místo cíle koptera postupně klesá až na zem, kde vypne motory a přejde pouze do telemetrického režimu. Ten vysílá telemetrická data včetně aktuální polohy. To je nezbytné pro případné dohledání koptery při poruše, havárii nebo při přistání na chybném místě.



Obr. 3. Plán letu a jeho fáze v závislosti na výšce a času

6. Řídicí elektronika

Řídicí elektronika je složena z několika prvků. Jádrem je mikrokontrolér, který zpracovává veškerá data a zastává výpočetní jednotku pro řídicí algoritmy. Dalšími neméně důležitými prvky jsou jednotlivé senzory. U nich je důležitá především přesnost a spolehlivost měření, jelikož na mnoha z nich závisí letuschopnost koptery. Posledním, ne již nutným prvkem, je komunikační jednotka. Ta má na starost předávání vybraných telemetrických dat bezdrátově do počítače.

Výběr mikrokontroléru jsem provedl po průzkumu trhu. Zjistil jsem, že pro podobné aplikace se v nejvíce případech používají výrobky od společnosti STm. Mikrokontroléry tohoto výrobce mají širokou uživatelskou základnu. To je nezanedbatelná výhoda pro rychlý vývoj bez delších zdržení. Z těchto důvodů jsem se tedy rozhodl použít právě mikrokontrolér STM32F407. Výpočty provádí mikroprocesor na architektuře ARM. Označení F4 má jedna z nejnovějších produktových řad tohoto výrobce. Typ 407 jsem zvolil z důvodu dostupnosti levného vývojového kytu. Pro finální produkt je plánována vlastní deska, ovšem pro počáteční testování a ladění je řešení na vývojové desce dostatečné.

Nejdůležitějšími senzory jsou 3osý akcelerometr a 3osý gyroskop. Ty dávají dohromady s 3osým magnetometrem kompletní informaci o pozici koptery. Po zanalyzování dostupných senzorů jsem vybral MPU9250. Ten kombinuje v jednom pouzdře všechny tyto senzory dohromady. Výhodou takového řešení je i zjednodušené elektronické zapojení, jelikož čip je zapojen pouze jedním I2C rozhraním s mikrokontrolérem. Všechny senzory pracují na principu MEMS (Micro Electro-Mechanical System). Díky tomu má čip velice malé rozměry. Jednotlivé signály trpí různými druhy chyb, ovšem díky pokročilým algoritmům je možné z nich vypočítat velmi přesné výsledné hodnoty. Tato problematika je rozepsána dále v tomto článku.

Pro měření výšky jsou zapotřebí hned dva senzory. Jedním je barometr, který dává informaci o výšce ve velkém rozsahu a je plně dostačující pro celý let koptery. Ovšem jeho přesnost již není velká. Ta je ale důležitá pouze pro manévr přistávání. Proto jsem přidal ultrazvukový senzor, který má naopak malý rozsah (přibližně 0 až 10 metrů), ale pracuje s velkou přesností. Během loňského ročníku soutěže jsme ověřili poměrně velké změny tlaku mezi dobou startu a přistání. I tato situace vyžaduje dodatečné měření pro úspěšné přistání bez zbytečného protahování či rizika poškození koptery.

Jelikož koptera během soutěže musí pracovat v automatickém (autonomním) režimu, je třeba dodat informaci o její poloze. Ta je získána z GPS modulu. Z něho jsou brány především informaci o zeměpisné délce a šířce. Spojením s výslednou informací z magnetometru dostaneme přesná data o poloze včetně pozice vůči severu. Díky tomu již je možné naplánovat letovou trasu a kopteru podle ní řídit.

7. Výpočetní algoritmy

Jak jsem již zmínil dříve v tomto článku, pro přesné a nezkreslené informace o pozici je třeba signály z akcelerometru a gyroskopu dále matematicky zpracovat. Oba z těchto senzorů mají určitá zkreslení signálu. Akcelerometr je citlivý na vibrace a jeho výstup je často zatížen šumem. Gyroskop na šum naopak příliš netrpí. Oproti akcelerometru podává i rychleji informaci o změně pozice, ale je ovlivněn teplotním driftem, který se mění v průběhu času. Z těchto důvodů se tedy

nejčastěji přistupuje k metodám syntézy signálů z obou těchto senzorů. Pro takovéto řešení jsem se také rozhodl a implementoval ho.

Zmíněný výpočet umožňuje hned několik algoritmů. Já vybral dva nejpoužívanější a porovnal je mezi sebou. Prvním je jednodušší komplementární filtr. Ten je z hlediska programování velice jednoduchý. Výsledky ale poskytuje lepší druhý vybraný, kterým je Kalmánův filtr. Lepší výsledky jsou ovšem vykoupeny mnohem vyšší programátorskou náročností a také následné ladění je složitější.

