



**Střední průmyslová škola elektrotechnická
Praha 10, V Úžlabině 320**

Maturitní práce z odborných předmětů

Šestiosá robotická paže

Ondřej Váňa

E4.A

Vedoucí práce: **Ing. Bc. Petr Hellebrand**

Studijní obor: **26-41-M/01 Elektrotechnika**

Rok odevzdání: **2023**

Čestné prohlášení

Odevzdáním této maturitní práce na téma **Šestiosá robotická paže** potvrzuji, že jsem ji vypracoval/a pod vedením vedoucího samostatně za použití v práci uvedených pramenů a literatury. Dále potvrzuji, že odevzdaná vytiskněná verze písemné zprávy (protokolu) a plakátu se plně shoduje s odevzdanou elektronickou verzí.

V Praze dne.....
.....
Podpis autora/autorky práce

Anotace

Tato práce se zabývá návrhem a provedením šestiosé robotické paže s integrovaným kinematickým modelem pro řešení převodů souřadnicových soustav. Robotická paže je koncipována jako učební model pro všechny možné úrovně. Pro jednoduchost ovládání je součástí práce také vytvoření ovládacího uživatelského rozhraní. Důležitým úkolem této práce je zprostředkovat komplexní problematiku do jednoduché podoby s intuitivním ovládáním.

Klíčová slova

inverzní kinematika, učební model, uživatelské rozhraní, šestiosá robotická paže

Annotation

This work deals with the design and implementation of a six-axis robotic arm with an integrated kinematic model for solving coordinate system conversions. The robotic arm is designed as a learning model for all possible levels. For ease of use, the work also includes control user interface. An important task of this work is to convey a complex issue in a simple form with intuitive control.

Keywords

inverse kinematics, educational model, user interface, six axis robotic arm

Obsah

1	ÚVOD A CÍL PRÁCE	5
2	TEORETICKÁ ČÁST	6
2.1	REŠERŠE TRHU	6
2.1.1	<i>Průmyslové zpracování.....</i>	6
2.1.2	<i>Open Source zpracování</i>	7
2.2	MANIPULACE A POHYB V 3D PROSTORU	8
2.2.1	<i>Přímá kinematika</i>	8
2.2.2	<i>Inverzní kinematika</i>	9
3	PRAKTICKÁ ČÁST	10
3.1	POHONY A PŘEVODY OS	10
3.1.1	<i>Motory.....</i>	10
3.1.2	<i>Planetové převody</i>	10
3.1.3	<i>Mechanické rozvody</i>	12
3.2	NÁVRH MECHANICKÉ KONSTRUKCE.....	13
3.3	ŘÍZENÍ A OVLÁDÁNÍ	15
3.3.1	<i>Hlavní řídící jednotka.....</i>	15
3.3.2	<i>Vedlejší řídící jednotka.....</i>	16
3.4	SENZOR NATOČENÍ	17
3.5	DRIVER KROKOVÝCH MOTORŮ.....	18
3.6	NAPÁJENÍ	18
3.7	BEZPEČNOSTNÍ OBVOD.....	18
3.8	PRAKTICKÉ VYUŽITÍ KINEMATIKY	19
3.9	UŽIVATELSKÉ ROZHRANÍ	20
3.10	KONCOVÝ EFEKTOR	20
4	ZÁVĚR	21
5	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	22
6	SEZNAM PŘÍLOH:	23

1 Úvod a cíl práce

Se stále rostoucím počtem robotických systému vzniká i stále větší poptávka po odbornících, co jsou schopni takové stroje ovládat. Za tímto účelem také vzniká tato práce, jejímž cílem je poskytnout prostředky pro základní vzdělávání v oboru robotiky. Základními robotickými systémy v dnešním průmyslu jsou robotické paže, a právě na danou problematiku se práce soustředí.

Jak již bylo řečeno, úkolem práce je vytvořit učební model šestiosé robotické paže s integrovaným kinematickým modelem, jehož úkolem je řešit pohyb v prostoru. Jelikož se jedná o učební model pro co největší počet úrovní pokročilosti, je důležité, aby i samotné ovládání tomu bylo uzpůsobeno. Současně by mělo poskytovat všechny potřebné prostředky s dostatečně jednoduchým použitím. Pro základní ovládání je k dispozici vizualizační program, který umožňuje ovládat polohu po krocích a sledovat komunikaci. Robotickou paži lze také ovládat pomocí příkazů zaslaných přes sériovou linku. Toto umožňuje vytvoření vlastních ovládacích programů nebo ovládat celou robotickou paži pomocí samostatného mikrokontroleru.

Jelikož se má jednat o model průmyslové paže, lze zde pozorovat určité podobnosti. Jedna z podobností je samotná konstrukce a umístění motorů. Další taková je univerzalita využití celé paže. Právě kvůli tomu je zde možnost implementace vlastního koncového efektoru (nástroje).

2 Teoretická část

Tato kapitola se zaměřuje na teoretické informace týkající se tématu. Řeší se zde rešerše trhu a porovnání výhod a nevýhod jednotlivých produktů, teorie problematiky přímé a inverzní kinematiky.

2.1 Rešerše trhu

Pod názvem šestiosá robotická paže lze nalézt na trhu mnoho profesionálních i hobby produktů. Mezi hlavní parametry, podle kterých lze produkty ohodnocovat a třídit, patří dosah, maximální zátěž, spolehlivost a rychlosť pohybu. Důležitou informací je také možnost kompatibility s nástroji a možnost ovládání.

2.1.1 Průmyslové zpracování

Mezi průmyslové konkurenty se dají zařadit roboti od firmy ABB. Například robot Articulated Robot IRB 1100, jehož akční rádius dosahuje 475 mm, je schopen unést objekt o váze až 4 kg. Tento stroj je též vybaven integrovaným zdrojem stlačeného vzduchu, který je vyveden na zápěstí robota. Zde je také možnost nechat vyvést až 16 signálových linek a zdroj elektrické energie. Robot se také vyznačuje velmi vysokou přesností, a to až při stacionární poloze 0,01 mm a 0,05 mm při pohybu. (ABB Asea Brown Boveri Ltd, 2023). Firma ABB přímo prodává variaci různých nástrojů, počínaje jednoduchými chapadly až po komplexní chapadlové ústrojí (ABB Asea Brown Boveri Ltd.).

Obrázek 1 IRB 1100



Zdroj: (ABB Asea Brown Boveri Ltd, 2023).

Jako další příklad průmyslového zpracování lze uvést robota KR 4 AGILUS od firmy Kuka. Tento robot dosahuje dosti podobných výsledků, ale při větším dosahu, a to konkrétně 601 mm. Na zápěstí robota je stejně jako v předchozím případě možnost přívodu stlačeného vzduchu a 16 signálových linek i s napájením (KUKA AG, 2022).

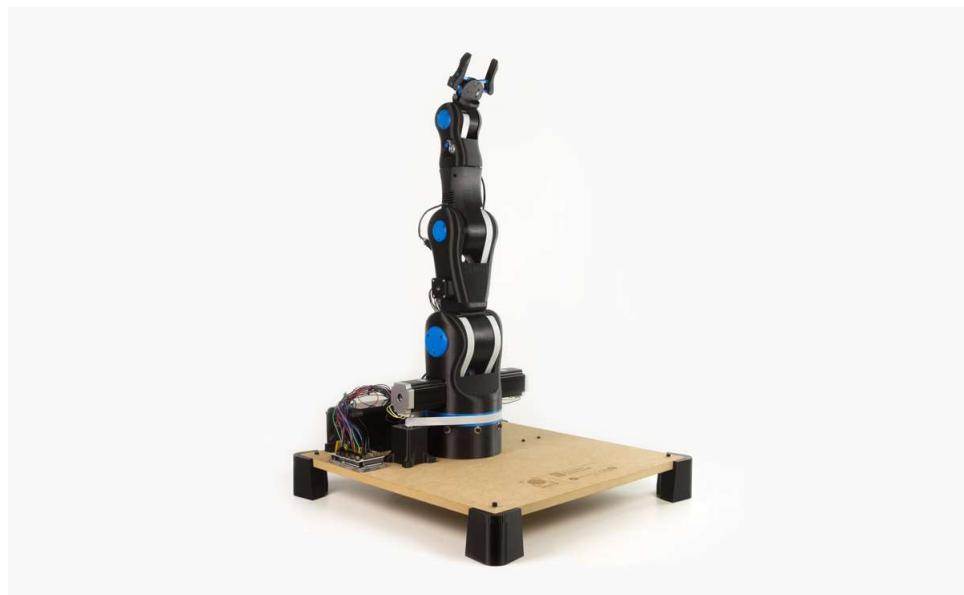
Výhodou těchto průmyslových robotů je jejich vysoká robustnost a velká přesnost. Toto se také promítá na jejich ceně, jelikož začíná někde v nižších desítkách tisíc amerických dolarů.

2.1.2 Open Source zpracování

Právě z důvodu vysoké pořizovací ceny robotických paží a vysokým nárokům na jejich ovládání či provoz, neměli menší edukační instituce možnost uvedené roboty provozovat. Toto se ovšem mění se stále dostupnější možností 3D tisku a vznikem několika open source projektů zabývajících se právě zmiňovanou problematikou.

Jeden takový projekt vznikl na půdě barcelonské firmy BCN3D. Tato firma se zabývá vývojem špičkových 3D tiskáren a open source projekt s názvem BCB3D MOVEO založila právě z důvodu zlepšení přístupu k robotice a moderním technologiím všeobecně. Součástí projektu jsou všechny potřebné CAD soubory, seznam všech potřebných dílů a veškerý potřebný firmware. Jedná se o 5 DOF robotickou paži poháněnou krokovými motory bez jakékoliv zpětné vazby. Řízení je zajištěno pomocí platformy Arduino mega a sériové komunikace s počítačovým programem. Jako nástroj je zde jednoduché chapanadlo poháněné modelářským servo motorem (BCN3D Technologies, 2016).

Obrázek 2 Robotická paže BCN3D MOVEO



Zdroj: BCN3D Technologies (2016).

Dalším podobným projektem je Niryo One. Jedná se také o projekt uzpůsobený pro výukové účely. Odpovídá tomu dosah robotické paže (440 mm) a maximální nosnost (300 g). Tentokrát se na každém motoru nachází rotační enkodér pro zpětnovazební sledování polohy a detekci nárazu. Koordinovaný pohyb šesti os volnosti obstarává Raspberry Pi 3 spolu s přídavnými moduly. Projekt obsahuje také pět možností koncového nástroje. Kromě tří variant chapadel je zde také modul vakuové pumpy a elektromagnetu. Pro ovládání robotické paže lze použít přiložený software, který podporuje jednoduché programování sekvencí (Niryo).

Tyto open source projekty nejsou ovšem tak dokonalé jako jejich průmysloví příbuzní. A nedostává se jim možnosti využít přenosného grafického rozhraní pro snadné a intuitivní ovládání. Další nevýhodou je malá nosnost a nepříliš velký rozsah pohybu.

2.2 Manipulace a pohyb v 3D prostoru

Pro dobrou schopnost manipulace robotické paže v prostoru využíváme souřadnicové systémy. První takový systém, který se nám nabízí, je osový souřadnicový systém. Tento systém se využívá zejména z pohledu robotické paže, jelikož ke každému kloubu připadá odpovídající úhel. Z natočení všech úhlů následně vyplývá poloha koncového bodu efektoru. Pro lepší možnosti orientace a následného řízení robota člověkem se vytvoří kinematický model a poloha se udává v kartézském souřadnicovém systému. Toto usnadní zajištění plynulosti pohybu po zadáné trajektorii. Poloha koncového bodu se udává pomocí šesti parametrů, které znázorňují posunutí a rotaci vůči bázi. Bází se rozumí pevně umístěný souřadnicový systém v základně robotické paže (KOLÍBAL, 2016 str. 374).

