



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MECHANICKÝ MODEL PARALELNÍHO MANIPULÁTORU SE SERVY RX64

THE MECHANICAL MODEL OF FIVE-BAR LINKAGE ROBOT.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Václav Večeřa

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. František Burian, Ph.D.

BRNO 2022

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Václav Večeřa

ID: 203372

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Mechanický model paralelního manipulátoru se servy RX64

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je vytvořit fyzický model malého manipulátoru s ověřeným matematickým základem pro výuku Robotiky (five-bar linkage). Manipulátor by měl mít možnost do osy posledního kloubu upevnit tužku, aby bylo možné zakreslit průběh trajektorie během přestavování. Práce bude vyžadovat mechanický cit při realizaci kloubů pro zajištění vyšší tuhosti konstrukce. Preferována je kovová konstrukce z důvodu tuhosti.

1. Proveďte rešerši v oblasti planárních pantografů, přímé i inverzní kinematiky a přesnosti serv RX-64
2. Vytvořte přímý i inverzní kinematický model manipulátoru a ověřte jeho funkci (matematicky)
3. Ze znalosti přesností serv RX-64 vytvořte model přesnosti dosažení pozice cílového manipulátoru
4. Navrhněte mechanický model manipulátoru s použitím serv RX-64
5. Realizujte mechanický model manipulátoru
6. Vytvořte aplikaci pro PC (RS-485) která nastaví manipulátor do zadané pózy

DOPORUČENÁ LITERATURA:

SPONG, W. a VIDYASAGAR, M.: Robot dynamics and control. New York: Wiley, 1989. ISBN 978-0471612438
TAVKHELIDZE, David. Geometry of five link mechanism with two degrees of freedom [online]. [cit. 2021-7-26].
Dostupné z: <http://shorturl.at/mOY12>

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 18.5.2022

Vedoucí práce: Ing. František Burian, Ph.D.

doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce představuje problematiku návrhu planárního pantografu pro požadované rozměry pracovního prostoru a následné aplikování metod k návrhu délky ramen, které tento rozsah zajistí. Dle těchto požadavků je vytvořen manipulátor, pro který je vypočtena a změřena chyba nastavení požadované pozice v závislosti na chybě nastavení polohy servomotorů RX-64 a nepřesnosti délky ramen při výrobě.

KLÍČOVÁ SLOVA

Paralelní robot, Planární pantograf, Kinematický model, Servomotor RX-64, Přesnost

ABSTRACT

This work presents the problem of designing a planar pantograph for the required dimensions of the working space and the subsequent follow-up methods to design the length of the arms, which will ensure this range. According to these requirements, a mechanical model is created. For which is calculated and measured accuracy and precision of reaching the required position dependent on the setting error of the RX-64 servomotors and error in the length of arms due to method of manufacturing.

KEYWORDS

Parallel Robot, Five-bar linkage, Kinematic model, Servo motor RX-64, Accuracy, Precision

VEČEŘA, Václav. *Mechanický model paralelního manipulátoru se servy RX64*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2022, 84 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. František Burian, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Bc. Václav Večeřa
VUT ID autora: 203372
Typ práce: Diplomová práce
Akademický rok: 2021/22
Téma závěrečné práce: Mechanický model paralelního manipulátoru se servy RX64

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. František Burian, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora

Obsah

Úvod	12
1 Paralelní robot	13
1.1 Planární pantograf	13
1.1.1 Pracovní prostor	14
1.1.2 Pracovní režimy	15
1.1.3 Singularity	19
2 Kinematický model	21
2.1 Přímá kinematická úloha	21
2.2 Inverzní kinematická úloha	23
3 Teoretický návrh manipulátoru	25
3.1 Sestavitelnost	25
3.2 Schopnost úplné rotace	26
3.3 Určení pracovního prostoru	27
4 Vytvoření fyzického modelu	31
4.1 Servomotor RX-64	31
4.2 Návrh mechanického modelu	32
4.3 Elektrické zapojení	33
4.4 Sestrojení manipulátoru	33
5 Ovládání manipulátoru	37
5.1 Komunikace	37
5.2 Inicializace motorů	39
5.3 Nastavení pozice	40
6 Přesnost dosažení cílové pozice	42
6.1 Přesnost v závislosti na odchylce úhlů aktivních kloubů	42
6.2 Přesnost v závislosti na odchylce rozměrů ramen	44
6.3 Přesnost v závislosti na odchylce rozměrů ramen a nastavení aktivních kloubů	45
7 Měření vlastností manipulátoru	49
7.1 Kalibrace manipulátoru	49
7.2 Měření přesnosti	51
7.3 Tuhost konstrukce	51

Závěr	54
Literatura	56
Seznam zkratk	58
Seznam příloh	59
A Přílohy na CD	60
B Servo motory RX-64	61
C Návrh báze manipulátoru	65
D Návrh aktivních ramen manipulátoru	67
E Návrh pasivních ramen manipulátoru	69
F Návrh hřídele v pasivního kloubu	71
G Návrh hřídele efektoru	72
H Návrh vložky mezi ložiska	74
I Návrh tlačícího prvku na tužku	75
J Návrh rozvodné krabičky	76
K Návrh uchycení kabelů	78
L Odchylka manipulátoru	80
M Manuál pro aplikaci pro ovládání planárního pantografu	82

Seznam obrázků

1.1	Schéma planárního pantografu	14
1.2	Pracovní prostor sériového robota	15
1.3	Pracovní režimy	17
1.4	Určení pracovního režimu	17
1.5	Pracovní prostor v závislosti na pracovním režimu	18
1.6	Singularity obecného planární pantografu	20
2.1	Výpočet FK pro získání pracovního prostoru	22
2.2	Vykreslení trajektorie kinematického modelu	23
3.1	Zobrazení požadovaného pracovního prostoru uvnitř teoretického pracovního prostoru	27
3.2	Postup návrhu délek ramen pro požadovaný pracovní prostor	29
3.3	Dosažitelné pozice v pracovním prostoru různými konfiguracemi	30
4.1	Schéma zapojení	33
4.2	Návrh mechanického modelu	34
4.3	Sestrojený manipulátor	36
5.1	Vytvořená aplikace	38
6.1	Zobrazení odchylky manipulátoru v závislosti na nepřesnosti nastavení aktivních úhlů	43
6.2	Zobrazení odchylky manipulátoru v závislosti na nepřesnosti nastavení aktivních úhlů pro různé konfigurace	44
6.3	Zobrazení odchylky manipulátoru v závislosti na nepřesnosti délky ramen	46
6.4	Zobrazení odchylky manipulátoru v závislosti na nepřesnosti délky ramen pro různé konfigurace	47
6.5	Odchylka manipulátoru pro různé konfigurace	48
B.1	Rozsah servo motoru RX-64	61
B.2	Rozměry servo motoru RX-64 - pohled z přední strany	61
B.3	Rozměry servo motoru RX-64 - pohled z boční strany	62
B.4	Rozměry servo motoru RX-64 - pohled ze zadní strany	62
C.1	Nepohyblivé rameno - pohled z horní strany	65
C.2	Nepohyblivé rameno - pohled z přední strany	66
D.1	Aktivní rameno - pohled z horní strany	67
D.2	Aktivní rameno - pohled z boční strany	68
E.1	Pasivní rameno - pohled z horní strany	69
E.2	Pasivní rameno - pohled z boční strany	70
E.3	Pasivní rameno - pohled z přední strany	70
F.1	Hřídel pasivního kloubu - pohled z boční strany	71

F.2	Hřídel pasivního kloubu - pohled z horní strany	71
G.1	Hřídel efektoru díl 1 - pohled z boční strany	72
G.2	Hřídel efektoru díl 1 - pohled z horní strany	72
G.3	Hřídel efektoru díl 2 - pohled z horní strany	73
G.4	Hřídel efektoru díl 2 - pohled z horní strany	73
H.1	Vložka mezi ložiska - pohled z horní strany	74
H.2	Vložka mezi ložiska - pohled z boční strany	74
I.1	Tlačicí prvek - pohled z boční strany	75
I.2	Tlačicí prvek - pohled z horní strany	75
J.1	Vrchní díl rozvodné krabička - pohled z horní strany	76
J.2	Vrchní díl rozvodné krabička - pohled z boční strany	76
J.3	Spodní díl rozvodná krabička - pohled z horní strany	77
J.4	Spodní díl rozvodné krabička - pohled z boční strany	77
K.1	Držák kabelů - pohled z horní strany	78
K.2	Držák kabelů - pohled z boční strany	78
K.3	Úchyt - pohled z dolní strany	79
K.4	Úchyt - pohled z boční strany	79
L.1	Přiblížené zobrazení odchyly v pracovním prostoru manipulátoru pro různé konfigurace způsobené vlivem nepřesnosti nastavení aktivních úhlů	80
L.2	Přiblížené zobrazení odchyly v pracovním prostoru manipulátoru pro různé konfigurace způsobené vlivem odchylky délky ramen	81
M.1	Aplikace pro ovládání planárního pantografu	82

Seznam tabulek

1.1	Pracovní prostor planárního pantografu v závislosti na poměru délek ramen	16
1.2	Určení pracovního režimu	18
4.1	Parametry servomotoru RX-64	31
4.2	Přesnost 3D tisku ramen	34
4.3	Vypočtená hmotnost vytisknutých dílů	35
4.4	Soupiska součástek a materiálu	35
5.1	Naměřené hraniční úhly pro natočení motorů	41
6.1	Výsledky přesnosti nastavení pozice v závislosti na odchylce aktivních kloubů	43
6.2	Výsledky přesnosti nastavení pozice v závislosti na délce ramen	45
6.3	Výsledky přesnosti nastavení pozice v závislosti na šířce ramen	45
6.4	Výsledky přesnosti nastavení pozice	47
7.1	Změřené přesnosti nastavení pozice	50
7.2	Změřené odchylky	52
7.3	Změřené odchylky v závislosti na tuhosti konstrukce při různých konfiguracích	52
7.4	Změřené odchylky v závislosti na tuhosti konstrukce	53
B.1	Tabulka instrukcí	63
B.2	Kontrolní data paměti	64
M.1	Hraniční úhly pro natočení motorů	84

Úvod

Paralelní roboty jsou čím dál více používány v průmyslu a to díky jejich výhodám v určitých aplikacích oproti sériovým robotům. Přitom jejich nevýhody způsobují značnou problematiku v oblasti návrhu.

Tato práce rozebírá problematiku planárního pantografu (Sekce 1) a to z hlediska velikosti pracovního prostoru, singularit manipulátor a přesnosti dosažení požadované přesnosti pro režimy, ve kterých manipulátor může pracovat. K tomu byl odvozen kinematický model planárního pantografu (Sekce 2), který je dále využit i k návrhu rozměrů délek ramen manipulátoru.

Sekce 3 uvádí postup navržení manipulátoru pro požadovanou velikost obdélníkového pracovního prostoru manipulátoru, jenž bude využívat co nejvíce ze svého dosažitelného prostoru. Součástí tohoto návrhu je i zamezení nastavení pozic, které by mohli způsobit poškození manipulátoru nebo jeho neřízené přenastavení do jiné konfigurace.

Pro rozměry získané návrhem je v Sekci 4 vytvořen 3D model manipulátoru, jež je následně vytvořena 3D tiskem. Pro pohyb konstrukce jsou použity servomotory RX-64, pro jejichž konfiguraci a ovládání je vytvořena aplikace (Sekce 5).

V Sekci 6 je představena problematika přesného nastavení požadované pozice planárního pantografu a vypočtena maximální odchylka manipulátoru v závislosti na přesnosti nastavení pozice servomotorů RX-64 a přesnosti výroby ramen manipulátoru, které jsou mezi sebou porovnány. Na to navazuje Sekce 7, ve které je provedena kalibrace vytvořeného manipulátoru a následně provedeny měření přesnosti nastavení pozice a odchylky od této pozice při různých nastavení parametrů motorů. Dále je testován vliv tuhosti konstrukce na změnu pozice. Tyto vlastnosti jsou porovnány i mezi možnými konfiguracemi manipulátoru.

1 Paralelní robot

Paralelní robot se skládá z několika jednoduchých řetězců kloubů, které jsou spojeny do uzavřených smyček. Oproti tomu sériový robot je tvořen jedním řetězcem kloubů. Paralelní robot v porovnání se sériovým má lepší:

- přesnost,
- tuhost,
- užitečné zatížení,
- setrvačnost.

Za to trpí:

- menším pracovním prostorem,
- více singulárními konfiguracemi v pracovním prostoru (Sekce 1.1.3).

Tento rozdíl vlastností je způsobem právě uzavřenými smyčkami paralelních robotů a tím, že akční členy jsou připevněny právě na základnu robotu a tedy nezatěžují konstrukci samotného robota a jejich pozice se nemění [1].

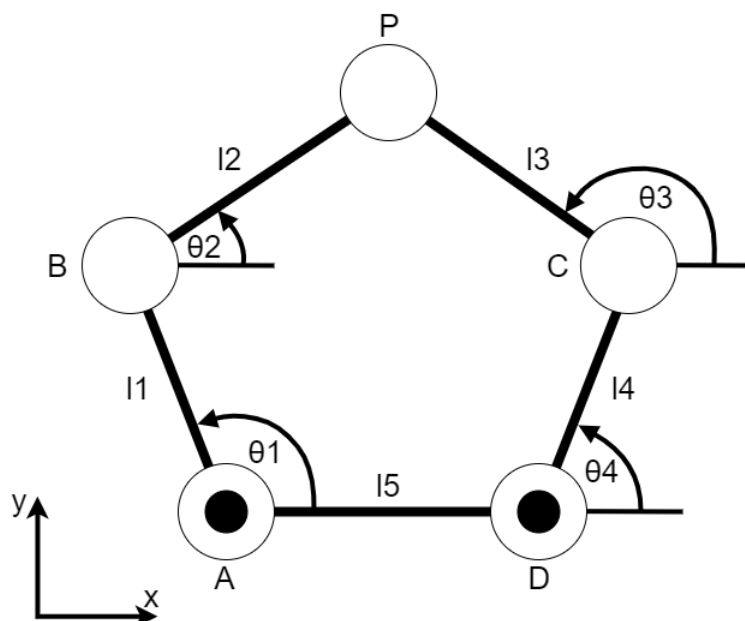
Aplikace paralelních robotů můžeme najít v: a) automobilových a leteckých simulacích, b) jídelním průmyslu, c) obráběcích strojích, d) přesných usazovacích pozicích, e) rychlém balení, f) medicíně a dalších [2].

1.1 Planární pantograf

Planární pantograf, v angličtině *five-bar linkage*, také označován jako $5R$, je systém z kategorie paralelních robotů skládající se z pěti rotačních kloubů a pěti spojených ramen tvořících uzavřenou smyčku, názorný příklad na Obrázku 1.1. Většinou se jedná o systém se dvěma Degrees Of Freedom - stupeň volnosti (DOF). Ke změně pozice tedy dochází za pomoci dvou motorů, jež jsou převážně spojeny nepohyblivým ramenem, které tvoří úchytnou plochu pro celého robota. Klouby planárního pantografu jsou rozděleny do dvou základních skupin:

1. **Klouby aktivní** - jejich součástí je aktivní prvek (motor).
2. **Klouby pasivní** - neobsahují žádný aktivní prvek.

V této práci je použito značení dle Obrázku 1.1, ve kterém jsou jednotlivé klouby označeny písmeny A , B , C , D a P . Kloub A ležící na souřadnicích $[0;0]$ je spolu s kloubem D jedinými aktivními klouby. Klouby B , C a P představují klouby pasivní a kloub P je efektozem robotu. Ramena l_1 a l_4 jsou ovládaná motory, ramena l_2 a l_3 jsou volná ramena a rameno l_5 je nepohyblivé. Úhly θ_1 , θ_2 , θ_3 a θ_4 jsou odvozovány od osy X , což se liší od Denavit Hartenberova popisu, kde jsou odvozeny dle předchozího ramene. Proto pro určení zcela napnutého nebo složeného řetězce je potřeba znát oba úhly.



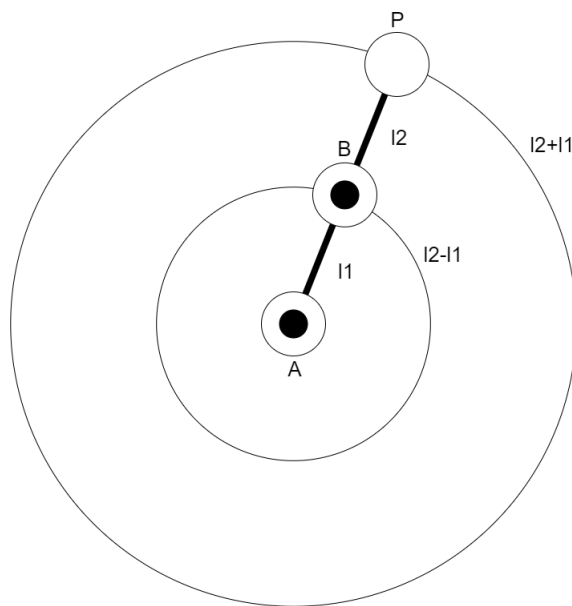
Obr. 1.1: Schéma planárního pantografu.

1.1.1 Pracovní prostor

Teoretický pracovní prostor je definován všemi body, kterých může efektor dosáhnout při rotaci obou aktivních kloubů o 0° až 360° . Pro zjednodušení v tomto případě nebereme v potaz singularity a mechanická omezení.

Pro zobrazení teoretického pracovního prostoru začneme s jedním řetězcem paralelního manipulátoru neboli sériovým robotem se dvěma aktivními klouby. Teoretický pracovní prostor takového robota je zobrazen na Obrázku 1.2. Protože máme dva takovéto pracovní prostory spojené skrze efektor, tak teoretický pracovní prostor planárního pantografu je průnikem těchto dvou prostorů. Výsledný tvar ovlivňuje délka ramene l_5 . V tabulce 1.1 jsou uvedena řešení teoretického pracovního prostoru symetrického planárního pantografu v závislosti na poměru velikosti ramen.

Reálný pracovní prostor získáme aplikováním právě zanedbaných mechanických omezení na teoretický pracovní prostor a dále je potřeba stanovit, zda brát v potaz singularity. U některých konfigurací velikosti ramen nebo již právě použitými mechanickými omezeními můžeme singularity typu 2 a 3 (Sekce 1.1.3) vyloučit nebo posunout mimo pracovní prostor (Sekce 3). Poté zůstanou pouze singularity typu 1, které omezí pracovní prostor dle toho, v jakém pracovním režimu se manipulátor nachází, nebo se nemusí brát v potaz, protože se týkají aktivních kloubů (Sekce 1.1.2) [3, 7].



Obr. 1.2: Pracovní prostor sériového robota.

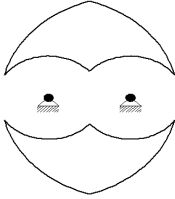
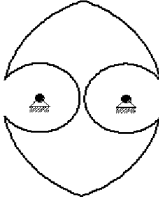
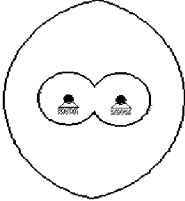
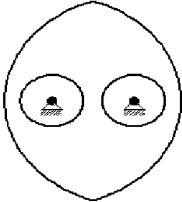
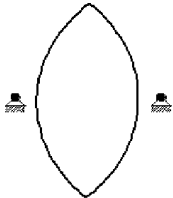
1.1.2 Pracovní režimy

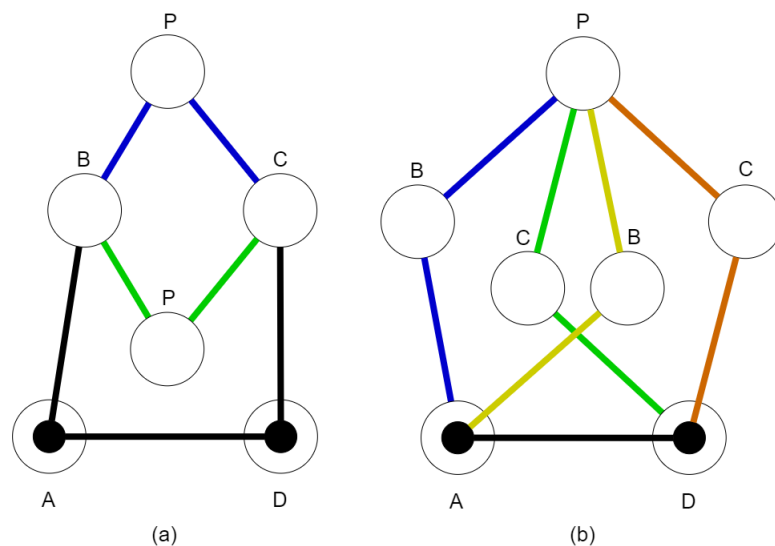
Pracovní prostor planárního pantografu je závislý na režimu, ve kterém je po sestavení. Těchto režimů je osm, přičemž v každém režimu má manipulátor přístup k jinému pracovnímu prostoru. Pokud je to mechanicky umožněno, tak manipulátor může přecházet mezi jednotlivými režimy a tak zvýšit svůj pracovní prostor. Ale aby mohl změnit svůj pracovní režim, tak musí projít přes singulární konfigurace, které jsou popsány v sekci 1.1.3.

U planárního pantografu je možné pro jedno nastavení aktivních kloubů θ_1 a θ_4 mít dvě různé pozice efektoru, jak znázorňuje Obrázek 1.3a. Horní konfiguraci nazveme řešením, jež je vzdálenější od ramene l_5 a spodní konfiguraci druhé řešení. Půjdeme-li inverzně a díky tomu budeme vědět polohu efektoru, tak existují čtyři řešení nastavení aktivních kloubů θ_1 a θ_4 , při kterých této pozice dosáhneme viz Obrázek 1.3b. Tyto čtyři řešení označíme jako a) ++, b) -+, c) +-, d) --.

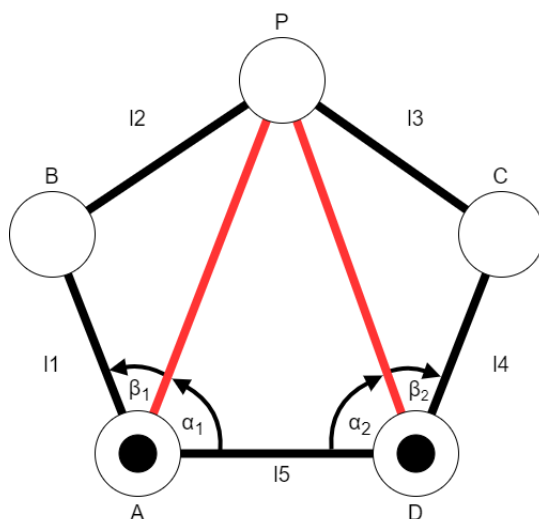
Určit pracovní režim lze podle úhlů β_1 a β_2 (Obrázek 1.4). Když je robot v horní konfiguraci a platí $0^\circ < \beta_i < 180^\circ$, tak je řetězec v + režimu. V případě spodní konfigurace je tomu naopak. Tabulka 1.2 shrnuje určení, v jakém pracovním režimu se robot nachází vzhledem k jeho konfiguraci.

