



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní



VÍCEVRTULOVÉ PLATFORMY A JEJICH APLIKACE V PRŮMYSLU

Studie na téma multikopter v praxi

Jan Gebauer

Petr Podešva

Pavel Šofer

Ostrava 2012



Tyto studijní materiály vznikly za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu OP VK CZ.1.07/2.3.00/09.0147 „Vzdělávání lidských zdrojů pro rozvoj týmů ve vývoji a výzkumu“.

Název: Vícevtulové platformy a jejich aplikace v průmyslu
Autoři: Jan Gebauer, Petr Podešva, Pavel Šofer
Vydání: první, 2012
Počet stran: 86
Náklad: 1

Studijní materiály pro studijní obor <Název oboru> Fakulty strojní

Jazyková korektura: nebyla provedena.



Tyto studijní materiály vznikly za finanční podpory Evropského sociálního fondu a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu Operačního programu Vzdělávání pro konkurenceschopnost.



Název: Vzdělávání lidských zdrojů pro rozvoj týmů ve vývoji a výzkumu
Číslo: CZ.1.07/2.3.00/09.0147
Realizace: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

© Jan Gebauer, Petr Podešva, Pavel Šofer

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

OBSAH

1	ÚVOD.....	6
2	MULTIKOPTER	7
2.1	Rám.....	8
2.2	Řídicí elektronika	9
2.3	Pohonná jednotka.....	9
2.4	Komunikační moduly a další externí doplňky.....	11
3	ANTI KOLIZNÍ SYSTÉM.....	13
3.1	Definice anti-kolizního systému	13
3.2	Požadavky na anti-kolizní systém.....	14
3.2.1	Oblast nasazení	14
3.2.2	Maximální rychlost pohybu.....	16
3.2.3	Pokrytí prostoru	18
3.3	Senzory	20
3.3.1	Ultrazvukové senzory	21
3.3.2	Radar	24
3.3.3	Laserové senzory	26
3.4	Funkce ve smyslu pokrytí prostoru	29
3.5	Funkce ve smyslu použití.....	29
4	NAVIGAČNÍ SYSTÉM.....	30
4.1	Kosmický segment systému GPS	30
4.1.1	GPS Block IIA.....	31
4.1.2	GPS Block IIR.....	31
4.1.3	GPS Block IIR(M)	31
4.1.4	GPS Block IIF	31
4.1.5	GPS Block III.....	31
4.2	Řídicí segment systému GPS	32
4.2.1	Hlavní řídicí stanice.....	32
4.2.2	Monitorovací stanice	33
4.3	Uživatelský segment systému GPS.....	34
4.3.1	Turistické GPS přijímače	35
4.3.2	Námořní GPS přijímače.....	35

4.3.3	Letecké GPS přijímače.....	36
4.4	Signály vysílané GPS družicemi.....	36
4.4.1	Navigační zpráva	38
4.4.2	Zpracování přijatého signálu	39
4.5	Zpřesňování GPS.....	40
4.6	Diferenciální GPS systémy	41
5	NAVIGAČNÍ SYSTÉM GALILEO	43
5.1	Kosmický segment systému Galileo	43
5.2	Pozemní segment systému Galileo	44
6	SIMULAČNÍ MODEL	45
6.1.1	Otáčky rotorů ($U1[N]$)	46
6.1.2	Klonění ($U2 [N m]$)	47
6.1.3	Klopení ($U3 [N m]$)	47
6.1.4	Otočení ($U4 [N m]$)	48
6.1.5	Eulerův-Newtonův model	49
6.1.6	Algoritmy regulace	53
6.1.7	Cíl regulace.....	54
6.1.8	PID algoritmus.....	56
6.1.8.1	Regulace naklonění:	57
6.1.8.2	Regulace naklopení:	57
6.1.8.3	Regulace otočení:	58
6.1.8.4	Regulace výšky:	58
6.1.9	Seřízení regulátorů	59
6.2	BLDC motor	64
6.2.1	Modelování BLDC motoru	65
6.2.2	Technologie snímání EMF	69
6.2.3	Model aerodynamických prvků	70
7	PRAKTICKÁ VYUŽITÍ	75
7.1	Případ první - Vzdušný jeřáb	75
7.2	Případ druhý - Sledování pohybujících se objektů	76
	Navigace na pohyblivý cíl pomocí GPS	76
	Navigace na pohyblivý cíl pomocí zpracování obrazu	77
	Navigace na statický cíl.....	77

7.3	Případ třetí - Měření kvality ovzduší	78
7.4	Případ čtvrtý - Monitorování událostí	78
7.5	Případ pátý - Dopravní prostředek	80
8	ZÁVĚR.....	83
9	POUŽITÁ LITERATURA.....	84

1 ÚVOD

Tato případová studie vznikla za účelem seznámit čtenáře s problematikou vícevrtulových platform – multikopterů. Multikopter je nový typ létajících strojů, který se začíná dostávat do povědomí veřejnosti. Svými vlastnostmi a letovými schopnostmi se řadí mezi VTOL (Vertical Take Off and Landing) stroje, tedy stroje s kolmým startem i přistáním. Letovými vlastnostmi se nejvíce podobá koaxiálním nebo tandemovým helikoptérům (dva protiběžné hlavní rotory).

V této studii se čtenář blíže seznámí s možnostmi těchto zařízení. Jde o popis hlavních částí, jejich propojení a možné využití v praxi. V úvodní části práce je stručně popsáno zařízení multikopter s variabilním počtem rotorů, které je postaveno na komerční řídicí jednotce Nanocopter. Multikopter je výukový produkt, který je výsledkem výzkumu VŠB-TUO. Významná část práce se věnuje řízení a regulačním algoritmům používaným ke stabilizaci polohy multikopteru v prostoru. Dále se čtenář seznámí s možnostmi satelitní navigace a anti-kolizního systému pro létání v uzavřených prostorech, který je významným prvkem pro bezpečnost provozu.

Tým autorů se při tvorbě studie zaměřil na tyto cíle:

- Seznámit čtenáře s vnitřní strukturou a zapojením elektronických komponent.
- Vymezit možnosti multikopteru při aplikaci v průmyslu.
- Charakterizovat výhody a nevýhody vícevrtulového pohonu.
- Definovat systém pro zvýšení bezpečnosti provozu.
- Nastínit možnosti konkrétního využití.

2 MULTIKOPTER



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- ✚ Popsat konstrukci multikopteru.
- ✚ Definovat pojmy z problematiky vícevrtulových zařízení.



Popis multikopteru

Multikopter je vícevrtulová platforma, která je schopna operovat ve vzdušném prostoru. Pro účely vývoje a výzkumu nových technologií a regulačních procesů byl sestrojen variabilní model vícevrtulového vrtulníku. Tento model je založen na hliníkovém modulárním rámu. Je možné sestavit model s různým počtem ramen a motorů. Každé rameno může nést jeden nebo dva motory. Současné možnosti multikopteru jsou závislé na konfiguraci jeho jednotlivých komponent. Mezi základní stavební prvky multikopteru patří:

- Šasi
- Řídicí elektronika
- Pohonné jednotky
- Komunikační moduly



Obr. 2.1 Multikopter se šesti rameny

2.1 Rám

Základem konstrukce multikopteru je samosvorný **středový náboj** z hliníku, jehož hlavním úkolem je pevně držet jednotlivá ramena s motory. Tato střední část má různá provedení v závislosti na požadovaném počtu ramen multikopteru. V současné době je možné z dostupných komponent vytvořit platformu se třemi až osmi rameny. Středový náboj v sobě ukrývá hlavní řídicí jednotku, GPS navigační jednotku, a je také nosičem všech externích komponent, baterií a komunikačních modulů.



Obr. 2.2 Středový náboj s osmi otvory

Ramena jsou dostupná v různých délkách, čímž je zajištěno bezproblémové osazení více motorů s různými průměry vrtulí.



Obr. 2.3 Ramena multikopteru různých délek

Držáky motorů jsou opět samosvorné náboje, které v sobě ukrývají frekvenční měniče pro pohon motorů. Držák má schopnost držet i dva motory současně. Tato možnost se využívá ve speciálních konfiguracích motorů. Každý držák je vybaven stavovou LED, která mimo jiné slouží k určení orientace platformy v prostoru – bílá LED je vždy vpředu, červená vždy vzadu.

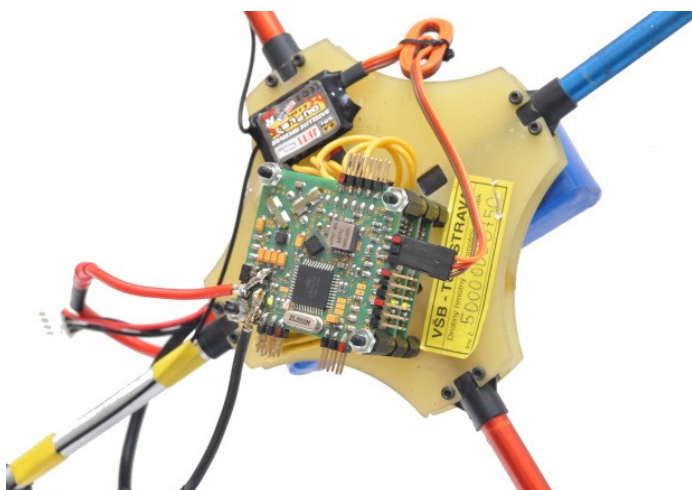


Obr. 2.4 Držák motoru

2.2 Řídicí elektronika

Pro všechny nezbytné funkce multikopteru se využívají jednočipové počítače.

Hlavní řídicí jednotka má za úkol stabilizovat model v prostoru. K tomu se využívá inerciální navigační systém, který je složen z MEMS senzorů (gyroskopy, akcelerometry, magnetometry, barometr). Tato jednotka se dále stará o příjem signálu z dálkového ovladače, nebo PC.



Obr. 2.5 Hlavní řídicí jednotka

Navigační jednotka je ve spojení s GPS určena k polohování multikopteru v prostoru. Tato jednotka umožňuje zafixovat model na požadovaných souřadnicích, nebo létat po nastavených trajektoriích. V současné době se pracuje na vývoji nového navigačního modulu s přesnou D-GPS a také s RTK-GPS jednotkou. S jejich přesností je možné polohovat s multikopterem v prostoru s přesností na 0,8m resp. 0,02m.

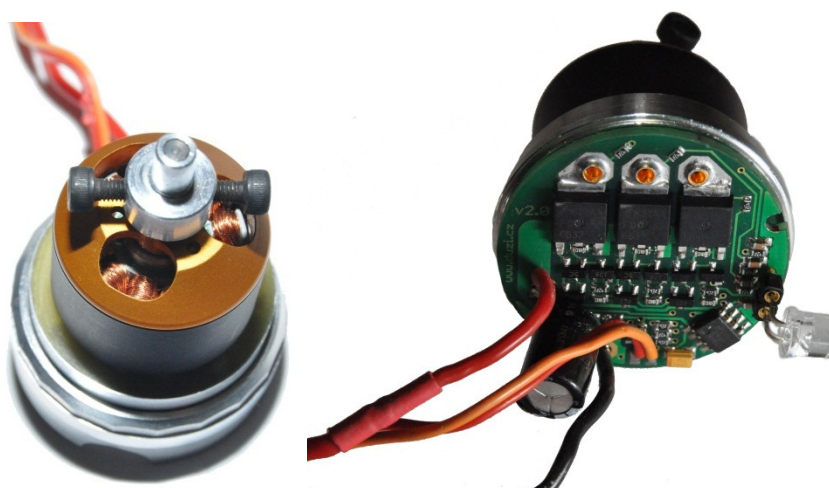
2.3 Pohonná jednotka

Zajišťuje správný chod motoru s vrtulí. Pojmem pohonná jednotka je myšlen celek vrtule-motor-řídicí jednotka motoru.



Obr. 2.6 Sestavená pohonná jednotka vrtule-motor-měnič

Každý **motor** má svou vlastní řídicí jednotku, která je umístěna přímo v držáku motoru. Jde o plně digitální měniče, které jsou s hlavní jednotkou propojeny pomocí obousměrné datové sběrnice. Tento způsob řízení motoru výrazně zrychluje odezvy na požadavky ze strany hlavní řídicí jednotky.



Obr. 2.7 Uložení motoru + regulátor motoru

Vlastnosti **vrtule** výrazně ovlivňují výsledné chování platformy. Hlavními parametry vrtule jsou průměr a stoupání. Zatímco stoupání ovlivňuje celkové zrychlení (se stoupáním je to podobné jako u řazení automobilu – první rychlostní stupeň zajistí rychlé odezvy na změny otáček motoru, zatímco pátý rychlostní stupeň výrazné dynamické změny rychlosti nedovolí), průměr vrtule ovlivní celkový možný tah.



Obr. 2.8 Různé rozměry vrtulí

2.4 Komunikační moduly a další externí doplňky

Multikopter lze ovládat manuálně pomocí dálkového ovládání. Pro komunikaci se používá obousměrná komunikace na frekvenci 2,4GHz. Modul, který je součástí multikopteru má na svém výstupu standardní PPM signál.



Obr. 2.9 Dálkový ovladač s obousměrnou komunikací

Dále je možné komunikovat s multikopterem pomocí bezdrátového spojení **WiFi** přímo s počítačem. Lze tak zobrazovat telemetrické údaje a operativně navigovat model podle GPS souřadnic.

O přenos videa se stará 1,2GHz vysílací modul. Výsledný obraz je možné ukládat na různá média, nebo jej lze použít k ovládání modelu v reálném čase a to s pomocí video-brýlí.



Obr. 2.10 Video-brýle pro řízení v reálném čase ve velkých vzdálenostech



Zajímavost k tématu

Multikopter lze vybavit i moduly pro **sběr dat a měření** analogových hodnot – tlak, teplota, vlhkost apod.

3 ANTIKOLIZNÍ SYSTÉM



Čas ke studiu: 4 hodiny



Cíl: Po prostudování této kapitoly budete umět

-  Popsat schéma anti-kolizního systému.
-  Charakterizovat vlastnosti a potřeby pro bezpečnost provozu.

V této kapitole bude popsána problematika anti-kolizního systému pro Multikopter. Multikopter je sám osobě poměrně křehká, ve výšce či rychle se pohybující struktura, navíc osazená rotory konajícími několik tisíc otáček za minutu. Jakákoliv kolize s pevnou či jinou překážkou může fatálně narušit řízení stability, způsobit poškození multikopteru či jiného předmětu, anebo dokonce ohrozit osoby v dané oblasti. Kolizím je tedy nutné se bezpodmínečně vyhnout.

V současné době se za běžných okolností o takovéto nebezpečné situace musí postarat sám pilot, nebo se v případě autonomního UAV letícího ve výškách a v otevřeném prostoru, možnost kolize zanedbává.

V opačném případě je nutné využít systému složeného ze senzorů a vyhodnocující jednotky. Tento systém detekuje překážku a umožní se jí vyhnout podle předem definovaného algoritmu. Anti-kolizní systém není navigační systém, účelem není hledání nové trasy při detekci překážky. Problematika hledání trasy je velmi rozsáhlá a má svou vlastní komplexní oblast řešení. Anti-kolizní systém však může s navigačním systémem spolupracovat.

3.1 Definice anti-kolizního systému

Anti-kolizní systém je systém sloužící k detekci blízkých objektů v okolí trasy pohybu zařízení a to zejména ve směru pohybu. Skládá se ze zejména ze senzorů schopných měřit vzdálenost nebo relativní rychlost a procesoru zpracovávajícího tyto informace. Procesorem může být samostatný jednoúčelový mikrokontroler, nebo hlavní procesor kopteru, pokud je k tomu vybaven dostatečným množstvím vstupních portů a výpočetním výkonem.

S anti-kolizními systémy se můžeme setkat zejména v letecké, lodní a automobilové dopravě. Dále jsou velmi důležitou součástí strojů z oblasti hutní a důlní dopravy.

- Letecká doprava – zde se anti-kolizní systém skládá primárně ze sítě pozemních radarů řízení letecké dopravy. Dále bývají letouny vybaveny směrovým radarem s vyzařováním směrem vpřed. Za součást anti-kolizního systému je považována i soustava barevných signálních světél o normovaném umístění na těle letounu, jež vizuálně předává informaci o pohybu letounu.
- Lodní doprava – lodě bývají vybaveny plošným dálkovým radarem a radiolokátorem s odpovídacím identifikačním znakem. Autopilot napojený na navigační systém v případě narušení předdefinované trasy změní kurz dle pravidel platných pro lodní

dopravu. Velké nákladní lodě jsou v dnešní době také vybaveny laserovými radary a 3D skenery, určenými k přesnému skenování prostoru okolo lodi při dokování.

- Automobilová doprava – klasickým příkladem anti-kolizního systému u automobilů je parkovací radar sloužící k měření vzdálenosti od překážky při couvání. Tento systém má mnoho podob od jednoduchých ultrazvukových dálkoměrů po dvourozměrné laserové skenery. Zejména u moderních autonomních dopravních vozidel, pohybujících se po předem definované trase, přichází na řadu také čelní senzory, bez nichž by nebylo možné zabránit srážce v případě náhodné události. Nejlevnější variantou byly taktilní senzory registrující překážku dotekem, nebo pouze systémy detekující až otřes při nárazu. V posledních letech stoupá zájem o plně autonomní vozidla ať už v oblasti osobní či nákladní dopravy, ale také v oblasti armády. Zde přichází ke slovu opět zejména laserové radary schopné sledovat okolí v rovině pohybu vozidla a čelní vysokorychlostní dálkové směrové radary.

3.2 Požadavky na anti-kolizní systém

Základním parametrem určujícím strukturu anti-kolizního systému je oblast, ve které je multikopter nasazen. Z oblasti nasazení totiž vychází rizika a překážky, proti kterým je třeba zařízení chránit, což ovlivňuje požadavky na fyzikální vlastnosti senzorů, jejich rozmístění na zařízení. V zásadě jsou zde tyto otázky:

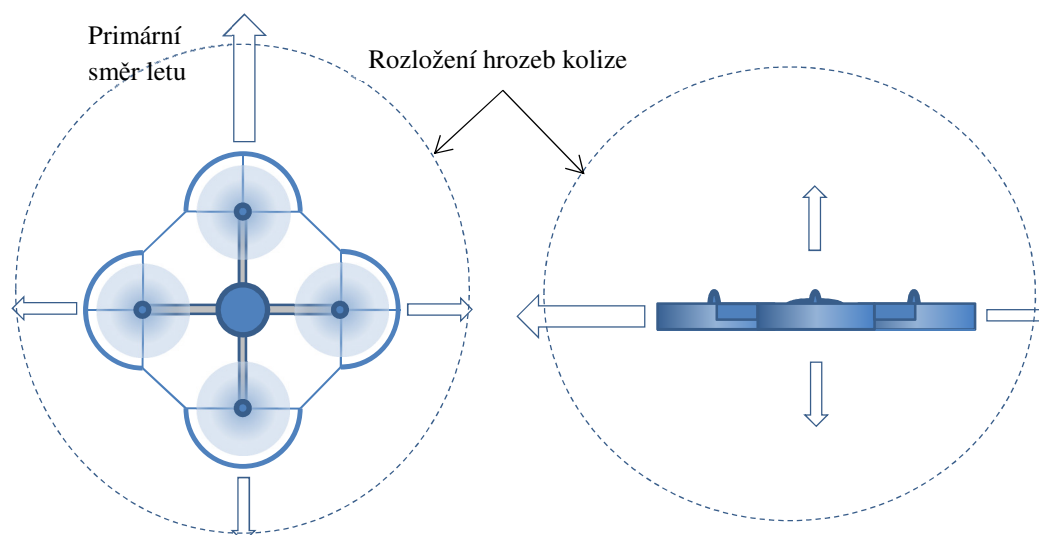
1. Jaké jsou hrozby v daném prostředí.
2. Jaká je maximální rychlost pohybu, při které je senzor chopen včas detekovat překážku.
3. Jaká je spolehlivost detekce překážky určená pokrytím prostoru okolo stroje senzory.

3.2.1 Oblast nasazení

Prostředí, ve kterých se může zařízení pohybovat lze zjednodušeně rozdělit do tří skupin, přičemž každé obsahuje jiné hrozby a jiné požadavky na anti-kolizní systém:

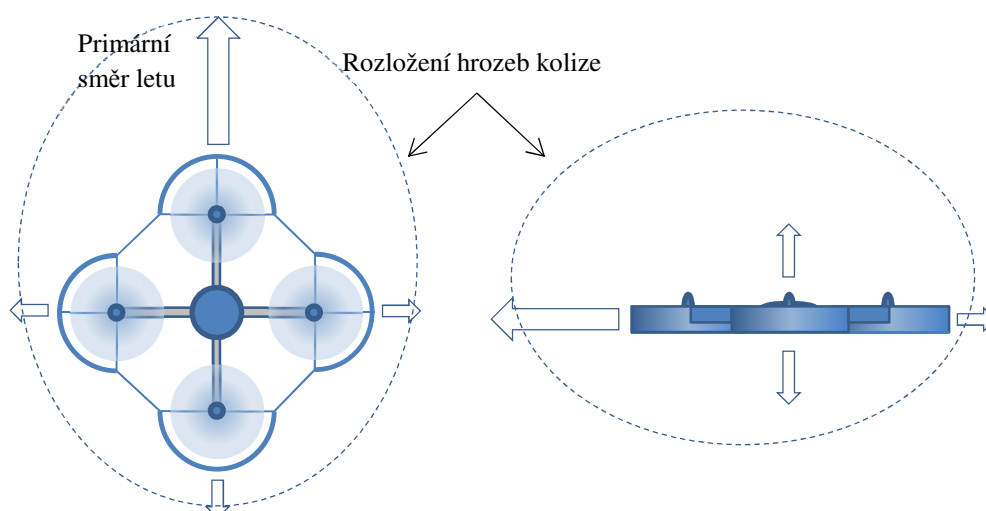
- Uzavřený prostor – multikopter zde má velmi nízký manévrovací prostor ve všech osách. Rychlost pohybu proto může být pouze velmi nízká, v rámci $0,5$ až $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ v případě rozlehlejších hal. Riziko kolize je velmi vysoká, k navigaci v budově je třeba využít jiný systém než GPS, který je bez přímé viditelnosti na oblohu nepoužitelný. Rozložení hrozby kolizí v prostoru při typickém pohybu v uzavřeném prostoru je zobrazen na Obr. 3.1. Problematické bude také využití výškoměru, založeného na barometru, kvůli neustálým změnám tlaku působením samotného multikopteru i proudění v budově. Výhoda uzavřeného prostoru je v odstínění slunečního záření, které snižuje spolehlivost nebo úplně znemožňuje použití infračervených optických senzorů. V budovách nelze spoléhat na radarové senzory, protože jsou zde přítomny materiály jako je plast, nebo sklo, přes které těmito materiály prochází, nicméně i tohoto lze za určitých okolností využít. Za nejvhodnější lze považovat 2D a 3D laserové skenery a ultrazvukové dálkoměry. Na vzdálenost do 3 m , typickou pro tuto skupinu, bude možné použít i infračervené dálkoměry a skenery. Bude nezbytné pokrytí prostoru skenery ve všech osách, protože hrozí kolize s předměty s malou plochou, jako jsou stojany, regály, svítidla a podobně. Pro

optické senzory (laser, IR) jsou rizikem antireflexní materiály, například filtry obrazovek. Pro snížení počtu senzorů, bude nutné využít algoritmy provádějící skenování prostoru, které jsou však mnohem složitější než pouhá detekce přítomnosti překážek.



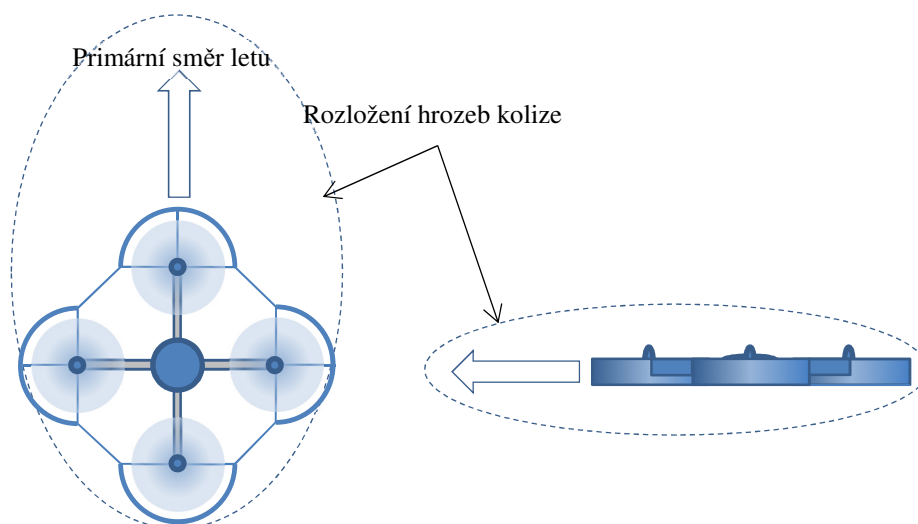
Obr. 3.1 Rozložení hrozby kolizí v prostoru při pohybu v uzavřené místnosti

- Otevřený prostor, malá výška – jedná se o výšku přibližně do 30 m. Zde je nutné očekávat podobná rizika jako v uzavřeném prostoru, navíc s přítomností slunečního světla rušivého zejména pro infračervené senzory. Rozložení hrozby kolizí v prostoru při pohybu v otevřeném prostoru je na Obr. 3.2 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..** K navigaci lze využít GPS, nicméně v okolí mohou být stavby, stromy a další objekty rušící signál. Opět budou největší hrozbou předměty s malou plochou, jakou jsou drát, sloupy a zejména organické materiály jako keře a větve stromů. Z tohoto ohledu může být otevřený prostor rizikovější než uzavřený, protože jelikož se zařízení pohybuje po větší ploše, bude nutné zvýšit i rychlost pohybu. To výrazně zvyšuje náročnost na detekci překážek a znemožňuje z časových důvodů provádět opakované zastavování a skenování prostoru. Opět bude nutné provádět detekci ve všech směrech včetně svislého, kvůli hrozcí kolizi například s větvemi stromů při stoupání. Nebude však nutné se příliš zaměřovat na boční senzory, neboť největší riziko bude ve směru dopředném a svislém.



Obr. 3.2 Rozložení hrozby kolizí v prostoru při pohybu v otevřeném prostoru v malých výškách.

- Otevřený prostor, velká výška – ve výšce nad 30 m lze předpokládat, že většina pozemních hrozeb pominula. Je-li multikopter určen primárně pro let nad touto hranicí, lze předpokládat, že naprostá většina času bude tvořena rychlým dopředním letem a udržováním konstantní pozice. Lze se tedy senzory zaměřit zejména na prostor ve směru letu, zejména senzory s větším dosahem. Nejkritičtější fází letu bude start a přistání. Bude zde nutné vhodně naplánovat trasu tak aby se hrozba kolize v těchto fázích eliminovala.



Obr. 3.3 Rozložení hrozby kolizí v prostoru při pohybu v otevřeném prostoru ve velkých výškách

3.2.2 Maximální rychlost pohybu

Jeden z faktorů pro určení maximální rychlosti pohybu v_{max} je dán poměrem dosahu senzoru ve směru pohybu, jeho periody měření a požadavkem na včasné zachycení překážky. Vzdálenost, ve které je požadováno zachycení překážky, lze definovat absolutně, nebo

relativně. Relativní definice může být výhodnější, neboť u senzorů s větším dosahem lze tolerovat nižší frekvence měření, protože i tak bude bezpečná vzdálenost zachována.

