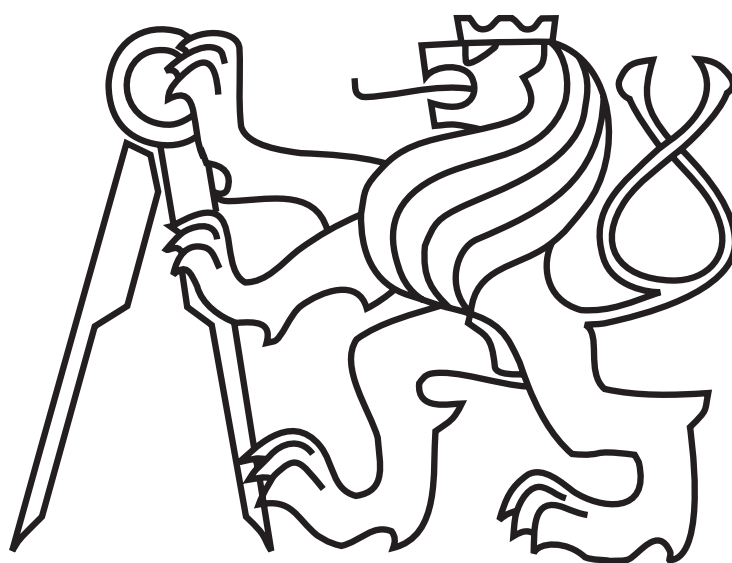


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

## Bakalářská práce



Martin Blaha

**Mobilní heliport pro kvadrokoptéru AR.Drone**

**Katedra kybernetiky**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Krajník**

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**Student:** Martin Blaha  
**Studijní program:** Kybernetika a robotika (bakalářský)  
**Obor:** Robotika  
**Název tématu:** Mobilní heliport pro kvadrokoptéru AR.Drone

### Pokyny pro vypracování:

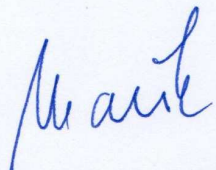
Cílem práce je porovnání metod pro automatické řízení bezpilotní kvadrokoptéry během přistávacího manévru. Nedílnou součástí práce je návrh a realizace heliportu umístěného na mobilní robotické platformě, který umožní efektivní kooperaci mezi týmem pozemních robotů a helikoptér. Heliport musí reagovat na přistávací manévr za účelem přesného umístění helikoptéry ve středu heliportu, což je nutná podmínka pro autonomní dobíjení a opakovaný vzlet. Součástí práce bude statistická studie verifikující úspěšnost přistávacích manévrů.

1. Seznamte se se současným stavem problematiky řízení bezpilotních kvadrokoptér.
2. Vyberte metody vhodné pro implementaci na platformě AR Drone.
3. Realizujte mobilní heliport schopný navádět bezpilotní kvadrokoptéru během přistávacího manévru.
4. Vybrané metody implementujte a proveďte jejich porovnání z hlediska přesnosti a spolehlivosti.

**Seznam odborné literatury:** Dodá vedoucí práce.

**Vedoucí bakalářské práce:** Ing. Tomáš Krajník

**Platnost zadání:** do konce zimního semestru 2012/2013

  
prof. Ing. Vladimír Mařík, DrSc.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 9. 1. 2012

Prohlášení autora práce

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne ..... 25. 5. 2012 .....

..... Martin Blaha .....

Podpis autora práce

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu práce Ing. Tomáši Krajníkovi za cenné rady, oceňuji jeho vstřícný a konstruktivní přístup. Děkuji své rodině za podporu v průběhu celého studia.

### *Abstrakt*

Tato práce se zabývá řízením kvadrokoptéry během přistávacím manévru. V této práci je stručně popsán hardware a software kvadrokoptéry AR.Drone. Pro řízení během přistávacího manévru byly vybrány dva typy adaptivních regulátorů. První typ využívá heuristický přístup, druhý potřebuje neustále identifikovat parametry regulované soustavy. Pro umožnění opakovaného autonomního vzletu a přistání byl navržen heliport, který během přistávacího manévru aktivně spolupracuje s kvadrokoptérou. Funkčnost navrženého heliportu spolu s nejlepším řídicím algoritmem byla experimentálně otestována. Nejlepších výsledků regulace polohy bylo dosaženo LQ regulátorem.

### *Abstract*

This thesis deals with the control of a quadcopter during the landing maneuver. We describe both of hardware and software of AR.Drone quadcopter. Moreover, we chose two types of adaptive controllers for landing maneuver control. The first type uses a heuristic approach and the second needs continuously identifies parameters of the controlled system. To allow repeatability of autonomous landing and takeoff, we have designed and manufactured a heliport, which actively cooperates with the quadcopter during the landing maneuver. The functionality of the heliport along with the best control algorithm was experimentally tested. The best results of position control has been achieved with a LQ controller.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Kvadrokoptéra AR.Drone</b>	<b>2</b>
2.1	Vybavení AR.Drone . . . . .	2
2.2	Navigace AR.Drone . . . . .	2
2.2.1	Navigace podle snímků z vertikální kamery . . . . .	2
2.2.2	Kalibrace inerciálních senzorů . . . . .	3
2.2.3	Výpočet orientace vzhledem ke směru letu . . . . .	4
2.3	Řízení . . . . .	4
2.4	Řízení AR.Drone z pohledu pilota . . . . .	5
2.4.1	Vznášení nad heliportem . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Metody řízení</b>	<b>8</b>
3.1	PID regulátor . . . . .	8
3.1.1	Regulační obvod . . . . .	8
3.1.2	Spojité PID regulátor . . . . .	8
3.1.3	Diskrétní PID regulátor . . . . .	9
3.2	Adaptivní systémy řízení . . . . .	11
3.2.1	Adaptivní regulátory založené na heuristickém přístupu . . . . .	12
3.2.2	Adaptivní systémy s referenčním modelem . . . . .	14
3.2.3	Samočinně se nastavující regulátory . . . . .	14
3.2.4	Identifikace parametrů soustavy . . . . .	14
3.2.5	Algoritmy identifikace . . . . .	16
3.2.6	Samočinně se nastavující PID regulátory . . . . .	17
3.3	LQ regulátor . . . . .	17

---

<b>4 Implementace</b>	<b>20</b>
4.1 Simulace algoritmů . . . . .	20
4.1.1 Simulace adaptivního řízení založená na heuristickém přístupu . . .	20
4.1.2 Simulace samočinně se nastavujícího regulátoru . . . . .	21
4.2 Současný model pro řízení AR.Drone . . . . .	23
4.3 Simulace LQR . . . . .	25
<b>5 Návrh a výroba heliportu</b>	<b>27</b>
5.1 Popis mechanického řešení heliportu . . . . .	27
5.1.1 Koncepce mechanického řešení heliportu . . . . .	27
5.1.2 Výroba . . . . .	27
5.2 Popis elektrického řešení heliportu . . . . .	28
5.2.1 Řízení modelářských serv . . . . .	28
5.2.2 Výběr mikrokontroléru . . . . .	29
5.2.3 Popis programu pro mikrokontrolér . . . . .	29
5.2.4 Schéma zapojení . . . . .	30
<b>6 Experimenty</b>	<b>32</b>
6.1 Funkčnost heliportu . . . . .	32
6.2 Sledování heliportu . . . . .	34
<b>7 Závěr</b>	<b>36</b>
<b>8 Příloha</b>	<b>39</b>
8.1 Obsah přiloženého CD . . . . .	39
8.2 Nákresy heliportu . . . . .	40
8.3 Tabulka hodnot . . . . .	44

## Seznam obrázků

1	AR.Drone s krytem pro létání venku, převzato z [1]	3
2	Stavový automat uvnitř AR.Drone, převzato a upraveno z [1]	5
3	Regulátor úhlu naklápění (naklonění), převzato z [2]	6
4	Souřadnicový systém AR.Drone, převzato z [2]	7
5	Snímky z vertikální kamery během přistávání	7
6	Snímky z vertikální kamery během přistávání - jiné obrazce	7
7	Základní blokové schéma zpětnovazebního obvodu	8
8	Možná implementace spojitého PID regulátoru s filtrací derivační složky včetně omezení přebuzení akčního členu	10
9	Základní klasifikace adaptivních systému řízení, převzato a upraveno z [3]	12
10	Blokové schéma modelu ARX, převzato a upraveno z [3]	15
11	Výsledky simulace algoritmu 1	20
12	Výsledky simulace algoritmu 1 - $T_0$ a $g$	21
13	Výsledky simulace pro STC	22
14	Identifikace parametru s exponenciálním zapomínáním	22
15	Ověření modelu, převzato a upraveno z [2]	23
16	Současný model řízení polohy AR.Drone	23
17	Porovnání Takahashiho a současného regulátoru	24
18	Porovnání odezvy na skok - LQR a současný regulátor	26
19	Porovnání akčních zásahů - LQR a současný regulátor	26
20	Fotografie otevřeného heliportu na mobilní robotické platformě, převzato [4]	27
21	Průběh signálů na servech při centrování kvadroptéry	28
22	Schéma desky ovládající serva	31
23	Deska plošných spojů ovládaní serv - pohled ze strany součástí	31
24	AR.Drone na referenčních značkách a vyznačený souřadnicový systém	32
25	Vizualizace pracovního prostoru s vyznačeným středem kvadroptéry a její orientací před a po centrování	33



---

26	Vzlet, vznášení a přistání kvadroptéry - stojící heliport . . . . .	35
27	Sledování jedoucího heliportu - souřadnice x . . . . .	35
28	Pohled shora na otevřený heliport . . . . .	40
29	Pohled shora na zavřený heliport . . . . .	41
30	Detailní pohled na servo a táhla . . . . .	42
31	Detailní pohled na servo a klapku . . . . .	43

## Seznam tabulek

1	Hodnoty $\mathbf{Q}$ a $\mathbf{R}$ . . . . .	25
2	Rozměry pracovního prostoru . . . . .	33
3	Statistické hodnoty . . . . .	34
4	Obsah CD . . . . .	39
5	Tabulka naměřených hodnot - funkčnost heliportu (část 1/2) . . . . .	44
6	Tabulka naměřených hodnot - funkčnost heliportu (část 2/2) . . . . .	45

## Seznam algoritmů

1	Adaptivní regulátor s adaptací zesílení podle ukazatele tlumení, převzato z [5]	13
2	Rekurzivní metoda nejmenších čtverců s exponenciálním zapomínáním, převzato z [6]	16
3	Výpočet kritických parametrů, převzato [3]	18

# 1 Úvod

Kvadrokoptéra je druh mnoharotorového vrtulníku, který nemá všechny čtyři rotory na jedné ose. Tyto vrtulníky se vyznačují především svou jednoduchou mechanickou a kompaktní konstrukcí. Pohyb kvadrokoptéry se uskutečňuje vhodnou změnou vztlakové síly jednotlivých rotorů na rozdíl od klasického vrtulníku, kde se mění úhel náběhu hlavního rotoru. Okolo roku 1920 jsou zaznamenány první pokusy s mnoharotorovými vrtulníky, ale až s rozvojem moderní výpočetní a měřicí techniky se je podařilo účinně řídit. Vývoj lehkých akumulátorů, výkonných střídavých modelářských motorů a miniaturizace elektromechanických senzorů umožnily dostupnost malých a lehkých kvadrokoptér všem zájemcům [7].

Na kvadrokoptéru během letu působí mnoho jevů, například různé turbulence způsobené prouděním vzduchu kolem rotorů a odrazy těchto turbulencí od různých překážek. Dynamiku chování kvadrokoptéry v neposlední řadě ovlivňuje i stav nabití baterie. Z těchto důvodů je výhodné při řízení kvadrokoptéry využít regulátorů, které jsou schopny tyto vlivy zaznamenat a dostatečně rychle upravit svoje parametry. Výsledné řízení musí splňovat požadavky na překmit, dobu náběhu a jiné.

Adaptivní systémy řízení vychází z myšlenky postupného přizpůsobení. Adaptace je proces, který se velmi často vyskytuje v přírodě, kde se živé organismy přizpůsobují změnám svého okolí. Podobné principy lze aplikovat na technické systémy, u kterých lze dosáhnou podobného efektu změnou jejich parametrů. Z hlediska teorie jde o zpětnovazební systém se dvěma smyčkami. První zpětná vazba funguje jako standardní zpětnovazební obvod s regulátorem a druhá zpětnovazební smyčka nastavuje parametry regulátoru, např. zesílení, integrační a derivační časové konstanty pro PID regulátor [8].

V této práci se zabývám možnostmi autonomního přistávání s využitím adaptivních technik při řízení polohy kvadrokoptéry AR.Drone, které lze nalézt v [3] a [5]. V případě použití kvadrokoptéry na úkoly, kde se předpokládá nasazení delší než je vydrž akumulátoru, se musí zajistit její automatické dobíjení. K tomuto účelu byl také navrhnut a vyroben heliport, který je schopen aktivně spolupracovat s kvadrokoptérou během přistávacího manévru. Po přistání heliport kvadrokoptéru přesune na přesnou pozici na heliportu, na které mohou být umístěny konektory pro dobíjení.

## 2 Kvadroptéra AR.Drone

V této kapitole jsou uvedeny základní informace o komerčně vyráběné kvadroptéře AR.Drone. Firma Parrot v roce 2010 uvedla na trh Hi-tech hračku, která má propracovaný design a dobré technické parametry viz [9]. Vlastnosti AR.Drone, které jsou popsány v [1], spolu s otevřeným softwarem ji umožňují použít jako platformu pro vědu a vzdělání [2].

### 2.1 Vybavení AR.Drone

Kvadroptéru AR.Drone pohání čtyři střídavé bezkartáčové motory, které jsou osazené pevnou dvoulistou vrtulí. Tyto motory jsou spolu s řídicími deskami motorů připevněny na základním trubkovém kříži z uhlíkového kompozitu. Zdroj energie zajišťuje 11,1V tříčlánková lithium-polymer (LiPo) baterie o kapacitě 1 000 mAh. Baterie je umístěna ve spodní části polypropylenového ochranného krytu. AR.Drone má dva typy horní části krytu. První je určen pro létání uvnitř budov a slouží jako ochrana vrtulí a obsluhy. Druhý se používá při létání venku, díky menší velikosti má lepší aerodynamické vlastnosti.

Řízení kvadroptéry obstarává 32-bitový ARM9 procesor Parrot P6 s taktovací frekvencí 468 MHz. Základní deska dále obsahuje Wi-Fi čip, vertikální kameru a konektor pro přední kameru. Přední VGA kamera o rozlišení 640x480 pixelů snímá obraz ze zorného pole 93° 15 snímků za sekundu. Vertikální kamera snímá ze zorného pole 64° více snímků než vertikální, a to 60 snímků za sekundu. Snímky z vertikální kamery používá procesor P6 k lepší navigaci. Na samostatné desce jsou osazeny snímače: tříosý akcelerometr, dvouosý gyroskop, přesný jednoosý vertikální gyroskop a dva ultrazvukové senzory, které se využívají k měření výšky. Tyto snímače zajišťují dostatečné množství dat pro robustní řízení AR.Drone. Software kvadroptéry je vestavěný real-time operační systém na bázi Linuxu [1].