Tab. 1.1: Pracovní prostor planárního pantografu v závislosti na poměru délek ramen, kde $l_1 = l_4 < l_2 = l_3$. [3]

Kombinace	Pracovní prostor	Poměry velikosti ramen
1		$2l_1 < l_5 < 2l_2$ $2l_2 > l_5 + 2l_1$
2		$2l_1 < l_5 < 2l_2$ $2l_2 \leq l_5 + 2l_1$
3		$l_5 \leq 2l_1$ $2l_2 > l_5 + 2l_1$
4		$l_5 \leq 2l_1$ $2l_2 \leq l_5 + 2l_1$
5		$2l_2 \leq l_5 \leq 2l_1 + 2l_2$ $2l_2 > l_5 + 2l_1$

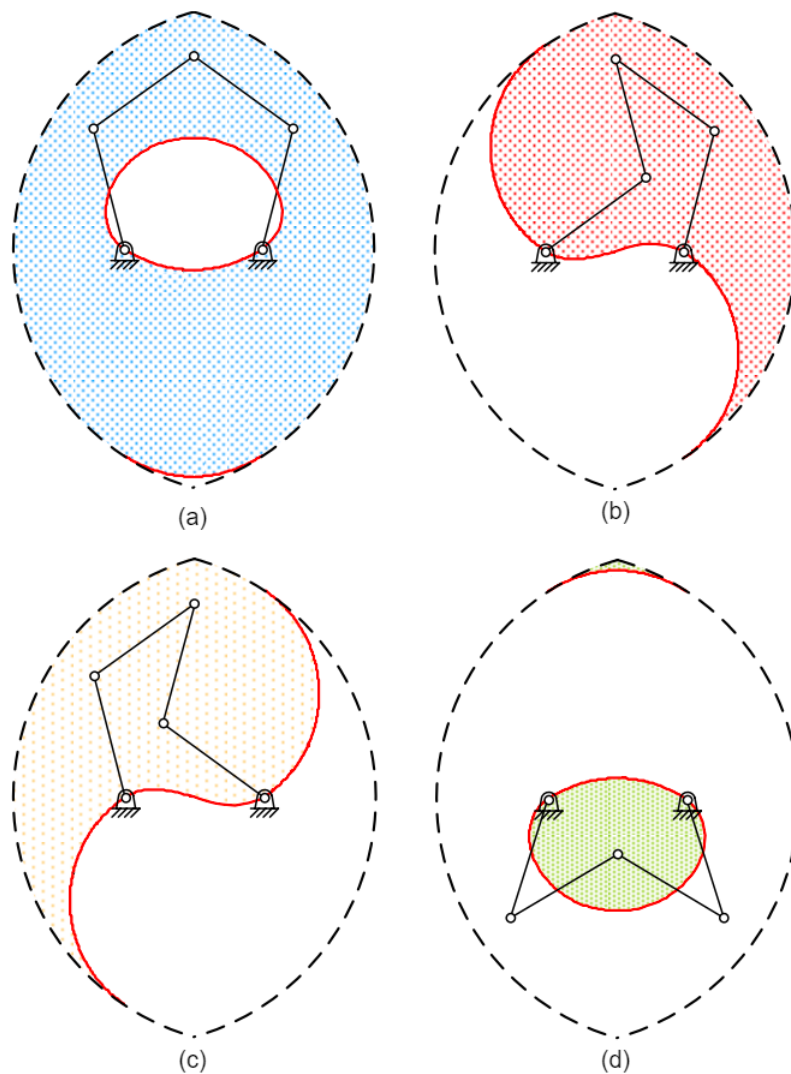


Obr. 1.3: Pracovní režimy (a) možné pozice efektoru při nastavení aktivních kloubů, (b) možná nastavení aktivních kloubů k dosažení určité pozice efektoru.



Obr. 1.4: Určení pracovního režimu.

Na Obrázku 1.5 je zobrazen pracovní prostor planárního pantografu, jenž má stejnou délku všech ramen. Červená křivka znamená singularitu druhého typu. Najetí na tuto křivku v daném pracovní režimu by mohl způsobit přechod do druhého konfiguračního sestavení. Přejít do jiného režimu je možné přes singularitu prvního typu, ze které jsme schopni ovlivnit, kam se z ní přesunem, protože je zde ve vazbě ovládané rameno. Díky těmto přesunům mezi pracovními režimy můžeme zvětšit pracovní prostor manipulátoru [6].



Obr. 1.5: Pracovní prostor v závislosti na pracovním režimu: (a)++ (b)−+ (c)+− (d)−− u manipulátoru se stejnou délkou ramen [6].

Tab. 1.2: Určení pracovního režimu dle úhlů β_1 , β_2 pro horní a spodní konfiguraci

Pracovní režim	Konfigurace							
	Horní				Spodní			
	$<\beta_1<$		$<\beta_2<$		$<\beta_1<$		$<\beta_2<$	
++	0°	180°	0°	180°	180°	360°	180°	360°
−+	180°	360°	0°	180°	0°	180°	180°	360°
+−	0°	180°	180°	360°	180°	360°	0°	180°
−−	180°	360°	180°	360°	0°	180°	0°	180°

1.1.3 Singularity

Součástí návrhu každého robota je vyšetření singulárních konfigurací robota, jinak může dojít k poškození manipulátoru nebo nemožnosti dosáhnout cílového polohy. V singulární poloze může robot:

- ztratit 1 DOF;
- vyžadovat nekonečnou rychlost;
- požadovat nekonečné síly nebo moment;
- být na hranici pracovního prostoru - pokud se mechanické provedení liší od teoretického, tak nemusí dané pozice dosáhnout;
- mít nejednoznačné řešení Inverzní Kinematická Úloha (IKU) [5].

Jednou z nevýhod paralelních robotů je větší počet singulárních konfigurací než u sériových. Zvýšený počet singulárních pozic je způsoben právě vzájemnými vazbami paralelních ramen. Singularity planárního pantografu lze rozdělit na tři typy.

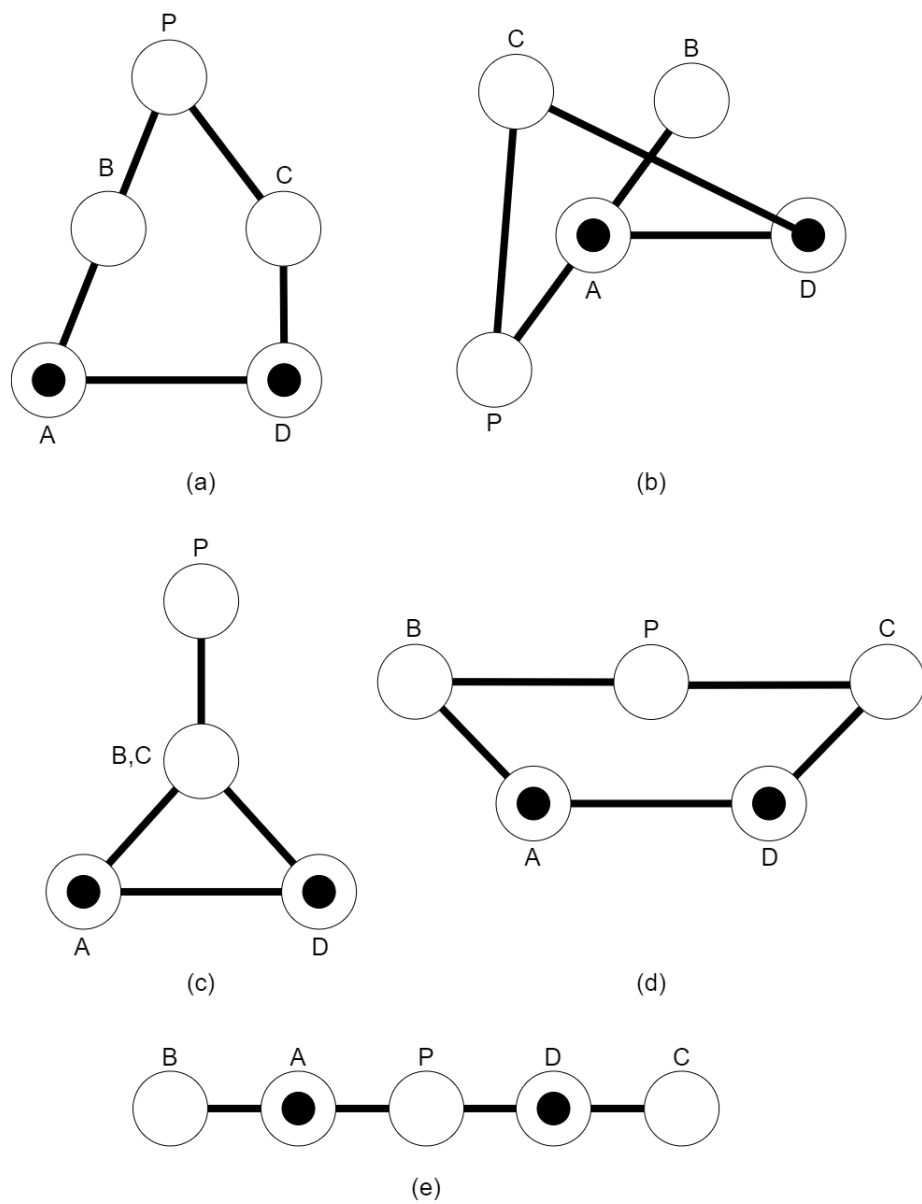
První typ nastane, pokud platí Rovnice 1.1. To odpovídá konfiguracím, kdy je alespoň jeden řetězec zcela natažen (Obrázek 1.6a) nebo složen (Obrázku 1.6b), přičemž robot ztratí 1 DOF. Zároveň se při této konfiguraci se robot nachází minimálně mezi dvěma pracovními režimy (Sekce 1.1.2).

$$\sin(\theta_1 - \theta_2) \cdot \sin(\theta_3 - \theta_4) = 0 \quad (1.1)$$

Druhý typ nastane při splnění Rovnice 1.2. Jedná se o konfigurace robota z Obrázku 1.6c-d, kde volná ramena jsou v rovině. Oproti prvnímu typu je tato singularita problematičtější. Při této konfiguraci se robot dostane na hranici dvou pracovních režimů. A protože se týká volných ramen, tak nemůžeme určit do jakého režimu přejde.

$$\sin(\theta_2 - \theta_3) = 0 \quad (1.2)$$

Třetí typ je kombinací předchozích dvou typů, jak je zřejmé z Obrázku 1.6 [3, 4].



Obr. 1.6: Singularity obecného planárního pantografu (a-b) prvního typu (c-d) druhého typu (e) třetího typu.

2 Kinematický model

Kinematický model popisuje geometrický vztah mezi kloubovými souřadnicemi a uspořádáním manipulátoru v prostoru. Ramena jsou brána jako tuhá tělesa, která jsou spojena klouby, jež omezují jejich pohyb [13].

2.1 Přímá kinematická úloha

Přímá Kinematická Úloha (PKU) je výpočet pozice a orientace efektoru manipulátoru při známých vstupních souřadnicích kloubů.

Pro řetězec A, B, P získáme pozici efektoru $[P_x; P_y]$ z Rovnic 2.1 a 2.2 a obdobně i pro řetězec D, C, P z Rovnic 2.3 a 2.4 vyjádříme pozici efektoru. Orientaci efektoru je možné vynechat, protože manipulátor bude kreslit tužkou a její natočení není pro daný úkol nijak podstatný.

$$l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_2) = P_x \quad (2.1)$$

$$l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_2) = P_y \quad (2.2)$$

$$l_3 \cos(\theta_3) + l_4 \cos(\theta_4) + l_5 = P_x \quad (2.3)$$

$$l_3 \sin(\theta_3) + l_4 \sin(\theta_4) = P_y \quad (2.4)$$

kde: P_x - souřadnice efektoru v ose X

P_y - souřadnice efektoru v ose Y

Ovšem B a C jsou pasivní klouby, takže neznáme jejich natočení a nejsme schopni ze zmíněných rovnic pro daný řetězec spočítat výslednou polohu efektoru. Poněvadž je manipulátor tvořen uzavřenou smyčkou, tak se Rovnice 2.1, 2.3 a 2.2, 2.4 musí rovnat a můžeme je zapsat ve tvaru Rovnice 2.5, 2.6 [9].

$$l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_2) - l_3 \cos(\theta_3) - l_4 \cos(\theta_4) - l_5 = 0 \quad (2.5)$$

$$l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_2) - l_3 \sin(\theta_3) - l_4 \sin(\theta_4) = 0 \quad (2.6)$$

Vyřešením těchto rovnic získáme dvě řešení θ_2 a θ_3 , jež odpovídají horní a spodní konfiguraci (Sekce 1.1.2). Dále úpravou rovnic se dostaneme k Rovnicím 2.7 - 2.10. Upravení rovnic do toho tvaru je vhodné, protože použití programu MATLAB¹ a

¹<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

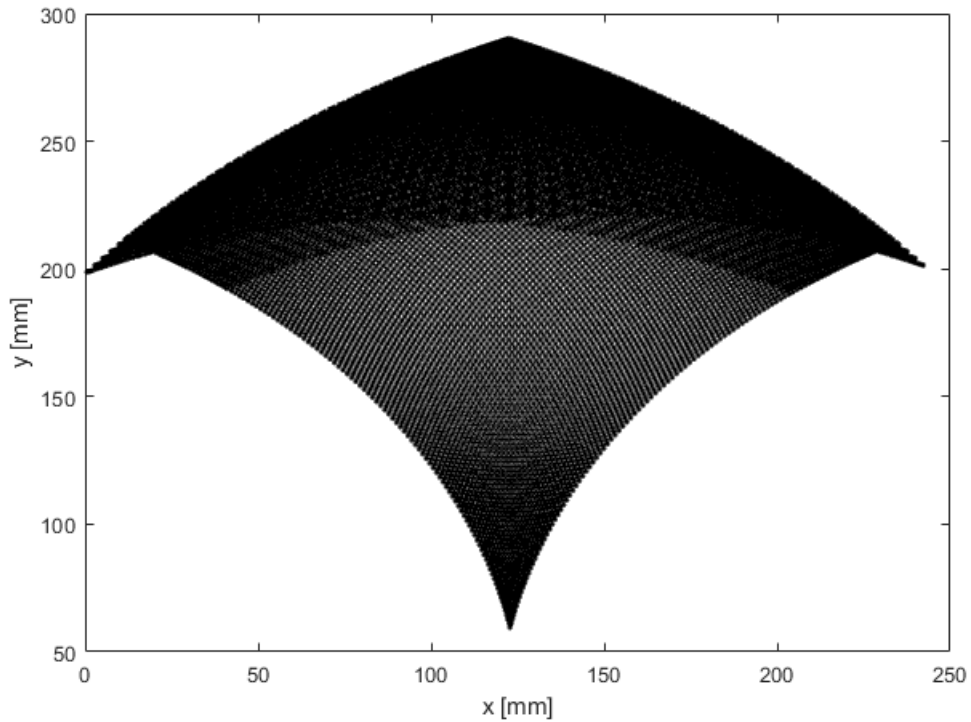
jeho funkce *solve*, pro výpočet úhlů θ_2 a θ_3 , je značně výpočetně náročné. A pro více konfigurací úhlů θ_1 a θ_4 velmi zdlouhavé. Výpočet více konfigurací odpovídá právě zjištění pracovního prostoru (Obrázek 2.1), jenž je důležitý pro návrh manipulátoru dle Sekce 3.

$$a = -l_1 \cos(\theta_1) + l_4 \cos(\theta_4) + l_5 \quad (2.7)$$

$$b = -l_1 \sin(\theta_1) + l_4 \sin(\theta_4) \quad (2.8)$$

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{\frac{l_2^2 - a^2 - l_3^2 - b^2}{2l_3}}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right) \quad (2.9)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{-l_1 \cos(\theta_1) + l_3 \cos(\theta_3) + l_4 \cos(\theta_4) + l_5}{l_2} \right) \quad (2.10)$$



Obr. 2.1: Výpočet PKU v prostředí MATLAB pro získání pracovního prostoru, kde $l_1 = l_4 = 95\text{mm}$, $l_2 = l_3 = 220\text{mm}$, $l_5 = 245\text{mm}$, $\theta_1 = \theta_4 = 0^\circ\text{-}180^\circ$ s krokem 1° .

Vypočteme-li i pozici pasivních kloubů (Rovnice 2.11 - 2.14), tak dostaneme plnohodnotný kinematický model, na kterém můžeme simulovat pohyb manipulátoru

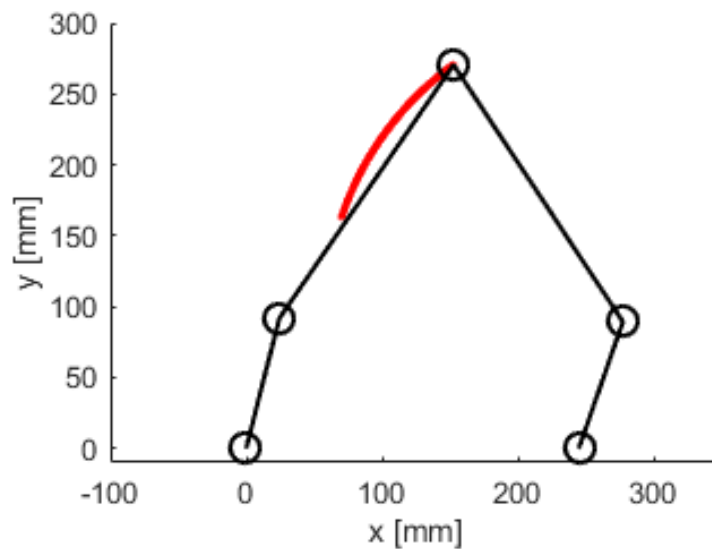
a jeho trajektorii v závislosti na změně úhlu aktivních kloubů viz Obrázek 2.2. Tento obrázek je jedním z několika obrázků, které znázorňují trajektorii efektoru z jednoho bodu do druhého a současnou konfiguraci.

$$l_1 \cos(\theta_1) = B_x \quad (2.11)$$

$$l_1 \sin(\theta_1) = B_y \quad (2.12)$$

$$l_4 \cos(\theta_4) + l_5 = C_x \quad (2.13)$$

$$l_4 \sin(\theta_4) = C_y \quad (2.14)$$



Obr. 2.2: Vykreslení trajektorie (červeně) s aktuální konfigurací kinematického modelu v prostředí MATLAB.

2.2 Inverzní kinematická úloha

V Sekci 2.1 byla popsána přímá kinematická úloha, jež popisuje výstup manipulátoru na základě vstupu, jinak řečeno přepočítání úhlů aktivních kloubů na pozici efektoru. Inverzní kinematická úloha je opak a popisuje vstup, když známe výstup nebo-li přepočítání pozice efektoru na natočení ramen.

Pro výpočet inverzní kinematické úlohy vyjdeme z Rovnic 2.1 - 2.4, které upravíme na tvar Rovnic 2.15 - 2.18 [9].

$$P_x - l_1 \cos(\theta_1) - l_2 \cos(\theta_2) = 0 \quad (2.15)$$

$$P_y - l_1 \sin(\theta_1) - l_2 \sin(\theta_2) = 0 \quad (2.16)$$

$$P_x - l_3 \cos(\theta_3) - l_4 \cos(\theta_4) - l_5 = 0 \quad (2.17)$$

$$P_y - l_3 \sin(\theta_3) - l_4 \sin(\theta_4) = 0 \quad (2.18)$$

Zatímco u přímé úlohy rovnice pro jednotlivé řetězce obsahovaly tři neznáme proměnné, u inverzní úlohy máme pouze dvě. Takže pro dosažení známého bodu efektoru není konfigurace řetězce A , B , P závislá na řetězci D , C , P a naopak. Úpravou rovnic dostaneme Rovnice 2.19 - 2.22 vyjadřující θ_1 , θ_2 , θ_3 a θ_4 . A jejich vyřešením získáme čtyři konfigurace viz Sekce 1.1.2.

$$\theta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{\frac{l_2^2 - P_x^2 - P_y^2 - l_1^2}{-2l_1}}{\sqrt{P_x^2 + P_y^2}} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{P_y}{P_x} \right) \quad (2.19)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{P_x - l_1 \cos \theta_1}{l_2} \right) \quad (2.20)$$

$$\theta_4 = \cos^{-1} \left(\frac{\frac{l_3^2 - P_x^2 - l_5^2 - P_y^2 - l_4^2 + 2P_x l_5}{2l_4}}{\sqrt{(l_5 - P_x)^2 + P_y^2}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{P_y}{l_5 - P_x} \right) \quad (2.21)$$

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{P_x - l_4 \cos \theta_4 - l_5}{l_3} \right) \quad (2.22)$$

3 Teoretický návrh manipulátoru

V Sekci 1.1 byla provedena analýza planárního pantografu a představeny problémy, které je potřeba vzít do úvahy v samotném návrhu manipulátoru. Snahou je navrhnout optimální manipulátor. Abychom toho byli schopni tak musíme být schopní: a) vyhodnotit parametry, b) určit rozměry manipulátoru. Pro každou aplikaci můžeme hodnotit různé kombinace kritických parametrů manipulátoru. Těmito parametry může být:

- velikost pracovního prostoru,
- singularity,
- přesnost,
- tuhost,
- obratnost,
- a další.

Zmíněné parametry jsou z velké části závislé na rozměrech manipulátoru nebo-li na velikosti ramen a jejich poměru. Určení těchto rozměrů je nejobtížnější částí návrhu manipulátoru [7].

Cílem této kapitoly je navrhnout optimální matematický model manipulátoru, jenž drží tužku v pasivním kloubu P , kterou značí svoji trajektorii na list papíru. Manipulátor bude navržen tak, aby pokryl požadovaný pracovní prostor o rozměrech 120x80mm, kde delší rozměr je ve směru osy X .