Za předpokladu, že je požadováno zajištění detekce překážky nejpozději v bezpečné vzdálenosti 0,8 rozsahu senzoru, lze určit, jakou maximální rychlostí se může stroj pohybovat při frekvencích měření a dosazích typických pro skupiny běžných senzorů. Koeficient 0,8 byl zvolen tak, aby byla zajištěna dostatečná bezpečnost. Rovnice určení maximální rychlosti pohybu jsou:

$$v_{max} = \frac{l \cdot (1 - k)}{T} \quad 3.1$$

$$v_{max} = \frac{l - l_{min}}{T} \quad 3.2$$

kde:

v_{max}	Maximální rychlost pohybu	$[m \cdot s^{-1}]$
l	Spolehlivý dosah senzoru	$[m]$
k	Koeficient bezpečnosti, podíl minimální vzdálenosti překážky od senzoru a dosahu senzoru	$[-]$
l_{min}	Minimální vzdálenost od senzoru, kde je detekována překážka	$[m]$
T	Perioda měření senzoru	$[s]$

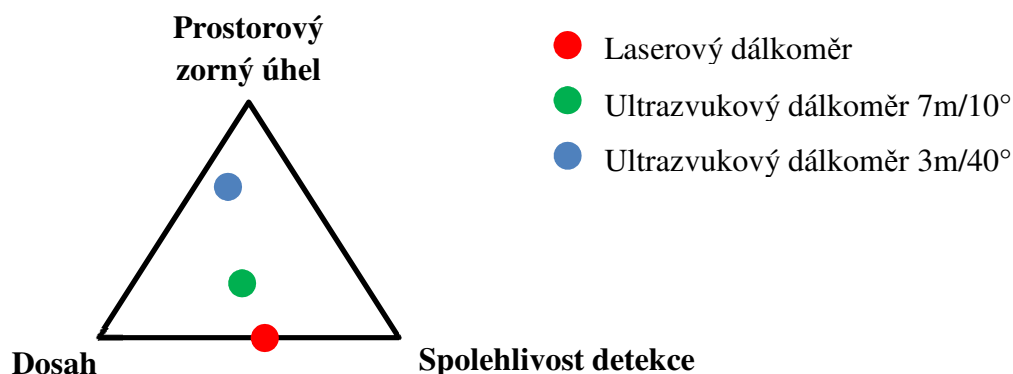
Následující tabulka (Tabulka 3-1) obsahuje příklady zástupců různých typů senzorů a jejich vlastností. Nejsou zde zahrnuty zorné úhly, které jsou velmi důležité, ale ne pro výpočet rychlosti. Všechny vybrané senzory mají přesnost vyšší v rámci centimetrů až milimetrů a v nejhorším případě lepší než 0,02 m (ultrazvukové senzory), což je pro potřeby anti-kolizního systému více než dostatečné.

Tabulka 3-1

Senzor	Dosah senzoru	Perioda měření	Koeficient bezpečnosti	Maximální rychlost	Bezpečná vzdálenost
	[m]	[s]	[-]	[m·s ⁻¹]	[m]
Ultrazvukový dálkoměr SR04	3	0,06	0,8	10	2,4
Ultrazvukový dálkoměr SR07	7	0,06	0,8	23,3	5,6
Laserový skener 240° URG-04LX	4	0,1	0,8	8	3,2
Laserový 3D skener 90°x240° URG-04LX na servu	4	1	0,8	0,8	3,2
Laserový dálkoměr LDM301	100	0,0005	0,8	40000	80
Infračervený dálkoměr GP02Y0A	2	0,05	0,8	8	1,6
Infračervený skener Kinect	3	0,2	0,8	3	2,4

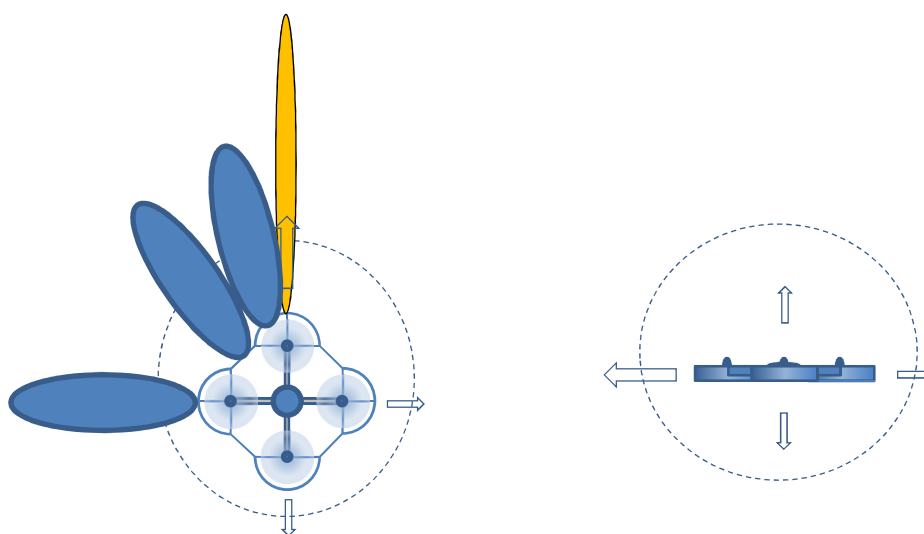
3.2.3 Pokrytí prostoru

V ideálním případě by měly pracovní oblasti senzorů tvořit celistvou kulovou plochu okolo multikopteru. V reálném světě toto však kvůli fyzikálním omezením a také ceně senzorů aplikovat nelze. Různé druhy senzorů, v řádově stejné cenové a váhové kategorii, jsou schopné při požadované spolehlivosti pokrýt určitý zorný úhel na omezenou vzdálenost. Vždy je nutné obětovat některou schopnost ve prospěch jiných. Platí zde úměra zobrazená trojúhelníkem na Obr. 3.4. Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.. V rozích trojúhelníku jsou naznačeny zvolené parametry, čím blíže je bod představující určitý senzor danému rohu, tím větší má parametr váhu. Výjimku tvoří plnohodnotný laserový 3D skener, který dominuje v zobrazených parametrech, avšak na úkor rychlosti.



Obr. 3.4 Trojúhelník parametrů senzorů

Pro maximální pokrytí prostoru okolo multikopteru je třeba využít senzory s co největším prostorovým zorným úhlem. Například laserový dálkoměr je velmi přesný, má velmi velký dosah a frekvenci měření, ale měří pouze bodově. Oproti tomu radarový či ultrazvukový senzor je pomalejší, s relativně malým dosahem a nižší spolehlivostí, protože odraz je závislý na velikosti, materiálu a úhlu odrazové plochy překážky. Spolehlivost přitom klesá s rostoucím vyzařovacím úhlem. Jelikož různé senzory vynikají v různých oblastech, je přirozené využití kombinace více typů současně. Příklady konfigurací jsou následující:



Obr. 3.5 Příklad konfigurace senzorů na multikopteru

Tabulka 3-2 obsahuje přehled typických zástupců různých skupin senzorů vhodných pro anti-kolizní systém a jejich zorných úhlů. Je třeba mít na paměti, že u senzorů, které neměří bodově, dochází ke ztrátě citlivosti na překážky s rostoucím zorným úhlem.

Tabulka 3-2 Přehled senzorů a jejich pracovních oblastí

Senzor	Dosah senzoru	Perioda měření	Pracovní oblast
	[m]	[s]	[-]
Ultrazvukový dálkoměr SR04	3	0,06	kužel 40°
Ultrazvukový dálkoměr SR07	7	0,06	kužel 15°
Laserový skener 240° URG-04LX	4	0,1	rovina 240° tvořeno body
Laserový 3D skener 90x240° URG-04LX na servu	4	1	prostor 90° x 240° tvořeno body
Laserový dálkoměr LDM301	100	0,0005	bod 1,7 mrad
Infračervený dálkoměr GP02Y0A	2	0,05	kužel 20°
Infračervený skener Kinect	3	0,2	prostor 45° x 58° tvořeno body

3.3 Senzory

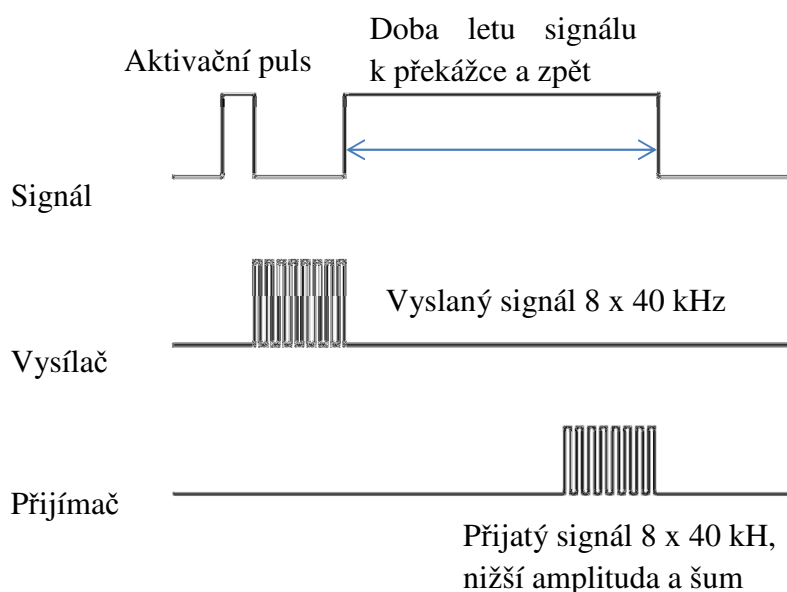
Jak již bylo řečeno, existuje řada senzorů pracujících na rozdílných principech s různými silnějšími a slabšími vlastnostmi. Lze je rozdělit do skupin dle charakteristiky pracovní oblasti a získaných informací:

- dle rozsahu
 - krátký dosah – testování blízkého okolí na přítomnost akutní hrozby. Nižší cena, rozměr a váha.
 - dlouhý dosah – pro úpravu plánované trasy.
- dle tvaru snímané plochy
 - bodové – pro přesné měření vzdálenosti překážek (laserový dálkoměr, usměrněný ultrazvukový dálkoměr).
 - plošné – pro detekci hrozby ve větším rozsahu a předmětů s menšími rozměry. (ultrazvukový dálkoměr, skener.).

- dle získaných informací
 - vzdálenost – jen informační (ultrazvukový, laserový dálkoměr)
 - vzdálenost a úhel – pro přesnou navigaci (2D skener)

3.3.1 Ultrazvukové senzory

Tyto senzory pracují na principu měření času, za který se vyslaný zvukový impuls o vysoké frekvenci odrazí od překážky a vrátí zpět do přijímače senzoru. Vysílač a přijímač jsou tvořeny piezoelektrickým oscilátorem, který působením střídavého napětí generuje vysokofrekvenční vlnění a naopak působením vlnění oscilátor generuje proud. Princip měření je naznačen na Obr. 3.6.



Obr. 3.6 Princip měření ultrazvukovým senzorem.

Po změření doby letu signálu a znalosti rychlosti vzduchu v daném prostředí se vzdálenost předmětu určí z rovnic:

$$v_{\tau} = (331,57 + 0,607 \cdot \tau) \quad 3.3$$

$$l = \frac{v_{\tau} \cdot t}{2} \quad 3.4$$

kde:

v_{τ}	Rychlost vzduchu za teploty τ	$[m \cdot s^{-1}]$
τ	Teplota vzduchu	$[m]$
l	Vzdálenost překážky	$[m]$
t	Čas mezi vyslaným a přijatým signálem	$[s]$

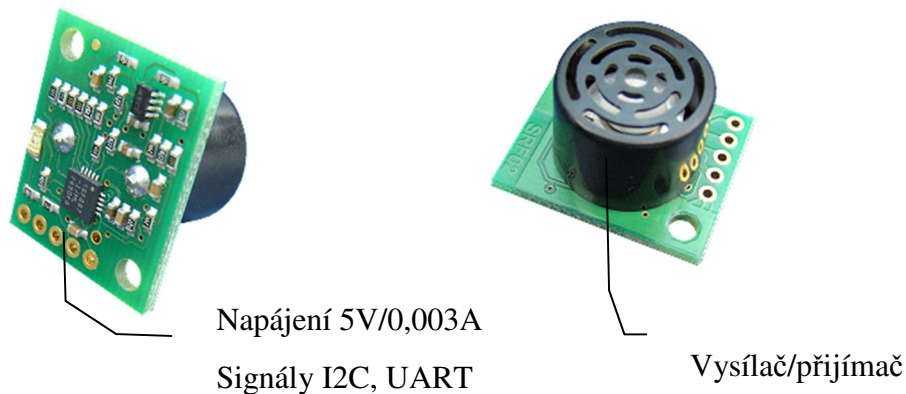
Některé senzory jsou schopny autokorekce tepelného koeficientu rychlosti, nebo jsou nastaveny konstantně na teplotu, např. 20 °C. Bez korekce odpovídá odchylka 1 °C chybě přibližně 0,19 % z rozsahu, což dá při dosahu 5 m a odchylce 10 °C rozdíl 9 cm.

Výhoda těchto senzorů je v jednoduchosti použití, pokrytí většího prostoru, poměrně nízké ceny a nízké hmotnosti i doby měření vzorku. Malý piezoelektrický senzor o příkonu 0,015 W s úzkým vyzařováním může mít dosah až 15m při 10° pracovní oblasti, nebo naopak při krátkém dosahu 2m pracovní oblast v kuželu 60°.

Nevýhodou je citlivost měření na teplotu prostředí i senzoru a rušivé proudění vzduchu, zejména kolmého na směr vyslaného signálu. Další nepříjemnou vlastností ultrazvukových senzorů je citlivost na úhel a velikost odrazové plochy.

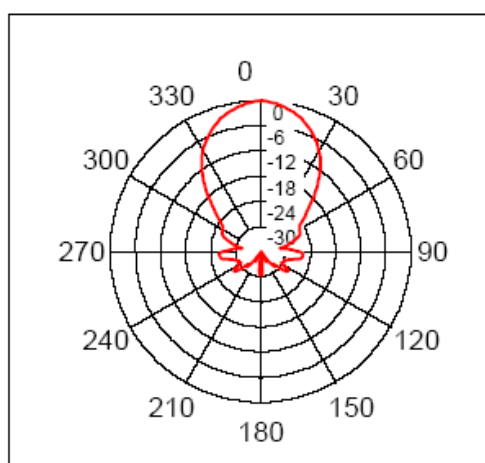
Existují dva typy konstrukcí ultrazvukových senzorů:

- se sjednoceným vysílačem/přijímačem – Oscilátor vygeneruje sérii pulsů a poté se přepne do režimu přijímače. Toto přepnutí vyžaduje určitý čas na ustálení, proto tyto senzory mají dolní limit změřené vzdálenosti. Výhodou je menší rozměr a větší přesnost. Příkladem je senzor SRF02 s vyzařovacím úhlem 55° a pracovním rozsahem měření 0,18 až 2,5 m. Tento senzor má datový výstup po sběrnici UART nebo pomocí protokolu I2C jenž umožňuje číst data z paměti, ale také nastavit parametry jako je teplota a jednotka vzdálenosti.



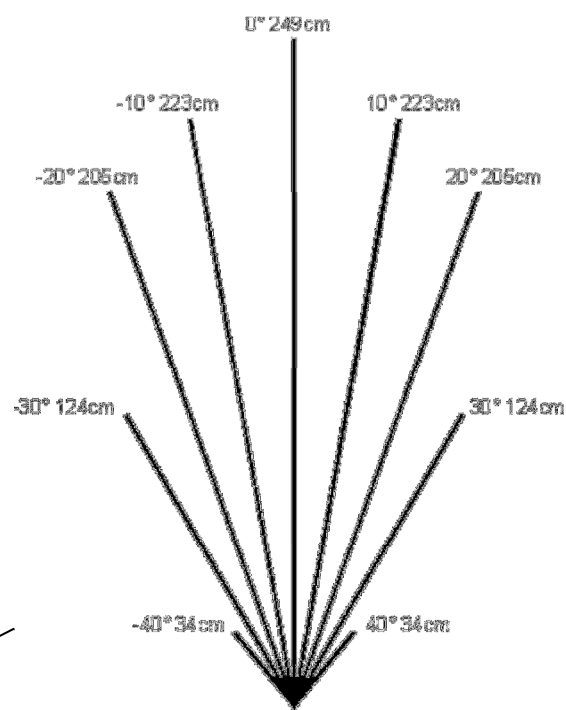
Obr. 3.7 Senzor SRF02 [zdroj: <http://www.robot-electronics.co.uk/htm/srf02tech.htm>]

Na Obr. 3.8 jsou zobrazeny charakteristiky senzoru SRF02 dané výrobcem a distributorem.



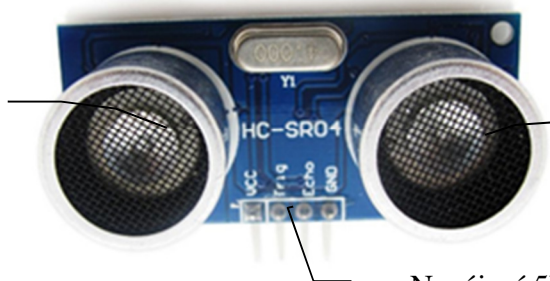
Citlivost senzoru daná výrobcem.

Detekce PVC trubky o průměru 55 mm.



Obr. 3.8 Charakteristika ultrazvukového senzoru SRF02 s odděleným přijímačem a vysílačem – jeden oscilátor má funkci generátoru signálu a druhý ve funkci senzoru. Výhoda této konstrukce je ve větší rychlosti měření a absenci dolní hranice měřené vzdálenosti. Příkladem takového senzoru je velmi levný model SR04 s vyzařovacím úhlem 30° a rozsahem 0,02 m až 3 m. Vstupem je signál „Trigger“, který spustí měření a výstupem obdélníkový signál „Echo“ určující dobu letu signálu od vyslání po návrat.

Přijímač



Vysílač

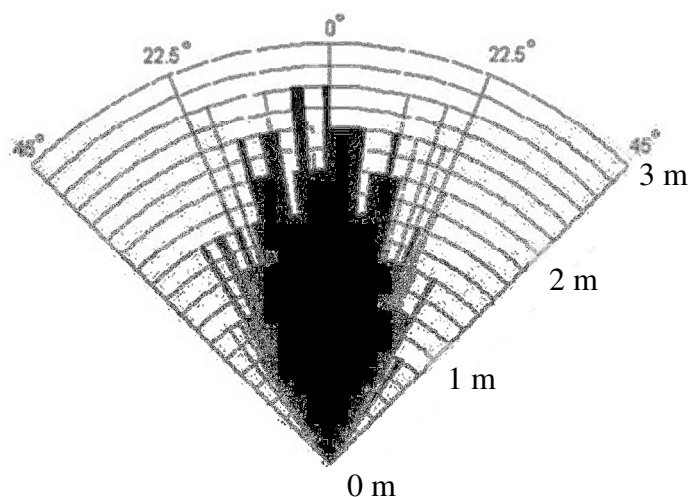
Napájení 5V/0,002A

Spouštěcí signál a signál měření

Obr. 3.9 Ultrazvukový senzor SR04

[zdroj:<http://imall.iteadstudio.com/im120628012.html>]

- Charakteristika senzoru SR04 daná výrobcem je zobrazena na Obr. 3.10. Je zde patrné, že hlavní pracovní oblast je v kuželu 20° a délce 2m. Výrobce však vlastnosti v různých sériích mění.



Obr. 3.10 Charakteristika ultrazvukového senzoru SRF02 [zdroj: <http://imall.iteadstudio.com/electronic-components/sensor/im120628012.html>]

Ultrazvukové senzory jsou tedy vhodné zejména na pokrytí blízkého okolí multikopteru, avšak nejsou vhodné pro přesné měření, zejména u levných modelů bez kompenzace teplotního rozdílu. Musí také být umístěny tak, aby nebyly ovlivňovány vrtulemi a zakryty aby nebyly ohřívány slunečním zářením.

Problematickou vlastností ultrazvukových senzorů je závislost citlivosti na překážky na vyzařovacím úhlu. Je nutné vyvážit požadavky na šířku sledované oblasti a potřebě detekovat malé předměty protože s úhlem rapidně klesá velikost předmětu, který je senzor chopen zachytit, neboť se vyzářená energie rozptýlí ve větším prostoru a tedy se také méně energie může vrátit do senzoru po odrazu. Problematická je zejména detekce malých předmětů, jejichž odrazová plocha je válcová nebo dokonce kulová, stejně tak pokud je odrazový úhel tupý.

3.3.2 Radar

Radarové senzory jsou často v současné době často využívány v prostředí automobilové dopravy. Skládají se z vysílače vysokofrekvenčního elektromagnetického záření tvořeného výkonovou elektronikou, nebo v případě malého zařízení jedním či více polovodičovými prvky. Stejně jako ultrazvukové senzory jsou schopny pokrýt větší oblast a to až všesměrově s rozsahem 360° (samozřejmě na úkor dosahu a přesnosti) nebo naopak usměrnit do roviny či do úzkého paprsku s řádově větším dosahem. Paprsek lze usměrnit pomocí reflektorů speciální konstrukce a materiálu. Velkou výhodou je vyšší odolnost vůči vlivu prostředí než ultrazvukové senzory a také výrazně větší dosah. Radar není natolik ovlivňován změnou teploty, vlhkosti nebo prašným prostředím. Výhodou a současně nevýhodou je vlastnost rádiového vlnění procházet různými materiály jako jsou plasty a sklo. To umožňuje skrýt senzor do zařízení a chránit ho tak vůči okolí. Stejně jako v případě jiných vysokofrekvenčních záření, je toto záření dokonce pohlcováno některé organické materiály, například dřevem nebo uhlím.

V současné době se rozvíjí polovodičové radary na frekvenci 76-81GHz, které nahrazují starší 24 GHz díky větší přesnosti a menším rozměrům. Příkladem mohou být nové sub kompaktní radarové senzory od firmy Bosch určené do osobních automobilů. Kompaktní radarové senzory jako takové lze rozdělit dle funkce do těchto skupin:

- Senzor relativní rychlosti – dopplerovský radar. Detekuje změnu frekvence signálu modulovaného do nosné vlny způsobené pohybem překážky, tzv. dopplerovský jev. Pohybuje-li se překážka směrem k senzoru, frekvence signálu roste, naopak klesá. Výhodou tohoto senzoru je nižší složitost konstrukce a nižší cena. Nevýhodou je, že je schopen detekovat překážky, pouze pokud se pohybují jinou rychlostí než samotný senzor. Za předpokladu, že chceme detekovat statické překážky při pohybu multikopteru, je tato podmínka splněna. Pokud by multikopter neměnil polohu, pak pro něj jiný statický objekt nepředstavuje hrozbu, což platí i pro případ kdy se překážka pohybuje stejně rychle jako multikopter.
- Dálkoměr – senzor měří čas, za který se vyslaný signál vrátí zpět do přijímače. Metod jak tohoto dosáhnout je několik, například měřením fáze vyslaného modulovaného signálu, nebo pro větší vzdálenosti přímo časovou prodlevu odraženého pulsu. Tato měření jsou technicky náročná, a proto jsou konstrukčně tyto senzory složitější a tedy také dražší.

Příkladem radarového dálkoměru je automobilový radar středního dosahu MRR od firmy Bosch. Jak je viditelné na obrázku níže (Obr. 3.11), radar je velmi kompaktní. Dané zařízení má udávaný dosah 100 m při vyzařovacím úhlu 150° nebo 160 m při úhlu 45°. Zařízení podobného typu by bylo pro anti-kolizní systém multikopteru vhodné, avšak tento konkrétní automobilový model ne, protože nepoužívá standardní sběrnici.



Obr. 3.11 Radar středního dosahu Bosch MRR [zdroj: http://www.bosch-kraftfahrzeugtechnik.de/en/de/component/CO_PC_DA_Adaptive-Cruise-Control_CO_PC_Driver-Assistance_2434.html]

- Pohybový alarm – podobně jako radarové rychloměry pracují tyto senzory na Dopplerově jevu. Na rozdíl od nich jsou však konstrukčně velmi jednoduché a také levné. Detekují pouze pohyb (přítomnost) předmětu v poli elektromagnetického záření generovaného polovodičovým zářičem. Při tomto pohybu dochází ke změně pole, která je zachycena komparačním prvkem. Senzory tohoto typu mají standardně

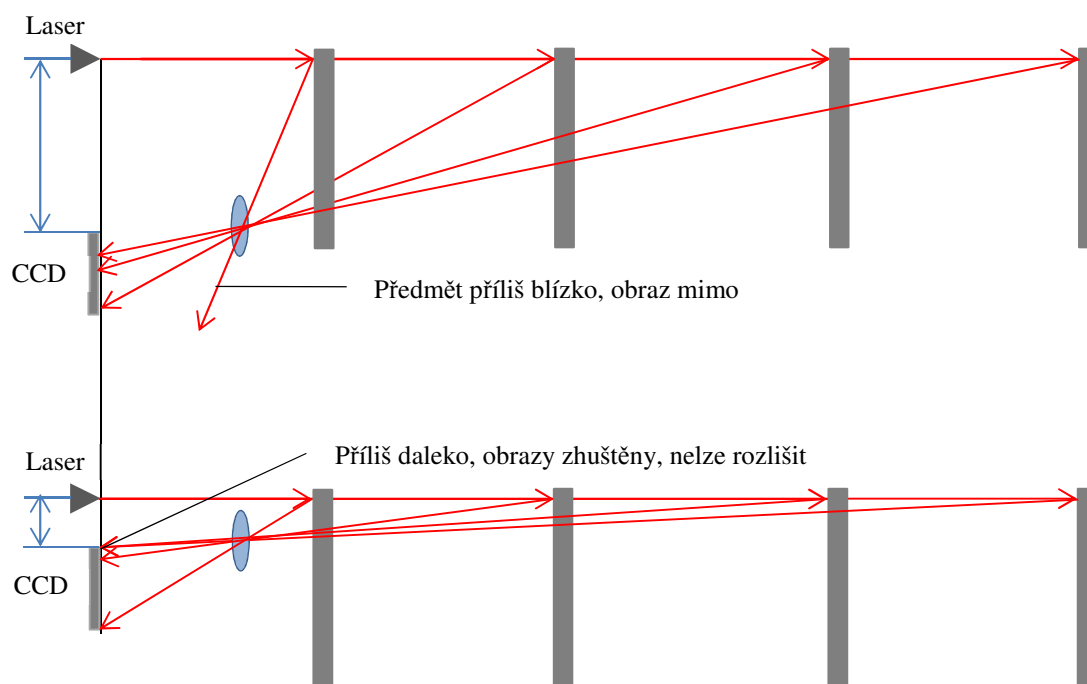
volitelnou citlivost a pracovní oblastí může mít tvar polokoule. Pro účely antikolizního systému by bylo možné využít několika širokoúhlých detektorů s různě nastavenou citlivostí. Bylo by pak možné do určité míry vytvořit bezpečnostní pásma a sadu varovných signálů o přítomnosti překážky.

3.3.3 Laserové senzory

Laserové senzory jsou pro anti-kolizní systém jedny z nejvhodnějších a to díky vysoké přesnosti, dosahu a v případě skenerů velké rozlišovací schopnosti. Navíc nejsou ovlivňovány počasím, teplotou a tlakem. Laserové senzory jsou optické senzory pracující s laserem jako se zdrojem koncentrovaného koherentního světla. Ve většině případů se používá infračervený laser s vlnovou délkou nad 900 nm, protože účinněji snímat fotocitlivým senzorem. Na druhou stranu mají různé vlnové délky specifické vlastnosti, proto se využívají například modré lasery 495 nm, které se na hranách ani v materiálu nerozptylují jako lasery s velkou vlnovou délkou.

Laserové dálkoměry a skenery lze rozdělit je dle fyzikálního principu do dvou skupin:

- Triangulační – základními prvky pro tento druh senzoru jsou laser jako zdroj světla a snímací prvek vzdálený od zdroje světla. Využívá triangulační metodu měření vzdálenosti, to je zdánlivé posunutí sledovaného bodu směrem k optickému středu snímacího prvku s rostoucí vzdáleností. Princip této metody je zobrazen na obrázku níže (Obr. 3.12), kde je také zobrazen vliv vzdálenosti senzoru od zdroje světla na pracovní oblast senzoru. S rostoucí vzdáleností roste rozsah a dosah, ale na úkor posunutí spodní hranice měření. Vzniká slepá oblast.



Obr. 3.12 Triangulační metoda měření vzdálenosti

Tato metoda měření je velmi přesná. Dle snímacího prvku lze dosáhnout přesnosti řádově menší než 1 mm, na druhou stranu je tato přesnost vykoupena velmi omezeným dosahem a rozsahem daným velikostí snímacího prvku a jeho vzdáleností od zdroje světla. Pracovní rozsah přesných senzorů se pohybuje v jednotkách až desítkách centimetrů. Rozměrnější a méně přesné senzory mají rozsah v řádu metrů za cenu omezení ze strany minimální měřené vzdálenosti a přesností klesající s tangenciální funkcí.

Velkou výhodou této metody je její jednoduchost, rychlost a nízká cena. Není nutné využívat měřící prvky pracující na frekvencích v řádu MHz až GHz, nutné pro radary a TOF laserové dálkoměry, které jsou velmi drahé. Stačí maticový obrazový senzor CCD nebo CMOS, navíc monochromatický s velmi malou šířkou. Teoreticky stačí šířka pouze 1 pixel, protože odražený bod se pohybuje jen v jedné ose. Užší snímací prvek znamená větší rychlost měření i nižší cenu. Změnou pozice a náklonu obrazového senzoru, optiky nebo laseru lze měnit rozsah a posouvat pracovní oblast.

