

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Testovací plošina inerciální navigace

Jiří Vejvoda

Diplomová práce

2013

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří Vejvoda**  
Osobní číslo: **I11430**  
Studijní program: **N2646 Informační technologie**  
Studijní obor: **Řízení procesů**  
Název tématu: **Testovací plošina inerciální navigace**  
Zadávací katedra: **Katedra řízení procesů**

### Zásady pro vypracování:

Cílem práce bude návrh a konstrukce testovací plošiny inerciální navigace. Zařízení bude sloužit k možnosti testování modulů inerciální navigace. Bude umožňovat definovaným způsobem a definovanou rychlostí pohybovat s modulem elektronické jednotky inerciální navigace. Tím bude možno testovat vlastnosti těchto jednotek. Pohyb testovací plošiny bude realizován zvoleným typem servomotorů. Ovládání, spolu se záznamem definovaných pohybů bude ovládáno nadřazeným systémem - osobním počítačem. Vlastní pohyby plošiny budou řízeny autonomně, řídicím mikrokontrolérem testovacího zařízení. Volba vhodného mikrokontroléru bude též součástí této diplomové práce. Výsledkem diplomové práce bude realizované zařízení společně s aplikací pro základní testování senzorů inerciální navigace.

Teoretická část:

- Rešerše tématu
- Seznámení s funkcí snímačů a akčních členů použitých v aplikaci
- Popis mikrokontroléru použitého v aplikaci

Implementační část:

- Návrh hardwarového řešení zařízení
- Návrh elektronické řídicí jednotky zařízení
- Realizace hardware, elektronické řídicí jednotky a naprogramování mikrokontroléru zařízení
- Tvorba řídicího a monitorovacího software pro PC
- Testování zařízení

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Šulc, B. - Vítěčková, M.: Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů.

Vydavatelství ČVUT Praha, 2004.

Matoušek David: Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR - 3.díl - edice uP a praxe 2.vydání, BEN - technická literatura, 2006, ISBN 80-7300-209-4.

Plíva Zdeněk: Eagle Prakticky, BEN-technická literatura, 2010, ISBN 978-80-7300-252-7.

Záhlava Vít: Návrh a konstrukce DPS, BEN-technická literatura, 2010, ISBN 978-80-7300-266-4.

[www.atmel.com](http://www.atmel.com)

[www.elcad.cz](http://www.elcad.cz)

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Libor Havlíček, Ph.D.**

Katedra řízení procesů

Datum zadání diplomové práce:

**31. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce:

**17. května 2013**



A handwritten signature in blue ink, appearing to read "S. Kuramazov".

prof. Ing. Simeon Kuramazov, Dr.

děkan

L.S.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "D. Honec".

Ing. Daniel Honec, Ph.D.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2012

## **Prohlášení autora**

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 15. 5. 2013

Jiří Vejvoda

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval Ing. Liboru Havlíčkovi Ph.D. za odborné vedení bakalářské práce, cenné připomínky a konzultace. Dále bych chtěl moc poděkovat své rodině a všem, kteří mne při studiu podpořili.

## **Anotace**

Tato práce se zabývá návrhem a realizací testovací plošiny pro inerciální navigaci. Druhá a třetí část se věnuje teoretickému rozboru a kinematickým strukturám. Třetí část popisuje návrh a realizaci konstrukce vlastního řešení. Hardwarový návrh systému je popsán ve čtvrté části. Vývoj řídicího systému, jeho nastavení a řízení je uvedeno v části páté. V práci je také provedeno praktické ověření funkce navrženého zařízení. V závěru byly zhodnoceny výsledky a zkušenosti s navrhnutým systémem.

## **Klíčová slova**

Inerciální navigace, Stewartova plošina, Hexapod, Inversní kinematika

## **Title**

Test platform of inertial navigation

## **Annotation**

This thesis describes the design and implementation of a test platform for inertial navigation. The second and third part is devoted to a theoretical analysis and kinematic structures. The third part describes the design and implementation of the actual construction solution. The hardware design of the system is described in the fourth part. Development of the control system, its setup and system control is shown in the fifth part. The thesis also presents practical verification of the function of the proposed device. In conclusion, results of the evaluation and experience with the proposed system are evaluated.

## **Keywords**

Inertial navigation, Stewart platform, Hexapod, Inverse kinematics

## Obsah

<b>Seznam zkratk</b> .....	<b>9</b>
<b>Seznam symbolů</b> .....	<b>10</b>
<b>Seznam obrázků</b> .....	<b>11</b>
<b>Seznam tabulek</b> .....	<b>13</b>
<b>1 Úvod</b> .....	<b>14</b>
<b>2 Rozbor aplikačních požadavků</b> .....	<b>15</b>
2.1 Požadavky na návrh systému.....	15
2.2 Rozbor řešení dle kinematických struktur .....	15
2.3 Sériové struktury .....	15
2.3.1 Kartézský robot .....	16
2.3.2 Cylindrický robot.....	17
2.3.3 Sférický robot .....	18
2.3.4 SCARA robot .....	18
2.3.5 Antropomorfní (angulární) robot.....	19
2.4 Paralelní struktury .....	20
2.4.1 Tricept.....	20
2.4.2 Deltabot .....	21
2.4.3 Hexapod.....	22
2.4.4 Modifikace paralelních struktur.....	22
2.5 Zhodnocení .....	23
<b>3 Rozbor kinematické paralelní struktury Hexapodu</b> .....	<b>24</b>
3.1 Konfigurace souřadnic.....	24
3.2 Eulerova transformační matice.....	25
3.3 Inverzní kinematická úloha .....	26
<b>4 Návrh zařízení</b> .....	<b>28</b>
4.1 Konstrukce testovací plošiny.....	28
4.2 Návrh HW .....	30
4.2.1 Řídící platforma Arduino .....	30
4.2.2 Servopohon.....	31
4.2.3 Napájení.....	32
4.3 Zhodnocení návrhu .....	33

<b>5</b>	<b>Návrh řízení systému.....</b>	<b>35</b>
5.1	Popis blokového schéma simulinku .....	35
5.1.1	Převod délky ramena na úhel natočení servopohonu .....	37
5.1.2	Komunikace s platformou Arduino .....	39
5.2	Řízení trajektorie plošiny.....	39
5.2.1	Manuální ovládání plošiny .....	40
5.2.2	Ovládání polohy pomocí gamapedu .....	42
5.2.3	Řízení pohybu pomocí definované trajektorie plošiny.....	43
<b>6</b>	<b>Praktické ověření funkce navrženého zařízení.....</b>	<b>48</b>
<b>7</b>	<b>Návrhy pro vylepšení systému.....</b>	<b>51</b>
<b>8</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>52</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>53</b>
	<b>Přílohy .....</b>	<b>54</b>
	<b>Příloha A.....</b>	<b>A - 1</b>
	<b>Příloha B.....</b>	<b>B - 1</b>
	<b>Příloha A.....</b>	<b>C - 1</b>



## Seznam zkratk

PC	Osobní počítač
DOF	Stupeň volnosti
LED	Dioda emitující světlo
USB	Univerzální sériová sběrnice
USART	Synchronní / asynchronní sériové rozhraní
PID	Proporcionální, integrační, derivační
DC	Stejnoseměrný proud
SW	Software, programové vybavení
HW	Hardware, technické vybavení
CPU	Procesor, centrální výpočetní jednotka
I/O	Vstup/výstup
3D	Trojrozměrný
CAD	Počítačem podporované projektování
SRAM	Statická polovodičová paměť
EEPROM	Elektricky mazatelná semipermanentní paměť
PWM	Pulzně šířková modulace
CNC	Číslicové řízení počítačem
Bd	Jednotka modulační rychlosti

## Seznam symbolů

$p$  – Počet řetězců kinematické struktury

$n$  – Počet tuhých těles v řetězci

$x$  – Translační pohyb podél osy  $x$  v kartézských souřadnicích

$y$  – Translační pohyb podél osy  $y$  v kartézských souřadnicích

$z$  – Translační pohyb podél osy  $z$  v kartézských souřadnicích

$\varphi$  – Náklon podél osy  $x$  v kartézských souřadnicích

$\psi$  – Náklon podél osy  $y$  v kartézských souřadnicích

$\theta$  – Náklon podél osy  $z$  v kartézských souřadnicích

$L$  – Vektor délky ramena hexapodu

$P$  – Vektor vzájemné polohy mezi pevnou podstavou a pohyblivou plošinou hexapodu

$P_{pi}$  – Souřadnice umístění kulového kloubu pohyblivé plošiny

$B_{bi}$  – Souřadnice umístění kulového kloubu pevné podstavy

$R_x$  – Rotace podél osy  $x$

$R_y$  – Rotace podél osy  $y$

$R_z$  – Rotace podél osy  $z$

$R$  – Rotační matice

$BSi$  – Součet vektoru transformace ze souřadného systému plošiny do podstavy

$Pb$  – Vektor vzájemné polohy mezi souřadnicovým systémem podstavy a plošiny

## Seznam obrázků

Obrázek 1 – Paralelní (a) a sériová (b) kinematická struktura.	16
Obrázek 2 – Mechanismus (a) a pracovní prostor (b) kartézského robotu	17
Obrázek 3 – Mechanismus (a) a pracovní prostor (b) cylindrického robotu	17
Obrázek 4 – Mechanismus (a) a pracovní prostor (b) sférického robotu	18
Obrázek 5 – Mechanismus (a) a pracovní prostor (b) SCARA robotu	19
Obrázek 6 – Mechanismus (a) a pracovní prostor (b) antropomorfního robotu	20
Obrázek 7 – Paralelní manipulátor konstrukce Tricept	21
Obrázek 8 – Paralelní manipulátor konstrukce Deltabot	22
Obrázek 9 – Paralelní manipulátor konstrukce Hexapod	22
Obrázek 10 – Modifikace konstrukce Deltabotu, <i>tzv RUS Stewart platform</i>	23
Obrázek 11 – Vektorová konfigurace souřadnic	26
Obrázek 12 – Reprezentace rotace pomocí Eulerových úhlů	27
Obrázek 13 – Vektorové zobrazení pohonu	28
Obrázek 14 – Blokové schéma systému	29
Obrázek 15 – 3D model navrženého zařízení	30
Obrázek 16 – Model testované konstrukce hexapodu	31
Obrázek 17 – Vývojový kit Arduino MEGA 2560	31
Obrázek 18 – Servopohon Hitec HS-5485HB	33
Obrázek 19 – Schéma napájecího obvodu	34
Obrázek 20 – Osazený napájecí modul	35
Obrázek 21 – Kompletně sestavená testovací plošina	35
Obrázek 22 – Blokové schéma řízení systému v simulinku	36
Obrázek 23 – Subsystém bloku pro výpočet rotační matice $\mathbf{R}$ v simulinku	37
Obrázek 24 – Subsystém <i>Leg Length</i> pro určení délky ramena	38

Obrázek 25 – Subsystem <i>Leg Length</i> pro určení délky ramena	38
Obrázek 26 – Náčrt převodu délky ramena na úhel natočení servopohonu	39
Obrázek 27 – Blokové schéma převodu délky ramena na úhel natočení servopohonu	40
Obrázek 28 – Zobrazení souřadného systému testovací plošiny	41
Obrázek 29 – Blokové schéma subsystému manuálního ovládání v simulinku	42
Obrázek 30 – Uživatelské prostředí manuálního ovládání plošiny	42
Obrázek 31 – Popis ovládání plošiny pomocí gamepadu	43
Obrázek 32 – Blokové schéma ovládání plošiny pomocí gamepadu	44
Obrázek 33 – Blokové schéma v simulinku pro logaritmickou spirálu	45
Obrázek 34 – Definovaná trajektorie logaritmické spirály (zobrazení xy)	45
Obrázek 35 – Blokové schéma v simulinku pro kruhový pohyb	46
Obrázek 36 - Definovaná trajektorie kruhového pohybu (zobrazení xy)	46
Obrázek 37 – Blokové schéma v simulinku pro pohyb ve tvaru spirály	47
Obrázek 38 – Definovaná trajektorie spirály (zobrazení xyz)	47
Obrázek 39 – Implementace Kaneho funkce v simulinku	48
Obrázek 40 – Příklad trajektorie generované pomocí Kaneho funkce	49
Obrázek 41 – Kompletní systém testovací plošiny pro inerciální navigaci	50
Obrázek 42 – Příklad nastavení rotace okolo osy $y$ , $\psi = +/-15^\circ$	50
Obrázek 43 – Příklad nastavení translace podél osy $x = +/-40$ mm	51
Obrázek 44 – Příklad nastavení translace podél osy $z = +/-20$ mm	51
Obrázek 45 – Výchozí pozice (a), nastavení rotace $\theta = 30^\circ$ (b)	51
Obrázek 46 – Blokové schéma vylepšení systému (stabilizace)	52

## **Seznam tabulek**

Tabulka 1 – Parametry vývojového kitu Arduino	32
Tabulka 2 – Parametry serva Hitec HS-5485HB	33
Tabulka 3 – Rozsah pohybu plošiny	41

# 1 Úvod

Ke zpracování této práce mne motivovala možnost navrhnout a realizovat vlastní způsob řešení kinematické struktury manipulátoru spolu s jejím řízením. Práce mne také zaujala svojí komplexností a náročností, protože jsem musel aplikovat většinu znalostí, které jsem doposud získal jak ve škole, tak mimo ni a realizovat je v praxi do fyzického zařízení. Komplexnost této práce spočívá v prolínání veškerých technických oborů od znalostí z mechaniky, analogové elektroniky přes digitální elektroniku, programování a řízení systémů. Tato práce pro mne znamená obrovské rozšíření mých znalostí, zkoumání pro mne nových technik a postupů a v neposlední řadě pomoc dalším studentům, kteří moji práci použijí jako výchozí bod pro svůj vlastní projekt.

Cílem práce bylo prostudovat kinematické struktury manipulátorů a ze získaných znalostí navrhnout a zhotovit zařízení, které bude sloužit jako testovací plošina pro inerciální navigaci. Toto zařízení by mělo být řízeno nadřazeným PC. Pohyblivá plošina by měla být řízena definovanou trajektorií nebo manuálně. Pohyb plošiny by měl být ukládán pro případné další zpracování.

Vlastní text práce je rozdělen do několika základních kapitol. První část se věnuje teoretickému úvodu. Druhá kapitola vychází z rozboru dostupných kinematických struktur manipulátorů a navrhuje nejvhodnější systém, který kompenzuje některé zjištěné nedostatky stávajících struktur. Následuje matematická analýza vybrané struktury především z pohledu řešení inverzní kinematické úlohy.

Čtvrtá část se zabývá hardwarovou realizací zařízení. V této části je také podrobněji vysvětlen postup návrhu konstrukce testovací plošiny, implementace řídicí platformy celého zařízení, výběr použitých servopohonů a jejich napájení. Návrhu řídicího systému a jeho implementace do zařízení se věnuje kapitola pátá. V této kapitole je také popsáno generování trajektorie pohybu a manuální ovládání plošiny.

V závěru této práce je funkce navrženého systému prakticky ověřena. Dále jsou shrnuty veškeré splněné a nesplněné cíle, včetně vyhodnocení a případného doporučení pro vylepšení systému.

## 2 Rozbor aplikačních požadavků

### 2.1 Požadavky na návrh systému

Požadavkem této práce bylo navrhnout a zkonstruovat testovací plošinu inerciální navigace. Zařízení by mělo sloužit pro testování modulů inerciální navigace a to tak, že definovaným způsobem a rychlostí pohybuje manipulátorem s modulem elektronické jednotky inerciální navigace. Takto bude možno testovat vlastnosti jednotlivých modulů. Kromě definovaného pohybu manipulátoru by také mělo existovat plně manuální ovládání z PC. Proto by další částí práce měl být jednoduchý SW na PC pro vizualizaci polohy zařízení. Pro tyto účely by mělo být navrženo samostatné zařízení s CPU, vhodnými servopohony a dalšími periferiemi, nutnými pro autonomní řízení z PC.

Funkce testovací plošiny by tedy měla být schopnost, buď automatickým, nebo plně manuálním řízením pohybovat koncovým manipulátorem za účelem ověření správné funkce testovaného modulu inerciální navigace.

Výsledkem této práce by měla být realizace zařízení společně s aplikací pro základní testování senzorů inerciální navigace.

### 2.2 Rozbor řešení dle kinematických struktur

Konstrukce průmyslového robotu se skládá z několika pevných těles, které jsou propojeny klouby. Toto spojení má za následek, vznik kinematických vazeb a také vznik kinematického řetězce. Z hlediska uspořádání ramen a kloubů, se dají průmyslové roboty rozdělit do následujících skupin [1].

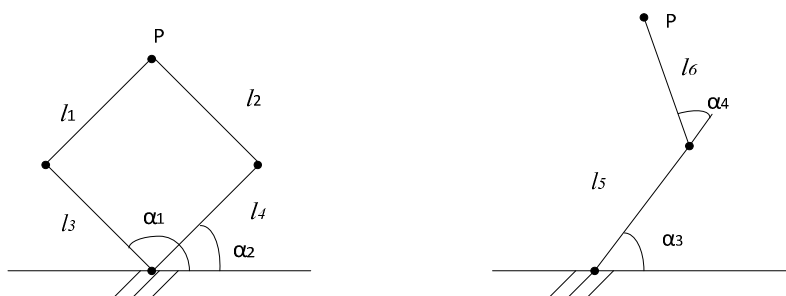
- roboty se sériovou kinematickou strukturou
- roboty s paralelní kinematickou strukturou
- roboty s kombinovanou kinematickou strukturou

S jistotou nelze říci, která struktura má lepší vlastnosti oproti ostatním. Proto dříve než se přistoupí k srovnávání a posuzování vlastností těchto struktur, je potřeba definovat každou strukturu jednotlivě.