### 2.2 Navigace AR.Drone

#### 2.2.1 Navigace podle snímků z vertikální kamery

V AR.Drone jsou dva vzájemně se doplňující navigační algoritmy, které zlepšují odhad stavu, především rychlosti kvadroptéry pomocí snímku z vertikální kamery.

- „multi-resolution scheme“ algoritmus, který porovnává snímky z vertikální kamery a vypočítává posunutí dvou po sobě jdoucích snímků. Tato metoda je méně robustní,



Obrázek 1: AR.Drone s krytem pro létání venku, převzato z [1]

ale dokáže si poradit s obrazy, které mají menší kontrast. Tento algoritmus je nastaven jako výchozí.

- „corner tracking“ algoritmus, který na rozdíl od prvního algoritmu sleduje pouze několik zajímavých bodů. Počet těchto bodů je pevně dán a při odhadu rychlosti jsou tyto body na snímcích hledány. Pro zlepšení přesnosti se může první algoritmus přepnout na druhý, pokud je rychlost letu dostatečně malá.

### 2.2.2 Kalibrace inerciálních senzorů

AR.Drone používá levné, komerčně vyráběné senzory. Z výroby jsou tyto senzory kalibrovány například pomocí dvouosé kalibrační tabulky. Dále se kalibruje nepřesnost mezi umístěním desky se senzory a rámu AR.Drone. K tomu se využívá faktu, že průměrná akcelerace při stacionárním letu musí být nulová a pomocí metody nejmenších čtverců se vypočítají koeficienty matice  $\mathbf{A}$  a vektoru  $\mathbf{b}$  v rovnici (1).

$$\mathbf{y}_m = \mathbf{A}\mathbf{y}_v + \mathbf{b}, \quad (1)$$

kde  $\mathbf{A}$  je čtvercová matice, která zahrnuje rozsah nesouososti, odchylky od ortogonality,  $\mathbf{b}$  je vektor zahrnující offsety jednotlivých os,  $\mathbf{y}_m$  je naměřená hodnota senzoru a  $\mathbf{y}_v$  je skutečná hodnota měřené veličiny.

### 2.2.3 Výpočet orientace vzhledem ke směru letu

Inerciální senzory (akcelerometry a gyroskopy) poskytují odhad polohy a rychlosti pro stabilizaci systému. Data z akcelerometrů a gyroskopů jsou použita jako vstup pro určení dynamiky. Rychlost těžiště se vypočítá podle vztahu (2) a úhlová rychlost podle vztahu (3).

$$\dot{\mathbf{v}} = -\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v} + \mathbf{F}, \quad (2)$$

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{g}(\boldsymbol{\omega}, \mathbf{q}), \quad (3)$$

kde  $\mathbf{g}(\boldsymbol{\omega}, \mathbf{q}) = (p + (q \sin \phi + r \cos \phi) \tan \theta, q \cos \phi - r \sin \phi, (q \sin \phi + r \cos \phi) \sec \theta)^T$ ,  $\mathbf{v} = (u, v, w)^T$  je polohový vektor těžiště kvadrokoptéry,  $\mathbf{q} = (\phi, \theta, \psi)^T$  představuje Eulerovy úhly (roll, pitch, yaw),  $\boldsymbol{\omega} = (p, q, r)^T$  reprezentuje natočení souřadného systému rámu vůči inerciální vztahné soustavě a  $\mathbf{F}$  je vnější síla.

Akcelerometr měří zrychlení, které zahrnuje i gravitační zrychlení. Z tohoto důvodu se musí gravitační zrychlení kompenzovat. Signál z gyroskopů a akcelerometrů je zatížen šumem, který se modeluje jako aditivní bílý šum. Šumy v datech inerciálních senzorů jsou kompenzovány pomocí algoritmů, které využívají snímky z vertikální kamery [1].

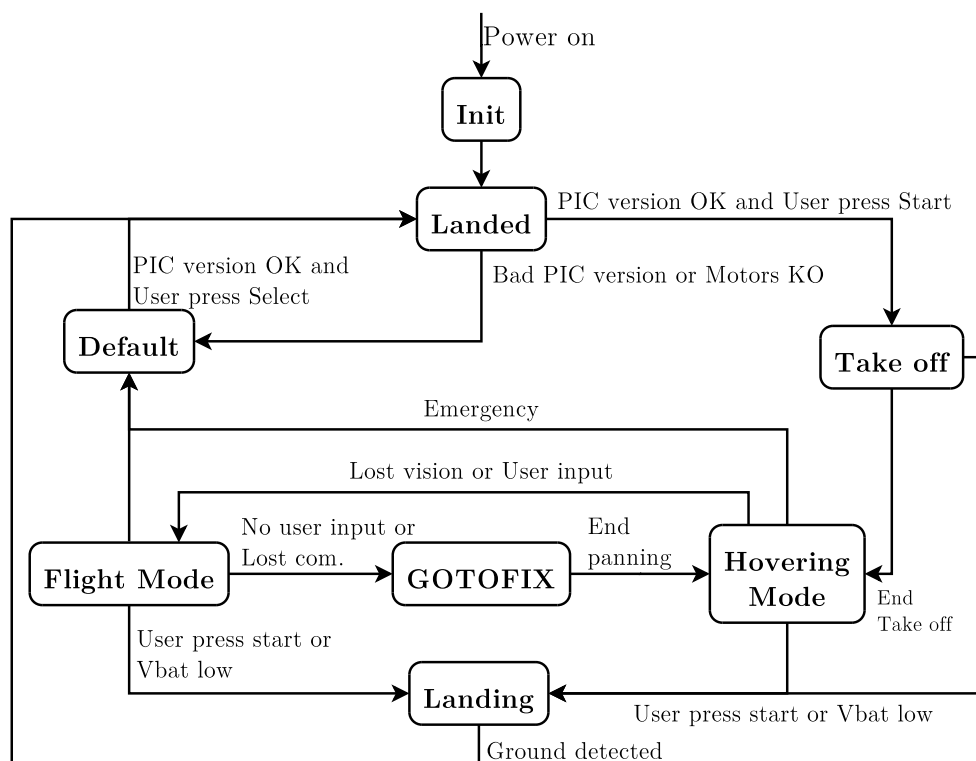
## 2.3 Řízení

Pro stabilní chování kvadrokoptéry je důležitý odhad rychlosti. Algoritmy využívající snímky z vertikální kamery fungují dobře, pokud je povrch dostatečně členitý. Odhad rychlosti pomocí snímku je ale ve srovnání s dynamikou kvadrokoptéry pomalý. K zpřesnění odhadů polohy a rychlosti se nejdříve určí rychlost, poloha a offset gyroskopů. Následně se pomocí ultrazvukových senzorů vypočítá výška nad povrchem. Odhad výšky a polohy spolu s daty z akcelerometrů se používají k výpočtu rychlosti kvadrokoptéry. Rozdíl mezi rychlostí spočítanou pomocí vertikální kamery a akcelerometrů je použit ke kompenzaci offsetu akcelerometrů.

Modelování kvadrokoptéry jako celku není nic jednoduchého. Odkazy na možné přístupy jsou uvedeny v [1]. Obecně je složité modelovat aerodynamické vlivy působící na kvadrokoptéru. Radiální účinky rotoru jsou kompenzovány protiběžným směrem otáčení, a proto se uplatňují pouze axiální účinky, které vytváření potřebný vztlak.

Struktura programu uvnitř AR.Drone je znázorněna na obrázku 2. Stavový automat rozhoduje o přepínání mezi stavy vznášení („hovering flight“), vzletnutí („take-off“), přistání („landing“) a let („forward flight“). Přepínání je podmíněno příkazy pilota nebo kontrolou kolizních stavů, například nízký stav baterie. Prvek „Gotofix“ zajišťuje vznášení

na poslední zadané pozici, dokud pilot nezadá další povely. Tento prvek je také aktivován, když se přeruší spojení mezi kvadrokoptérou a vysílačem pilota nebo při nízkém stavu baterie.



Obrázek 2: Stavový automat uvnitř AR.Drone, převzato a upraveno z [1]

Řídicí systém uvnitř AR.Drone se skládá z několika zpětnovazebních smyček. První smyčka řídí pozici v závislosti na skutečné a požadované pozici kvadrokoptéry a obsahuje proporcionalně integrační regulátor. Druhá řídicí smyčka používá proporcionalní regulátor k regulaci úhlové rychlosti.

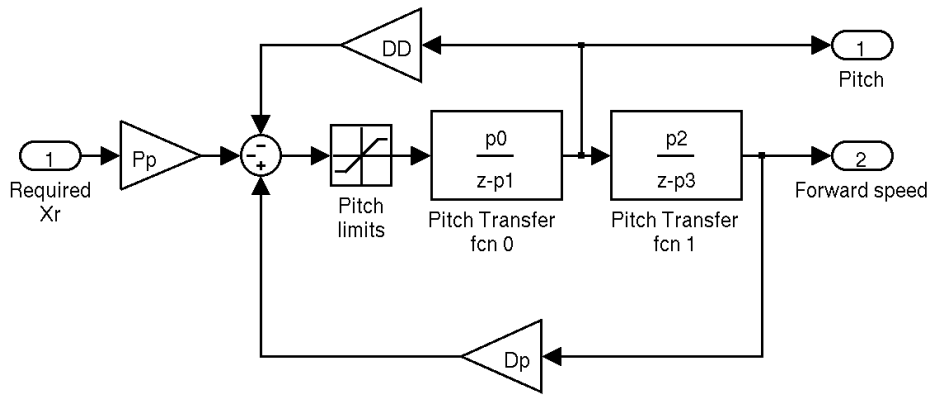
## 2.4 Řízení AR.Drone z pohledu pilota

Z předchozího textu vyplývá, že je možné nahlížet na AR.Drone jako na stabilní soustavu, kde vstupy jsou úhel otáčení (yaw), úhel naklápění (pitch), úhel naklánění (roll) a vertikální rychlost. Stavové veličiny systému jsou jednotlivé úhly, rychlosti a poloha. Tento přístup také umožňuje provést identifikaci a návrh regulátorů na rozděleném dynamickém modelu na čtyři oddělené subsystemy prvního nebo druhého řádu. K identi-



fikaci lze například využít přechodové odezvy na skok a pomocí metody nejmenších čtverců vypočítat parametry přenosové funkce, viz [2].

Za předpokladu malých změn úhlové rychlosti otáčení lze předpokládat, že úhel naklápění bude mít vliv na dopřednou rychlost kvadroptéry a úhel naklápění na boční rychlost. Pro regulaci polohy (souřadnice  $x$  a  $y$ ) kvadroptéry je použit PD regulátor úhlu naklápění, respektive naklápění. Struktura regulátoru je znázorněna na obrázku 3. Integrací dopředné (resp. boční) rychlosti je vypočítána poloha, která spolu s požadovanou hodnotou polohy tvoří vstup do regulátoru.



Obrázek 3: Regulátor úhlu naklápění (naklonění), převzato z [2]

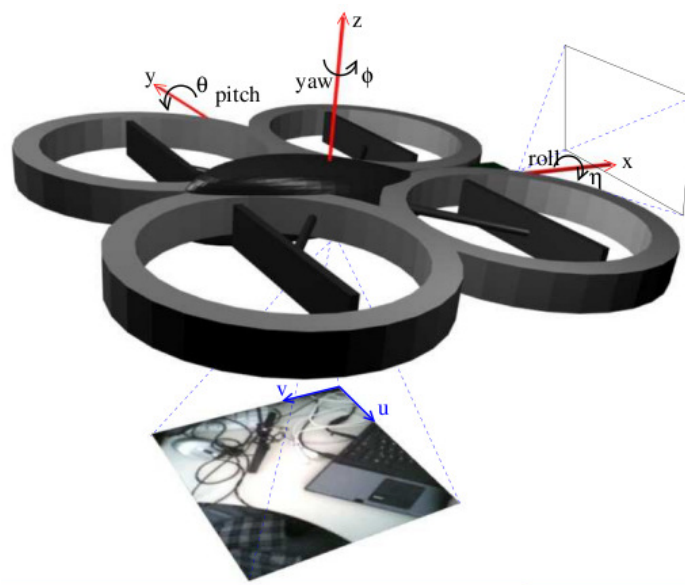
### 2.4.1 Vznášení nad heliportem

K přesnému navedení kvadroptéry na heliport je využita vertikální kamera. Ze snímků z vertikální kamery (obrázek 5 a 6) se určí relativní souřadnice heliportu pomocí tzv. „blobfinding“, kdy se hledají obrazce známých tvarů a barev. Následně se vypočítá pozice pixelu ve středu vybraného obrazce. Tyto souřadnice se musí transformovat do globálního souřadného systému pomocí rovnice (4) z [2].

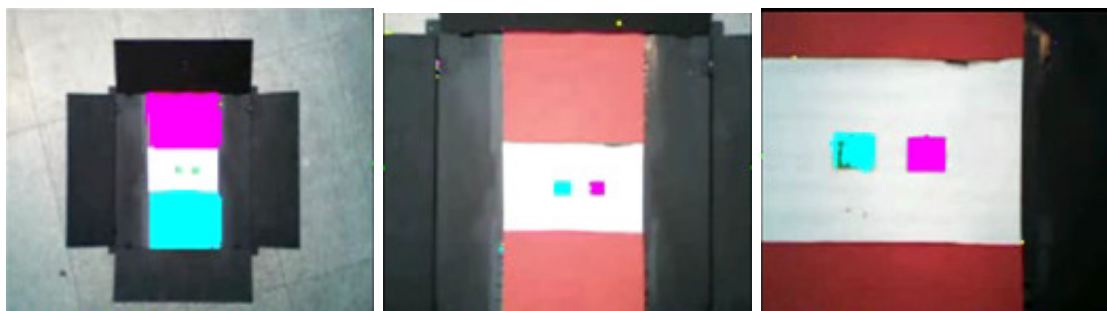
$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \left[ \begin{pmatrix} 0 & k_u \\ k_v & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_u - u \\ c_v - v \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sin \theta \\ \sin \eta \end{pmatrix} \right] z + \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}, \quad (4)$$

kde  $x$  a  $y$  představuje aktuální polohu,  $z$  výšku,  $\phi$ ,  $\theta$ ,  $\eta$  jsou úhly podle obrázku 4,  $c_u$  a  $c_v$  jsou pozice středu snímku a  $k_u$  a  $k_v$  jsou parametry vertikální kamery.

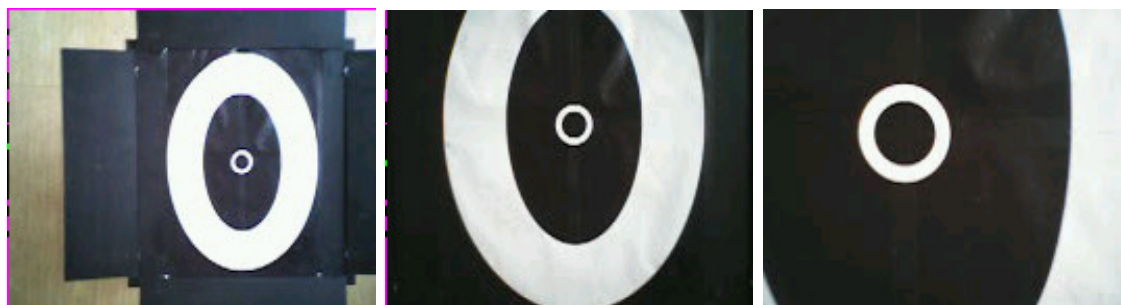
Při přistávání se mění zorné pole kamery, a proto musí být heliport opatřen vhodně rozmístěnými značkami [2].