Z důvodu malého rozsahu a velké minimální vzdálenosti je tento typ senzorů pro anti-kolizní systém méně nevhodný, pokud by byl nasazen sám. V kombinaci se senzory krátkého dosahu by bylo možné použít triangulační dálkoměr k měření středních vzdáleností avšak za cenu přesnosti klesající se vzdáleností.

- TOF – metoda „Time Of the Flight“ neboli doba letu, je metoda založená na měření času uplynulého mezi vysláním modulovaného světelného signálu a okamžikem kdy je signál odražený od překážky opět zachycen. Zjednodušeně řečeno se jedná o metodu obdobnou funkci ultrazvukového senzoru s tím rozdílem, že nosičem signálu je koherentní světelný paprsek a doba měření je mnohem kratší. Pro zajištění větší přesnosti je vyslána série pulsů o definované frekvenci. Fotocitlivým senzorem nemusí být maticový snímač, ale pouze rychlý bodový fotocitlivý snímač.

Výhoda TOF laserových senzorů je ve velkém dosahu a pracovním rozsahu oproti triangulačním senzorům, neboť tyto parametry se mohou pohybovat ve stovkách metrů až několik tisících metrů. Také přesnost není tak závislá na vzdálenosti, spíše na odrazivosti materiálu a úhlu odrazové plochy.

Nevýhoda TOF dálkoměrů je ve výrazně vyšší pořizovací ceně, omezené minimální vzdálenosti, od níž lze měřit a nižší přesnosti v porovnání k triangulačním senzorům. V závislosti na rychlosti vyhodnocovacího obvodu se přesnost pohybuje v jednotkách až desítkách centimetrů.

Příkladem těchto senzorů je kompaktní dálkoměr od firmy Jenoptik LDS 30 zobrazený na obrázku níže (Obr. 3.13). Tento dálkoměr pracující s 905 nm pulsním laserem o trvalém výkonu 1 mW je dostatečně malý a lehký pro potřeby umístění na multikopteru. Jeho dosah je udáván až 250 m na reflexních materiálech a 30 m za běžných podmínek a nízké odrazivosti 10%. Přesnost je udávána 5cm a frekvence měření 30 kHz. Velkou část hmotnosti tvoří pevný hliníkový obal, který by bylo možno nahradit odlehčeným krytem z ABS plastu, extrudovaného polystyrenu, karbonových destiček nebo odlehčené hliníkové konstrukce. Senzor by byl vhodný také k přenému měření výšky nad zemí.

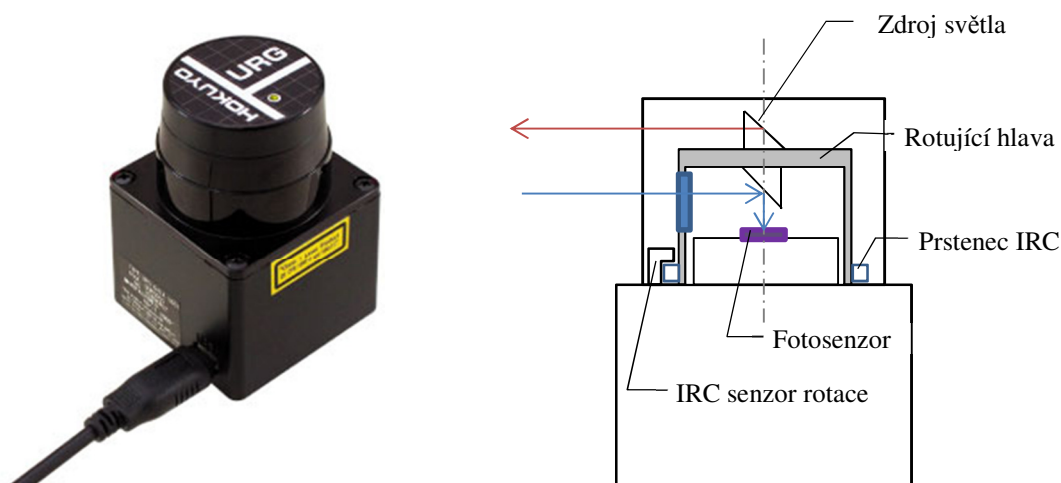


Obr. 3.13 Dálkoměr LDS30 [zdroj: http://www.jenoptik.com/internet_en_laser-distance-sensor-lds30]

Pro detekci překážky jsou více než vhodné laserové skenery. Jsou založené na stejných principech jako dálkoměry a navíc rozšířené o měření v jedné nebo dvou dalších os. Toho je dosaženo následujícími způsoby:

- Rotační pohyb senzorem – senzor je umístěn na mechanickém prvku (krokový motor, servomotor), který pohybuje celým senzorem kolem v rozsahu nejčastěji 270° tam a zpět. Varianta rotace 360° je složitější z důvodu přenosu energie a dat. Řešení s pohybujícím se senzorem je nejlevnější, avšak nejpomalejší. Hmotu senzoru, ať už triangulačního nebo TOF, má určitou setrvačnost kterou je nutné překonat. Nelze dosáhnout vyšších rychlostí než jednotek sekund na 180°skenovaného úhlu.
- Rotační pohyb zrcátkem – před senzorem je umístěno zrcátko na mechanickém prvku konajícím rotační nebo kývavý pohyb. Pohonem může být například malý servomotor nebo motor s vačkou. Výhodou je mnohem vyšší rychlost měření než v předešlém případě, avšak konstrukčně je tato varianta mnohem složitější.

Příkladem takového kompaktního skeneru je například 2D laserový dálkoměr Hokuyo 04LX-UG01s maximálním dosahem 5 m, přesností ± 30 mm, 240° pracovní oblastí a 10 Hz frekvencí měření. Rotace je snímána s přesností 0,36°. Při hmotnosti 160 g je vhodný pro umístění na multikopteru.



Obr. 3.14 2D skener Hokuyo 04LX-UG01a obecný náčrt činnosti [zdroj: http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/urg_04lx_ug01.html]

- Více-násobné senzory – při této variantě je použito několik párů vysílačů a přijímačů pro pokrytí většího úhlu při zachování vysoké rychlosti měření. Nevýhodou je neúplné pokrytí skenovaného prostoru, senzory jsou mezi sebou posunuty například o úhel 5°. Dalším negativním faktorem je vysoká cena zařízení.

3D skenery jsou založeny na kombinaci předešlých metod. Každá má své zastoupení ve specifické oblasti, ale v posledních letech se rozvíjejí tzv. laserové radary „Light Detection And Ranging“ neboli LIDAR. Tyto skenery jsou určené pro anti-kolizní a navigační systémy.

3.4 Funkce ve smyslu pokrytí prostoru

Anti-kolizní systémy lze zjednodušeně rozdělit dle složitosti a nákladnosti do dvou skupin:

- Pomocný systém – převážně varovný systém, použitý v případě kdy je riziko kolize velmi malé, nebo je zařízení pod dozorem operátora. Pokryty jsou jen určité oblasti v okolí zařízení. Příkladem takového systému je parkovací senzor u automobilů, kde se předpokládá vizuální kontrola řidičem, zda na místě nejsou hrozby jako sloupky s malým průměrem, které by parkovací senzor nezachytil.
- Bezpečnostně kritický systém – tento systém musí být sestaven tak, aby spolehlivě a včas zajistil detekci překážky a umožnil takovou reakci multikopteru či jiného zařízení aby nedošlo ke srážce a to buď autonomně, nebo varováním operátora. Při jeho nasazení se předpokládá se vysoké riziko kolize. Pokrytí tedy musí být maximalizováno ve všech rovinách pohybu. Jelikož žádný typ dálkoměrného senzoru není naprosto univerzální, je nutné použít senzory pracující na různých fyzikálních principech, aby bylo zajištěno vzájemné pokrytí slepých oblastí senzorů a překážek, které některé senzory nedetekují.

Z výše uvedeného textu se jeví druhá možnost jako jasná volba, problémem je její realizace. Jak už bylo uvedeno dříve, pokrýt bezpečně celé blízké okolí stroje je s využitím běžně dostupných senzorů v podstatě nereálné zejména kvůli pořizovací ceny a v případě multikopteru velké hmotnosti.

3.5 Funkce ve smyslu použití

Pokud jde o funkci anti-kolizního systému, lze jej rozdělit do dvou skupin:

- a. Pasivní – tento systém slouží k varování operátora, že hrozí kolize. Na něm pak je, aby zadal příkaz k nouzovému zastavení, nebo převzal řízení nad strojem. Výhoda tohoto systému je v jeho jednoduchosti. Lze jej realizovat například pomocí telemetrického modulu, jenž multikopter střední třídy již běžně obsahuje.

4 NAVIGAČNÍ SYSTÉM



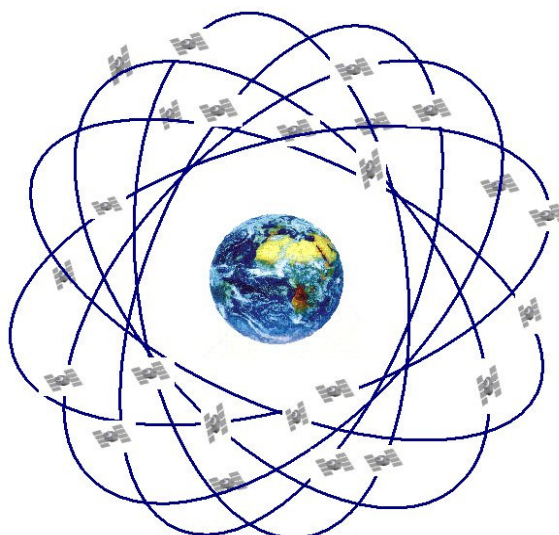
Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl: Po prostudování této kapitoly budete umět

- ✚ Popsat systém GPS.
- ✚ Charakterizovat vlastnosti a strukturu pozemních a kosmických stanic.

Pro navigaci ve venkovních prostorech je vhodné použít GPS systém. GPS Systém (Global Positioning Systems) je vojenský družicový systém, jehož provozovatelem je Ministerstvo obrany Spojených států amerických. GPS Systém byl vyvíjen od roku 1973 výhradně k vojenským účelům. Od počátku 90. let se však jeho působnost hojně rozšířila i do civilní sféry.



Obr. 4.1 GPS Systém [Zdroj: gps.gov]

Strukturu GPS systému lze obecně rozdělit do tří základních oblastí:

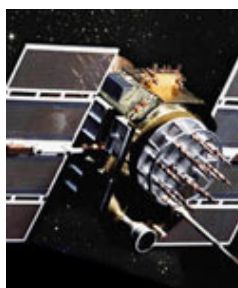
- Kosmický segment – soustava družic na oběžné dráze země.
- Řídicí a kontrolní segment - monitoruje kosmický segment, zasílá povely družicím, provádí jejich manévry a údržbu atomových hodin.
- Uživatelský segment – vyhodnocování polohy přijímacího zařízení na straně uživatele na zemi.

4.1 Kosmický segment systému GPS

Sestává z aktivních umělých družic na orbitu země. Družice obíhají zemi na středním orbitu (MEO – Middle Earth Orbit) ve výšce 20200 km. Každý ze satelitů obletí zemi

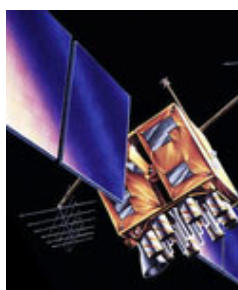
přibližně dvakrát denně. V současné době je na orbitu země umístěno 31 satelitů + 4 záložní tak, aby teoreticky v každém místě na planetě byly v daném bodě viditelné alespoň 4 satelity. Každý satelit je vybaven vysílačem/přijímačem a atomovými hodinami. Elektrickou energii získává ze solárních panelů.

Typy použitých satelitů:



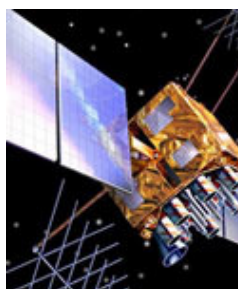
4.1.1 GPS Block IIA

- Vypuštěn 1989-1990
- Vyvinut firmou Rockwell International, dnes Boeing
- 7,5 letý životní cyklus



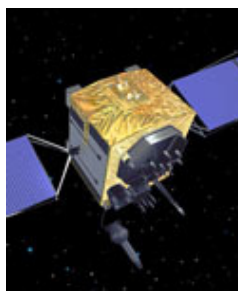
4.1.2 GPS Block IIR

- Vypuštěn 1997
- Vyvinut firmou Lockheed Martin
- Vestavěné atomové hodiny



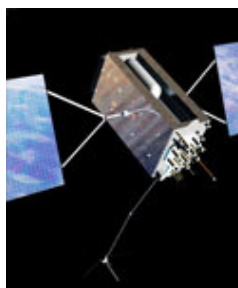
4.1.3 GPS Block IIR(M)

- Modernizovaná verze IIR satelitů
- Modernizace spočívala v upraveném GPS signálu



4.1.4 GPS Block IIF

- Vypuštěn 2010
- Vyvinut firmou Boeing
- 12 letý životní cyklus

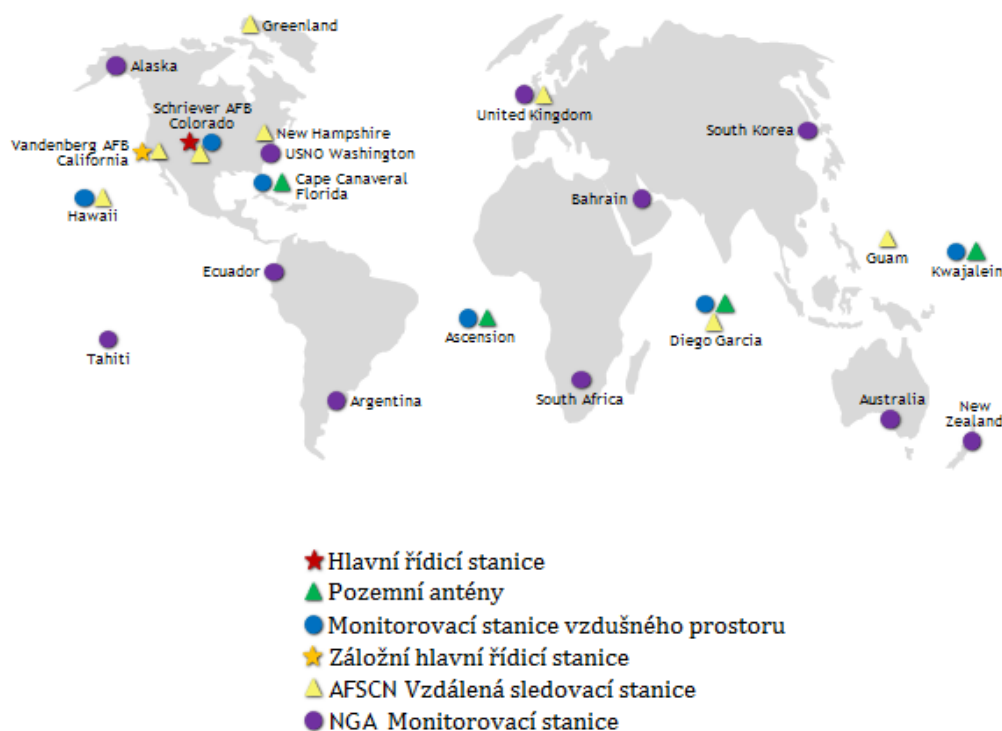


4.1.5 GPS Block III

- V současné době ve fázi vývoje firmou Lockheed Martin
- 15 letý životní cyklus

4.2 Řídicí segment systému GPS

Neméně důležitou součástí GPS systémů je řídicí segment. Řídicí segment se skládá ze sítě pozemních zařízení, které slouží k řízení přesného systémového času, průběžném monitorování a koordinaci celého systému. Současná podoba řídicího segmentu zahrnuje jednu hlavní řídicí stanici, záložní řídicí stanici, 12 komunikačních a řídicích antén a 16 monitorovacích zařízení.



Obr. 4.2 Rozmístění prvků GPS systému [Zdroj: gps.gov]

4.2.1 Hlavní řídicí stanice

Hlavní řídicí stanice je umístěna ve městě Colorado ve Spojených státech amerických. Řídicí stanice generuje a odesílá navigační zprávy a zajišťuje správný chod a přesnost soustavy satelitů. Řídicí stanice rovněž přebírá informace z monitorovacích stanic k výpočtu přesné polohy satelitů na orbitu země. Tyto informace jsou dále odesílány satelitům pro jejich potřebu.



Obr. 4.3 Hlavní řídící stanice - Základna Schriever [Zdroj: Wikipedia]

4.2.2 Monitorovací stanice

Monitorovací stanice neustále sleduje polohu satelitů na orbitu země a odesílá tyto informace centrální řídící stanici. Celosvětově je rozmístěno 16 těchto monitorovacích stanic.



Obr. 4.4 Monitorovací stanice na Hawai [Zdroj: Wikipedia]

4.3 Uživatelský segment systému GPS

Uživatelský segment GPS systému se skládá z GPS přijímačů (GPS čipy přijímačů a antény), koncových uživatelů a různých technologických zařízení, které pracují s informacemi polohy, rychlosti a přesném čase. Komunikace probíhá pouze směrem od družice k uživateli, GPS přijímače jsou pasivního typu.

Rozdělení přijímačů podle přijímaných pásem:

- Jednofrekvenční
- Dvoufrekvenční
- Multifrekvenční

Rozdělení přijímačů podle kanálů:

- Jednokanálové
- Vícekanálové

Rozdělení přijímačů podle způsobu výpočtu polohy:

- Kódové
- Fázové a kódové

Standardní GPS přijímač obsahuje tyto prvky:

- Anténa
- Předzesilovač
- Procesor
- Časový krystal
- Komunikační rozhraní

Uživatelé GPS systémů lze rozdělit do dvou skupin:

Autorizovaní uživatelé

Do této kategorie spadají uživatelé vojenského sektoru USA a vybrané spojenecké armády, využívající službu *Precise Positioning Service* (PPS) mající k dispozici dekodovací klíče k P(Y) kódu na frekvencích L1 a L2. Tito uživatelé mají zaručenou vyšší přesnost systému. Uplatňují se především v aplikacích:

- Podpora velení a vojáků
- Doprava
- Navádění zbraňových systémů
- Vojenská geodézie a mapování
- Přesný čas

Ostatní uživatelé

Do této kategorie spadají uživatelé především civilního sektoru. Přijímače vyrobené v USA nesmějí být exportovány, pokud nemají nastavená omezení výšky do 18 km a rychlosti

do 515 m/s. Tyto limity vychází z prevence možného zneužití jako systému orientace v prostoru ve zbraních obdobných balistickým raketám nebo střelám s plochou dráhou letu. Typickými profesemi a odvětvími civilních uživatelů jsou:

- Doprava
- Geologie a geofyzika
- Geodézie a geografické informační systémy
- Archeologie
- Lesnictví a zemědělství
- Turistika
- Přesný čas

4.3.1 Turistické GPS přijímače

V současné době nejrozšířenější kategorie GPS přijímačů. Vzhledem k jejich určení se klade důraz na vysokou mobilitu, přesnost, hmotnost a ergonomii ovládání. Zároveň je nutná zvýšená mechanická odolnost.



Obr. 4.5 Turistická GPS navigace Garmin [Zdroj: garmin.cz]

4.3.2 Námořní GPS přijímače

U námořních navigací je rovněž kladen důraz na přesnost a mobilitu zřízení. Některé navigace jsou rovněž rozšířeny o možnost monitorování dna pod lodí.



Obr. 4.6 Námořní GPS navigace Garmin [Zdroj: garmin.cz]

4.3.3 Letecké GPS přijímače

Letecké GPS přijímače se využívají především ke sportovním účelům, paragliding, plachtění atd.



Obr. 4.7 Letecká GPS navigace Garmin [Zdroj: garmin.cz]

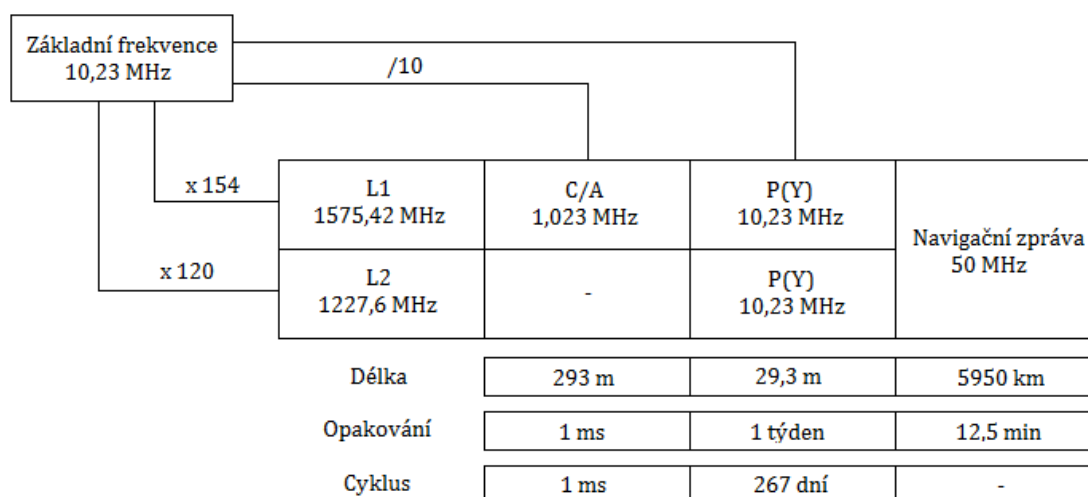
4.4 Signály vysílané GPS družicemi

Signály, které jsou vysílány GPS družicemi, v sobě obsahují kombinaci nosné vlny, dálkoměrného kódu a navigační zprávy. Složky daného signálu jsou vypočítávány ze základní frekvence. Hodnota této základní frekvence $f_0 = 10,23$ MHz. Tato frekvence je určována z atomových hodin, které každá družice obsahuje.

Každá družice vysílá signály na nosných frekvencích označovaných jako L1, L2, které jsou odvozeny od základní frekvence f_0 následovně.

$$L1 = 154 \cdot f_0 = 1575,42 \text{ MHz}$$

$$L2 = 120 \cdot f_0 = 1227,6 \text{ MHz}$$



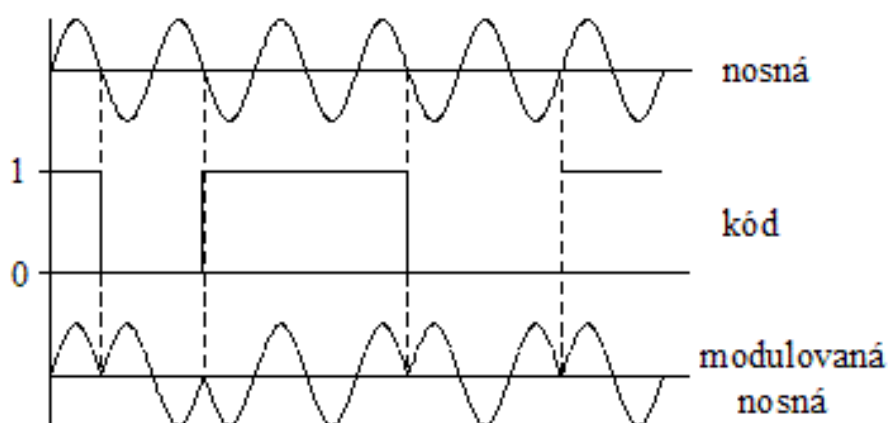
Obr. 4.8 Struktura družicového signálu.

Pro modulaci signálu L1 se využívají dva dálkoměrné kódy, které jsou reprezentovány tzv. pseudonáhodnými šумы a navigační zprávou. Jedná se o:

- Přesný kód (Precision code, P), který bývá pro vojenské účely zašifrován, pak se označuje Y-kód.
- C/A kód (Course/Acquisition code)

Pro modulaci signálu L2 se využívá pouze šifrovaná varianta P-kódu a navigační zpráva.

Čas přenosu signálu mezi družicí a přijímačem se určuje pomocí dvou pseudonáhodných kódů, které jsou modulovány na nosnou vlnu. Tyto signály se označují C/A kód a P-kód. Z určeného času se dále odvozuje vzdálenost mezi družicí a přijímačem. Oba kódy jsou v podstatě posloupnosti hodnot +1 a -1 a mají „pseudonáhodný“ charakter. Kdykoliv se znaménková hodnota kódu změní, nastane změna fáze nosné vlny o 180°. Pseudonáhodná sekvence může připomínat náhodou posloupnost, přesto je vygenerována podle přesně stanoveného matematického algoritmu, [Path.cz].



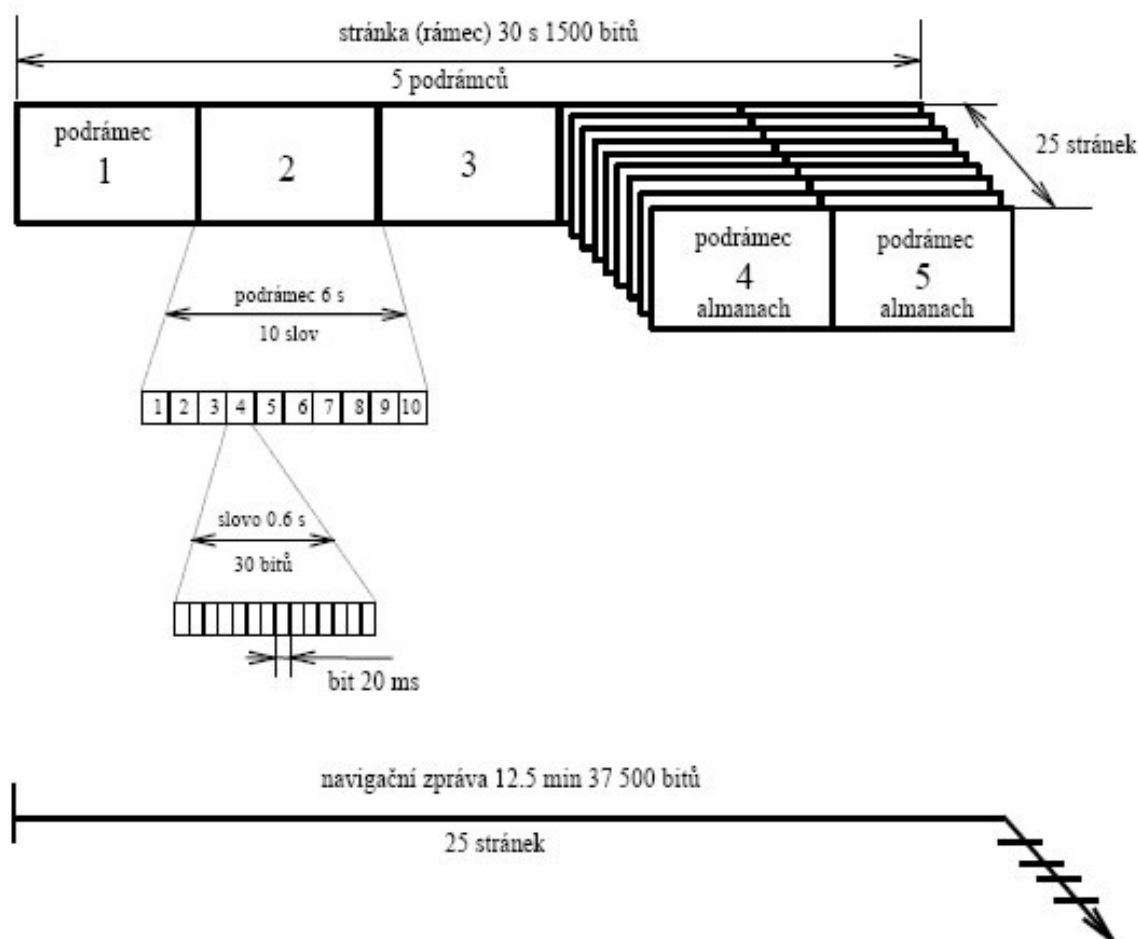
Obr. 4.9 Binární fázové klíčování nosné vlny [Zdroj: Path.cz]

4.4.1 Navigační zpráva

Navigační zpráva představuje řetězec, který je vysílán každou družicí. Její velikost je 1500 bitů a je vysílána každou družicí rychlostí 50kbit/s. Navigační zpráva je součástí obou signálů L1 a L2. Navigační zpráva obsahuje například tato data:

- Čas odeslání zprávy
- Klíč k přístupu P-kódu
- Hodinovou korekci
- Informaci o technickém stavu vysílací i ostatních družic
- Model ionosféry a koeficienty pro výpočet času UTC.