7.1. Akcelerometrická data

Akcelerometr je použit pro výpočet náklonu koptery vůči horizontální pozici. Jelikož výstupní data z akcelerometru nám udávají zrychlení v jednotlivých osách, je třeba provést jednoduchou úpravu. Jedná se o trigonometrickou úlohu pro nalezení úhlů náklonů v podélné (roll) a příčné (pitch) ose. Použité názvy vycházejí ze zavedené terminologie.

$$roll = \tan^{-1} \left(\frac{X}{\sqrt{Y^2 + Z^2}} \right) \frac{180}{\pi} [deg] \quad (1)$$

$$pitch = \tan^{-1} \left(\frac{Y}{\sqrt{X^2 + Z^2}} \right) \frac{180}{\pi} [deg] \quad (2)$$

7.2. Komplementární filtr

Komplementární filtr dává velice dobrý výsledek na svou jednoduchost. Celý výpočet je v jedné jednoduché rovnici, která se nápadně podobá výpočtu filtru s dolní propustí.

$$\acute{uhel}_k = P(\acute{uhel}_{k-1} + gyrData \cdot dt) + (1 - P)accData [^\circ] \quad (3)$$

Hodnota P je parametr, kterým je nastavena citlivost a rychlost filtru. V praxi má často konstanta P hodnotu blížící se jedné. Toto nastavení je z důvodu zachování rychlosti reakce, která je dána především gyroskopickými daty, a akcelerometrická data jsou použita pouze pro eliminaci driftu v dlouhodobém měřítku.

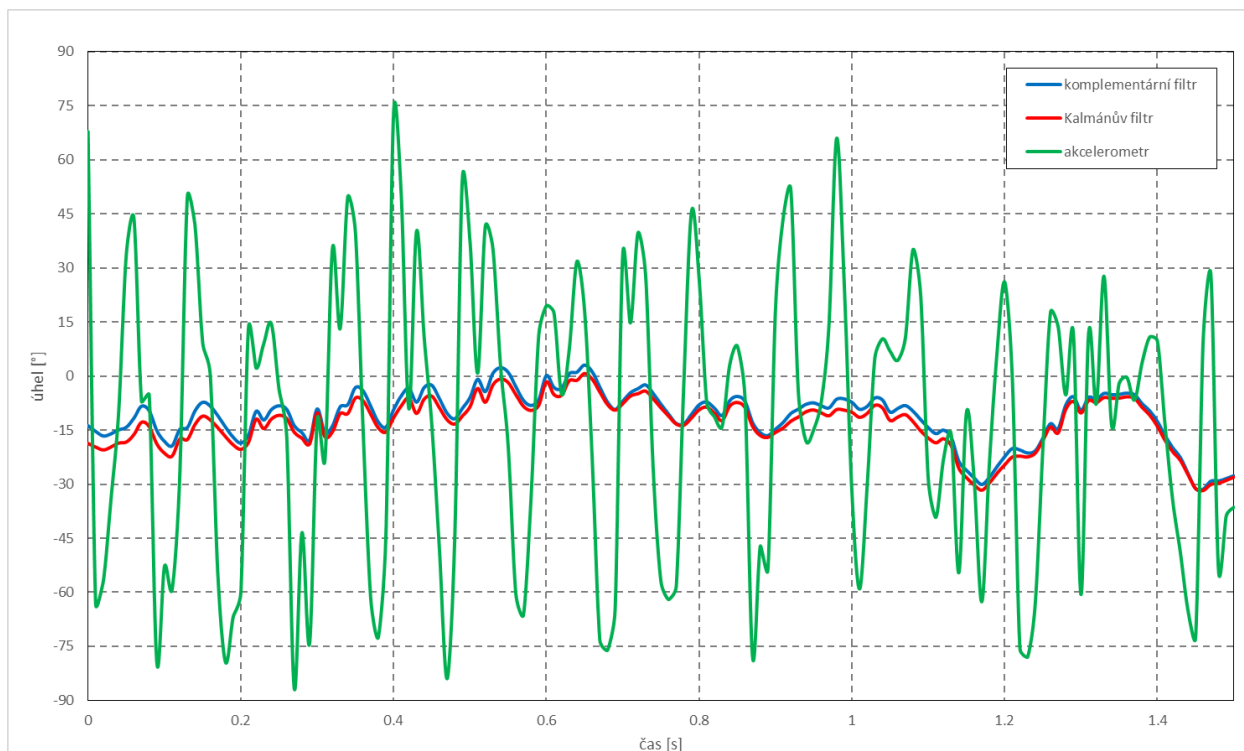
7.3. Kalmánův Filtr

Hlavním přínosem Kalmánova filtru je schopnost podat aktuální hodnotu bez zpoždění. To znamená, že výsledek je počítán pro budoucí stav, nikoli pro současný (minulý). Toho je docíleno algoritmem filtru. Kalánův filtr pracuje s modelem pro predikci budoucího stavu, se současně změřenými daty a s porovnáváním těchto dvou hodnot. Na základě rozdílu těchto dvou hodnot je vypočtena hodnota řídicí, která říká, jak moc která z hodnot ovlivní celkový výsledek.