Obrázek 4: Souřadnicový systém AR.Drone, převzato z [2]



Obrázek 5: Snímky z vertikální kamery během přistávání



Obrázek 6: Snímky z vertikální kamery během přistávání - jiné obrazce

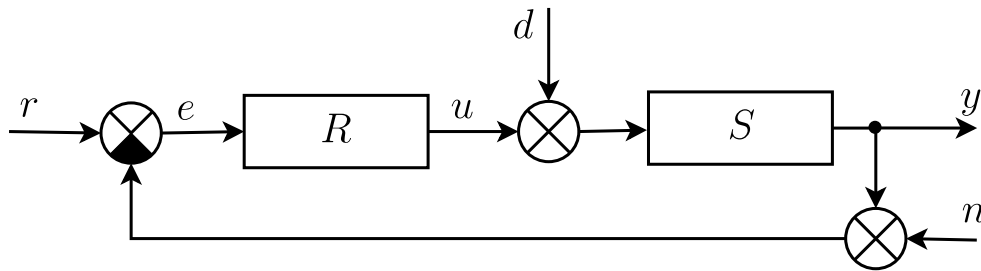
### 3 Metody řízení

V této kapitole je uvedena teorie spojitých diskrétních, adaptivních PID regulátorů a diskrétních LQ regulátorů. Informace v této kapitole jsou z [3], [10], [11], [5], [12] a [13].

#### 3.1 PID regulátor

##### 3.1.1 Regulační obvod

Základní struktura zpětnovazebního systému je na obrázku 7, kde  $u$  je řídicí veličina neboli referenční signál,  $y$  je skutečná hodnota výstup ze soustavy  $S$ ,  $u$  je akční veličina produkovaná regulátorem  $R$ ,  $e$  je regulační odchylka, která se spočítá podle  $e = r - y$ ,  $d$  představuje poruchovou veličinu působící na soustavu a  $n$  je šum vzniklý měřením skutečné hodnoty  $y$ .



Obrázek 7: Základní blokové schéma zpětnovazebního obvodu

##### 3.1.2 Spojitý PID regulátor

Základní rovnice (5) ideálního PID regulátoru se skládá ze tří částí. Tyto části se liší vlastnostmi reakce na regulační odchylku.

- P je proporcionální část, která generuje akční zásah přímo úměrný regulační odchylce.
- I je integrační část generující akční zásah přímo úměrný době, po kterou existuje regulační odchylka.
- D je derivační část, která vytváří akční zásah podle rychlosti změny regulační odchylky.

$$u(t) = k_P \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (5)$$

Podobně po převodu do obrazové oblasti pomocí Laplaceovy transformace lze získat rovnici (6).

$$U(s) = k_P \left[ 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right] E(s) \quad (6)$$

Parametry  $k_P$ ,  $T_I$  a  $T_D$  v rovnici (5) představují zesílení, integrační a derivační konstantu. Tyto parametry určují vlastnosti regulátoru. Další možností, jak vyjádřit řídicí zákon PID regulátoru, je rovnice (7), která se také označuje jako paralelní forma PID regulátoru.

$$U(s) = \left[ K_P + \frac{K_I}{s} + K_P s \right] E(s) \quad (7)$$

Pokud některý parametr  $K_P$ ,  $K_I$  nebo  $K_D$  v rovnici (7) vynecháme, lze získat P, I, PI, PD regulátor.

Z rovnice (7) je vidět, že přenos nelze fyzikálně realizovat, a proto je nutné derivační složku filtrovat. Tomu odpovídá rovnice (8), kde  $N$  je filtrační koeficient derivační složky, který se volí v rozsahu 3 až 20. Podrobné odvození lze nalézt v [10].

$$G_R = k_P \left[ 1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{\frac{T_D}{N} s + 1} \right] \quad (8)$$

Dalším problémem při implementaci může být „windup“ - jev, kdy integrační část PID regulátoru přesáhne maximální hodnotu výstup regulátoru, čímž je akční člen přebuzen. Integrovaná hodnota roste, dokud se nezmění znaménko regulační odchylky a naintegrovaná chyba pak zpomaluje reakci na změnu požadované hodnoty.

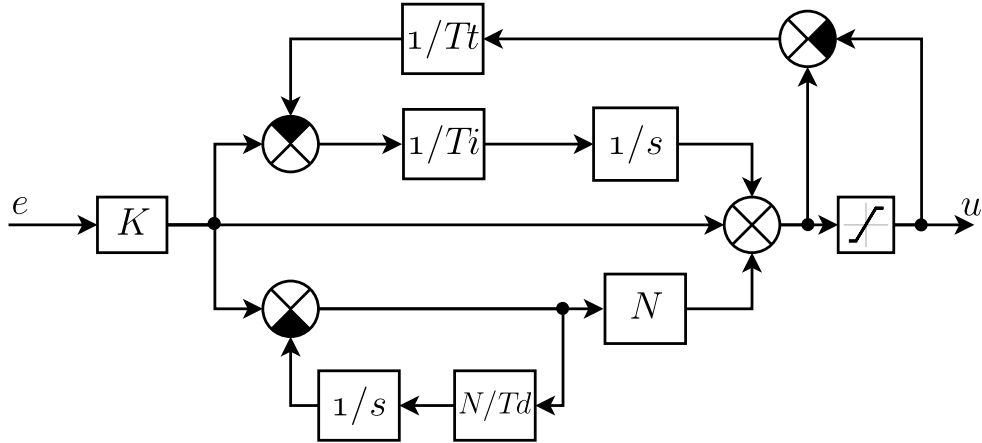
Na obrázku 8 je další konstanta  $T_t$ , na níž lze pohlížet jako na další parametr regulátoru. Tato konstanta musí být podle [11] větší než  $T_D$  a menší než  $T_I$ , z čehož vyplývá vztah  $T_t = \sqrt{T_I T_D}$ .

### 3.1.3 Diskrétní PID regulátor

Pro převedení spojitého PID regulátoru na diskrétní je nutné derivaci a integraci diskretizovat. Základní možnosti diskretizace jsou:

- Derivaci lze nahradit diferencí 1. řádu, pokud derivovaný signál neobsahuje šum a doba vzorkování je dostatečně hustá.

$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(k) - e(k-1)}{T_0} = \frac{\Delta e(k)}{T_0} \quad (9)$$



Obrázek 8: Možná implementace spojitého PID regulátoru s filtrací derivační složky včetně omezení přebuzení akčního členu

- Integraci lze nahradit sumací. Podle toho, jakou funkcí aproximujeme integrovanou veličinu, rozlišujeme:
  - Zpětná obdélníková aproximace (ZOBD)

$$\int_0^t e(\tau) d\tau \approx T_0 \sum_{i=1}^k e(i-1) \quad (10)$$

- Dopředná obdélníková aproximace (DOBD)

$$\int_0^t e(\tau) d\tau \approx T_0 \sum_{i=1}^k e(i) \quad (11)$$

- Lichoběžníková aproximace

$$\int_0^t e(\tau) d\tau \approx T_0 \sum_{i=1}^k \frac{e(i) + e(i-1)}{2} \quad (12)$$

Pomocí aproximací lze přepsat ideální rovnici (5) spojitého PID regulátoru na rovnici (13), ve které je použita dopředná aproximace integrace.

$$u(k) = K_P \left\{ e(k) + \frac{T_0}{T_I} \sum_{i=1}^k e(i) + \frac{T_D}{T_0} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (13)$$

Rovnici (13) lze přepsat do tvaru (14) pomocí Z-transformace.

$$G_R(z) = K_P \left( 1 + \frac{T_0}{T_I} \frac{1}{z-1} + \frac{T_D}{T_0} \frac{z-1}{z} \right) \quad (14)$$

Rovnice (13) není zcela vhodná pro implementaci, protože při výpočtu akčního zásahu je nutné si pamatovat všechny minulé regulační odchylky. Pro implementaci je lepší vztah (15), který bývá označován jako přírůstkový algoritmus.

$$u(k) = K_P \left\{ e(k) - e(k-1) + \frac{T_0}{T_I} e(k-1) + \frac{T_D}{T_0} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \right\} + u(k-1) \quad (15)$$

Další možnost je složkový tvar regulačního algoritmu. Akční zásah je vypočítán jako součet jednotlivých složek.

$$\begin{aligned} u(k) &= u_P(k) + u_I(k) + u_D(k) \\ u_P(k) &= K_P e(k) \\ u_I(k) &= u_I(k-1) + K_P \frac{T_0}{T_I} e(k) \\ u_D(k) &= K_P \frac{T_D}{T_0} [e(k) - e(k-1)] \end{aligned}$$

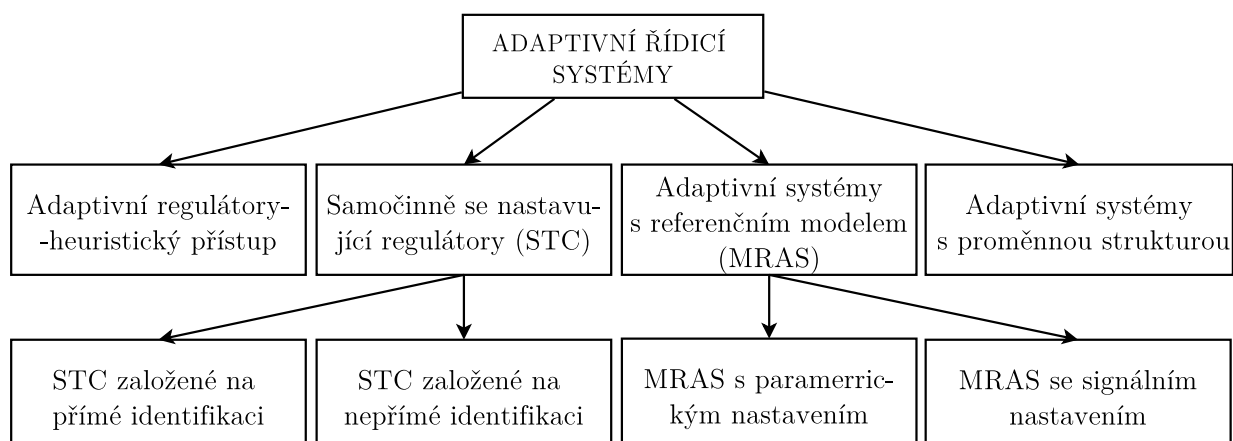
Ze spojitě podoby PID regulátoru (rovnice (8)) lze pomocí Z-transformace získat přenos (16).

$$G_R(z) = K_P \left( 1 + \frac{T_0}{T_I} \frac{1}{z-1} + N \frac{z-1}{z - e^{-\frac{T_0 N}{T_D}}} \right) \quad (16)$$

Dalším parametrem diskretních PID regulátorů je perioda vzorkování. Pro její volbu existuje mnoho pravidel, například v [3], [5], [11], [13]. Volbu periody vzorkování ovlivňují například požadavek kvality regulace, dynamika regulované soustavy a jiné.

## 3.2 Adaptivní systémy řízení

Základní rozdíl mezi klasickým zpětnovazebním a adaptivním zpětnovazebním řízením spočívá v tom, že u klasického regulátoru je vyhodnocena regulační odchylka či neznámá porucha stále stejným způsobem, zatímco u adaptivního regulátoru se mění způsob vyhodnocení - adaptuje se na nové podmínky. Parametry regulátoru se upravují tak, aby se udržela nastavená kvalita regulace. Rozdělení přístupů k adaptivním systémům řízení je na obrázku 9.



Obrázek 9: Základní klasifikace adaptivních systému řízení, převzato a upraveno z [3]

Nejvíce používané přístupy adaptivního řízení jsou:

- Adaptivní regulátory založené na heuristickém přístupu
- Adaptivní systémy s referenčním modelem
- Samočinně se nastavující regulátory

### 3.2.1 Adaptivní regulátory založené na heuristickém přístupu

Hlavní myšlenka tohoto přístupu spočívá v tom, že pro adaptaci se využívá přímo vyhodnocení průběhu regulované veličiny, regulační odchylky, popřípadě kmitavost přechodové odezvy nebo jiná kritéria. Adaptivní regulátory využívající tento přístup nepotřebují identifikovat ani znát parametry regulované soustavy.

#### Adaptace zesílení pomocí ukazatele tlumení

Samotný algoritmus vychází z vyhodnocení globální časové konstanty, tedy konstanty vyjadřující rychlost regulačního procesu. Globální časová konstanta je přímo úměrná časovým konstantám regulátoru, a tedy i periodě adaptačního algoritmu, viz algoritmus 1, který lze odvodit ze vztahů uvedených v [5].

Ukazatel tlumení je definován podle vzorce (17).

$$\mu = \overline{|\text{sign}e + \text{sign}\Delta^2e|} \quad (17)$$

**Data:** Vstupy regulátoru - požadovaná veličina  $w$  a výstup  $y$

**Result:** Výstup regulátoru - akční zásah  $u$

**begin**

**while** *Nastal okamžik vzorkování podle  $T_0$*  **do**

$w_1(l) = w_1(l-1) + 0,5[w(l) - w_1(l-1)]$  // filtrace žádané hodnoty

$e(l) = w_1(l) - y(l)$  // regulační odchylka

$\Delta e(l) = e(l) - e(l-1)$  // první diference regulační odchylky

$\Delta^2 e(l) = e(l) - 2e(l-1) + e(l-2)$  // druhá diference regulační odchylky

**if**  $|e(l)| > 0,01w$  **then**

$h(l) = h(l-1) + c_1 \cdot h(l-1) \cdot \text{sign}(|\Delta^2 e(l)| - h(l-1) \cdot |\Delta e(l)|)$

// převrácená hodnota globální časové konstanty  $\tau$

$g(l) = g(l-1) + c_2 \cdot h(l) \cdot g(l-1) [|\text{sign}(e(l-1) + e(l-3)) + \text{sign}(\Delta^2 e(l))| - \mu_{ref}]$

// adaptace zesílení

$T_0(l) = T_0(l-1) + 0,03 \cdot T_0(l-1) \text{sign}(b \cdot |\Delta e(l)| - |\Delta^2 e(l)|)$

// perioda adaptačního algoritmu

$u(l) = u(l-1) + g(l) [e(l) + c\Delta e(l) + c\Delta^2 e(l)]$  // výpočet akčního zásahu

**end**

**Algoritmus 1:** Adaptivní regulátor s adaptací zesílení podle ukazatele tlumení, převzato z [5]

Možný rozsah ukazatele je  $0 \leq \mu \leq 2$ . Pokud je  $\mu$  rovno 0, systém je na mezi stability. Aperiodickému ději odpovídá hodnota 2.