### 2.3 Sériové struktury

Sériová struktura manipulátoru je nejběžnější typ robotu. Má otevřený kinematický řetězec a ramena řazena za sebou. Začíná na podstavě a končí koncovým efektoem (obrázek 1b). Jednotlivá ramena a klouby jsou často konfigurovány tak, aby vytvářely samostatné pohybové a orientační struktury. První tři klouby jsou obvykle použity pro polohu orientačního bodu v prostoru a další tři tvoří koncovou orientaci efektoru. Velikost prostoru, kam je koncový efektor (bod P na obrázku 1b) schopen dosáhnout se nazývá dosažitelná pracovní plocha robota. Množina dosažitelných bodů s libovolnou orientací efektoru se nazývá prostor obratnosti.

Výhoda této struktury je, že dokáže dosáhnout vysoké rychlosti a zrychlení, protože koncový efektor se pohybuje rychleji než jednotlivá ramena. Tento typ manipulátoru má proti paralelní struktuře větší rozsah pracovního prostoru, ale zároveň je více energeticky náročný, protože každé poháněné rameno musí nést následující ramena s pohony (obrázek 1b). Tato konstrukce má za následek nízkou tuhost (statické a dynamické kmitání). Proto se na koncovém efektoru robota projeví sumace chyb superponovaných na jednotlivých kinematických dvojicích [1].



Obrázek 1 – Paralelní (a) a sériová (b) kinematická struktura

Příklady základních sériových kinematických struktur jsou:

### 2.3.1 Kartézský robot

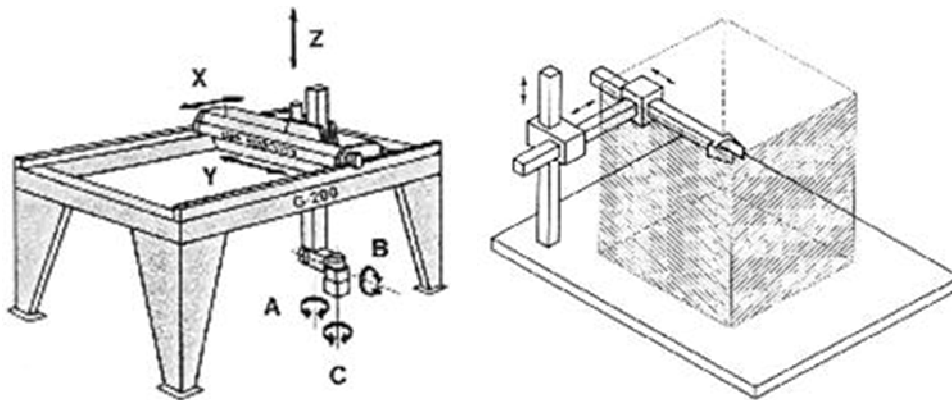
Jak název napovídá, kartézský robot vychází ze tří posuvných os ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ), které jsou navzájem kolmé. Portálové roboty mají horizontální posuv zavěšen na obou stranách. Obvykle dosahují větších rozměrů. Klasická i portálová konstrukce kartézského manipulátoru má obdélníkový pracovní prostor (obrázek 2b).

Konstrukce vyniká svou vysokou tuhostí a přesností, ale postrádá flexibilitu, pokud je předmět uchopován pouze z jedné strany. Díky své konstrukci je manipulátor velice jednoduchý na ovládání a vizualizaci. Posuvné klouby nebývají zpravidla zakrytovány, a proto není vhodný pro práci ve vlhkém nebo prašném prostředí.

Jeho poměrně jednoduchá konstrukce a ovládání předurčuje použití pro výrobní účely. Tím, že jednotlivé části lze snadno vyměnit, je redukována doba výpadku a náklady na údržbu jsou také sníženy minimum. Kromě toho, je možné celý systém demontovat na jednotlivé složky pro použití jednoosé aplikace. Základní rysy jsou:

- nedochází ke změně orientace objektu
- pracovním prostorem je hranol
- nepříznivé vlastnosti lineárních posuvů
- velká prostorová zastavěnost
- méně časté použití
- používají se jako podavače, obsluha výrobních strojů
- proti ostatním systémům je levnější



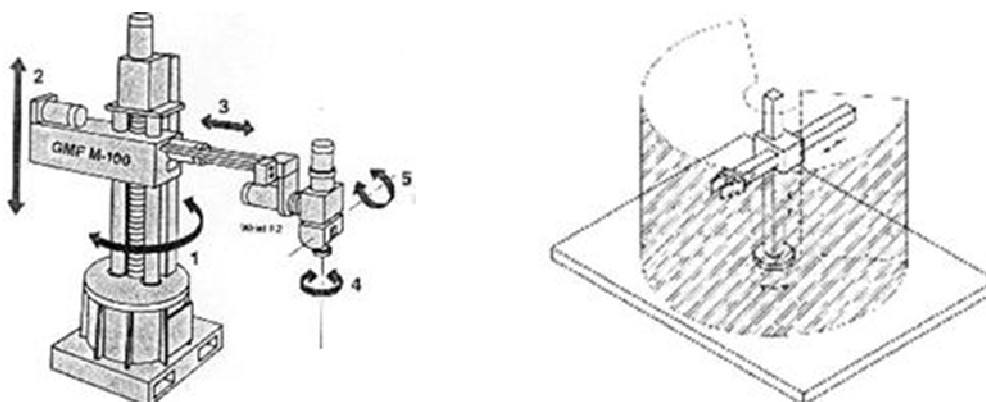


Obrázek 2 – Mechanismus (a) a pracovní prostor (b) kartézského robotu [2]

### 2.3.2 Cylindrický robot

Manipulátor obsahuje tři osy pohybu, z nichž dva jsou lineární a jeden rotační (obrázek 3a). Tudiž roboti tohoto typu se mohou pohybovat podél osy  $X$  a  $Y$  a otáčet ve směru osy  $Z$ . Pracovní prostor tvoří neuzavřený válcový tvar (obrázek 3b). Výhody jeho mechanické konstrukce se využívají především v aplikacích, kde se dobře využije válcový pracovní prostor s kombinací horizontálního pohybu manipulátoru. Například specifické montážní a manipulační úkoly nebo bodové sváření. V praxi je však tento druh velice vzácný. Charakteristické vlastnosti:

- dochází ke změně orientace objektu
- pracovním prostorem je válcový prstenec
- je potřeba velký operační prostor
- přesnost polohy efektoru se zmenšuje úměrně s vysunutím ramene
- obsluha vstřikovacích strojů nebo strojů na tlakové lití
- modifikací je montážní robot SCARA

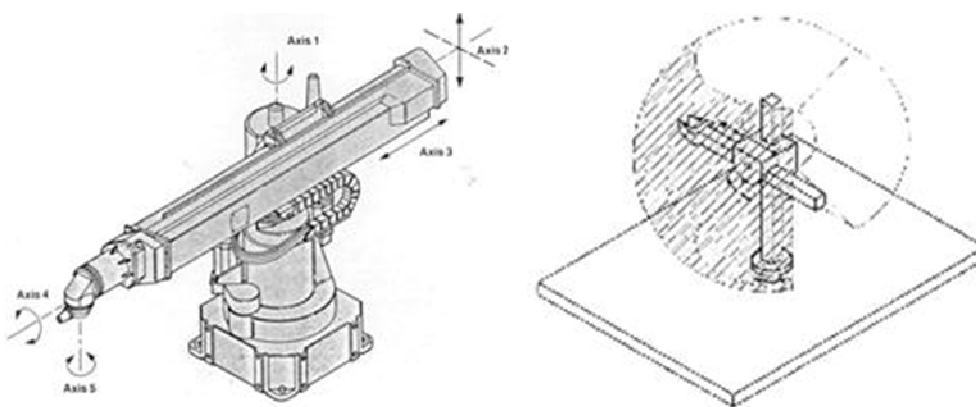


Obrázek 3 - Mechanismus (a) a pracovní prostor (b) cylindrického robotu [2]

### 2.3.3 Sférický robot

Struktura sférického robotu (obrázek 4a) obsahuje dva rotační a jeden posuvný kloub. Souřadnice pro koncový efektor jsou zadávány ve sférickém souřadném systému. Základní vlastnosti:

- dochází ke změně orientace objektu
- pracovním prostorem je kulový vrchlík (obrázek 4b)
- polohování ve sférických souřadnicích
- přesnost polohy efektoru se zmenšuje úměrně s vysunutím ramene směrem od středu
- na rozdíl od cylindrického robota je schopen dosáhnout i na zem a nad podstavu
- používá se především pro svařovací linky

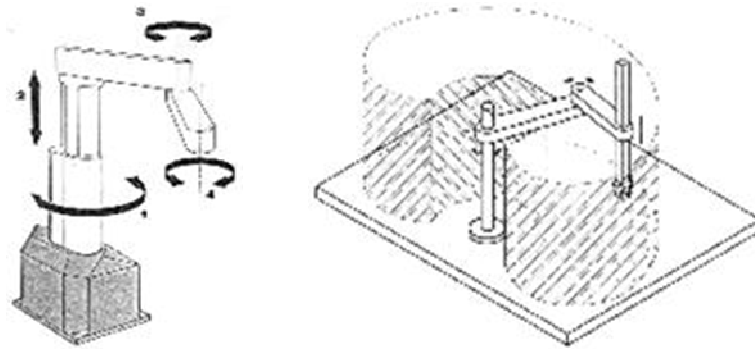


Obrázek 4 - Mechanismus (a) a pracovní prostor (b) sférického robotu [2]

### 2.3.4 SCARA robot

Konstrukci SCARA robotu tvoří jeden posuvný a dva rotační klouby, takže všechny tři osy jsou rovnoběžné (obrázek 5a). Základní rysy jsou:

- zvýšená vertikální tuhost
- pracovní prostor tvaru válcového prstence (obrázek 5b)
- vhodné pro vertikální montážní operace na horizontální rovině
- přesnost se snižuje se vzdáleností od vertikální osy
- velká světlá výška

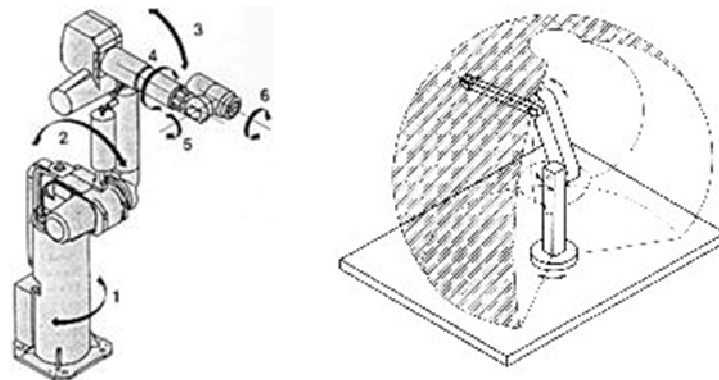


Obrázek 5 - Mechanismus (a) a pracovní prostor (b) SCARA robotu [2]

### 2.3.5 Antropomorfní (angulární) robot

Struktura antropomorfního manipulátoru se podobá tvaru lidské paže. Skládá se nejméně ze tří otočných kloubů, které tvoří sférický souřadný systém (obrázek 6a). Manipulátor má šest stupňů volnosti, čímž dosahuje vysoké flexibility. Dále je schopen dosáhnout i přes překážky. Toho lze dosáhnout v jakékoliv pozici a orientaci koncového efektoru v pracovním prostoru robota. Typické antropomorfní manipulátory mají 5 nebo 6 volně programovatelných paží nebo os. Jak již bylo zmíněno, díky flexibilitě robota vyhovuje pro širokou škálu průmyslových aplikací. Základní vlastnosti:

- má 3 rotační klouby, 1. osa je ortogonální k zbývajícím 2 osám, které jsou rovnoběžné
- pracovní prostor je anuloid
- podobnost s lidskou paží, nejšikovnější konfigurace
- korespondence s kartézskými souřadnicemi je komplikovaná
- v porovnání s ostatními strukturami obtížnější ovládání
- přesnost se liší dle pozice v prostoru
- velký rozsah pracovního prostoru vzhledem k velikosti (hmotnosti) manipulátoru
- minimální zastavěná plocha
- dobré dynamické vlastnosti (vysoké rychlosti manipulačních pohybů)
- nejčastější konfigurace, zejména pro manipulační účely



Obrázek 6 - Mechanismus (a) a pracovní prostor (b) antropomorfního robotu [2]

## 2.4 Paralelní struktury

Podle obecné definice paralelní struktura obsahuje mechanismus s uzavřeným kinematickým řetězcem (obrázek 1). Koncový efektor je s podstavou spojen několika nezávislými kinematickými řetězci. Paralelní robot se skládá z efektoru s  $n$  stupni volnosti a pevné základny, které jsou navzájem propojeny minimálně dvěma kinematickými řetězci.

Paralelní roboty, pro které platí, že počet řetězců se rovná počtu stupňů volnosti koncového efektoru, se nazývají úplné paralelní manipulátory [3].

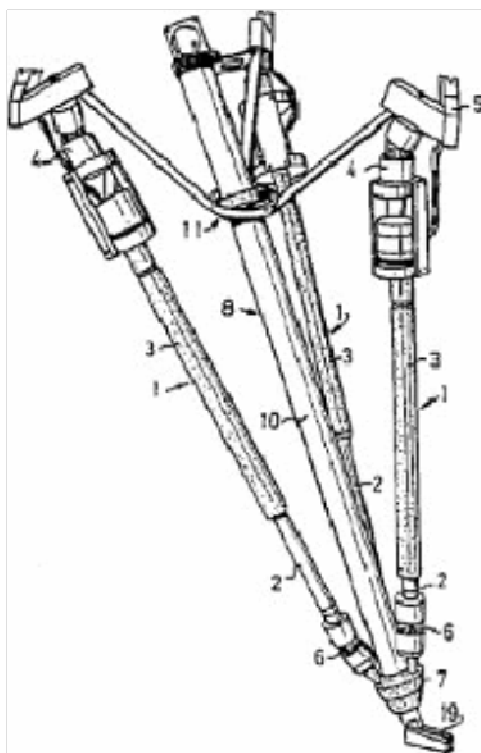
$$p(n - 6) = -6 \quad (2.1)$$

kde  $p$  – počet řetězců,  
 $n$  – počet tuhých těles v řetězci.

Příkladem paralelních robotů jsou například Tricept, Deltabot, nebo Hexapod. Tyto kinematické struktury jsou podrobněji rozebrány v následujících kapitolách.

### 2.4.1 Tricept

Tricept je typickým zástupcem manipulátoru s třemi stupni volnosti. Koncepce je založena na hybridní kinematice. Dá se zařadit do studií s netradiční (dělenou) stavbou podstavy. Jako bázi lze označit nejen středový prvek uchycení středního pasivního ramene (obrázek 7 – bod 11), ale i následná uchycení ramen vedlejších souběžných ramen (obrázek 7 – bod 5). Těmito lineárními rameny (1), které se nachází v pootočení vůči sobě o  $120^\circ$  je polohován koncový efektor (obrázek 7 – bod 19). Tato ramena musí být zavěšena na univerzálních kloubech a zároveň pohybují středovým pasivním ramenem (obrázek 7 - bod 8), které může často nést pohon pro koncový efektor. To umožňuje této koncepci především schopnost pro manipulaci s velmi těžkými břemeny a je především vhodná pro aplikaci v obrábění [3].



Obrázek 7 – Paralelní manipulátor konstrukce Tricept [3]

#### 2.4.2 Deltabot

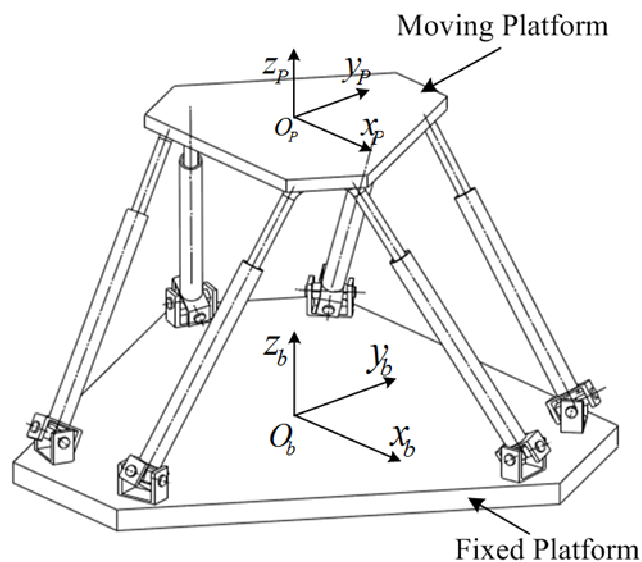
Tři motory, které jsou vůči sobě vzájemně pootočené o  $120^\circ$  a jsou připevněné na bázi, pohybují ramenem s otáčivým pohybem s horizontální osou otáčení. Na konci tohoto ramene jsou pomocí dvou kulových kloubů souběžně připojena táhla, která uchycují pohybující se platformu. Uspořádání táhel vytvoří pohybující se paralelogram. Vlivem třech těchto paralelogramů, pohybující se platforma získává možnost pohybu ve třech směrech s vyloučením současných rotací (obrázek 8). Struktura bývá často doplněna o čtvrtý stupeň volnosti středovou rotací koncového efektoru. Čtvrtá osa je nejčastěji provedena pomocí samostatného pohonu umístěného na podstavě. Přenos pohybu od tohoto pohonu bývá proveden přes Kardanovy klouby s teleskopickou hřídelí.