3.1 Sestavitelnost

V první řadě je zapotřebí stanovit podmínky, při kterých je vůbec možné složit planární pantograf. Podmínkou pro sestavení paralelního manipulátoru je vytvořit uzavřenou smyčku, čehož lze dosáhnout pouze pokud žádné rameno není delší než součet zbývajících ramen. Toto tvrzení je známo jako teorém sestavitelnosti a pro N -ramenný manipulátor jej vystihuje Rovnice 3.1 [8].

$$l_n \leq l_1 + l_2 + \dots + l_{n-1} \quad (3.1)$$

kde: n - počet ramen
 l_n - je největší z ramen

3.2 Schopnost úplné rotace

Po zajištění sestavitelnosti, lze dále pokračovat zajištěním schopnosti úplné rotace ($0^\circ-360^\circ$) aktivních kloubů, přestože motory, které budou použity (Sekce 4.1), tuto možnost nemají. To jednak z důvodu, že zatím není známo, jaké rozpětí úhlu bude potřeba a tím pádem zajistíme všechny možné případy. Například zda požadovaného pracovního prostoru dosáhneme v rozsahu $0^\circ-300^\circ$ nebo $30^\circ-330^\circ$. Další důvod pro zajištění plné rotace obou aktivních kloubů nastane při zprovoznování manipulátoru, protože nemůže nastat konfigurace na Obrázku 1.6d, při které další pohyb může roztrhnout či jinak poškodit manipulátor. Což znamená zmenšení počtu nebo úplnou eliminaci singularity z Obrázku 1.6d. Schopnost úplné rotace pěti ramenného manipulátoru je zajištěna splněním Rovnice 3.2 a pokud mezi dvěma pasivními klouby je pouze jedno rameno, které je jedním ze tří nejdelších.

$$l_1 + l_4 + l_5 \leq l_2 + l_3 \quad (3.2)$$

kde: $l_1 \leq l_4 \leq l_2 \leq l_4 \leq l_5$

Splnění Rovnice 3.2 nevylučuje přítomnost zmíněné singularity, protože je stále možná konfigurace z Obrázku 1.6e. Pro její eliminaci upravíme rovnici na tvar Rovnice 3.3 [8].

$$l_1 + l_4 + l_5 < l_2 + l_3 \quad (3.3)$$

Z důvodů jednodušší konstrukce manipulátoru vezmeme v potaz, že ramena l_1 a l_4 jsou ve stejné výšce s motory a tudíž je možná jejich kolize mezi sebou. Proto pro umožnění úplné rotace zavedeme další podmínku (Rovnice 3.4). Zajištěním této podmínky zároveň eliminujeme singularitu z Obrázku 1.6c.

$$l_1 + l_4 + k < l_5 \quad (3.4)$$

kde: $0 < k$ - bezpečná vzdálenost

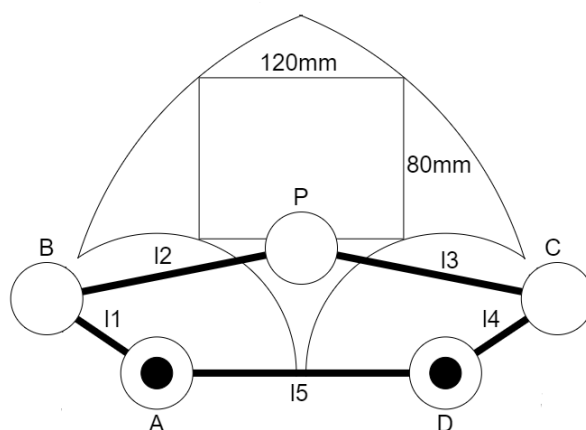
Konstanta k je součet vzdáleností od os otáčení kloubů B a C k jejich okraji a vzdálenost mezi těmito okraji, která musí být zvolena s úvahou na přesnost konstrukce manipulátoru [3]. Jestliže kolize ramen nehrozí a není splněna podmínka z Rovnice 3.4 je možné stále eliminovat danou singularitu splněním alespoň jedné z Rovnic 3.5, 3.6.

$$l_1 + l_4 < l_5 \quad (3.5)$$

$$l_2 \neq l_3 \quad (3.6)$$

3.3 Určení pracovního prostoru

Pracovní prostor je závislý na délce ramen, rozsahu nastavení θ_1 a θ_4 a pracovním režimu. Nejdříve prohlásíme, že manipulátor bude symetrický ($l_1=l_4$, $l_2=l_3$). Nesymetrický manipulátor by pro zvolenou úlohu neměl žádnou výhodu a výpočet pracovního prostoru by byl značně náročnější. Dodržením podmínek v Sekci 3.2 eliminuje všechny singularity typu 2 a 3. Tyto podmínky zároveň definují tvar pracovního prostoru, který bude odpovídat první kombinaci v Tabulce 1.1. Dále bude návrh proveden pro horní konfiguraci manipulátoru. Poslední omezení se týká rozsahu aktivních kloubů. První omezení vzniká již z použitých motorů, které mají rozsah $0^\circ-300^\circ$. Tento rozsah ale ještě z konstrukčních důvodů omezíme. Jak bylo řečeno v Sekci 3.2, ramena jsou umístěna ve stejné výšce jako motory a je možná jejich kolize. Této kolizi lze zabránit právě dodatečným omezením rozsahu úhlů θ_1 a θ_4 nebo do určité míry zvětšením ramen l_2 a l_3 . Z důvodů tuhosti manipulátoru je kladen požadavek na co nejmenší ramena, ale omezením úhlů se zmenší pracovní prostor. Vyřešením tohoto problému dostaneme model manipulátoru. Obrázek 3.1 znázorňuje popsanou problematiku.



Obr. 3.1: Zobrazení požadovaného pracovního prostoru uvnitř teoretického pracovního prostoru.

Z Obrázku 3.1 odvodíme Rovnici 3.7 [3]. Tento tvar rovnice počítá s natažením a složením obou řetězců. I přestože mají motory omezený rozsah tak je možné je nastavit tak, aby bylo umožněno natažení a složení obou řetězců. Ale již zvolená mechanická omezení konstrukce to neumožňují.

$$\sqrt{(l_1 + l_2)^2 - \left(\frac{l_5 + s}{2}\right)^2} - \sqrt{(l_2 - l_1)^2 - \left(\frac{l_5 - s}{2}\right)^2} = v \quad (3.7)$$

kde: s - šířka pracovního prostoru
 v - výška pracovního prostoru

Proto z Rovnice 3.7 vyjádříme P_y pro složené rameno, při kterém dosáhneme požadovaných rozměrů pracovního prostoru. Dosazením do Rovnic 2.15 - 2.18 dostaneme Rovnice 3.8 - 3.11. A vyřešením této inverzní kinematické úlohy získáme úhly θ_1 , θ_2 , θ_3 a θ_4 , při kterých dosáhneme požadovaného pracovního prostoru. Pokud θ_1 a θ_4 budou v rozsahu možných konfigurací, tak bylo nalezeno řešení poměrů délek ramen zajišťující určený pracovní prostor se všemi omezeními. Rozsah možných konfigurací je vhodné zmenšit oproti skutečnému, protože:

- při řešení rovné hranici rozsahu nemusí být krajní body kvůli mechanickým nepřesnostem dosažitelné,
- motory mají omezenou přesnost a proto části požadovaného pracovního prostoru nemusí ležet uvnitř reálného pracovního prostoru manipulátoru.

$$\frac{l_5 - s}{2} - l_1 \cos(\theta_1) - l_2 \cos(\theta_2) = 0 \quad (3.8)$$

$$\sqrt{(l_1 + l_2)^2 - \left(\frac{l_5 + s}{2}\right)^2} - v - l_1 \sin(\theta_1) - l_2 \sin(\theta_2) = 0 \quad (3.9)$$

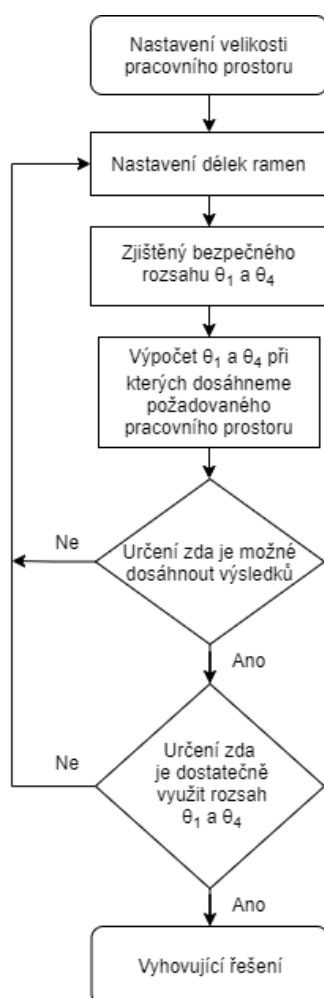
$$\frac{l_5 + s}{2} - l_3 \cos(\theta_3) - l_4 \cos(\theta_4) - l_5 = 0 \quad (3.10)$$

$$\sqrt{(l_3 + l_4)^2 - \left(\frac{l_5 + s}{2}\right)^2} - v - l_3 \sin(\theta_3) - l_4 \sin(\theta_4) = 0 \quad (3.11)$$

Postupem uvedeným na Obrázku 3.2 byli nalezeny následující délky ramen:

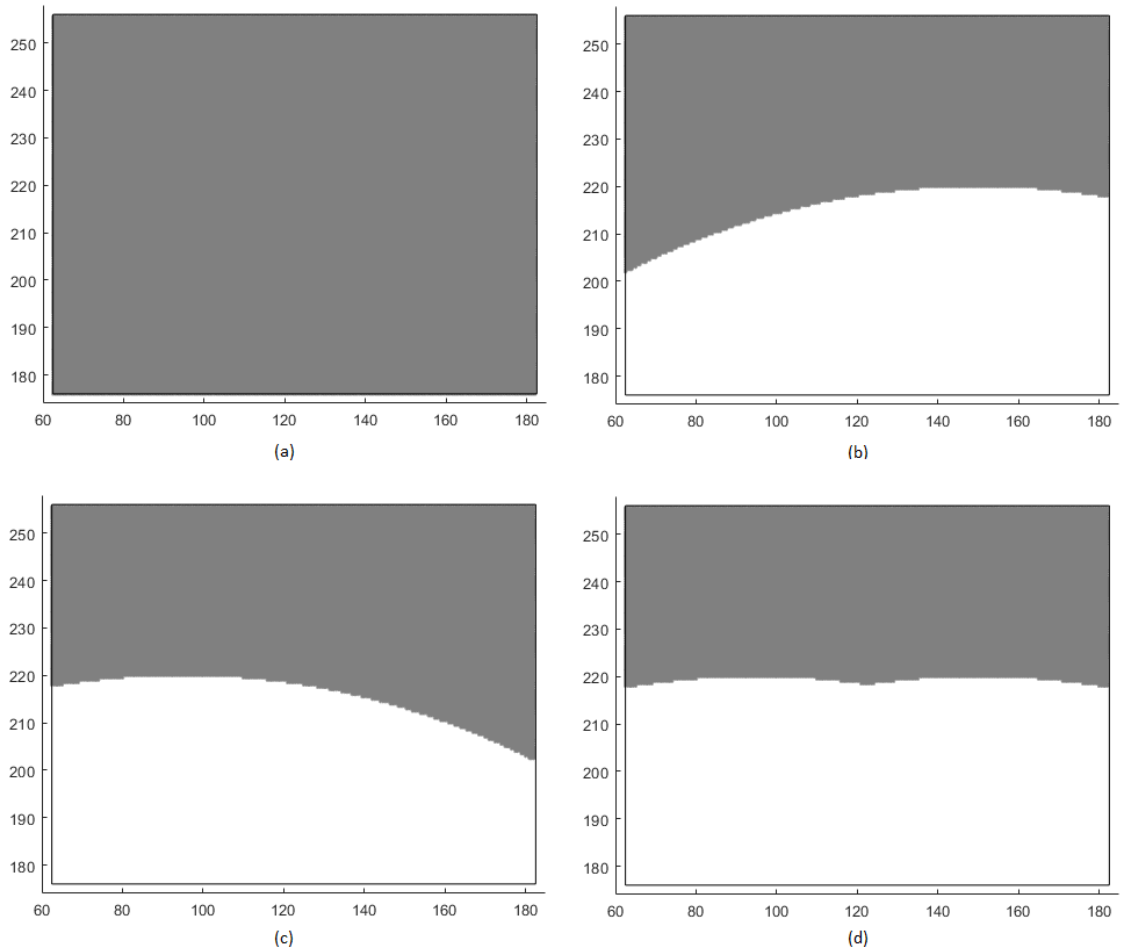
- $l_1 = l_4 = 95\text{mm}$,
- $l_2 = l_3 = 220\text{mm}$,
- $l_5 = 245\text{mm}$.

Zvolená šířka ramen = 28mm, vzdálenost hrany ramene od osy otáčení = 14mm, konstanta k z Rovnice 3.4 je stanovena na 38mm, bezpečný rozsah pro $\theta_1 = 0^\circ\text{-}170^\circ$ a pro $\theta_4 = 10^\circ\text{-}180^\circ$. Bezpečný rozsah úhlů byl zjišťován z grafu, ve kterém byla vykreslena hrana ramene a pozice motoru pro krajní hodnotu rozsahu. Rozsah byl poté zmenšován, dokud nebyla zajištěna bezpečná vzdálenost motoru a ramen. Zmíněné rozsahy byly zmenšeny z každé strany o 3° pro určení, zda výsledek spadá do dosažitelného rozsahu. Pro zjednodušení návrhu mechanické části planárního pantografu byl ihned na začátku tento rozsah omezen pro θ_1 i θ_4 na $0^\circ\text{-}180^\circ$. Kvůli velké výpočetní náročnosti celého návrhu byl bezpečný rozsah a délky ramen ručně kontrolovány a nastavovány.



Obr. 3.2: Postup návrhu délek ramen pro požadovaný pracovní prostor.

Při této délce ramen se rohy požadovaného pracovního prostoru nachází na pozicích $[62,5;176]$, $[182,5;176]$, $[182,5;256]$ a $[62,5;256]$ mm. Protože je rozsah úhlů θ_1 a θ_4 omezen je možno dosáhnout všech pozic v požadovaném pracovní prostoru pouze konfigurací $++$. Zbývající pracovní režimy mohou nastavit pouze omezenou část tohoto prostoru, jenž odpovídá Obrázku 3.3.



Obr. 3.3: Dosažitelné pozice v pracovním prostoru konfigurací (a) $++$, (b) $-+$, (c) $+-$, (d) $--$. Černě ohraničený požadovaný pracovní prostor a šedě pozice dosažitelné danou konfigurací.

4 Vytvoření fyzického modelu

Návrh mechanického provedení manipulátoru (Sekce 4.2) byl vytvořen v programu Autodesk Inventor¹ a výkresy jednotlivých částí jsou v Přílohách C-I. Rozměry ramen vychází z výpočtů a předpokladů uvedených v Sekci 3 a z rozměrů použitých motorů (Příloha B). K tomu byly vytvořeny prvky pro rozvod napájecích a datových vodičů (Příloha 4.3). Všechny navržené komponenty byly vytvořeny 3D tiskem metodou Fused Deposition Modeling - modelování depozicí taveniny (FDM).

4.1 Servomotor RX-64

Pro nastavení úhlů θ_1 a θ_4 jsou použity dva servomotory DYNAMIXEL RX-64. V Tabulce 4.1 jsou uvedeny parametry těchto motorů. Obrázek B.1 zobrazuje rozsah (ne)dosažitelných úhlů v rámci konstrukce motoru. Obrázky B.2 - B.4 popisují rozměry motorů, které budou brány v potaz při návrhu mechanické konstrukce manipulátoru. K vytvoření návrhu manipulátoru (Obrázek 4.2) byl využit již vytvořený 3D model výrobce². Zapojení motorů je rozebráno v Sekci 4.3 a jejich řízení v Sekci 5.1.

Tab. 4.1: Parametry servomotoru RX-64 [10].

Parametr	Specifikace
Rozsah úhlů	$0^\circ \sim 300^\circ$
Rozlišení	0.29°
Napájecí napětí	$12 \sim 18.5V$
Zastavovací moment	$5.3 [N.m]$ (při $18.5V$; $2.6A$)
Převodový poměr	$200 : 1$
Rychlost bez zatížení	$64rpm$ (při $18.5V$)
Pracovní teplota	$-5^\circ C \sim +80^\circ C$
Zpětná vazba	Pozice, teplota, zatížení, napájecí napětí
Fyzické připojení	RS485 Multi Drop Bus
Typ protokolu	Poloviční duplex asynchronní sériová komunikace (8bit, 1stop, Bez parity)
Přenosová rychlost	$7343 bps \sim 1 Mbps$
Materiál	Plně kovová převodovka, plastové tělo
Hmotnost	$125g$

¹<https://www.autodesk.cz/products/inventor/overview>

²<http://en.robotis.com/service/download.php?no=112>

4.2 Návrh mechanického modelu

V Sekci 3 byly určeny některé rozměry ramen a báze, ze kterých se dále vychází. Manipulátor je složen z řetězců, jež jsou identické a tak pasivní klouby, aktivní a pasivní ramena jsou navržena tak, aby byl jeden díl použitelný v obou řetězcích.

Návrh je vhodné začít od aktivního ramene (Příloha D), na jehož výšce záleží zbylé díly manipulátoru. Pro zvýšení tuhosti manipulátoru jsou použity dvě desky uchycené z obou stran k motoru a k pasivnímu rameni, dále jsou tyto desky uprostřed propojeny, čímž je vytvořen díl ve tvaru písmene H. Propoj desek zároveň musí být uzpůsoben tak, aby umožňoval nastavit pozice v požadovaném pracovním prostoru. Na straně připojené k motoru stačí zvolit vzdálenost od osy otáčení větší než vzdálenost části samotného motoru v rozsahu 0° - 180° . Pro druhou stranu již určení tohoto rozsahu není tak zřejmé a pro jeho určení lze použít PKU (Sekce 2.1) nebo IKU (Sekce 2.2). Výsledkem je rozsah úhlů od $\mp 99^{\circ}$ do $\pm 126^{\circ}$ (dle řetězce) od osy ve směru délky ramene. Po vytvoření pasivního ramene byl pomocí funkce *Sestavení* dodělán tento prvek, jenž umožňuje nastavit úhly $\pm 130^{\circ}$. Tento rozsah zároveň omezuje dosažitelný prostor manipulátoru (Sekce 5.3). Výška desek byla zvolena 3mm, což se na vytisknutém kusu z hlediska tuhosti ukázalo jako nedostačující a bylo změněno na 5mm.

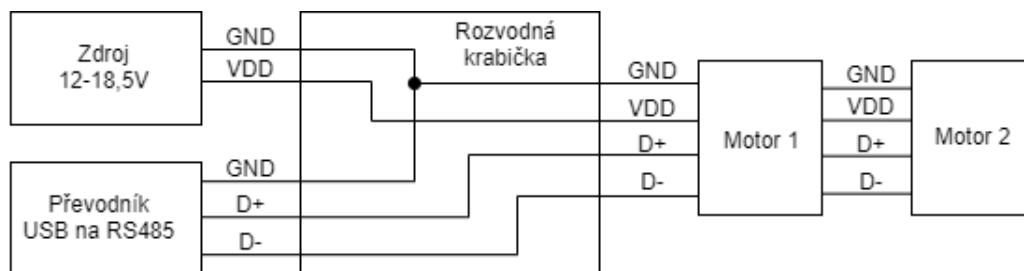
Jelikož pasivní rameno (Příloha E) v místě kloubu s aktivním ramenem může být celistvý kus, tak jsou do něj vložena i ložiska 608 2RS a díra, kterou povede hřídel (Příloha F) tvořící pasivní kloub, ke kterému bude připevněno aktivní rameno. Pasivní rameno má tvar písmene L, protože pasivní ramena budou umístěna ve stejné výšce a musí být spojena na druhém konci. Tento konec tvoří efektor manipulátoru, jenž je zároveň posledním pasivním kloubem, který je složen z ložisek 6200 2RS a hřídele (Příloha G), kterou povede tužka. Tužka je přitlačována ke kreslicí ploše tlačícím prvkem (Příloha I), jehož funkci plní tažné pružiny uchycené k vrchnímu pasivnímu rameni. Pro zabránění dotyku ložisek je mezi ně vložena vložka (Příloha H). Do pasivních ramen jsou přidány výřezy pro odlehčení konstrukce.

K bázi manipulátoru jsou uchyceny motory, a tím i celá konstrukce. Pro uchycení báze k podložce jsou vytvořeny díry mezi motory. Uchycení z druhé strany k podložce nebylo vytvořeno z důvodu omezení rozměrů 3D tiskárny (Sekce 4.4) a vytvoření báze z jednoho kusu kvůli lepšímu dodržení rozměrů. Výška báze je určena od aktivních ramen tak, aby se rameno či šrouby, které spojují rameno s motorem nebo hřídelí pasivního kloubu, nedotýkaly desky, na níž je manipulátor připevněn.

4.3 Elektrické zapojení

K motorům musí být přivedeno napájení a datové vodiče tak, aby nebylo v prostoru, v němž se pohybují ramena. Pro vedení vodičů mezi motory jsou navrženy držáky (Příloha K), jež se přichytí na bázi manipulátoru do pozic výřezů aktivních ramen. Díky tomu není nijak omezen dosažitelný prostor manipulátoru a vodiče jsou uchyceny v bezpečné poloze.

Propojení počítače s motory se předpokládá skrze převodník, jenž pro propojení s motory má výstup jako piny, a napájení motorů ze samostatného zdroje s vidlicovým konektorem DC 2,1mm. Motory mají zásuvku Mini-SPOX s roztečí 2,5mm; 1x4 pin, přičemž musí být propojeny země napájení a převodníku, aby nevznikl rozdíl v potenciálu zemí znemožňující komunikaci příslušných zařízení. Pro vytvoření těchto spojení (Obrázek 4.1) a převodů je vytvořena rozvodná krabice (Příloha J). Jejím vstupem jsou zásuvky pro tři piny, pro datové vodiče, zem převodníku, a konektor DC 2,1mm. Výstupem je vidlice Mini-SPOX s roztečí 2,5mm; 1x4 pin.



Obr. 4.1: Schéma zapojení.

4.4 Sestrojení manipulátoru

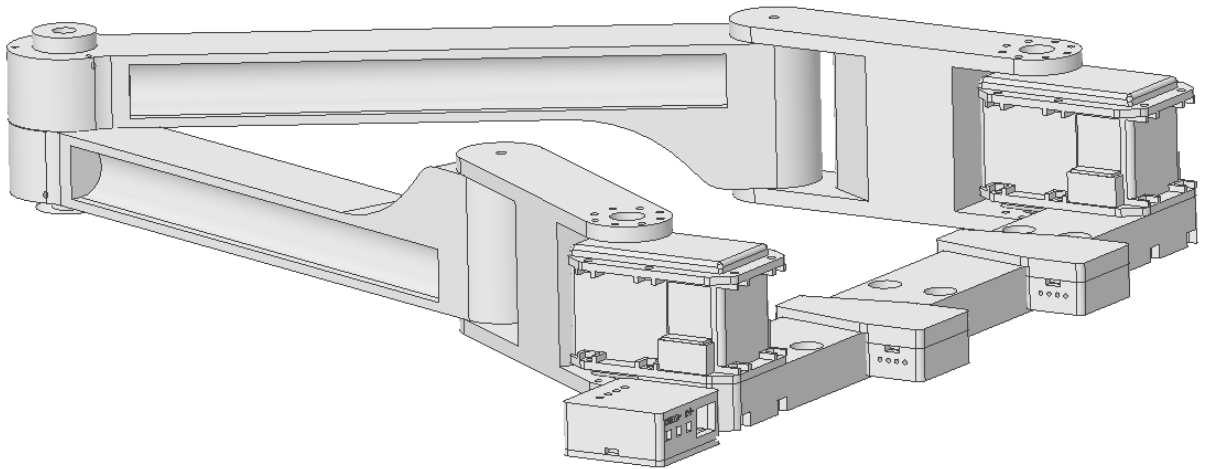
Návrh mechanického modelu je zobrazen na Obrázku 4.2. Preferovaná kovová konstrukce ze zadání není použita a použitým materiálem je plast, protože: a) je snadněji opracovatelný, b) je levnější, c) rozšířením 3D tisku je i výroba více dostupná.

Navržené komponenty jsou vytvořeny 3D tiskem metodou FDM. Pro tisk je použit materiál PET-G, jenž byl vybrán z dostupných materiálů kvůli jeho malé tepelné roztažitelnosti a průměrné pevnosti. K tisku je použita 3D tiskárna Creality Ender 3 S1³ s tiskovou plochou 220x220mm, jejíž předpokládaná přesnost tisku je pro osu Z $\pm 0,1$ a ve zbylých osách $\pm 0,3$ mm.

Tabulka 4.2 uvádí přesnost tisku rozměrů a hustoty výplně jednotlivých typů ramen a báze, kde Sekce 6.2 rozebírá tento vliv na přesnost manipulátoru. Tabulka 4.3

³<https://www.creality.com/products/creality-ender-3-s1-3d-printer>

zobrazuje množství potřebného materiálu pro tisk jednotlivých komponent při 100% výplni.