Úskalí tohoto algoritmu 1 spočívá v množství konstant ( $c, c_1, c_2$ ), které se spíše nastavují pomocí simulace než pomocí výpočtů. Jejich hodnota musí být dostatečně malá, aby iterace v algoritmu konvergovaly. Na začátku je nutné inicializovat hodnoty  $T_0(0)$ ,  $h(0)$ ,  $g(0)$ , které mají velký vliv na průběh regulace. Hodnotou  $\mu_{ref} \approx 0,7$  lze ovlivnit tvar regulačního pochodu. Konstantou  $b$  je možné upravit periodu algoritmu. Pokud se v soustavě objevuje šum, je možné výpočet zesílení upravit podle vztahu (18). Konstanta  $c_2$  se pohybuje v intervalu  $0,03 < c_2 < 0,1$ .

$$\begin{aligned} \Delta g(l) = c_2 \cdot h(l) \cdot g(l-1) [|\text{sign}(e(l-1) + e(l-3)) + \\ + \text{sign}(e(l) - 2e(l-2) + e(l-4))| - \mu_{ref}] \end{aligned} \quad (18)$$



### 3.2.2 Adaptivní systémy s referenčním modelem

Při stanovení parametrů se algoritmus snaží co nejvíce se přiblížit k referenčnímu modelu požadovaného chování systému. Tuto metodu lze s výhodou použít k identifikaci parametrů soustavy a zároveň k řízení soustavy.

### 3.2.3 Samočinně se nastavující regulátory

Tento přístup je založen na průběžném odhadování vlastností (parametrů) soustavy a případných poruch, které na regulovanou soustavu působí. Odhady parametrů jsou zatížené nejistotou, která je závislá na průběhu veličin, podle kterých se provádí identifikace, a počtu kroků identifikace.

Samočinně se nastavující regulátory lze rozdělit na:

- Nepřímé - využívají odhad parametrů regulované soustavy k optimálnímu naladění regulátorů.
- Přímé - využívají odhad parametrů regulované soustavy k přímému ladění regulátorů. Vztah mezi výstupem a vstupem je přepočítán přímo na parametry regulátoru.

### 3.2.4 Identifikace parametrů soustavy

V případě použití samočinně se nastavujících regulátorů závisí úspěšnost použití na schopnosti dostatečně rychle a přesně určit parametry regulované soustavy. Tato schopnost je ve velké míře negativně ovlivněna různými druhy šumu, např. kvantizačním šumem nebo šumem vzniklým měřením skutečné hodnoty.

Pro identifikaci je nejjednodušší popis pomocí regresního ARX („AutoRegressive with eXogenous input“) modelu, který se používá pro parametrickou identifikaci stochastických procesů. ARX model popisuje rovnice (19), ve které  $v$  je měřitelná poruchová veličina a  $e_s$  představuje neměřitelný šum. Poruchu  $n$  na obrázku 10 si lze představit jako signál, jehož vlastnosti jsou dány šumem, který projde přes filtr.

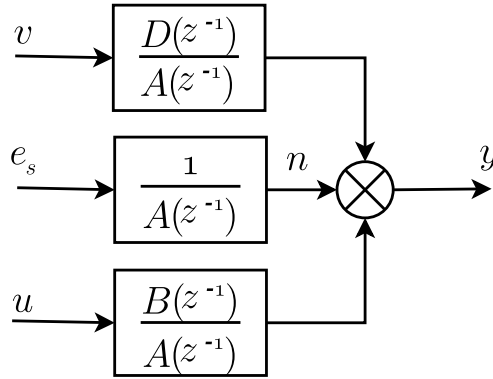
$$y(k) = - \sum_{i=1}^{n_a} a_i y(k-i) + \sum_{i=1}^{n_b} b_i y(k-i) + \sum_{i=1}^{n_d} d_i v(k-i) + e_s(k) \quad (19)$$

Rovnici (19) lze upravit do tvaru rovnice (20).

$$A(z^{-1})y = B(z^{-1})u + D(z^{-1})v + e_s, \quad (20)$$

kde jednotlivé polynomy rovnice (20) mají tvar:

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a} \\ B(z^{-1}) &= b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{n_b} z^{-n_b} \\ D(z^{-1}) &= d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + \dots + d_{n_d} z^{-n_d} \end{aligned}$$



Obrázek 10: Blokové schéma modelu ARX, převzato a upraveno z [3]

Regresní model ARX lze také zapsat v podobě rovnice (21), která umožňuje lepší zařazení do algoritmů.

$$y(k) = \Theta^T(k) \phi(k-1) + e_s(k), \quad (21)$$

kde

$$\Theta^T = [a_1, a_2, \dots, a_{n_a}, b_1, b_2, \dots, b_{n_b}, d_1, d_2, \dots, d_{n_d}] \quad (22)$$

obsahuje koeficienty identifikovaného modelu soustavy a tzv. regresor (23)

$$\begin{aligned} \phi^T(k-1) = & [-y(k-1), -y(k-2), \dots, -y(k-n_a), \\ & u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-n_b), \\ & v(k-1), v(k-2), \dots, v(k-n_d)] \end{aligned} \quad (23)$$

Při modelování soustavy pomocí regresního modelu (ARX) se jako nástroj pro určení jeho parametrů používá metoda nejmenších čtverců, nebo její různé modifikace. Pro identifikaci, která se využívá pro adaptivní řízení, se data získávají přímo ve zpětnovazebním obvodu. Vstup soustavy je tedy buzen zásahy regulátoru. Pro adaptivní řízení se nejvíce hodí metody, které nepočítají s konstantními parametry. Zvolená struktura identifikovaného

modelu se během identifikace nemění. Na začátku většiny algoritmů pro identifikaci je dobré znát přibližné hodnoty parametrů, protože od začátku spuštění procesu regulátor počítá akční zásah, který by při špatném odhadu nebyl adekvátní. Sledování proměnných parametrů v čase se řeší pomocí exponenciálního zapomínání. Nedostatek exponenciálního zapomínání spočívá v tom, že se při nedostatečném buzení soustavy ztrácí informace o dané soustavě. Taková situace se řeší vylepšenými metodami, které fungují na principu exponenciálního zapomínání.[5]

### 3.2.5 Algoritmy identifikace

Pro kvalitní adaptivní řízení založené na identifikaci parametrů regulované soustavy je identifikace stejně důležitá jako výběr vhodné metody návrhu regulátoru. Pro adaptivní řízení jsou nejvhodnější rekursivní algoritmy. Jejich výhoda spočívá v tom, že se dají realizovat v reálném čase a nejsou příliš paměťově náročné.

#### Rekuzivní metoda nejmenších čtverců s exponenciálním zapomínáním

Pro SISO systém popsany pomocí ARX modelu, ve kterém má polynom  $D$  nulové koeficienty, lze použít algoritmus 2. Pokud je faktor zapomínání  $\lambda$  roven 1, přejde algoritmus 2 na normální metodu nejmenších čtverců. Faktor zapomínání  $\lambda$  se volí v rozsahu 0.995 až 0.999.

**Data:** Vstupy  $u$  a  $y$

**Result:** Odhad parametrů modelu  $\hat{\Theta}(k)$

**begin**

**while** není konec činnosti **do**

$$\phi^T(k) = [-y(k-1), \dots, -y(k-n_a), u(k-1), \dots, u(k-n_b)]$$

$$\hat{e}(k) = y(k) - \phi^T(k) \hat{\Theta}(k-1)$$

$$\mathbf{L}(k) = \frac{\mathbf{C}(k-1) \phi(k)}{\lambda + \phi^T(k) \mathbf{C}(k-1) \phi(k)}$$

$$\hat{\Theta}(k) = \hat{\Theta}(k-1) + \mathbf{L}(k) \hat{e}(k)$$

$$\mathbf{C}(k) = \mathbf{C}(k-1) - \mathbf{L}(k) \phi^T(k) \mathbf{C}(k-1) \quad // \text{kovarianční matice}$$

**end**

**Algoritmus 2:** Rekuzivní metoda nejmenších čtverců s exponenciálním zapomínáním, převzato z [6]

### 3.2.6 Samočinně se nastavující PID regulátory

Při znalosti parametrů soustavy lze podle různých postupů, uvedených, například v [3], vypočítat parametry diskretního regulátoru podle zadaných požadavků. Zde je popsána metoda založená na modifikovaném Ziegler-Nicholově kritériu pro diskretní PID regulátor (24) ve tzv. Takahashimově tvaru. Tento tvar snižuje nežádoucí změnu akční veličiny při skokové změně žádané hodnoty.

$$u(k) = K_P \left\{ -y(k) + y(k-1) + \frac{T_0}{T_I} [w(k) - y(k)] + \frac{T_D}{T_0} [2y(k-1) - y(k) - y(k-2)] \right\} + u(k-1) \quad (24)$$

Parametry tohoto regulátoru se spočítají podle vztahů (25)

$$K_P = 0,6K_{PK} \left( 1 - \frac{T_0}{T_K} \right); \quad T_I = \frac{K_P T_K}{1,2K_{PK}}; \quad T_D = \frac{3K_{PK} T_K}{40K_P}, \quad (25)$$

kde  $K_{PK}$  je kritické proporcionální zesílení a  $T_K$  je kritická perioda kmitů. Tyto parametry pro model druhého řádu lze vypočítat podle algoritmu 3 z [3]

## 3.3 LQ regulátor

Metoda minimalizace kvadratického kritéria pro LQ řízení vychází z lineárního stavového popisu diskretního systému.

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{F}\mathbf{x}(k-1) + \mathbf{G}\mathbf{u}(k-1) \quad (26)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) \quad (27)$$

V rovnici (26) a (27) jsou  $\mathbf{x}(k)$ ,  $\mathbf{y}(k)$  a  $\mathbf{u}(k)$  vektory stavu, výstupu a vstupu. Matice  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{N}$ ,  $\mathbf{C}$ , a  $\mathbf{D}$  jsou stavová matice, vstupní výstupní matice a matice přímé vazby. Cíl návrhu LQ regulátoru je minimalizovat kritérium (28)[3].

$$J = \sum_{k=1}^N [\mathbf{x}^T(k) \mathbf{Q}\mathbf{x}(k) + \mathbf{u}^T(k) \mathbf{R}\mathbf{u}(k)] \quad (28)$$

$\mathbf{Q}$  a  $\mathbf{R}$  jsou penalizační matice stavu a vstupu, pro které platí:  $\mathbf{Q} \geq 0$ ,  $\mathbf{R} > 0$ . Pomocí matice  $\mathbf{Q}$  a  $\mathbf{R}$  se dá ovlivnit rychlost přechodu stavů a energetická náročnost akčního

**Data:** Identifikované parametry soustavy  $a_1, a_2, b_1, b_2$

**Result:** Kritické proporcionální zesílení  $K_{PK}$  a kritická perioda kmitů  $T_K$

**begin**

$$K_{P1} = \frac{1 - a_2}{b_2}$$

$$K_{P2} = \frac{a_1 - a_2 - 1}{b_2 - b_1}$$

$$b = b_1 K_{P1} + a_1$$

$$c = b_2 K_{P1} + a_2$$

$$d = b^2 - 4c$$

$$\alpha = -\frac{b}{2}$$

$$\omega_k = \frac{1}{T_0} \arccos \alpha$$

$$T_K = \frac{2\pi}{\omega_k}$$

**if**  $d \leq 0$  **then**

$$| K_{PK} = K_{P1}$$

**else**

$$| K_{PK} = K_{P2}$$

$$| T_K = 2T_0$$

**end**

**Algoritmus 3:** Výpočet kritických parametrů, převzato [3]

zásahu. Optimální řídicí zákon je dán rovnicí (29), kde  $\mathbf{K}$  je Kalmanovo zesílení diskrétního LQ regulátoru.

$$\mathbf{u}(k) = -\mathbf{K}(k) \mathbf{x}(k) \quad (29)$$

To to zesílení se vypočítá pomocí diferenční Riccatiho rovnice (30) pro LQ regulátor:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(k) &= \mathbf{Q}(k) + \mathbf{M}^T \mathbf{P}(k+1) \mathbf{M} - \mathbf{M}^T \mathbf{P}(k+1) \mathbf{N} \mathbf{K}(k), \\ \mathbf{K}(k) &= [\mathbf{R}(k) + \mathbf{N}^T \mathbf{P}(k+1) \mathbf{N}]^{-1} \mathbf{N}^T \mathbf{P}(k+1) \mathbf{M}, \end{aligned} \quad (30)$$

s koncovou podmínkou

$$\mathbf{P}(N) = \mathbf{Q}(N). \quad (31)$$

Riccatiho rovnice řeší pomocí iterace s dostatečně velkým počtem kroků  $N$ , aby Kalmanovo zesílení konvergovalo k limitní hodnotě. Tímto postupem získáme časově invariantní LQ regulátor, který má stejnou strukturu jako stavová zpětná vazba [12].

Při použití adaptivní LQ regulace je třeba neustále opakovat syntézu regulátoru. Musí se brát v úvahu doba potřebná k identifikaci a k syntéze regulátoru, kterou omezuje vzorkovací perioda a výpočetní rychlost. Jedinou neurčitou veličinou je počet kroků  $N$  [3].

## 4 Implementace

V této kapitole jsou uvedeny výsledky simulací popsaných algoritmů.

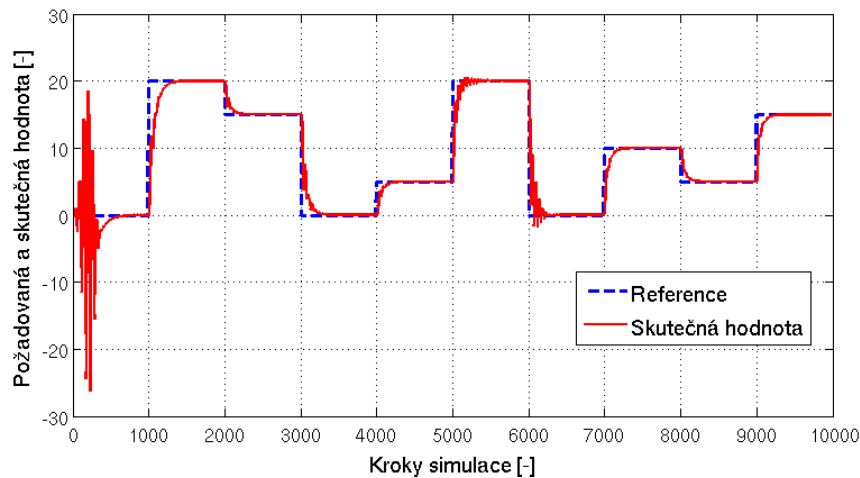
### 4.1 Simulace algoritmů

#### 4.1.1 Simulace adaptivního řízení založená na heuristickém přístupu

Simulace byla provedena pro statickou soustavu třetího řádu s přenosem (32)

$$G(z^{-1}) = \frac{0,0013z^{-1} + 0,0041z^{-2} + 0,0008z^{-3}}{1 - 2,277z^{-1} + 1,651z^{-2} - 0,3679z^{-3}}. \quad (32)$$

Simulované průběhy požadované a skutečné hodnoty jsou znázorněny na obrázku 11. Simulované průběhy adaptace zesílení  $g$  a adaptace doby opakování adaptačního algoritmu jsou na obrázku 12. Hodnota zesílení  $g$  je pro lepší znázornění vynásobena deseti.