Obrázek 8 - Paralelní manipulátor konstrukce Deltabot [3]

### 2.4.3 Hexapod

Hexapod nebo také Stewartova plošina je druh paralelního robota. Šest lineárních pohonů, které jsou vzájemně vůči sobě pootočené o  $120^\circ$  spojuje podstava s koncovým efektem. Tyto pohony jsou připevněny ve dvojicích pomocí kulových kloubů k podstavě a efektoru (obrázek 9). Koncový efektor disponuje šesti stupni volnosti. Může tedy měnit polohu ve třech osách ( $x, y, z$ ) a ve třech osách úhel natočení ( $\varphi, \psi, \theta$ ).

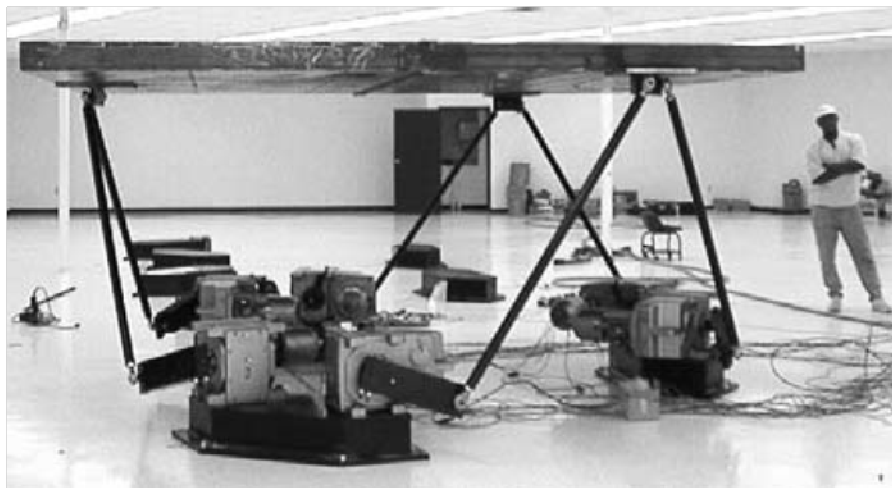


Obrázek 9 - Paralelní manipulátor konstrukce Hexapod [3].

### 2.4.4 Modifikace paralelních struktur

Modifikací paralelních struktur existuje nepřeborné množství. Proto výběr následujícího systému spočíval v jednoduchosti konstrukce manipulátoru. Na obrázku 10

je tzv. *RUS Stewart platform*. Kde Pierrot a Uchiyama upravili princip paralelní konstrukce Deltabotu a tím rozšířili tři stupně volnosti na šest. Modifikaci lze také interpretovat pouhou výměnou lineárních pohonů za klasické servopohony u konstrukce Hexapodu. Funkce pak spočívá v tom, že změnu délky ramene pak tvoří změna úhlu natočení páky servopohonu.



Obrázek10 – Modifikace konstrukce Deltabotu, tzv *RUS Stewart platform* [3]

## 2.5 Zhodnocení

Ve výše uvedených kapitolách byl proveden rozbor hlavních konstrukčních systémů sériových a paralelních manipulátorů. Každý systém má své výhody a nevýhody, ale z hlediska zadání práce je nejvhodnější z důvodů realizovatelnosti a obtížnosti konstrukce tzv. *RUS Stewart platform*, dále jen Hexapod.

Konstrukce Stewartovy plošiny má tyto výhody:

- 6 stupňů volnosti
- vysoká strukturní tuhost
- vysoká poziční tuhost
- všechny pohony jsou shodné
- vyšší rychlost pohybů
- jednoduché části rámu konstrukce
- díly rámu nevyžadují zvláštní výrobní nebo montážní přesnost
- není potřeba pohyblivé vedení přívodních kabelů

Nevýhodou konstrukce Stewartovy plošiny je nutnost řešení těchto okruhů problémů:

- 6 stupňů volnosti vyžaduje pro řízení pohonů nutný řídicí systém pro 6 pohybových os (v případě inverzní kinematiky)
- vysoké nároky na řízení, protože v každém okamžiku pohybu v prostoru je nutné řešit transformaci souřadnic, která vypočítává délku každé nohy pro daný bod v kartézských souřadnicích (6 stupňů volnosti odpovídá transformaci pro šest nohou)
- nepříznivý poměr velikosti pracovního prostoru k celkovému objemu manipulátoru

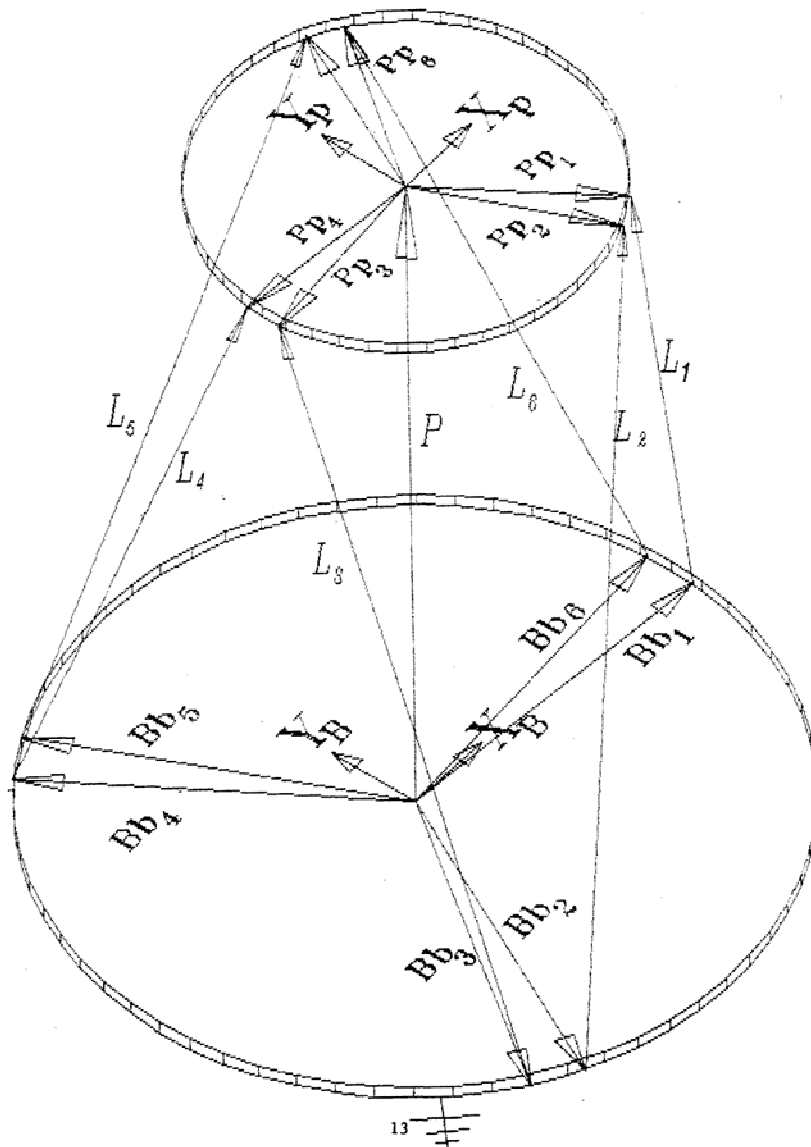
### 3 Rozbor kinematické paralelní struktury Hexapodu

Při návrhu paralelní kinematické struktury Hexapodu bylo potřeba vyřešit následující problémy. Pokud je známa požadovaná pozice koncového manipulátoru, je potřeba určit odpovídající délky každého ze šesti ramen pro nastavení pohonů a tím i koncového efektoru. Tento proces je obecně znám jako úloha inverzní kinematiky. V druhém případě je známa délka ramen (např. hodnoty z enkodéru pohonu) a je potřeba určit pozici koncového efektoru (např. pro korekce o aktuální pozici). Tento proces je znám jako úloha dopředné kinematiky. Vzhledem k náročnosti řešení výše uvedených úloh a zadání této práce byla vybrána úloha inverzní kinematiky. Řešení je popsáno v kapitole 3.2

#### 3.1 Konfigurace souřadnic

Aby bylo možné vyřešit inverzní kinematickou úlohu paralelní struktury Hexapodu, je nejdříve nutné definovat konfiguraci systému. Na obrázku 11 je struktura Hexapodu zobrazena v souřadnicovém systému a vektorové konfiguraci [4]. I když je tento výkres poněkud zjednodušený pohled na paralelní strukturu hexapodu, přesto dostačuje pro matematické vyjádření. Dva kotouče představují pohyblivou plošinu a podstavu hexapodu. Plošina a podstava jsou spojeny pomocí vektorů servopohonů ( $L_{1-6}$ ) a vektoru  $P$ . Pohyblivá plošina má šest stupňů volnosti (3 translační -  $x, y, z$  a 3 rotační pohyby -  $\theta, \psi, \varphi$ ), zatímco podstava je pevná. Vektory s indexy  $p$  a  $b$  ( $P_{p1-6}$  a  $P_{b1-6}$ ) označují souřadnice bodů, kde jsou ramena pohyblivě spojena s plošinou a s pevnou podstavou. Plošina a podstava je spojena pohonem pomocí kulových kloubů. Plošinu popisují vektory  $P_{p1-6}$  a podstavu vektory  $P_{b1-6}$ . Vektory  $L_{1-6}$  představují pohony v trojrozměrném prostoru. Každý vektor plošiny ( $P_{pi}$ ), vektor podstavy ( $P_{bi}$ ) a vektor pohonu ( $L_i$ ) jsou přidruženy pomocí indexu  $i$  (kde  $i$  je 1-6). Vektor  $P$  spojuje dva souřadné systémy a v podstatě popisuje jejich vzájemnou polohu [4].

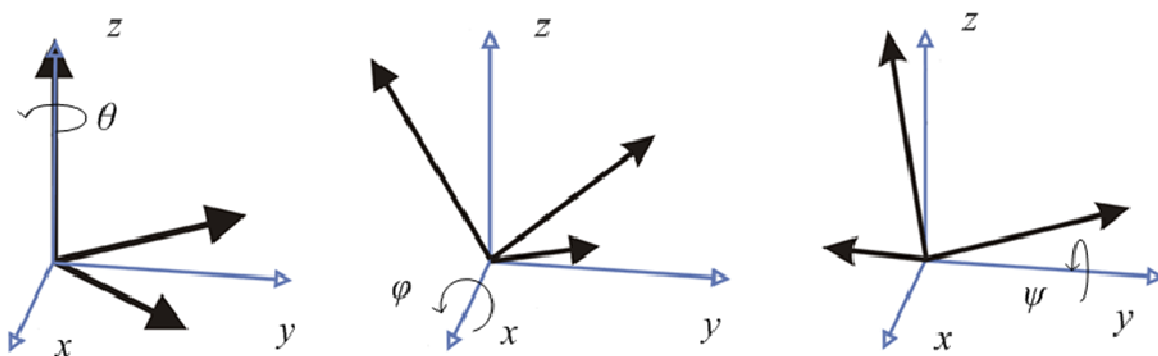




Obrázek 11 – Vektorová konfigurace souřadnic [4]

### 3.2 Eulerova transformační matice

Orientace pohyblivé plošiny je definována úhly  $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $\theta$ . Kde úhel  $\varphi$  je rotace kolem osy  $x$ , úhel  $\psi$  je rotace kolem osy  $y$  a úhel  $\theta$  je rotace kolem osy  $z$  (obrázek 12). Eulerovy úhly (nebo také Eulerovy ZYX úhly) jsou dány následujícími rovnicemi.



Obrázek 12 – Reprezentace rotace pomocí Eulerových úhlů

$$\mathbf{R}_x(\varphi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{R}_y(\psi) = \begin{pmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{R}_z(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

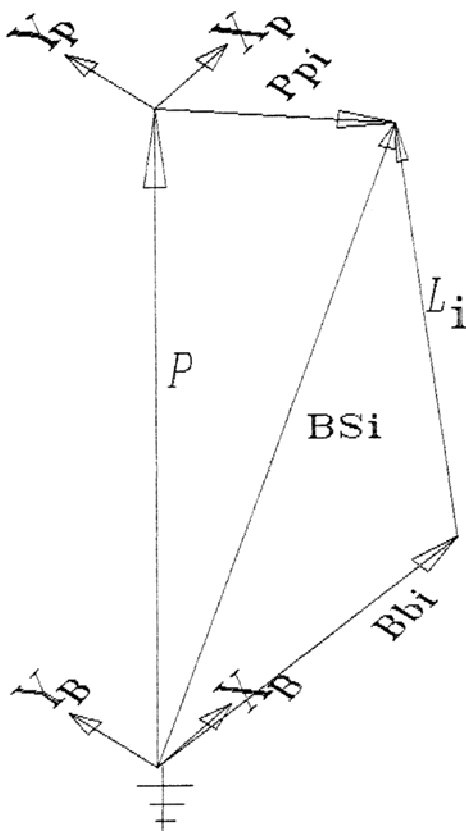
Součinem výše uvedených jednotlivých Eulerových úhlů vznikla matice rotace (rovnice (3.4)). Matice rotace v prostoru obsahuje devět položek, ale ve skutečnosti závisí pouze na třech parametrech (např. v rovině závisí pouze na jednom parametru). Tato transformační matice je použita pro transformaci vektorů ze souřadnic pohyblivé plošiny na souřadnice pevné podstavy.

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_z(\theta) \cdot \mathbf{R}_y(\psi) \cdot \mathbf{R}_x(\varphi) = \mathbf{R}_{zx}(\theta, \psi, \varphi) = \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \psi & -\sin \theta \cos \varphi + \sin \psi \cos \theta \sin \varphi & \sin \theta \sin \varphi + \sin \psi \cos \theta \cos \varphi \\ \cos \psi \sin \theta & \cos \theta \cos \varphi + \sin \theta \sin \psi \sin \varphi & -\cos \theta \sin \varphi + \sin \theta \sin \psi \cos \varphi \\ -\sin \psi & \cos \psi \sin \varphi & \cos \psi \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

### 3.3 Inverzní kinematická úloha

Na obrázku 13 je zobrazena vektorová reprezentace pohonu paralelní kinematické struktury hexapodu. Tento náčrt je v podstatě zjednodušená verze obrázku 10, kde je zobrazen pouze jeden pohon s kulovými klouby. Indexem  $i$  jsou rozlišeny jednotlivá ramena ( $i = 1 - 6$ ). Vektorem  $\mathbf{P}_b$  je označena vzájemná poloha mezi souřadnicovým systémem podstavy a plošiny. Dále je na obrázku 13 zaveden také vektor  $\mathbf{BS}_i$ ,

(rovnice (3.5) a (3.6)), který vede ze středu souřadného systému pevné podstavy do kulového kloubu pohyblivé plošiny [4].



Obrázek 13 – Vektorové zobrazení pohonu [4]

Vektor  $BS_i$  je dán jako součet vektoru transformace ze souřadného systému plošiny do podstavy ( $R \cdot Pp_i$ ) a vzájemné polohy plošiny vůči podstavě ( $P_b$ ).

$$BS_i = P_b + (R \cdot Pp_i) \quad (3.5)$$

Vektor  $BS_i$  lze také zapsat také jako:

$$BS_i = Bb_i + L_i \quad (3.6)$$

$$L_i = BS_i - Bb_i \quad (3.7)$$

Po dosazení rovnice (3.5) do rovnice (3.7) je získána délka ramen, kde indexem  $i$  jsou označeny jednotlivé pohony ( $i = 1 - 6$ ).

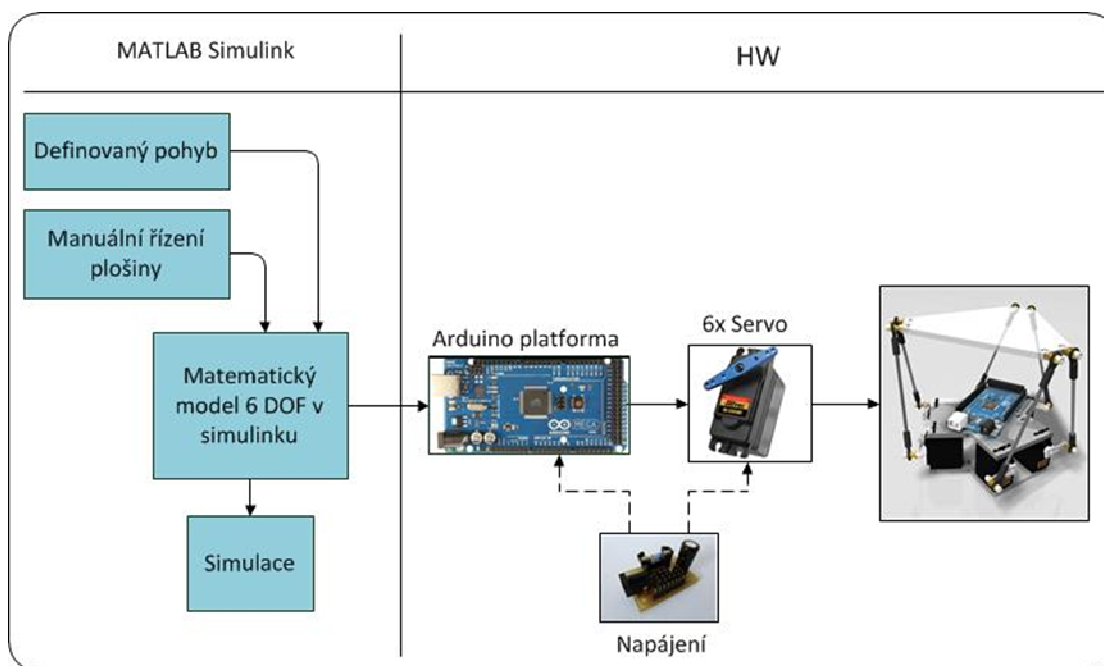
$$L_i = \|P_b + (R \cdot Pp_i) - Bb_i\| \quad (3.8)$$

## 4 Návrh zařízení

Návrh systému vychází z požadavku (kapitola 2.1) navrhnout a zrealizovat samostatné zařízení, které bude sloužit k možnosti testování modulů inerciální navigace. Testovací zařízení by mělo umožňovat definovaným způsobem a rychlostí pohybovat s modulem elektronické jednotky inerciální navigace, čímž bude možno testovat jejich vlastnosti.