Obr. 4.2: Návrh mechanického modelu bez prvků pro zajištění spojů, pružin a tlačícího prvku .

Tab. 4.2: Přesnost 3D tisku ramen a hustotě výplně.

Díl	Délka [mm]	Šířka [mm]	Výška [mm]	Výplň [%]
Aktivní rameno	$\pm 0,3$	$\pm 0,1$	$\pm 0,3$	7
Pasivní rameno	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$	$\pm 0,1$	10
Báze	$\pm 0,3$	$\pm 0,1$	$\pm 0,3$	10

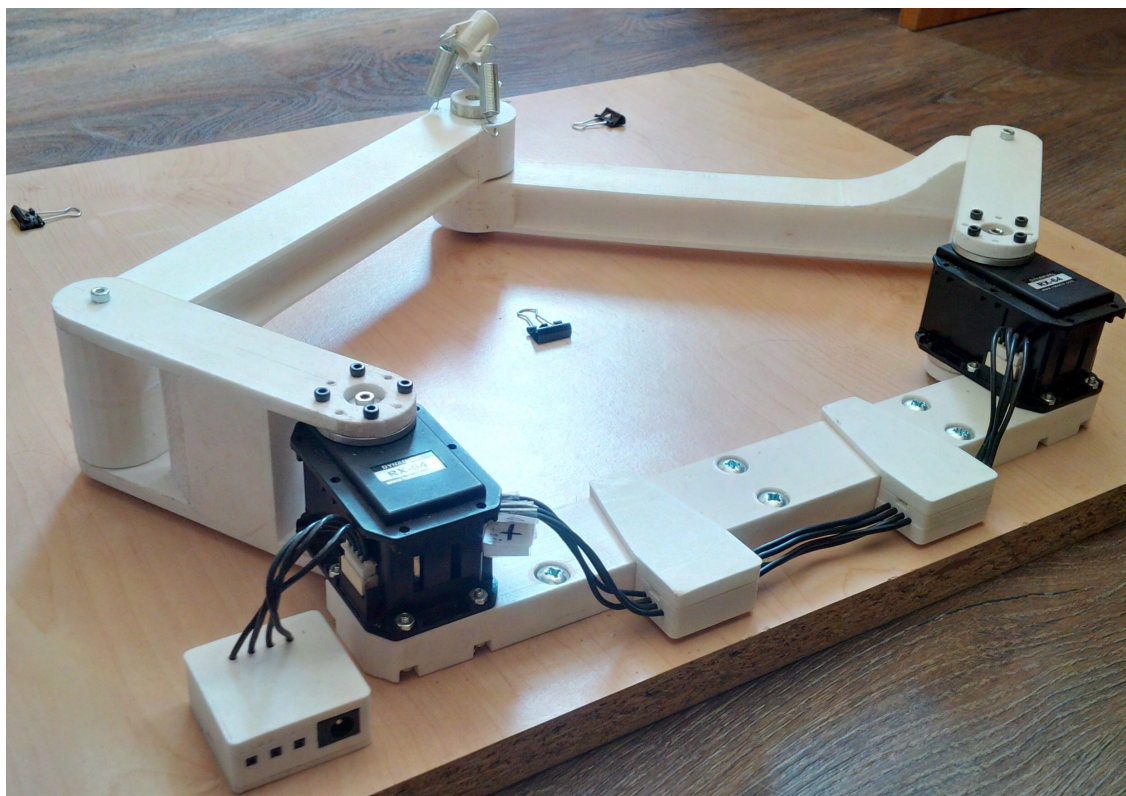
Pro sestavení manipulátoru jsou použity součástky uvedené v Tabulce 4.4, jež uvádí počty a předpokládanou cenu součástek potřebných pro sestavení navrženého manipulátoru. Ložiska jsou vložena do těsných otvorů a do nich jsou stejně vloženy hřídele, kde tyto prvky drží v dané konfiguraci pouze třecí silou. Obdobně drží dvoudílová hřídel efektoru, rozvodná krabice a úchyty pro vedení vodičů. Sestavený manipulátor je ukázán na Obrázku 4.3.

Tab. 4.3: Vypočtená hmotnost vytisknutých dílů při 100% výplni v programu Autodesk Inventor.

Díl	Vypočtená váha pro 1ks [g]	Počet [ks]
Báze	200	1
Aktivní rameno	133	2
Pasivní rameno	168	2
Hřídel pro pasivní kloub	3	2
Hřídel efektoru	6	1
Víčko k hřídeli efektoru	3	1
Vložka mezi ložiska	1	1
Tlačicí prvek	3	1
Vrchní díl krabičky	12	1
Spodní díl krabičky	5	1
Háček pro držení kabelů	13	2
Držák kabelů	6	2
Celková váha připevněná na motory	821	
Celková váha vytisknutých dílů	876	

Tab. 4.4: Soupiska součástek a materiálu pro navržený manipulátor. Cena 3D tisku je brána - 1g = 1Kč.

Součástka	Cena za kus [Kč]	Počet [ks]
Servomotor RX-64	pořízeno	2
3D tisk	876	-
Ložisko 608 2RS	22	4
Ložisko 6200 2RS	20	2
M2,5x16 DIN 912	1,8	8
M2,5 DIN 934	0,2	8
M3 DIN 934	0,8	4
M2,5x8 DIN 912	2,8	16
M3x12 DIN 912	0,8	4
Tažná pružina	20	3
Deska	100	1
Konektory a vodiče	50	1
Svorky na papír	2	3
Vrutky pro připevnění	0,2	12
Celková cena	1290	



Obr. 4.3: Sestrojený manipulátor.

5 Ovládání manipulátoru

Pro ovládání planárního pantografu byla vytvořena aplikace (Obrázek 5.1) v prostředí MATLAB ve verzi R2021b, za použití rozšíření MATLAB Compiler¹ a jeho funkce Design App², pro operační systém Windows. Tato aplikace musí být nainstalována společně s aplikací MATLAB Runtime³, jež je zdarma ke stažení nebo přidána k instalačnímu souboru samotné aplikace. Toto prostředí pro vývoj aplikace bylo zvoleno z důvodu již vytvořených matematických výpočtů v programu MATLAB, který má stejnou syntaxi jako funkce Design App.

Aplikace byla navržena pro ovládání planárního pantografu navrženého v Sekci 3 se servomotory od firmy Dynamixel podporující Protocol 1.0 komunikující s počítačem přes sériový port skrze převodník na RS-485 nebo TTL komunikaci. Aplikace umožňuje:

- nastavit komunikaci přes sériový port;
- zvolit Identifikátor (ID) motorů, se kterými se má komunikovat;
- přizpůsobit velikost úhlu pro jeden krok motorů;
- zvolit možnou odchylku od požadovaného natočení;
- měnit strmost momentovou při dojezdu k požadované pozici;
- nastavit rychlost pohybu motorů;
- nastavit maximální moment;
- bliknout s integrovanou LED v jednotlivých motorech;
- nastavit pozice efektoru v rámci pracovního prostoru v XY souřadnicích spolu s nastavením priority konfigurace, ve které by měla být daná pozice nastavena;
- nastavit natočení motorů;
- nastavit offset motorů.

Tyto funkce tvoří čtyři části: a) nastavení komunikace, b) přizpůsobení motorů, c) nastavení pozice, d) informace o akcích aplikace. Zmíněné části se v aplikaci mezi sebou prolínají, a proto pro nastavení jedné části je potřeba nastavit i další část. Jak používat jednotlivé části je popsáno v manuálu (Příloha M). První tři části jsou více rozebrány v následujících sekcích.

5.1 Komunikace

Pro funkční komunikaci je v aplikaci potřeba zadat: a) sériový port, ke kterému je připojen převodník; b) komunikační rychlost; c) ID motorů. Oba motory proto musí být nastaveny na stejnou komunikační rychlost a mít rozdílné ID v rozsahu 0-253.

¹<https://www.mathworks.com/products/compiler.html>

²<https://www.mathworks.com/products/matlab/app-designer.html>

³<https://www.mathworks.com/products/compiler/matlab-runtime.html>

The image shows the Dynamixel Wizard 2.0 application interface, divided into three main sections:

- Nastavení motoru (Motor Settings):**
 - Motor 1 (θ1): ID 1, Offset motoru [krok] -14, Krok motoru [°] 0.291, Odchylka od pozice [krok] 0.
 - Motor 2 (θ4): ID 4, Offset motoru [krok] 77, Krok motoru [°] 0.291, Odchylka od pozice [krok] 0.
 - Sklon momentu: 16
 - Rychlost [%]: Slider from 0 to 100, currently at 50.
 - Moment [%]: Slider from 0 to 100, currently at 50.
 - Buttons: Nastavit motory, Blik motor1 (θ1), Blik motor2 (θ4).
- Nastavení pozice v souřadnicích (Position Settings in Coordinates):**
 - X [mm]: 0.0
 - Y [mm]: 0.0
 - Priorita konfigurace: 1=největší, 4=nejmenší
 - Buttons: ++ 1, +- 3, -- 2, -+ 4, Nastavit pozici.
- Nastavení uhlí aktivních kloubů (Active Joint Angle Settings):**
 - θ1 (M1) [°]: 0.0
 - θ4 (M2) [°]: 0.0
 - Button: Nastavit natocení
- Nastavení seriového portu pro komunikaci (Serial Port Settings):**
 - Serial port: COM3
 - Baud Rate [bps]: 57 600
 - Buttons: Odpojeno (toggle), Pripojeno (toggle), Pripojeni (button).
- Informace (Information):**
 - 1) Pripojte seriový port
 - 2) Nastavte motory
 - 3) Zadejte pozice

Obr. 5.1: Vytvořená aplikace s použitým nastavením motorů.

Pokud tyto údaje nejsou známy, je možné využít aplikaci DYNAMIXEL Wizard 2.0⁴, pomocí níž lze tyto údaje zjistit a změnit. Pro otestování správného nastavení lze využít funkce pro bliknutí integrované LED v motorech.

Data jsou předávána mezi zařízeními pomocí paketů. Každý paket začíná hlavičkou tvořenou dvěma bajty o hodnotách 255, dále po jednom bajtu je uvedeno ID, délka (počet následujících bajtů) a instrukce. Dle instrukce následuje N parametrů a posledním bajtem je kontrolní součet (Rovnice 5.1) [11].

$$\text{kontrolní součet} = \sim (ID + \text{délka} + \text{instrukce} + \text{součet parametrů}) \quad (5.1)$$

kde $\sim$ značí binární doplněk a je použit pouze nejnižší bajt

K vytvoření jednotlivých funkcí byla využita instrukce zápisu z Tabulky B.1, jež zapisuje na příslušné adresy dle Tabulky 4.1. Po zápisu je vyčkáno 250ms, po kterých již mají být vyřízeny stavové pakety. Instrukce čtení nebyla využita, poněvadž přečtení paketů mělo velké prodlevy a při spuštění další funkce dříve, než byla poslední funkce zcela dokončena, způsobovalo přepisování informačního okna, kde se mohlo pořadí zaměnit a tím zmást uživatele. Protože nejsou čtena žádná data od motorů, aplikace upravuje nastavení motorů, aby posílaly zpět co nejméně paketů, ale nijak nekontroluje, zda byly příslušné příkazy vykonány a zda nastala chyba ze

⁴https://emanual.robotis.com/docs/en/software/dynamixel/dynamixel_wizard2/

strany motorů. Aplikace pomocí informačního panelu pouze informuje, že příslušné příkazy byly odeslány.

5.2 Inicializace motorů

V této části jsou uživatelem zadány převážně parametry, jež jsou nastavitelné individuálně pro oba motory, ovlivňující přesnost dosažení cílové pozice.

- Připevněná ramena k motorům nemusí mít vycentrovaný požadovaný rozsah natočení. To lze opravit nastavením offsetu. Protože motory mají rozsah úhlů 0° - 300° (Sekce 4.1), ale konstrukcí robota je tento rozsah omezen na 0° - 180° (Sekce 4), tak je možné posunout požadovaný rozsah úhlů do požadovaných mezí bez omezení pracovního prostoru manipulátoru. Ve výsledku se jedná o hlavní parametr pro kalibraci manipulátoru (Sekce 7.1), protože jsou jím upraveny výpočty pro nastavení limitních úhlů motorů a nastavení pozice.
- Aplikace má možnost nastavit krok motorů pro případy, kdy uvedený krok motorů (Sekce 4.1) je třeba zpřesnit nebo jsou použity jiné typy motorů. Tento parametr ovlivňuje výpočty pro nastavení pozic manipulátoru a je použit při kalibraci manipulátoru (Sekce 7.1).
- Pro výukové účely je využita funkce motorů nastavení přesnosti natočení. To umožňuje nastavit možnou odchylku v krocích od požadované pozice a tím zvýšit nepřesnost nastavení pozice jednotlivých motorů.
- Regulace momentu před dojetím na požadovanou pozici je řešena změnou sklonu úbytku momentu při přiblížení k cílové hodnotě. Hodnota tedy určuje, od jaké vzdálenosti od cílové pozice se začne omezovat moment motoru. Při malých odchylkách kroků a malé vzdálenosti omezení výkonu se motor rozkmitá a nenastaví ustálenou pozici, což je způsobeno tím, že motor pokaždé přejede požadovanou pozici. Při opačných podmínkách naopak zůstane velmi blízko k okraji tolerované odchylky.
- Rychlost pohybu manipulátoru má obdobné vlastnosti na přesnost dosažení cílové pozice jako sklon regulace momentu. Zároveň je skutečná rychlost pohybu omezena i nastavením maximálního momentu, a proto zvyšování této hodnoty nemusí zvětšit rychlost pohybu manipulátoru, pokud je přednastaven malý maximální výkon. Některé motory se při nastavení nulové rychlosti nepohnou, ale jiné se naopak mohou pohybovat i rychleji, než při nastavení maximální rychlosti.
- Maximální výstupní moment motorů mění strmost křivky regulace momentu před dosažením cílové pozice, jak bylo zmíněno, a omezuje i maximální rychlost pohybu motorů. Při nastavení nulového maximálního momentu se motory

nemusí hýbat nebo naopak použijí neomezený maximální výkon motoru, který je větší než při nastavení nejvyšší hodnoty.

Při potvrzení hodnot zmíněných parametrů aplikace zároveň:

- Nastaví zasílání stavových packetů na minimum.
- Omezí úhly motorů, aby byl dosažitelný rozsah natočení 0° - 180° pro oba motory při zvoleném offsetu velikosti kroku motoru, i přestože aplikace neumožňuje vybrat úhly mimo tento rozsah. Je tomu tak, protože omezení úhlů se nachází v paměti motorů v Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory - elektricky vymazatelná paměť pouze pro čtení (EEPROM) části a mohla by zde být tedy uložena hodnota omezující funkci aplikace.
- Povolí moment motorů.
- Nastaví maximální moment motorů v EEPROM části paměti, aby nastavená hodnota momentu uživatelem nebyla omezena.

5.3 Nastavení pozice

Pozici efektoru manipulátoru lze měnit buď přímo zadáním úhlů aktivních kloubů s využitím PKU (Sekce 2.1) nebo zadáním pozice v XY souřadnicích, kde je ke zjištění natočení aktivních kloubů použita IKU (Sekce 2.2). Zadané nebo vypočtené úhly jsou převedeny na hodnoty pro motory a odeslán příkaz na jejich nastavení. Ne každá pozice lze nastavit, a proto jsou hodnoty zaokrouhleny k nejbližším a poté zpětně vypočtena pozice, jež je nastavována, přičemž oba motory nastavují pozici zvolenou rychlostí a nezávisle na sobě. To znamená, že požadovaná pozice je nastavena nejrychleji a uživatel nemůže zvolit tvar trajektorie z jednoho bodu do druhého. Pokud je přikázána změna polohy a před dokončením je znovu odeslán příkaz pro novou pozici, tak se okamžitě začne nastavovat nová pozice.

Zadávání úhlů umožňuje využít celý dosažitelný pracovní prostor vytvořeného manipulátoru, kde nastavení úhlů aktivních kloubů má dvě omezení rozsahu vycházející z mechanického provedení manipulátoru (Sekce 4): a) rozsah úhlů aktivních kloubů 0° - 180° - hrozí kolize aktivních ramen s bází manipulátoru, b) úhel mezi aktivními rameny viz Tabulka 5.1 - hrozí kolize aktivních ramen s pasivními rameny. Aplikace nedovolí poslat příkaz k nastavení pozic motorů, pokud výsledná θ_1 je větší a θ_4 menší než uvádí Tabulka 5.1.

Tab. 5.1: Naměřené hraniční úhly pro natočení motorů, kde zvětšení úhlu mezi aktivními rameny již může způsobit kolizi. Použitý krok motorů 5° .

θ_1 [$^\circ$]	100	105	110	115	120	125	130	135	140
θ_4 [$^\circ$]	0	5	10	10	15	15	20	20	25
θ_1 [$^\circ$]	145	150	155	160	165	170	175	180	
θ_4 [$^\circ$]	25	30	35	45	55	65	70	80	

Nastavení pozice pomocí XY souřadnic je omezeno na pracovní rozsah 120x80mm, který z důvodu zmíněného zaokrouhlování může být přesažen. Zde nemůže nastat kolize, protože konstrukce byla navrhnutá tak, aby byly všechny pozice v tomto prostoru dosažitelné (Sekce 4). Dále je možné zvolit prioritu konfigurací ($++$, $+-$, $-+$, $--$), podle které bude nastaven manipulátor pokud to bude možné (Obrázek 3.3).

6 Přesnost dosažení cílové pozice

Přesnost dosažení cílové pozice je jedním z hlavních parametrů manipulátoru. Jedná se o vyjádření vzdálenosti mezi požadovanou a dosaženou pozicí. Na přesnost má vliv: a) rychlost pohybu manipulátoru; b) zatížení manipulátoru; c) přesnost nastavení úhlů aktivních kloubů (Sekce 6.1); d) délka ramen a přesnost jejich výroby (Sekce 6.2); e) tření; f) teplota okolí a tepelná roztažitelnost materiálu, ze kterého je manipulátor sestaven [14].

Následující podsekce se zaměřují pouze na přesnost dosažení požadované pozice v závislosti na nastavení úhlů θ_1 , θ_4 použitých akčních členů (Sekce 6.1), dodržení rozměrů délky ramen při 3D tisku (Sekce 6.2) a kombinaci těchto dvou vlivů.

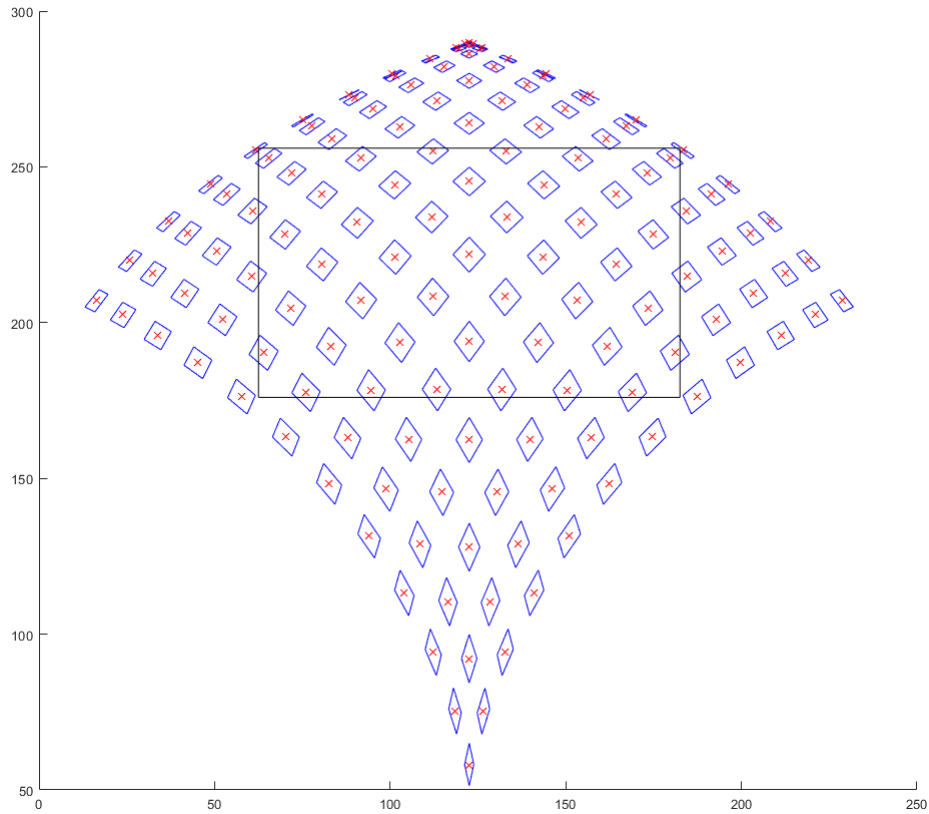
Pokud není uvedeno jinak, jsou v tomto dokumentu při výpočtech odchylek od požadované pozice úhly ve zvoleném rozsahu s krokem $0,29^\circ$. Začátek rozsahu odpovídá první hodnotě, od které jsou následující hodnoty odvozeny s daným krokem, a kde poslední hodnota je menší nebo rovna konci rozsahu. Například pro rozsah 0° - 170° je řada $[0^\circ; 0,29^\circ; 0,58^\circ; \dots; 169,36^\circ; 169,65^\circ; 169,94^\circ]$. Dále se předpokládá, že první hodnota řady svírá daný úhel s přímkou procházející středem aktivních kloubů a to odpovídá požadovanému natočení, což u reálného manipulátoru nemusí platit.

6.1 Přesnost v závislosti na odchylce úhlů aktivních kloubů

Natočení servomotorů RX-64 je měřeno potenciometrem a převedeno na digitální hodnotu. Rozlišením $0,29^\circ$ tedy určuje i rozsah, v jakém se pozice může měnit a přitom udávat stejnou hodnotu. Pokud označíme střed tohoto rozsahu jako požadovanou pozici, tak víme, že maximální odchylka od požadované hodnoty je $\pm$ polovina rozlišení. Poté určíme plochu, na níž se při zadané konfiguraci nacházíme, výpočtem PKU pro kombinace těchto krajních rozsahů a propojením výsledných bodů. Obrázky 6.1 a 6.2 znázorňují výsledky tohoto postupu pro vybrané konfigurace, ze kterých je vidět přesnost dosažení požadované pozice manipulátoru v závislosti na pozici v dosažitelném pracovním prostoru.