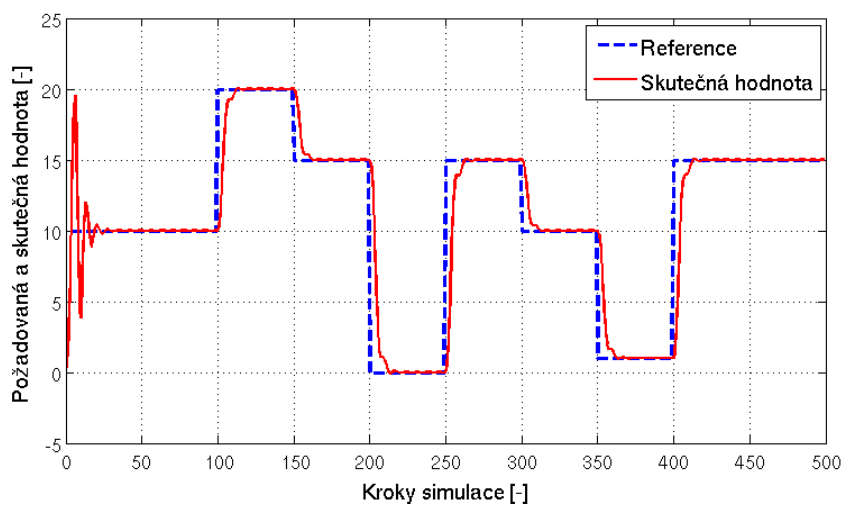


Obrázek 11: Výsledky simulace algoritmu 1

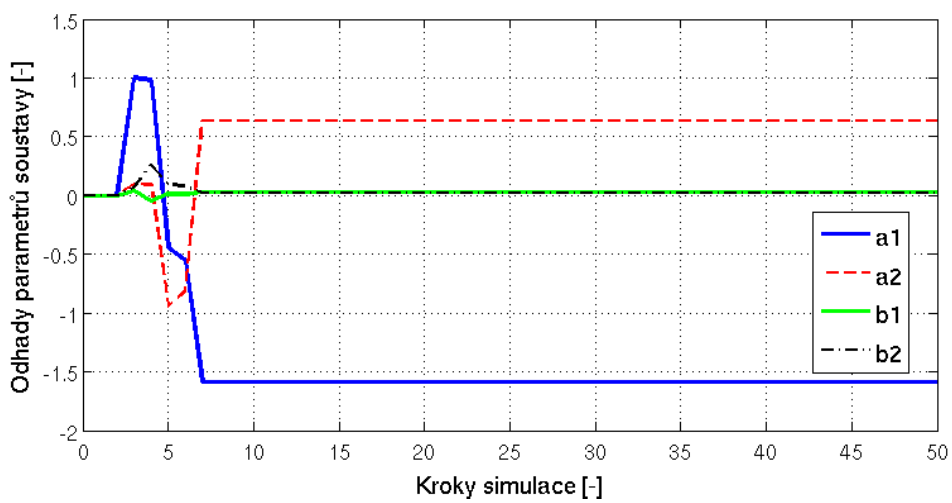
Počáteční nastavení parametru je:  $c = 2$ ,  $c_1 = 0,1$ ,  $c_2 = 0,05$ ,  $b = 1$ ,  $h(0) = 10$ ,  $g(0) = 1$ ,  $T_0 = 30$ . Doba  $T_0$  představuje počet kroků do další adaptace. Počáteční nastavení parametrů a konstant jsem hledal opakovanou simulací a postupně upravil hodnoty na výše uvedené. Tato skutečnost vedla k tomu, že tento algoritmus nebyl dále použit pro pokusy s kvadroptérou.







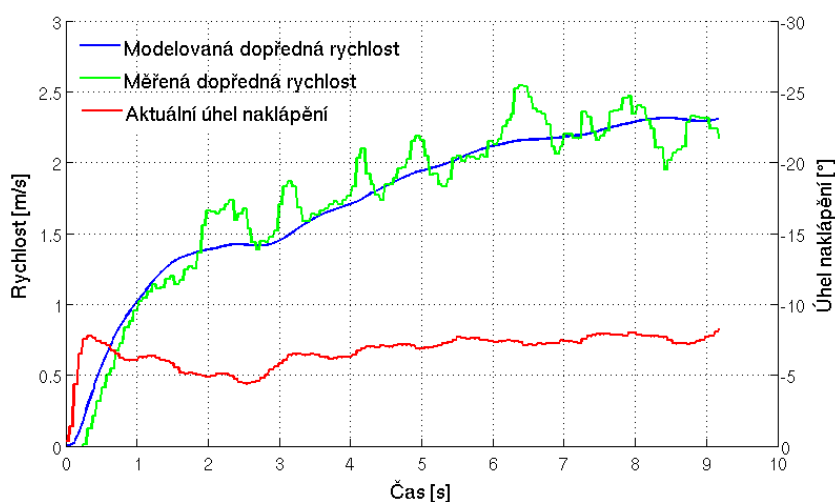
Obrázek 13: Výsledky simulace pro STC



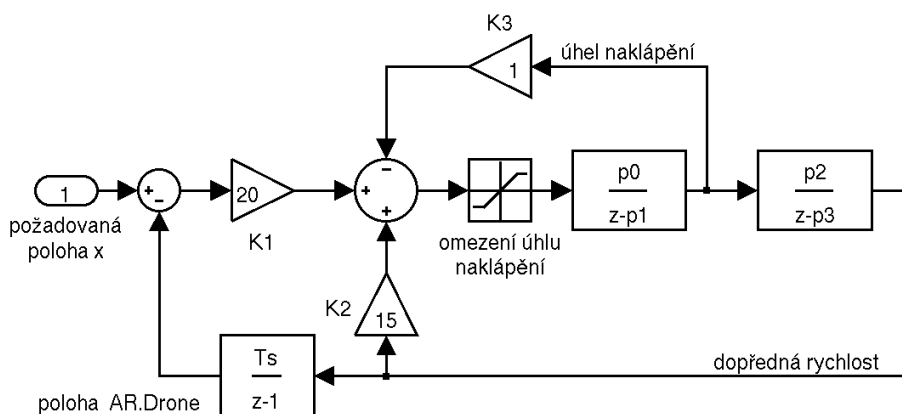
Obrázek 14: Identifikace parametru s exponenciálním zapomináním

## 4.2 Současný model pro řízení AR.Drone

Řízení polohy kvadrokoptéry je v současnosti realizováno pomocí struktury znázorněné na obrázku 16. Konstanty  $K1$ ,  $K2$ ,  $K3$  jsou vypočítány pomocí metody umístění pólů [2]. Identifikované hodnoty přenosových funkcí jsou:  $p_0 = 0,03$ ,  $p_1 = 0,97$ ,  $p_2 = -0,003$ ,  $p_3 = 0,99$ . Tyto hodnoty se určily pomocí metody nejmenších čtverců z odezvy na skokovou změnu úhlu naklápění. Ověření parametrů modelu je na obrázku 15, kde se jsou porovnané simulovaná a naměřená data [2].



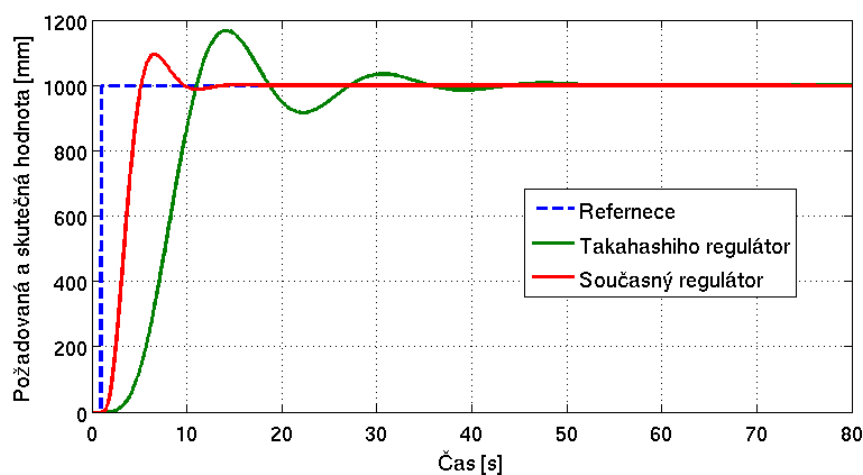
Obrázek 15: Ověření modelu, převzato a upraveno z [2]



Obrázek 16: Současný model řízení polohy AR.Drone

Pro využití výše uvedeného postupu regulace byly algoritmus identifikace, výpočet kritických hodnot a řídicí zákon přepsány do programovacího jazyka C. Strukturu navrženého postupu nebylo možno jednoduše implementovat do programu, který se momentálně používá pro řízení kvadrokoptéry. Úskalí spočívá v tom, že uvedený výpočet kritických parametrů je určen pro soustavu druhého řádu, zatímco přenosová funkce kvadrokoptéry pro řízení polohy je třetího řádu. Tento problém jsem se snažil vyřešit tím, že budu navrhovat konstanty PID regulátoru pro soustavu druhého řádu a integrační složku regulátoru bude tvořit již samotná regulovaná soustava. Nepodařilo se mi ale najít vhodné přepočtení vztahy do dosavadního modelu řízení, navíc navržené konstanty Takahashiho regulátoru vycházely příliš velké ( $K_p = 256,2$ ,  $T_i = 0,5$  a  $T_d = 0,1336$ ), což způsobovalo neustálé saturace akční veličiny a kmitání celého modelu.

Simulací jsem zjistil kritické parametry pro model celé kvadrokoptéry (soustava 3.řádu). Z nich jsem pak určil konstanty Takahashiho regulátoru, které jsou  $K_p = 2,31$ ,  $T_i = 6,08$  a  $T_d = 1,529$ . Porovnání se současným regulátorem je na obrázku 17, kde perioda vzorkování je  $T_s = 0,033s$ . Z tohoto důvodu je upravena hodnota konstanty  $K_1$  na hodnotu 10. V [3] je uveden výpočet kritických parametrů pro přenos 3. řádu, ale tento výpočet při simulacích modelu kvadrokoptéry numericky selhával.



Obrázek 17: Porovnání Takahashiho a současného regulátoru

### 4.3 Simulace LQR

Pro výpočet Kalmanova zesílení pomocí Matlabu lze použít funkci „dare“. Nejprve je nutné převést přenosové funkce kvadroptéry zobrazené na obrázku 16 do diskretního stavového popisu. Stavový popis, který je ekvivalentní se současným modelem je:

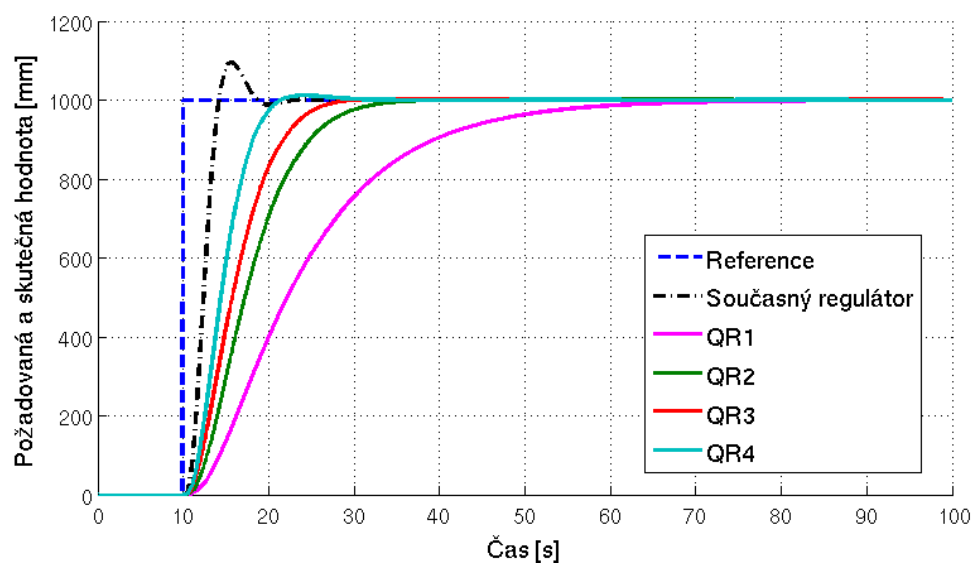
$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 0,97 & 0 & 0 \\ -0,003 & 0,99 & 0 \\ 0 & T_s & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{N} = \begin{pmatrix} 0,03 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{pmatrix} 0 \end{pmatrix}$$

Provedl jsem simulace pro různé hodnoty v penalizačních matic  $\mathbf{Q}$  a  $\mathbf{R}$ . Pro lepší orientaci jsou uvedeny v tabulce 1. Simulace LQ regulátoru pro hodnoty v tabulce 1 jsou zobrazeny na obrázku 18, kde  $T_s = 0,033s$  a konstanta  $K_1 = 10$ .

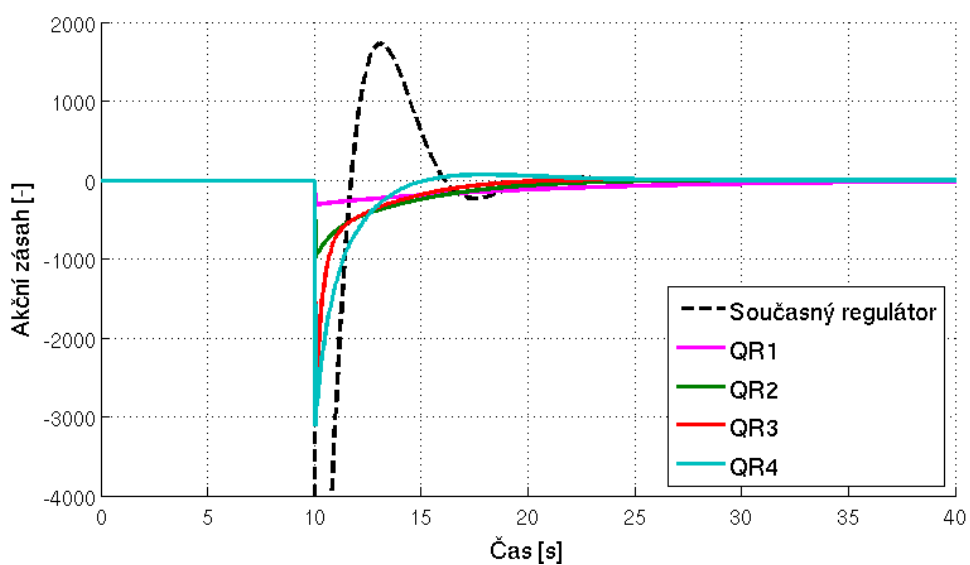
Tabulka 1: Hodnoty  $\mathbf{Q}$  a  $\mathbf{R}$

Parametry	QR1	QR2	QR3	QR4
$\mathbf{Q}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 50 & 0 \\ 0 & 0 & 50 \end{pmatrix}$
$\mathbf{R}$	$\begin{pmatrix} 10 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 10 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 10 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 10 \end{pmatrix}$

LQ regulátor s nastavenými maticemi  $\mathbf{Q}$  a  $\mathbf{R}$ , podle QR1 se snaží minimalizovat akční zásah. Pokud jsou penalizační matice nastaveny podle QR3, regulátor se snaží minimalizovat dobu regulace. Na obrázku 19 má akční zásah současného regulátoru maximální hodnotu  $-1 \cdot 10^4$ .