Navrhnutý systém by měl být ovládaný řídicím systémem pomocí PC. Vlastní pohyby plošiny by měly být řízeny autonomně pomocí řídicího mikrokontroléru testovacího zařízení.

Z těchto výchozích požadavků byl navrhnout systém, který popisuje blokové schéma na obrázku 14. Blokový návrh je rozdělen na dvě hlavní části. První reprezentuje řídicí systém, který byl realizován v programu Matlab a je podrobně popsán v páté kapitole. Druhá hardwarová část obsahuje řídicí platformu Arduino, jednotlivé servopohony, jejich napájení a vlastní konstrukci testovací plošiny. Postup návrhu konstrukce plošiny je popsán v následující kapitole.



Obrázek 14 – Blokové schéma systému

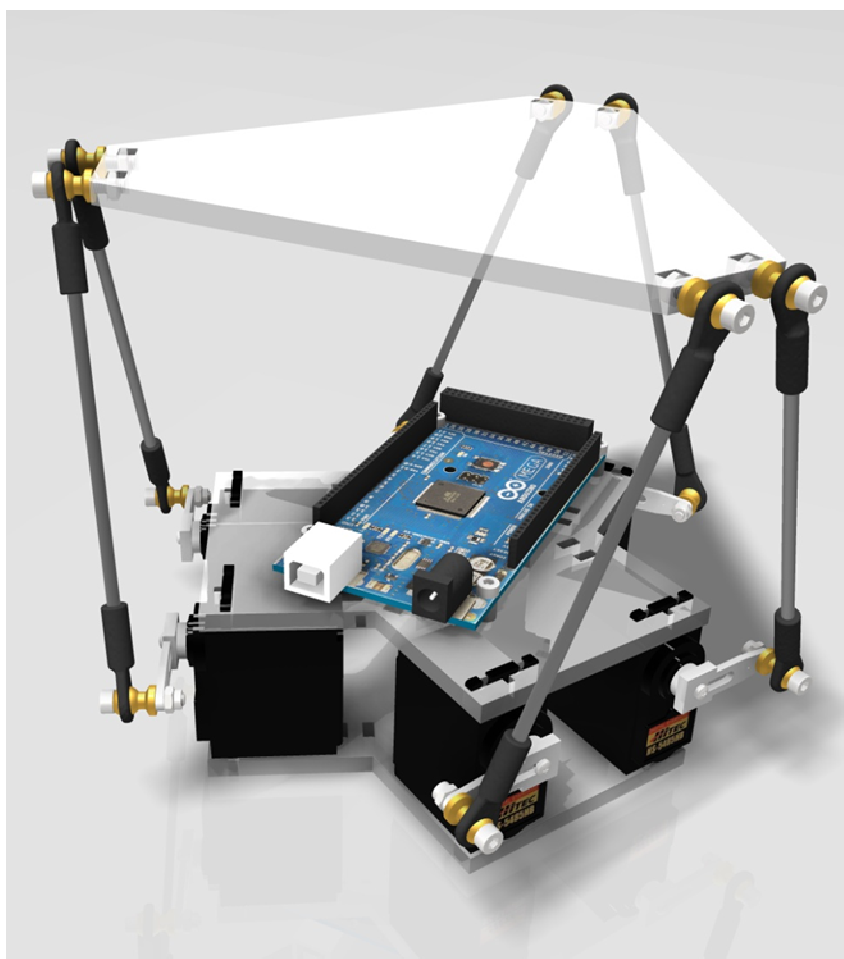
### 4.1 Konstrukce testovací plošiny

Cílem práce nebyla analýza pracovního prostoru ani detekce singularity. Nýbrž vybrat a zkonstruovat vhodnou kinematickou strukturu z hlediska konstrukční jednoduchosti a realizovatelnosti. Modelování strojírenské konstrukce probíhalo ve 3D CAD aplikaci Autodesk Inventor. Na obrázku 15 je zobrazená výsledná sestava hexapodu. Program pomohl ověřit i velikost pracovního prostoru, který je závislý především na délce ramen a poměru velikostí pevné podstavy vůči pohyblivé plošině. Například prodloužením ramen

se zvětší pracovní prostor plošiny, ale také se sníží jemnost pro nastavení polohy plošiny. Rozměry navrženého zařízení jsou výsledkem optimální konfigurace pro účely této práce.

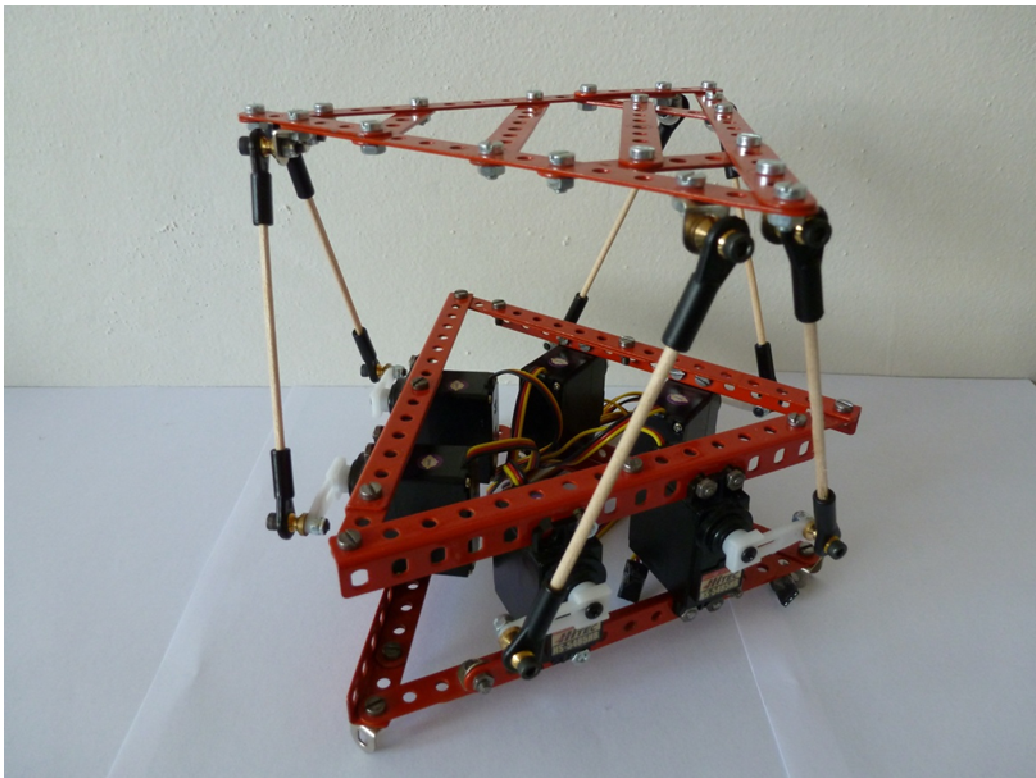
Rozmístění elektroniky je následující. Aby bylo možné testovací plošinu v budoucnu modifikovat, připojit další měřící HW nebo ji použít jako napájecí zdroj měřených senzorů, je řídicí platforma Arduino připevněna na vrchní desce rámu podstavy. S napájecí deskou servopohonu se manipulovat nebude a je proto vsazena mezi desky rámu podstavy.

3D model navržené konstrukce posloužil i pro vygenerování potřebné dokumentace pro výrobu jednotlivých součástí hexapodu. Výrobní *.dxf* soubory pro obráběcí centra a výkresy jsou v příloze.



Obrázek 15 – 3D model navrženého zařízení

Funkčnost navržené konstrukce byla simultánně ověřena také praktickým sestavením hexapodu ze stavebnice Merkur (obrázek 16).



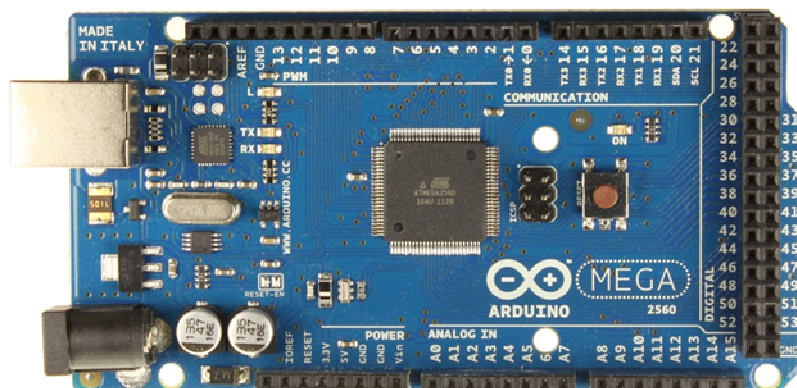
Obrázek 16 – Model testované konstrukce hexapodu

## 4.2 Návrh HW

### 4.2.1 Řídící platforma Arduino

Aby nebylo nutné navrhovat vlastní desku s mikrokontrolérem pro autonomní řízení testovací plošiny, bylo vybráno hotové řešení vývojové platformy Arduino (obrázek 17).

Arduino je otevřená elektronická platforma, založena na uživatelsky jednoduchém hardware a software. Mikrokontrolér na desce Arduino se programuje pomocí speciálního Arduino programovacího jazyku (založený na jazyku Wiring) ve vlastním Arduino vývojovém prostředí. Projekty založené na Arduinu mohou jednoduše komunikovat s PC.



Obrázek 17 – Vývojový kit Arduino MEGA 2560

Hlavní důvody, proč byl použit tento vývojový kit jsou:

- jednoduché programování
- možnost připojení měřených senzorů a dalšího HW
- slouží zároveň jako zdroj napětí (3,3 V a 5 V)
- univerzálnost
- jednoduché zapojení pomocí USB
- nízká cena oproti jiným vývojovým kitům
- spousta návodů
- široká uživatelská komunita
- platformní nezávislost (Windows/Linux/MacOS/atd)

Arduino MEGA 2560 je levný, robustní vývojový kit založený na mikrokontroléru ATmega 2560. Napájení může probíhat pomocí USB kabelu nebo z navrhnuté napájecí desky servopohonů. Bližší specifikace parametrů je v tabulce 1.

Tabulka 1 - Parametry vývojového kitu Arduino

Pracovní napětí:	5 V
Vstupní napětí:	7-12 V
Ext. Napájení:	6-20 V
I/O piny:	54 (z toho 15 PWM s rozlišením 8 b)
Analogové vstupy:	16
DC proud na pin:	40 mA
Flash paměť:	256 KB (8 KB využito pro bootloader)
SRAM:	8 KB
EEPROM:	4 KB
Frekvence krystalu:	16 MHz

#### 4.2.2 Servopohon

Původním záměrem bylo použít jako pohon testovací plošiny DC motor a jeho natočení měřit pomocí magnetického enkodéru. Konstrukce hexapodu však vyžaduje použití šesti pohonů. Proto hlavně z finančních důvodů a jednodušší dostupnosti byla vybrána modelářská serva (obrázek 18). Při jejich výběru byl kladen důraz hlavně na jejich přesnost nastavení polohy, a proto byla pořízena programovatelná digitální serva, která oproti analogovým mají lepší vlastnosti nebo je lze alespoň upravit. K tomuto programování je však nutné použít speciální programátor. Nastavit lze parametry jako rychlost, krajní polohy, poloha při ztracení signálu atd.



Obrázek 18 – Servopohon Hitec HS-5485HB

Specifikace parametrů vybraného servopohonu Hitec HS-5485HB v je v následující tabulce:

Tabulka 2 - Parametry serva Hitec HS-5485HB

Typ motoru:	3-pólový
Typ ložiska:	kuličkové
Rychlost při napájení 4,8 V/6 V	0,2/0,17
Točivý moment při napájení 4,8 V/6 V	5,2/66,4 kg cm <sup>-1</sup>

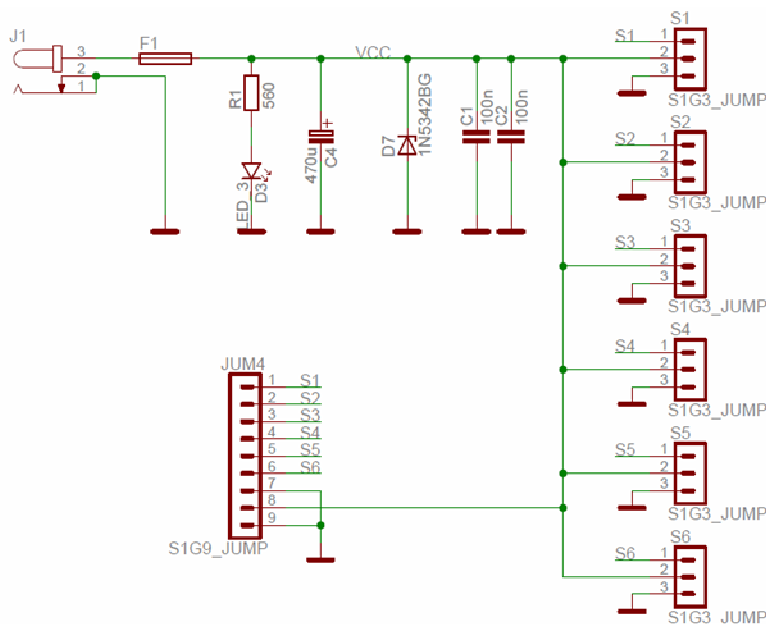
Řízení polohy serva obstarává pulzní šířková modulace (PWM) s opakovací frekvencí 50 Hz, většina modelářských serv pracuje s rozsahem impulzů 1-2 ms. Výrobce Hitec udává ve svém všeobecném manuálu rozsah impulzů od 0,9 ms do 2,1 ms s centrální polohou 1,5 ms. Středová poloha 1500  $\mu$ s bývá obvyklá pro všechny serva různých výrobců. Pásmo necitlivosti pro serva Hitec je 8  $\mu$ s. Spotřeba serva v klidu byla naměřena na 50 mA. Při pohybu 180 mA a při zátěži odebírá až 480 mA. Celkový odběr pro šest servopohonů při zatížení by tedy neměl přesahovat hodnotu 3 A.

#### 4.2.3 Napájení

Pro napájení Arduina a servopohonu byl k dispozici nastavitelný spínaný zdroj. Původně bylo napájení navrženo s rozmezím 7 V až 14 V, které bylo jednotlivě stabilizováno pro každé servo na 5 V. Toto řešení se v průběhu návrhu desky plošných spojů ukázalo jako nevhodné, protože úbytek napětí na jednotlivých lineárních stabilizátorech LM7805 byl tak velký, že síťový adaptér nebyl schopný dodávat potřebný proud a pohyb servopohonů nebyl plynulý. Lineární stabilizátory byly proto odstraněny a výstupní napětí spínaného zdroje sníženo na 6 V, při kterém je schopen dodat proud až 7 A. Z tohoto důvodu byla do napájecího obvodu zařazena jednoduchá filtrace v podobě elektrolytického kondenzátoru. Toto zvýšení napětí má pozitivní vliv na rychlost servopohonů, protože jsou při vyšším napětí schopná dosáhnout i vyšší rychlosti pohybu (viz Tabulka 2).



Na obrázku 19 je schéma napájecího obvodu. Z bezpečnostních důvodů napájecí obvod obsahuje tavnou pojistku pro případ zkratu. Jako ochrana proti přepětí servopohonů funguje Zenerova dioda D7. Pokud se v obvodu vyskytne napětí vyšší než 6,8 V nebo napětí opačné polaroty, proud procházející přes Zenerovu diodu přepálí tavnou pojistku. Led dioda D3 indikuje zapnutý stav nebo naopak přepálenou pojistku. Napájení servopohonů bylo pro odběr proudu naddymenzováno. Protože pokud by bylo potřeba programově zvýšit rychlost servopohonu, zvýšil by se i jejich odběr proudu.