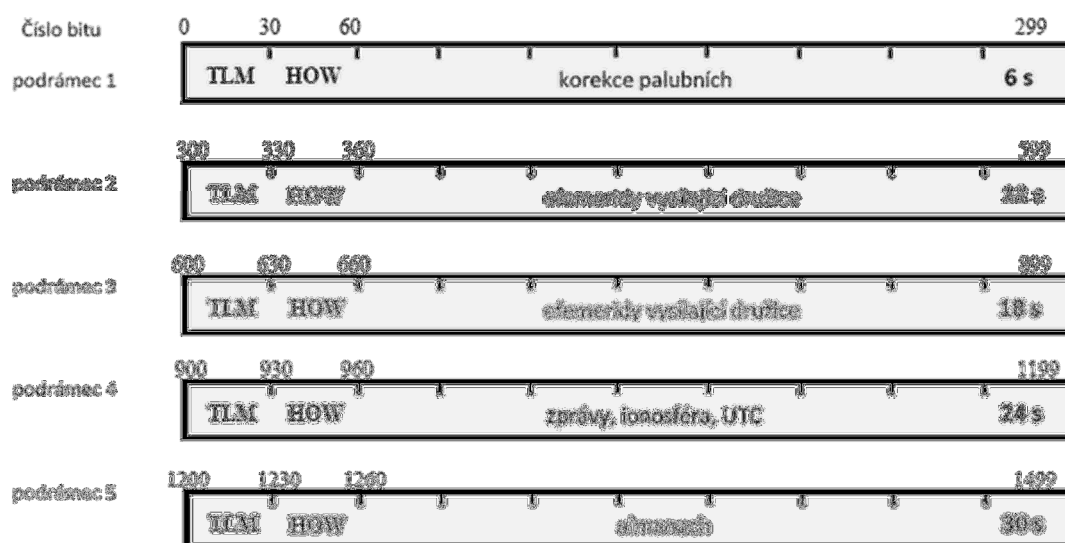
Na základě přijaté navigační zprávy a jejího obsahu se vypočítává přesná poloha konkrétní družice a přesný čas odeslání sekvence dálkoměrného kódu.



Obr. 4.10 Struktura navigační zprávy [Zdroj: Path.cz]

Kompletní zpráva obsahuje 25 **rámců** (Frame). Každý rámec obsahuje 1 500 bitů, trvá 30 s a je rozdělen na pět 300bitových **podrámců** (Subframe). Každý podrámec trvá 6 s a obsahuje deset 30bitových **slov** (Word). Jedno slovo trvá 0,6 s. Doba vysílání celé navigační zprávy je tedy 12,5 min, [Path.cz].

Každý podrámec má 25 možných významů, které nazýváme **stránka**. Podrámece 1 až 3 mají jednu stránku, tj. v každém rámci se opakují stejné údaje každých 30 s. Podrámece 4 a 5 mají 25 stránek s jiným obsahem, tj. údaje každé stránky se opakují jen jednou v navigační zprávě každých 12,5 minuty, [Path.cz].



Obr. 4.11 Struktura a obsah rámců navigační zprávy [Zdroj: Path.cz]

Každý podrámec začíná slovy *TLM* (Telemetry Word) a *HOW* (Handover Word), které mají stejný význam v každém podrámeči.

TLM obsahuje synchronizační slovo a některé diagnostické zprávy řídicího segmentu.

HOW obsahuje identifikaci podrámece a pořadí následujícího podrámece od počátku GPS-týdne.

První podrámec obsahuje číslo GPS-týdne, předpověď přesnosti určení pseudovzdálenosti (*URA*), indikátor zdraví družice, koeficienty pro modelování korekcí palubních hodin příslušné družice ap.

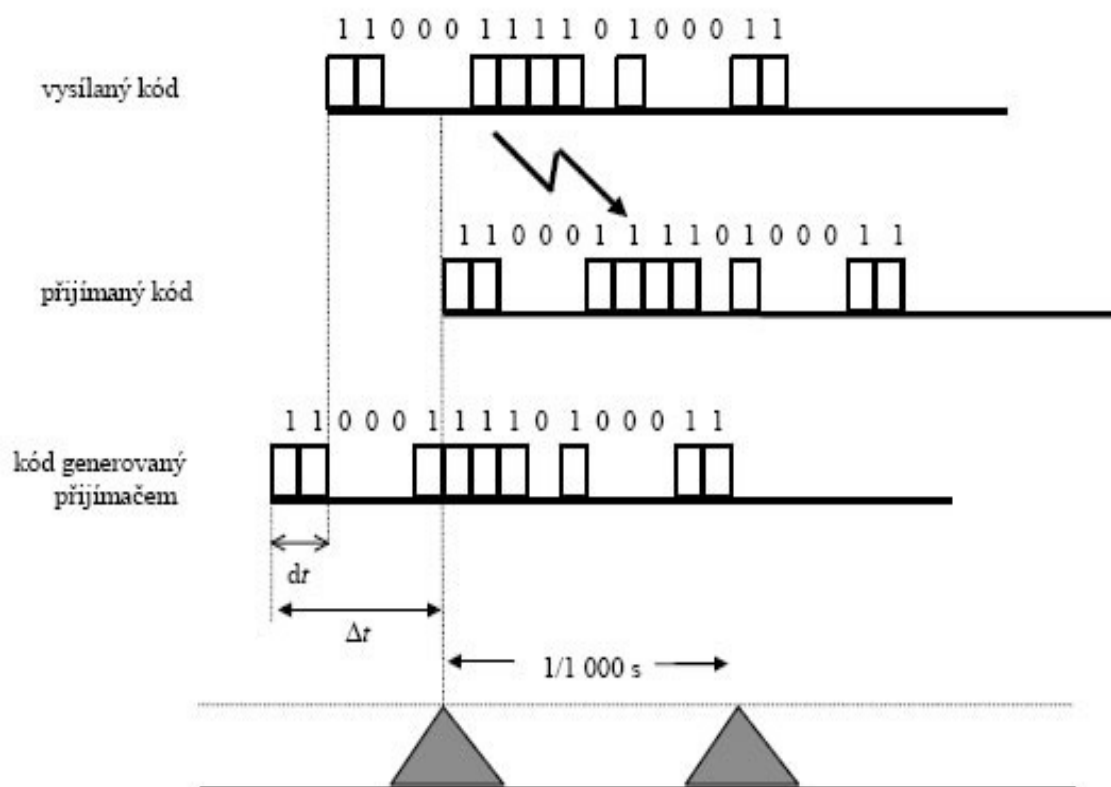
Druhý a třetí podrámec obsahují palubní efemeridy vysílající družice. Z těchto efemerid se pak počítá poloha družice.

Čtvrtý i pátý podrámec obsahují 25 stránek. Tyto stránky jsou obsahem stejné u všech družic. Část stránek 4. podrámece je rezervována pro vojenské využití. Ostatní stránky tohoto podrámece obsahují informace o ionosféře, almanach (předpokládané efemeridy všech družic) a některé další údaje. Stránky 5. podrámece obsahují hlavně almanach a zdravotní stav družic, [Path.cz].

4.4.2 Zpracování přijatého signálu

Aby bylo možné určit vzdálenost mezi družicí a přijímačem, je nutné přijatý signál zpracovat. Pro tyto účely je nutné získat čas přenosu signálu, navigační zprávu a rekonstruovat nosnou vlnu. Ke zpracování signálu se využívá kódová korelační technika. Zpracování korelační kódovou technikou lze rozdělit do několika kroků:

1. Přijímač vygeneruje referenční nosnou vlnu
2. Referenční signál je korelován s přijatým družicovým signálem. Signály jsou vzájemně posunuty tak, aby se optimálně shodovaly v maximální korelaci. Získaný časový posuv odpovídá času přenosu signálu mezi družicí a přijímačem.
3. Po odstranění *PRN* kódu přijatý signál obsahuje ještě navigační zprávu, která může být dekodována a eliminována horní-frekvenčním filtrem. Tím získáme nosnou vlnu, která je vlivem pohybu družice dopplerovsky posunuta a kterou můžeme využít k fázovým měřením.



Obr. 4.12 Princip kódové korelační techniky [Zdroj: Path.cz]

4.5 Zpřesňování GPS

Přesnost měření GPS souřadnic je v současné době v jednotkách metrů. Pro ostatní aplikace (např. multikopter), kdy je nutná vyšší přesnost souřadnic, než jsou současné GPS systémy schopny poskytnout, je nutné využít některý systém zpřesňování GPS.

Metody zpřesňování:

Dodatečné zpracování

Jedná se o metodu zpřesňování, která se využívá při aplikacích, kde není nezbytně nutné mít přesná data v reálném čase. Výpočet přesných souřadnic probíhá dodatečně.

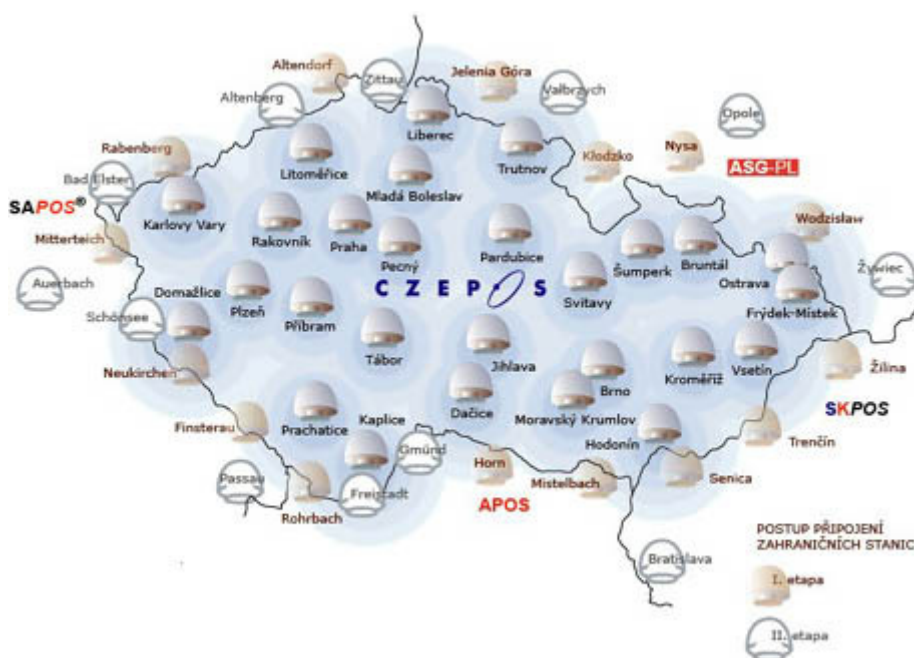
Zpracování v reálném čase

Při tomto zpracování je nutné přímé připojení k referenční stanici. K tomu se ve většině případů využívá komunikační protokol RTCM SC-104. K přenosu diferenčních korekcí se nejčastěji využívají tyto kanály [RAPANT. Petr, 2002]:

- Rádiové vysílače:
 - KV – velký dosah, nutnost velké antény
 - VKV, UKV – možnost použít malé a lehké antény, nutnost přímé viditelnosti mezi vysílači
- Bezdrátové datové sítě
- Mobilní telefony
 - Výhodou mobilních sítí pro přenos diferenčních signálů je snadná dostupnost, výborná dostupnost signálu
- Počítačové sítě

4.6 Diferenciální GPS systémy

Diferenciální GPS systémy pracují na principu vyhodnocování odchylek měření GPS signálu od skutečného stavu polohy a následného vypočítávání korekce. Předpokládá se existence alespoň jednoho přijímače GPS signálu a tzv. referenční stanice. V České republice existuje např. síť referenčních stanic CZEPOS. Tyto referenční stanice mají určenou přesnou polohu, se kterou se pracuje při následných korekcích.



Obr. 4.13 Rozmístění referenčních stanic systému CZEPOS [Zdroj: czepos.cz]



Obr. 4.14 Referenční GPS stanice [Zdroj: Wikipedia]

5 NAVIGAČNÍ SYSTÉM GALILEO



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl: Po prostudování této kapitoly budete umět

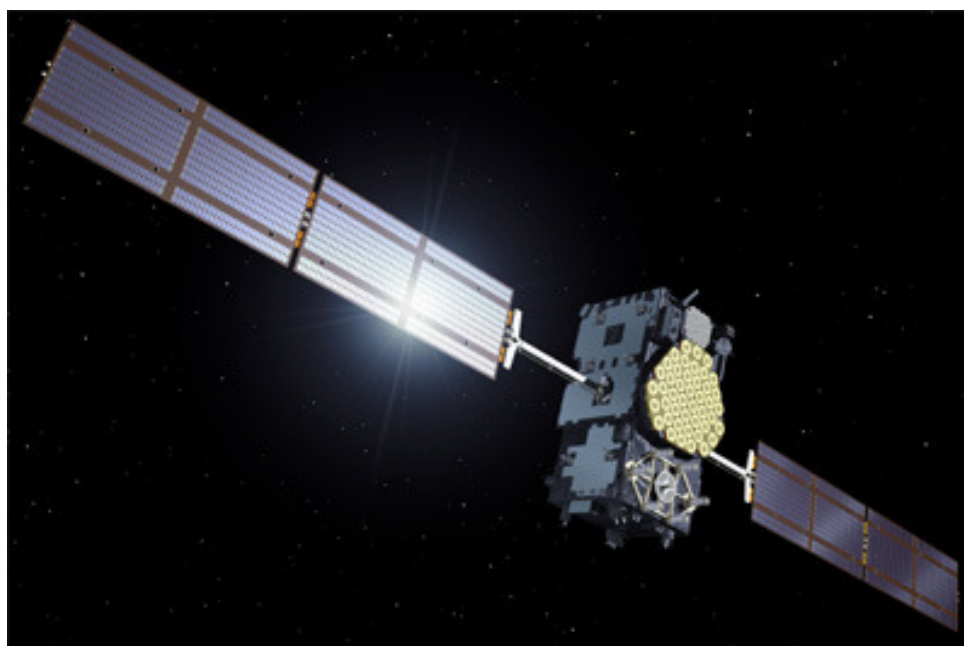
 Popsat systém Galileo.

Galileo je název pro evropský autonomní družicový systém. Systém Galileo je obdobou amerického systému GPS. Stejně jako systém GPS, i Galileo využívá k určení polohy družice na oběžné dráze země. Systém Galileo lze rovněž rozdělit na:

- Kosmický segment
- Pozemní segment
- Regionální složka
- Lokální složky

5.1 Kosmický segment systému Galileo

Vesmírný segment systému GALILEO obsahuje třicet satelitů ve třech oběžných rovinách se sklonem 56° k rovníku. Každá rovina obsahuje devět aktivních satelitů, které budou v oběžné rovině rovnoměrně rozloženy po 40° , a jeden neaktivní rezervní satelit, který bude v případě selhání schopen nahradit libovolný satelit. Výška oběžné dráhy bude 23 222 km. Satelity vždy po deseti dnech zopakují stejné rozmístění kolem Země. Během těchto deseti dnů satelity sedmáctkrát oběhnou zemi, [Czechspaceportal.cz].



Obr. 5.1 Satelit Galileo-IOV [Zdroj: esa.int]

5.2 Pozemní segment systému Galileo

Základem pozemního segmentu systému Galileo jsou dvě hlavní řídicí stanice. Každá řídicí stanice slouží ke kontrole a řízení funkcí pozemního kontrolního systému GSC. Řídicí stanice rovněž mají za úkol kontrolu a řízení leteckých funkcí podporovaných pozemním leteckým segmentem GMS. GSC má za úkol údržbu polohy družic, GMS se stará o kontrolu navigační funkce celého navigačního systému. GSC využívá globální síť pěti stanic ke komunikaci s každým jednotlivým satelitem.



Obr. 5.2 Pozemní stanice systému Galileo [Zdroj: spacefellowship.com]

6 SIMULAČNÍ MODEL



Čas ke studiu: 5 hodin



Cíl: Po prostudování této kapitoly budete umět

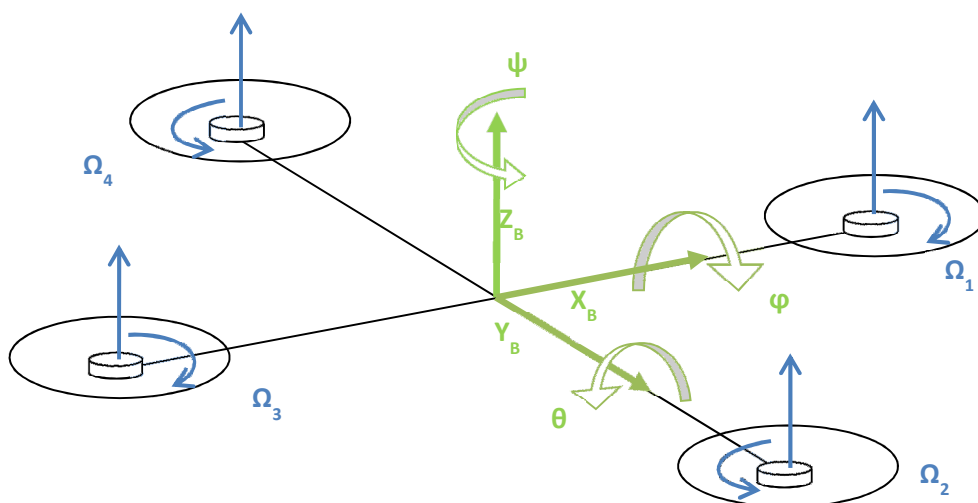
-  Popsat vlastnosti a chování multikopteru.
-  Popsat jednotlivé regulační algoritmy.
-  Popsat matematický model pro stabilizaci kopteru v prostoru.
-  Určit správné parametry regulace na základě experimentálních metod.

Matematický model multikopteru je vhodné vytvořit z konfigurace se čtyřmi rotory. Výhodná je konstrukce rámu do X, která má vysokou tuhost. Vrtule jsou připevněny k motoru přes převodovku, nebo napřímo. Všechny čtyři rotory jsou vůči sobě paralelní. Vrtule mají konstantní (neproměnlivý) profil, který zajistí proudění vzduchu směrem dolů k vyprodukování tahu směrem vzhůru od zemského povrchu. Tato konstrukce s tuhým rámem je ovladatelná. Stabilita a regulace polohy v prostoru je závislá pouze na otáčkách rotorů.



Klíč k řešení

Aby bylo možné s multikopterem manipulovat v prostoru, je nutné zajistit manévrovací schopnosti. Vrtule se proto nemohou točit jedním směrem, docházelo by k rotaci multikopteru kolem svislé osy. Absence křidélek nebo ocasu je nutné kompenzovat. Přední a zadní vrtule proto rotují shodným směrem, levá a pravá vrtule směrem opačným. Dojde tak ke kompenzaci krouticího momentu (podobně jako ocasní rotor u běžné helikoptéry) a vznikne tak možnost dalšího manévrování.



Obr. 6.1 Zjednodušené schéma kopteru za letu

Na Obr. 6.1 Zjednodušené schéma kopteru za letu je vidět schéma vznášejícího se kopteru. Zelená barva představuje souřadný systém vázaný na rám kopteru. Modrá barva představuje úhlovou rychlost vrtulí. Pro doplnění jsou znázorněny šipky, jejichž směr doplňuje směr rotace a rychlost pohybu.

Na modelu rotují všechny rotory stejnou úhlovou rychlostí Ω_H [rad·s⁻¹], která vytváří tahovou sílu úměrnou gravitačnímu zrychlení. Tímto základním pohybem se udržuje kopter v letu (tzv. visí).

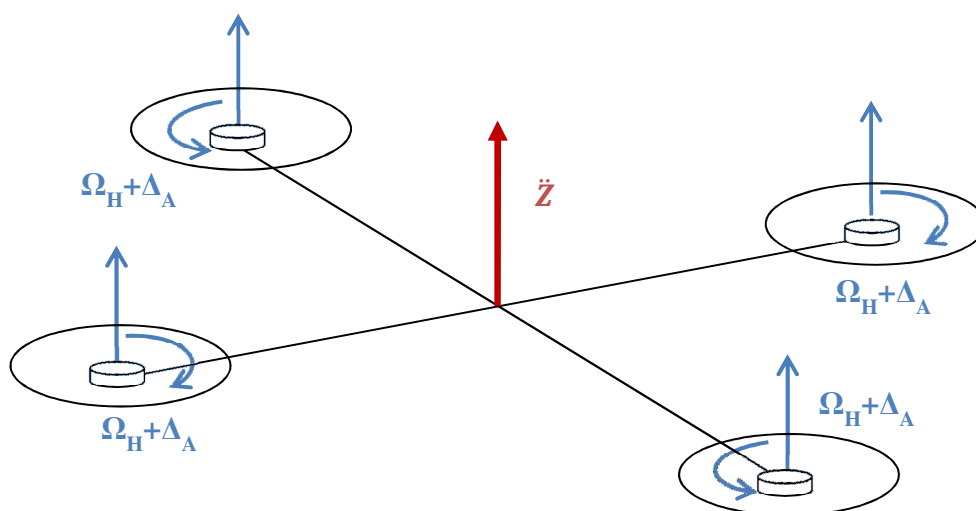
Protože jde o model se šesti stupni volnosti – 6DOF vybavený čtyřmi vrtulemi, nelze zajistit dokonalou stabilitu ve všech stupních volnosti najednou (maximálně ve čtyřech). Ačkoliv se to jeví jako nemožné, lze kopter ovládat za pomoci čtyř proměnných, které lze rozložit a usnadnit tak ovládání.

Aby bylo možné úspěšně regulovat polohu kopteru, je nezbytné určit si cíle regulace. Tyto cíle jsou dle předchozího odstavce celkem čtyři. Jde o základní pohyby kopteru v prostoru, které určí jeho výslednou pozici, natočení a výšku. Poloha kopteru v prostoru je vyvozena z následujících dějů:

6.1.1 Otáčky rotorů (U1[N])

Tento výstup je doprovázen synchronizovanou změnou otáček (zvýšení/snížení) všech rotorů současně. Tento řídicí povel způsobí změnu tahové síly a pohyb kopteru ve vertikální rovině.

Pokud je kopter ustálen v horizontální i vertikální rovině, bude souřadný systém rámu i okolí splývat. Na Obr. 6.2 je znázorněn pohyb kopteru při změně otáček o Δ_A .

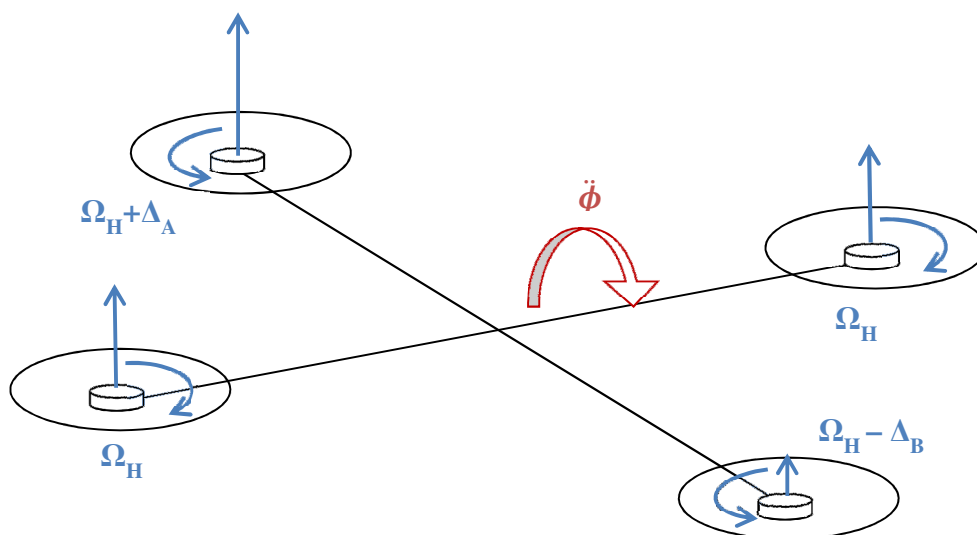


Obr. 6.2 Změna otáček všech rotorů pro změnu vertikální výšky letu

Modře je znázorněna rychlost rotorů, která v tomto případě odpovídá $\Omega_H + \Delta_A$. Kladná změna otáček Δ_A [rad·s⁻¹] představuje přírůstek úhlové rychlosti Ω_H . Pokud bude hodnota Δ_A příliš vysoká, bude regulace ovlivněna nelinearitami nebo saturacemi.

6.1.2 Klonění (U2 [N m])

Tento výstup regulace má za následek kladnou/zápornou měnu otáček levého rotoru a naopak zápornou/kladnou změnu otáček pravého rotoru. Vede to ke vzniku točivého momentu v ose x_B a k rotaci kolem této osy. Celkový vertikální tah zůstává konstantní, proto dojde pouze ke změně zrychlení úhlu rotace kolem osy x_B . následující obrázek znázorňuje změnu náklonu.

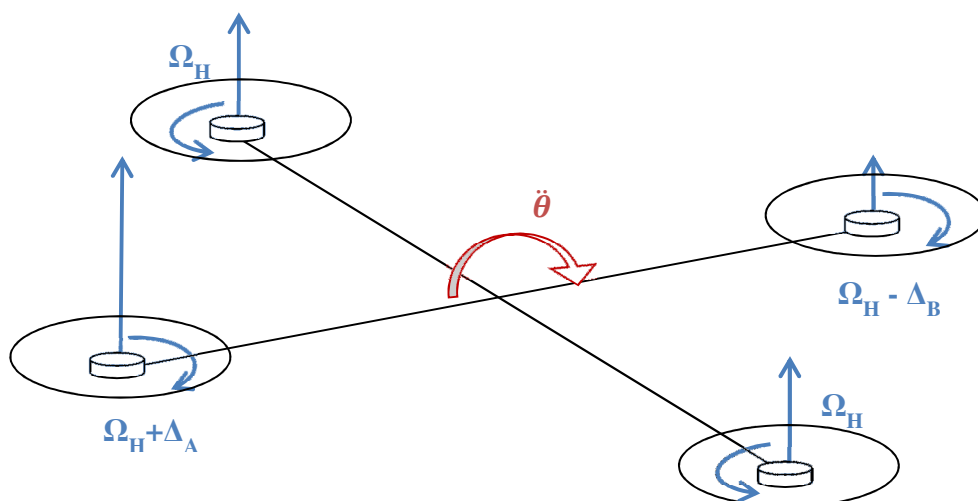


Obr. 6.3 Změna otáček rotorů pro naklonění

Kladné změny proměnných Δ_A a Δ_B [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$] musí být shodné, aby nedošlo ke změně svislého tahu, platí tedy, že $\Delta_A \approx \Delta_B$. Stejně jako v předchozím případě je nutné, aby změny těchto proměnných nebyly příliš vysoké, kvůli možnému riziku vzniku nelinearit a saturací.

6.1.3 Klopení (U3 [N m])

Tento výstup je velice podobný jako v případě U_2 . Dochází zde ke kladné/záporné změně otáček předního rotoru a naopak záporné/kladné změně otáček zadního rotoru. Vede to ke vzniku točivého momentu v ose y_B a k rotaci kolem této osy. Celkový vertikální tah zůstává konstantní, proto dojde pouze ke změně zrychlení úhlu rotace kolem osy y_B . následující obrázek znázorňuje změnu naklopení.

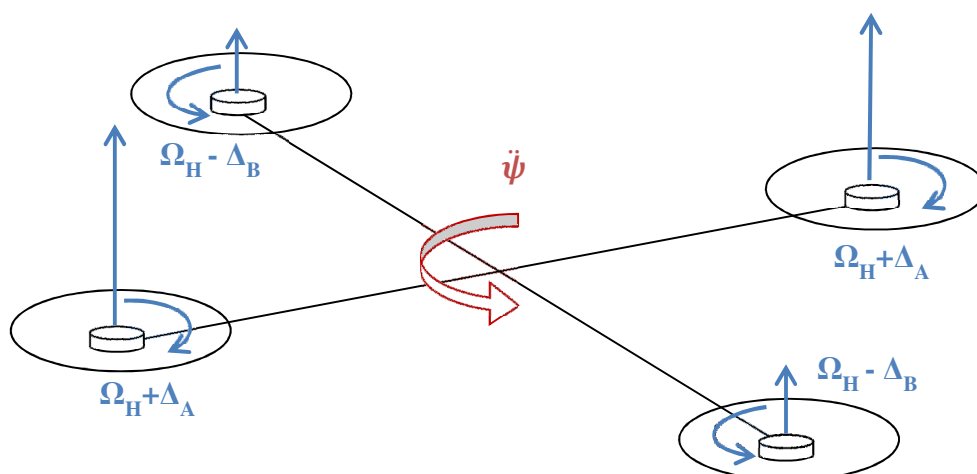


Obr. 6.4 Změna otáček rotorů pro naklopení

Kladné změny proměnných Δ_A a Δ_B [rad·s⁻¹] musí být shodné, aby nedošlo ke změně svislého tahu, platí tedy, že $\Delta_A \approx \Delta_B$.