2.2.1 Přímá kinematika

Přímá kinematika neboli přímá transformace je proces, kdy přecházíme z osového souřadnicového systému do kartézského. Tato matematická úloha je jednoznačná a má vždy jen jedno řešení.

Abychom získali souřadnice koncového efektoru, musíme nejprve vyjádřit každý stupeň volnosti (každý lokální souřadný systém) svou vlastní transformační maticí, která vyjadřuje rotaci (otočení) a translaci (posunutí) vůči bázi (počátku). Po vzájemném roznásobení všech transformačních matic získáme celkovou translaci a rotaci koncového efektoru. Pro

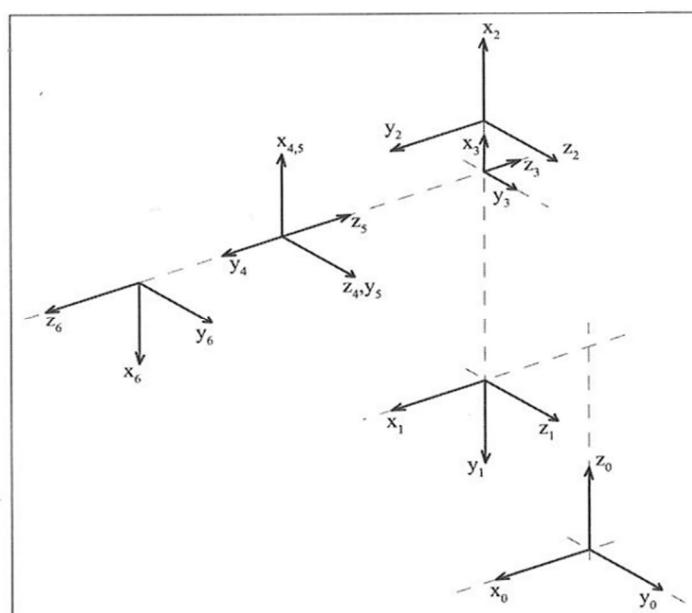
usnadnění popisu pomocí matic se v praxi užívá Denavit-Hartenbergových parametrů (DH parametry). Principem DH parametrů je schopnost sloučit dvě různě orientované soustavy do čtyř základních transformací. Při používání DH parametrů nelze lokální souřadné systémy popisovat nahodile, ale musí být dodržena zásadní pravidla. Po definici všech lokálních souřadných systémů si tři DH parametry určíme jako konstantu, jelikož jsou závislé na samotné konstrukci, a jak již bylo řečeno, matice můžeme mezi sebou roznásobit a získat pozici efektoru (KOLÍBAL, 2016 stránky 380-381).

2.2.2 Inverzní kinematika

Inverzní kinematika je proces opačný, k již zmíněné přímé kinematici. Úkolem je ze souřadnic systému kartézské soustavy získat úhly pro jednotlivé osy. Tento proces již není jednoznačný a může nastat několik řešení. S tím přicházejí jisté komplikace, ke kterým různé metody přistupují jinak.

Při užití metody, kdy hledáme řešení v uzavřeném tvaru, máme možnost zadání omezovacích pravidel a parametrů, což nám může pomoci v případě možné kolize, anebo nám to dovolí se vyhnout bodům singularity. Tato metoda má navíc výhodu v rychlosti výpočtu a díky tomu je velmi často využívána při potřebách řešit kinematiku v reálném čase (proces trvá v rázech milisekund) (KOLÍBAL, 2016 stránky 385-386).

Obrázek 3 Zavedení lokálních souřadných systémů pro 6 os volnosti



Zdroj: KOLÍBAL (2016 str. 384).

3 Praktická část

Tato kapitola se již zaměřuje na konkrétní řešení problémů, které se spojují s návrhem, tvorbou a řízením robotické paže. Jsou zde voleny konkrétní komponenty použity při výrobě. Cenová kalkulace zakoupených komponent viz příloha 10.

3.1 Pohony a převody os

Pro správnou funkci je důležitá vhodná podoba akčních členů, které splňují následující požadavky. Prvním požadavkem je schopnost motorů držet svou pozici i pod větším zatížením. Za druhé je důležité, aby motory byly schopné pracovat i při malých otáčkách. Dalším požadavkem je jednoduchost jejich ovládání a možnost snadné implementace do samotného výrobku. Posledním požadavkem je cenová dostupnost.

Jelikož zde jsou využity také převody a rozvody, je důležité si určit nějaká základní kritéria při jejich výběru. Celý převod by měl být kompaktní a co s nejmenší vůlí. Velmi důležitým parametrem je také realizovatelnost jednotlivých částí pomocí 3D tisku.

3.1.1 Motory

Podle základních požadavků byly nakonec zvoleny motory krokové, kvůli jejich snadnému ovládání, možnosti krovování a nízké ceně.

Konkrétně se využívá dvou typů, motorů NEMA 17 pro osy 4 až 6 a motorů NEMA 23 pro osy 1 až 3. Motor NEMA 17 je konkrétně model 17HS4401 a disponuje přídržnou silou $40 \text{ N} \cdot \text{cm}$ při proudovém odběru 1,7 A. Motor disponuje klasickým krovováním $1,8^\circ$ na krok, takže na jedno celé otočení je třeba 200 kroků (Motion King Motor Industry Co.). Motory NEMA 23 byly zvoleny modelu Nema23-03 s přídržnou silou $3 \text{ N} \cdot \text{m}$ při proudovém zatížení 3 A. Motor opět disponuje klasickým krovováním 200 kroků na jedno celé otočení (Joy-it, 2019).

3.1.2 Planetové převody

Ke každému motoru je přidáván převod, konkrétně byly zvoleny planetové převody, kvůli jejich kompaktnosti a vysokému poměru převodu. Jejich další výhodou je možnost jednoduše řadit několik převodů za sebe a tím docílit zvýšení celkového převodu.

Byly navrženy dva různé typy převodů, každý pro jeden typ motorů. Pro navržení převodu

byly zvoleny následující parametry:

Počet satelitů: 3

Počet zubů na vnějším prstenci: $Z_r = 46$

Počet zubů na centrálním kole: $Z_s = 14$

Po zvolení těchto parametrů lze podle následujících vzorců spočítat poměr převodu, který byl tímto získán.

$$i = \frac{Z_r}{Z_s} + 1 = \frac{46}{14} + 1 = 4$$

Nakonec se musí spočítat počet zubů na kolejích satelitu. Výpočty vychází z předpokladu, že součet poloměru roztečné kružnice středového kola a poloměru dvou roztečných kružnic satelitů je roven poloměru roztečné kružnice vnějšího prstence (Slováček, 2019 str. 31).

$$r_s + 2 \cdot r_c = r_r$$

V této formuli lze dále nahradit poloměry roztečných kružnic počtem zubů a modulem.

$$\frac{z_1 \cdot m}{2} + \frac{2 \cdot z_2 \cdot m}{2} = \frac{z_3 \cdot m}{2}$$

$$z_1 + 2 \cdot z_2 = z_3$$

$$z_2 = \frac{z_3 - z_1}{2}$$

Po dosazení:

$$z_2 = \frac{46 - 14}{2} = 16$$

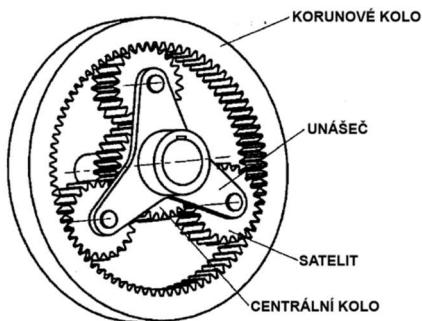
Pro dosažení chtěného celkového poměru převodu jsou použity tři tyto převody, které jsou řazeny za sebou. S výsledným poměrem:

$$i = i_1 \cdot i_2 \cdot i_3 = 4 \cdot 4 \cdot 4 = 64$$

Po návrhu byly vytvořeny samotné modely v prostředí Fusion 360, kde byl také zvolen modul ozubených kol $m = 1,25$. Modul byl přizpůsoben tak, aby byla možná výroba pomocí

3D tisku a bylo do samotného převodu možné zakomponovat motor a ložiska. Modely byly následně vytiskány na 3D tiskárně z materiálu PETG. Tento materiál byl zvolen kvůli jeho vysoké pevnosti a mechanické odolnosti.

Obrázek 4 Planetový převod

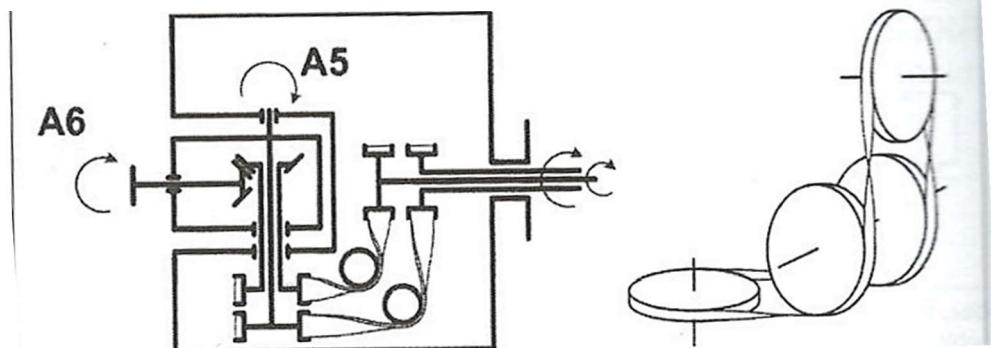


Zdroj: Slováček (2019 str. 26).

3.1.3 Mechanické rozvody

Pro dosažení lepšího váhového rozložení byly motory os 4 až 6 přesunuty za připojení třetí osy. Toto je u průmyslových robotů poměrně běžná praktika, jelikož se tím nedosáhne jen zmíněného přesunutí váhy, ale také dojde ke zmenšení velikosti orientačního ústrojí poblíž koncového efektoru. Samotný pohon je k jednotlivým osám přenášen pomocí třech hnacích hřídelí, které jsou navzájem vloženy v sobě. Vnější hnací hřídel je napojena na čtvrtou osu robota. Prostřední hnací hřídel je napojena na osu pátou a vnitřní hnací hřídel na osu šestou. Hnací hřídele jsou napojeny na motory pomocí řemenů typu GT2. Osy 5 a 6 jsou na hřídele napojeny pomocí pravoúhlého vedení řemenů, které se také například vyskytuje u robotů KUKA (obrázek 4). Pohon osy 6 je dále řešen pomocí devadesáti stupňového napojení ozubených kol. Veškeré převody v rozvodovém systému jsou řešeny způsobem, že celkový poměr převodu je vždy jedna.

Obrázek 5 Systém vedení ozubených řemenů



Zdroj: KOLÍBAL (2016 str. 114).

3.2 Návrh mechanické konstrukce

Celá konstrukce byla tvořena v prostředí CAD programu Fusion 360, který nabízí nejenom možnosti modelování objektů a sestav, ale také možnost zátěžových testů a jejich technické výkresy (technický výkres sestavy celkové konstrukce viz příloha 1). Vzhled a některé funkční mechanismy byly při návrhu ovlivněny designem dnešních průmyslových robotů. Celková konstrukce je velmi komplexní, ale je možno ji pomyslně rozdělit do šesti menších částí.

První částí je základna, kde je také umístěn motor první osy a první osa celkově. Jelikož základna nedosahuje dostatečných rozměrů, aby celá konstrukce stála sama, obsahuje tři otvory ve velkosti šroubů M5 pro montáž na pracovní plochu. Otočná plocha první osy je k základně zakotvena pomocí pojazdové plochy, která je vložena mezi šest páru ložisek. Motor zde není připojen přímo, ale je zde využito ozubeného převodu se zuby směřující ke středu. Na středu otočné plochy se nachází rotační enkodér, který měří úhel natočení první osy. Na základně se také nachází konektory pro napojení motorů a senzorů.

Část druhá zahrnuje třístupňový planetový převod a ukotvení osy dvě. Jelikož osa dva a její převod leží na stejné hřídeli, je nutné natočení osy měřit excentricky. K tomu je využito ozubeného převodu s poměrem jedna.