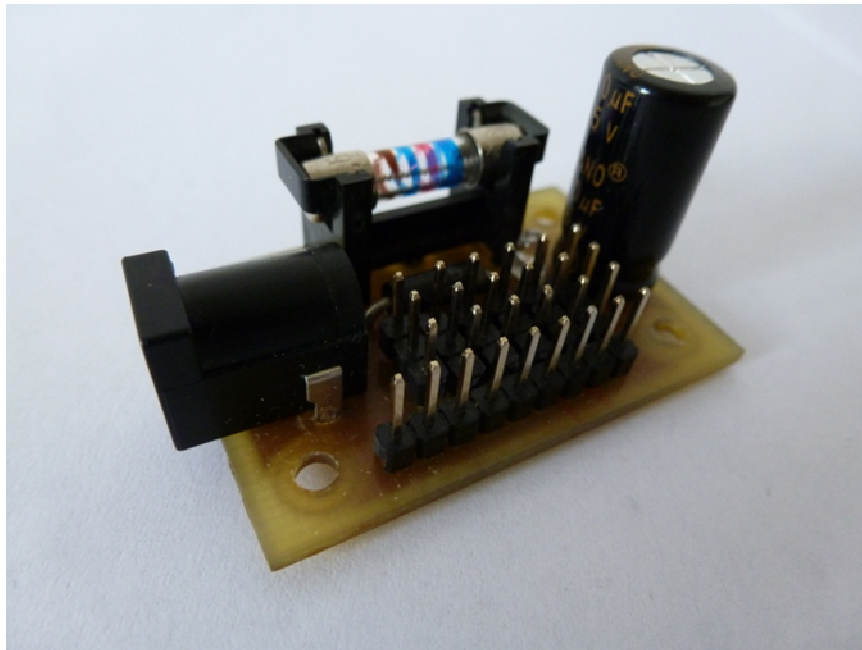


Obrázek 19 – Schéma napájecího obvodu

Napájecí obvod slouží zároveň i jako propojovací deska s řídicími signály z Arduina pro servopohony. Pro potřeby napájení například testovaných modulů inerciální navigace nebo připojení dalšího bloku je na jumper liště vyvedeno napájecí napětí.

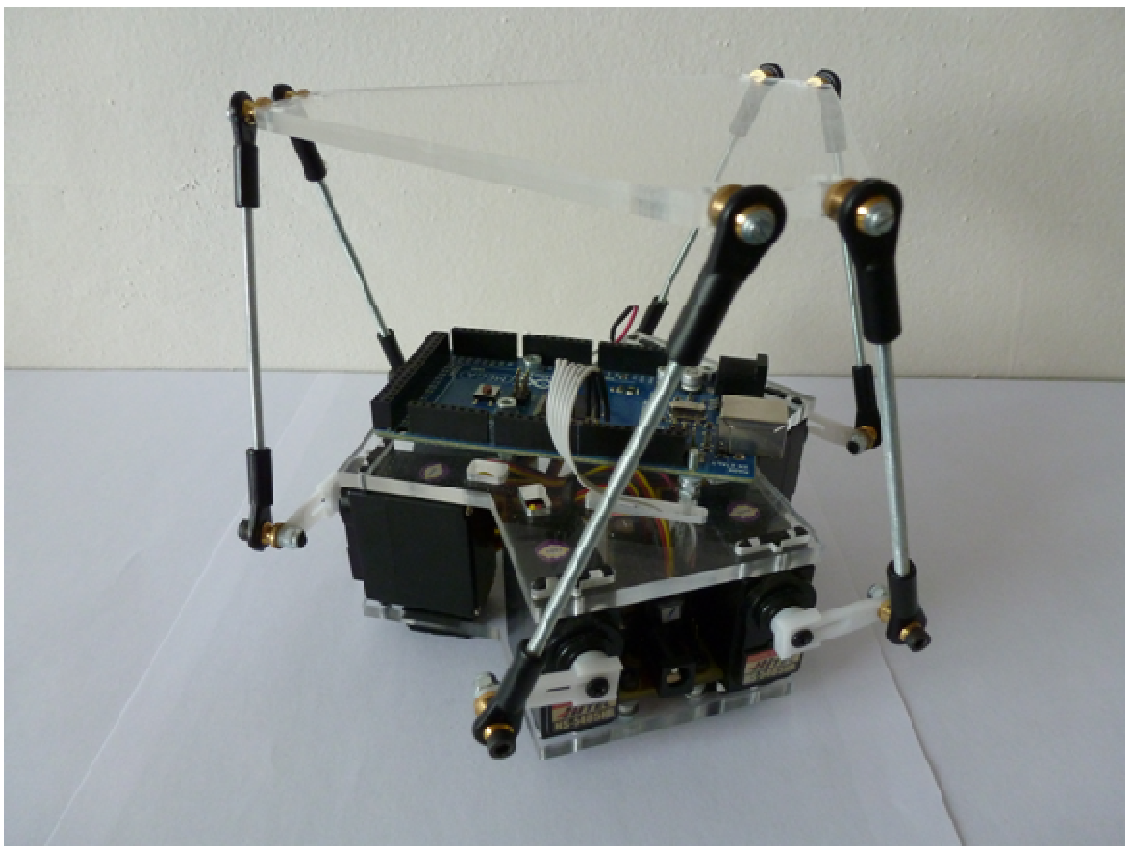
### 4.3 Zhodnocení návrhu

Desku pro napájení pro servopohony a propojení s Arduinem se podařilo minimalizovat na rozměry 43 mm na 29 mm (obrázek 20). Rozměry a umístění jsou voleny záměrně, aby deska zapadala do konstrukce testovací plošiny a bylo možné vyměnit například ochrannou pojistku. Vzhledem k velikosti použitých součástek výroba a osazení desky proběhla bez problému v amatérských podmínkách.



Obrázek 20 – Osazený napájecí modul

Na obrázku 21 je kompletně sestavená testovací plošina. Výroba jednotlivých součástí rámu byla provedena na domácí CNC fréze.



Obrázek 21 – Kompletně sestavená testovací plošina

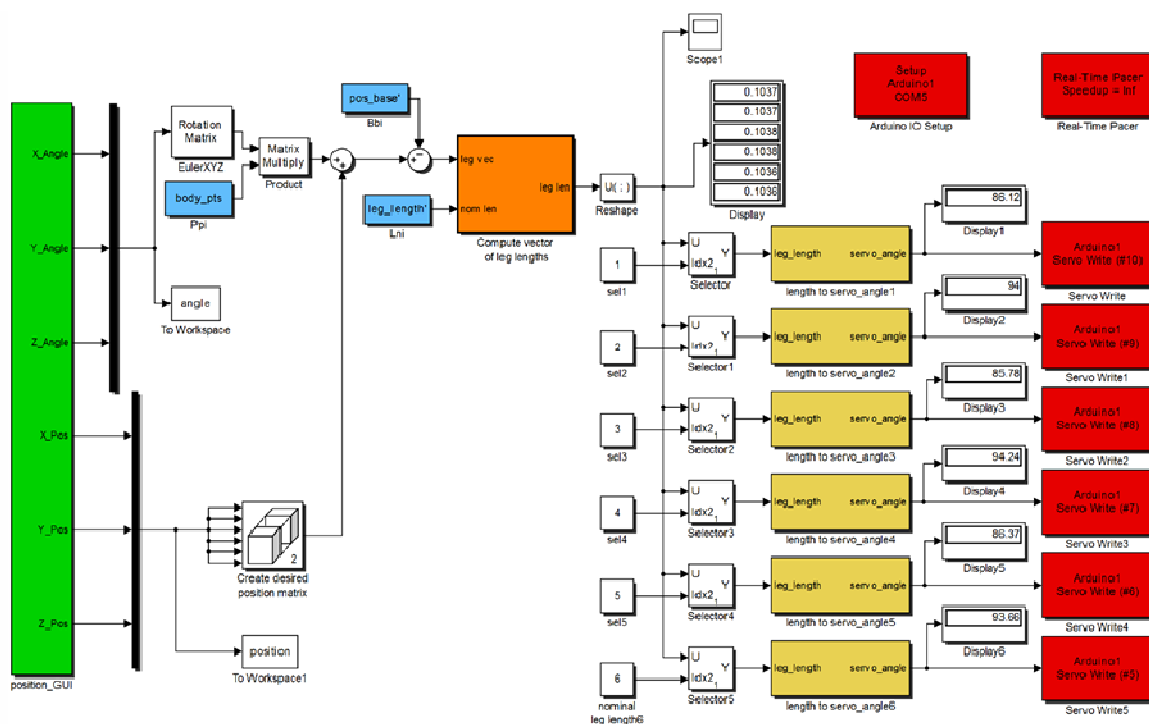
## 5 Návrh řízení systému

Jak bylo již napsáno (viz kapitola 3), šest stupňů volnosti vyžaduje pro řízení pohonů nutný řídicí systém pro 6 pohybových os. Vysoké nároky na řízení ještě více podtrhuje fakt, že je také nutné v každém okamžiku pohybu v prostoru řešit transformaci souřadnic, která vypočítává délku každé nohy pro daný bod v kartézských souřadnicích. Kde šest stupňů volnosti odpovídá transformaci pro šest nohou. Analytický výpočet by zahrnoval řešení numerických komplexních integračních technik. Použitím výpočetních nástrojů, jako jsou dynamické simulační SW, je nyní možné snadno modelovat a simulovat mechaniku hexapodu spolu s jeho řídicím systémem. Tento účel velice dobře splňuje nadstavba simulink programu Matlab. V tomto prostředí byl navrhnout a ověřen kinematický model hexapodu spolu s jeho řídicím systémem. Blokové schéma s popisem jednotlivých bloků řídicího systému je v následující kapitole.

### 5.1 Popis blokového schéma simulinku

Na obrázku 22 je blokové schéma řízení systému v simulinku [5]. Schéma odpovídá rovnici (5.1). Pro lepší přehlednost jsou bloky barevně rozlišeny. Vstupem pro soustavu jsou koncové souřadnice manipulátoru (zelený blok). Zde se zadává úhel natočení a poloha plošiny v kartézské soustavě souřadnic ( $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $\theta$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). Výstupem soustavy je délka jednotlivých ramen, která je převáděna na úhel natočení servopohonu.

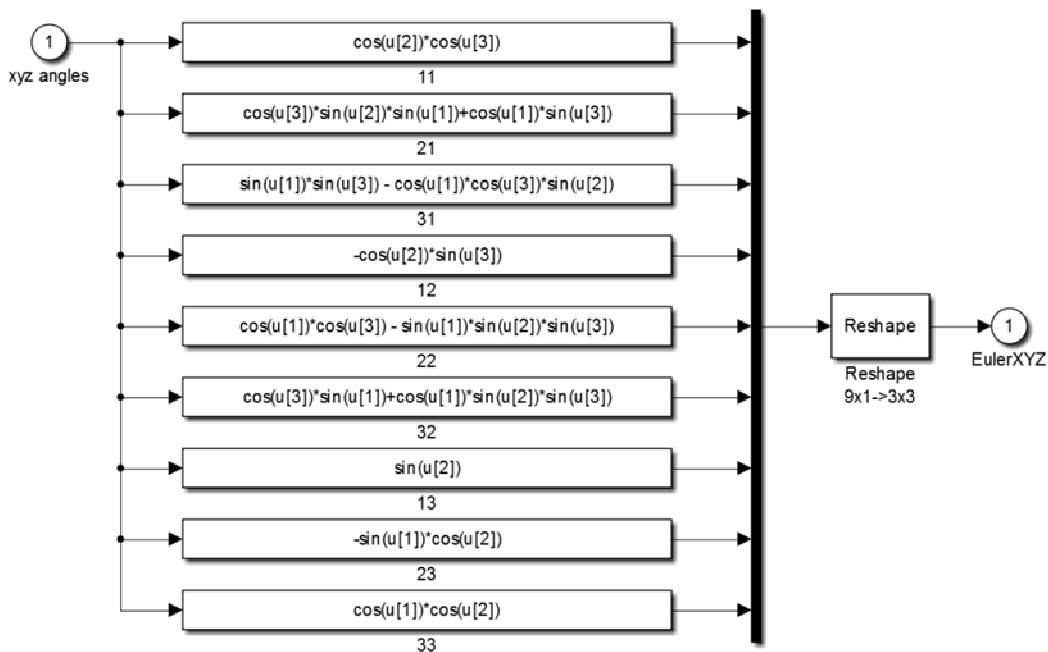
$$L_i = \|P_b + (R \cdot P_{p_i}) - Bb_i\| - L_{ni} \quad (5.1)$$



Obrázek 22 – Blokové schéma řízení systému v simulinku

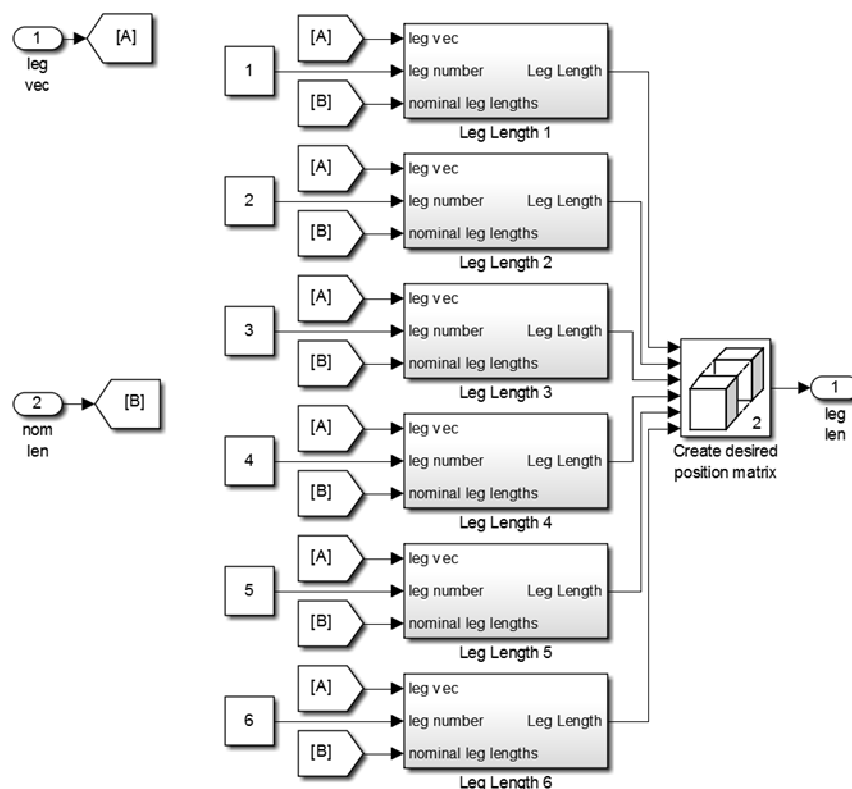
Geometrie testovací plošiny je definována pomocí jednoduchého *M-file* skriptu. Zde po zadání uhlu mezi rameny, výšky plošiny a také poloměru pevné podstavy a pohyblivé plošiny jsou určeny souřadnice jednotlivých ramen a jejich vzájemné spojení. Výhodou použití skriptu je, že řídicí systém lze velice jednoduše upravit v podstatě pro jakoukoliv geometrii kinematické struktury Hexapodu pouhou změnou tří hodnot v *M-file*. Tyto souřadnice a délka ramen ve výchozí pozici jsou do řídicího systému zadány pomocí modrých bloků konstant ( $Bb_i$ ,  $Pp_i$  a  $L_{ni}$ ).

Na níže uvedeném obrázku je subsystém pro určení rotační matice  $R$ , která odpovídá rovnici (3.4). Jednotlivé rovnice reprezentují součin Eulerových úhlů [5]. Blok Reshape slouží pro změnu rozměru matice z 9x1 na potřebný rozměr 3x3. Obdobnou funkci má i blok *Matrix Concatenate*, který z matice o rozměru 1x3 vytvoří požadovanou matici pozice 6x3 pro další zpracování.



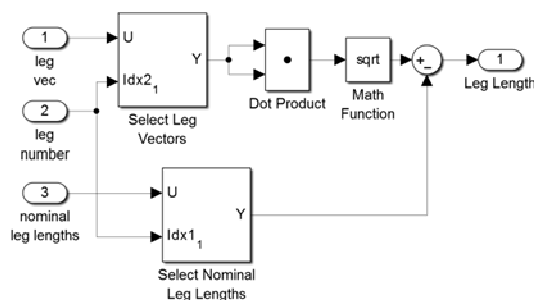
Obrázek 23 – Subsystém bloku pro výpočet rotační matice  $R$  v simulinku

Oranžový blok slouží pro výpočet délky jednotlivých ramen [5]. Výpočet nelze provést ve vektorovém tvaru, a proto je provedeno rozdělení složek a vlastní výpočet probíhá pro každé rameno zvlášť (obrázek 24). Po tomto výpočtu jsou velikosti ramen pomocí bloku *Matrix Concatenate* převedeny do tvaru 1x6.



Obrázek 24 – Subsystem pro výpočet vektoru délek ramen

Na obrázku 25 je zobrazen subsystem pro vlastní výpočet délky ramena [5]. Blok *selektor* určuje, pro které rameno má probíhat výpočet.



Obrázek 25 – Subsystem *Leg Length* pro určení délky ramena

Trajektorie pohybu plošiny je ukládána pro potřeby následné vizualizace pomocí bloku *To Workspace*. Ostatní bloky jsou podrobněji rozebrány v následujících dvou kapitolách.