6.1.4 Otočení (U4 [N m])

Tento výstup se projevuje změnou otáček všech rotorů současně. Zatímco pravý a levý rotor zrychluje/zpomaluje, přední a zadní rotor zpomaluje/zrychluje. Vede to ke vzniku disbalanci točivého momentu v ose z_B a k rotaci kopteru kolem této osy. Celkový vertikální tah zůstává konstantní, proto dojde pouze ke změně zrychlení úhlu rotace kolem osy z_B . následující obrázek znázorňuje změnu otočení.



Obr. 6.5 Změna otáček rotorů pro otočení podél svislé osy

Kladné změny proměnných Δ_A a Δ_B [rad·s⁻¹] musí být shodné, aby nedošlo ke změně svislého tahu, platí tedy, že $\Delta_A \approx \Delta_B$.

6.1.5 Eulerův-Newtonův model

V této části bude popsán dynamický model kopteru. Dynamika pohybu kopteru je relativně vysoká a je závislá především na vlastnostech pohonného systému ESC-motor-vrtule. Obecně lze popsat systém 6DOF takto:

$$\mathbf{q} = (x, y, z, \psi, \theta, \phi) \in \mathbb{R}^6 \quad 6.1$$

Kde (x, y, z) jsou souřadnice vycházející ze středu souměrnosti kopteru a jsou svázané s rámem. (ψ, θ, ϕ) jsou tři Eulerovy úhly (klonění - *nick*, klopení - *roll*, otočení - *yaw*), které popisují natočení kopteru.

Polohu kopteru lze přirozeně rozdělit na tyto dva pohybové souřadnice:

translační:

$$\boldsymbol{\xi} = (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \quad 6.2$$

a rotační:

$$\boldsymbol{\eta} = (\psi, \theta, \phi) \in S^3 \quad 6.3$$

Translační kinetická energie kopteru je:

$$W_{trans} \triangleq \frac{m}{2} \dot{\boldsymbol{\xi}}^T \dot{\boldsymbol{\xi}} \quad 6.4$$

Kde m je hmotnost kopteru. Rotační energií lze popsat vztahem:

$$W_{rot} \triangleq \frac{1}{2} \dot{\boldsymbol{\eta}}^T \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\eta}} \quad 6.5$$

Kde $\mathbf{J}$ je matice celkové setrvačnosti. Jediná potenciální energie, která musí být vzata v úvahu, je konzervativní gravitační síla:

$$U = mgz \quad 6.6$$

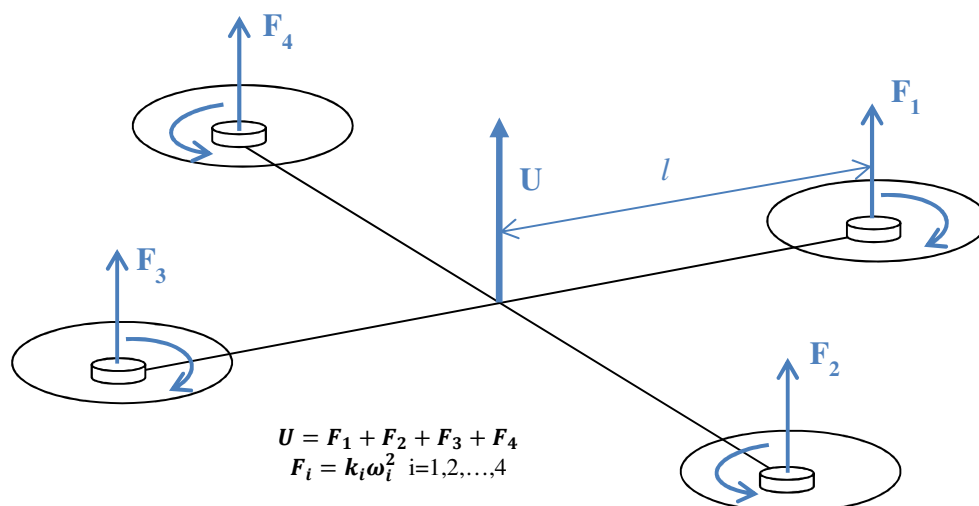
Lagrangeova funkce má tvar:

$$\begin{aligned} L(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &= W_{trans} + W_{rot} - U \\ &= \frac{m}{2} \dot{\boldsymbol{\xi}}^T \dot{\boldsymbol{\xi}} + \frac{1}{2} \dot{\boldsymbol{\eta}}^T \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\eta}} - mgz \end{aligned} \quad 6.7$$

Model kopteru lze pomocí Eulerových rovnic druhého druhu popsat takto:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{F} \quad 6.8$$

Kde $\mathbf{F} = (\mathbf{F}_\xi, \tau)$. τ je obecný krouticí moment a $\mathbf{F}_\xi$ je síla, která vzniká díky řídicím vstupům kopteru.



Obr. 6.6 Schéma rozložení sil působících na tuhý rám kopteru

Obecně tedy platí:

$$\hat{\mathbf{F}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ U \end{pmatrix} \quad 6.9$$

kde

$$\begin{aligned} U &= F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \\ F_i &= k_i \omega_i^2, \quad i = 1, \dots, 4 \end{aligned} \quad 6.10$$

kde $k_i > 0$ je konstanta a ω_i^2 představuje čtverec úhlové rychlosti rotoru “ i ” (M_i , $i = 1, \dots, 4$), pak

$$\mathbf{F}_\xi = \mathbf{R} \hat{\mathbf{F}} \quad 6.11$$

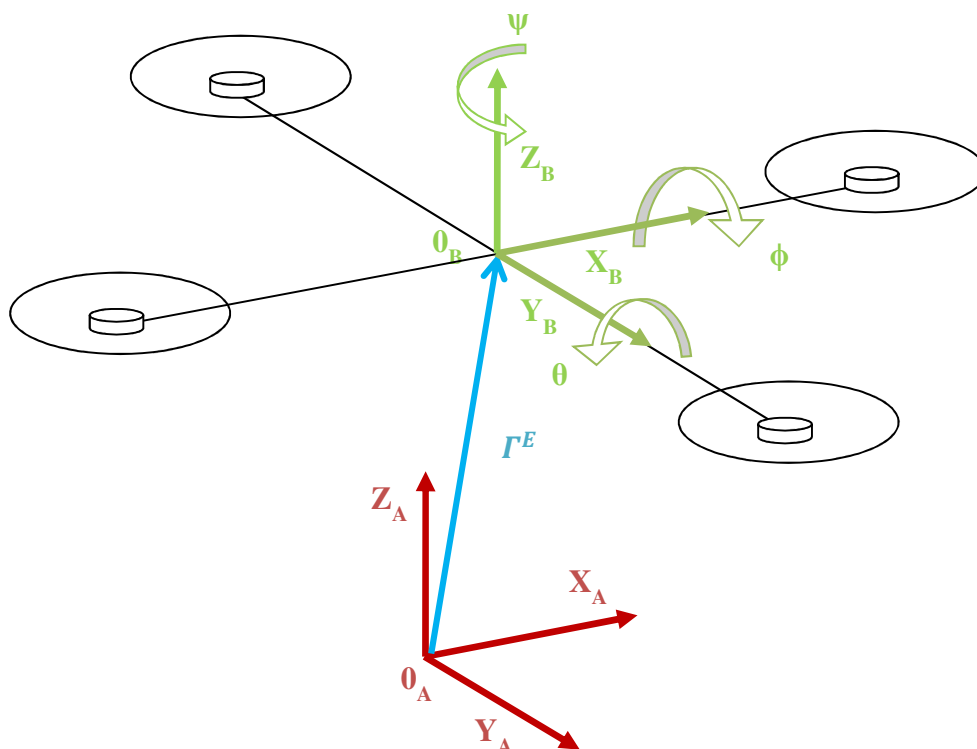
kde $\mathbf{R}$ je transformační matice popisující orientaci kopteru v prostoru.

Pro popis simulačního modelu kopteru je nutné definovat dva souřadné systémy T. [Perez, 2005].

- Souřadný systém vztažený k povrchu Země (inerciální), Z-systém.
- Souřadný systém vztažený k rámu kopteru, K-systém.

K-systém O_B, x_B, y_B, z_B , tzv. tělesová soustava je pevně svázána s trupem kopteru. Jeho počátek je v těžišti kopteru O_B . Podélná osa x_B leží v podélném směru kopteru a směřuje dopředu. Kladná osa y_B směřuje k levé straně kopteru. Kolmá osa z_B míří vzhůru.

Z-systém O_A, x_A, y_A, z_A , je pevně svázaný se zemským povrchem. Jeho počátek je v místě vzletu nebo je volen shodně s O_A . Podélná osa x_A leží ve směru letu kopteru. Kolmá osa z_A míří vzhůru.



Obr. 6.7 Souřadné systémy pro určení polohy kopteru v prostoru

- Rotaci kolem osy Z_B lze popsat změnou úhlu ψ pomocí matice $\mathbf{R}_{(\psi,z)}$:

$$\mathbf{R}_{(\psi,z)} = \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 6.12$$

- Rotaci kolem osy Y_B lze popsat změnou úhlu θ pomocí matice $\mathbf{R}_{(\theta,y)}$:

$$\mathbf{R}_{(\theta,y)} = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \quad 6.13$$

- Rotaci kolem osy X_B lze popsat změnou úhlu ϕ pomocí matice $\mathbf{R}_{(\phi,x)}$:

$$\mathbf{R}_{(\phi,x)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & s\phi \\ 0 & s\phi & c\phi \end{bmatrix} \quad 6.14$$

Pro zjednodušení je použito zkrácení $s\theta$ pro $\sin \theta$ a $c\theta$ pro $\cos \theta$ atd.

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \mathbf{R}_{(\psi,z)} + \mathbf{R}_{(\theta,y)} + \mathbf{R}_{(\phi,x)} = \\ &= \begin{pmatrix} c\theta \cdot c\psi & s\psi \cdot s\theta & -s\theta \\ c\psi \cdot s\theta \cdot s\phi - s\psi \cdot c\phi & s\psi \cdot s\theta \cdot s\phi + c\psi \cdot c\phi & c\theta \cdot s\phi \\ c\psi \cdot s\theta \cdot c\phi + s\psi \cdot s\phi & s\psi \cdot s\theta \cdot c\phi - c\psi \cdot s\phi & c\theta \cdot c\phi \end{pmatrix} \end{aligned} \quad 6.15$$

Obecný popis momentových proměnných η je následující:

$$\boldsymbol{\tau} \triangleq \begin{pmatrix} \tau_\psi \\ \tau_\theta \\ \tau_\phi \end{pmatrix} \quad 6.16$$

kde

$$\begin{aligned} \tau_\psi &= \sum_{i=1}^4 \tau_{M_i} \\ \tau_\theta &= (F_2 - F_4)l \\ \tau_\phi &= (F_3 - F_1)l \end{aligned} \quad 6.17$$

kde l je vzdálenost mezi motorem a těžištěm kopteru a τ_{M_i} je krouticí moment vyprodukovaný motorem M_i .

Euler-Lagrangeova rovnice, může být rozdělena na dynamiku ξ souřadnic a dynamiku momentů η (s ohledem na $\dot{\xi}$ a $\dot{\eta}$):

$$\begin{aligned} m\ddot{\xi} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{pmatrix} &= F_\xi \\ J\ddot{\eta} + J\dot{\eta} \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \eta} (\dot{\eta}^T J \dot{\eta}) &= \boldsymbol{\tau} \end{aligned} \quad 6.18$$

Pokud definujeme Coriolisův odstředivý vektor:

$$\bar{\mathbf{V}}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}}) = J\dot{\boldsymbol{\eta}} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \eta} (\dot{\boldsymbol{\eta}}^T J \dot{\boldsymbol{\eta}}) \quad 6.19$$

lze pak zapsat:

$$J\ddot{\boldsymbol{\eta}} + \bar{\mathbf{V}}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}}) = \boldsymbol{\tau} \quad 6.20$$

Nyní můžeme přepsat $\bar{\mathbf{V}}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})$ jako:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{V}}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}}) &= \left(J - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \eta} (\dot{\boldsymbol{\eta}}^T J) \right) \dot{\boldsymbol{\eta}} \\ &= \mathbf{C}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}}) \dot{\boldsymbol{\eta}} \end{aligned} \quad 6.21$$

kde $\mathbf{C}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})$ označuje Coriolisovu sílu a je v ní zahrnutý gyroskopický a odstředivý jev spojený s momenty $\boldsymbol{\eta}$ v závislosti na J .

$$\begin{aligned} m\ddot{\xi} &= U \begin{pmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \sin \phi \\ \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{pmatrix} \\ J\ddot{\boldsymbol{\eta}} &= -\mathbf{C}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}}) \dot{\boldsymbol{\eta}} + \boldsymbol{\tau} \end{aligned} \quad 6.22$$

6.1.6 Algoritmy regulace

Pohybové rovnice jsou vztaženy na K-systém z několika důvodů:

- Hlavní osy setrvačnosti jsou totožné s K-soustavou.
- Vektor tahu motoru leží v podélné ose kopteru.
- Matice setrvačnosti je t-invariantní (hmotnost ani tvar modelu se za letu nemění).
- Symetrická konstrukce modelu zjednodušuje použité vztahy.
- Data naměřená senzory na modelu jsou přímo spjatá s K-systémem.
- Síly generované akčními členy jsou vázány na K-systém.
- Z-systém je inerciální soustavou, neuvažuje se Coriolisovo zrychlení.
- Kopter je tuhé těleso, má šest stupňů volnosti a lze ho popsat diferenciálními rovnicemi. Je geometricky a hmotově souměrný.

Na základě fyzikálních vlastností pohybu tuhého tělesa v prostoru [Noskievič, 1999], lze s ohledem k transformaci mezi jednotlivými souřadnými systémy odvodit následující vztahy.

$$\begin{aligned}
 \ddot{X} &= (\sin \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi) \frac{U_1}{m} \\
 \ddot{Y} &= (-\cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi) \frac{U_1}{m} \\
 \ddot{Z} &= -g + (\cos \theta \cos \phi) \frac{U_1}{m} \\
 \dot{p} &= \frac{J_{YY} - J_{ZZ}}{J_{XX}} q r - \frac{J_{TP}}{J_{XX}} q \Omega + \frac{U_2}{J_{XX}} \\
 \dot{q} &= \frac{J_{ZZ} - J_{XX}}{J_{YY}} p r - \frac{J_{TP}}{J_{YY}} p \Omega + \frac{U_3}{J_{YY}} \\
 \dot{r} &= \frac{J_{XX} - J_{YY}}{J_{ZZ}} p q - \frac{J_{TP}}{J_{ZZ}}
 \end{aligned} \tag{6.23}$$

Kde J_{XX}, J_{YY}, J_{ZZ} jsou momenty setrvačnosti v jednotlivých osách. $J_{TP} [N m s^2]$ je moment setrvačnosti vznikající rotací vrtule ve vzduchu.

Druhý systém rovnic popisuje vztah mezi základním pohybem kopteru a pohybem vrtulí.

$$\begin{aligned}
 U_1 &= b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\
 U_2 &= l b (-\Omega_2^2 + \Omega_4^2) \\
 U_3 &= l b (-\Omega_1^2 + \Omega_3^2) \\
 U_4 &= d (-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\
 \Omega &= \Omega_1 + \Omega_2 + \Omega_3 + \Omega_4
 \end{aligned} \tag{6.24}$$

Třetí rovnice zahrnuje dynamiku motorů a znázorňuje závislost mezi napětím motorů a otáčkami vrtulí.

$$(J_P + \eta N^2 J_M) \dot{\Omega} = -\frac{K_E K_M}{R} \eta N^2 \Omega - d \Omega^2 + \frac{K_M}{R} \eta N v \quad 6.25$$

Kde $J_P [N m s^2]$ moment setrvačnosti vrtule, $J_M [N m s^2]$ je moment setrvačnosti motoru. [Bresciani, 2008].



Zajímavost k tématu

Touto rovnicí lze určit pozici kopteru pomocí dvojí integrace zrychlení. Aby to bylo možné, je nutné ovládat všechny motory a znát vnitřní stav ze senzorů.

6.1.7 Cíl regulace

Cílem regulačního obvodu je stabilizovat polohu kopteru v prostoru. Toho lze dosáhnout při správném nastavení napětí na jednotlivých motorech. Tento proces regulace je znám jako problém inverzní dynamiky a kinematiky.

Pro snadnou implementaci inverzního modelu musí být dynamika kopteru značně zjednodušena. Rovnice 6.23 může být upravena po zohlednění tří možností:

- Mnoho proměnných souvisí s párovým křížením úhlových rychlostí (gyroskopický efekt a Coriolisova odstředivá formulace). Pokud budeme předpokládat, že se kopter pohybuje v blízkém okolí stabilního visení, budou se vyskytovat pouze malé změny úhlové rychlosti (klonění i klopení).
- Úhlové zrychlení souvisí s naměřenými hodnotami přímo na kopteru. Nejsou shodné se zrychlením, které mají Eulerovy úhly popisující polohu vůči E-systému. Přenosová matice T_θ popisuje vztah mezi úhlovými rychlostmi v E-systému a K-systému.
- Celý regulační algoritmus pro stabilizaci polohy kopteru generuje vhodný signál pro vrtule. Pokud jsou čtyři, je potřeba generovat čtyři proměnné v řídicí smyčce. Cílem stabilizace kopteru v prostoru je udržet konstantní úhlové rychlosti (Eulerovy úhly) a výšku. Na základě této myšlenky lze z rovnic odstranit části popisující stabilizaci polohy v osách X a Y.
- Následující rovnice ukazuje způsob regulace použitý ke stabilizaci kopteru.

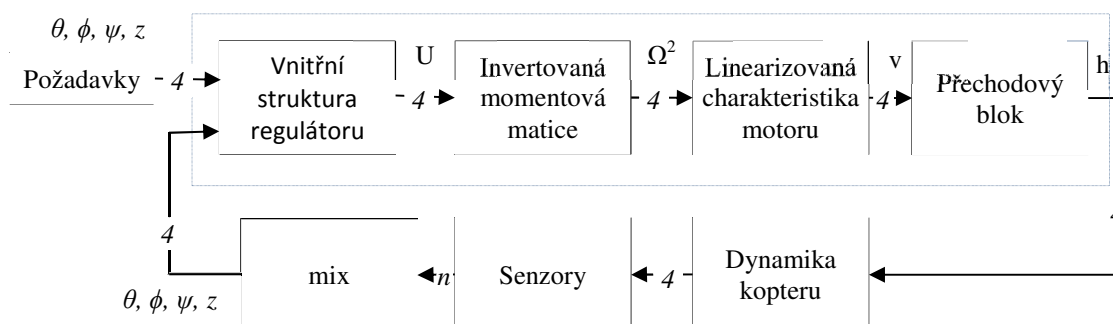
$$\begin{aligned}
 \ddot{z} &= -g + (\cos \theta \cos \phi) \frac{U_1}{m} \\
 \ddot{\phi} &= \frac{U_2}{J_{xx}} \\
 \ddot{\theta} &= \frac{U_3}{J_{yy}} \\
 \ddot{\psi} &= \frac{U_4}{J}
 \end{aligned}
 \tag{6.26}$$

Do regulační smyčky vstupují data ze snímačů a požadovaná hodnota. Výstupem algoritmu je hodnota PWM signálu pro BLDC motory. Regulační algoritmus je rozdělen do čtyř částí.



Regulátory otáček motorů

O pohon modelářských motorů použitých v multikopteru se stará ESC – Electronic speed controller. Jde v podstatě o frekvenční měnič, který se stará o chod motoru. Řídicím vstupem většiny ESC je zpravidla PWM, který má amplitudu 5V a pulsy s měnicí se střídou se objevují s frekvencí 50 Hz. Otáčky lze proto měnit jen 50x za vteřinu. ESC použitý v multikopteru proto komunikuje pomocí rychlé datové sběrnice SPI s periodou až 300 změn za vteřinu.



Obr. 6.8 Blokové schéma regulace stability

Algoritmy stabilizace představují jádro celého regulačního obvodu. Zpracovává signály ze snímačů a srovnává odchylky od požadované hodnoty pro všechny regulované hodnoty. Rovnice 3.5 je v tomto bloku použita spolu s PID ke kalkulaci výstupních hodnot pro motory.

Invertovaná momentová matice je použita k výpočtu rychlosti vrtulí. Je zde určena závislost mezi U a Ω^2 .

$$\begin{aligned}
\Omega_1^2 &= \frac{1}{4b} U_1 - \frac{1}{2bl} U_3 - \frac{1}{4d} U_4 \\
\Omega_2^2 &= \frac{1}{4b} U_1 - \frac{1}{2bl} U_2 - \frac{1}{4d} U_4 \\
\Omega_3^2 &= \frac{1}{4b} U_1 - \frac{1}{2bl} U_3 - \frac{1}{4d} U_4 \\
\Omega_4^2 &= \frac{1}{4b} U_1 - \frac{1}{2bl} U_2 - \frac{1}{4d} U_4
\end{aligned} \tag{6.27}$$

- Linearizovaná dynamika motoru použitá v třetím bloku regulační smyčky vychází z rovnice 6.25.

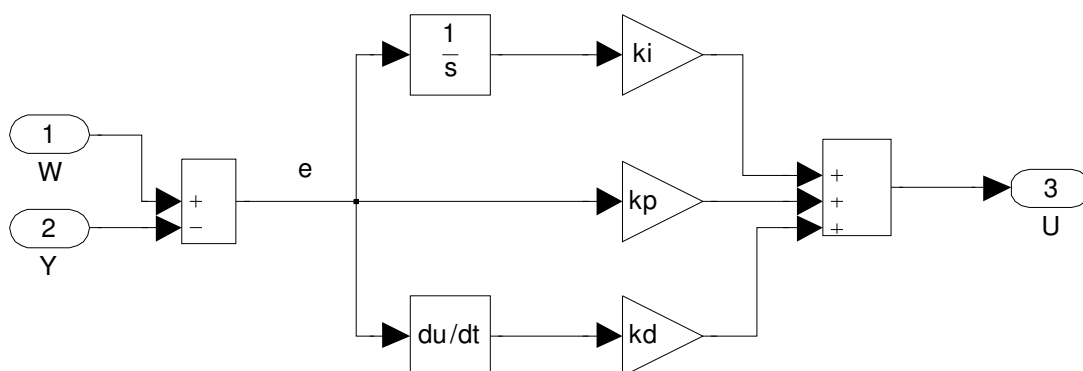
V prvním kroku tohoto bloku se numericky vyřeší rovnice pro získání správných hodnot napětí pro motory. Následuje linearizace pro zjednodušení výpočtu.

- Přechodový blok slouží k transformaci hodnoty napětí na hodnoty pro ESC jednotky motorů (PWM). Tento blok bere ohled na aktuální napětí baterie a zohledňuje jej při výpočtech pro omezení výstupu. Pro dodržení zásad bezpečnosti je dána přednost v dodržení stabilní polohy před výškou. Při nedostatečném napětí baterie je tedy zachována manévrovací schopnost, dochází však ke klesání kopteru.

6.1.8 PID algoritmus

Nejčastěji používanými regulátory v průmyslu jsou právě ty, jež jsou založeny na PID technologii. Výhodou je jednoduchá struktura, dobrý výkon pro mnohé aplikace a především jej lze seřadit i bez nutnosti znát model regulované soustavy.

Tradiční PID regulátor je složen z následujících komponent:



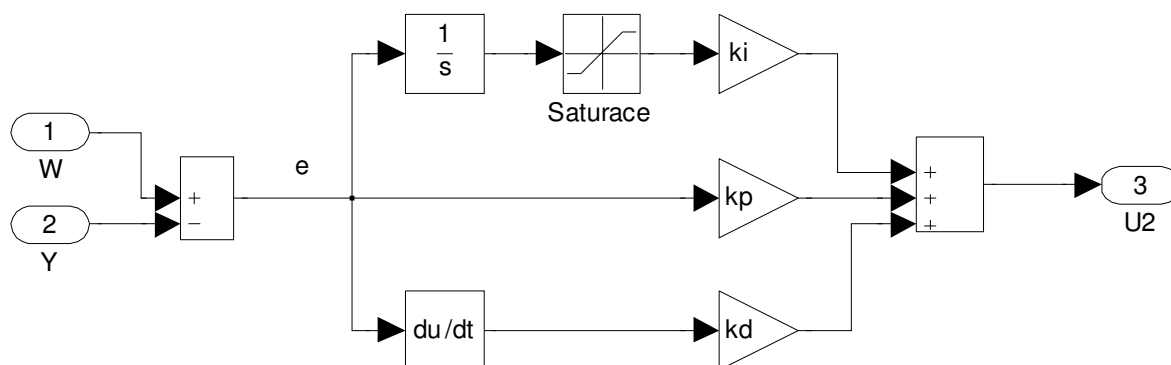
Obr. 6.9 Blokové schéma PID regulátoru

$$u(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau + r_1 \frac{de(t)}{dt} \tag{6.28}$$

Regulátor v rovnici 6.28 je obecný, změnu struktury lze dosáhnout dosazením nuly za jednu z konstant r_0 , r_1 a r_{-1} [Víteček, Vítečková 2008].

Integrace spolu se saturačním efektem aktuátoru způsobuje nepříjemný jev, který snižuje výkon celého algoritmu. Pokud je integrační hodnota vysoká a odchylka změny znaménko, je nutné čekat dlouho, než systém získá svou lineární povahu (než dojde v „vybití“

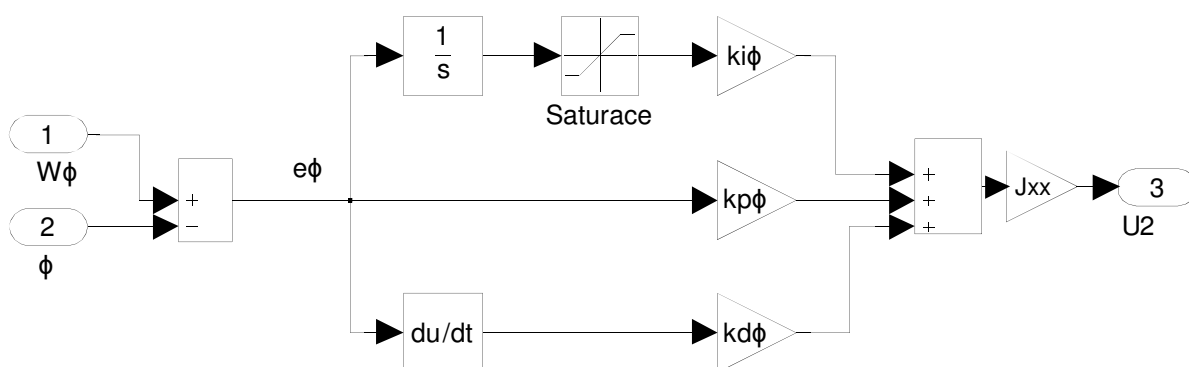
integrační složky). Tento jev se nazývá integrační wind-up. Pro odstranění této vlastnosti je do struktury regulátoru vložen saturátor za integrační člen.



Obr. 6.10 Blokové schéma PID regulátoru s kompenzací wind-up efektu

Nyní si představíme všechny čtyři regulační smyčky, které zajišťují stabilitu koptery.