Třetí část obsahuje nižší rameno ruky a osu tři. Motor osy tři je kvůli jeho váze umístěn co nejblíže k ose dva a s osou tři je spojen pomocí řemenu typu HTD 3M. Toto excentrické umístění motoru umožňuje úhel natočení osy 3 měřit přímo. Uvnitř konstrukce nižšího ramene je také vytvořen prostor pro vedení kabelů z vyšších částí robota.

Čtvrtá část se skládá z prostoru rozvodů, kde dochází k napojení motorů a převodů pro osy 4 až 5 na hřidelový systém a osy 4. V prostoru rozvodů se také nachází měření úhlu natočení, které je řešeno excentricky pomocí pravoúhlého ozubeného převodu. Na prostor rozvodů je také přichycen blok pro ukotvení osy 3 ke zbytku vrchní části. Z estetického hlediska je zakrytování převodů řešeno pomocí 2 mm tlustého plexiskla.

Pátá část zahrnuje rozdelení již jen dvou hřidelí a rozvody pomocí řemenů s pravoúhlým zahnutím. Zde již nejsou umístěny žádné senzory, jelikož k veškerému potřebnému měření dochází ve čtvrté části. Opět je zde využito plexiskla k zakrytování pro odhalení funkčnosti vnitřních mechanismů.

Šestá část obsahuje ukotvení 5. osy a pravoúhlé zatočení pro připojení osy 6. Toto zahnutí je řešeno pomocí pravoúhlého ozubeného spoje. Na úplném konci se nachází tři otvory pro přichycení koncového efektoru pomocí tří šroubů velikosti M3.

Všechny plastové díly byly tištěny na 3D tiskárně Průša i3 MK3S převážně z materiálu PLA, kvůli jeho dobrým vlastnostem a nízké ceně. Jako spojovací materiál byly využity šrouby, matky a závitové tyče velikostí M3, M4 a M5. Pro tvorbu hřídelí bylo využito již zmíněných závitových tyčí nebo hliníkových profilů válcového řezu různých velikostí. Pro zhotovení krycích částí z 2 mm tlustého plexiskla bylo využito CNC laseru o maximálním výkonu 80 W. Fotodokumentace výroby viz příloha 11.

Pro tvorbu modelů ozubených převodů byl využit integrovaný generátor ozubených kol a následná modifikace profilů takto vytvořených kol. Většina převodů byla následně vytiskena z materiálu PETG. A pro hladký chod je všude použito ložisek různých velikostí vnitřního průměru, od 3 mm do 42 mm.

Obrázek 6 Sestava robotické paže

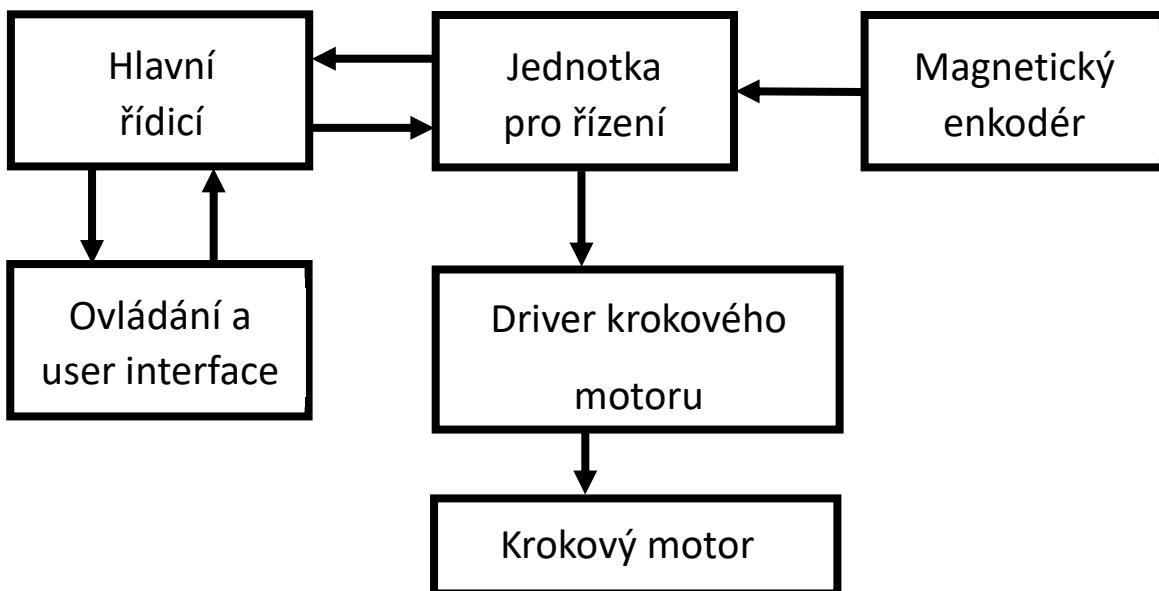


Zdroj: Vlastní obrázek.

3.3 Řízení a ovládání

Pro řízení je nutno zpracovávat data ze senzorů, ovládat drivery pro krokové motory, zpracovávat uživatelem zadané příkazy, ovládat nástroj. Pro lepší průběh všech operací byly rozděleny do dvou hlavních bloků. První blokem je hlavní řídicí jednotka, která bude komunikovat s uživatelem a tyto data zpracovávat. Takto zpracovaná data bude posílat dále do druhého bloku, který je tvořen vedlejšími řídicími jednotkami, které zpracovávají data ze senzorů a na základě dat obdržených od hlavní řídicí jednotky řídí drivery krokových motorů. Pro správnou funkčnost je důležité zvolit správný typ komunikace mezi jednotlivými členy.

Obrázek 7 Blokový diagram řízení robotické paže



Zdroj: Vlastní obrázek.

3.3.1 Hlavní řídicí jednotka

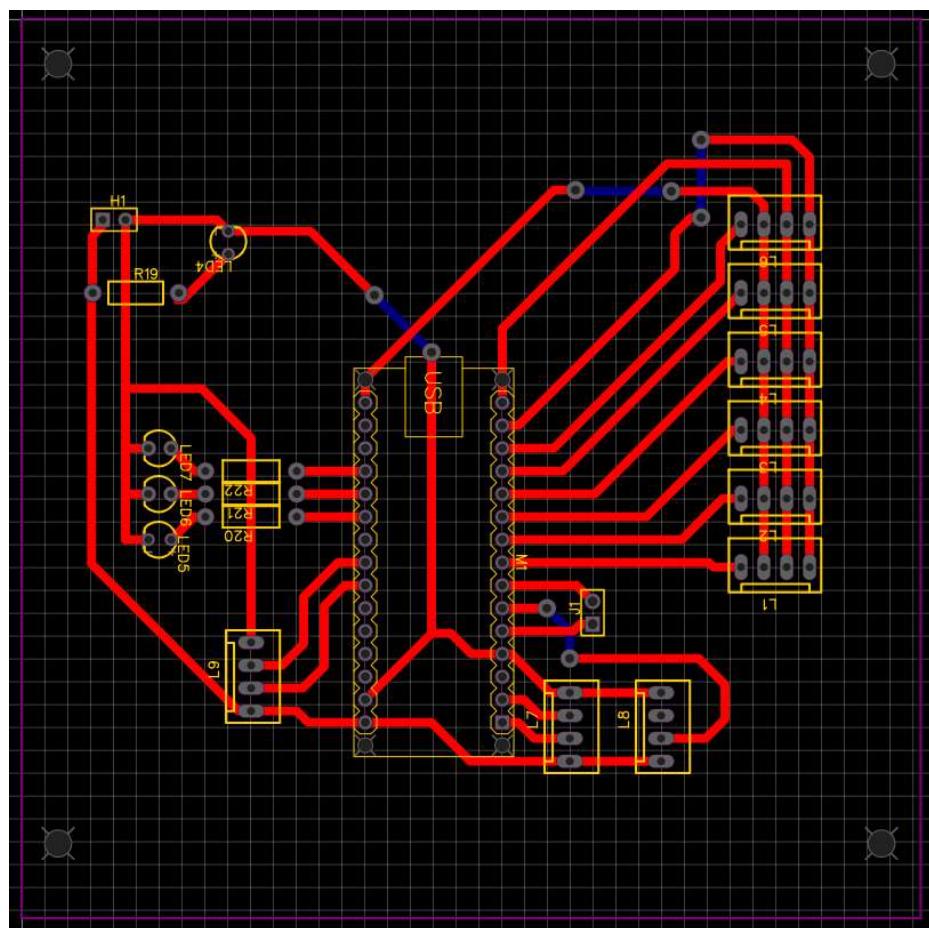
Jelikož hlavní řídicí jednotka musí zpracovávat údaje od uživatele, což znamená také provádět proces inverzní kinematiky, byly ostatní časově náročné procesy přenechány vedlejší řídicí jednotce. Pro řízení pak postačí mikroprocesor Atmega328P obsažený ve vývojové platformě Arduino NANO. Tato platforma také nabízí veškeré komunikační prostředky, které jsou potřeba.

Pro zajištění komunikace s uživatelem bude použit sériový UART. Jelikož hlavní řídicí jednotka musí komunikovat se šesti vedlejšími a posílat jim potřebné údaje, byla zvolena SPI komunikace pro její schopnost rychlé komunikace mezi pámem a více otroky. Platforma

Arduino NANO disponuje ještě prostředky pro komunikaci I²C, která může být využita pro přijímání dat z nástroje, pokud nástroj obsahuje nějaký senzor. Z hlavní řídicí jednotky je také vyvedeno připojení na malý servo motor, který je obsažen v základním gripperu. Pro schopnost případného debugu byly také přidány tři indikační LED různých barev.

Pro návrh zapojení a následnou tvorbu plošného spoje bylo využito prostředí EasyEDA, jelikož je jednoduché na použití a umožňuje prostřednictvím uživatelské knihovny vkládat před vytvořené Footprinty pro mnoho komponentů. Schéma zapojení viz příloha 2. Samotná výroba plošného spoje byla řešena pomocí hobby CNC frézy.

Obrázek 8 Návrh plošného spoje hlavní řídicí jednotky



Zdroj: Vlastní Obrázek.

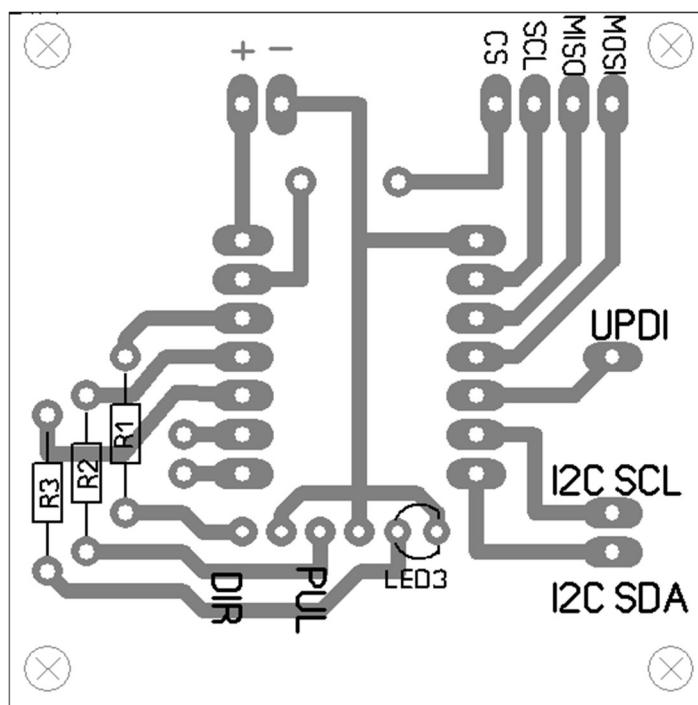
3.3.2 Vedlejší řídicí jednotka

Jak již bylo řečeno, je zde použito šesti vedlejších řídicích jednotek, pro každou osu jedna. Jejich úkolem je číst data z rotačních enkodérů pomocí sběrnice I²C a ty porovnávat s daty, které byly přijaty pomocí SPI z hlavní řídicí jednotky, a na základě jejich rozdílu proporcionálně ovlivňovat krokování motoru. Dá se tedy říci, že se jedná o P regulátor.