Obrázek 6.1 nevystihuje zcela úplně danou situaci, ale je vhodný pro znázornění zmenšování či zvětšování odchylky od požadované pozice v dosažitelném prostoru manipulátoru, kde je vidět, že odchylka od požadované pozice je větší ve středu dosažitelného pracovního prostoru než u jeho okrajů. Jak již bylo řečeno v Sekcích 1.1.2 a 3.3, určité pozice dosáhneme čtyřmi různými konfiguracemi a lze

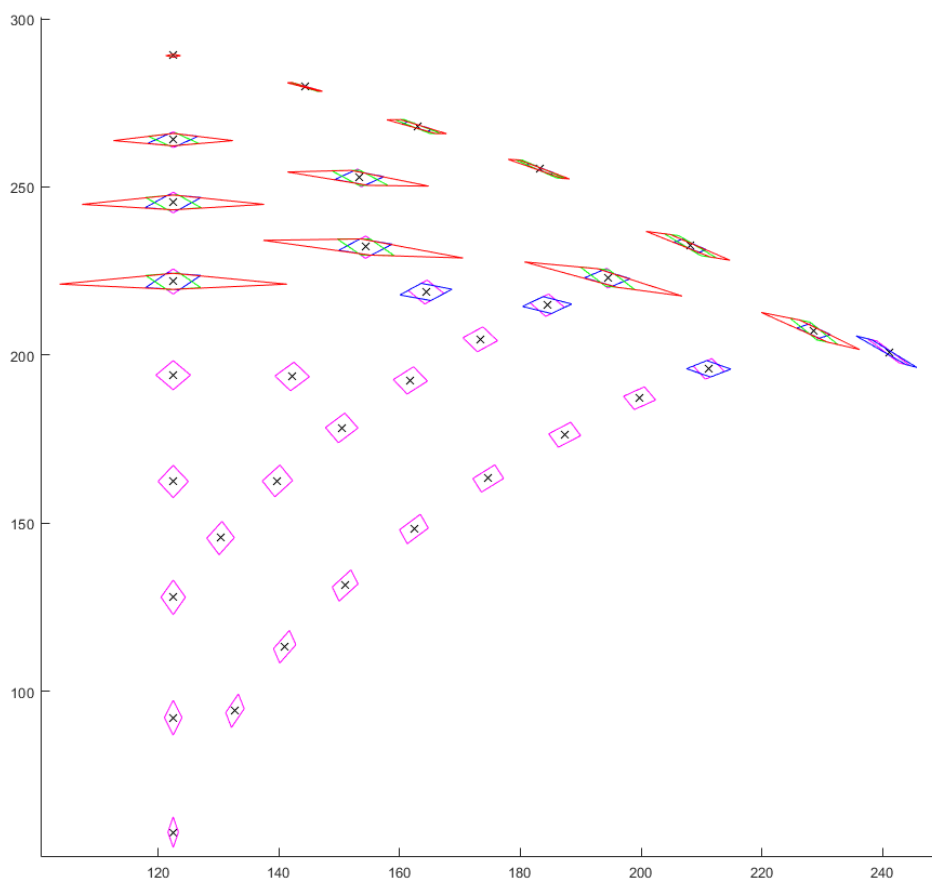
předpokládat, že jejich odchylky budou odlišné. Obrázek 6.2 tuto hypotézu potvrzuje. Detail vrchní části grafu zobrazuje Příloha L.1. Ovšem kvůli omezení rozsahu úhlu θ_1 a θ_4 nejsou všechny pozice dosažitelné více konfiguracemi.



Obr. 6.1: Zobrazení 15x zvětšené odchylky aktivních úhlů od požadované pozice manipulátoru pro kombinace úhlu $\theta_1 = 60^\circ$ - 170° a $\theta_4 = 10^\circ$ - 120° s krokem 10° , kde černě ohraničená plocha tvoří požadovaný pracovní prostor, červeně požadovaná pozice a modře ohraničená plocha, ve které se může skutečná pozice nacházet.

Tab. 6.1: Výsledky přesnosti nastavení pozice v závislosti na odchylce aktivních kloubů, kde odchylka je $\pm 0,29^\circ$.

V ose/osách	Pracovní prostor	
	Dosažitelný	Požadovaný
x [mm]	1,91	1,91
y [mm]	0,59	0,48
xy [mm]	1,91	1,91



Obr. 6.2: Zobrazení 10x zvětšené odchylky aktivních úhlů od požadované pozice manipulátoru pro různé pozice z Obrázku 6.1 dosažitelné více konfiguracemi. Černě požadovaná pozice a purpurově ++, modře +, zeleně +-, červeně --. Příloha L.1 detailněji zobrazuje vrchní část grafu.

6.2 Přesnost v závislosti na odchylce rozměrů ramen

Nepřesnost v nastavení úhlů způsobuje odchylku od požadované pozice a při použití servomotorů RX-64 i vzdálenosti dosažitelných pozic od sebe. Obdobně je tomu i u nepřesnosti délky ramen, i když s jinými závislostmi. Navíc tato nepřesnost způsobuje deformaci tvaru dosažitelného i požadovaného pracovního prostoru a jejich posunu vůči pozicím aktivních kloubů. V této sekci se bere přesnost 3D tisku dle Tabulky 4.2. Tyto odchylky jsou dále zjednodušeny:

- maximální odchylka v daném směru se týká posunu os otáčení kloubů od sebe (k sobě);
- vzdálenost odchylky je konstantní v celé výšce ramene;
- ramena manipulátoru nejsou prohnutá, jak z důvodů vlastností 3D tisku či vlivem gravitace.

To znamená, že osy otáčení budou vždy kolmé na pracovní plochu manipulátoru a bude zcela zanedbán vliv odchylky ve výšce ramene. Výpočty bez zmíněných zjednodušení by musely brát v potaz i výšku nad pracovní plochou. Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v Tabulkách 6.2 a 6.3. Obrázky 6.3 a 6.4 zobrazují odchylky od požadované pozice v závislosti na délce ramen, které jsou ve středu dosažitelného prostoru menší než u jeho okrajů. Vliv šířky je převeden na kombinaci odchylky v úhlech a v délce ramen, což je rozebráno v Sekci 6.3, kde je nepřesnost nastavení pozice při uvedených odchylkách více ovlivněna odchylkou v úhlech. Zde je ještě zanedbána změna úhlu mezi aktivními klouby, protože souřadný systém je vázán na osu, která prochází středem aktivních kloubů. V potaz je tedy brána pouze změna délky ramena l_5 .

Tab. 6.2: Výsledky přesnosti nastavení pozice v závislosti na délce ramen, kde je odchylka jednotlivých ramen $\pm 0,3\text{mm}$.

V ose/rovině	Pracovní prostor	
	Dosažitelný	Požadovaný
x [mm]	6,70	6,63
y [mm]	8,64	2,08
xy [mm]	8,64	6,88

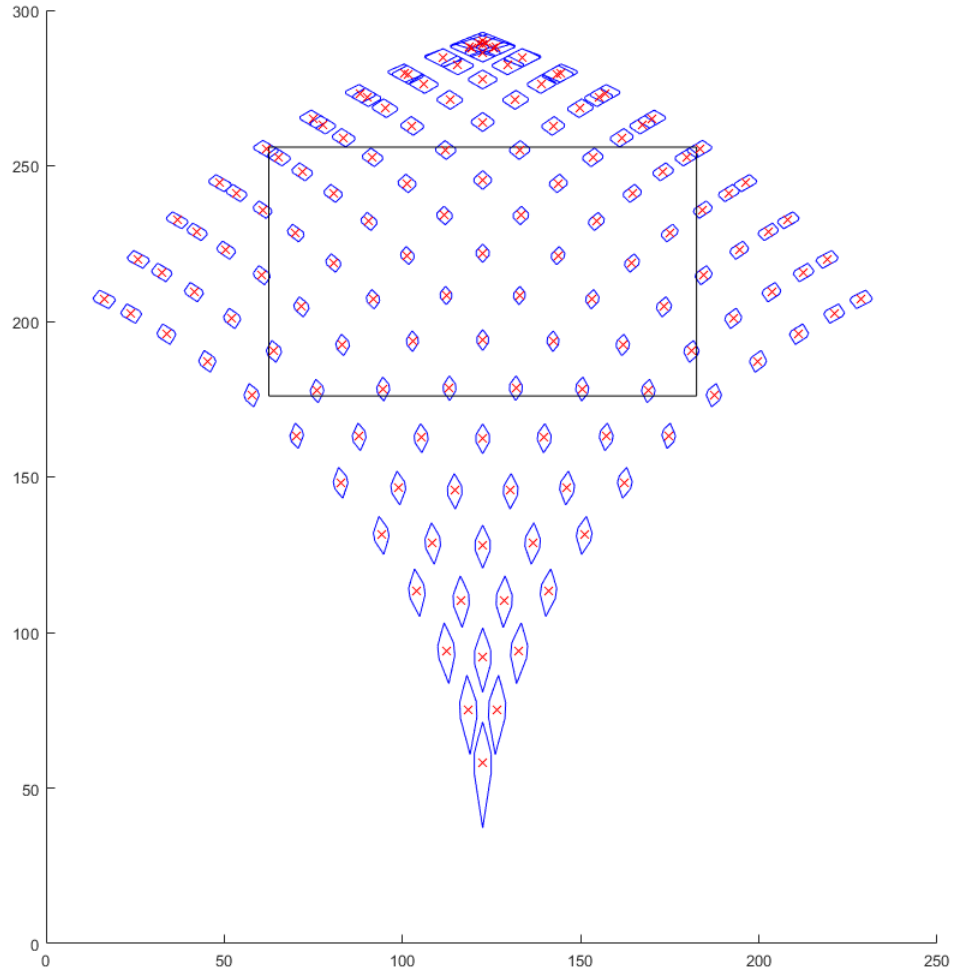
Tab. 6.3: Výsledky přesnosti nastavení pozice v závislosti na šířce ramen, kde odchylka ramen $l_1, l_4, l_5 = \pm 0,1\text{mm}$ a $l_2, l_3 = \pm 0,3\text{mm}$.

V ose/rovině	Pracovní prostor	
	Dosažitelný	Požadovaný
x [mm]	0,028	0,028
y [mm]	0,009	0,007
xy [mm]	0,028	0,028

6.3 Přesnost v závislosti na odchylce rozměrů ramen a nastavení aktivních kloubů

Zkombinováním odchylek ze Sekcí 6.1 a 6.2 dostaneme odchylky z Tabulky 6.3. Porovnáním Obrázků 6.2, 6.4 a 6.5 je zřejmá podobnost mezi odchylkou způsobenou nepřesností délky ramen a kombinací výše uvedených odchylek. Tento poznatek spolu s hodnotami v Tabulkách 6.1-6.4 značí, že vliv nepřesnosti výroby ramen má

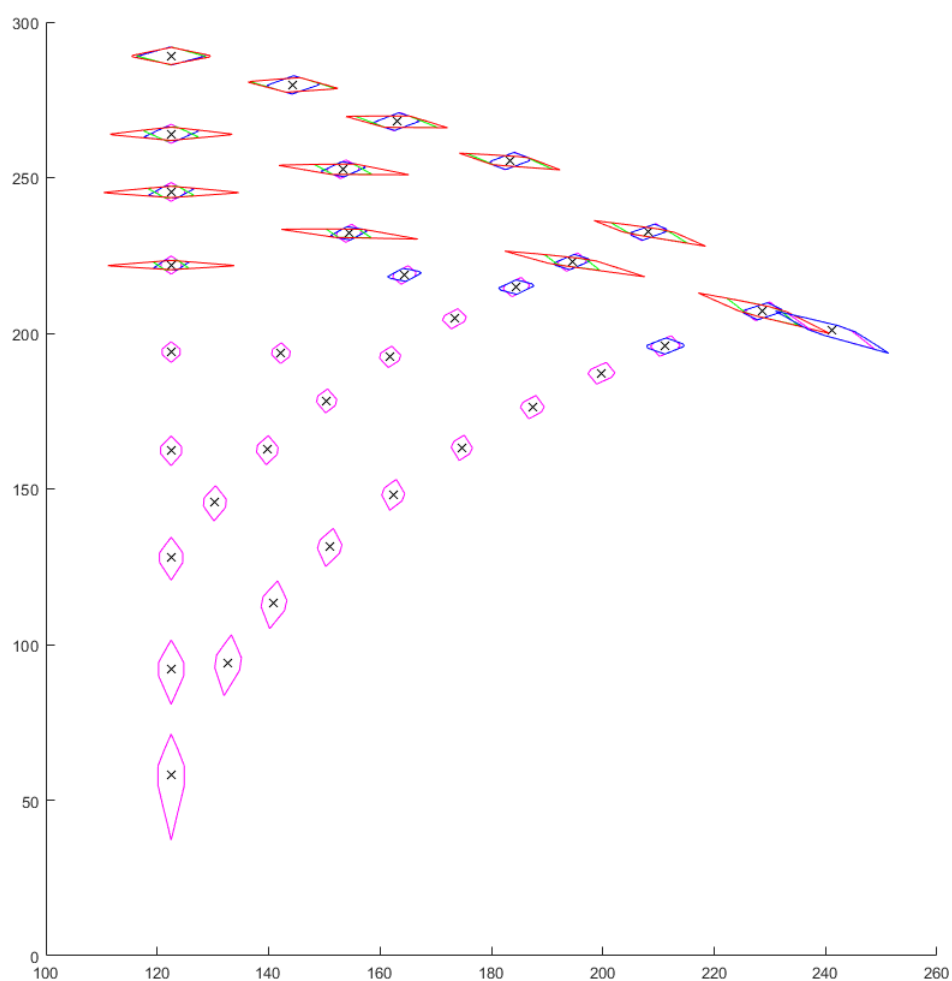
větší dopad na odchylku od požadované pozice než nepřesnost nastavení úhlů aktivních kloubů. Odchylka nastavení úhlů motoru RX-64 by tak mohla být zhruba třikrát větší, aby zmíněné vlivy měli stejný dopad na chybu nastavení efektoru manipulátoru.



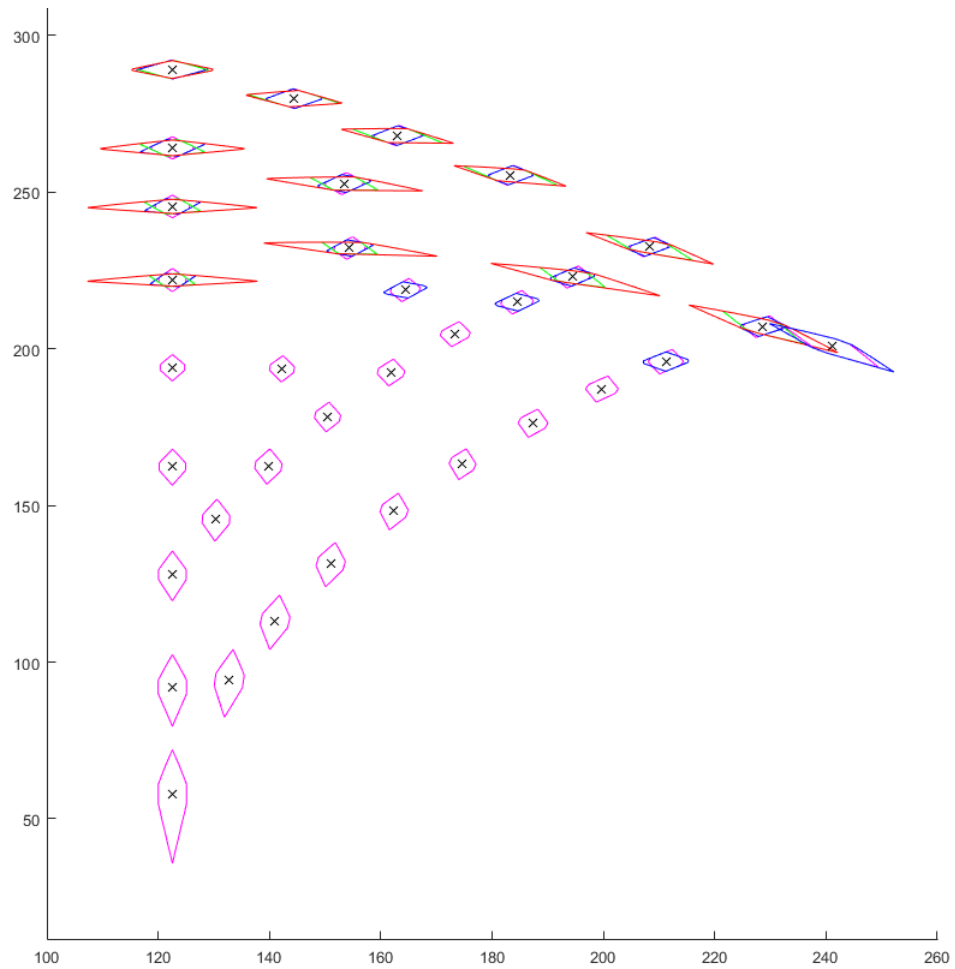
Obr. 6.3: Zobrazení 2x zvětšené odchylky způsobené nepřesnostmi 3D tisku ramen ($\pm 0,3\text{mm}$) pro kombinace úhlu $\theta_1 = 60^\circ\text{-}170^\circ$ a $\theta_4 = 10^\circ\text{-}120^\circ$ s krokem 10° , kde černě ohraničená plocha tvoří požadovaný pracovní prostor, červeně požadovaná pozice a modře ohraničená plocha, ve které se může skutečná pozice nacházet.

Tab. 6.4: Výsledky přesnosti nastavení pozice v závislosti na odchylce délky ramen ($\pm 0,3\text{mm}$) a úhlů aktivních kloubů ($\pm 0,29^\circ$).

V ose/rovině	Pracovní prostor		
	Dosažitelný	Požadovaný	Požadovaný ++ konfigurací
x [mm]	8,25	8,25	3,74
y [mm]	9,16	2,56	1,53
xy [mm]	9,16	8,58	4,00



Obr. 6.4: Zobrazení 2x zvětšené odchylky způsobené nepřesností 3D tisku ramen ($\pm 0,3\text{mm}$) pro různé pozice z Obrázku 6.3 dosažitelné více konfiguracemi. Černě požadovaná pozice, purpurově ++, modře +-, zeleně +-, červeně --. Příloha L.2 detailněji zobrazuje vrchní část grafu.



Obr. 6.5: Zobrazení 2x zvětšené odchylky způsobené nepřesností 3D tisku ramen a nepřesností nastavení úhlů aktivních kloubů pro různé pozice dosažitelné více konfiguracemi. Černě požadovaná pozice, purpurově ++, modře -+, zeleně +-, červeně -.

7 Měření vlastností manipulátoru

U sestrojeného manipulátoru vzniká otázka přesnosti dosažení jeho pozice, jež není závislá pouze na přesnosti výroby ramen a nastavení úhlů manipulátoru, jak bylo řečeno v Sekci 6. Některé z dalších vlivů a možnosti, jak je kompenzovat, již byly zmíněny v Sekci 5.2. Problematikou u reálného manipulátoru je i rozlišení přesnosti nastavení pozice (Sekce 7.1) a dosažení pozice při opakovaném nastavení (Sekce 7.2). Sekce 7.3 popisuje testování tuhosti vytvořeného manipulátoru a definuje, co má největší vliv na celkovou tuhost. Zároveň je i porovnána tuhost při možných konfiguracích nastavení pozice.

Pro nastavování konfigurací a pozic manipulátoru byla použita vytvořená aplikace (Sekce 5), která při zadání požadované pozice vypočetla i skutečně zadávanou pozici nebo-li nejbližší dosažitelnou pozici k požadované, která dále slouží jako nastavovaná pozice.

7.1 Kalibrace manipulátoru

Při oživení manipulátoru je nutné provést kalibraci, kterou upravíme aktuální pracovní prostor, aby se co nejvíce podobal námi požadovanému, a kterou přesuneme tyto prostory přes sebe. Pro kalibraci byla zvolena metoda nulového bodu, která spočívá v přesném nastavení zvoleného bodu na jeho skutečnou pozici. Pozice byly nastavovány v režimu ++, jelikož jako jediná umožňuje nastavit všechny pozice v požadovaném pracovním prostoru (Obrázek 3.3), a při nastavení rychlosti a maximálního momentu na 50% a pokojové teplotě 21°C.

Výchozím bodem pro kalibraci byl zvolen střed obdélníku (pozice [60;40]mm), jenž tvoří požadovaný pracovní prostor. Zadáním této pozice do aplikace bylo zjištěno, že pozice není dosažitelná a nastavovaná pozice je [60,2;39,9]mm. Jelikož však určení skutečné pozice bylo možné s přesností na 1mm, tak byla tato pozice nastavena na polohu [60;40]mm. Postup kalibrace:

1. Nastavit natočení $\theta_1=140^\circ$ a $\theta_4=40^\circ$.
2. Nastavit pozici [60;40]mm a určit vzdálenost od skutečné pozice.
3. Nastavit natočení $\theta_1=90^\circ$ a $\theta_4=90^\circ$.
4. Nastavit pozici [60;40]mm a určit vzdálenost od skutečné pozice.
5. Vyhodnotit vzdálenosti a upravit offset tak, aby se skutečná pozice přesunula do středu nastavovaných pozic.
6. Opakovat kroky 1-5 dokud skutečná pozice nebude uprostřed nastavovaných bodů.

Nastavované natočení motorů může být odlišné od zmíněných za dodržení podmínek:
a) oba motory změni svoji pozici o několik kroků (dle sklonu momentu při dojezdu

k cílové pozici) více než je nastavená odchylka od požadované pozice, b) efektor bude nastavován na pozici z opačných stran. Tento postup redukuje chybu nastavení skutečné pozice, způsobenou opakovaným nastavením.

Po této operaci se reálný pracovní prostor nachází na příslušné poloze vůči bázi manipulátoru, ale jeho tvar nebo rozměry nemusí odpovídat. To je možné kompenzovat nastavením velikosti kroku motorů. Postup je obdobný jako kalibrace středu pracovního prostoru, kde jsou nastavovány rohy požadovaného pracovního prostoru a porovnávána vzdálenost mezi nimi. Změna velikosti kroku ovšem posune pracovní prostor manipulátoru oproti požadovanému a je tedy zapotřebí znovu zkalibrovat středovou hodnotu a opakovat zmíněné postupy, dokud není dosaženo pro aplikaci dostatečného nebo nejbližšího pracovního prostoru k požadovanému.

Tab. 7.1: Změřené vzdálenosti nastavovaných bodů při nastavených motorech na 50% a 100% rychlost a moment. První procentová hodnota je nastavení rychlosti a druhá momentu. Pozice jsou uvedeny v milimetrech.

Pozice									
Požadovaná		Nastavovaná		Dosažená					
				50%, 50%		50%, 100%		100%, 100%	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
0	0	0,1	0,1	-1,0	0,0	-1,5	-0,5	-1,5	0,0
0	40	-0,1	40,0	-0,5	41,0	-1,0	41,0	-1,0	41,0
0	80	-0,2	79,9	0,0	80,5	0,5	80,5	1,0	80,5
40	0	40,1	-0,1	40,0	0,5	40,5	0,5	39,5	0,0
40	40	40,1	40,0	39,5	41,5	39,5	41,5	39,0	41,5
40	80	40,1	79,9	40,5	80,5	40,5	80,5	40,5	80,0
60	40	60,2	39,9	-	-	-	-	-	-
80	0	80,0	0,4	79,5	2,0	80,0	1,5	79,5	1,0
80	40	80,3	40,0	80,5	41,0	80,0	41,0	80,0	41,0
80	80	79,9	80,1	79,5	80,5	80,0	80,0	80,5	79,5
120	0	120,2	0,1	121,5	1,5	122,0	1,5	121,5	0,5
120	40	119,8	40,1	120,0	40,0	120,0	40,0	120,0	39,5
120	80	120,0	80,0	119,0	79,5	119,0	79,5	119,5	78,5

7.2 Měření přesnosti

Se zkalibrovaným manipulátorem byly změřeny pozice požadovaného pracovního rozsahu, tvořící mřížku s velikostí čtverce 40x40mm, a jejich vzdálenost od přesně nastaveného středu. Jednotlivé pozice byly vždy nastaveny dvakrát z ostatních měřených pozic a ze vzdálenosti 10mm ve směru os a 45° od os, ale vždy pouze z pozic uvnitř nebo na hraně požadovaného pracovního prostoru. Pozice z vnějšku byly vynechány, protože se předpokládá funkce manipulátoru pouze v požadovaném pracovním prostoru a tím pádem nenastane nastavení z vnějšku. Tím byly vytvořeny shluky bodů pro jednotlivé pozice, jejichž střed označuje nastavovanou pozici (Tabulka 7.1) a vzdálenosti mezi body shluku odchylku od dané pozice (Tabulka 7.2). Pro pozice na okraji požadovaného pracovního rozsahu nemusí jejich střed a odchylky odpovídat skutečným, kvůli vynechání některých směrů. Body byly zaznamenávány na milimetrový papír, ze kterého lze odečítat hodnoty s přesností 0,5mm. Měření bylo provedeno dvakrát pro nastavení rychlosti a maximálního momentu na 50% a 100% při pokojové teplotě 21°C. Kde při nastavení obou hodnot na 50% byla zřejmé omezení rychlosti. Z těchto dat lze usoudit, že na přesnost nastavení ustálené pozice sestrojeného manipulátoru má větší vliv použitý moment než rychlost, kterou se manipulátor pohybuje.