Obrázek 18: Porovnání odezvy na skok - LQR a současný regulátor



Obrázek 19: Porovnání akčních zásahů - LQR a současný regulátor

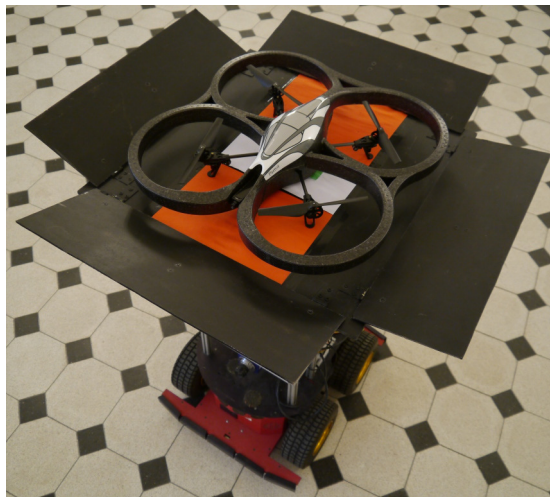
## 5 Návrh a výroba heliportu

V této kapitole je popsán návrh a výroba heliportu.

### 5.1 Popis mechanického řešení heliportu

#### 5.1.1 Koncepce mechanického řešení heliportu

Při řešení mechanické části heliportu jsem vycházel ze základních rozměrů kvadroptéry AR.Drone s nasazeným ochranným krytem pro létání uvnitř budov. Jedná se tedy o rozměry půdorysu helikoptéry vepsané do čtverce s délkou hrany 530 mm. Tyto rozměry se mohou měnit o  $\pm 10$  mm, protože se ochranný kryt helikoptéry, vyrobený z polypropylenu, různě deformuje. Helikoptéru je nutné po přistání na heliport umístit na střed. To se děje pomocí čtyř klapek, které jsou připevněny na kraji základní desky pomocí pantů. Na polohování klapek jsem použil čtyři modelářská serva. Tato serva jsou řízena mikrokontrolérem AT-mega8, který zároveň slouží ke komunikaci mezi heliportem a robotickou platformou. Při návrhu jsem se snažil minimalizovat náklady, proto je základna heliportu vyrobena z 8 mm silné překližky a klapky ze 3 mm silné překližky.



Obrázek 20: Fotografie otevřeného heliportu na mobilní robotické platformě, převzato [4]

#### 5.1.2 Výroba

Výroba heliportu spočívala v sestavení základny s klapkami, dále jsem musel vyřešit, jak a kam vhodně umístit modelářská serva. Serva jsem umístil na spodní stranu základny a

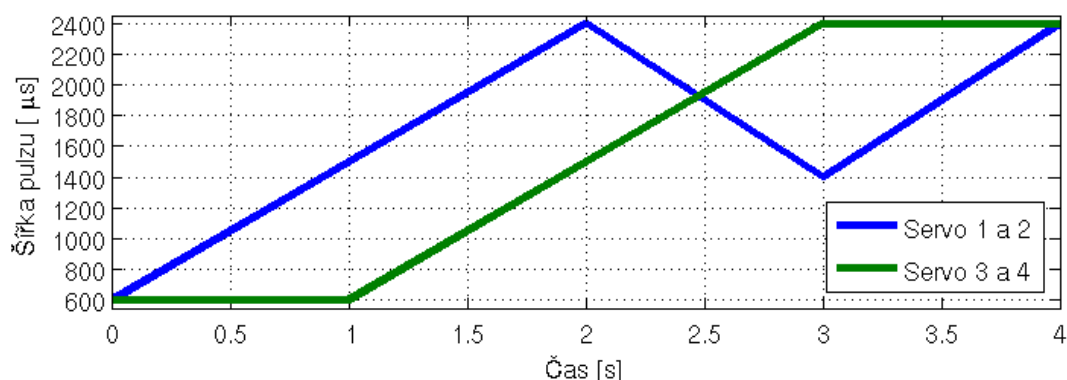
potřebný moment jsem převedl na klapky pomocí táhel, která jsou umístěna na prostředku klapky. Síla použitých modelářských serv Hi-tech (typ: HS-485 HB) je přibližně 5 kg/cm při napájení 5 V. Tato síla se ukázala jako dostačující na posun helikotéry pomocí klapky. Heliport je umístěn na robotické platformě pomocí čtyř tyčí. Tyto tyče jsou opatřeny na koncích šrouby, které jsou zapuštěny 4 mm do základny. Celý heliport je opatřen černým matným nátěrem. Na vrchní straně jsou umístěny barevné značky pro navádění kvadrokoptéry na heliport.

## 5.2 Popis elektrického řešení heliportu

Heliport je propojen s počítačem, odkud se ovládá, pomocí virtuální sériové linky. Dnešní počítače většinou nemají sériový port, a proto jsem využil už hotový převodník z USB na sériovou linku s obvodem FT232RL, který je pro tento účel vyhovující.

### 5.2.1 Řízení modelářských serv

Většina analogových modelářských serv se řídí PWM signálem. Jeho opakovací frekvence je 50 Hz a šířka pulzu se pohybuje v rozmezí 600 až 2400  $\mu\text{s}$ . Podle konstrukčního uspořádání je při šířce pulzu 600  $\mu\text{s}$  klapka téměř rovnoběžná se základnou. Tato poloha klapky se označuje jako „otevřeno“. Při šířce pulzu 2400  $\mu\text{s}$  je klapka kolmá k základně. Tato poloha klapky se označuje jako „zavřeno“. Během pokusů s centrováním kvadrokoptéry na heliportu se ukázalo, že je vhodnější pohybovat klapkami podle časového diagramu 21 než zavírat všechny klapky najednou. Z časového diagramu je patrné, že se nejprve zavírá



Obrázek 21: Průběh signálů na servech při centrování kvadrokoptéry

dvojice klapky, které spolu utvoří roh. Následně se začne zavírat po úhlopříčce protilehlý roh a první otevírat. Nakonec se první dvojice klapky dovrže a centrování kvadroptéry je dokončeno.

### 5.2.2 Výběr mikrokontroléru

Průběhy, které jsou na obrázku 21, a komunikaci s počítačem jsem realizoval pomocí mikrokontroléru ATmega8 od společnosti Atmel [14]. Tento mikrokontrolér jsem vybral kvůli dostatečně velké 8kB paměti a faktu že jej lze programovat pomocí ISP. Společnost Atmel také poskytuje bezplatně vývojové prostředí - AVRStudio.

### 5.2.3 Popis programu pro mikrokontrolér

Program mikrokontroléru generuje řídicí signál pro čtyři modelářská serva podle aktuálního přijmutého příkazu. Komunikace nadřazeného zařízení s heliportem má pět příkazů. Nadřazené zařízení pošle znak **S**, heliport pošle zpět následující znak:

- **C**, pokud jsou všechny klapky heliportu v zavřené poloze.
- **O**, pokud jsou všechny klapky heliportu v otevřené poloze.
- **I**, pokud jsou všechny klapky heliportu nastavené na zadaných polohách
- **B**, pokud se nějaká klapka pohybuje.

Nadřazené zařízení pošle znak **P**, heliport pošle zpět následující čtyři aktuální hodnoty pozic klapky. Hodnota 0 odpovídá poloze otevřeno a hodnota 255 odpovídá poloze zavřeno. Nadřazené zařízení pošle znak **O**, heliport přesune všechny klapky do polohy otevřeno. Během otvírání heliport ignoruje požadavek na zavření klapky heliportu. Nadřazené zařízení pošle znak **C**, heliport přesune klapky do polohy zavřeno následujícím způsobem:

- Pokud byl heliport ve stavu **O**, zavřou se klapky podle navrženého diagramu znázorněného na obrázku 21.
- Pokud byl heliport ve stavu **I**, zavřou se klapky konstantní rychlostí.

Nadřazené zařízení pošle znak **I** následovaný čtyřmi hodnotami v rozsahu 0 až 255, heliport plynule nastaví klapky na zadané pozice.



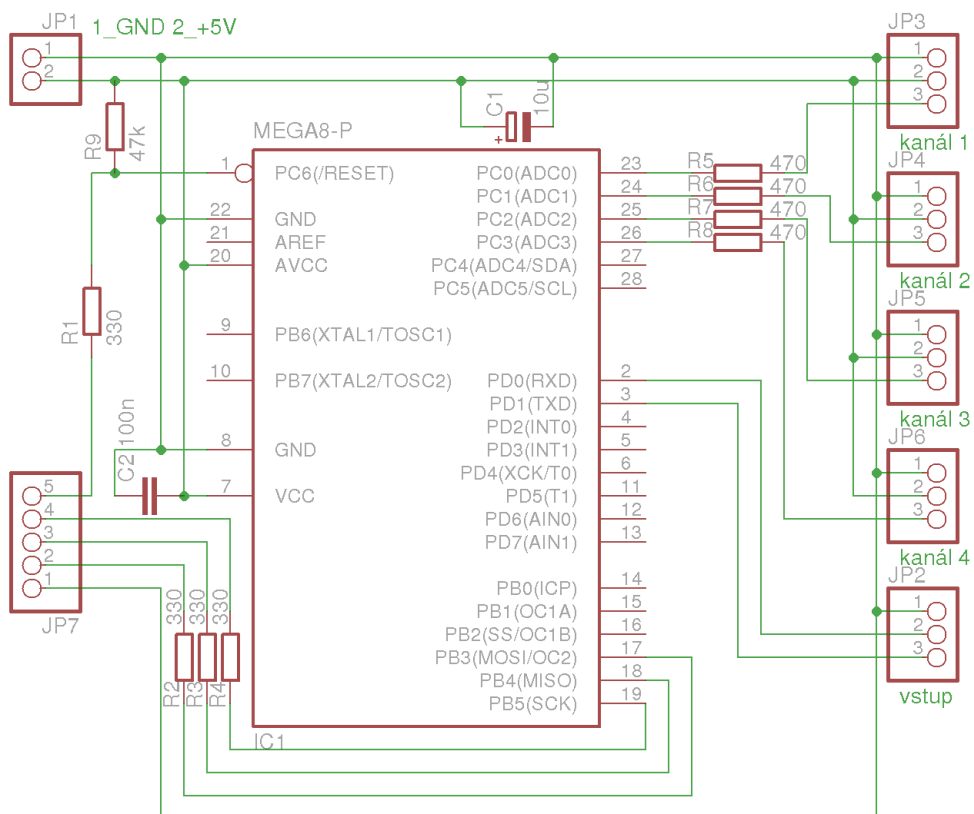
Přenosová rychlost jednotky USART v mikrokontroléru je 9600 bps, přenáší se 8 bitů, vysílán je 1 stopbit a parita se nepoužívá.

K taktování mikrokontroléru používám interní 8MHz RC oscilátor. Jeho přesnost vyhovuje pro generování PWM signálu, ale omezuje přenosovou rychlost na 9600 bps. Při zkoušení větších přenosových rychlostí, například 14400 bps, neprobíhal přenos dat korektně.

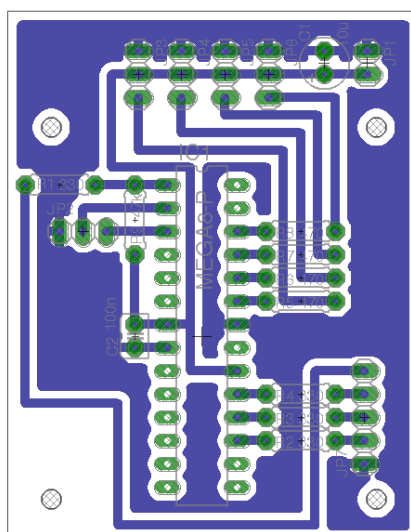
Mikrokontrolér generuje čtyři kanály PWM signálu pro ovládání čtyř modelářských serv. Po připojení napájecího napětí 5 V se klapky začnou pohybovat podle diagramu 21, a to i pokud byly v poloze zavřeno. Z důvodu jednoduchosti se v mikrokontroléru přepočítává zadaná hodnota polohy klapky na hodnotu pro nastavení šířky pulzu v rozsahu od 600 do 2400 pomocí vztahu  $wp = \frac{120}{17}x + 600$ , kde  $wp$  je šířka pulzu a  $x$  je zadaná hodnota. Podobně se počítá i hodnota, kterou mikrokontrolér posílá nadřazenému zařízení, a to podle vztahu  $p = \frac{17}{120}wp - 85$ , kde  $p$  je vyslaná hodnota pozice daného serva. Obě takto vypočítané hodnoty se zaokrouhlují na celá čísla, což způsobuje malé nepřesnosti.

### 5.2.4 Schéma zapojení

Návrh zapojení desky ovládání vychází z funkce mikrokontroléru, viz obrázek 22. Konektor JP1 slouží k napájení celé desky a serv napětím 5 Voltů. Konektor JP2 slouží k připojení sériové linky převodníku s obvodem FT232RL. Konektory JP3, JP4, JP5, JP6 jsou určeny pro jednotlivá serva. Pomocí konektoru JP7 lze mikrokontrolér programovat přímo na desce. Rezistory R1 až R8 omezují proud při případném přetížení, rezistor R9 funguje jako pull-up. Kondenzátory C1 a C2 plní funkci blokovacích kondenzátorů a jejich jmenovité napětí je 6,3 V.



Obrázek 22: Schéma desky ovládající serva



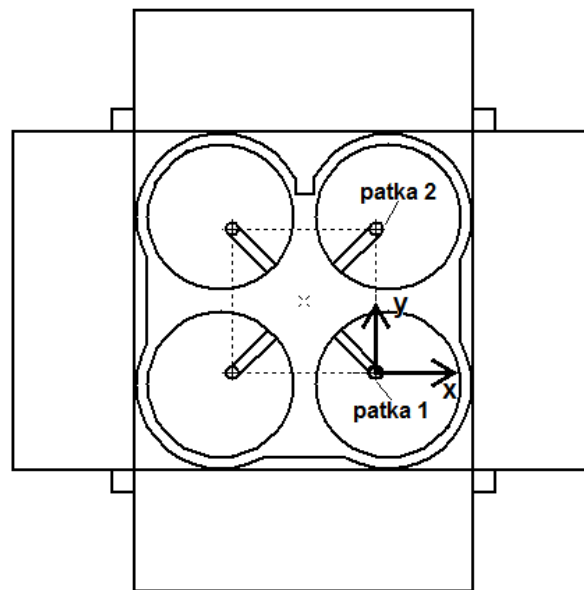
Obrázek 23: Deska plošných spojů ovládaní serv - pohled ze strany součástek

## 6 Experimenty

V této kapitole je popsán experiment, kterým se ověřila funkčnost vyrobeného heliportu. V druhé části jsou zdokumentovány výsledky sledování pohybujícího se heliportu kvadrokoptérou pro regulátor nastavený pomocí LQ.