Jako mozek vedlejší řídicí jednotky byl použit mikrokontroler ATtiny1614, který disponuje potřebnými komunikačními prostředky a poskytuje dostatek IO periferií. Další jeho výhodou je jeho velmi nízká cena a malá velikost. (Ukázka kódu regulující úhel běžící na mikrokontroleru ATtiny1614 je dostupný v příloze 3.)

K tomuto mikrokontroleru jsou také připojeny dvě datové linky pro zajištění ovládání driveru pro krokové motory. Pomocí jedné se ovládá směr, kterým se má motor točit a druhá ovládá kroky. Jako poslední je zde opět připojena LED pro možnost debugu a informování uživatele o funkčnosti. (Schéma zapojení vedlejší řídicí jednotky viz příloha 4.)

Obrázek 9 Návrh plošného spoje vedlejší řídicí jednotky



Zdroj: Vlastní obrázek.

3.4 Senzor natočení

Pro sledování úhlu natočení jednotlivých os bylo použito magnetického rotačního enkodéru AS5600. Tento senzor obsahuje Hallův článek, na který působí magnet, který je umístěn před čipem. Halovo napětí dále pomocí 12bit A/D převodníku převádí na digitální hodnotu, která se ukládá do paměti. Pomocí I²C sběrnice lze dále k této hodnotě přistupovat. Lze také přistupovat k přepočítané hodnotě, která vyjadřuje natočení ve stupních. Přístup k tomuto registru je uplatněn při získávání úhlu natočení (AMS AG, 2018).

3.5 Driver krovových motorů

Je použito šesti driverů TB6600, které jsou napájeny napětím 24 V. Drivery jsou nastaveny na základní krovování 200 kroků na jedno otočení. Toto nastavení je dostačující, jelikož díky následným převodům je potřeba více otočení samotného motoru na jedno otočení výstupu. Výhodou, kterou tento driver nabízí, je oddělení řídícího obvodu od obvodu s vyšším napětím. Toto oddělení je řešeno pomocí optočlenů. Driver je schopen poskytnout maximální výstupní proud 4 A, což je dostatečný proud pro oba typy krovových motorů (TOSHIBA, 2014).

3.6 Napájení

K napájení jsou použity dva spínací zdroje. Zdroj 5 V slouží k napájení řídící elektroniky a zdroj 24 V slouží k napájení driverů a krovových motorů. Oba zdroje byly vybrány kvůli jejich dobrým vlastnostem a nízké ceně.

Jako zdroj 5 V byl použit průmyslový zdroj LYONZG S-20-5, který disponuje maximálním výkonem 20 W. Zdroj také v sobě obsahuje všechny standardní ochrany jako jsou ochrana proti přetížení, zkratu, přehřátí a nad proudem. Další výhodou zdroje je možnost nastavení přesného výstupního napětí pomocí trimeru (laskakit).

Jako zdroj napětí 24 V byl použit průmyslový zdroj S-400-24, který disponuje maximálním výkonem 400 W. Tento zdroj má stejné ochrany a možnosti doladění jako použitý zdroj 5 V. Kvůli vyššímu výkonu je zde již přítomen prvek aktivního chlazení (HADEX).

3.7 Bezpečnostní obvod

Jelikož se zde pracuje se síťovým napětím a pohyblivými mechanickými částmi, je nutné implementovat bezpečnostní obvod.

Prvním prvkem bezpečnostního odbodu je přepínač "HOLD". Pomocí přepínače lze deaktivovat krovování driverů, což nám umožní pracovat a komunikovat s řídícími obvody bez pohybu motorů. Deaktivace je řešena pomocí přepínání enable pinu k zemi nebo k napětí 5 V.

Druhým bezpečnostním prvkem je bezpečnostní "STOP" tlačítko, které po sepnutí odpojí oba zdroje od síťového napětí, tudíž vypne všechny systémy. Na signalizaci, zda jsou všechny obvody pod napětím, je použito průmyslové signalizační LED modré barvy.

3.8 Praktické využití kinematiky

Pro praktické řešení kinematických úloh je důležité zmapovat některé rozměry robota a tyto hodnoty následně uvést v tabulce DH parametrů, viz tabulka 1. Potřebné měřené parametry lze vidět v nákresu v příloze 5. Jelikož je třeba převádět souřadnice kartézské soustavy na úhly, na natočení jednotlivých os byly použity procesy s prvky inverzní kinematiky.

Tabulka 1 DH parametry robotické paže

osa	θ [°]	α [°]	d [mm]	a [mm]
1	θ_1	-90	220	3,5
2	θ_2	0	0	500
3	θ_3	90	0	0
4	θ_4	-90	360	0
5	θ_5	90	0	0
6	θ_6	0	44	0

Zdroj: Vlastní tabulka.

Pro zjednodušení výpočtů si lze celý kinematický model rozdělit na dvě části, a to rameno, které nám určuje pozici v prostoru a sférické zápěstí, které nám naopak určuje natočení v prostoru. Pozici koncového bodu ramene pak lze spočítat pomocí základních goniometrických funkcí a na vypočtený konec se zpětně umístí vyřešené sférické zápěstí (Kyzlink Jiří, 2020 stránky 43-45).

Pozice koncového bodu ramene je řešena čistě rovině, pomocí základních goniometrických funkcí. Je ale důležité určit v jaké pozici se bude rameno nacházet a na základě toho zvolit správný postup. Při praktickém řešení byly zahrnuty jen dvě možnosti a to, že koncový bod se nachází před osou 2 nebo za osou 2. Podrobnější výpočty viz příloha 6. Dalším důležitým východiskem je, ve kterém kvadrantu se koncový bod ramene pohybuje. Tento údaj je důležitý pro řešení úhlu natočení první osy. Po vypočítání úhlů natočení prvních třech os se pro tyto úhly vytvoří transformační matice, kde po vzájemném roznásobení vznikne celková transformace až po koncový bod ramene, na který se později připojí sférické zápěstí. Přesné výpočty opět viz příloha 6.

Aby bylo možno vyřešit sférické zápěstí, je potřeba vytvořit matici rotace, viz příloha 6. Tato matice se následně invertuje a posune na koncový bod ramene. Z takto vzniklé nové transformační matice lze extrahovat údaje pro vypočtení úhlů natočení 4 až 5. Přesné výpočty viz příloha 6.

Dále již následuje kontrola, že se jedná o dosažitelnou pozici a případná limitace, aby nedošlo k poškození konstrukce. Kód pro výpočet inverzní kinematiky viz příloha 7.

3.9 Uživatelské rozhraní

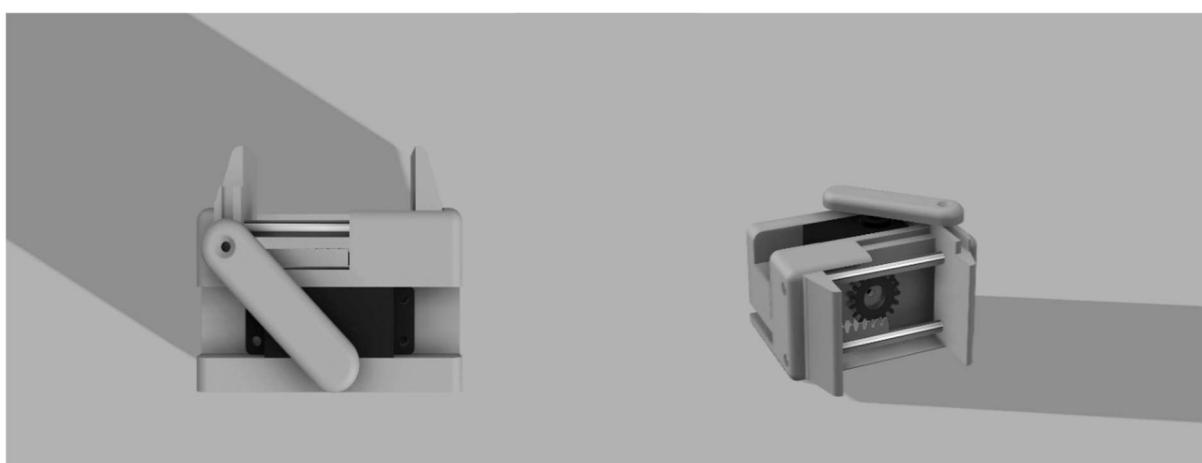
Pomocí uživatelského rozhraní je možno posílat hlavní řídicí jednotce data na základě kterých bude určovat úhly natočení jednotlivých os a ovládat koncový efektor. Uživatelské rozhraní bylo vytvořeno pomocí systému PROMOTIC. Více informací je k nalezení v uživatelském manuálu, viz příloha 8.

3.10 Koncový efektor

Jelikož je celá konstrukce robotické paže koncipována univerzálně, nemá proto jen jeden koncový efektor, ale místo toho je zde prostor pro ukotvení. Koncový efektor lze ukotvit na přírubu pomocí tří šroubů velikosti M3. Technický nákres příruby viz příloha 9. Případná kabeláž je vedena po samotné konstrukci a v prostoru třetí osy se již připojuje k ostatní kabeláži.

Pro základní potřeby ukázky a využití byl vytvořen základní uchopovací efektor s převodem. Tento efektor je poháněn modelářským servo motorem typu MG995. Toto servo, které váží jen 69 gramů, je napájeno napětím 5 V a ovládáno pomocí PWM signálu. Při použití napájení servo disponuje točivým momentem $13 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ (laskakit). Rameno servo motoru je napojeno na jedno z ramen a přes centrální ozubené kolo a lineární ozubený převod je připojeno i rameno druhé. Ramena uchopovacího efektoru jsou od sebe maximálně vzdálena 55 mm a uchopovací plocha každého ramene je $16,45 \text{ cm}^2$.

Obrázek 10 Model základního koncového efektoru



Zdroj: Vlastní obrázek.

4 Závěr

Cílem práce bylo vytvořit funkční model šestiosé robotické paže s kinematickým modelem. Design robotické paže byl inspirován průmyslovým provedením, z čehož také pramení univerzálnost designu a možnost pro napojení nástroje. Pro jednoduchou možnost ovládání robotické paže bylo úkolem vytvořit vizualizační program, pomocí kterého lze ovládat polohu a zobrazovat komunikaci.

Prvním cílem, který byl stanoven, je vytvoření samotné konstrukce. Napříč celým procesem vytváření konstrukce jsem narážel na mnoho konstrukčních problémů, které na první pohled nebyly viditelné. Jedním z takových problémů je váha samotných částí, jak tištěných, tak i kupovaných. Toto způsobuje velký tlak na spojovací díly zejména v prostorách okolo jednotlivých os. Dalším problémem, se kterým nebylo počítáno, jsou vibrace, které se přenáší napříč celou konstrukcí. Chod samotných motorů i převodů způsobuje vibrace obzvláště při nízkých otáčkách. Již zmíněné problémy nejsou zcela vyřešeny a mohou potencionálně způsobit selhání celé ruky.

Dalším cílem bylo vytvořit kinematický model, pomocí kterého bude robotická paže ovládána. Tento vývojový krok proběhl bez větších problémů. Implementace samotného modelu do kódu také proběhla úspěšně a celá jedna smyčka výpočtu trvá dobu, kterou lze považovat za uspokojivou.

Dalším prvkem, který měla práce splňovat, je uživatelské rozhraní pro ovládání. Toto je řešeno pomocí rozhraní, které bylo vytvořené v prostředí PROMOTIC. Uživatelské rozhraní nabízí dostatek možností pro základní ovládání a analyzování dat.