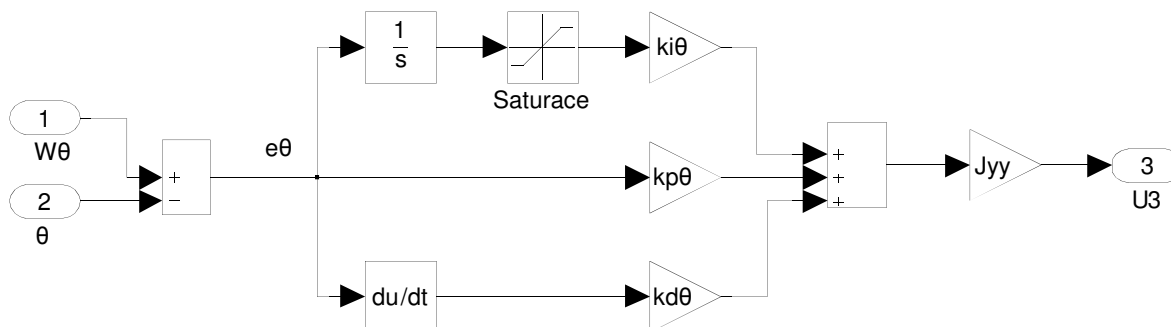
6.1.8.1 Regulace naklonění:



Obr. 6.11 Blokové schéma PID regulátoru pro regulaci naklonění ϕ

Kde $\phi^w[\text{rad}]$ představuje požadovanou hodnotu úhlu naklonění, $\phi[\text{rad}]$ je změřený úhel naklonění, $e_\phi[\text{rad}]$ je regulační odchylka a $U_2[\text{Nm}]$ je požadovaný kroučící moment. Dále $k_{p\phi} [\text{s}^{-2}]$, $k_{i\phi} [\text{s}^{-3}]$ a $k_{d\phi} [\text{s}^{-1}]$ jsou regulační koeficienty. $J_{xx} [\text{Nm}]$ je moment setrvačnosti v ose x .

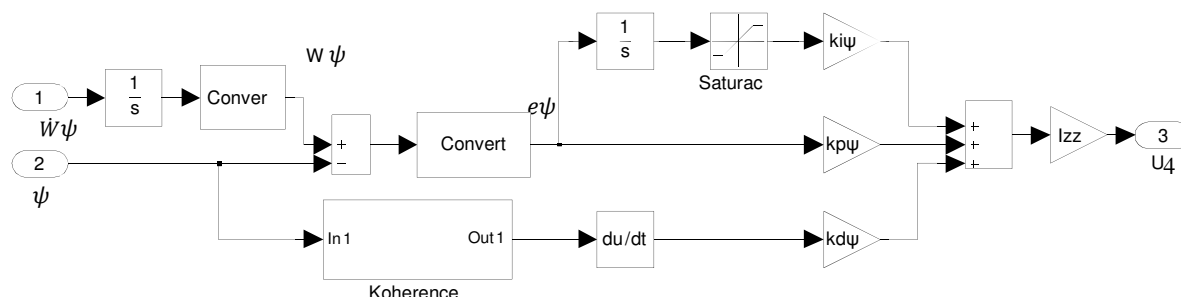
6.1.8.2 Regulace naklopení:



Obr. 6.12 Blokové schéma PID regulátoru pro regulaci naklonění θ

Kde $\theta^w[\text{rad}]$ představuje požadovanou hodnotu úhlu naklonění, $\theta[\text{rad}]$ je změřený úhel naklonění, $e_\theta[\text{rad}]$ je regulační odchylka a $U_3[\text{Nm}]$ je požadovaný krouticí moment. Dále $k_{p\theta}[\text{s}^{-2}]$, $k_{I\theta}[\text{s}^{-3}]$ a $k_{D\theta}[\text{s}^{-1}]$ jsou regulační koeficienty. $J_{yy}[\text{Nm}]$ je moment setrvačnosti v ose y .

6.1.8.3 Regulace otočení:



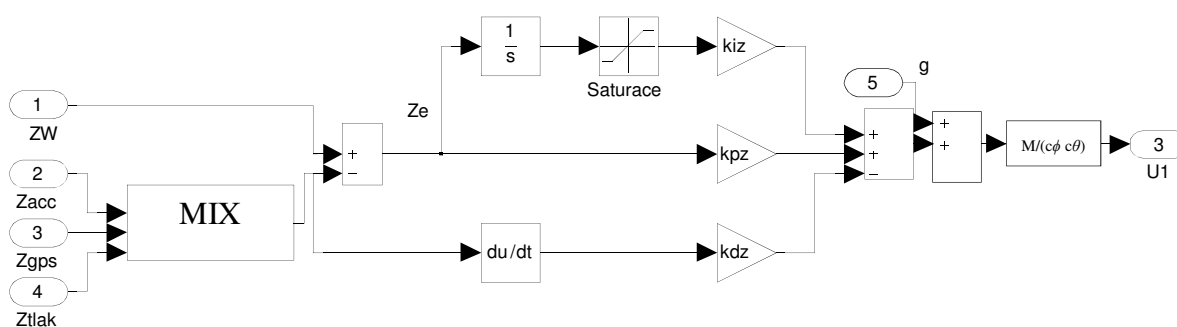
Obr. 6.13 Blokové schéma PID regulátoru pro regulaci otočení ψ

Kde $\dot{\psi}^w[\text{rad s}^{-1}]$ představuje požadovanou úhlovou rychlost otočení, $\psi^w[\text{rad}]$ představuje požadovaný úhel otočení, $\psi[\text{rad}]$ je změřený úhel naklonění, $e_\psi[\text{rad}]$ je regulační odchylka a $U_4[\text{Nm}]$ je požadovaný krouticí moment. Dále $k_{p\psi}[\text{s}^{-2}]$, $k_{I\psi}[\text{s}^{-3}]$ a $k_{D\psi}[\text{s}^{-1}]$ jsou regulační koeficienty. $J_{zz}[\text{Nm}]$ je moment setrvačnosti v ose z .

Struktura obvodu se liší od předchozích dvou. Blok Convert slouží ke korekci nekontinuálního přechodu při $\pm\pi$. Tedy pokud bude vstup $\frac{3\pi}{2}$, pak výstup bude roven $-\frac{\pi}{2}$.

Blok Koherence využívá posledních dvou hodnot derivace pro korekci chyby při přechodu mezi $\pm\pi$.

6.1.8.4 Regulace výšky:



Obr. 6.14 Blokové schéma PID regulátoru pro regulaci výšky letu

Kde $z^w[\text{m}]$ představuje požadovanou hodnotu výšky, $z[\text{m}]$ změřenou výšku, $e_z[\text{m}]$ je regulační odchylka a $U_1[\text{N}]$ je požadovaný tah motorů. Dále $k_{pz}[\text{s}^{-2}]$, $k_{Iz}[\text{s}^{-3}]$ a $k_{Dz}[\text{s}^{-1}]$ jsou regulační koeficienty. Nakonec $g[\text{m s}^{-2}]$ je gravitační zrychlení, $m[\text{kg}]$ hmotnost kopteru, $\cos \phi[-]$ je kosinus úhlu naklonění a $\sin \theta[-]$ je sinus úhlu naklonění.

Na rozdíl od předchozích smyček je v regulátoru výšky zahrnut modul MIX, který převede naměřená data ze senzorů (Z_{acc} výstup akcelerometru, Z_{GPS} výstup z GPS,

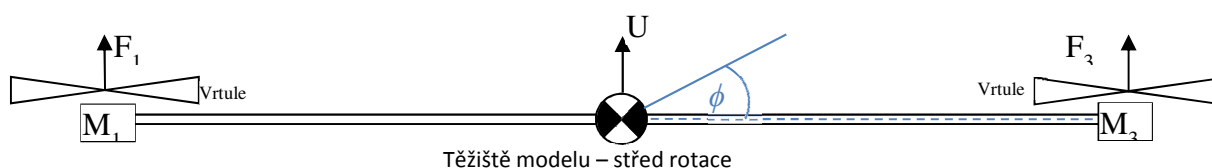
Z_{tlak} výstup z tlakoměru) na výstup. Pokud dojde k výpadku jednoho ze signálů, blok dokáže stále pracovat.

S ohledem na rovnici 6.28 je regulace výšky komplexní úloha. Výška letu je ovlivněna úhly klonění i klopení a navíc je kompenzováno i gravitační zrychlení. Hmotnost kopteru m [kg] má stejný význam jako momenty setrvačnosti v předešlých smyčkách.

6.1.9 Seřízení regulátorů

Regulace náklonu jednotlivých os ϕ a θ je nezávislá, nastavené hodnoty PID složek regulátoru jsou shodné pro obě osy. Časová konstanta T_1 má hodnotu přibližně $T_1 = 0,2$ [s].

Na následujícím obrázku je zjednodušené schéma regulované soustavy.



Obr. 6.15 Schéma regulované soustavy

M_1 a M_3 je označení jednotlivých motorů, F_1 a F_3 jsou tahové síly jednotlivých motorů.

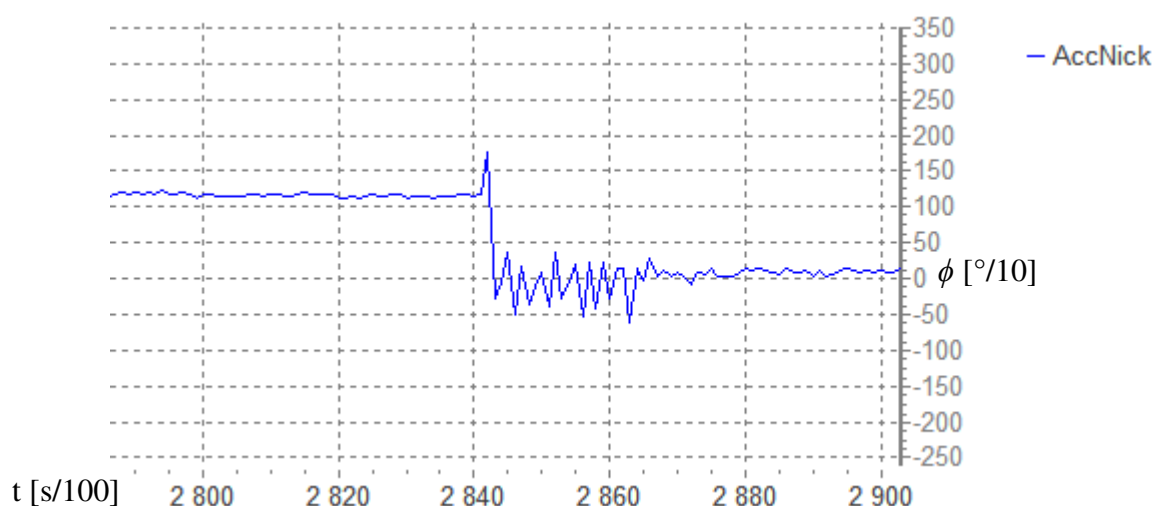


Výchozí hodnoty

Z mnoha metod pro nastavení parametrů regulátoru, byla vybrána následující, Zigler-Nicholsova, která je jednoduchá a velmi účinná [Víteček, Vítečková 2008]:

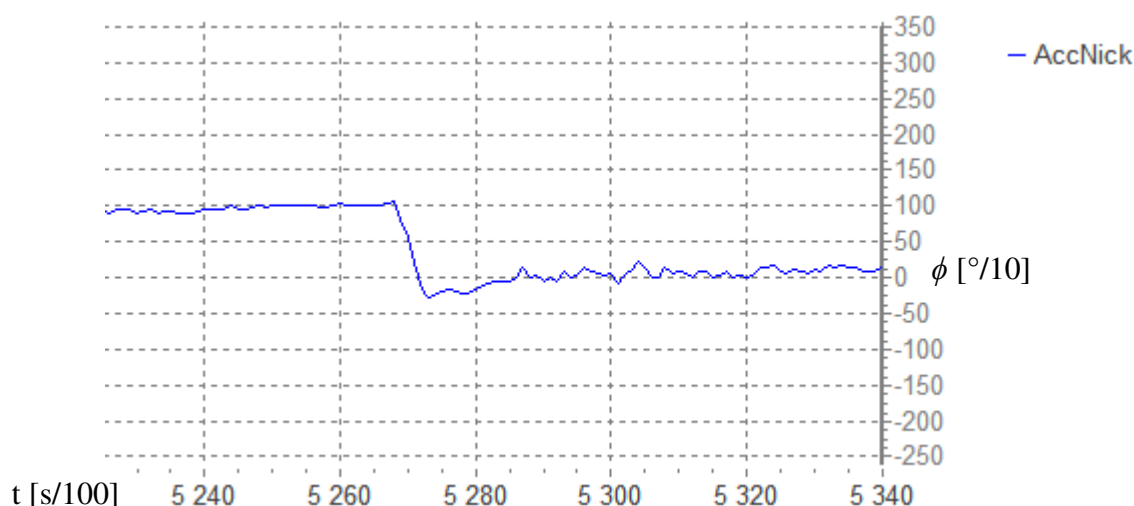
1. Na sestaveném modelu se nastaví konstantní požadované hodnoty stavů w , a v ručním režimu se nastaví $y = w$ (V našem případě $w = 0$). Vyřadí se integrační složka ($I = 250$ [nastavitelné maximum]) a derivační složka ($D = 0$). Zesílení k_p se sníží na nízkou hodnotu ($k_p = 10$).
2. Zesílení regulátoru k_p se postupně zvyšuje tak dlouho, až při skokové změně požadované hodnoty w se dostane požadovaný průběh regulované veličiny y . Model rotace kolem osy x je integrační soustava 1. Řádu, proto nevznikne regulační odchylka.

Průběh regulace při nastaveném $k_p = 10$, $I = 250$, $D = 0$ vypadá následovně:



Graf 1 Odezva na skokovou změnu natočení osy x

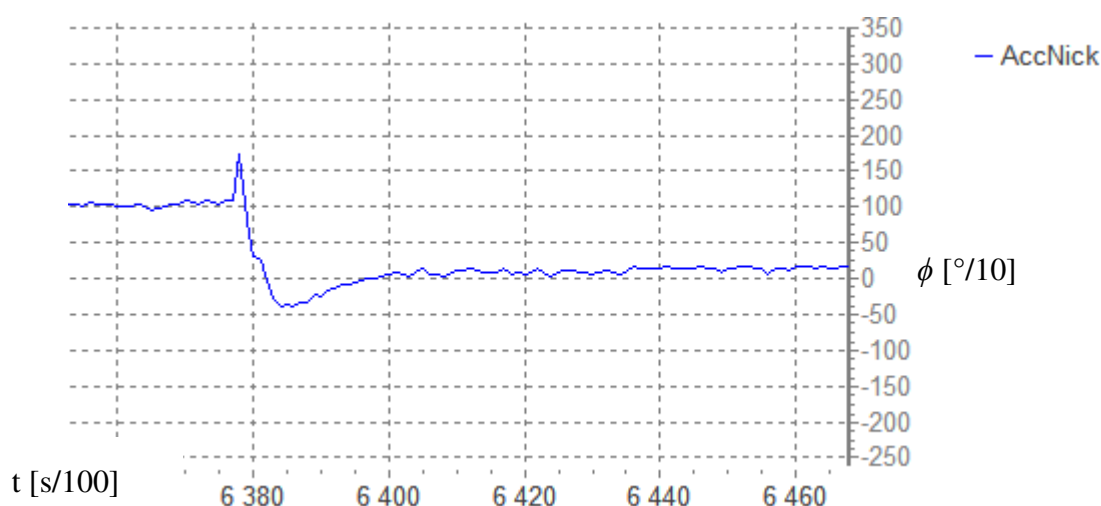
Z grafu je vidět kmitavý průběh při skokové změně natočení osy x. Je patrné kmitání a neustálená poloha. Průběh regulace po zvýšení nastavení zesílení regulátoru na $k_p = 120$, $I = 250$, $D = 0$ vypadá následovně:



Graf 2 Odezva na skokovou změnu natočení osy x, kde $k_p = 120$, $I = 250$, $D = 0$

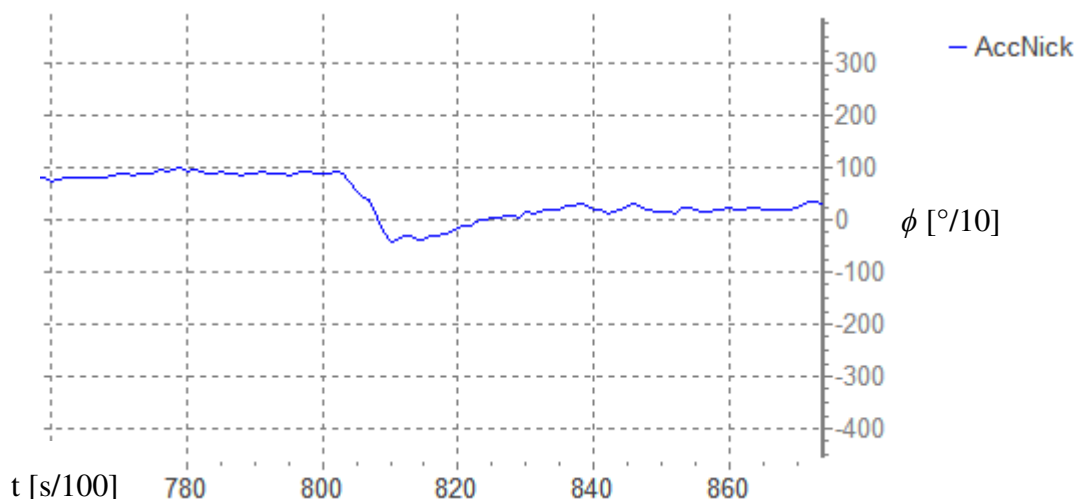
Z grafu je patrné, že kmitání soustavy je mnohem mírnější, avšak průběh regulace je stále nutné doladit.

3. Zesílení regulátoru k_p se sníží zhruba na $\frac{3}{4}$ předchozí hodnoty a pomalu se začne snižovat hodnota integrační časové konstanty T_I a to tak dlouho, až je odstraněna trvalá regulační odchylka a získá se při skokové změně polohy žádané veličiny w požadovaný průběh regulované veličiny y . Je vhodné, aby byl tento průběh mezní, nekmitavý. Nastavíme proto $k_p = 100$, $I = 200$, $D = 0$, průběh regulace je vidět na následujícím grafu:



Graf 3 Odezva na skokovou změnu natočení osy x , kde $k_p = 100$, $I = 200$, $D = 0$

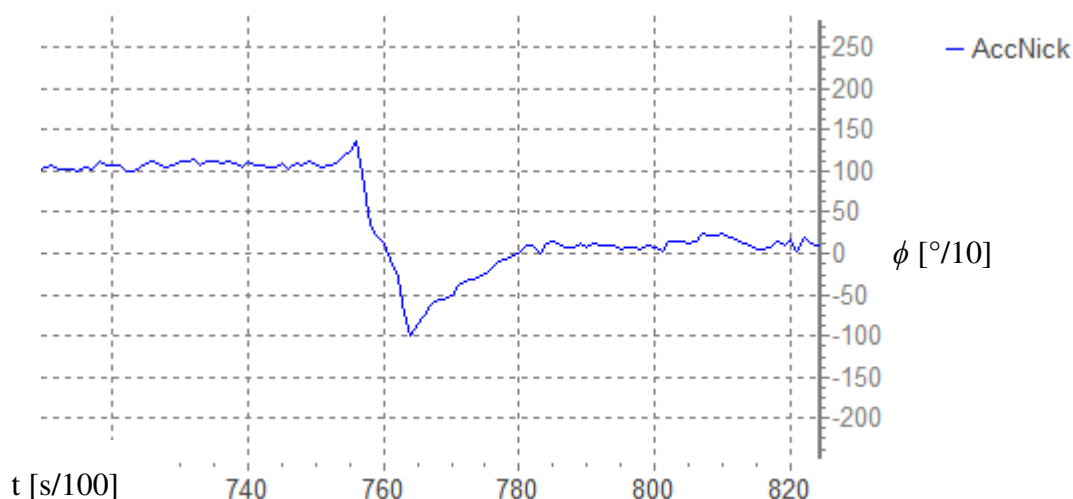
Na předchozím grafu je vidět zlepšení regulačního pochodu z hlediska kmitavosti soustavy. Je patrný mírný 45% překmit. Postupně se sníží hodnota integrační složky až na $T_I = 120$. Průběh regulace pak vypadá následovně:



Graf 4 Odezva na skokovou změnu natočení osy x , kde $k_p = 100$, $I = 120$, $D = 0$

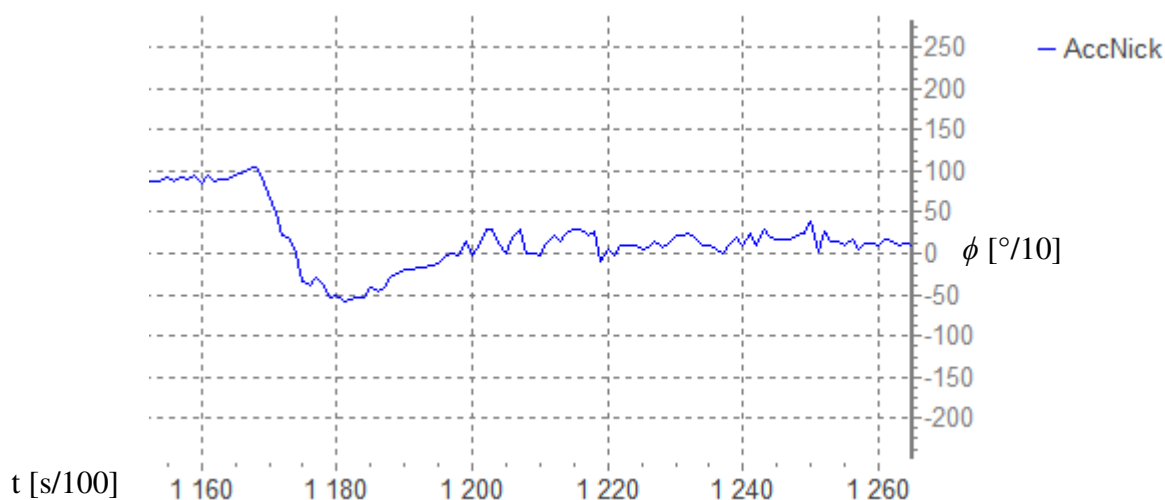
Průběh regulace je opět méně kmitavý. Doba regulace je vyšší, ale překmit se snížil na přijatelných 10%.

4. V případě použití derivační složky se časová konstanta T_D nastaví na počáteční hodnotu $1/10 T_I$. Jak je patrné z následujícího grafu, hodnota $T_D = 12$ způsobila zrychlení regulačního procesu.



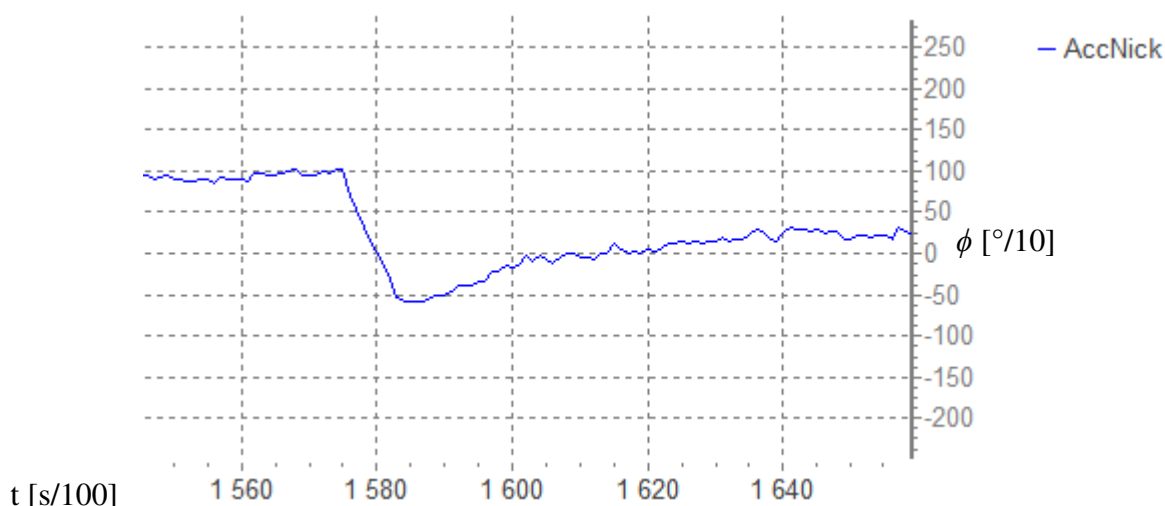
Graf 5 Odezva na skokovou změnu natočení osy x , kde $k_p = 100$, $I = 120$, $D = 12$

5. Celkově se regulační proces zlepšil po aktivaci derivační činnosti. Jelikož došlo ke zrychlení regulačního procesu, hodnota derivační časové konstanty se zvýší na $\frac{1}{4}$ hodnoty T_I , zesílení regulátoru k_p se zvýší o $\frac{1}{4}$ předchozí hodnoty a integrační časová konstanta se sníží o $\frac{1}{3}$ předchozí hodnoty. Při zvýšeném nastavení derivační složky regulátoru na $\frac{1}{4}$ hodnoty T_I již ale dochází k nepříznivému chování celé soustavy. Toto chování regulátoru je způsobeno příliš vysokým šumem snímačů. Akční zásah regulátorů je příliš aktivní a soustava je značně neklidná, jak je vidět na následujícím grafu Graf 6 kde $k_p = 120$, $I = 90$, $D = 30$.



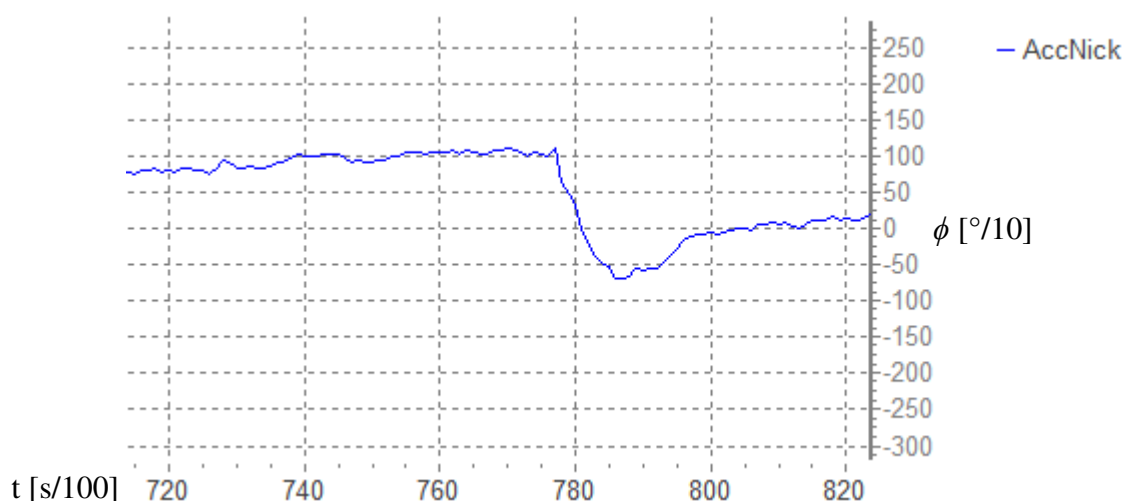
Graf 6 Odezva na skokovou změnu natočení osy x , kde $k_p = 120$, $I = 90$, $D = 30$

Derivační složku proto snížíme na minimum a postupně zvyšujeme. Na následujícím grafu je vidět nastavení regulátoru $k_p = 120$, $I = 90$, $D = 15$.



Graf 7 Odezva na skokovou změnu natočení osy x , kde $k_p = 120$, $I = 90$, $D = 15$

Z grafu Graf 7 je vidět, že soustava je klidnější a doba regulace je výrazně kratší. Soustava je však stále mírně rozkmitaná a dochází ke vzniku regulační odchylky. Vracíme se tedy k téměř původnímu nastavení $k_p = 110$, $I = 100$, $D = 10$. Derivační složka je nastavena tak, aby nedocházelo k vysokému překmitu, který byl způsoben příliš rychlým zásahem akční veličiny.



Graf 8 Odezva na skokovou změnu natočení osy x , kde $k_p = 110$, $I = 100$, $D = 10$

Z grafu Graf 8 je vidět, že soustava při použití malé hodnoty derivační složky klidnější. Regulační proces s PID regulací je rychlejší než při použití PI regulace.



Výchozí hodnoty nastavení:

Výchozí hodnoty nastavené na regulátorech stabilizátorů jsou tedy:

$$k_p = 110, I = 100, D = 10.$$

Při jiném nastavení není let modelu příliš optimální, protože dochází k několika nežádoucím jevům – převážně horizontální polohová nestabilita. Proto je vhodné nastavit D složku tak, aby došlo k požadovanému překmitu (30-50%).