### 6.1 Funkčnost heliportu

K ověření funkčnosti centrování navrženého heliportu jsem provedl experiment, při kterém se kvadrokoptéra s krytem pro létání uvnitř budov pokládala na možná místa přistání na heliportu. Poté se spustila procedura centrování. K odměření chyby pozice na heliportu jsem zvolil souřadný systém, který je naznačen na obrázku 24. Měřil jsem vzdálenost mezi zvoleným souřadným systémem a mezi patkami jedna a dva kvadrokoptéry. Ke každé testované poloze náleží souřadnice patek kvadrokoptéry před a po vycentrování. Touto metodou jsem také zjistil pracovní prostor heliportu, tedy prostor, kde je heliport



Obrázek 24: AR.Drone na referenčních značkách a vyznačený souřadnicový systém

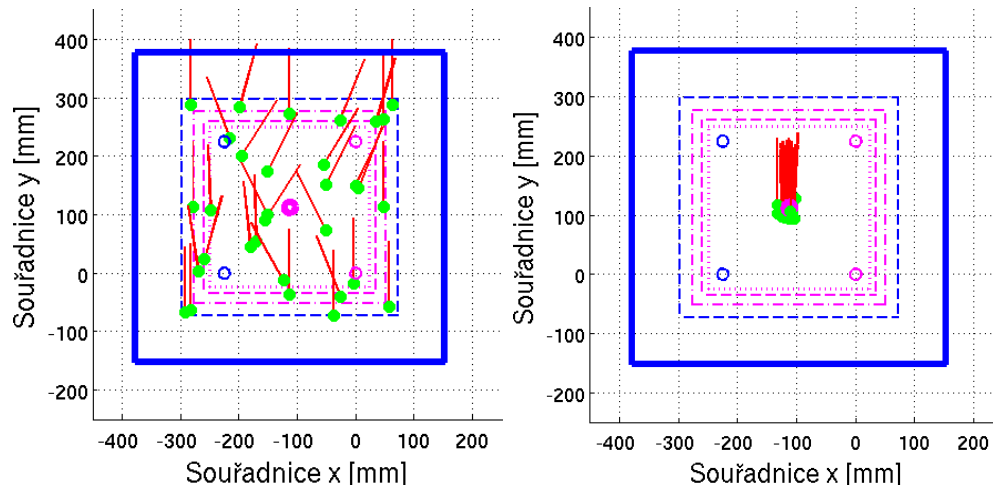
schopen posunout kvadrokoptéru na střed heliportu, což je nutná podmínka pro dobíjení akumulátoru a opakovaný vzlet. Při určování pracovního prostoru byly použity souřadnice pozic patek, při kterých se povedlo vycentrování na první pokus. Úspěšné vycentrování

kvadrokoptéry závisí na poloze a na úhlu otáčení mezi zvoleným souřadným systémem heliportu a osou horizontální kamery kvadrokoptéry. Odchylka tohoto úhlu musí být v rozmezí  $\pm 30^\circ$ . Kvadrokoptéra má čtvercový půdorys, proto je možné měřit tuto odchylku od kladné, nebo záporné osy x, y. Zjištěné velikosti pracovního prostoru, pro různé odchylky natočení jsou v tabulce 2. Pracovní prostor, který je vztažen ke středu kvadrokoptéry je zobrazen

Tabulka 2: Rozměry pracovního prostoru

Odchylka úhlu $[\circ]$	Rozměry pracovního prostoru $[mm]$
0	$370 \times 370$
$\leq 10$	$328 \times 328$
$\leq 20$	$295 \times 295$
$\leq 30$	$273 \times 273$

na obrázku 25. Na obrázku 25 modrá plná čára ohraničuje základnu heliportu, modrá přerušovaná čára lemuje maximální pracovní prostor pro odchylku  $0^\circ$ . Purpurové čtverce označují pracovní prostor pro úhel odchylky menší než  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  a  $30^\circ$ .



Obrázek 25: Vizualizace pracovního prostoru s vyznačeným středem kvadrokoptéry a její orientací před a po centrování

Pro účely statistického zpracování naměřených dat jsem použil vzdálenosti patek 1 a 2 od referenčních bodů po vycentrování. Tato volba se zdá jako nejlepší, protože pro případné nabíjení kvadrokoptéry by byly kontakty umístěny na místech referenčních bodů. Vypočítané statistické hodnoty pro naměřená data jsou uvedeny v tabulce 3.

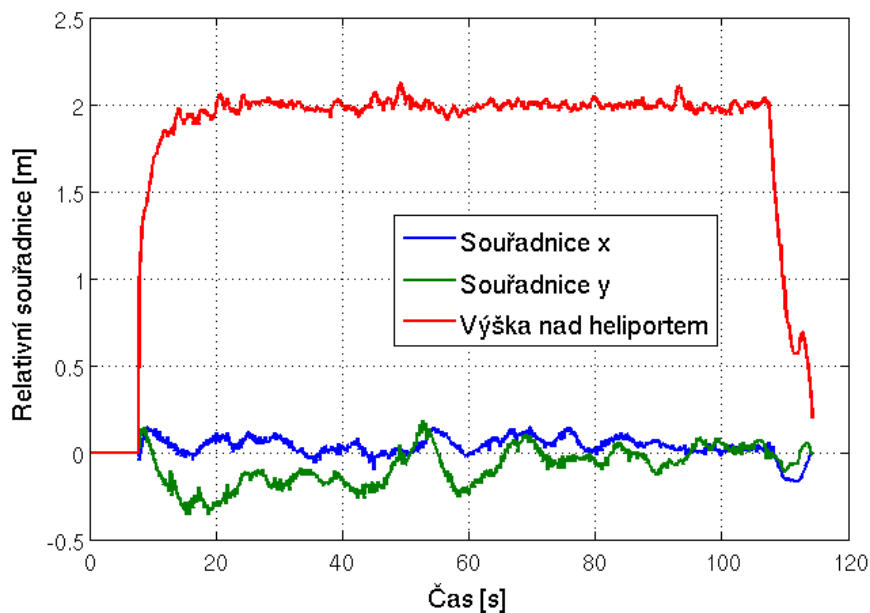
Tabulka 3: Statistické hodnoty

Statistické hodnoty	Pozice patky 1		Pozice patky 2	
	Souřadnice x [mm]	Souřadnice y [mm]	Souřadnice x [mm]	Souřadnice y [mm]
Minimum	-20	-20	-20	-22
Maximum	10	10	15	10
Průměr	5	-8	1	-8
Median	-5	-10	0	-10
Rozptyl	71	108	107	112
Standartní odchylka	8	10	10	11

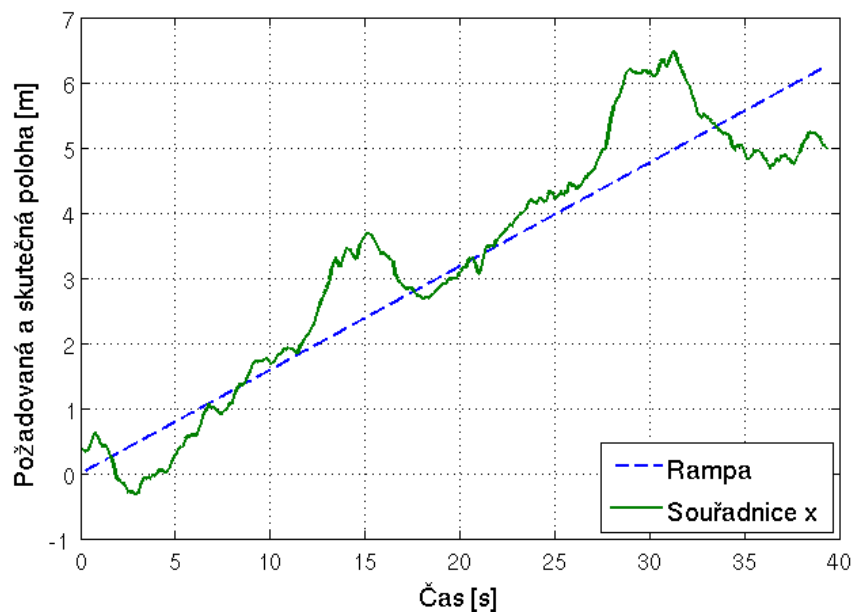
## 6.2 Sledování heliportu

Pomocí LQ regulátoru byly navrženy hodnoty konstant  $K1$ ,  $K2$ ,  $K3$ . Penalizační matice  $\mathbf{Q}$  je diagonální s hodnotami 100 a matice  $\mathbf{R}$  má hodnotu 1. Hodnoty konstant jsou  $K1 = 8, 7$ ,  $K2 = 22, 1$ ,  $K3 = 8$ . Pro tyto hodnoty kvadroptéru kmitala, zřejmě z důvodů dopravního zpoždění při výpočtu úhlu naklápění resp. naklání, proto byla konstanta  $K3$  upravena na hodnotu 1. Pro toto nastavení regulátoru byly provedeny experimenty.

Při prvním experimentu se kvadroptéru vznášela nad stojícím heliportem. Naměřený průběhů relativních souřadnic je znázorněn na obrázku 26, kde je vidět i vzlet a přistání. Při druhém experimentu kvadroptéru sledovala jedoucí heliport, který se pohyboval ve směru osy  $x$ . Naměřený průběh při sledování jedoucího heliportu je zobrazen na obrázku 27. Dvě výrazné odchylky jsou způsobeny změnou světelných podmínek (průjezdy kolem oken). Detekčnímu algoritmu na rozpoznání obrazců na heliportu chvíli trvá, než se přizpůsobí této změně.



Obrázek 26: Vzlet, vznášení a přistání kvadroptéry - stojící heliport



Obrázek 27: Sledování jedoucího heliportu - souřadnice x

## 7 Závěr

Popsané metody řízení jsem vybral především kvůli jejich jednoduchosti. Výsledky simulací pomocí programu Matlab a Simulink byly uspokojivé. Při simulacích na modelu kvadrokoptéry AR.Drone bylo nejlepších výsledků dosaženo pomocí LQ regulátoru. Navržené hodnoty tímto regulátorem byly implementovány do softwaru ovládacího programu kvadrokoptéry. U simulace samočinně se nastavujícího regulátoru na modelu kvadrokoptéry numericky selhával výpočet kritických parametrů. Tato skutečnost pak vedla ke špatnému nastavení konstant PID regulátoru. Pokud by se měla používat tato metoda, musí se zvolit jiný postup návrhu PID regulátoru, například metody založené na přiřazení pólů.

Navrhl jsem heliport, který je schopný aktivně spolupracovat s kvadrokoptérou během přistávacího manévru. Tato spolupráce má za následek vycentrování kvadrokoptéry na střed heliportu, což je důležité pro dobíjení a opakovaný vzlet. Zprovoznění heliportu nebylo jednoduché, ale problémy s konstrukcí a ovládacími prvky se mi podařilo vyřešit. Navíc jsem se naučil programovat mikrokontroléry Atmel AVR. Zjistil jsem velikost pracovního prostoru pro různé odchylky natočení mezi kvadrokoptérou a heliportem. Maximální odchylka natočení pro úspěšné vycentrování musí být v rozmezí  $\pm 30^\circ$ , viz 6. Přesnost vycentrování také ovlivňuje tření mezi klapkami heliportu a ochranným krytem AR.Drone. Svou roli hraje rovněž mechanická vůle v převodech mezi servem na klapkou.

Pracovní prostor by bylo možné ještě zvětšit, pokud by se upravil postup centrování. Při používání heliportu bylo zjištěno, že by mohl být komunikační protokol doplněn o další povel, který by odpojil serva od řídicího signálu a tím se snížila spotřeba energie. Přistávací manévry je také ovlivňován světelnými podmínkami a volbou tvarů obrazců a jejich barev.

Heliport byl představen jako součást multi-robotického systému na 2012 IEEE 9th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices (SSD), viz [4].

## Reference

- [1] Pierre-Jean Bristeau, François Callou, David Vissière, and Nicolas Petit. The Navigation and Control technology inside the AR.Drone micro UAV. In *Preprints of the 18th IFAC World Congress Milano (Italy) August 28 - September 2, 2011*, pages 1477–1484, 2011. Dostupné na <http://cas.ensmp.fr/~petit/papers/ifac11//PJB.pdf>, Přístup: 02/05/2012.
- [2] Tomáš Krajník, Vojtěch Vonásek, Daniel Fišer, and Jan Faigl. AR-Drone as a Platform for Robotic Research and Education. In David Obdržálek and Achim Gottscheber, editors, *Research and Education in Robotics - EUROBOT 2011*, volume 161 of *Communications in Computer and Information Science*, pages 172–186. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [3] Vladimír Bobál, Josef Böhm, and Jaromír Fessl. *Praktické aspekty samočinně se nastavujících regulátorů: Algoritmy a implementace*, volume 1. VUTIUM Vysoké učení technické v Brně, Brno, 1999.
- [4] M. Saska, T. Krajník, and L. Přeučil. Cooperative Micro UAV-UGV Autonomous Indoor Surveillance. In *International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*, page 36, Piscataway, 2012. IEEE.
- [5] Petr Klán, Jaroslav Maršík, Vladimír Görner, and Pavel Valášek. *Adaptivní PID regulátory s monolitickými  $\mu$ -počítači: Technické a programové vybavení a aplikace*. ÚTIA ČSAV, Praha, 1990.
- [6] Petr Navrátil. *Metody průběžné identifikace pro návrh samočinně se nastavujících regulátorů*. PhD thesis, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, 2007.
- [7] Radek Baranek and František Šolc. Mnohorotorové vrtulníky k použití v budovách i v otevřeném terénu. *Automa*, (12):45–47, 2011.
- [8] Karl J. Åström and Björn Wittenmark. *Adaptive control Second Edition*, volume 2. DOVER PUBLICATIONS, INC., Mineola, New York, 2008.
- [9] Parrot SA. AR.Drone Parrot: A technological first [online]. <http://ardrone.parrot.com/parrot-ar-drone/en/technologies>. Přístup: 22/03/2012.



- [10] J. Crowe, K.K. Tan, T.H. Lee, R. Ferdous, M.R. Katebi, H.-P. Huang, J.-C. Jeng, K.S. Tang, G.R. Chen, K.F. Man, S. Kwong, A. Sánchez, Q.-G. Wang, Yong Zhang, Yu Zhang, P. Martin, M.J. Grimble, D.R. Greenwood, and M.A. Johnson. PID Control Technology. In Michael A. Johnson and Mohammad H. Moradi, editors, *PID Control*, pages 1–46. Springer London, 2005.
- [11] Karl J. Åström and Tore Hägglund. *PID Control*, volume 2. Research Triangle Park : Instrument Society of America, 1995.
- [12] Jiří Roubal, Jaroslav Pekař, Vladimír Pachner Daniel, and Vladimír Havlena. *Moderní teorie řízení: Cvičení*, volume 1, chapter 6. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2005.
- [13] Jaroslav Balátě. *Automatické řízení*, volume 1. BEN - technická literatura, Praha, 2003.
- [14] Atmel. Katalog atmega8 [online]. [http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc2486.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2486.pdf). Přístup: 15/04/2012.