### 5.1.1 Převod délky ramena na úhel natočení servopohonu

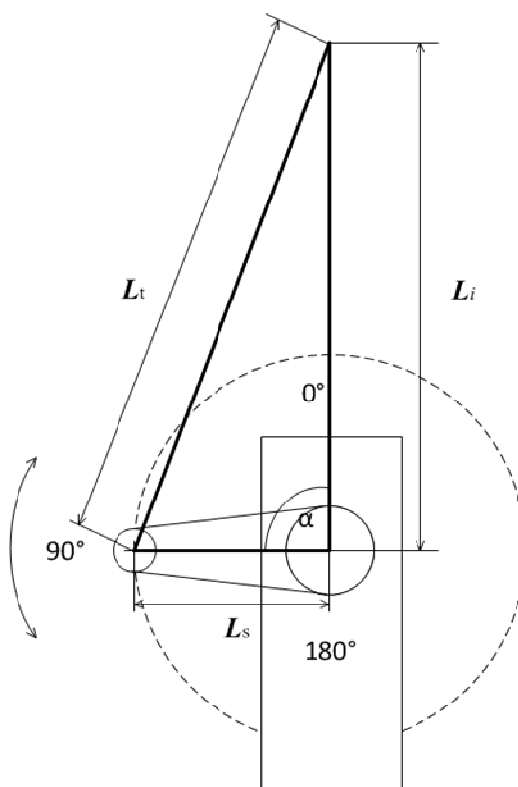
Pro zjednodušení byl v matematickém modelu kinematické struktury hexapodu použit lineární servopohon. V návrhu testovací plošiny byl však použit servopohon s rotačním pohybem. Proto je v blokovém schématu řízení systému (obrázek 21) blok pro převod délky ramena na úhel natočení servopohonu.

Změna délky ramena se potom provádí změnou úhlu natočení servopohonu (obrázek 26). Rameno  $L_s$  se může otáčet v rozmezí  $0^\circ$ - $180^\circ$  (úhel  $\alpha$ ). Délka ramena servopohonu  $L_s$  a spojovacího táhla  $L_t$  je pevná. Délka ramena  $L_i$  je známa z řešení inverzní kinematické úlohy. Úhel natočení  $\alpha$  servopohonu se poté analyticky určí pomocí Kosinovy věty podle rovnice

$$L_t^2 = L_s^2 + L_i^2 - 2L_sL_i \cdot \cos \alpha \quad (5.2)$$

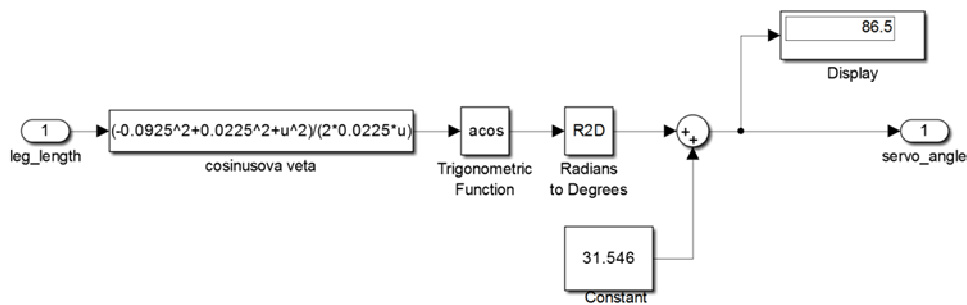
úhel  $\alpha$  je poté

$$\alpha = \arccos \frac{-L_t^2 + L_s^2 + L_i^2}{2L_sL_i} \quad (5.3)$$



Obrázek 26 – Náčrt převodu délky ramena na úhel natočení servopohonu

Na obrázku 27 je subsystém bloku pro převod délky ramena na úhel natočení servopohonu v simulinku podle rovnice (5.3).



Obrázek 27 – Blokové schéma převodu délky ramena na úhel natočení servopohonu v simulinku

### 5.1.2 Komunikace s platformou Arduino

Aby bylo možné ovládat pohyby testovací plošiny nadřazeným řídicím systémem, je platforma Arduino připojena pomocí sériové sběrnice k PC. Dále byla použita simulink knihovna vstupně výstupních bloků pro platformy Arduino [6]. Tento balík umožňuje připojenému PC k Arduino platformě měnit jak analogové, tak digitální vstupy a výstupy, a také ovládat pohony přímo z prostředí Matlabu. Provedeno je to tak, že v mikrokontroléru Arduina je nahrán program, který naslouchá příkazům Matlabu. Příkazy jsou přenášeny po sériové lince. Arduino poté provede příkazy a pokud je třeba, vrátí výsledek.

Číslo sérového portu je nastaveno v modrozeleném bloku Arduino IO setup (obrázek 21). Přenosová rychlost je nastavena na 115200 bit/s, což zajišťuje v podstatě okamžitou reakci systému na změnu. Pro účel ladění a simulace je na obrázku 21 blok *Real-Time Pacer* (hnědý blok), který slouží pro zpomalení simulace a pohybu testovací plošiny. Výchozí nastavení bloku je na nejvyšší možnou rychlost.

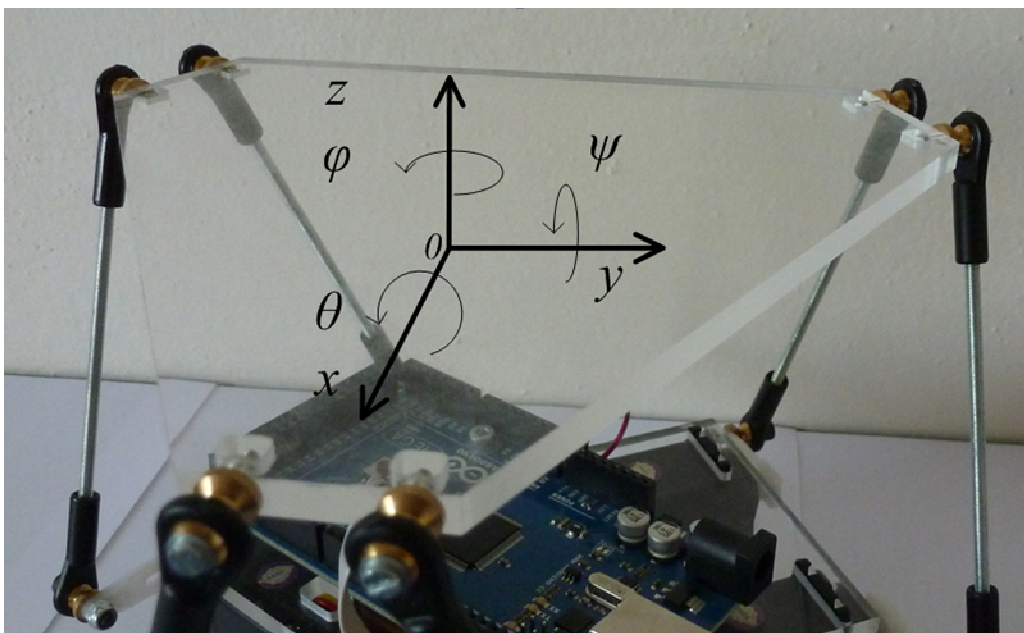
Úhel natočení servopohonů je nastavován pomocí červených bloků *Servo Write* (obrázek 21). Funkce probíhá tak, že do bloku je přivedena hodnota  $0 - 180^\circ$ . Tato hodnota je zaslána po sériové lince do běžícího programu v Arduinu, které nastaví výstupní PWM signál pro odpovídající úhel natočení. V masce bloku lze nastavit číslo portu výstupního PWM portu na Arduinu a vzorkovací perioda.

## 5.2 Řízení trajektorie plošiny

Jedním z klíčových požadavků zadání práce bylo řízení pohybu testovací plošiny pomocí definované trajektorie a také manuální řízení pohybu. Tento úkol lze realizovat hned několika způsoby, které jsou popsány v následujících kapitolách. Jak již bylo napsáno (kapitola 3) pohyblivá plošina se může pohybovat ve třech translačních a třech rotačních směrech (obrázek 28). Pro ovládání testovací plošiny je tedy potřeba šest vstupních parametrů  $x, y, z, \theta, \psi, \varphi$ . Souřadný systém testovací plošiny je na obrázku 27.

Tabulka 3 - Rozsah pohybu plošiny

Translace	$x$	$y$	$z$
[mm]	+/-40	+/-40	+/-40
Rotace	$\psi$	$\theta$	$\varphi$
[°]	+/-30	+/-15	+/-15

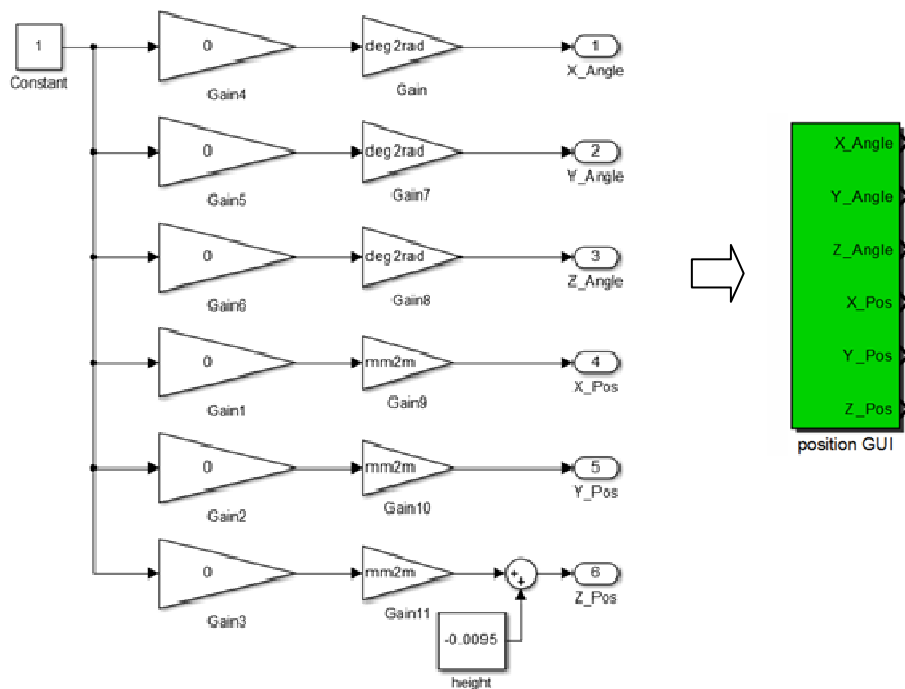


Obrázek 28 – Zobrazení souřadného systému testovací plošiny

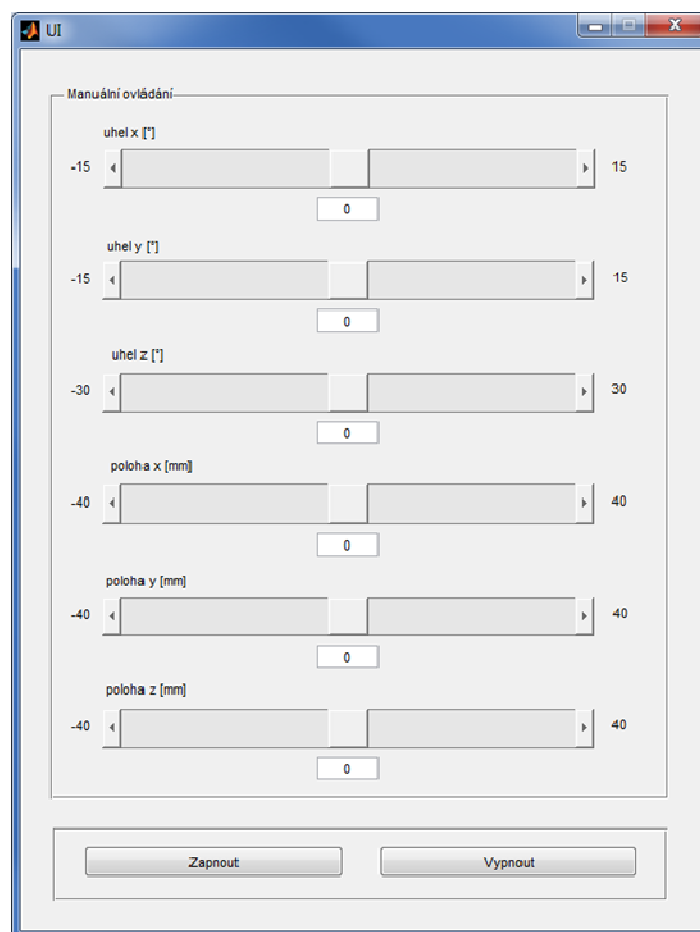
### 5.2.1 Manuální ovládání plošiny

Na obrázku 29 je subsystém manuálního ovládání pozice testovací plošiny. Ovládání pozice probíhalo zadáváním konkrétní hodnoty jednotlivých parametrů (Simulink blok Gain 1-6). Proměnná *deg2rad* převádí úhlově stupně na radiány. Proměnná *mm2m* slouží pro převod z milimetrů na metry. Tato metoda se však ukázala jako nevhodná hlavně pro své neohrabané a pomalé ovládání. Proto bylo vytvořeno uživatelské prostředí, kde ovládání probíhá pomocí *slideru* (obrázek 30).





Obrázek 29 – Blokové schéma subsystému manuálního ovládání v simulinku



Obrázek 30 – Uživatelské prostředí manuálního ovládání plošiny

### 5.2.2 Ovládání polohy pomocí gamepadu

Další metoda manuálního ovládání pohybu testovací plošiny je ovládání pomocí *gamepadu*. Pro tyto účely byl zakoupen Genius Grandias 12, který lze standardně připojit do PC pomocí USB rozhraní. Jednou z jeho vlastností je, že lze přepínat mezi digitálním a analogovým režimem tlačítkem *mode* (zelená-digitální režim/červená-analogový režim).

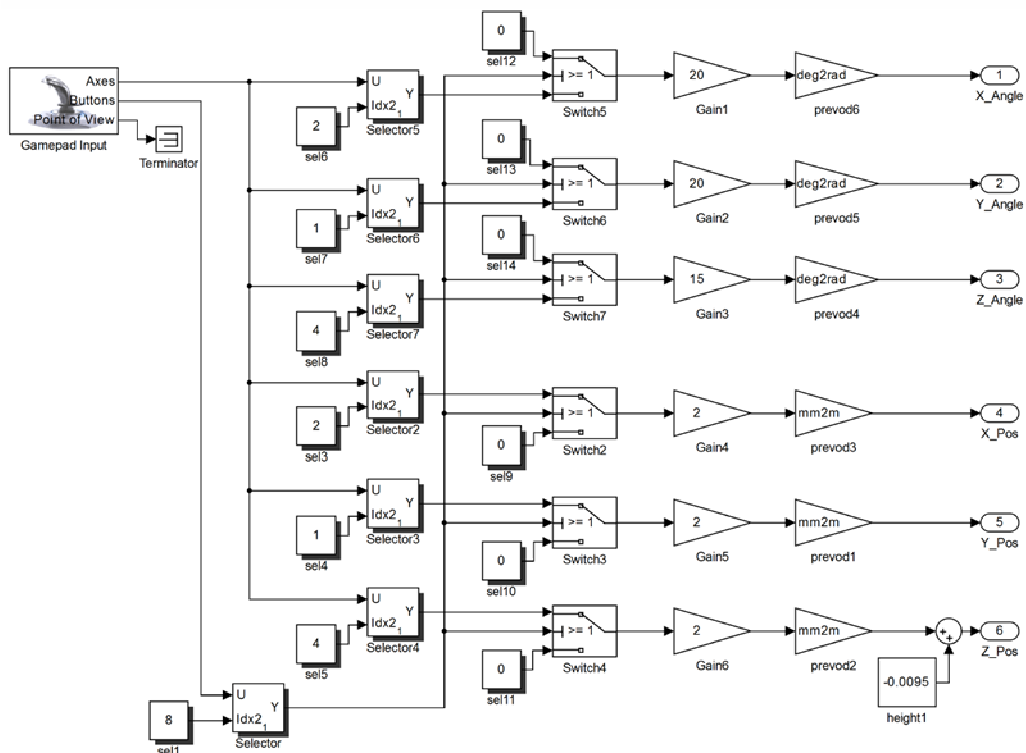
Testovací plošina je ovládána pomocí dvou mini-joystiků (obrázek 31). Levý ovládá osu  $x$ ,  $y$  a pravý ovládá osu  $z$ . Bočním tlačítkem R2 je přepínán režim mezi ovládáním rotačního nebo translačního pohybu. Aby bylo možné pohyb plynule ovládat, je třeba gamepad přepnout do analogového režimu.



Obrázek 31 – Popis ovládání plošiny pomocí gamepadu

Na obrázku 32 je blokové schéma subsystému ovládání testovací plošiny pomocí gamepadu. Hlavní blok *Gamepad input* je standardně obsažen v knihovně simulinku. Výstupní proměnná *Axes* obsahuje polohu mini-joysticku. Jejich hodnoty se spojitě mění (v analogovém režimu) mezi 0 pro výchozí středovou aretovanou polohu a 1/-1 pro koncové polohy. Další proměnná *Buttons* informuje, zda v danou chvíli není stisknuté některé z tlačítek a slouží pro přepínání mezi rotačním a translačním pohybem. Tuto funkci obsluhuje blok *Switch*.

Výhody této metody jsou hlavně její rychlost a možnost ovládat více pohybů ve stejný okamžik. Nevýhodou oproti předchozí metodě je naopak menší přesnost nastavení polohy.