7.3 Tuhost konstrukce

Tuhost sestrojeného manipulátoru v kreslicí rovině byla měřena působením gravitační síly na manipulátor, k němuž bylo uchyceno 200g závaží za hřídel efektoru, a natáčením desky s manipulátorem tak, aby závaží viselo pouze na efektoru a aby jej obkroužilo. Tabulka 7.4 zobrazuje výsledky měření pro zvolené pozice. Stejně bylo provedeno měření pro pozici [59;59,9]mm, pro zjištění tuhosti pro jednotlivé konfigurace (Tabulka 7.3).

Při těchto měřeních byla nejznatelnější změna vidět na natočení aktivních kloubů, kde motory nedokázaly udržet nastavenou pozici, a v ohybech báze manipulátoru v blízkosti uchycení motorů. Pro zmenšení prohnutí báze by bylo zapotřebí přidat uchycení k desce i z dalších stran motorů.

Z návrhu manipulátoru by nejbližší část efektoru ke kreslicí desce měla být ve vzdálenosti 5,7mm, kde ve skutečnosti je tato vzdálenost 3,2mm a při zatížení 200g konstrukce poklesne na 2,4mm. Bez zátěže a tužce upevněné do manipulátoru pomocí pružin tak, že se o ni manipulátor opírá se tato vzdálenost zvedne na 6,8mm a přidání závaží tuto vzdálenost nezmění. Toto měření bylo provedeno při nastavení 90° na aktivních ramenech.

Tab. 7.2: Změřené odchylky ve vybraných pozicích. Odchylky jsou udané jako vzdálenost dvou nejvzdálenějších bodů od sebe v dané ose. První procentová hodnota je nastavení rychlosti a druhá momentu.

Požadovaná pozice		Odchylka					
		50%, 50%		50%, 100%		100%, 100%	
X [mm]	Y [mm]	X [mm]	Y [mm]	X [mm]	Y [mm]	X [mm]	Y [mm]
0	0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5
0	40	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0	80	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0
40	0	1,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0
40	40	0,5	2,0	0,0	1,0	1,0	1,0
40	80	0,5	1,0	0,0	0,5	0,5	0,5
60	40	0,5	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0
80	0	0,5	1,5	1,0	1,0	0,5	1,0
80	40	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	1,5
80	80	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5
120	0	0,5	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5
120	40	0,5	0,5	0,0	0,0	0,5	0,5
120	80	0,5	0,0	0,5	0,5	0,5	0,0

Tab. 7.3: Změřené odchylky v závislosti na tuhosti konstrukce při různých konfiguracích pro pozici [59,0;59,9]mm. Odchylky jsou udané jako vzdálenost dvou nejvzdálenějších bodů od sebe v dané ose.

Konfigurace	++	--	+-	-+
X [mm]	2,0	45,5	2,5	4,0
Y [mm]	1,5	5,0	1,0	2,0

Tab. 7.4: Změřené odchylky v závislosti na tuhosti konstrukce při zatížení 200g. Odchylky jsou udané jako vzdálenost dvou nejvzdálenějších bodů od sebe v dané ose.

Požadovaná pozice		Odchylka	
X [mm]	Y [mm]	X [mm]	Y [mm]
0	0	1,5	1,5
0	40	2,0	1,0
0	80	1,5	1,0
40	0	1,5	2,0
40	40	2,5	1,5
40	80	2,5	1,0
60	40	2,0	1,5
60	60	2,0	1,5
80	0	1,5	2,0
80	40	2,5	2,0
80	80	3,5	1,0
120	0	1,0	2,5
120	40	1,5	2,0
120	80	1,5	1,0

Závěr

V rámci této práce byla rozebrána problematika planárního pantografu a odvozena jeho přímá a inverzní kinematická úloha, jež byla ověřena v prostředí MATLAB. Dále byly představeny podmínky poměrů ramen mezi sebou pro zajištění sestavitelnosti a pro odstranění singularit, které mohou způsobit poškození manipulátoru. Na základě těchto poznatků byly určeny délky ramen tak, aby vytvořený manipulátor měl obdélníkový pracovní prostor o rozměrech 120x80mm. Manipulátor byl zvolen symetrický, protože nesymetrický manipulátor by nepřinesl zvolené aplikaci žádné výhody a pouze by ztížil výpočet délky ramen a jejich následný návrh. Použitá délka ramen tak je $l_1=l_4=95\text{mm}$, $l_2=l_3=220\text{mm}$, $l_5=245\text{mm}$ a šířka pohyblivých ramen 28mm. Při těchto rozměrech manipulátoru musí fyzický manipulátor umožňovat rozsah úhlů $\theta_1=\langle 0;170 \rangle^\circ$, $\theta_2=\langle -126;99 \rangle^\circ$, $\theta_3=\langle -99;126 \rangle^\circ$, $\theta_4=\langle 10;180 \rangle^\circ$, aby byl požadovaný prostor nastavitelný.

Navržený manipulátor byl vytvořen z materiálu PET-G pomocí 3D tisku s přesností tisku $\pm 0,1\text{mm}$ nebo $\pm 0,3\text{mm}$ dle natočení při tisku a servomotorů RX-64 s přesností nastavení natočení $0,29^\circ$. Pro tyto hodnoty byla vypočtena odchylka nastavení od pozice ve zvoleném pracovním prostoru, kde odchylka způsobená výrobou kratších nebo delších ramen může způsobit nepřesnost v ose X až 6,7mm a v ose Y až 2,1mm a způsobuje větší odchylky u okrajů dosažitelného pracovního prostoru. Odchylka způsobená nepřesností nastavení úhlů může dosáhnout v ose X až 1,9mm a pro osu Y až 0,5mm a je větší ve středu dosažitelného prostoru. Nepřesnost v nastavení úhlu by mohla být zhruba třikrát větší, aby měla stejný vliv na přesnost jako nepřesnost výroby ramen. Při zkombinování těchto vlivů může odchylka od pozice v ose X dosáhnout hodnoty 8,3mm a v ose Y hodnoty 2,6mm, kde tyto odchylky jsou napříč všemi konfiguracemi. Pro ++ konfiguraci je maximální odchylka v ose X 3,8mm a pro osu Y 1,6mm.

K nastavování pozic manipulátoru a parametrů motorů byla v prostředí MATLAB Compiler vytvořena aplikace pro operační systém Windows, pomocí které byl zkalibrován vytvořený manipulátor a naměřeny odchylky nastavení pozice. Měření byla provedena v ++ konfiguraci, přičemž nepřesnost nastavení pozice byla rozdělena na chybu nastavení pozice a odchylku od této pozice. Zde byla největší nepřesnost nastavení pozice pro obě osy rovna 2mm. Největší odchylka od těchto pozic byla 1,5mm v ose X a 2mm v ose Y.

Zároveň byl zkoumán vliv rychlosti motorů a jejich momentu na přesnost nastavení pozice. V nastavení není znatelný rozdíl, ale u odchylky od této pozice použití většího momentu zvětšilo přesnost. Dále byla zkoumána tuhost manipulátoru v klidovém stavu při zatížení 200g, které způsobilo změnu pozice v ose X až o 3,5mm a v ose Y až o 2,5mm. Nejslabším místem manipulátor při zatížení byly použité servo

motory RX-64, které neudržely potřebné natočení a jejich uchycení skrze bázi, kde nastávalo natočení motorů vůči bázi a konců báze ku desce, k níž je báze přichycena. Pro zlepšení těchto vlastností by bylo potřeba vytisknout bázi s větší hustotou výplně nebo vytvořit novou bázi, jež by pevněji držela motory a byla přichycena pevněji k desce v okolí motorů.

Práce by dále mohla být rozšířena o prvky umožňující automatizovanou kalibraci manipulátoru nebo o prvek, jež by pohyboval z tužkou v ose Z nebo vyměnit tužku za vypalovací laser, což by s rozšířením aplikace umožnilo kreslit komplexnější útvary. Aplikace by dále mohla být rozšířena o čtení stavových packetů a chyb motorů, ke kterým by poskytovala možnosti, jak je vyřešit.

Literatura

- [1] T. D. Le, H.-J. Kang, V. D. Quang, *A method for optimal kinematic design of five-bar planar parallel manipulators* [online]. 2013 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS). DOI: 10.1109/ICCAIS.2013.6720521. Dostupné z URL: <https://www.researchgate.net/publication/271456154_A_method_for_optimal_kinematic_design_of_five-bar_planar_parallel_manipulators>
- [2] C. Gosselin , JP. Merlet, *Parallel Robots: Architecture, Modeling, and Design* [online]. 2020. Ang M., Khatib O., Siciliano B. (eds) Encyclopedia of Robotics. Springer, Berlin, Heidelberg. Dostupné z URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-41610-1_158-1>
- [3] T. M. Hoang, B. C. Pham, *Study and Development of Parallel Robots Based On 5-Bar Linkage* [online]. 2015. National Conference on Machines and Mechanisms 2015, Ho Chi Minh City Dostupné z URL: <https://www.researchgate.net/publication/283356024_Study_and_Development_of_Parallel_Robots_Based_On_5-Bar_Linkage>
- [4] J. Brandon, *5-Bar Linkage Kinematic Solver and Simulator* [online]. 2020. UVM Honors College Senior Theses. 406. Dostupné z URL: <<https://scholarworks.uvm.edu/hcoltheses/406/>>
- [5] F. Šolc, L. Žalud, *Robotika* 2006. Brno, Vysoké učení technické v Brně. Skripta, str.55.
- [6] A. Figielski, I. A. Bonev, P. Bigras, *Towards Development of a 2-DOF Planar Parallel Robot with Optimal Workspace Use* [online]. 2007. École de technologie supérieure (ÉTS) Dostupné z URL: <https://www.researchgate.net/publication/224299016_Towards_development_of_a_2-DOF_planar_parallel_robot_with_optimal_workspace_use>
- [7] X. J. Liu, J. Wang, G. Pritschow, *Kinematics, singularity and workspace of planar 5R symmetrical parallel mechanisms* [online]. Mechanism and Machine Theory. 2006, vol. 41, p.145-169. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2005.05.004. Dostupné z URL: <<http://www.paper.edu.cn/scholar/showpdf/NUT2EN4IMTT0kxeQh>>
- [8] T. Kwun-Lon, *Mobility Criteria of Single-Loop N-Bar Linkages* [online]. Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design. 1989, Vol. 111, issue 4, p. 504-507 Dostupné z URL: <<https://doi.org/10.1115/1.29388>>

- [//www.researchgate.net/publication/267485912_On_the_Mobility_of_Single-Loop_N-Bar_Linkage_With_One_Prismatic_Joint](https://www.researchgate.net/publication/267485912_On_the_Mobility_of_Single-Loop_N-Bar_Linkage_With_One_Prismatic_Joint)>
- [9] I. Khalil, M. Abu Seif, *Modeling of a Pantograph Haptic Device* [online]. 2020. Medical Micro Nano Robotics Laboratory (MNRLab), Department of Mechatronics Engineering, German University in Cairo. Retrieved 1 . Dostupné z URL: <<http://www.mnrlab.com/uploads/7/3/8/3/73833313/modeling-of-pantograph.pdf>>
 - [10] ROBOTIS e-Manual, *RX-64* [online]. Citováno dne: 25.12.2021 Dostupné z URL: <<https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/rx/rx-64/>>
 - [11] ROBOTIS Protocol 1.0, *Protocol 1.0* [online]. Citováno dne: 26.4.2022 Dostupné z URL: <<https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/protocol1/>>
 - [12] ROBOTIS, *RX-64 User Manual* [online]. Verze ze dne: 28.6.2006 Dostupné z URL: <<https://www.robot-advance.com/pj-50.pdf>>
 - [13] K. Hauser , *Robotic Systems* [online]. University of Illinois at Urbana-Champaign Citováno dne: 29.12.2021. Dostupné z URL: <<http://motion.cs.illinois.edu/RoboticSystems/Kinematics.html>>
 - [14] K. L. Conrad, P. S. Shiakolas, T. C. Yih, *Robotic Calibration Issues: Accuracy, Repeatability and Calibration* [online]. 2000. Mechanical and Aerospace Eng. Department, and Automation and Robotics Research Institute, The University of Texas at Arlington, Arlington, Dostupné z URL: <https://www.researchgate.net/publication/260336817_Repeatability_and_Accuracy_of_an_Industrial_Robot_Laboratory_Experience_for_a_Design_of_Experiments_Course>

Seznam zkratek

DOF Degrees Of Freedom - stupeň volnosti.

EEPROM Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory - elektricky vymazatelná paměť pouze pro čtení.

FDM Fused Deposition Modeling - modelování depozicí taveniny.

ID Identifikátor.

IKU Inverzní Kinematická Úloha.

PKU Přímá Kinematická Úloha.

RAM Random Access Memory - paměť s náhodným přístupem.

Seznam příloh

A Přílohy na CD	60
B Servo motory RX-64	61
C Návrh báze manipulátoru	65
D Návrh aktivních ramen manipulátoru	67
E Návrh pasivních ramen manipulátoru	69
F Návrh hřídele v pasivního kloubu	71
G Návrh hřídele efektoru	72
H Návrh vložky mezi ložiska	74
I Návrh tlačícího prvku na tužku	75
J Návrh rozvodné krabičky	76
K Návrh uchycení kabelů	78
L Odchylka manipulátoru	80
M Manuál pro aplikaci pro ovládání planárního pantografu	82

A Přílohy na CD

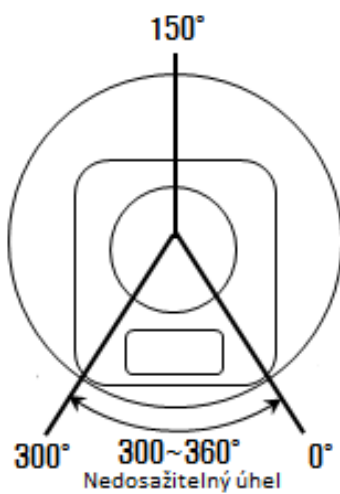
3D_modely/ - obsahuje použité 3D modely jednotlivých prvků

aplikace/ - obsahuje zdrojový a instalační soubor aplikace

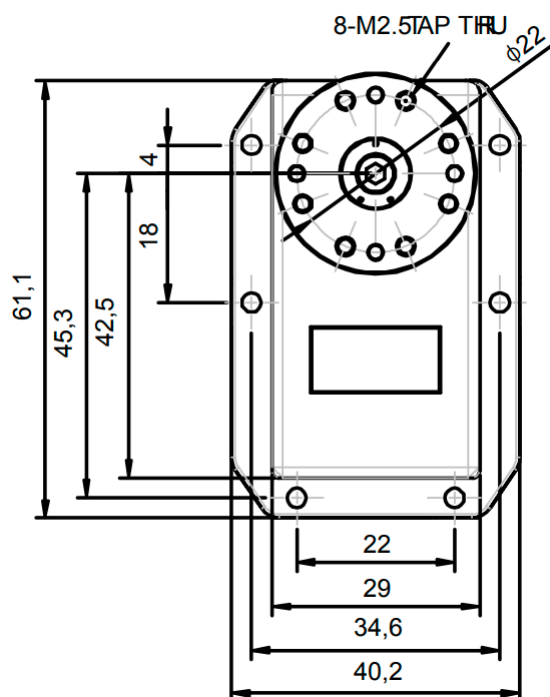
vypocty_MATLAB/ - obsahuje výpočty a vykreslení grafů v prostředí MATLAB

pdf/ - obsahuje text práce a manuál k aplikaci

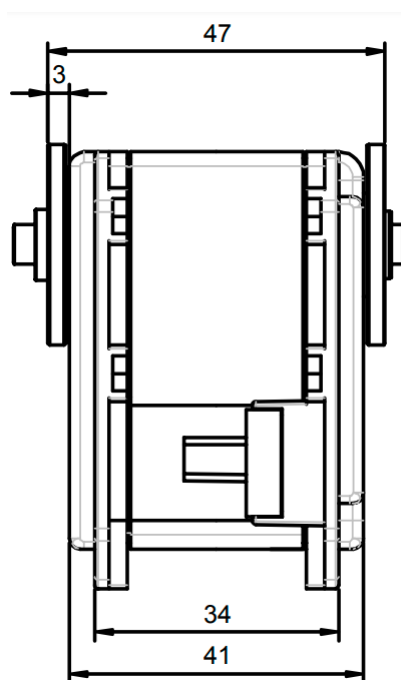
B Servo motory RX-64



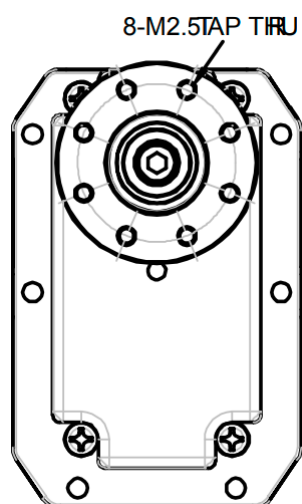
Obr. B.1: Rozsah servo motoru RX-64 při pohledu z přední strany [10].



Obr. B.2: Rozměry servo motoru RX-64 - pohled z přední strany [12].



Obr. B.3: Rozměry servo motoru RX-64 - pohled z boční strany [12].



Obr. B.4: Rozměry servo motoru RX-64 - pohled ze zadní strany [12].

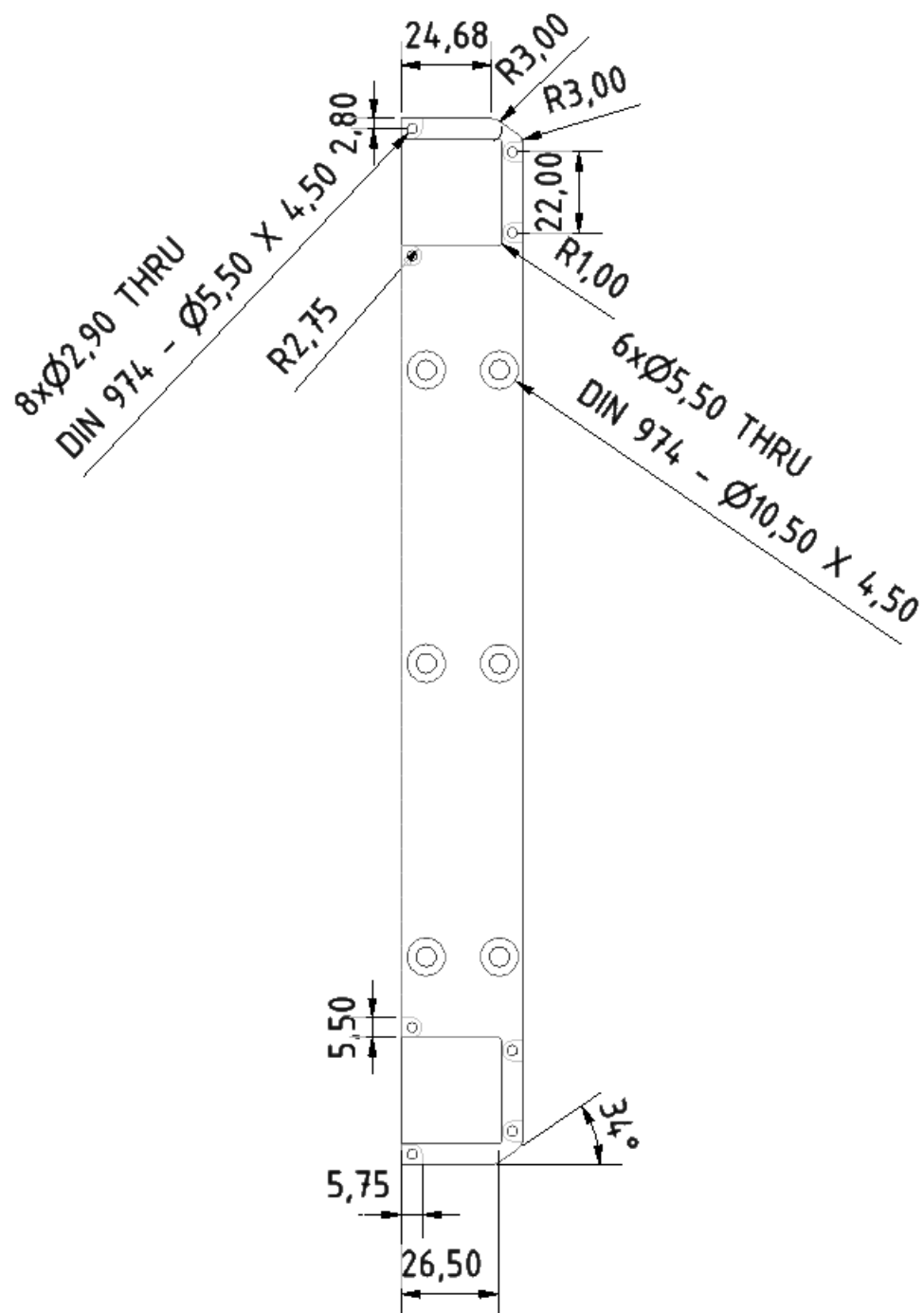
Tab. B.1: Tabulka instrukcí [11].

Hodnota	Instrukce	Hodnota	Instrukce
0x01	Ping	0x06	Tovární nastavení
0x02	Čtení	0x08	Restart
0x03	Zápis	0x83	Synchronizovaný zápis
0x04	Registrovaný zápis	0x92	Hromadné čtení
0x05	Akce		

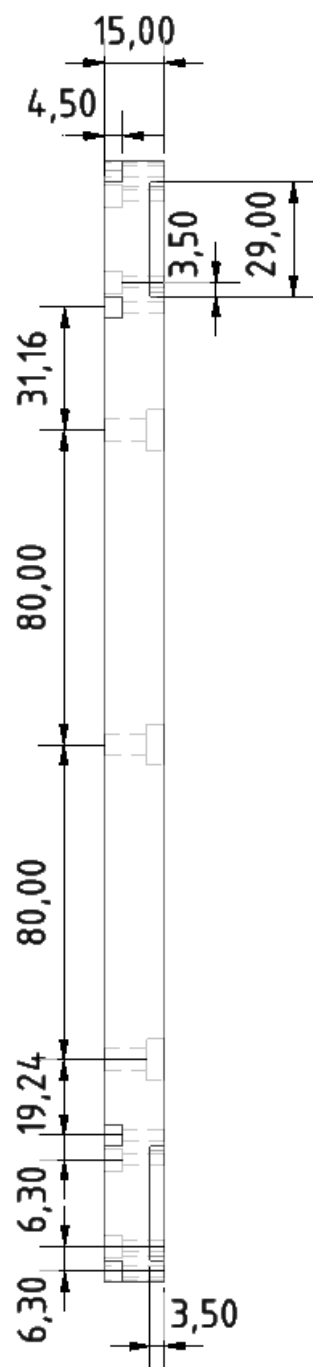
Tab. B.2: Kontrolní data paměti - adresy 0-18 jsou zapisovány do paměti EEPROM a 24-49 do paměti RAM. V tabulce jsou tyto paměti rozděleny tlustou čarou [10].