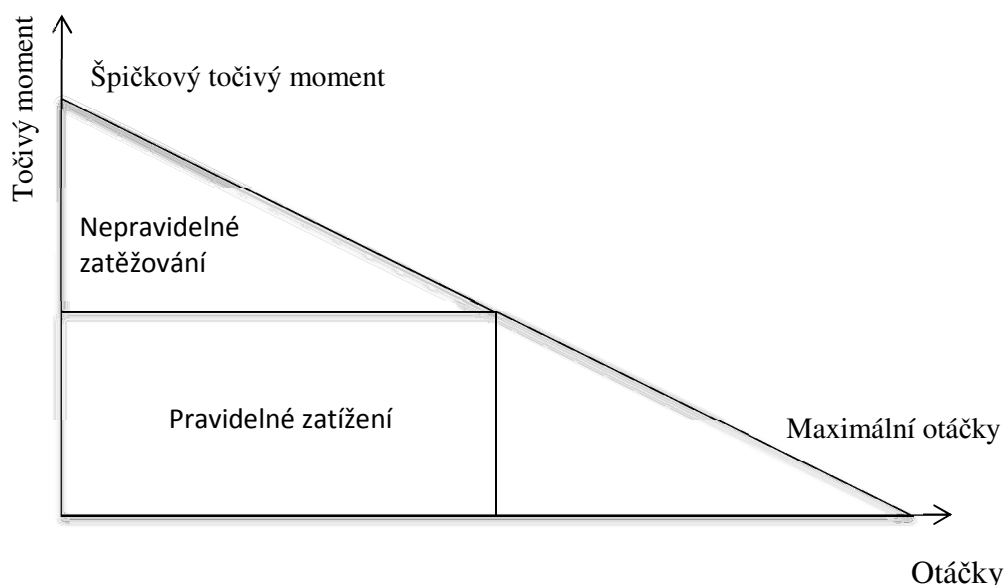
6.2 BLDC motor

K pohonu vrtulí kopteru se používají výhradně bezkartáčové DC motory. Jsou složeny z rotujícího pláště s neodymovými magnety a statoru s vinutím.

Bezkartáčové DC motory (Brushless DC motors, BLDC motors, BL motors) jsou také známé jako elektronicky komutované motory (ECM, EC motors). Tyto motory jsou napájeny stejnosměrným proudem DC a používají elektronickou komutaci, zatímco běžné DC motory používají mechanický komutátor a kartáče. Závislost proudu na točivém momentu i závislost frekvence na rychlosti jsou lineární.

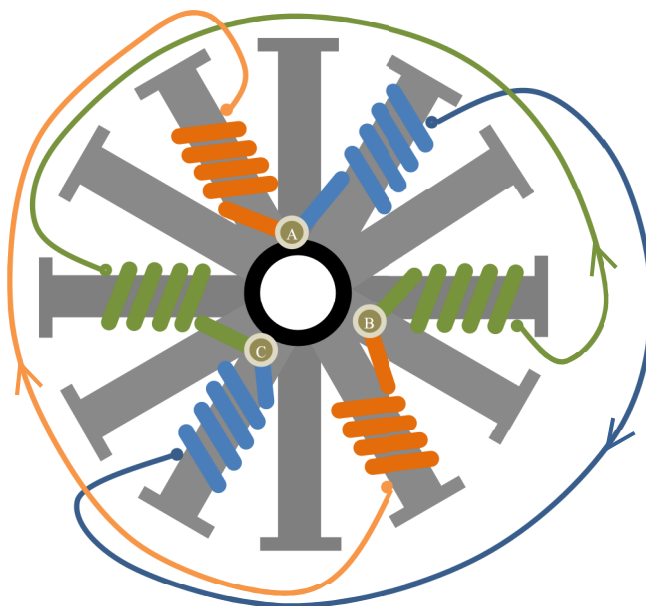
BLDC motory svou strukturou připomínají krokové motory s permanentními magnety a s rozdílným počtem pólů na rotoru a statoru. Avšak krokové motory mají využití zcela jiné a to především přesné změny polohy rotoru po krocích.

Běžné kartáčové motory byly omezeny mechanickou životností komutátoru a bylo nutné servisovat kartáče (uhlíky). Byly nahrazeny BLDC motory s příchodem výkonných a komplexních regulačních obvodů. Oproti komutátorovým motorům mají bezkartáčové lineárně ubývající točivý moment v závislosti na otáčkách.



Obr. 6.16 Charakteristika BLDC motorů.

Bezkartáčové motory jsou složeny z rotujících magnetů na rotoru a ze statoru s vinutím. Komutátor je nahrazen elektronickým obvodem, který kontinuálně přepíná napětí mezi fázemi a udržuje motor v chodu. Elektronický obvod tedy pracuje s motorem stejně jako komutátor, ale není tak náročný na údržbu mechanických částí. Bezkartáčový motor je tedy omezen pouze životností ložisek.



Obr. 6.17 Schéma vinutí BLDC motoru.

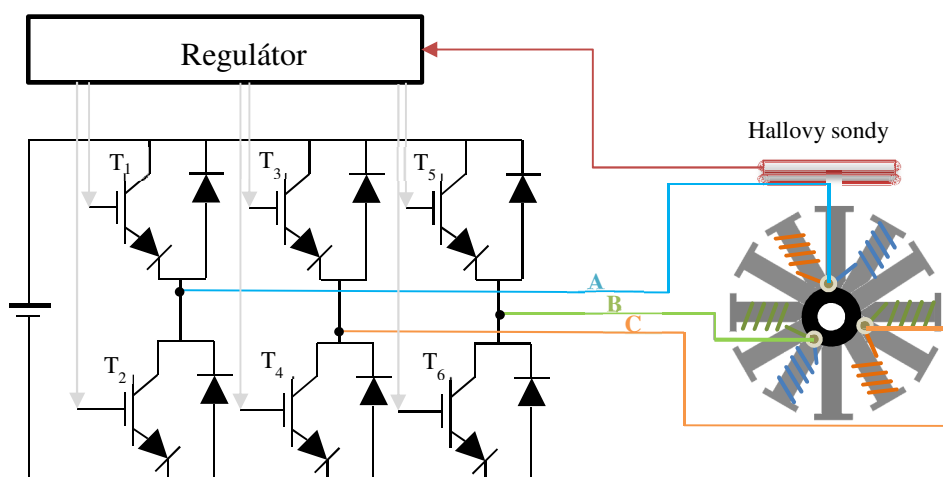
BLDC motory nabízí oproti běžným DC motorům lepší poměr krouticího momentu na hmotnost i krouticího momentu na watt (vyšší účinnost), vyšší spolehlivost, nižší hluk, delší životnost (žádné kartáče ani korodující komutátor), žádné jiskření a celková redukce elektromagnetických interferencí (EMI).

Rotor je složen jen z magnetů, díky tomu jsou značně redukovány vibrace, a protože je vinutí ukryto a lze jej chladit jen vedením tepla, není potřeba řešit chlazení uvnitř motoru. To znamená, že vnitřní část motoru může být kompletně zakryta a chráněna před prachem a různými částicemi.

6.2.1 Modelování BLDC motoru

BLDC motor je osazen permanentními magnety v rotoru (outrunner) nebo statoru (inrunner). Ve vinutí vzniká rotací permanentních magnetů lichoběžníkový nebo sinusový průběh napětí (takzvaný back EMF – zpětná elektromagnetická síla). Vinutí motoru je spojeno s polem většinou šesti tranzistorů, jejichž spínací sekvence je řízena v závislosti na poloze rotoru vůči statoru. Sinusová komutace se využívá jen zřídka vzhledem k náročnějšímu řízení a nutnosti přesného snímání polohy rotoru. Oproti lichoběžníkově komutovaným motorům mají sinusově komutované motory plynulejší průběh krouticího momentu.

BLDB motory existují v mnoha provedeních, dále budeme popisovat pouze motory s třemi fázemi, protože jde o nejběžnější motory na trhu, navíc mají vysokou účinnost a hladký průběh točivého momentu.



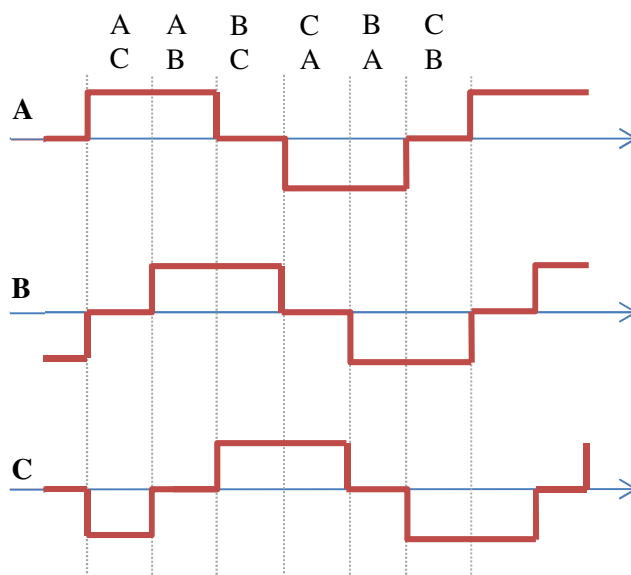
Obr. 6.18 Schéma zapojení měniče napětí s lichoběžníkovou komutací

Proudový průběh BLDC motorů má ve většině případů lichoběžníkový nebo sinusový tvar a je synchronní s průběhem napětí, které je generováno elektromagnetickým polem rotujícího motoru. Synchronizací obou průběhů zajistí konstantní průběh točivého momentu při konstantních otáčkách.

Mechanický komutátor DC motoru je nahrazen elektronickými spínači, které přivádějí proud do vinutí v závislosti na jeho pozici. Tento typ AC motoru byl pojmenován jako elektronicky komutovaný nebo bezkartáčový motor – BLDC motor. Jeho výkon je srovnatelný s DC motory stejných rozměrů.

Tyto motory jsou řízeny pomocí elektronických tří-fázových regulátorů. Využívají senzory pro zjištění polohy rotoru vůči statoru, čímž lze přesně řídit spínání jednotlivých fází. Tyto senzory jsou Hallové sondy, enkodéry nebo totální optické snímače polohy. Tyto senzory zvyšují cenu i rozměry celého pohonného systému. Hallové sondy jsou využívány nejčastěji, avšak jsou citlivé na teplo, které je motorem přirozeně produkováno. Motor se nesmí zahřát nad teplotu okolo 75°C, která je pro Hallové sondy limitující. Navíc existuje mnoho aplikací, které neumožňují použít přídavné senzory v motoru. Proto bylo snímání polohy rotoru v posledních letech nahrazeno bez-senzorovou technologií.

Typicky je motor řízen tří-fázovým měničem pomocí šesti kroků komutace. Interval vedení je 60° pro každou fázi. Jednotlivé sekvence se označují jako AB-AC-BC-BA-CA-CB. Každá sekvence vedení se nazývá krok. Přechod mezi jednotlivými kroky se nazývá komutace. Jak je vidět, každý krok využívá pouze dvě fáze k vedení proudu.



Obr. 6.19 Šest logických kroků při řízení BLDC motoru

Časování komutace je determinováno pomocí pozice rotoru, která může být detekována výše zmíněnými způsoby – Hallovými sondy nebo zpětné elektromagnetické impulsy, které jsou generovány na volné cívce.

V literatuře [Luk, Lee, 1994] se lze setkat s dvěma způsoby řízení bezsenzorové komutace. První metoda je již zmíněné snímání napětí, které vzniká na volné cívce a druhým způsobem je estimace polohy rotoru, která vyhodnocuje parametry motoru a také celkové napětí a proudy. Druhý způsob řízení vyžaduje přesné a drahé DSP, které pracuje se složitým algoritmem řízení.



Sinusová komutace

Sinusová komutace se používá především v případech, kdy je nutný plynulý chod motoru. Měnič se snaží řídit napětí na fázích tak, aby se motor pohyboval plynule a bez cukání.

V tomto případě je však nutné znát přesnou polohu rotoru, kterou nelze měřit Hallovými sondami. V tomto případě je nutné použít enkodéry nebo podobné snímače.

Proudový vektor na všech fázích musí být plynule rotující a mít konstantní magnitudu. Protože je vinutí na statoru posunuto o 120° musí být i fázový rozdíl mezi jednotlivými fázemi 120° . Informace o natočení rotoru je použita k správnému posouvání dvou sinusoid vůči sobě. Amplituda je zesílena dle požadavku na točivý moment. Výsledkem jsou dva sinusové signály, které jsou odpovídajícím způsobem synchronizovány, aby vytvořily rotující vektor napětí na statoru.

Zapojení tří cívek do hvězdy lze zapsat následující rovnicí:

$$v_{ab} = R(i_a - i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a - i_b) + e_a - e_b \quad 6.29$$

$$v_{bc} = R(i_b - i_c) + L \frac{d}{dt}(i_b - i_c) + e_b - e_c$$

$$v_{ca} = R(i_c - i_a) + L \frac{d}{dt}(i_c - i_a) + e_c - e_a$$

$$T_e = k_f \omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} + T_L$$

Kde v , je napětí [V], i je proud [A], e je změřné elektromagnetické napětí [V], to vše mezi jednotlivými fázemi a, b, c . Celkový odpor ve fázi je R , indukance jednotlivých fází L . Hodnoty T_e, T_L představují krouticí moment elektromagnetického pole a zatížení výstupu. J představuje setrvačnost motoru, k_f je třecí konstanta a ω_m je úhlová rychlost rotoru. Elektromagnetický krouticí moment spolu se zpětným EMF lze vyjádřit:

$$\begin{aligned} e_a &= \frac{k_e}{2} \omega_m F(\theta_e) \\ e_b &= \frac{k_e}{2} \omega_m F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_c &= \frac{k_e}{2} \omega_m F\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) \\ T_e &= \frac{k_t}{2} \left[F(\theta_e) i_a + F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) i_b + F\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) i_c \right] \end{aligned} \quad 6.30$$

Kde k_t, k_e jsou konstanty krouticího momentu a zpětného EMF. Elektrický úhel θ_e je shodný s úhlem rotoru násobeno počtem pólů ($\theta_e = \frac{p}{2} \theta_m$). Funkce $F(-)$ popisuje průběh jedné periody lichoběžníkového zpětného EMF. Tuto funkci lze zapsat:

$$F(\theta_e) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \theta_e < \frac{2\pi}{3} \\ 1 - \frac{6}{\pi} \left(\theta_e - \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{2\pi}{3} \leq \theta_e < \pi \\ -1 & \pi \leq \theta_e < \frac{5\pi}{3} \\ -1 + \frac{6}{\pi} \left(\theta_e - \frac{5\pi}{3} \right) & \frac{5\pi}{3} \leq \theta_e < 2\pi \end{cases} \quad 6.31$$

Pro implementaci této formulace do simulačního prostředí je nutné upravit rovnice 3.7. Protože každá z rovnic napětí je lineární kombinací ostatních budou ke stavovému popisu stačit pouze dvě rovnice využívající tuto souvislost:

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

bude mít upravená soustava rovnic tvar:

$$v_{ab} = R(i_a - i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a - i_b) + e_a - e_b \quad 6.32$$

$$v_{bc} = R(i_b - 2i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a - 2i_b) + e_b - e_c$$

Celkový model BLDC motoru má tvar:

$$\begin{pmatrix} i'_a \\ i'_b \\ \omega'_m \\ \theta'_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{k_f}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ \omega_m \\ \theta_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{2}{3L} & \frac{1}{3L} & 0 \\ -\frac{1}{3L} & \frac{1}{3L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{ab} - e_{ab} \\ v_{bc} - e_{bc} \\ T_e - T_L \end{pmatrix} \quad 6.33$$

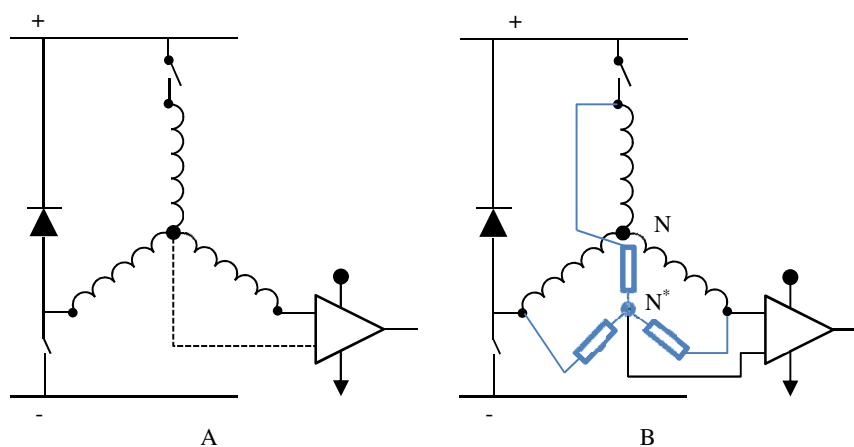
$$\begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \omega_m \\ \theta_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ \omega_m \\ \theta_m \end{pmatrix}$$

Modely strojů jsou obvykle transformovány na rotující referenční rám pro zjednodušení a zefektivnění výpočtu. Protože nebylo použito sinusové napětí, nebyla tato metoda použita, nedošlo by ke zjednodušení výpočtu [Luk, 1994].

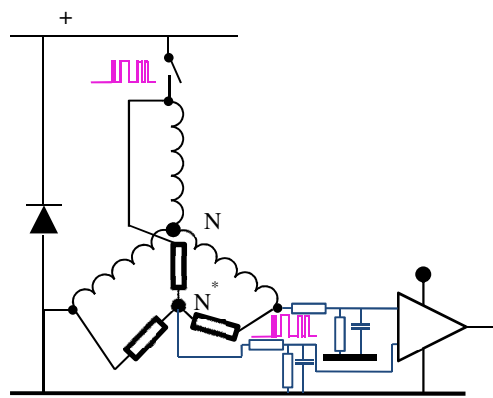
6.2.2 Technologie snímání EMF

Svorkové napětí na vinutí je kontinuálně měřeno. Aby bylo možné určit napětí volné cívky, je nutné jej měřit vůči nulovému potenciálu, který se nachází ve středu vinutí a je nedostupný. Zpětná elektromagnetická síla (back EMF) se měří vůči středu vinutí. Měří se průchod EMF nulovým potenciálem (zero crossing).

Nulový bod (bod s nulovým potenciálem) je tedy nutné určit, aby bylo možné měřit zpětné napětí z volné cívky. V praxi se využívá tzv. virtuální střed, který má teoretický shodný potenciál s reálným středem Y vinutí. Virtuální střed je vyroben z rezistorů.



Obr. 6.20 Vinutí motoru s přístupným středem vinutí (A) a virtuální střed vytvořený s pomocí rezistorů (B).



Obr. 6.21 Průběh napětí modulovaného do PWM na zapojení s virtuálním středem.

Protože jsou veškeré signály (lichoběžníkové i sinusové) převedeny do PWM podoby, vzniká problém s vysokofrekvenčním rušením, které musí být odfiltrováno.



BLDC motory v praxi

Výkonné motory využívají výhradně PWM modulaci pro veškerý svůj běh – startování, brzdění, udržování otáček apod.

Řídicí algoritmus musí obsahovat:

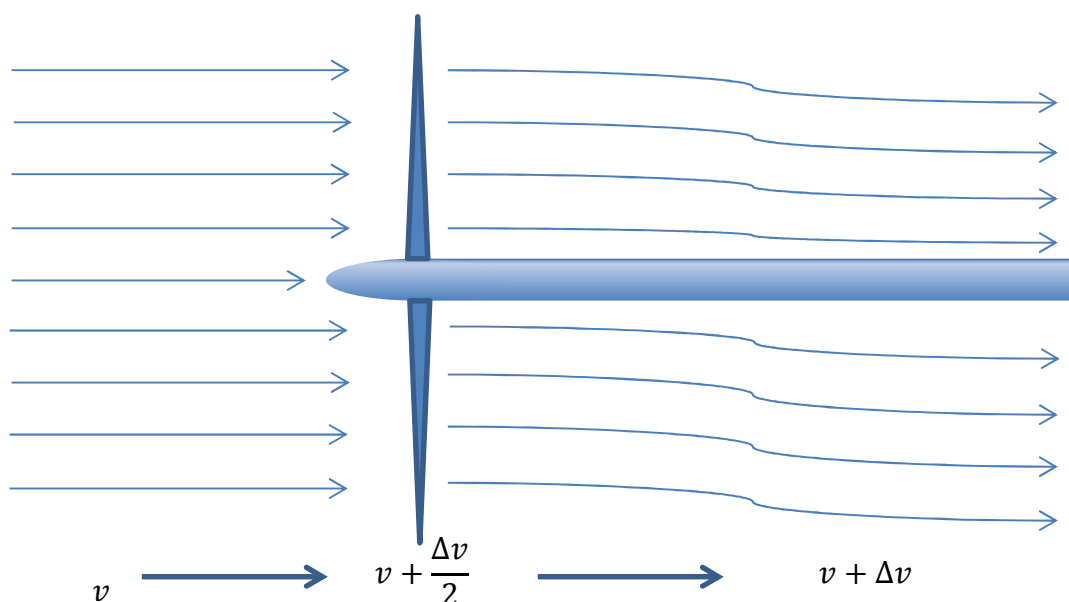
- PWM modulátor pro napájení motoru.
- Mechanismus pro komutaci motoru.
- Metodu pro estimaci polohy rotoru, nejlépe pomocí zpětných elektromagnetických pulsů nebo Hallových sond.

PWM se používá k vytvoření požadovaného napětí na vinutí s pomocí jednoduchých spínačů. Pokud je motor vhodně komutován, je jeho výkon srovnatelný s DC motorem.

6.2.3 Model aerodynamických prvků

Vrtule zrychluje částice vzduchu a odsunuje je za sebe, čímž vznikne síla přímo působící na lopatce vrtule. Tato síla se nazývá tah. Podíváme-li se na vrtulové pohony z blízka, zjistíme, že vrtule vytvoří na částicích vzduchu změnu rychlosti Δv a nakonec jim udělí rychlost v .

První část tohoto zrychlení se odehrává na vstupu před vrtulí a zbytek zrychlení vznikne za vrtulí. Protože objem vzduchu procházejícího proudem kolem vrtule musí být konstantní, narůstající rychlost částic vede ke zhuštění částic za vrtulí a tím ke zvýšení tlaku, které vyvolá tah.



Obr. 6.22 Boční pohled na tubu s vrtulí. Kde je proud vzduchu akcelarován a rozvířen.

Vrtule proud vzduchu nejen urychlí, ale také rozvíří. Udělí mu rotaci na výstupu. Velikost rotace vzduchu závisí na úhlové rychlosti vrtule a spotřebovává energii, která již není součástí tahu. Běžně dochází ke ztrátám okolo 1%-5% na dobře navržených vrtulích. Rotace výstupního proudu vzduchu (okolo $1^\circ - 10^\circ$) způsobuje nesymetrické proudění výstupu a ovlivňuje součásti za vrtulí.

Tah vrtule je závislý na nadmořské výšce, na hustotě média a na rychlosti, kterou se vrtule v médiu pohybuje. Tyto závislosti lze vyjádřit následujícím vzorcem:

$$T = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \left(v + \frac{\Delta v}{2} \right) \cdot \rho \cdot \Delta v \quad 6.34$$

Kde:

T	Tah	[N]
D	Průměr vrtule	[m]
v	Rychlost vzduchu na vstupu	[m/s]
Δv	Rychlost dodaná vrtulí	[m/s]
ρ	Hustota média	[kg/m ³]

(vzduch: $\rho = 1\,225 \text{ kg/m}^3$, voda: $\rho = 1\,000 \text{ kg/m}^3$)

Rovnice nám říká, že se tah T [N] bude zvyšovat, pokud se zvětší průměr vrtule D [mm] nebo když se zvětší hustota média ρ [kg m⁻³]. Zrychlení vrtule závisí na rychlosti v [m s], i když není zcela pravdou, že zvyšováním rychlosti v dojde ke zvýšení tahu T . Lze však říci, že zvyšováním přidané rychlosti Δv [ms] zaručeně dojde ke zvýšení tahu. Pro vrtuli s fixním průměrem, rotující určitou rychlostí, pracující v určitém médiu je tah závislý pouze na přírůstku rychlosti Δv [ms].

Výkon vrtule je definován jako práce za jednotku času. Použitím dostupného tahu T [N] k pohonu vozidla určitou rychlostí v (rychlost v je definována jako dráha za jednotku času) můžeme vypočítat výkon (také nazývaný „potřebný výkon“) [NACA]:

$$P_p = T \cdot v \quad 6.35$$

Samozřejmostí je, že cílem je vytvořit potřebný tah za použití co nejnižšího výkonu. Vztah mezi tahem a výkonem lze vyjádřit pomocí účinnosti.

Účinnost vrtule η [%] je definována jako poměr potřebného výkonu k výkonu motoru:

$$\eta = \frac{P_p}{P_{motoru}} = \frac{T \cdot v}{P_{motoru}} \quad 6.36$$

Tato definice účinnosti používá rychlost v , což znamená, že účinnost bude nulová, pokud i rychlost bude nulová. Takže tato definice není použitelná pro speciální případ – statický tah.

Zapomeneme-li na ztráty způsobené vířením vzduchu za vrtulí, lze vyjádřit výkon vrtule takto:

$$P_{motoru} = T \cdot \left(v + \frac{\Delta v}{2} \right) \quad 6.37$$

Po dosazení:

$$v = \eta \cdot \left(\frac{2 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot D^2 (1 - \eta)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad 6.38$$

Jak již bylo naznačeno, nemůže být tato rovnice použita pro všechny případy. Pro nulovou rychlost v vychází účinnost nulová. Nelze tedy vyšetřit účinnost ve stavu, který je pro vizení ($v = 0$) kopteru běžný.

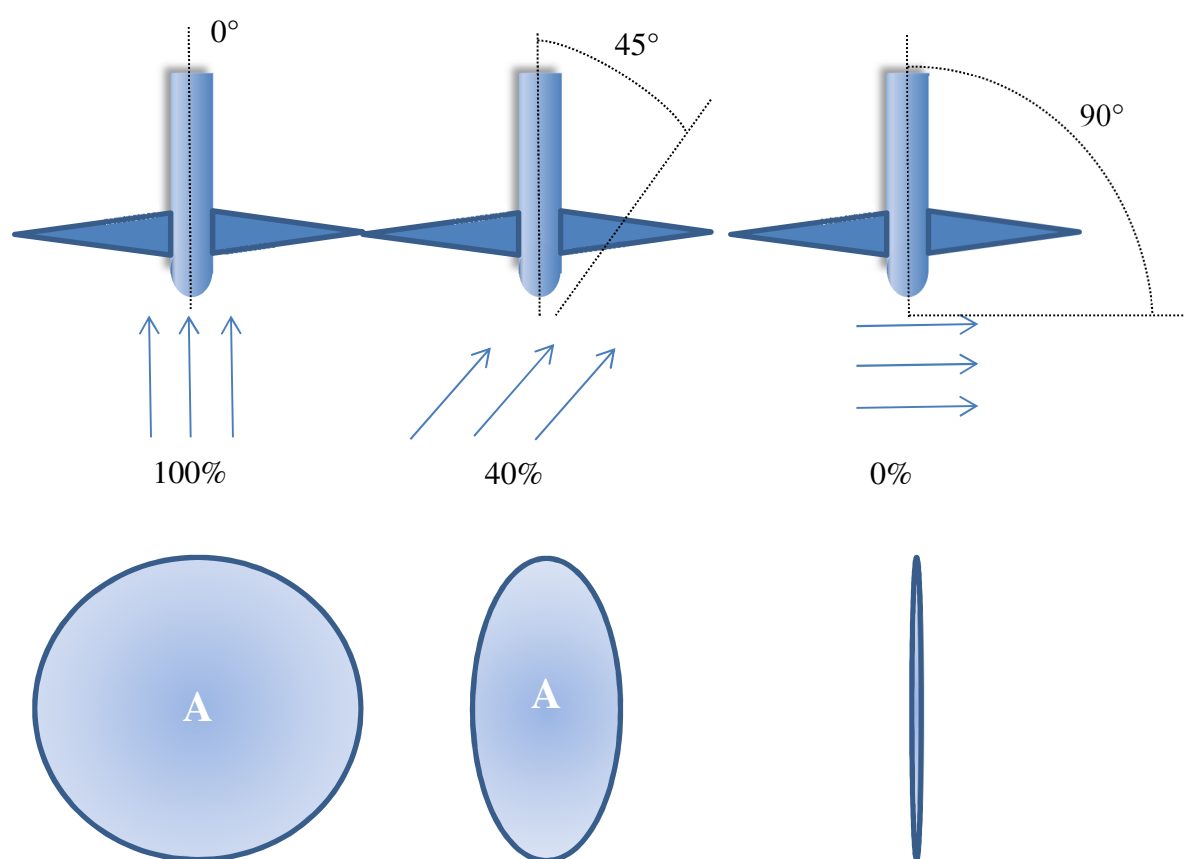
Následující výraz vychází z rovnice 6.35, kdy po úpravě:

$$B = \frac{T \cdot (v + v_l)}{P_{motoru}} \quad 6.39$$

de v_l [m s] je indukovaná rychlost na vrtuli v [m s] je rychlost stroje T [N] tah a P_p [W] je potřebný výkon. Abychom vyřešili B , je nutné určit v_l . Budeme vycházet z analogie $F = m \cdot a$:

$$T = \rho \cdot A \cdot v \cdot \Delta v \quad 6.40$$

Kde ρ je hustota vzduchu, A [m²] vyjadřuje plochu, kterou pokryjí listy vrtule.