Obrázek 32 – Blokové schéma ovládání plošiny pomocí gamepadu

### 5.2.3 Řízení pohybu pomocí definované trajektorie plošiny

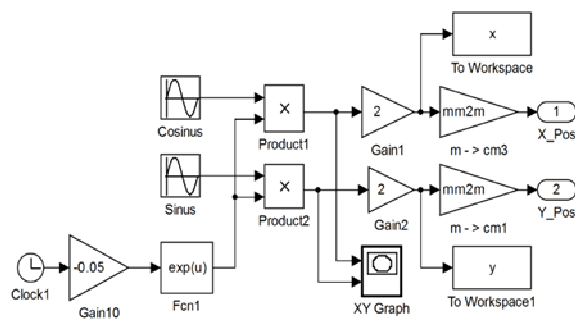
Definování pohybu testovací plošiny je realizováno tak, že se v simulinku vytvoří blokové schéma tak, aby odpovídalo žádané trajektorii. Vzhledem k tomu, že v zadání práce nebyl žádný příklad, bylo vytvořeno několik příkladů pro demonstraci funkce.

Následující rovnice reprezentují logaritmickou spirálu

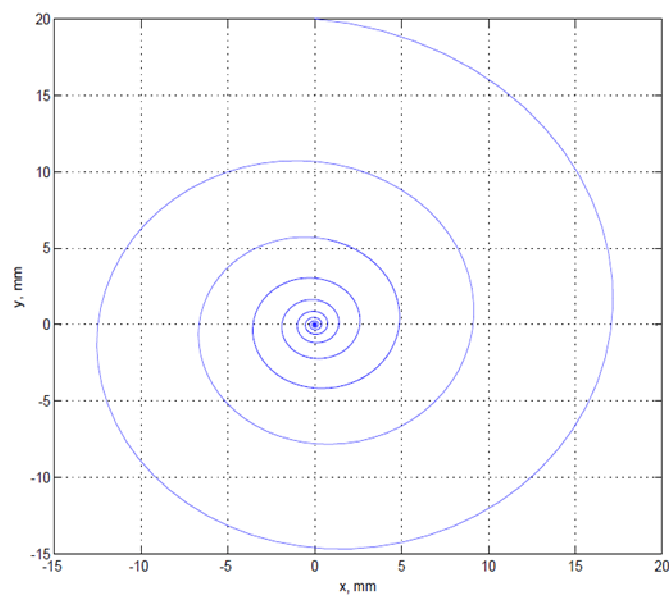
$$x = e^{-kt} \sin t \quad (5.4)$$

$$y = e^{kt} \sin t \quad (5.5)$$

Na obrázku 33 jsou v simulinku zadány výše uvedené rovnice logaritmické spirály. Translační pohyb je prováděn pouze osami  $x$  a  $y$ , ostatní jsou v nulové poloze. Žádanou rychlost pohybu testovací plošiny lze nastavit pomocí frekvence v blocích *Sin wave*. Ostatní vstupní parametry jsou nastaveny na nulu.

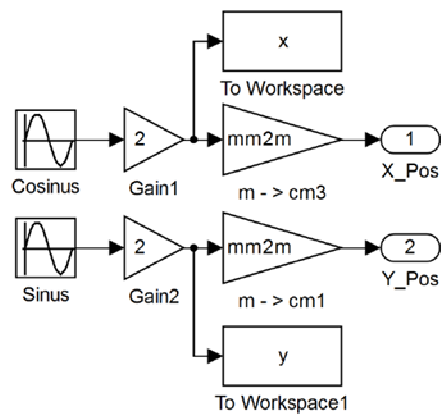


Obrázek 33 – Blokové schéma v simulinku pro logaritmickou spirálu

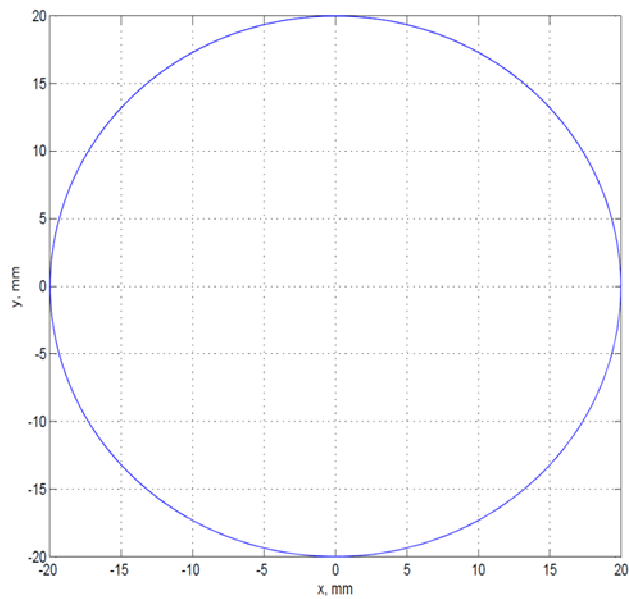


Obrázek 34 – Definovaná trajektorie logaritmické spirály (zobrazení xy)

Dalším příkladem je kruhový pohyb v rovině xy. Trajektorii lze jednoduše sestavit pomocí funkce sinus a kosinus (obrázek 35). Tím že počátek funkce kosinu posunut o  $\pi/2$  a pohyby jsou vůči sobě posunuty o úhel  $90^\circ$ , vytváří žádaný kruhový pohyb, který je na obrázku 36.

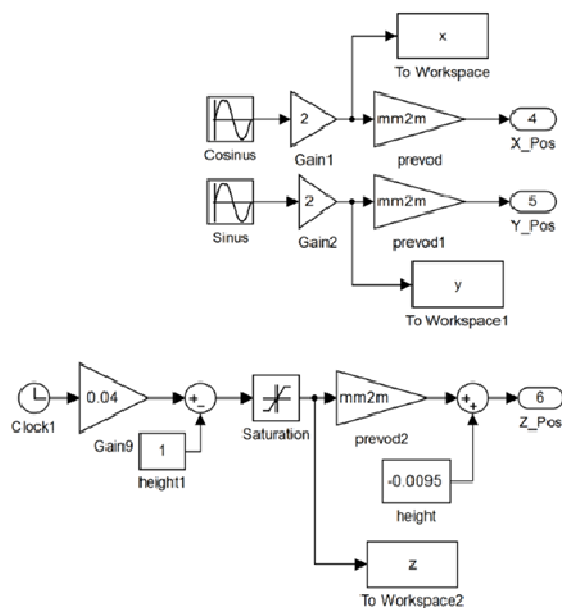


Obrázek 35 – Blokové schéma v simulinku pro kruhový pohyb

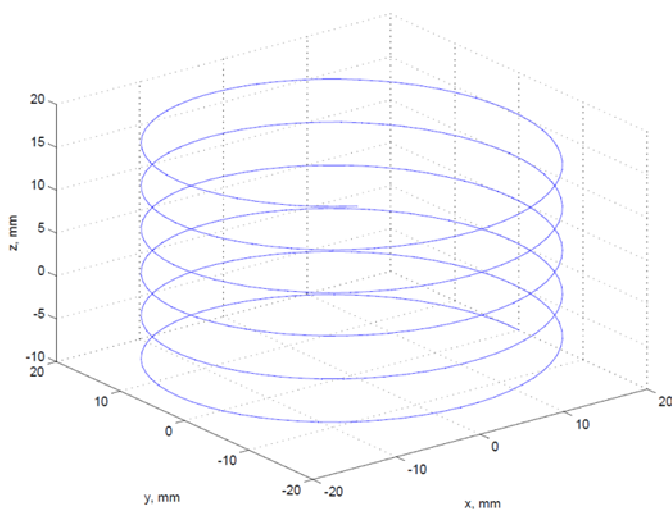


Obrázek 36 - Definovaná trajektorie kruhového pohybu (zobrazení xy)

Doplněním předešlého příkladu o pohyb podél osy z, je získán tvar spirály (obrázek 38). Výšku spirály (osa z) lze nastavit pomocí bloku Saturation (obrázek 37).



Obrázek 37 – Blokové schéma v simulinku pro pohyb ve tvaru spirály



Obrázek 38- Definovaná trajektorie spirály (zobrazení xyz)

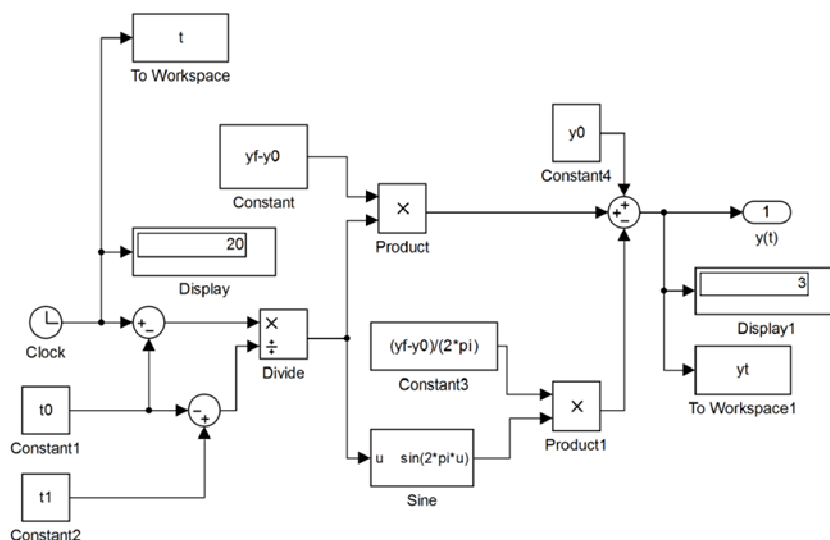
Pro vytvoření složitější nebo nepravidelné trajektorie je potřeba velké množství počátečních a koncových bodů s potřebnými dobami pohybu. Proto je poslední příklad generace trajektorie pomocí Kaneho funkce [7]. Vstupem je pouze koncová poloha a doba pohybu. Ostatní parametry jsou vypočítány.

Kaneho přechodová funkce je dána:

$$y(t) = y_0 + (y_f - y_0) \frac{t - t_0}{t_1 - t_0} - \frac{y_f - y_0}{2\pi} \sin\left(2\pi \frac{t - t_0}{t_1 - t_0}\right) \quad (5.6)$$

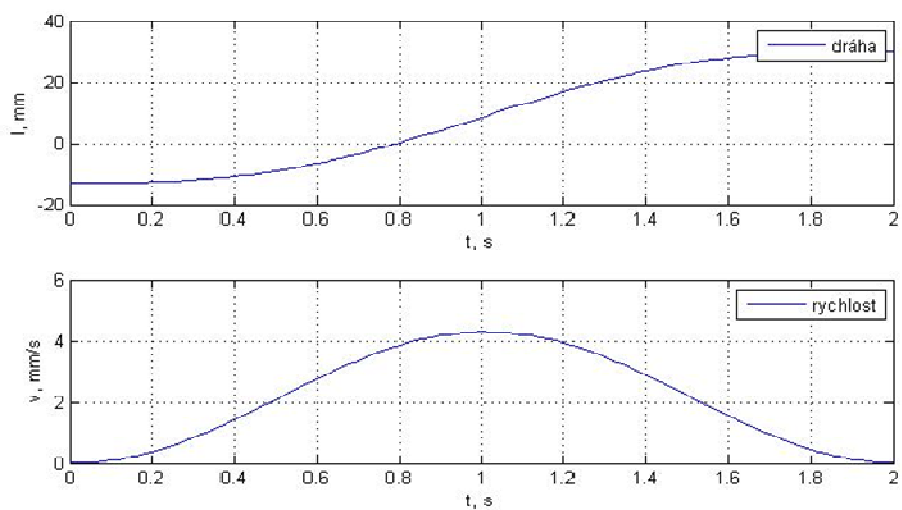
kde  $y(t)$  - funkce pozice,  
 $y_0$  - počáteční poloha,  
 $y_f$  - cílová poloha,  
 $t$  - čas,  
 $t_0$  - počáteční čas,  
 $t_1$  - koncový čas.

Výsledek implementace rovnice do modelu v simulinku je na následujícím obrázku. Pro jednodušší ovládání byl model zamaskován. Kaneho funkce požaduje pouze čtyři vstupní parametry.



Obrázek 39 – Implementace Kaneho funkce v simulinku

Jak je vidět na dalším obrázku, rychlost a zrychlení začíná a končí s nulovou rychlostí a zrychlením. Změna rychlosti, zrychlení a pozice se mění velice jemně. Tato vlastnost je velice důležitá pro plynulý rozjezd a zastavení servopohonu, což má pozitivní vlastnosti i na jeho životnost.



Obrázek 40 – Příklad trajektorie generované pomocí Kaneho funkce

## 6 Praktické ověření funkce navrženého zařízení

Po zkonstruování testovací plošiny, návrhu řídicího systému a vytvoření požadované trajektorie pohybu je na následujícím obrázku kompletní systém testovací plošiny pro inerciální navigaci.



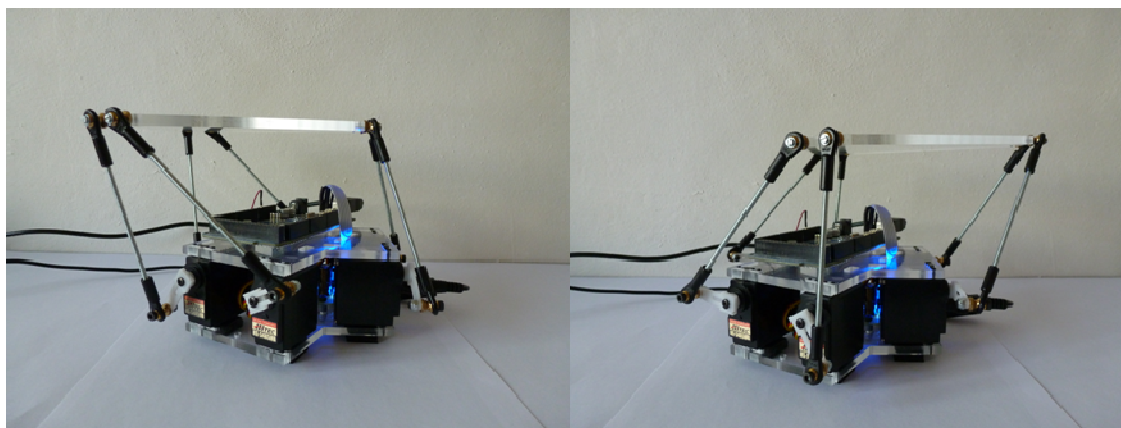
Obrázek 41 – Kompletní systém testovací plošiny pro inerciální navigaci



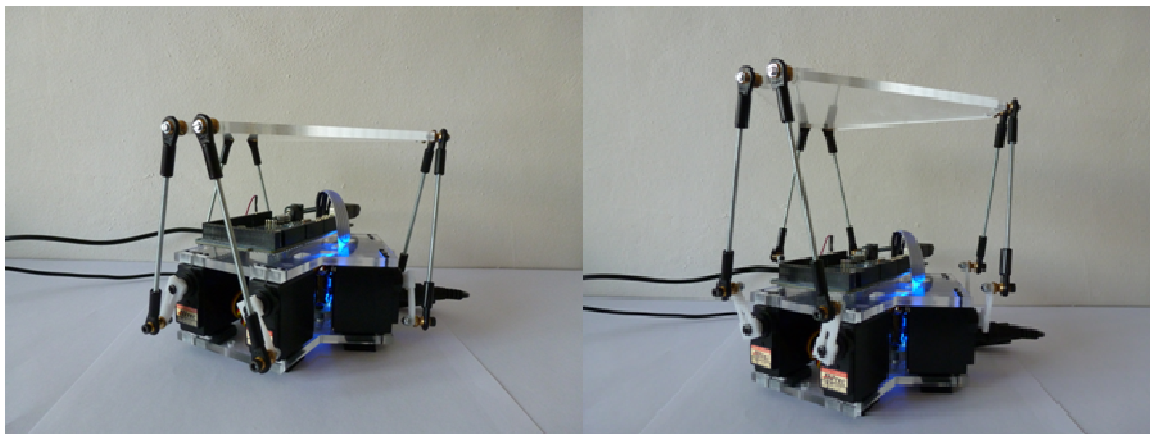
Praktické ověření zda je koncový manipulátor testovací plošiny opravdu v pozici, která byla nastavena, je vcelku obtížné. K měření by mohl být použit přesný modul inerciálních senzorů (akcelerometr, gyroskop a magnetometr). V době, kdy probíhalo testování, nebylo však k dispozici žádné měřicí zařízení, které by umožňovalo provést potřebné měření. Praktické ověření funkce systému probíhalo tedy následovně. V manuálním režimu byla nastavena hodnota, která se posléze ověřila. Pro měření náklonu, byl použit telefon obsahující gyroskopický senzor a pro měření translačního pohybu posuvné měřítko. Výsledky měření jsou na obrázcích 42 – 45.