## 8 Příloha

### 8.1 Obsah přiloženého CD

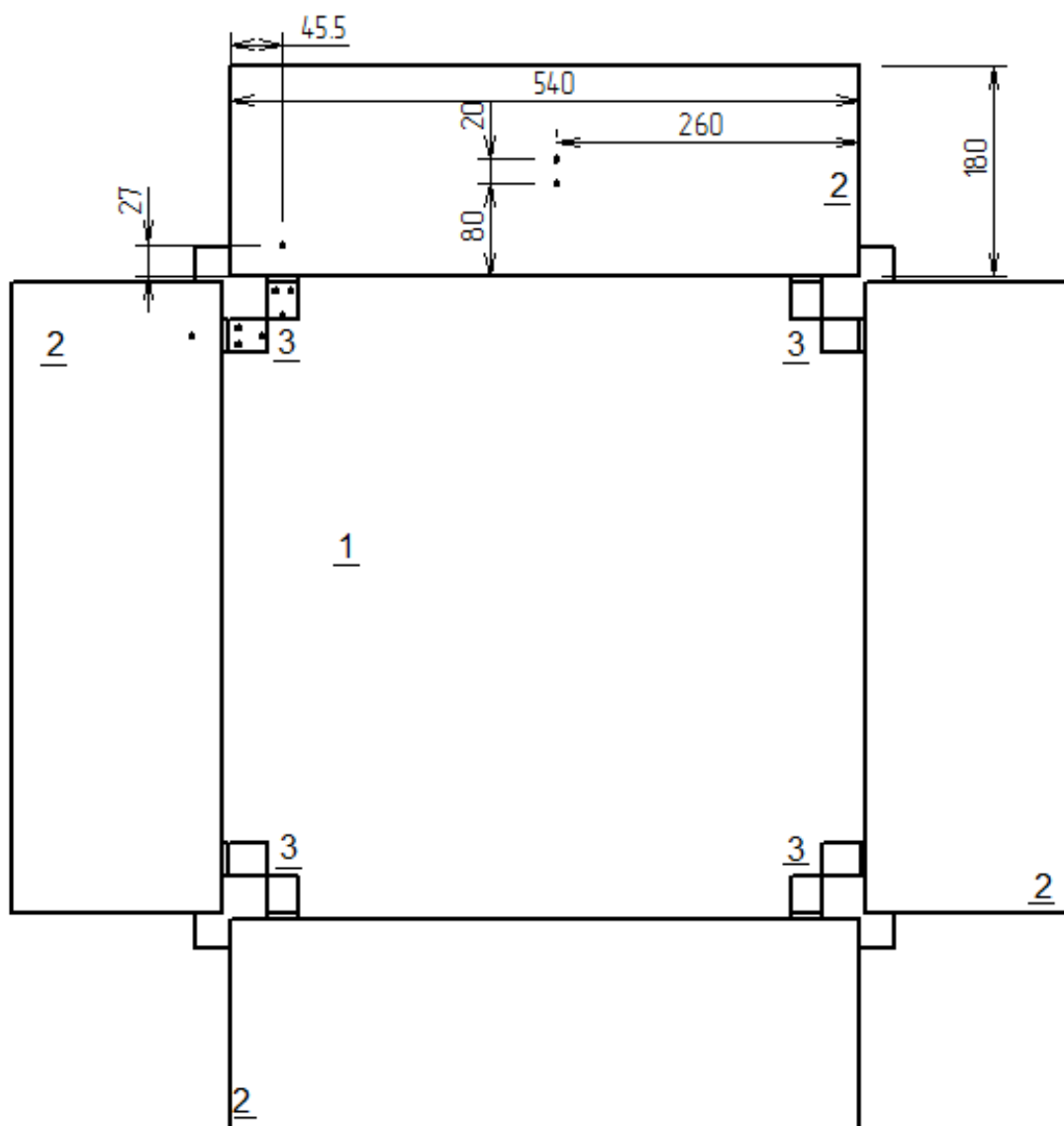
V tabulce 4 jsou uvedena jména všech kořenových adresářů přiloženého CD s popisem obsahu.

Tabulka 4: Obsah CD

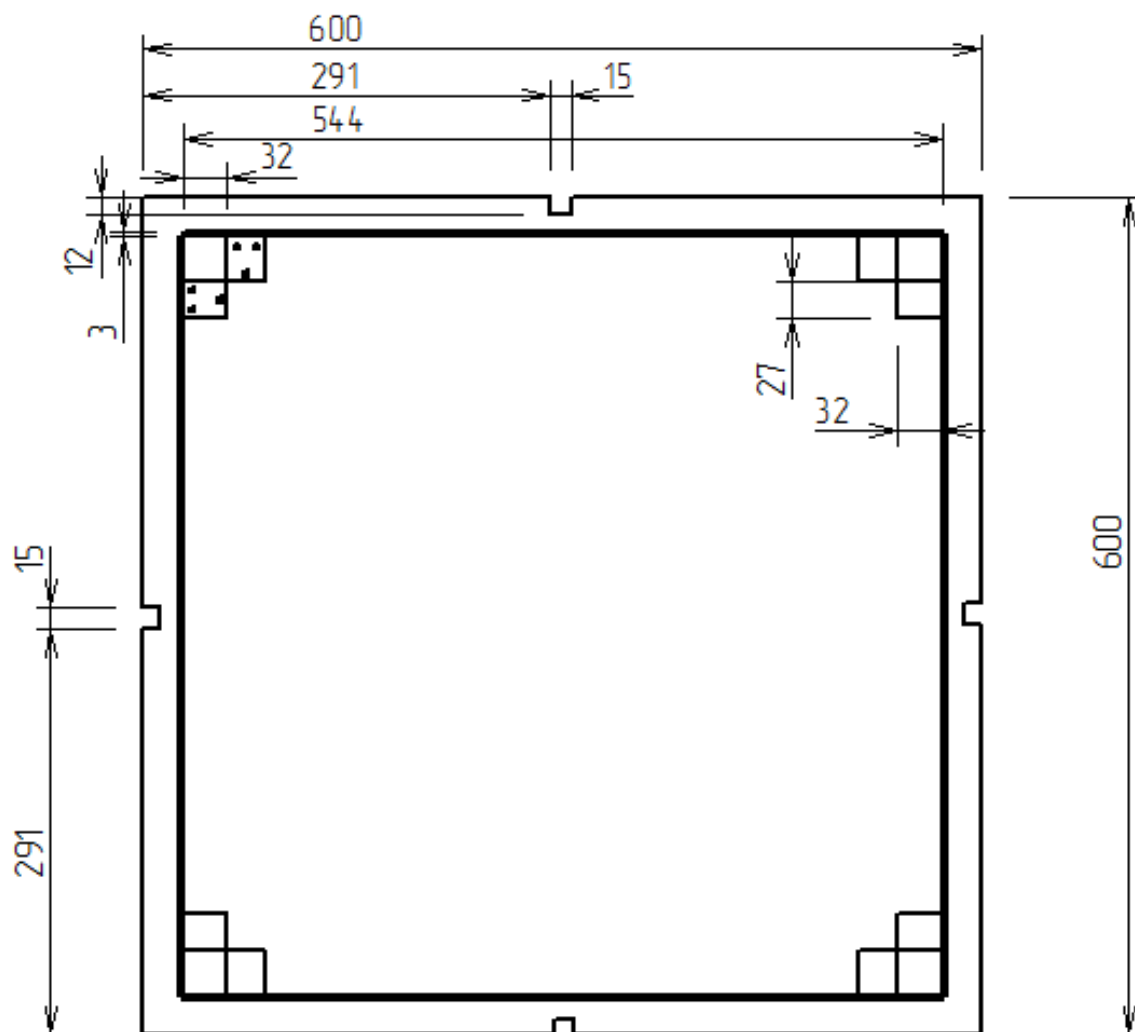
<b>Jméno adresáře</b>	<b>Popis obsahu</b>
atmega	zdrojový kód pro ATmega8
bp	bakalářská práce ve formátu pdf
elektro	schéma, deska navržená v programu EAGLE Light
matlab	simulace algoritmu, statistická data
mechanika	náčrty a fotografie heliportu
source	zdrojové kódy pro řízení kvadrokoptéry

## 8.2 Nákresy heliportu

Seznam součástí: 1 – základna , 2 – klapka, 3 – pant, 4 – servo, 5 – rameno serva, 6 – táhlo, 7 – upínka na klapce, 8 – podložka

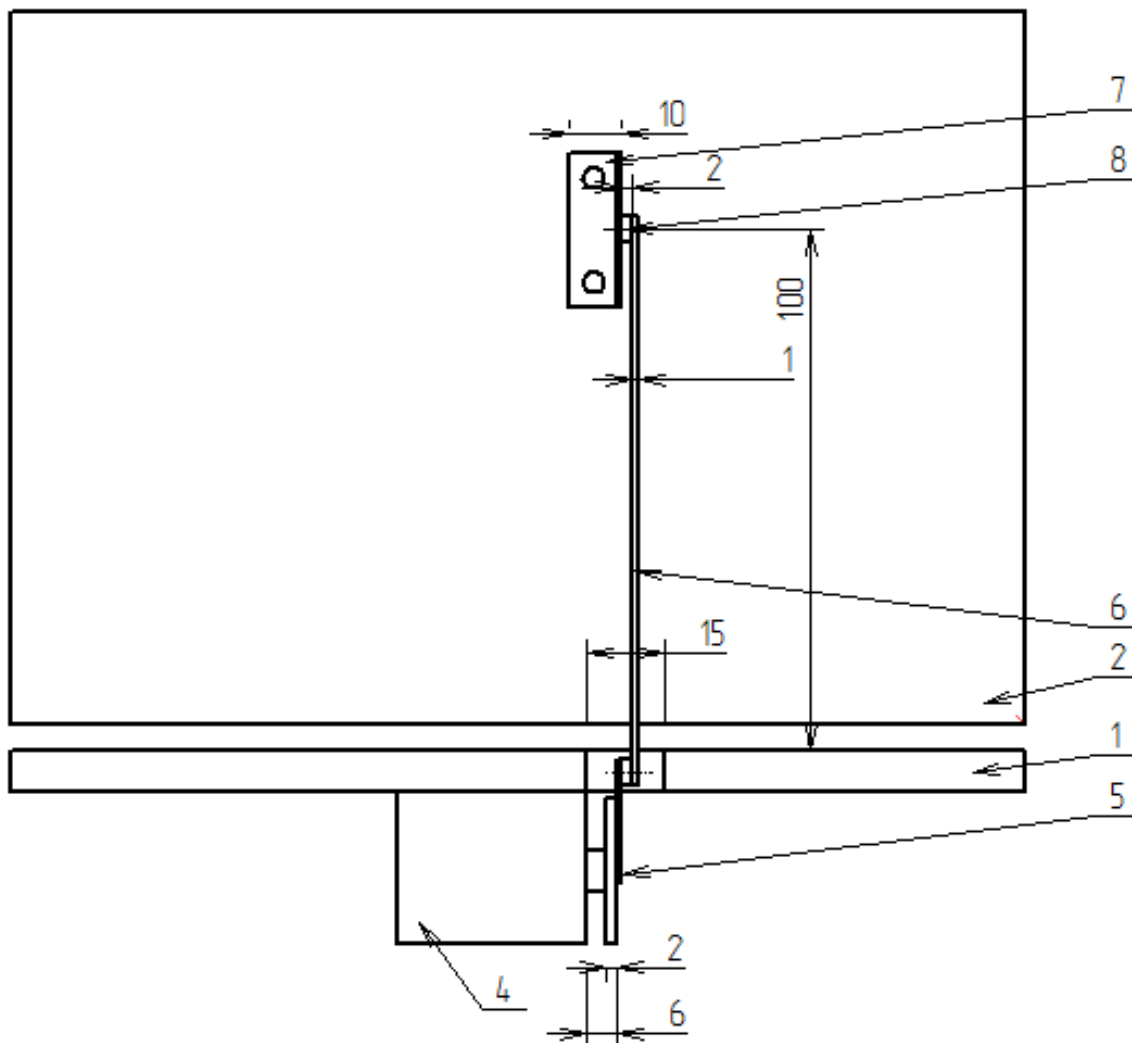


Obrázek 28: Pohled shora na otevřený heliport



Obrázek 29: Pohled shora na zavřený heliport





Obrázek 31: Detailní pohled na servo a klapku

## 8.3 Tabulka hodnot

Tabulka 5: Tabulka naměřených hodnot - funkčnost heliportu (část 1/2)

Jednotlivé polohy	Pozice patky 1		Pozice patky 2	
	Souřadnice x [mm]	Souřadnice y [mm]	Souřadnice x [mm]	Souřadnice y [mm]
1 před	0	0	100	202
1 po	0	-10	10	215
2 před	55	0	150	204
2 po	-15	-20	15	203
3 před	100	23	0	225
3 po	10	0	-5	225
4 před	-100	23	0	225
4 po	0	-15	10	210
5 před	-120	-65	0	125
5 po	-20	-10	-20	215
6 před	-130	0	-140	225
6 po	-3	0	-3	225
7 před	0	-150	0	75
7 po	-15	-5	-10	220
8 před	-165	0	-165	225
8 po	-1	0	-2	225
9 před	0	160	0	385
9 po	-8	0	-10	225
10 před	160	0	160	225
10 po	5	10	15	235
11 před	110	-130	110	95
11 po	-1	-20	0	205
12 před	120	-105	38	105
12 po	-10	-12	-15	213
13 před	-180	-180	-180	45
13 po	-10	-20	10	205
14 před	-55	-55	-80	169
14 po	-10	-20	10	205
15 před	-55	-55	-60	170
15 po	-5	-20	5	205
16 před	160	150	160	375
16 po	-5	-5	5	220

Tabulka 6: Tabulka naměřených hodnot - funkčnost heliportu (část 2/2)

Jednotlivé polohy	Pozice patky 1		Pozice patky 2	
	Souřadnice x [mm]	Souřadnice y [mm]	Souřadnice x [mm]	Souřadnice y [mm]
17 před	35	115	120	324
17 po	-3	-10	5	215
18 před	-120	145	-60	362
18 po	-3	0	0	225
19 před	-170	175	-170	400
19 po	0	0	0	225
20 před	-170	-175	-170	50
20 po	0	5	0	230
21 před	170	-170	170	55
21 po	8	-20	10	205
22 před	175	175	175	400
22 po	10	10	-10	235
23 před	110	120	175	335
23 po	-20	5	-20	230
24 před	-20	30	100	221
24 po	10	10	-15	234
25 před	-70	165	-150	375
25 po	-5	-15	-10	210
26 před	0	50	-100	252
26 po	-10	-8	0	217
27 před	-180	-115	-120	102
27 po	0	-10	5	215
28 před	75	-185	75	40
28 po	-5	0	-3	225
29 před	30	-55	-80	141
29 po	-15	-20	5	205
30 před	70	0	150	210
30 po	-10	-20	10	205
31 před	-160	45	-40	235
31 po	-15	-20	15	203
32 před	-140	-90	-175	133
32 po	-15	-20	15	203