Největším problémem bylo samotné spojení jednotlivých prvků dohromady. Podstatné potíže zde činí senzory natočení, které jsou negativně ovlivňovány rušením. U senzorů os pět a šest způsobuje problém také jejich špatné umístění. Tento problém je potřeba kompenzovat softwarově, avšak i tak se nedosahuje plné operativnosti.

I přes všechny tyto nedostatky lze konstatovat, že robotická paže je funkční s možností využití jako edukativní pomůcky. Poskytuje všechny potřebné prostředky pro představení problematiky. Tvorba samotné práce byla pro mě velkým přínosem, jak ze stránky teoretické, tak i praktické.

5 Seznam použitých zdrojů

- ABB Asea Brown Boveri Ltd. 2023.** IRB 1100. [Online] 2023. [Cited: Únor 20, 2023.] <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107046A7014&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
- ABB Asea Brown Boveri Ltd.** ABB Robotics WebShop Accessories. *ABB Robotics WebShop*. [Online] ABB Asea Brown Boveri Ltd. [Citace: 20. Únor 2023.] <https://webshop.robotics.abb.com/gl/accessories.html>.
- AMS AG. 2018.** AS5600. [Online] Červen 20, 2018. [Cited: Březen 5, 2023.] https://www.laskakit.cz/user/related_files/as5600_ds000365_5-00-1877365.pdf.
- Annin, Chris. 2019.** github.com. *Chris-Annin/AR2: 6 axis stepper motor robot and control software*. [Online] Srpen 23, 2019. [Cited: Březen 12, 2023.] <https://github.com/Chris-Annin/AR2>.
- BCN3D Technologies. 2016.** BCN3D MOVEO: A fully open Source 3D printed robot arm. [Online] 2016. [Cited: Únor 20, 2023.] <https://www.bcn3d.com/bcn3d-moveo-the-future-of-learning-robotic-arm/#>.
- HADEX.** Průmyslový zdroj S-400-24, 24V/400W spínavý. [Online] HADEX. [Cited: Březen 5, 2023.] <https://www.hadex.cz/g572a-prumyslový-zdroj-s-400-24-24v400w-spinavý/>.
- Joy-it. 2019.** datasheet-2148835-joy-it-stepper-motor-nema23. [Online] Září 25, 2019. [Cited: Březen 1, 2023.] <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/en/002148835DS01/datasheet-2148835-joy-it-stepper-motor-nema23-03-joy-it-3-nm-3-a-shaft-diameter-75-mm.pdf>.
- KOLÍBAL, Zdeněk a kolektiv. 2016.** *Roboty a robotizované výrobní technologie*. 1. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
- KUKA AG. 2022.** KR 4 R600. [Online] 2022. [Cited: Únor 20, 2023.] https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/8350ff3ca11642998dbdc81dcc2ed44c/0000356043_en.pdf?rev=0f3aa5dca42e4d0096f4ed0b74a40f35&hash=5EA8C7B7CBE03613A01E6A9DB23C9B4F.
- Kyzlink Jiří, Bc. 2020.** *Vestavěné zařízení pro řízení robotické ruky*. [online] Brno : Vysoké učení technické v Brně , 2020. 978-1846286414.
- laskakit.** LYONZG S-20-5 modulový napájecí 230V AC-DC zdroj 5V4A 20W. [Online] laskakit. [Cited: Březen 5, 2023.] <https://www.laskakit.cz/lyonzg-s-20-5-modulový-napajecí-230v-ac-dc-zdroj-5v-4a-20w/>.
- . Servo MG995 s kovovými převody, kontinuální. [Online] laskakit. [Cited: Březen 5, 2023.] <https://www.laskakit.cz/servo-mg995-s-kovovymi-prevody-kontinualni--extra-silne/>.
- Liu, Wei and Yongheng, Ma. 2022.** Error_Compensation_Trajectory_Planning_Method_of_B. [Online] Květen 31, 2022. file:///C:/Users/ondre/Downloads/Error_Compensation_Trajectory_Planning_Method_of_B.pdf.
- Motion KIng Motor Industry Co.** 17hsxxxx-motionking. [Online] [Cited: Březen 1, 2023.] https://www.laskakit.cz/user/related_files/17hsxxxx-motionking.pdf.
- Niryo.** Niryo One, a 6 axis robot arm designed for education and research. [Online] [Cited: Únor 20, 2023.] https://niryo.com/fr/product/niryo-one/#pll_switcher.
- Slováček, Dominik. 2019.** *Konstrukční návrh pohonu s planetovou převodovkou a pojistknou spojkou*. [online] Zlín : Univerznita Tomáše Bati ve Zlíně, 2019.
- TOSHIBA. 2014.** TB67S109AFTG/FNG. [Online] Duben 7, 2014. [Cited: Březen 5, 2023.] https://www.laskakit.cz/user/related_files/tb67s109aftg_datasheet_en_20140327.pdf.

6 Seznam příloh:

Příloha č. 1: Technické schéma sestavy robotické paže

Příloha č. 2: Schéma zapojení hlavní řídící jednotky

Příloha č. 3: Ukázka kódu P regulátoru vedlejší řídící jednotky

Příloha č. 4: Schéma zapojení vedlejší řídící jednotky

Příloha č. 5: Diagram robotické paže s potřebnými DH parametry

Příloha č. 6: Výpočet inverzní kinematiky

Příloha č. 7: Ukázka kódu pro výpočet inverzní kinematiky

Příloha č. 8: Uživatelský manuál

Příloha č. 9: Technický nákres příruby pro montáž koncového efektoru

Příloha č. 10: Cenová kalkulace

Příloha č. 11: Fotodokumentace výroby a jednotlivých částí výrobku

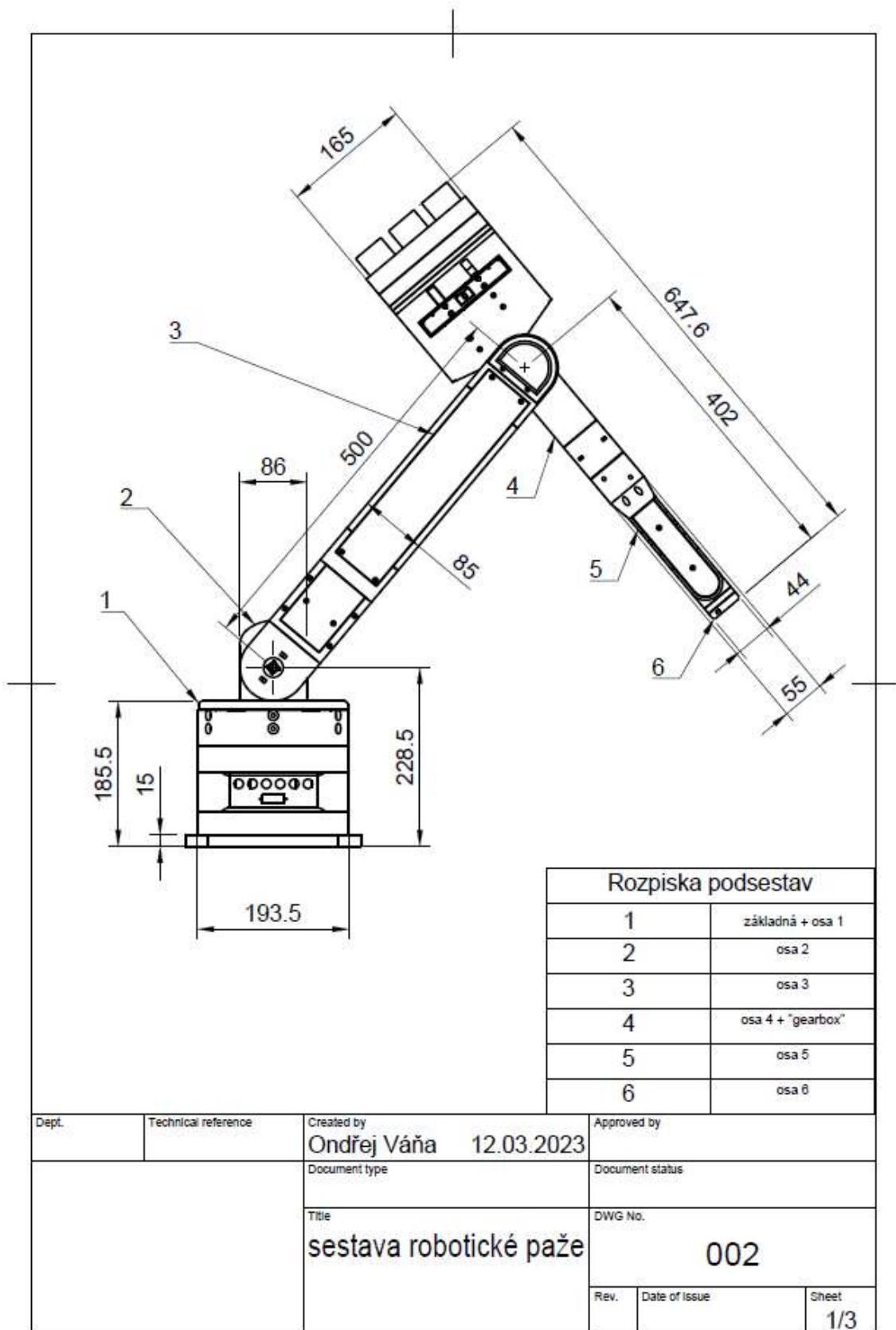
Seznam obrázků

Obrázek 1 IRB 1100	6
Obrázek 2 Robotická paže BCN3D MOVEO	7
Obrázek 3 Zavedení lokálních souřadných systémů pro 6 os volnosti	9
Obrázek 4 Planetový převod	12
Obrázek 5 Systém vedení ozubených řemenů.....	12
Obrázek 6 Sestava robotické paže	14
Obrázek 7 Blokový diagram řízení robotické paže	15
Obrázek 8 Návrh plošného spoje hlavní řídicí jednotky	16
Obrázek 9 Návrh plošného spoje vedlejší řídicí jednotky	17
Obrázek 10 Model základního koncového efektoru.....	20