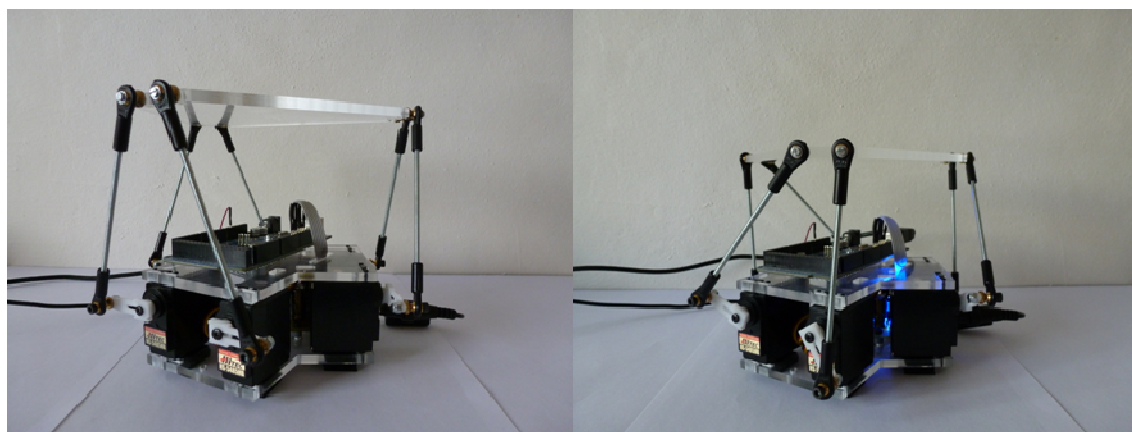
Obrázek 42 – Příklad nastavení rotace okolo osy  $y$ ,  $\psi = \pm 15^\circ$



Obrázek 43 – Příklad nastavení translace podél osy  $x = \pm 40$  mm



Obrázek 44 - Příklad nastavení translace podél osy  $z = \pm 20$  mm



Obrázek 45 – Výchozí pozice (a), nastavení rotace  $\theta = 30^\circ$  (b)

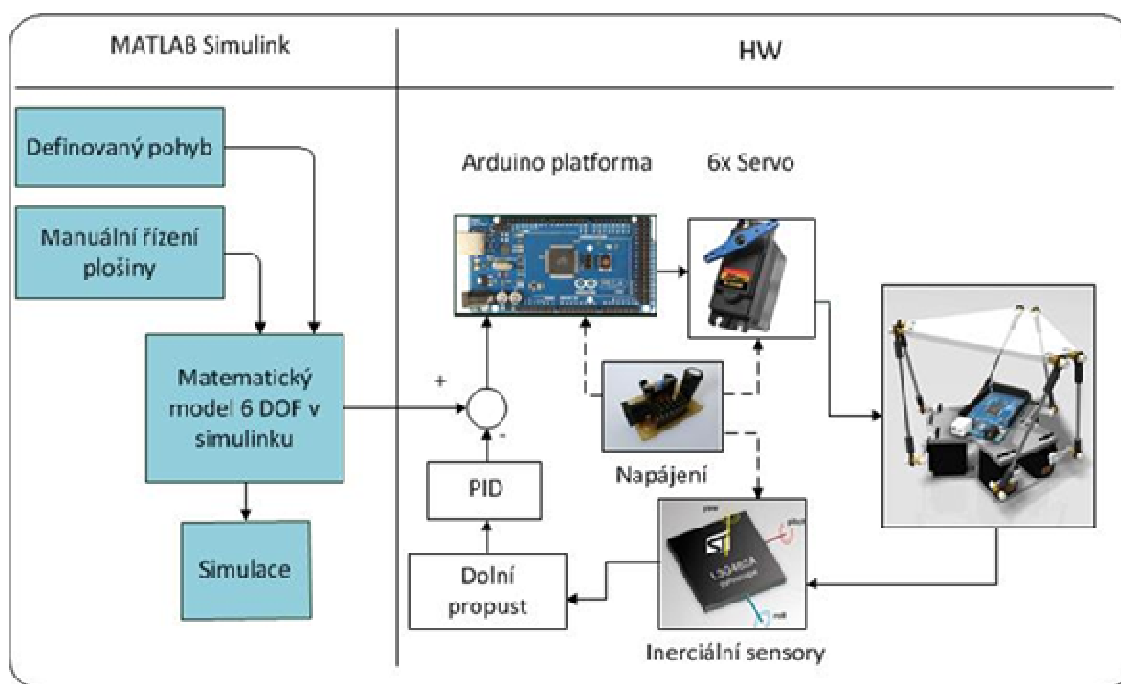
## 7 Návrhy pro vylepšení systému

Z konstrukčního pohledu se testovací plošina chová velmi dobře, nicméně během odlaďování systému bylo zjištěno, že při vyšším zatížení pohyblivé plošiny, nebo rychlých dynamických pohybech, se táhla servopohonu mírně krutem ohýbají. Pokud bude systém sloužit pro testování inerciálních modulů a tudíž takřka bez zatížení, pevnost táhel nebude nutné zvyšovat. V opačném případě by je bylo vhodné vyztužit nebo vyměnit za táhla z pevnějšího materiálu (například hliník).

Co se týče řízení polohy, tak v návrhu systému výrazně chybí zavedení zpětné vazby. Pro další vývoj je tedy doporučeno přidat minimálně zpětnou vazbu od úhlu natočení servopohonů (enkodér) nebo snímat výslednou polohu pohyblivé plošiny (gyroskop, akcelerometr a magnetometr). Tímto by bylo dosaženo výrazného zpřesnění požadované cílové polohy plošiny.

Jednou z doporučených replikací je vytvoření stabilizované roviny. Na pohyblivou plošinu by bylo nutné pouze přidat modul inerciálních senzorů (gyroskop, akcelerometr a magnetometr). Výstup ze senzorů by byl přiveden pomocí Arduina do PC, kde by proběhla filtrace (například dolní propust) a další zpracování v PID regulátoru (obrázek 46).

Další návrh je vytvořit balanční systém-kulička na rovině. Oproti předešlému návrhu je místo inerciálních senzorů potřeba kamera, která snímá pozici kuličky na pohyblivé plošině. Zpracování informací o poloze a vlastní regulace by probíhalo v PC.



Obrázek 46 – Blokové schéma vylepšení systému (stabilizace)

## 8 Závěr

V předložené diplomové práci jsou teoreticky rozebrány sériové a paralelní kinematické struktury manipulátorů. Z potřeb aplikačních kritérií vychází navržená testovací plošina a její řídicí systém. Pro servopohony byl vyroben napájecí modul. Zařízení bylo navrženo tak, aby splňovalo v maximální míře modifikovatelnost a univerzálnost pro potřebu navazujících projektů stabilizace roviny. Navržený systém je výsledkem roční práce.

Všechny vytyčené cíle práce se podařilo beze zbytku splnit. Během realizace se vyskytlo mnoho problémů, které se však podařilo zcela odstranit nebo vyřešit. Zařízení je schopno měnit polohu v šesti stupních volnosti. Je možné definovat rychlost i trajektorii pohybu. Plošinu lze ovládat jak manuálně, tak lze definovat trajektorii, podle které je pohyb řízen. Nad rámec zadání byla přidána možnost ovládat plošinu pomocí gamepadu. Trajektorie pohybu plošiny je ukládána pro potřeby následné vizualizace.

Lze konstatovat, že se podařilo dosáhnout velmi dobré shody nastavení polohy plošiny s její skutečnou polohou. Při reálném použití je však nutné zohlednit určité nepřesnosti, které vznikají vysokou mírou interpolace. Tento negativní jev může silně zvýšit rozdíl mezi nastavenou a výslednou polohou. Jako řešení tohoto problému je v práci navrženo přidání zpětné vazby do zařízení v podobě enkodéru, který by měřil úhel natočení servopohonů. Další způsob řešení by byl snímat inerciálními senzory výslednou polohu, která by byla porovnávána s nastavenou.

Tato práce je nejrozsáhlejší projekt, na kterém jsem doposud pracoval v oblasti návrhu a realizace řízení systémů. Pro úspěšné dokončení bylo nutné nastudovat problematiku kinematických struktur manipulátoru a jejich pracovního prostoru, aplikovat inverzní kinetickou úlohu a osvojit práci s adaptivním 3D modelováním. Díky tomu jsem získal velice cenné zkušenosti, které v budoucnu snad využiji v zaměstnání.

## Literatura

[1].SICILIANO, B a KHATIB, O. *Springer Handbook of Robotics*. Berlin: Springer-Verlag, 2008. ISBN 978-3-540-23957-4.

[2] Robot arm tutorial. *Society robots* [online]. 2005 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: [http://www.societyofrobots.com/robot\\_arm\\_tutorial.shtml](http://www.societyofrobots.com/robot_arm_tutorial.shtml)

[3] MERLET, J. *Parallel robots*. Sophia Antipolis: INRIA, 2006. ISBN 978-1-4020-4133-

[4] STEWART, D. *A Platform with six Degrees of freedom*. United Kingdom: Proc. Institution of Mechanical Engineers, 1965-1966. ISBN 371-386.

[5] Stewart Platform Mechanical System. In: WENDLANDT, Jeff. [Http://www.mathworks.com](http://www.mathworks.com) [online]. 2002 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/2334-stewart-platform-mechanical-system>

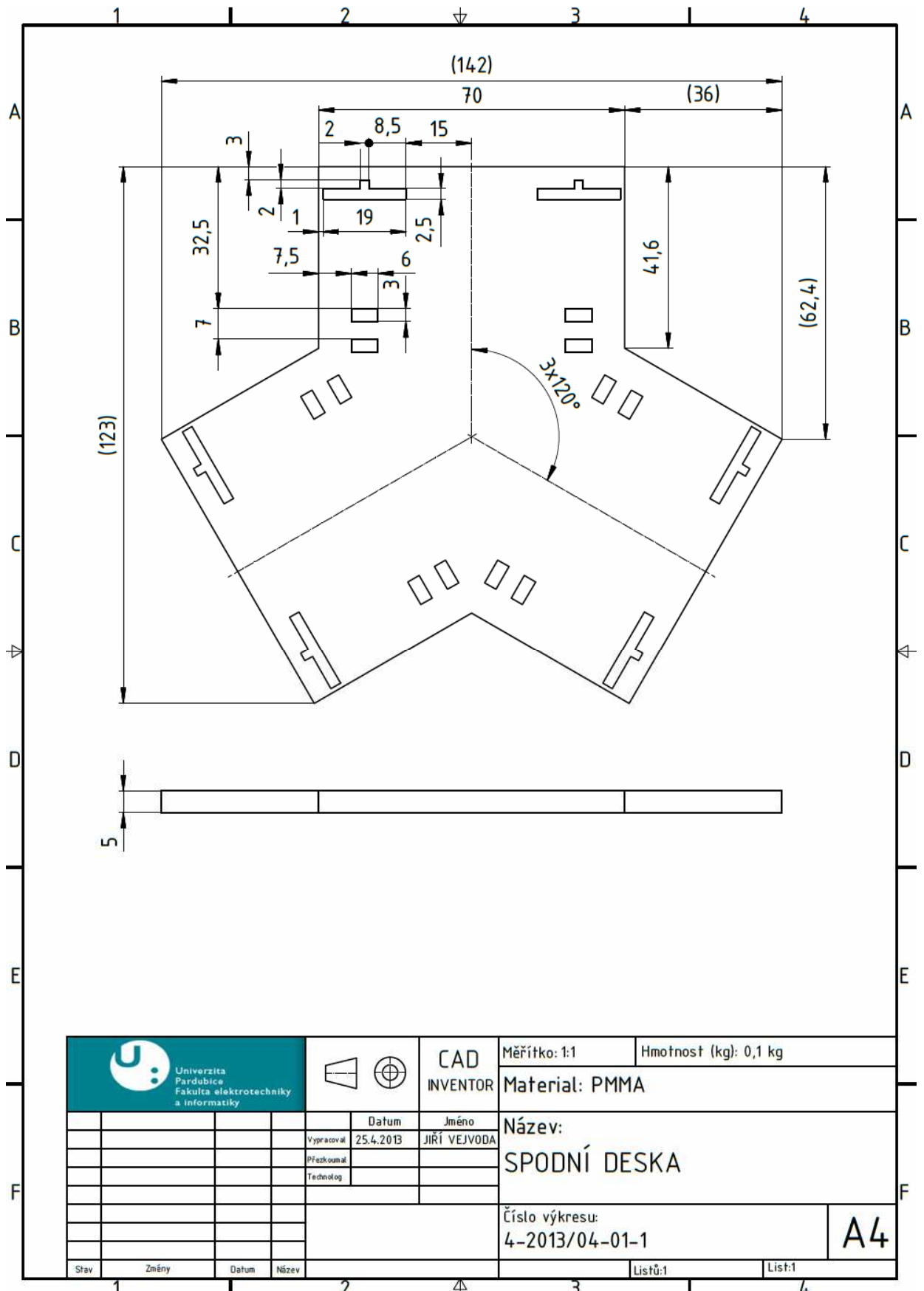
[6] Matlab Support Package for Arduino (aka ArduinoIO Package). In: [Http://www.mathworks.com](http://www.mathworks.com) [online]. 2013 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/32374-matlab-support-package-for-arduino-aka-arduinoio-package>

[7] Position Control and Trajectory Tracking of the Stewart Platform. In: [Http://www.intechopen.com](http://www.intechopen.com) [online]. 2012 [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/serial-and-parallel-robot-manipulators-kinematics-dynamics-control-and-optimization/position-control-and-trajectory-tracking-of-the-stewart-platform->

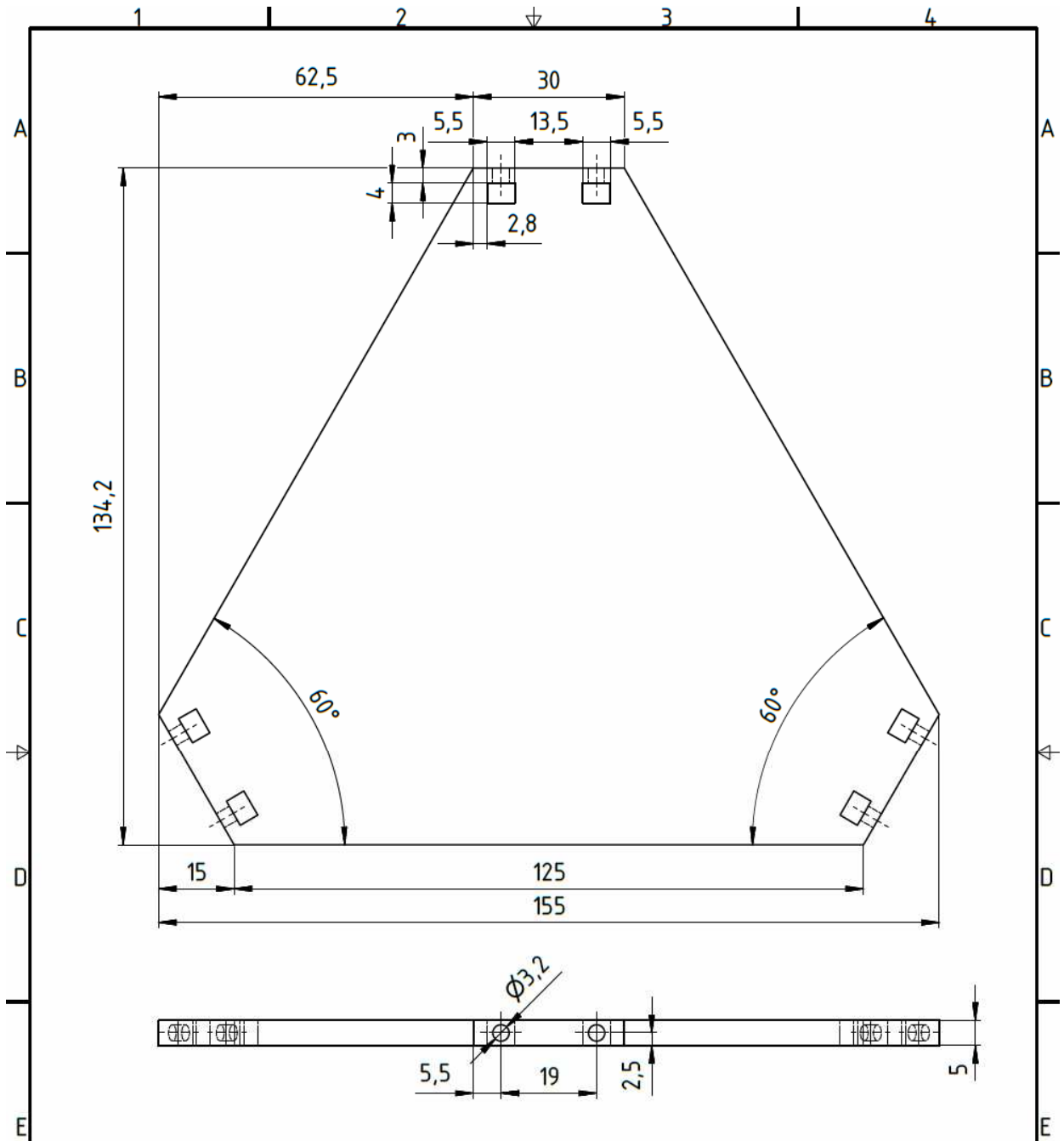
## **Přílohy**

Příloha A	Výkres spodní desky testovací plošiny
Příloha B	Výkres vrchní desky testovací plošiny
Příloha C	Výkres sestavy testovací plošiny

# Příloha A



# Příloha B



				Měřítko: 1:1	Hmotnost (kg): 0,1 kg
				Material: PMMA	
		Datum	Jméno	Název: <b>VRCHNÍ DESKA</b>	
		Vypracoval	JIRÍ VEJVODA		
		Přezkoumal			
		Technolog			
		Číslo výkresu: 4-2013/04-01-2			A4
Stav	Změny	Datum	Název	Listů:1	



# Příloha A