Adresa	Velikost [Byte]	Název	Přístup	Rozsah hodnot
0	2	Číslo modelu	Čtení	-
2	1	Verze firmwaru	Čtení	-
3	1	ID	Čtení/Zápis	0-253
4	1	Přenosová rychlost	Čtení/Zápis	0-254
5	1	Zpoždění odpovědi	Čtení/Zápis	0-254
6	2	Hraniční úhel (po SHR)	Čtení/Zápis	0-1023
8	2	Hraniční úhel (proti SHR)	Čtení/Zápis	0-1023
11	1	Teplotní limit	Čtení/Zápis	0-100
12	1	Minimální vstupní napětí	Čtení/Zápis	50-250
13	1	Maximální vstupní napětí	Čtení/Zápis	50-250
14	2	Maximální moment	Čtení/Zápis	0-1023
16	1	Typ vracení statusu	Čtení/Zápis	0-2
17	1	Alarm LED	Čtení/Zápis	0-255
18	1	Informace o vypnutí	Čtení/Zápis	0-255
24	1	Povolení momentu	Čtení/Zápis	0-1
25	1	LED	Čtení/Zápis	0-1
26	1	Dodržení úhlu (po SHR)	Čtení/Zápis	0-255
27	1	Dodržení úhlu (proti SHR)	Čtení/Zápis	0-255
28	1	Moment při nastavování úhlu (po SHR)	Čtení/Zápis	0-255
29	1	Moment při nastavování úhlu (proti SHR)	Čtení/Zápis	0-255
30	2	Cílová pozice	Čtení/Zápis	0-1023
32	2	Rychlost pohybu	Čtení/Zápis	0-2047
34	2	Maximální moment	Čtení/Zápis	0-1023
36	2	Aktuální rychlost	Čtení	0-1023
38	2	Aktuální pozice	Čtení	0-2047
40	2	Aktuální moment	Čtení	0-2047
42	1	Aktuální napětí	Čtení	50-250
43	1	Aktuální teplota	Čtení	0-100
44	2	Registrovaná instrukce	Čtení	0-1
46	1	Pohyb	Čtení	0-1
47	1	Zamknutí paměti EEPROM	Čtení/Zápis	0-1
48	2	Minimální proud	Čtení/Zápis	20-1023

C Návrh báze manipulátoru

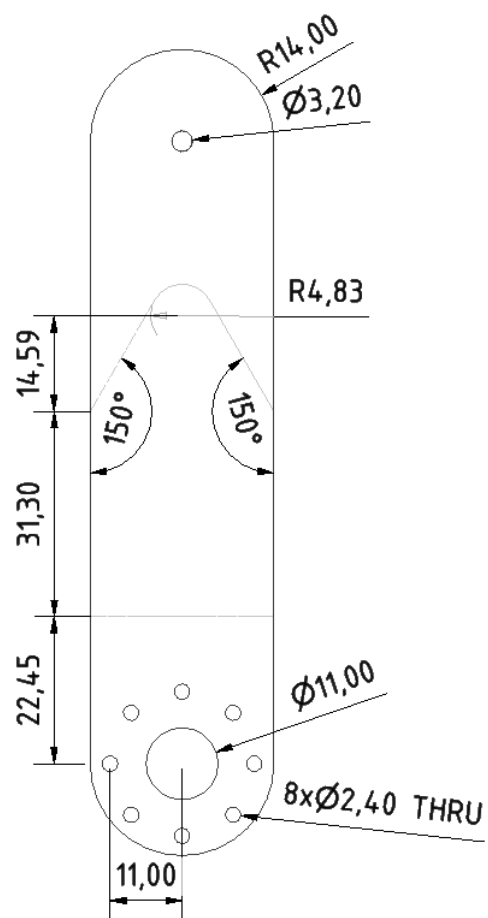


Obr. C.1: Nepohyblivé rameno - pohled z horní strany.

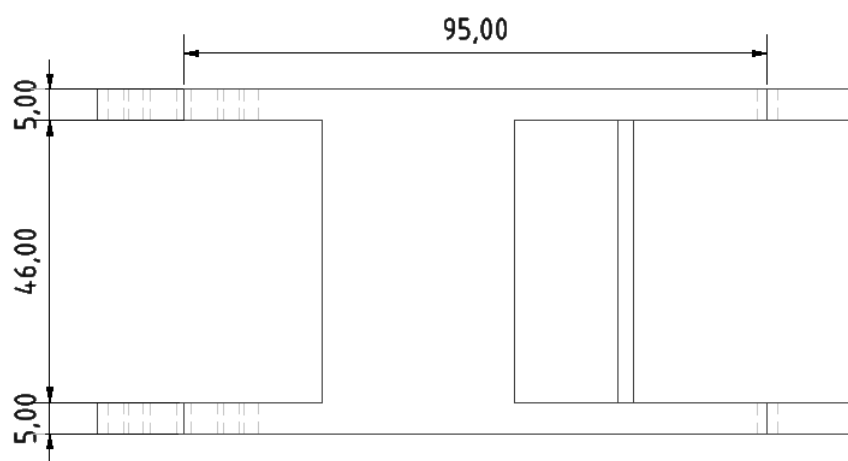


Obr. C.2: Nepohyblivé rameno - pohled z přední strany.

D Návrh aktivních ramen manipulátoru

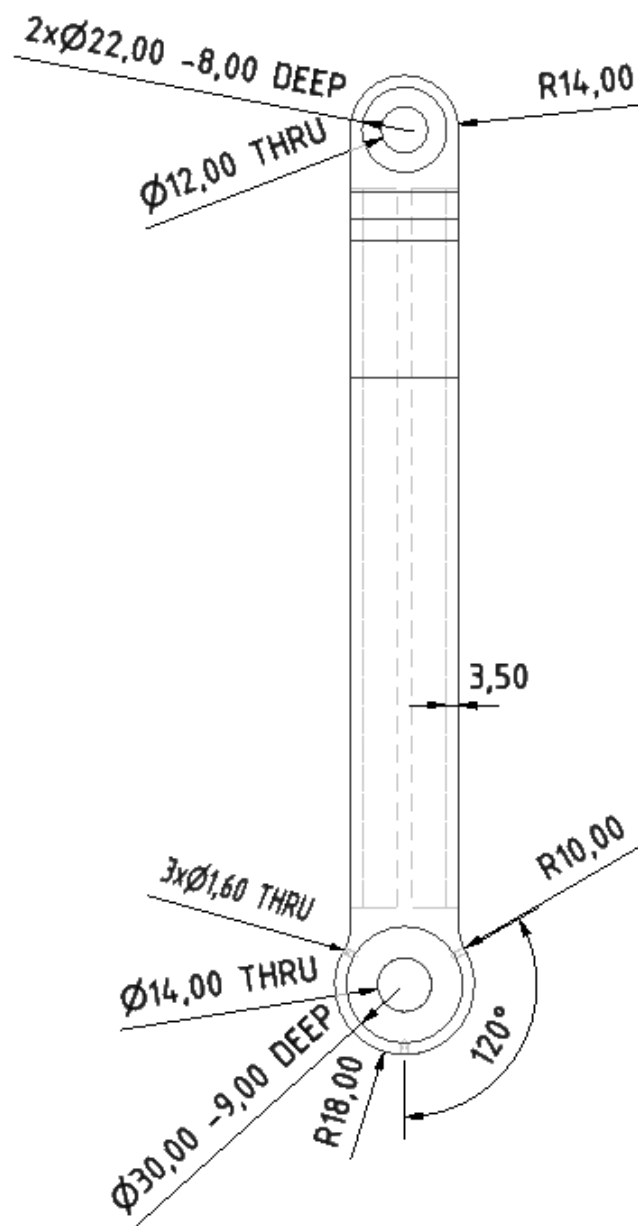


Obr. D.1: Aktivní rameno - pohled z horní strany.

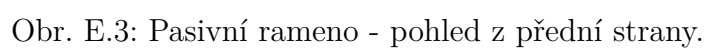
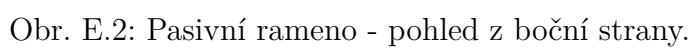


Obr. D.2: Aktivní rameno - pohled z boční strany.

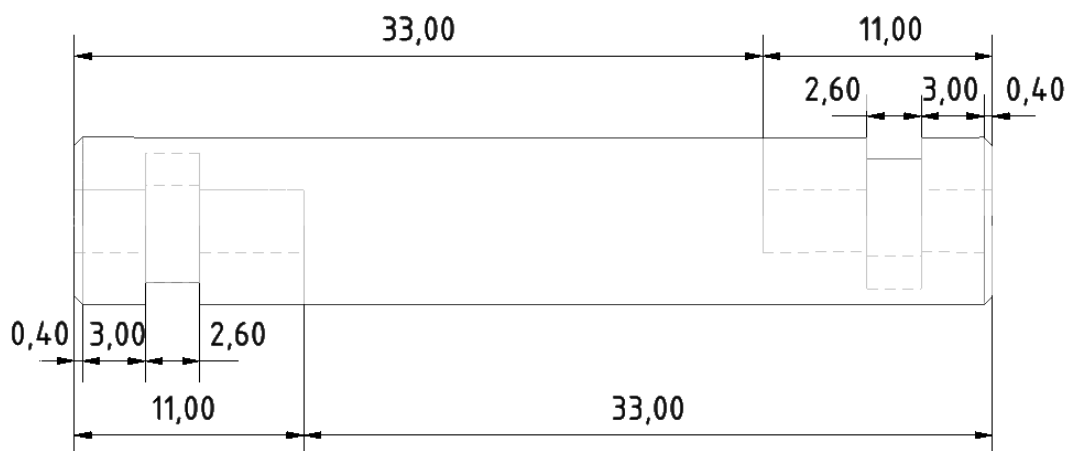
E Návrh pasivních ramen manipulátoru



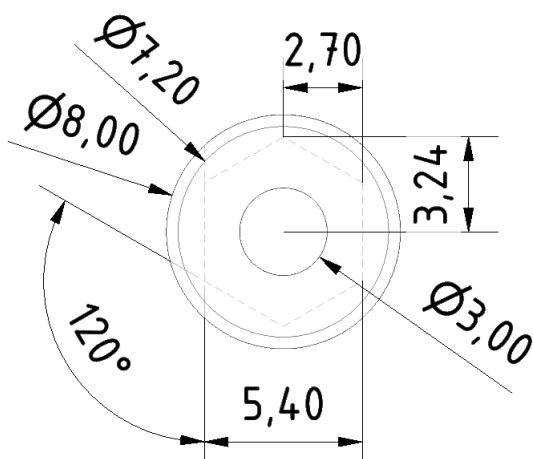
Obr. E.1: Pasivní rameno - pohled z horní strany.



F Návrh hřídele v pasivního kloubu

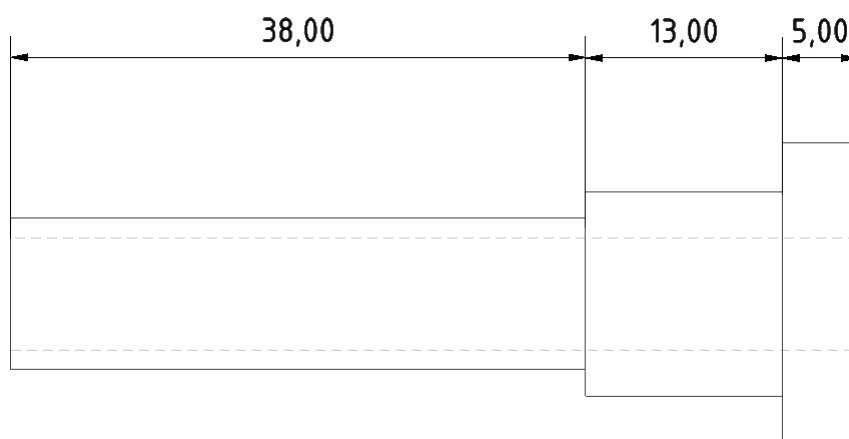


Obr. F.1: Hřídel pasivního kloubu - pohled z boční strany.

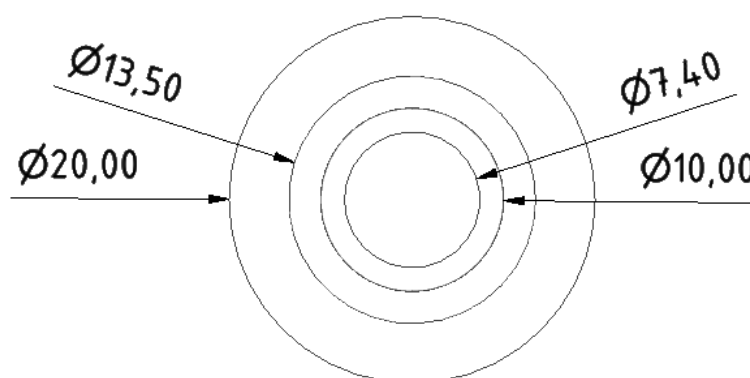


Obr. F.2: Hřídel pasivního kloubu - pohled z horní strany.

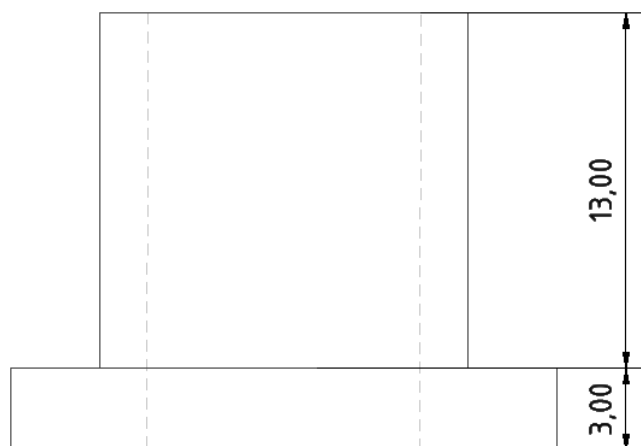
G Návrh hřídele efektoru



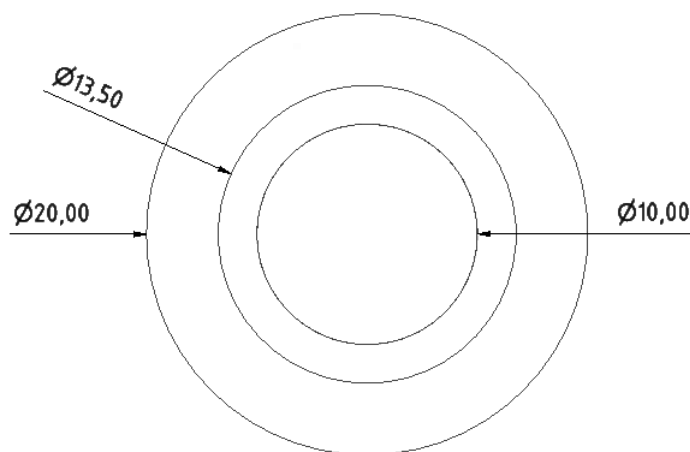
Obr. G.1: Hřídel efektoru díl 1 - pohled z boční strany.



Obr. G.2: Hřídel efektoru díl 1 - pohled z horní strany.

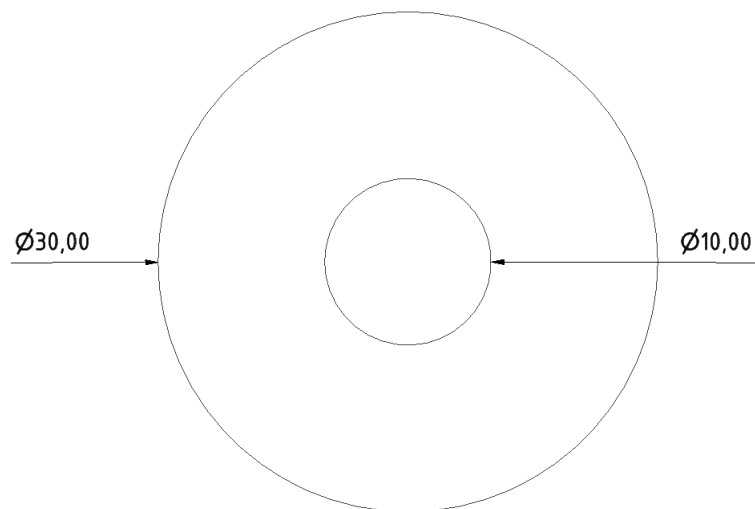


Obr. G.3: Hřídel efektoru díl 2 - pohled z horní strany.



Obr. G.4: Hřídel efektoru díl 2 - pohled z horní strany.

H Návrh vložky mezi ložiska

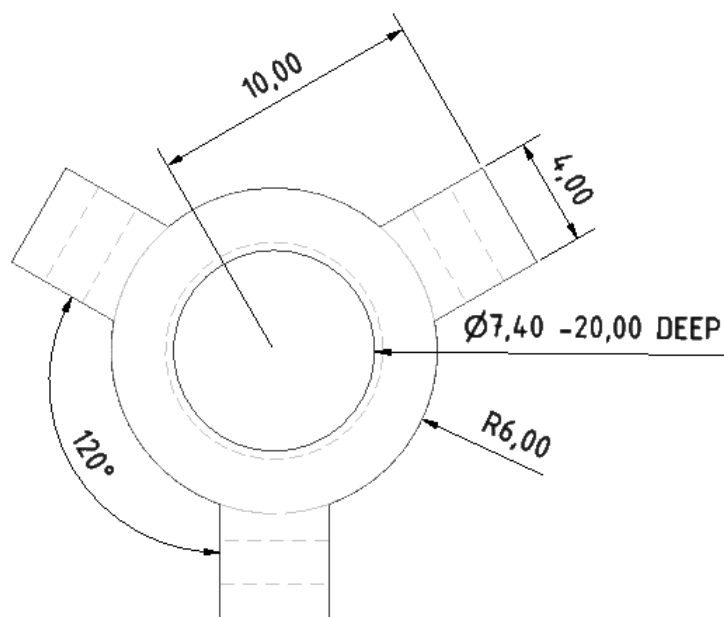


Obr. H.1: Vložka mezi ložiska - pohled z horní strany.

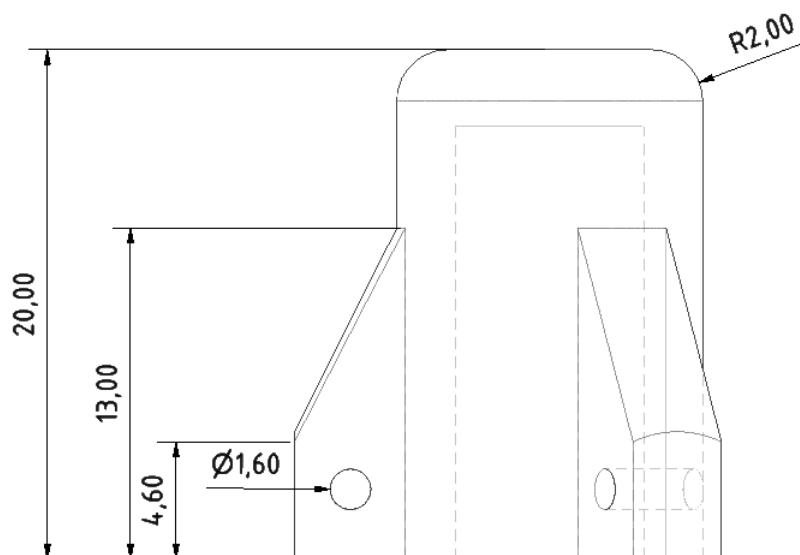


Obr. H.2: Vložka mezi ložiska - pohled z boční strany.

I Návrh tlačícího prvku na tužku

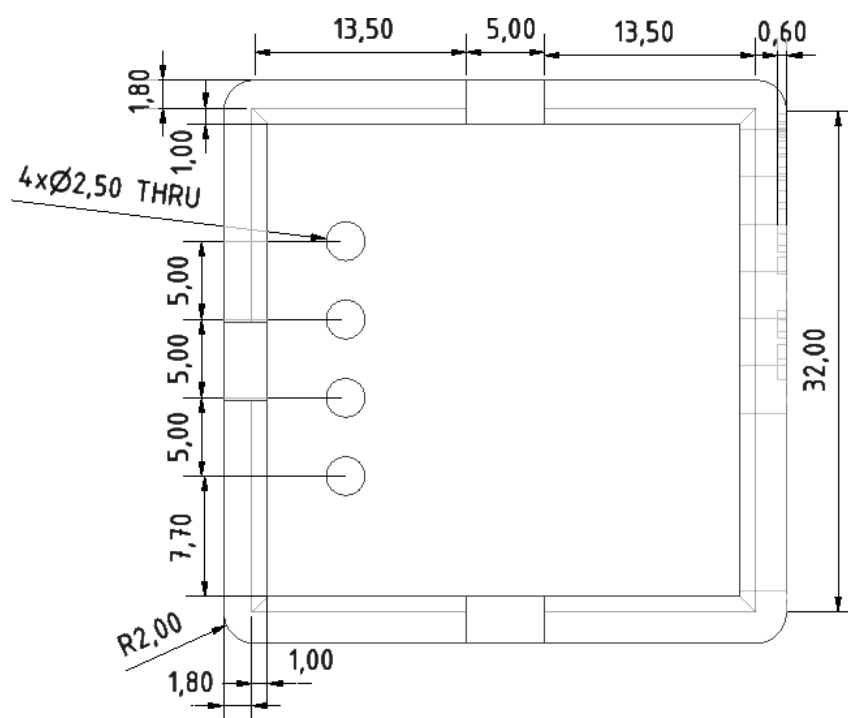


Obr. I.1: Tlačící prvek - pohled z boční strany.