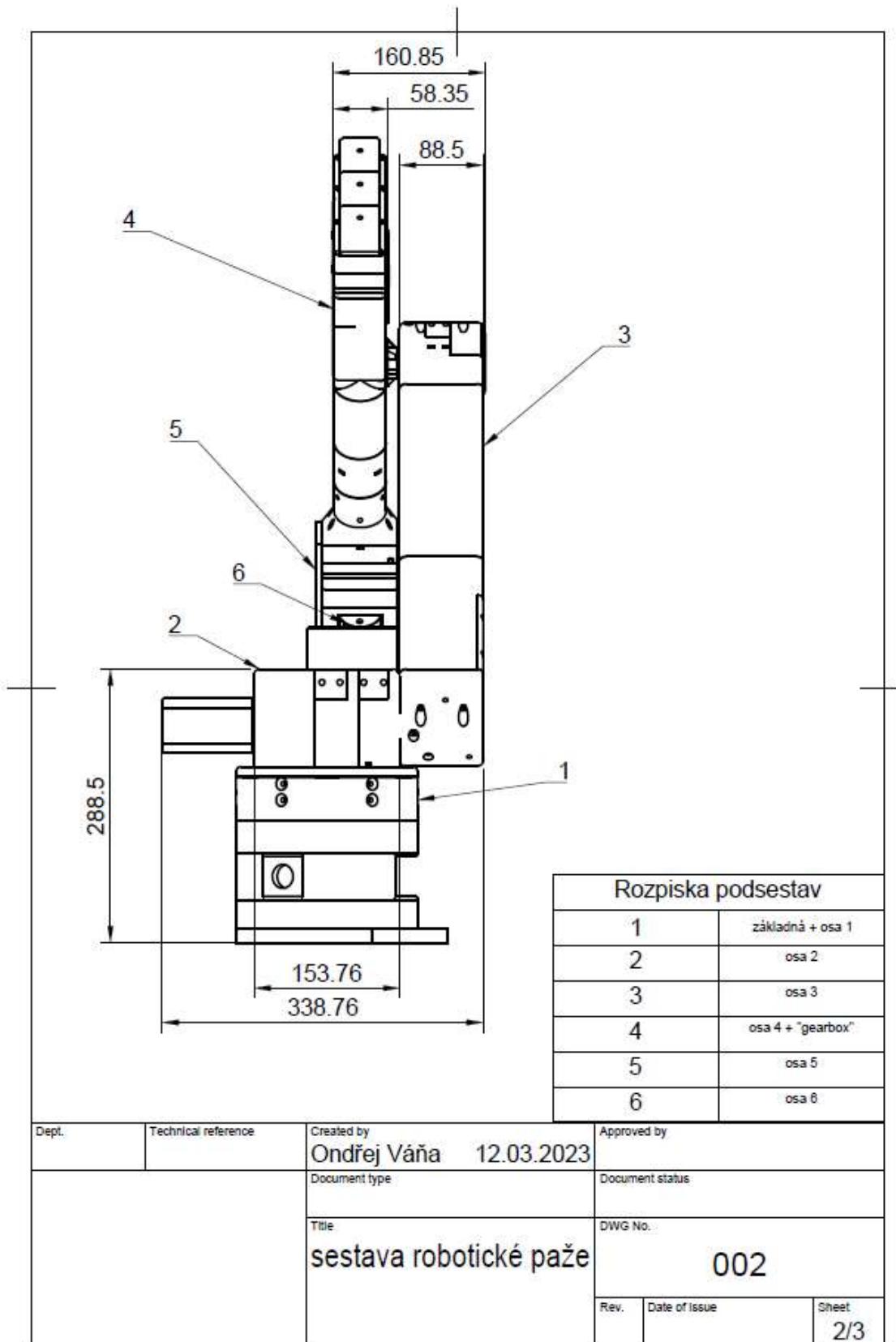
Seznam tabulek

Tabulka 1 DH parametry robotické paže.....	19
---	-----------

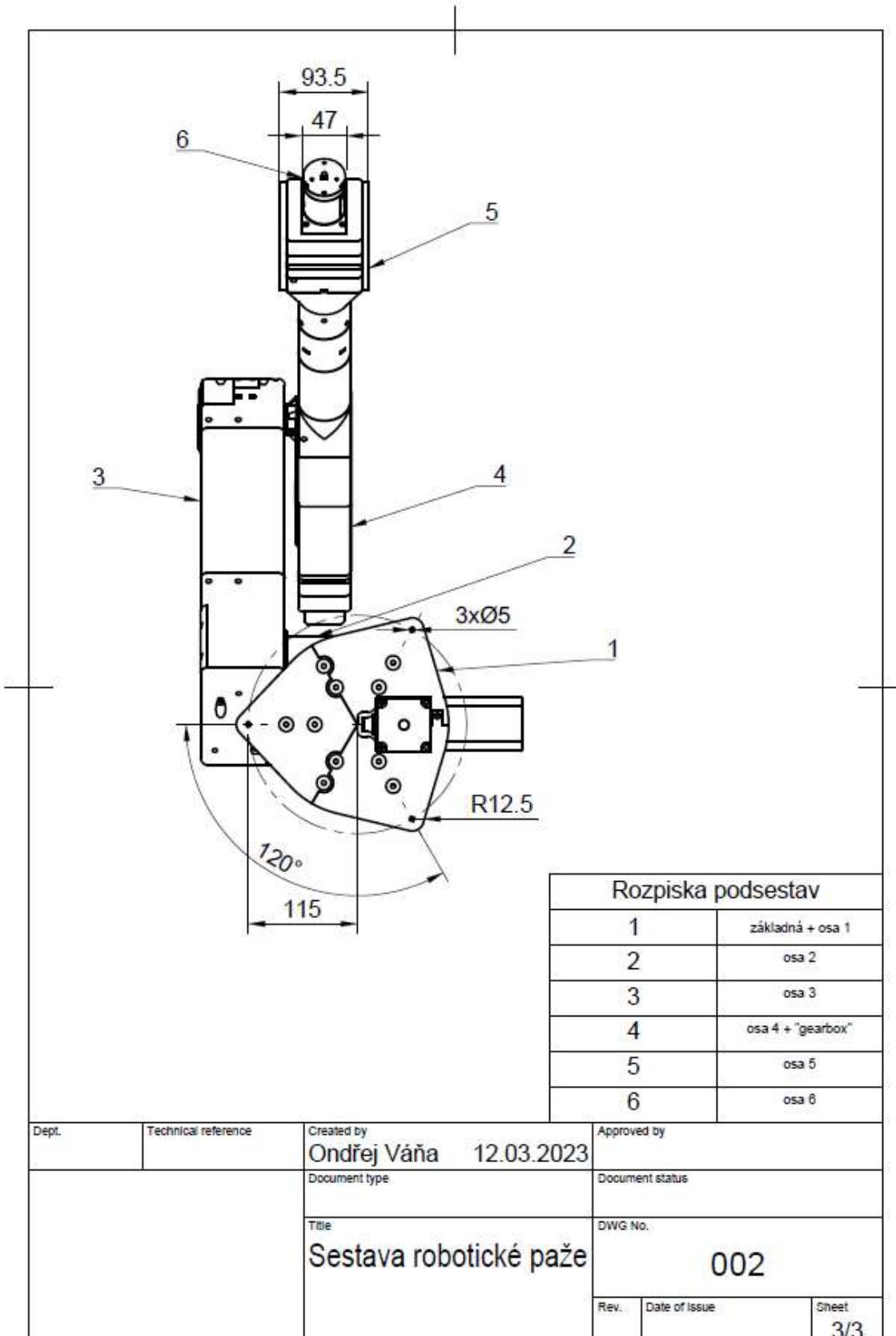
Příloha č. 1: Technické schéma sestavy robotické paže



Zdroj: Vlastní výkres.

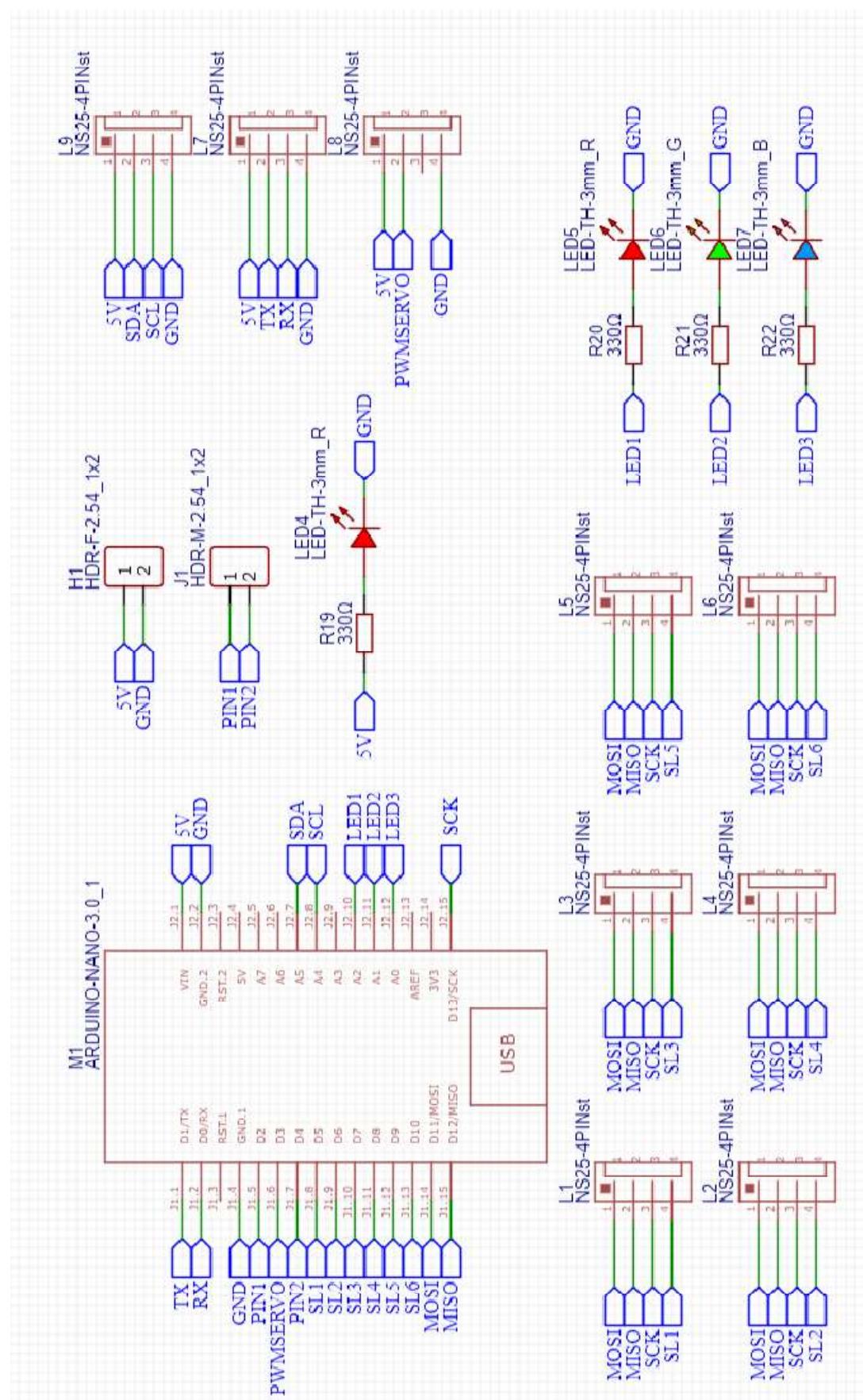


Zdroj: Vlastní výkres.



Zdroj: Vlastní výkres.

Příloha č. 2: Schéma zapojení hlavní řídicí jednotky



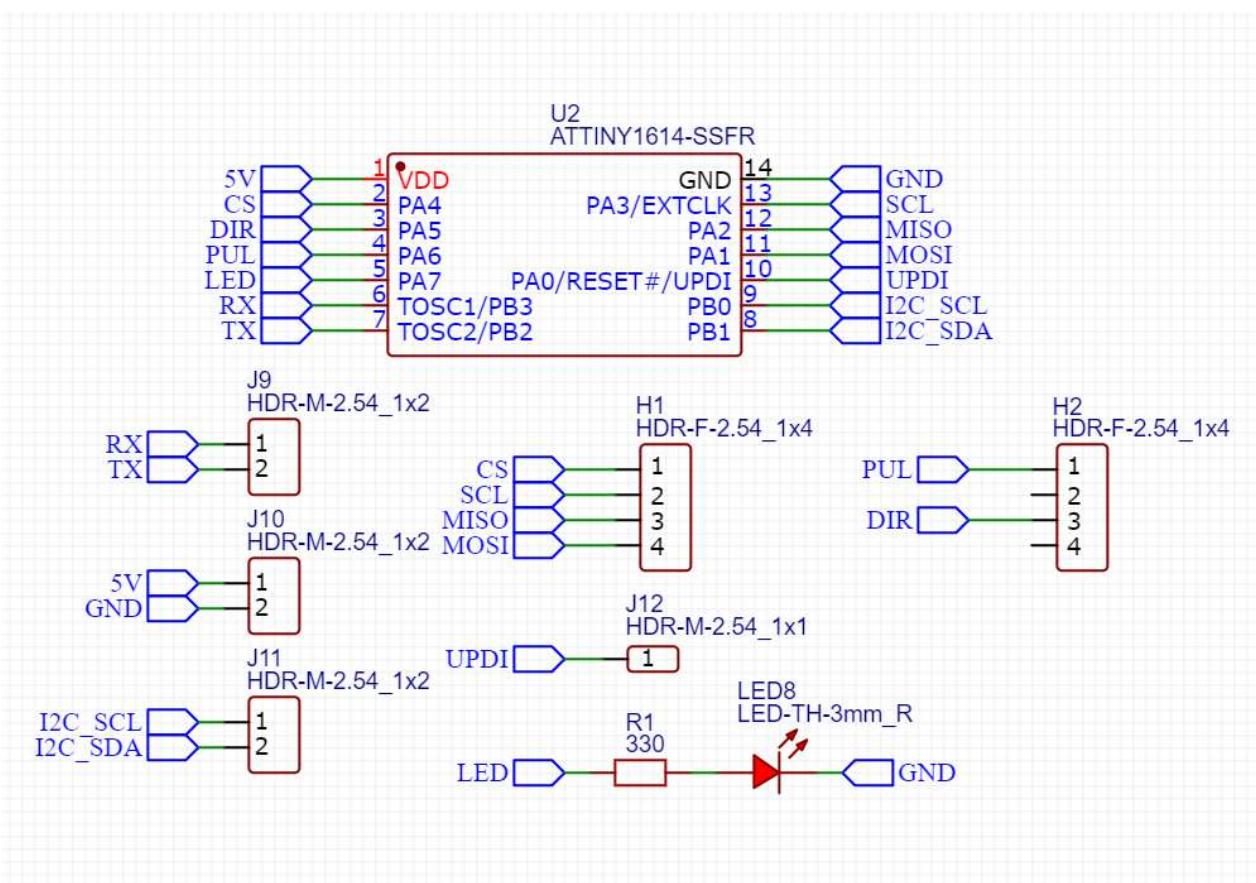
Zdroj: Vlastní Schéma.