Pro případ použití Kalmánova filtru pro syntézu signálů z gyroskopu a akcelerometru je nahrazen model signálem z gyroskopu a jako hlavní signál je považován akcelerometr. Rozhodnutí má své opodstatnění v chování těchto signálů. Jelikož gyroskopická data jsou aktuální a reagují rychle na změnu, jsou snadno použitelná pro odhad predikce. Naopak akcelerometrická data vykazují

z dlouhodobého hlediska stabilní a přesný výsledek bez tendence k driftu a mohou být použita jako základ pro porovnání a udržení správné hodnoty bez driftu.

7.4. Porovnání obou filtrů



Obr. 4. Porovnání signálu z Kalmánova a komplementárního filtru

Z naměřeného grafu hodnot je patrné hned několik poznatků. Signál bez filtrace opravdu použit nelze. Druhý a důležitější poznatek ale je, že výsledky filtrů vyšly téměř stejné. Liší se pouze minimálně. Kalmánův filtr vykazuje rychlejší odezvu, ovšem rozdíl je minimální. Výsledek velmi záleží na nastavení obou filtrů. V tomto případě jsem hledal parametry pomocí experimentálního nastavení. To se zdá pro tuto aplikaci dostatečné. Pokud bych ale chtěl využít plný potenciál Kalmánova filtru, nevyhnul bych se využití například metody nejmenších čtverců. Pomocí ní by bylo možné dohledat hodnoty parametrů velice blízko ideálním. Nastavení komplementárního filtru je velice jednoduché, jelikož se mění pouze jeden parametr. Lze tedy dobře nalézt optimum i experimentálně bez využití složitějších metod.

8. Závěr

Z dosavadních výsledků práce je patrné, že zvolený robot má potenciál dosáhnout úspěchu v soutěži, pro kterou je především vyvíjen. Dalším neméně důležitým účelem navrženého robota a především jeho softwarového vybavení (zdrojového kódu a dokumentace k němu) je jeho modularita. Pro specifické požadavky na realizaci robota plynoucí z podmínek soutěže bylo nutné

zvážit mnoho možností řešení dané problematiky. Z navrhovaných možností jsem vybral pro danou aplikaci optimální řešení. Díky modularitě softwarového řešení není složité zaměnit knihovnu za jinou a tím zkoušet nové možnosti navrženého robota. Výsledkem bude tedy robot splňující požadavky na soutěž a zároveň všestranný aparát na reálné testování získaných teoretických poznatků.

Z hlediska posouzení a vyhodnocování použitých algoritmů pro zpracování signálů z inerciální soustavy lze pokládat současný stav za vyhovující, ovšem pro exaktnější a přesnější posouzení bude třeba realizovat ještě další testy. Velikou výpovědní hodnotu také budou mít testy a hlavně získaná data z reálného letu.

Poděkování

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS14/182/OHK2/3T/12.

Seznam symbolů

h	výška nad zemí	(m)
t	čas	(min)
X	příčné přetížení	(G)
Y	podélné přetížení	(G)
Z	vertikální přetížení	(G)
P	parametr komplementárního filtru	(1)
dt	vzorkovací perioda	(s)

Seznam použité literatury

- [1] TKJ Electronics [online] Kristian Lauszus [vid. 8.4.2015] Dostupné z <http://blog.tkjelectronics.dk/2012/09/a-practical-approach-to-kalman-filter-and-how-to-implement-it/>
- [2] eCalc [online] Markus Mueller [vid. 8.4.2015] Dostupné z <http://www.ecalc.ch/xcoptercalc.php?ecalc&lang=en>
- [3] Leonidas Toliás, *Two Dimensional Quadcopter Attitude Estimation using Kalman Filtering of MEMS Accelerometers and Gyroscopes*, leonidastolias.com, [online]. Leonidas Toliás, 2013. [vid. 8.4.2015] Dostupné z http://www.leonidastolias.com/Site/Quadcopter_files/ltolias_filtering.pdf
- [4] ŠULC, B., VÍTEČKOVÁ, M. *Teorie a praxe návrhů regulačních obvodů*. ČVUT 2004. ISBN 80-01-03007-5