Obr. 6.23 Vliv úhlu proudění vzduchu na směr pohybu vrtule.

V proudu vzduchu za vrtulí již nedochází k dalšímu zrychlování částic vzduchu. Z principu fungování vrtule je jasné, že urychluje jen polovinu částic, které vytváří proud vzduchu za vrtulí ($v_I = \frac{1}{2}\Delta v$) viz. Obr. 6.22. Po dosazení:

$$T = \rho \cdot A \cdot \left(v + \frac{1}{2}\Delta v \right) \cdot \Delta v \quad 6.41$$

Úpravou rovnice vznikne kvadratický tvar:

$$\frac{1}{2}\Delta v^2 + v\Delta v - \frac{T}{\rho A} = 0 \quad 6.42$$

Řešení této rovnice je:

$$\Delta v = \frac{-v \pm \sqrt{v^2 + 4 \frac{1}{2} \frac{T}{\rho A}}}{1} \quad 6.43$$

Po dosazení $v_I = \frac{1}{2}\Delta v$ vznikne:

$$v_I = \frac{-v \pm \sqrt{v^2 + 4 \frac{1}{2} \frac{T}{\rho A}}}{2} \quad 6.44$$

Upravíme rovnici 6.37:

$$T = \frac{\eta P_{motoru}}{v} \quad 6.45$$

Po substituci:

$$v_I = \frac{-v \pm \sqrt{v^2 + 4 \frac{1}{2} \frac{1}{\rho A} \frac{\eta P_{motoru}}{v}}}{2} \quad 6.46$$

Nyní mám tři rovnice, které použijeme pro řešení. Použijeme rovnici 6.40:

$$P_{motoru} = \frac{T \cdot (v + v_I)}{B} \quad 6.47$$

Dále použijeme substituci s rovnicí 6.37:

$$\eta = \frac{v \cdot B}{v + v_I} \quad 6.48$$

Substitucí s rovnicí 6.46 vznikne:

$$\eta = \frac{v \cdot B}{v + \frac{-v \pm \sqrt{v^2 + 4 \frac{1}{2} \frac{1}{\rho A} \frac{\eta P_{motoru}}{v}}}{2}} \quad 6.49$$

Nyní je možné snadno určit účinnost vrtule.



Statický tah

Statický tah je speciální případ, kdy rychlost v a vypočtená účinnost η jsou rovny nule. Použijeme-li koeficient B do rovnice pro výpočet tahu T , získáme následující výraz, který umožní vypočítat tah i při nulové rychlosti v :

$$T = \left(\frac{B \cdot P_{motoru}}{\sqrt{\frac{1}{2} \frac{1}{\rho A}}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad 6.50$$

7 PRAKTICKÁ VYUŽITÍ

Multikopter v současném stavu umožňuje létat po předem definovaných trajektoriích. Je schopen udržovat požadovanou polohu v prostoru s přesností na 4m. Díky tomu je možné provádět různá měření v požadovaných oblastech. Požadované trajektorie letu se editují a vytvářejí prostřednictvím osobního počítače. Trajektorie letu se zhotovují na aktuálních mapových podkladech.



Kamerový systém

Pokud je multikopter vybaven kamerou, je možné využít navigaci k automatickému fotografování objektů. Kdy lze v mapě označit focený objekt a požadovanou výšku, ze které má být vyfocen. Stabilizační mechanismus pak automaticky nastaví úhel kamery tak, aby byl objekt v záběru, dle požadavku autora. Tato funkce se využívá pro fotografování historických budov apod.



Senzory

Dále je možné doplnit multikopter o nejrůznější senzory, kterými je možné měřit různé veličiny. Limitujícím faktorem je pouze hmotnost senzorů a měřicí aparatury. Možnosti využití jsou tedy široké – koncentrace částic v atmosféře, teplota, tlak, vlhkost, inverzní hladina, radiace apod.



Termokamera

Při osazení termokamerou s bezdrátovým přenosem obrazu je možné využít multikopter při pátrání po pohřešovaných osobách, při hasičských zásazích při policejních kontrolách apod.



Laserový scanner

Laserový scanner jako součást anti-kolizního systému může být využit i jako dálkoměr. Při použití přesně inerciální jednotky a GPS je pak možné scannerem měřit tvar okolního terénu – obsah výkopů, hald apod.

Pokud využijeme senzory pro měření obsahu prachových částic, teploty, vlhkosti a tlaku, pak je možné měřit kvalitu ovzduší.

7.1 Případ první - Vzdušný jeřáb

Význam přepravy materiálu vzduchem není nutné zdůrazňovat. Současná koncepce multi-rotorových helikoptér není předurčena pro přepravu materiálu na velké vzdálenosti. Svými vlastnostmi jsou tyto malé stroje vhodné pro přepravu nákladu s nízkou hmotností a na krátké vzdálenosti.

Tyto vlastnosti jsou vhodné pro využití v armádě a to především k přepravě tržavin. V kombinaci se zpřesněnou D-GPS navigací pak lze takové stroje využít jako naváděné střely. Cílem výzkumných skupin ve spojených státech amerických (GRASP Lab, MIT apod.) je, mimo jiné, využít tyto stroje pro transport tržavin do podzemních jeskyní, kde je nutné provádět rychlé manévry a navíc se orientovat v prostoru pomocí integrovaných senzorů.



Obr. 7.1 Konstrukční drony v GRASP Lab, University of Pennsylvania. [Zdroj: GRASP Lab]



Příklad z praxe

V civilní sféře je zatím jen málo aplikací, které jsou pro tyto malé stroje vhodné, především je lze použít jako montážní drony pro sestavování malých konstrukcí – mosty apod. Tímto výzkumem se zabývají ústavy MIT a GRASP Lab. Při sestavování konstrukcí je nutné znát velice přesně polohu jednotlivých kopterů a dále je nutné zajistit jejich bezproblémovou spolupráci – několik dronů pracuje, několik dobíjí energii apod.

Pro využití v průmyslové praxi je vhodnější současný model zvětšit a změnit koncepci pohonu. Pokud by se multikopter vybavil přesnou navigační jednotkou, bude těmto zastaralým (konstrukčně a technologicky) strojům snadno konkurovat. Díky jednoduché konstrukci a možnosti autonomního řízení pak může být převážený předmět snadno umisťován na místo určené přímo operátorem na zemi. Odpadne tak problematická část, kdy docházelo k problémům v komunikaci mezi operátorem a pilotem.

7.2 Případ druhý - Sledování pohybujících se objektů

Navigace na pohyblivý cíl je další významnou aplikací multikopteru v průmyslové praxi. Aby byla tato úloha realizovatelná, je nezbytné mít model vybaven sledovacím navigačním zařízením.

Navigace na pohyblivý cíl pomocí GPS

Sledovat objekt lze více způsoby. Jako nejjednodušší způsob si uvedeme navigaci na cíl pomocí GPS. Sledovaný objekt i multikopter jsou vybaveny GPS přijímači se shodnými vlastnostmi. Jsou-li přijímače shodné, měří se shodnou chybou a jejich relativní poloha v prostoru je velmi přesná bez nutnosti použití zpřesněných D-GPS jednotek. Aby nedošlo k nedorozumění ohledně přesnosti navigace, je potřeba objasnit princip navigace.

Sledovaný objekt vybavený GPS přijímačem je propojen s multikopterem pomocí bezdrátového komunikačního kanálu. Informace o poloze sledovaného objektu jsou vysílány do navigační jednotky v multikopteru. Tato jednotka naopak již jen porovnává získané souřadnice sledovaného objektu a informace o vlastní poloze. Pokud jsou oboje porovnávány souřadnice shodné, je multikopter stále nad sledovaným objektem.

Při sledování jakéhokoliv pohyblivého se objektu není důležité znát přesnou absolutní polohu v prostoru, ale pouze přesnou polohu vůči sledovanému objektu. Například pokud bude multikopter použit jako „oko na nebi“ pro sledování okolí pohyblivého se vozidla z ptáčích perspektiv, je nutné znát pouze souřadnice sledovaného vozu. Pokud je sledovaný vůz i multikopter vybaven shodným GPS přijímačem dojde při získávání souřadnic ke stejným nepřesnostem a tyto dva přijímače budou mít nižší odchylku vůči sobě než vůči absolutním souřadnicím (což je cílem při sledování). Nevýhoda tohoto řešení je, že relativně přesně lze navigovat pouze v okolí 50m od sledovaného objektu. Při vyšších vzdálenostech je již přesnost měření nižší vzhledem k rozdílným vlastnostem pro měření polohy na jednotlivých GPS přijímačích.

Navigace na pohyblivý cíl pomocí zpracování obrazu

Pokud předchozí systém doplníme o kameru se signálovým procesorem, je možné využít tento komplet navíc i k autonomnímu přistání.

Pro účely zabezpečení rozsáhlých areálů bezpečnostními složkami je multikopter vhodným doplňkem. Dnes již oblíbená robotizovaná vozidla s kamerovým systémem jsou omezena pro použití v rovinatém terénu. Tyto mobilní platformy se používají v oblastech, kde je nevhodně používat rozsáhlý kamerový systém (rozsáhlý prostor – národní parky, pouštní oblasti apod.). Pokud vybavíme tento robot vhodnou přistávací platformou pro multikopter, značně se rozšíří pole možného využití. Například pokud narazí robot na nepřekonatelý terén, může operátor rozhodnout, že použije pro pozorování kameru na multikopteru.

Aby se usnadnila práce operátora, je vhodné doplnit multikopter o jednotku pro zpracování obrazu, která bude sledovat navigační signály na přistávací platformě robota (obvykle IR LED s modulovanými impulsy). Kromě sledování robota pomocí GPS navigace tak bude možné i autonomní přistání na mobilní platformě (robotovi). Operátor si ze svého pracoviště zvolí výšku a pozici, ze které chce pozorovat okolí a multikopter s mobilní platformou se postará o vzájemnou spolupráci.

Navigace na statický cíl

Tento způsob využití je vhodný pro průzkumné drony v rukou záchranářů, nebo pro transport materiálu na větší vzdálenosti. Možné využití lze spatřit také ve službách expresní pošty nebo u armády. Využití multikopteru v armádě je možné i k transportu trhavin (navigační střela). Současné armádní agentury (např. DARPA) se zaměřuje výzkum aplikace multikopteru jako nosiče lehkých trhavin. Tyto koptery vybavené laserovými scannery pro orientaci v uzavřených prostorech mají za úkol dopravit trhavinu do jeskynních

komplexů, kde dojde k odpálení trhavin. Pro navigaci se využívá nejprve GPS, který navede kopter na vstup do jeskynního otvoru, a poté se aktivuje navigace pomocí laseru. Cílem laserové navigace je vyhnout kolizi a dopravit kopter s trhavinou co nehlouběji do jeskyně.

7.3 Případ třetí - Měření kvality ovzduší

Multikopter se svými vlastnostmi přímo nabízí k využití i v této oblasti. K měření kvality ovzduší se dnes využívá několik různých metod. Patří mezi ně měření pomocí sítě pozemních stanic, které jsou vybaveny citlivými senzory, které měří změny koncentrace různých plynů a dále také množství polétavých částic.

Pro měření ve vyšších vrstvách (od 5m do 30m nad zemí) lze využít stožáry, které jsou vybaveny měřicími bloky v různých výškách. Problém tohoto měření je v časové náročnosti jeho realizace. Momentálně se v ČR nachází pouze jedno takové zařízení, protože získat povolení pro takovou stavbu není snadné (několik let).

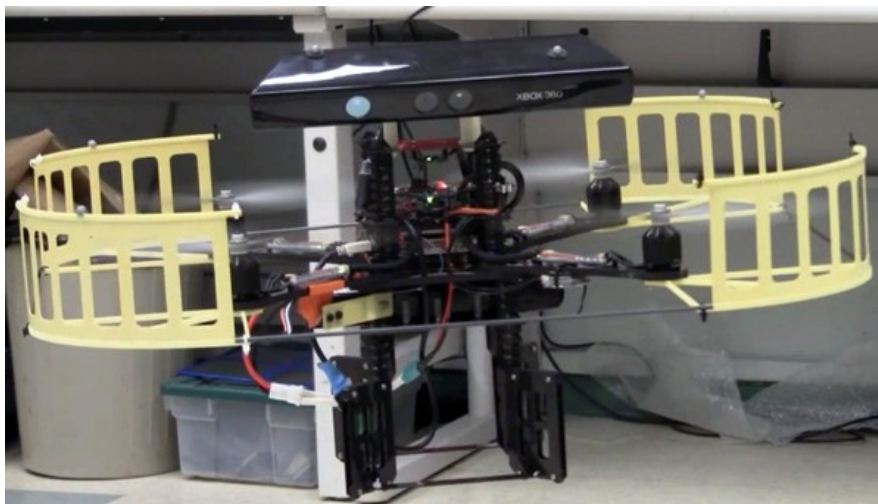
Použití kopteru se sadou snímačů může být tento způsob měření snadno nahrazen. S použitím GPS je možné udržovat konstantní pozici v atmosféře a po měření v jedné výškové hladině lze snadno přejít k měření v dalších požadovaných výškách. Takto lze měřit na celém území státu a bez nutnosti vyřizování zdoluhavých legislativních procedur, které by tato měření povolila.

7.4 Případ čtvrtý - Monitorování událostí



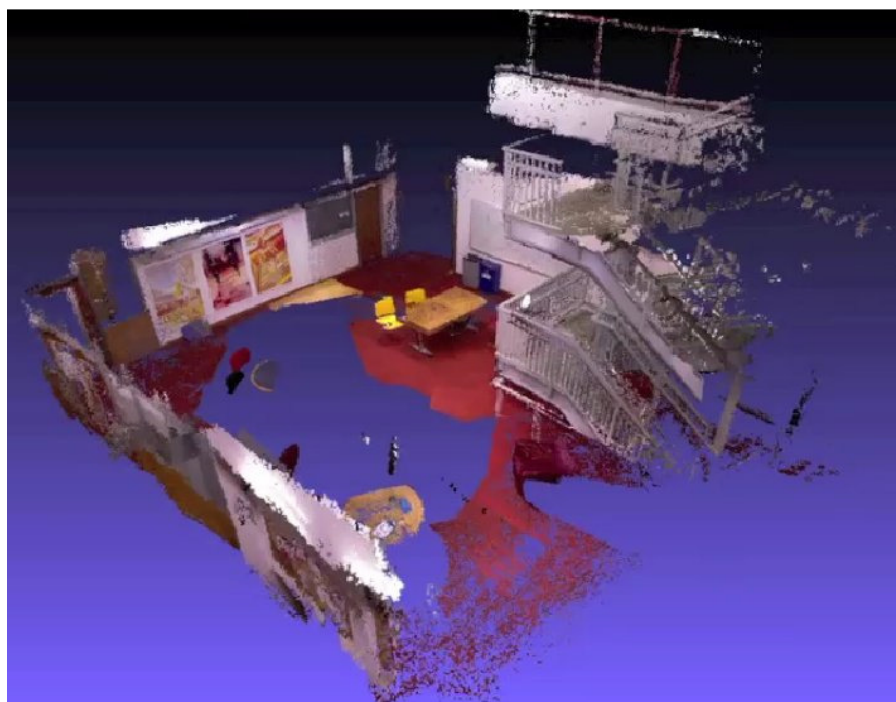
Příklad z praxe

Jednou z největších ambicí výzkumných týmů je vyvinout plně autonomní zařízení, které bude schopné pohybovat se v neznámém prostředí. Pro zmapování svého okolí využívá velké množství senzorů. Důležitá je přesnost a spolehlivost takového měření. Profesor Claire Tomlin a jeho student Patrick Bouffard z Berkley University of California, přišli s řešením, které využívá hotový komerční kamerový systém Kinect společnosti Microsoft. Jejich zařízení je schopné detekovat objekty v bezprostřední blízkosti kopteru a veškerá řídicí logika je integrována přímo v multikopteru.



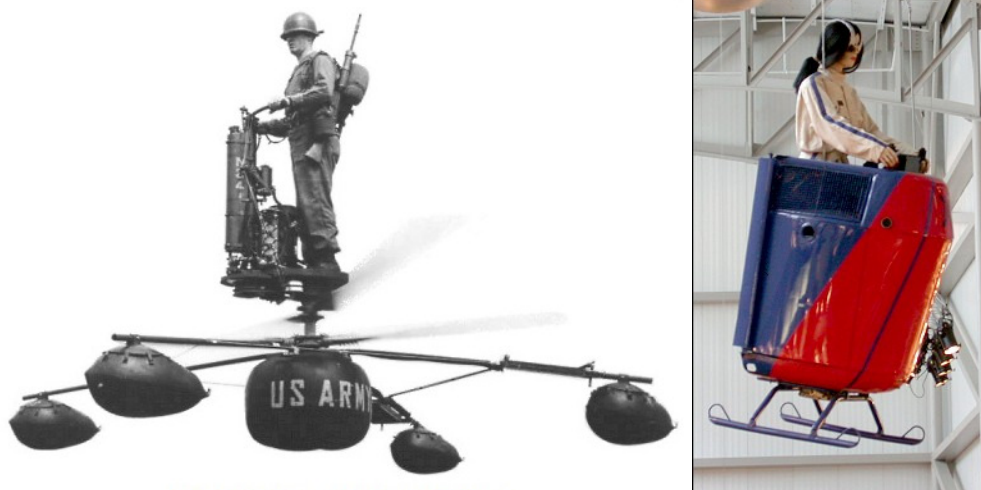
Obr. 7.2 Autonomní quadkopter s detekcí překážek. [Zdroj: University of California, Berkeley]

Tento způsob prostorové orientace se v současné době začíná rozvíjet a přináší velmi uspokojivé výsledky. Například skupina vědců Robust Robotics Group – CSAIL z univerzity MIT ve spojených státech využívá takto vybavená zařízení k určení prostorového modelu vnitřních prostorů v budovách nebo v jeskyních. Tento způsob autonomní navigace je určen k průzkumu neznámých a nepřístupných oblastí – průzkum prostorů zamořených radiací, nebo vojenské cíle, což bylo popsáno v předchozím textu.



Obr. 7.3 Ukázka výsledku měření pomocí algoritmů RGBD-SLAM. Kopter je propojen s řídicím počítačem bezdrátově. Řídicí PC zpracovává výsledný 3D obraz a přeposílá kopteru korekce pro lepší navigaci. [Zdroj: Robust Robotics Group | CSAIL]

některého z motorů. Asi nejdůležitější je velikost vrtulí - není život ohrožující a při kolizi tak nehrozí vážná zranění.



Obr. 7.5 Vlevo osobní koaxiální helikoptéra De Lackner DH-5 Aerocycle 1955. Vpravo platforma s proudovým motorem od Williams Research z roku 1960. [Zdroj: vectorsite.net/avplatfm.html]



Obr. 7.6 První elektronicky řízený multikopter schopný přepravit lidskou posádku. [Zdroj: e-volo.com]



Obr. 7.7 Osobní koaxiální helikoptéra GEN-H4 z roku 2006. [Zdroj: gen-corp.jp]

8 ZÁVĚR

Multikopter je perspektivní zařízení, které je na počátku svého vývoje. V současné době jsou multikoptery schopny létat po předem definovaných trajektoriích. V uzavřených prostorech se využívá k měření pozice systém speciálních kamer, které předávají informaci o poloze do systému MatLab. Ve venkovních prostorech dochází k navigaci pomocí systému GPS – problémem je malá přesnost těchto systému. Komunikace mezi kopterem a pozemní stanicí probíhá většinou bezdrátově za účelem sběru naměřených dat.

Významným prvkem při nasazování multikopterů do praxe je jejich bezpečnost a spolehlivost provozu. Pád zařízení z výšky, nebo nekontrolovatelný let způsobený výpadkem některého z motorů může mít tragické následky na majetku i zdraví. Anti-kolizní systémy jsou proto neodmyslitelnou součástí multikopterů. Ať půjde o pasivní bezpečnost zajišťující odpojení napájení z baterie při havárii či bezpečnost aktivní, kdy je cílem vyhnout se překážkám a kolizím.

Studie vznikla díky týmové spolupráci více autorů. Týmový výzkum přináší lepší porozumění problematiky a umožní jednotlivým tvůrcům se navzájem podněcovat. Při objasňování problematiky je tak snazší provázat mezi sebou jednotlivá témata výzkumu. Výsledkem je rychlejší porozumění problematiky.

Výsledkem studie je určení směru dalšího vývoje multikopteru v oblasti civilní i armádní. Případným zájemcům o vývoj podobných zařízení pomůže při návrhu nových koncepcí.

9 POUŽITÁ LITERATURA

- A. Bry, N. Roy. "Rapidly-exploring Random Belief Trees for Motion Planning Under Uncertainty", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Shanghai, China, 2011. Dostupné z WWW: <http://groups.csail.mit.edu/rrg/index.php?n=Main.Publications#toc3>
- A. G. Banerjee, M. Ono, N. Roy and B. C. Williams. „Chance-Constrained Finite Horizon Optimal Control with Nonconvex Constraints", Proceedings of the American Control Conference (ACC), San Francisco, CA, 2011. Dostupné z WWW: <http://groups.csail.mit.edu/rrg/index.php?n=Main.Publications#toc3>
- A. Geramifard, F. Doshi, J. Redding, N. Roy, J. How. "Incremental Feature Dependency Discovery", Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning (ICML), Bellevue, WA, 2011. Dostupné z WWW: <http://groups.csail.mit.edu/rrg/index.php?n=Main.Publications#toc3>
- A. Geramifard, J. Redding, N. Roy, J. P. How, "UAV Cooperative Control with Stochastic Risk Models", Proceedings of the American Control Conference (ACC), San Francisco, CA, June 2011. Dostupné z WWW: <http://groups.csail.mit.edu/rrg/index.php?n=Main.Publications#toc3>
- A. Huang, A. Bachrach, P. Henry, M. Krainin, D. Maturana, D. Fox, N. Roy. "Visual Odometry and Mapping for Autonomous Flight Using an RGB-D Camera", Proceedings of the International Symposium of Robotics Research (ISRR), Flagstaff, AZ, 2011. Dostupné z WWW: <http://groups.csail.mit.edu/rrg/index.php?n=Main.Publications#toc3>
- C.L. DeGeorge. „Large scale advanced prop-fanů“ (LAP), rok neznámý. Dostupné z WWW: <http://www.nasa.gov>
- Etheodore Theodorsen.: „The theory of propellers, ill-the slipstream contraction with numerical values for two-blade and four-blade propellers“. NACA Report nr. 777: 1944. Dostupné z WWW: <http://www.nasa.gov>
- G. Aoude, J. Joseph, N. Roy, J. How. „Nonparametric Reachability Trees", Proceedings of AIAA Infotech@Aerospace (I@A), St. Louis, MO, 2011. Dostupné z WWW: <http://groups.csail.mit.edu/rrg/index.php?n=Main.Publications#toc3>
- J. C. Ryan, M. L. Cummings, N. Roy, A. Banerjee and A. Schulte. "Local and Global Decision Support System for Aircraft Carrier Deck Scheduling", Proceedings of AIAA Infotech@Aerospace (I@A), St. Louis, MO, 2011. Dostupné z WWW: <http://groups.csail.mit.edu/rrg/index.php?n=Main.Publications#toc3>
- J. Velez, G. Hemann, A. Huang, I. Posner and N. Roy. "Active Exploration for Robust Object Detection", Proceedings of IJCAI, Barcelona, Spain, 2011. Dostupné z WWW: <http://groups.csail.mit.edu/rrg/index.php?n=Main.Publications#toc3>
- J. Velez, G. Hemann, A. Huang, I. Posner and N. Roy. "Planning to Perceive: Exploiting Mobility for Robust Object Detection", Proceedings of ICAPS, Freiburg, Germany, 2011. Dostupné z WWW: <http://groups.csail.mit.edu/rrg/index.php?n=Main.Publications#toc3>

- Jianwen Shao: „*Direct Back EMF Detection Method for Sensorless Brushless DC Motor Drives*“, 2003, Blacksburg, Virginia, Diplomová práce na Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and the State University. Dostupné z WWW: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-09152003-171904/unrestricted/T.pdf>
- Joh L. McCloud III and James C. Biggers.: „*FULL-SCALE WIND-TUNNEL TESTS OF NONARTICULATED HELICOPTER ROTOR*“, červenec 1964, Dostupné z WWW: <http://www.nasa.gov>
- NACA.: „*Wartime report*“, Leden. 1946. Dostupné z WWW: <http://www.nasa.gov>
- Noskievič, Petr: „*Modelování a identifikace systémů*“. Ostrava: Montanex, 1999, 276s. ISBN 80-7225-030-2.
- P. C. K. Luk a C. K. Lee. „*Efficient modeling for a brushless dc motor drive. Industrial Electronics*“, Control and instrumentation 1994.
- Renesas: „*BLDC Motor Control Algorithms*“, 20. 09. 2011. Dostupné z WWW: http://www.renesas.eu/applications/motor_control/child_folder/algorithms/bldc.jsp
- Richard E. Kuhn: „*GROUND EFFECTS ON V/STOL AND STOL AIRCRAFT*“. NASA Langley Research Center. Dostupné z WWW: <http://www.nasa.gov>
- Rother, P.: „*Verschiedene Arten der Bewicklung*“, 16. 07. 2011. Dostupné z WWW: http://www.aerodesign.de/peter/2001/LRK350/Wickel_arten.html
- Rother, P.: „*Why does the Torquemax rotate so slowly and so forcefully?*“, 16. 07. 2011. Dostupné z WWW: http://www.aerodesign.de/peter/2001/LRK350/Warum_dreht_er_so_eng.html#Anker1164462
- S. Gil, S. Prentice, N. Roy and D. Rus. "*Decentralized Control for Optimizing Communication with Infeasible Regions*", Proceedings of the International Symposium of Robotics Research (ISRR), Flagstaff, AZ, 2011. Dostupné z WWW: <http://groups.csail.mit.edu/rrg/index.php?n=Main.Publications#toc3>
- S. Tellex, T. Kollar, S. Dickerson, M. R. Walter, A. G. Banerjee, S. Teller, N. Roy. "*Understanding Natural Language Commands for Robotic Navigation and Mobile Manipulation*", Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence (AAAI), San Francisco, CA, 2011. Dostupné z WWW: <http://groups.csail.mit.edu/rrg/index.php?n=Main.Publications#toc3>
- S.Hemachandra, T.Kollar, N. Roy and S. Teller. "*Following and Interpreting Narrated Guided Tours*", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Shanghai, China, 2011. Dostupné z WWW: <http://groups.csail.mit.edu/rrg/index.php?n=Main.Publications#toc3>
- T. Perez. Ship Motion Control:Course Keeping and Roll Stabilisation using Rudder and Fins. Springer-Verlag, 2005. 3.2, 3.2, A.1, A.2
- Tommaso Bresciani: „*Modelling, Identification and Control of a Quadrotor Helicopter*“, 2008, Lund University, Department of Automatic Control, ISSN 0280-5316

Víteček A., Vítečková M.: „*Optimální systémy řízení*.“ Ostrava: Repronis s.r.o., 2002, ISBN 80-7078-736-8.

Víteček A., Vítečková M.: „*Základy automatické regulace*“. Ostrava: Repronis s.r.o., 2008, 244s. ISBN 978-80-248-1924-2.

Wikipedia: „*Brushless DC electric motor*“, 15. 07. 2011. Dostupné z WWW: http://en.wikipedia.org/wiki/Brushless_DC_motor

Wikipedia: „*Outrunner*“, 15. 07. 2011. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Outrunner>