Příloha č. 3: Ukázka kódu P regulátoru vedlejší řídicí jednotky

```
115 // solving the direction of turnig
116 bool find_dir(double val_r, double val_s)
117 {
118     if(val_r > val_s)
119     {
120         return 1;
121         /*
122         | 1 pro osy 2, 3, 6
123         | 0 pro osy 1, 4, 5
124         */
125     }
126     else
127     {
128         return 0;
129         /*
130         | 0 pro osy 2, 3, 6
131         | 1 pro osy 1, 4, 5
132         */
133     }
134 }
135
136 // stepping a motor with P regulator
137 void stepp(double set_angle, double real_angle)
138 {
139     if(abs(set_angle - real_angle) > 10) //rozdeleni do dvou rychlostnich segmentu
140     {
141         kp = 100; //default //proporce v rychlem segmentu
142         //kp = 10; //osaz
143     }
144     else
145     {
146         kp = 2; //proporce v pomalem segmentu
147     }
148     wait_time = abs(set_angle - real_angle) * kp;
149     wait_time = F_speed - wait_time; //vypocet casu mezi jednotlivymi kroky
150     wait_time = constrain(wait_time, S_speed, F_speed); // omnezeni rychlosti
151     digitalWrite(DIRE, find_dir(real_angle, set_angle)); // urceni smeru rotace
152     digitalWrite(PUL, HIGH); //krokovani
153     delayMicroseconds(wait_time);
154     digitalWrite(PUL, LOW);
155     delayMicroseconds(wait_time);
156     digitalWrite(PUL, HIGH);
157     delayMicroseconds(wait_time);
158     digitalWrite(PUL, LOW);
159     delayMicroseconds(wait_time);
160 }
161
```

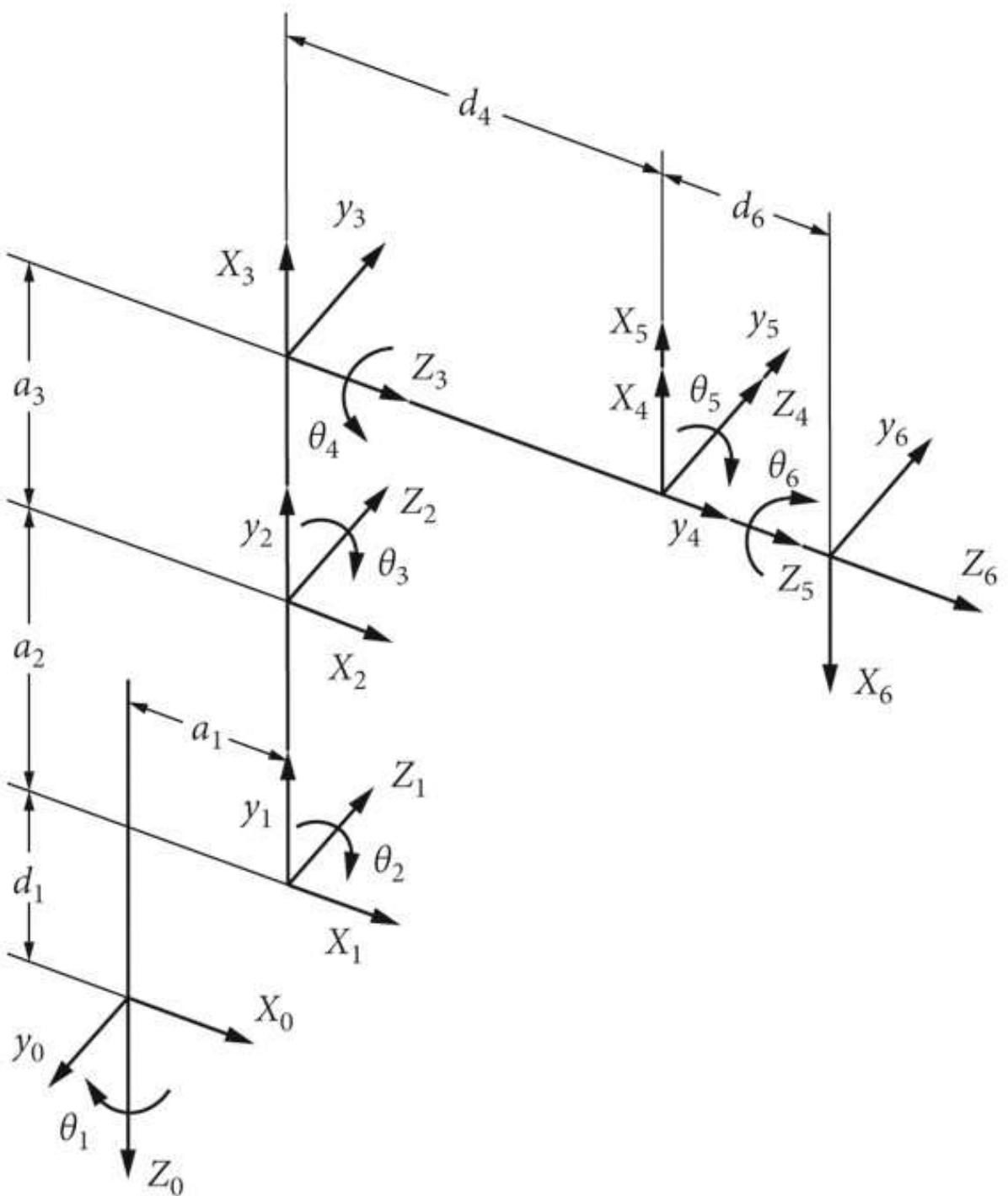
Zdroj: Vlastní obrázek.

Příloha č. 4: Schéma zapojení vedlejší řídicí jednotky



Zdroj: Vlastní schéma.

Příloha č. 5: Diagram robotické paže s potřebnými DH parametry



Zdroj: (Liu, et al., 2022).

Příloha č. 6: Výpočet inverzní kinematiky

Pro výpočet inverzní kinematiky je zásadní vytvoření tabulky DH parametrů z hodnot určených pomocí diagramu v příloze 5 a modelu konstrukce. Druhý sloupec tabulky odpovídá úhlům natočení jednotlivých os.

osa	$\Theta [^{\circ}]$	$\alpha [^{\circ}]$	d [mm]	a [mm]
1	θ_1	-90	220	3,5
2	θ_2	0	0	500
3	θ_3	90	0	0
4	θ_4	-90	360	0
5	θ_5	90	0	0
6	θ_6	0	44	0

Další důležité údaje, které jsou potřeba pro výpočet inverzní kinematiky, jsou souřadnice bodu, kam se chceme dostat.

$$P = [X_P; Y_P; Z_P; y_P; p_P; r_P]$$

Kde X_P , Y_P , a Z_P jsou souřadnice posunutí chtěného bodu vůči bázi a souřadnice y_P , p_P a r_P odpovídají natočení chtěného bodu vůči bázi.

Z těchto souřadnic lze sestrojit transformační matici, která nám bude určovat polohu koncového efektoru.

$$R_{0-T} = \begin{bmatrix} -(\cos y_P \cdot \cos r_P - \cos p_P \cdot \sin y_P \cdot \sin r_P) & \cos r_P \cdot \sin y_P + \cos y_P \cdot \cos p_P \cdot \sin r_P & \sin p_P \cdot \sin r_P & X_P \\ \cos p_P \cdot \cos r_P \cdot \sin y_P + \cos y_P \cdot \sin r_P & \cos y_P \cdot \cos p_P \cdot \cos r_P - \sin y_P \cdot \sin r_P & \cos r_P \cdot \sin p_P & Y_P \\ \sin y_P \cdot \sin p_P & \cos y_P \cdot \sin p_P & -\cos p_P & Z_P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Po vytvoření této matice je ještě třeba vytvořit matici pro odebrání posunutí šesté osy, která se získá dosazením do následující matice.

$$R_{0-6r} = \begin{bmatrix} \cos \pi & \sin \pi & 0 & 0 \\ -\sin \pi \cdot \cos \alpha_6 & \cos \pi \cdot \cos \alpha_6 & \sin \alpha_6 & 0 \\ \sin \pi \cdot \sin \alpha_6 & -\cos \pi \cdot \sin \alpha_6 & \cos \alpha_6 & -d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Po roznásobení obou matic vznikne matice, která vyjadřuje posunutí od báze až po osu pět, kde se oddělilo sférické zápěstí od zbytku paže.

$$R_{0-5} = R_{0-T} \cdot R_{0-6r}$$

Nyní jsou k dispozici všechny prostředky pro vypočtení úhlu natočení os jedna až tři pomocí jednoduchých goniometrických funkcí. Před výpočtem úhlu natočení první osy je důležité si určit kvadrant, ve kterém se pohybujeme. Je použito standartního značení plošných kvadrantů.

Pro kvadrant Q = 1 nebo Q = 4:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{{}^1_3 R_{0-5}}{{}^0_3 R_{0-5}}$$

Pro kvadrant Q = 2:

$$\theta_1 = - \left(\tan^{-1} \frac{{}^1_3 R_{0-5}}{{}^0_3 R_{0-5}} \right) + 90^\circ$$

Pro kvadrant Q = 3

$$\theta_1 = - \left(\tan^{-1} \frac{{}^1_3 R_{0-5}}{{}^0_3 R_{0-5}} \right) - 90^\circ$$

Při výpočtech úhlů os dvě a tři jsou brány v potaz dvě situace, a to kdy je rameno nataženo vpřed, nebo je rameno uprostřed nad bází. Pro určení vhodné pozice je důležité provést následující výpočty.

$$pX = \sqrt{({}^0_3 R_{0-5})^2 + ({}^1_3 R_{0-5})^2}$$

$$pY = {}^2_3 R_{0-5} - {}^0_2 D H$$

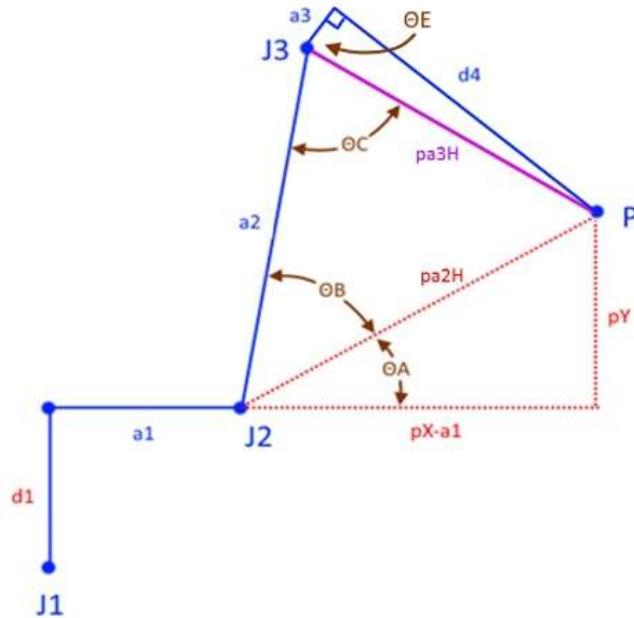
$$pXa = pX - {}^0_3 D H$$

$$pa2H = \sqrt{pY^2 + pXa^2}$$

$$pa3H = \sqrt{(\frac{3}{2}DH)^2 + (\frac{2}{3}DH)^2}$$

Situace, které mohou nastat se rozlišují podle parametru pXa , pokud je parametr větší, než nula nastává situace, kdy je rameno v přední pozici. Pokud je parametr menší, než nula nastává situace, kdy je rameno v pozici nad bází.