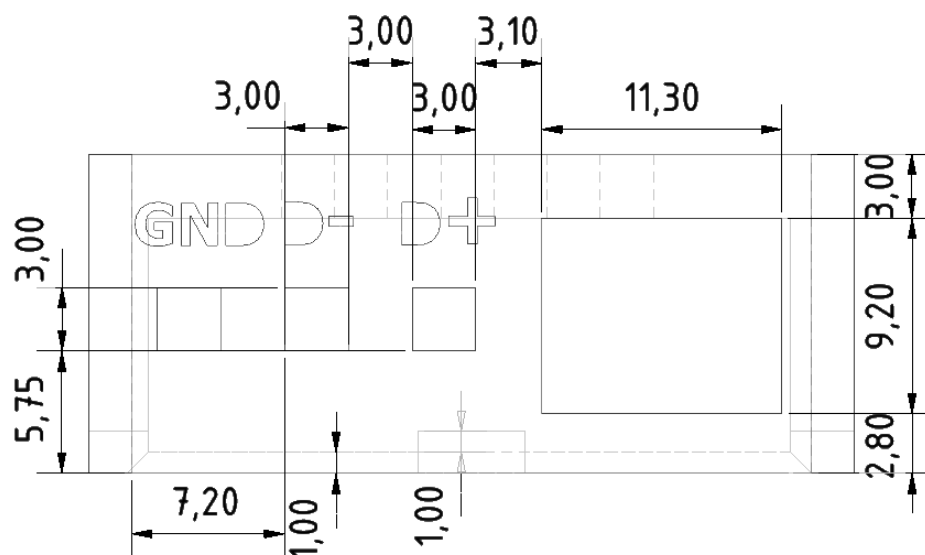


Obr. I.2: Tlačící prvek - pohled z horní strany.

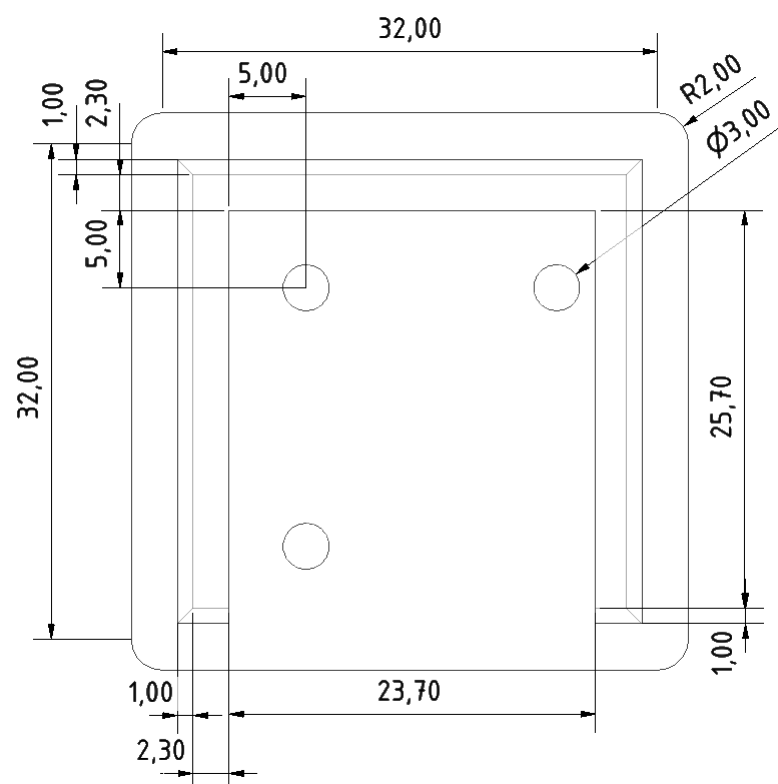
J Návrh rozvodné krabičky



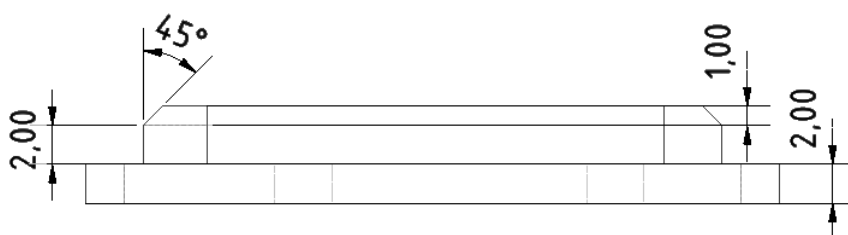
Obr. J.1: Vrchní díl rozvodné krabičky - pohled z horní strany.



Obr. J.2: Vrchní díl rozvodné krabičky - pohled z boční strany.

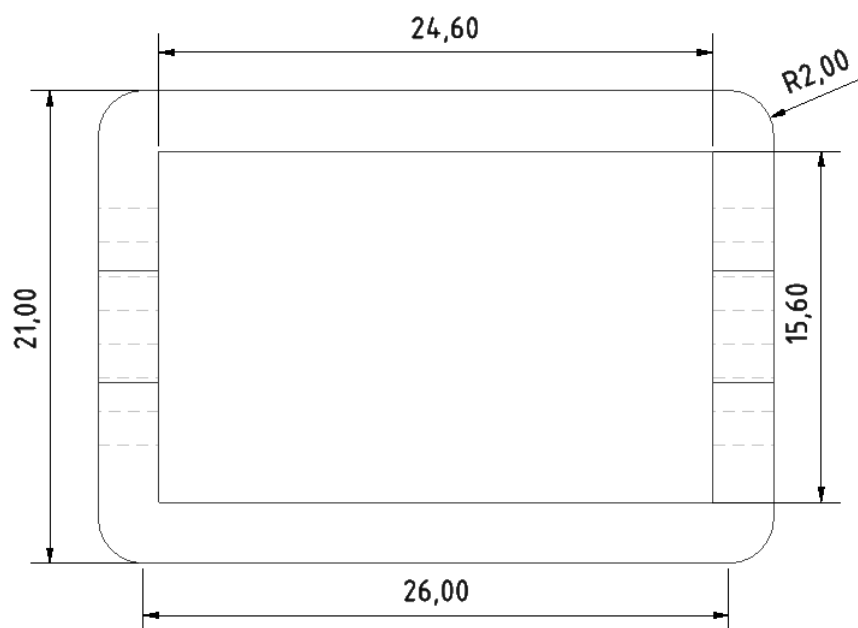


Obr. J.3: Spodní díl rozvodné krabičky - pohled z horní strany.

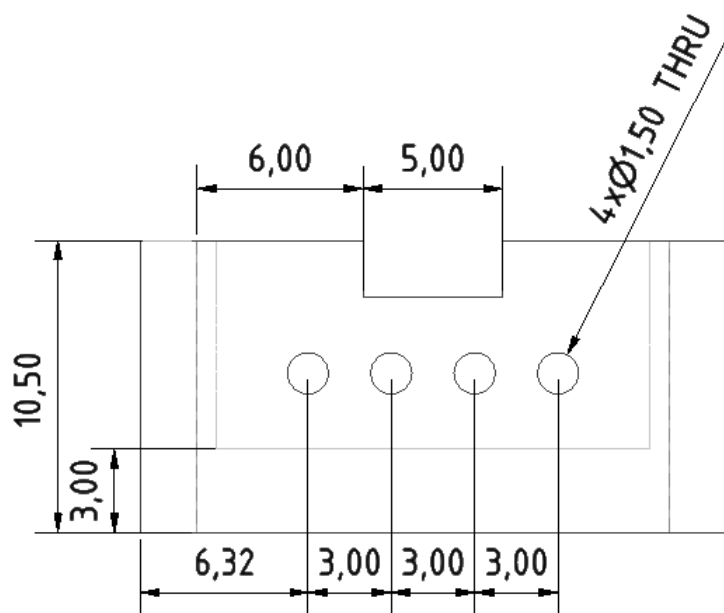


Obr. J.4: Spodní díl rozvodné krabičky - pohled z boční strany.

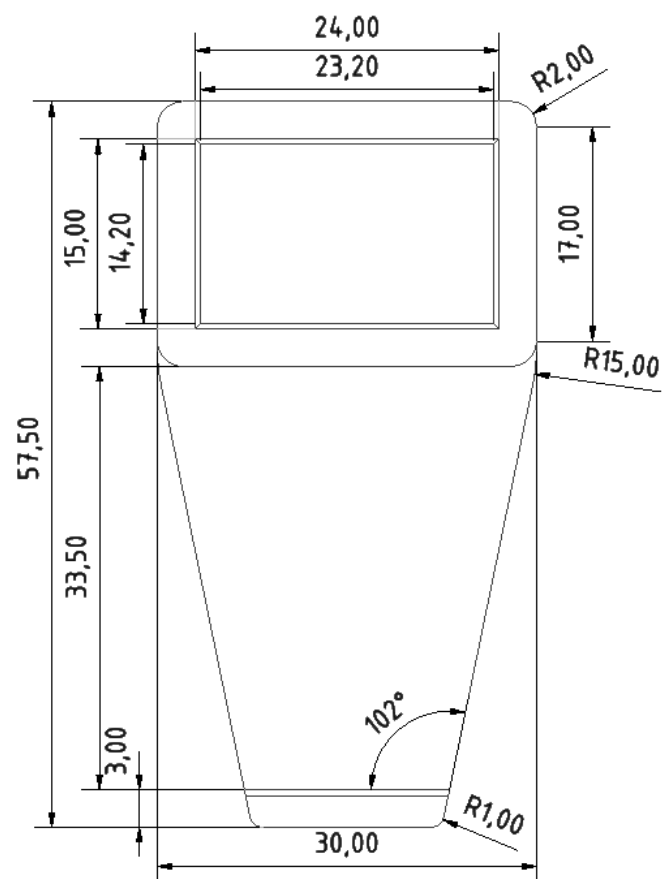
K Návrh uchycení kabelů



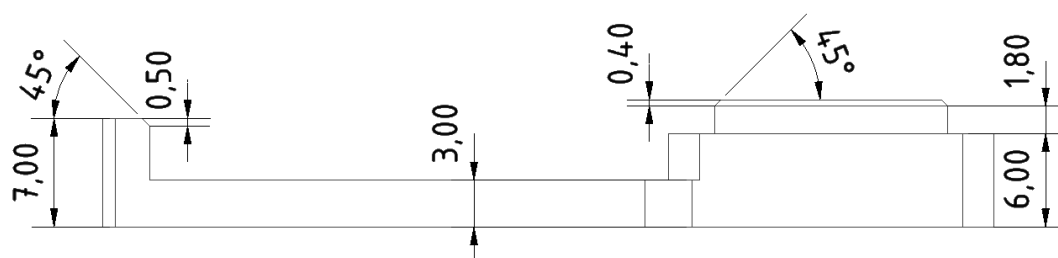
Obr. K.1: Držák kabelů - pohled z horní strany.



Obr. K.2: Držák kabelů - pohled z boční strany.

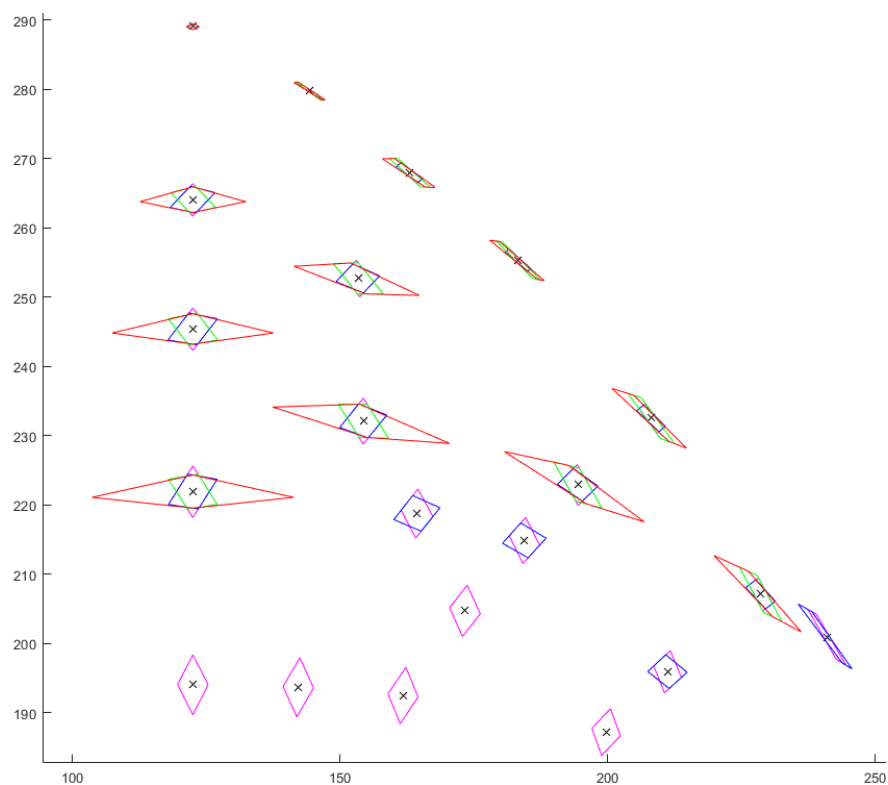


Obr. K.3: Úchyt - pohled z dolní strany.

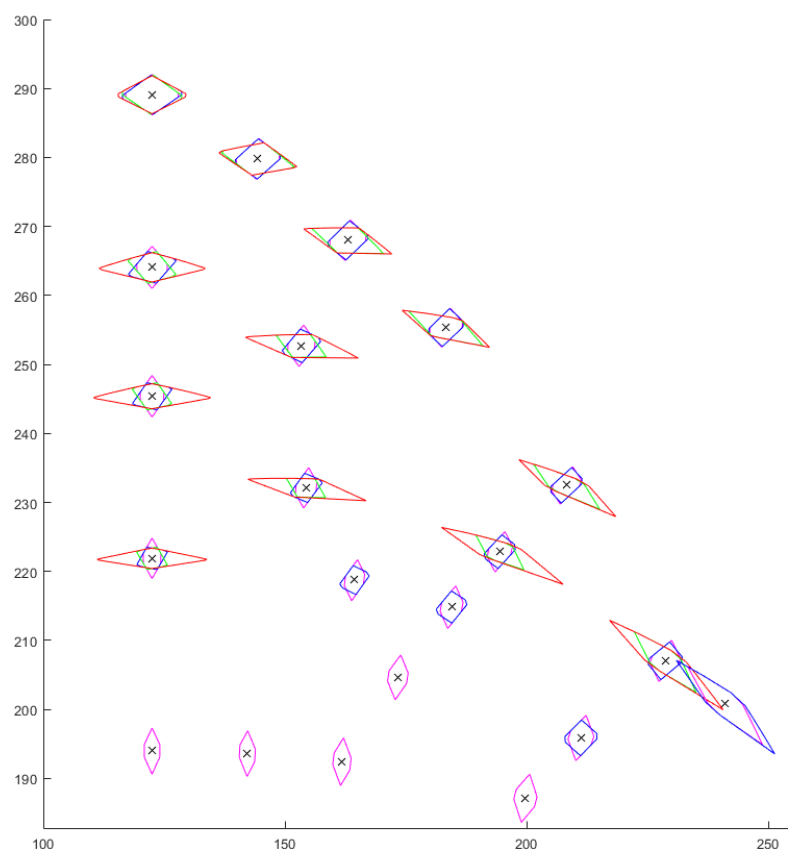


Obr. K.4: Úchyt - pohled z boční strany.

L Odchylka manipulátoru



Obr. L.1: Zobrazení 10x zvětšené odchylky aktivních úhlů od požadované pozice manipulátoru pro různé pozice z Obrázku 6.1 dosažitelné více konfiguracemi. Černě požadovaná pozice, purpurově ++, modře $-+$, zeleně $+ -$, červeně $--$.



Obr. L.2: Zobrazení 2x zvětšené odchylky způsobené nepřesnostmi 3D tisku ramen ($\pm 0,3\text{mm}$) od požadované pozice manipulátoru pro různé pozice z Obrázku 6.3 dosažitelné více konfiguracemi. Černě požadovaná pozice, purpurově ++, modře -+, zeleně +-, červeně --.

M Manuál pro aplikaci pro ovládání planárního pantografu

Vzhled aplikace je vidět na Obrázku M.1, kde jsou zároveň vyplněny výchozí hodnoty. Samotnou aplikaci lze rozdělit do čtyř částí: a) komunikace počítače s motory, b) nastavení parametrů motorů, c) nastavení pozice, d) informace o akcích aplikace.

Po spuštění aplikace je nutno nastavit komunikaci, poté ID motorů společně s dalšími parametry. Následně zkontrolovat nastavení správných motorů a potom nastavovat požadované pozice.

The screenshot shows the application interface for controlling a planar pantograph. It is divided into three main sections:

- Nastavení motoru** (Motor Settings):
 - Motor 1 (θ1) ID: 1
 - Motor 2 (θ4) ID: 4
 - Offset motoru [krok]: -14
 - Krok motoru [°]: 0.291
 - Odchylka od pozice [krok]: 0
 - Sklon momentu: 16
 - Rychlost [%]: 0 to 100 slider
 - Moment [%]: 0 to 100 slider
 - Nastavit motory button
 - Blik motor1 (θ1) and Blik motor2 (θ4) buttons
- Nastavení pozice v souřadnicích** (Position Settings):
 - X [mm]: 0.0
 - Y [mm]: 0.0
 - Priorita konfigurace: 1=největší, 4=nejmenší
 - ++ 1, +- 3, -- 2, -+ 4 buttons
 - Nastavit pozici button
 - Nastavení uhlu aktivních kloubů:
 - θ1 (M1) [°]: 0.0
 - θ4 (M2) [°]: 0.0
 - Nastavit natočení button
- Nastavení serialového portu pro komunikaci** (Serial Port Settings):
 - Serialový port: COM3
 - Baud Rate [bps]: 57600
 - Odpojeno / Pripojeno toggle
 - Pripojení button

On the right, there is an **Informace** (Information) window with instructions: 1) Pripojte serialový port, 2) Nastavte motory, 3) Zadejte pozice. Below this is a red '19' error code and a status bar for Motor 1 and Motor 2.

Obr. M.1: Aplikace pro ovládání planárního pantografu s vyznačenými ovládacími prvky.

Aplikace má celkem 31 prvků, jejichž funkce je následující (číslo na Obrázku M.1 odpovídá číslu v seznamu):

1. Výběr ID motorů, se kterými se má komunikovat. Rozsah 0-253.
2. Nastavení offsetu úhlu motorů, nebo-li o kolik kroků má příslušný motor posunout nastavované pozice. Rozsah hodnot je od -600 do 600, kde mínus je ve směru hodinových ručiček a plus v protisměru.
3. Nastavení velikosti kroku motoru, se kterou se má počítat ve výpočtech pozic. Hodnotu lze nastavit v rozsahu 0,01-5°.
4. Určuje, s jakou tolerancí kroků může být požadovaná hodnota nastavena v rozsahu 0-255. Lze tak simulovat větší nepřesnost nastavení pozice jednotlivých motorů.

5. Upravuje použitý moment v blízkosti cílové pozice a tím i dojezdovou rychlost do cílové pozice. Malá hodnota může rozkmitat manipulátor. Nastavená hodnota je pro oba motory.
6. Nastavení rychlosti pohybu motorů v procentech. U některých motorů hodnota 0 znamená žádná rychlost a u dalších rychlost bez omezení. Zároveň je tato rychlost omezena momentem (7). Nastavená hodnota je pro oba motory.
7. Nastavení maximálního momentu motorů v procentech. U některých motorů hodnota 0 znamená nulový moment a tím pádem nulový pohyb a u jiných moment bez jakéhokoli omezení. Zároveň maximální moment ovlivňuje rychlost pohybu motorů (6). Nastavená hodnota je pro oba motory.
8. Při zmáčknutí zapíše do programu a motorů nastavené hodnoty z bodů 1-7.
9. Zapnutí LED pro vybraný motor na 1s. Slouží pro indikaci funkční komunikace motorů s počítačem a přiřazení správného ID k pozici v manipulátoru.
10. Zadání souřadnic v pracovním prostoru manipulátoru v rozsahu $X = 0-120\text{mm}$ a $Y = 0-80\text{mm}$. Tyto hodnoty nemusí odpovídat později nastaveným - viz 12. Kde $[0;0]$ je vzdálená od prvního motoru (θ_1) 62,5mm v ose X ve směru k druhému motoru (θ_1) a v ose Y 176mm.
11. Výběr priority konfigurace pro nastavení zvolené pozice v 10. Hodnoty nemohou být stejné a 1 znamená největší prioritu a 4 nejmenší. Pokud není možné nastavit pozici konfigurací s nejvyšší prioritou, je použita konfigurace s nižší prioritou. Výsledná konfigurace je vypsána na informační panel (19). Konfigurace ++ je vždy dosažitelná. Při změně priorit konfigurací je vždy duplikátní nenastavovaná konfigurace změněna na předchozí hodnotu měněné konfigurace, takže nikdy nebudou mít dvě konfigurace stejnou prioritu.
12. Odeslání příkazu na nastavení pozice v pracovním prostoru v XY souřadnicích (10). Zvolená pozice je přepočtena na úhly, jež jsou převedeny na hodnotu pro motory a zpět převedeny na úhly motorů a pozici v pracovním prostoru, což je vypsáno na informační panel (15). Těmito převody je finální pozice nastavena na nejbližší možnou konfiguraci v rámci natočení motorů a zároveň může být nastavována jiná pozice pro rozdílné konfigurace. Pro některé pozice to znamená i nastavení efektoru mimo tento vymezený prostor.
13. Úhly natočení motorů. Možný rozsah $0^\circ-180^\circ$. Přičemž nejsou nastavitelné hodnoty pro θ_1 větší a θ_4 menší než uvádí Tabulka M.1.
14. Příkaz k nastavení zvolených úhlů.
15. Nastavení sériového portu, přes který má probíhat komunikace mezi počítačem a motory.
16. Nastavení komunikační rychlosti.
17. Připojení nebo odpojení sériového portu dle nastavených hodnot v 15 a 16.

18. Indikace připojení sériového portu, kde červená znamená, že připojení neexistuje, a zelená, že spojení bylo navázáno - neznačí aktivní spojení.
19. Informační panel indikuje, zda bylo nastavení nebo akce odeslána a doplňuje dodatečné informace k určitým příkazům:
 - Spuštění aplikace 1) *Připoje seriový port* 2) *Nastavte motory* 3) *Zadejte pozice*.
 - 8 - *Nastaveno*.
 - 9 - *Motor x LED zapnuta* po skončení *Motor x LED vypnuta*.
 - 12 - *Konfigurace: xx Vysledna pozice: [xx.x;xx.x]mm Vysledne nastaveni uhlu: θ_1 :xx.x θ_4 :xx.x*.
 - 14 - Pro povolené hodnoty *Nastavene uhly: θ_1 :xx.x θ_4 :xx.x Nastavena pozice: [xx.x;xx.x]mm* pro kolizní hodnoty *Nelze nastavit Z duvodu kolize ramen v pasivnim kloubu Zmensete uhel mezi rameny l1 a l4*.
 - 17 - Při připojení *Připojeno k xxx* a po odpojení *Odpojeno od xxx*.
20. Zobrazení ID motorů, kterým jsou posílány instrukce. Hodnota je aktualizována při nastavení motorů (1). Pokud jsou tyto pole prázdná ID nebyla nastavena.

Pozn: Samotná aplikace neřeší problematiku špatně doručených paketů a zda již motory dosáhly cílové pozice. Proto může dojít ke kolizi či nutnosti potvrdit vícekrát danou akci a zkontrolovat, zda se aktualizovalo informační pole. Pokud byla zadána instrukce pro pohyb motorů před dokončením aktuálního pohybu, tak je aktuální pohyb přerušen a proveden nový.

Tab. M.1: Hraniční úhly pro natočení motorů, kde zvětšení úhlu mezi aktivními rameny již může způsobit kolizi.

θ_1 [°]	100	105	110	115	120	125	130	135	140
θ_4 [°]	0	5	10	10	15	15	20	20	25
θ_1 [°]	145	150	155	160	165	170	175	180	
θ_4 [°]	25	30	35	45	55	65	70	80	