Pro $pXa > 0$:



Zdroj: (Annin, 2019).

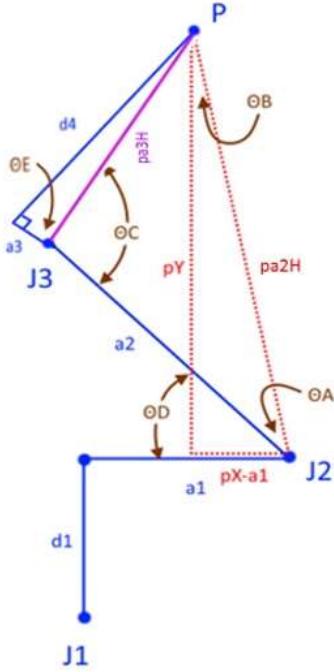
$$\theta_A = \tan^{-1} \frac{pY}{pXa}$$

$$\theta_B = \cos^{-1} \left(\frac{(\frac{1}{3}DH)^2 + pa2H^2 - pa3H^2}{2 \cdot \frac{1}{3}DH \cdot pa2H} \right)$$

$$\theta_2 = -(\theta_A + \theta_B)$$

$$\theta_3 = \pi - \theta_C = \pi - \cos^{-1} \frac{pa3H^2 + (\frac{1}{3}DH)^2 - pa2H^2}{2 \cdot pa3H \cdot \frac{1}{3}DH}$$

Pro $pX\alpha < 0$:



Zdroj: (Annin, 2019).

$$\theta_A = \cos^{-1} \frac{(\frac{1}{3}DH)^2 + pa2H^2 - (\frac{3}{2}DH)^2}{2 \cdot pa3H \cdot \frac{1}{3}DH}$$

$$\theta_B = \tan^{-1} \frac{pX\alpha}{pY}$$

$$\theta_2 = -\frac{\pi}{2} - (\theta_A + \theta_B)$$

$$\theta_3 = \pi - \theta_C = \pi - \cos^{-1} \frac{pa3H^2 + (\frac{1}{3}DH)^2 - pa2H^2}{2 \cdot pa3H \cdot \frac{1}{3}DH}$$

Pro zpětné napojení sférického zápěstí je potřeba spočít koncový bod ramene. K tomu lze využít přímou kinematiku. Po vytvoření transformační matice pro osy jedna až tři a po následném roznásobení vznikne celková transformace až po bod napojení.

Transformační matice pro osu i :

$$J_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cdot \cos \alpha_i & \sin \theta_i \cdot \sin \alpha_i & a \cdot \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cdot \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \cdot \sin \alpha_i & a \cdot \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Transformace od báze až po osu 2:

$$T_{0-2} = J_1 \cdot J_2$$

Transformace od báze po osu 3:

$$T_{0-3} = T_{0-2} \cdot J_3$$

Pro napojení sférického zápěstí je ještě potřeba matici posunutí 0 až 3 invertovat. Po inverzi lze již napojit sférické zápěstí a získat úhly natočení os 4 až 6.

Napojení sférického zápěstí:

$$R_{3-6} = R_{0-3}^{-1} \cdot R_{0-5}$$

Posledním krokem je výpočet úhlu natočení os 4 až 6. Jak již bylo řečeno jsou řešeny dvě situace, které mohou nastat. Tentokrát záleží na předchozím úhlu natočení osy 5.

Pro předchozí $\theta_5 \geq 0$:

$$\theta_5 = \tan 2^{-1} \left(\sqrt{1 - (\frac{2}{2} R_{0-3})^2}; \frac{2}{2} R_{0-3} \right)$$

$$\theta_4 = \tan 2^{-1} (\frac{1}{2} R_{0-3}; \frac{0}{2} R_{0-3})$$

$$\theta_6 = \tan 2^{-1} (\frac{2}{1} R_{0-3}; -\frac{2}{0} R_{0-3})$$

Pro předchozí $\theta_5 < 0$:

$$\theta_5 = \tan 2^{-1} \left(-\sqrt{1 - (\frac{2}{2} R_{0-3})^2}; \frac{2}{2} R_{0-3} \right)$$

$$\theta_4 = \tan 2^{-1} (-\frac{1}{2} R_{0-3}; -\frac{0}{2} R_{0-3})$$

$$\theta_6 = \tan 2^{-1} (-\frac{2}{1} R_{0-3}; \frac{2}{0} R_{0-3})$$

Po takovém spočtení úhlů dochází k jejich mezení, aby nedošlo k poškození ramene nebo aby nenastala situace, kdy bude existovat nekonečně mnoho řešení. (Annin, 2019)

Příloha č. 7: Ukázka kódu pro výpočet inverzní kinematiky

```
325 //Inverse Kinematics
326 void InverseKinematics(double Xcor, double Ycor, double Zcor, double y_cor, double p_cor, double r_cor)
327 {
328     double time_s = micros();
329     //QVADRANT
330     if(Xcor > 0 && Ycor > 0){
331         Q = 1;
332     }
333     else if(Xcor < 0 && Ycor > 0){
334         Q = 2;
335     }
336     else if(Xcor < 0 && Ycor < 0){
337         Q = 3;
338     }
339     else if(Xcor > 0 && Ycor < 0){
340         Q = 4;
341     }
342
343     //degrees to radians
344     double y_cor_r = radians(y_cor);
345     double p_cor_r = radians(p_cor);
346     double r_cor_r = radians(r_cor);
347
348     //ROT Matrix
349     double ROT[4][4] = {{0, 0, 0, 0},
350                         {0, 0, 0, 0},
351                         {0, 0, 0, 0},
352                         {0, 0, 0, 0}};
353     ROT[0][0] = -((cos(y_cor_r) * cos(r_cor_r)) - (cos(p_cor_r) * sin(y_cor_r) * sin(r_cor_r)));
354     ROT[0][1] = (cos(r_cor_r) * sin(y_cor_r)) + (cos(y_cor_r) * cos(p_cor_r) * sin(r_cor_r));
355     ROT[0][2] = sin(p_cor_r) * sin(r_cor_r);
356     ROT[0][3] = Xcor;
357     //-----
358     ROT[1][0] = (cos(p_cor_r) * cos(r_cor_r) * sin(y_cor_r)) + (cos(y_cor_r) * sin(r_cor_r));
359     ROT[1][1] = (cos(y_cor_r) * cos(p_cor_r) * cos(r_cor_r)) - (sin(y_cor_r) * sin(r_cor_r));
360     ROT[1][2] = cos(r_cor_r) * sin(p_cor_r);
361     ROT[1][3] = Ycor;
362     //-----
363     ROT[2][0] = sin(y_cor_r) * sin(p_cor_r);
364     ROT[2][1] = cos(y_cor_r) * sin(p_cor_r);
365     ROT[2][2] = -cos(p_cor_r);
366     ROT[2][3] = Zcor;
367     //-----
368     ROT[3][0] = 0;
369     ROT[3][1] = 0;
370     ROT[3][2] = 0;
371     ROT[3][3] = 1;
```

Zdroj: Vlastní obrázek.

```

373 //R06_r Matrix
374 double R06_r[4][4] = {{-1, 0.00001, 0, 0},
375 | {-0.00001, -1, 0, 0},
376 | {0, 0, 1, -44},
377 | {0, 0, 0, 1}};
378
379
380 //R05 Matrix
381 double R05[4][4] = {{0}};
382 MatMul(ROT, R06_r, 4, R05);
383
384 //Angle J1
385 double angle_J1 = atan(R05[1][3] / R05[0][3]);
386 if(Q == 2){
387 | angle_J1 = degrees(angle_J1) * (-1) + 90;
388 }
389 else if(Q == 3){
390 | angle_J1 = degrees(angle_J1) * (-1) - 90;
391 }
392 else{
393 | angle_J1 = degrees(angle_J1);
394 }
395
396 //ARM POS CAL
397 double pX = sqrt(R05[0][3] * R05[0][3] + R05[1][3] * R05[1][3]);
398 double pY = R05[2][3] - DH[0][2];
399 double pXa = pX - DH[0][3];
400 double pa2H = sqrt(pY * pY + pXa * pXa);
401 double pa3H = sqrt(DH[3][2] * DH[3][2] + DH[2][3] * DH[2][3]);
402 double angle_J2, angle_J3, angle_A, angle_B;
403 //ARM FORWARD
404 if(pXa > 0)
405 {
406 | angle_A = atan(pY / pXa);
407 | angle_B = acos((DH[1][3]*DH[1][3] + pa2H*pa2H - pa3H*pa3H)/(2*DH[1][3]*pa2H));
408 | angle_J2 = -(angle_A + angle_B);
409 | angle_J3 = PI - acos((pa3H*pa3H + DH[1][3]*DH[1][3] - pa2H*pa2H) / (2*pa3H*DH[1][3]));
410 }
411 //ARM MID
412 else
413 {
414 | angle_A = acos((DH[1][3]*DH[1][3] + pa2H*pa2H - DH[3][2]*DH[3][2])/(2*DH[1][3]*pa2H));
415 | angle_B = atan(pXa / pY);
416 | angle_J2 = -PI/2 - (angle_A + angle_B);
417 | angle_J3 = PI - acos((pa3H*pa3H + DH[1][3]*DH[1][3] - pa2H*pa2H)/(2*pa3H*DH[1][3]));
418 }
419
420 //DH table update
421 DH[0][0] = ValLim(angle_J1, limits[0][0], limits[0][1]);
422 DH[1][0] = ValLim(degrees(angle_J2), limits[1][0], limits[1][1]);
423 DH[2][0] = ValLim(degrees(angle_J3), limits[2][0], limits[2][1]);
424

```

Zdroj: Vlastní obrázek.

```

425 //J1 Matrix
426 double J1[4][4] = {{0}};
427 RotMat(DH[0][0], DH[0][1], DH[0][2], DH[0][3], J1);
428 //J2 Matrix
429 double J2[4][4] = {{0}};
430 RotMat(DH[1][0], DH[1][1], DH[1][2], DH[1][3], J2);
431 //J3 Matrix
432 double J3[4][4] = {{0}};
433 RotMat(DH[2][0] - 90, DH[2][1], DH[2][2], DH[2][3], J3);
434
435 //R03 Matrix
436 double R02[4][4] = {{0}};
437 MatMul(J1, J2, 4, R02);
438 double R03[4][4] = {{0}};
439 MatMul(R02, J3, 4, R03);
440 //Inverse R03 Matrix
441 double R03_inv[4][4] = {{0}};
442 MatInv(R03, R03_inv);
443
444 //R36 Matrix
445 double R36[4][4] = {{0}};
446 MatMul(R03_inv, R05, 3, R36);
447
448 //J4, J5 and J6 calculation
449 double angle_J4, angle_J5, angle_J6;
450 if(DH[3][0] >= 0){
451     angle_J5 = atan2(sqrt(1 - R36[2][2]*R36[2][2]), R36[2][2]);
452     angle_J4 = atan2(R36[1][2], R36[0][2]);
453     angle_J6 = atan2(R36[2][1], -R36[2][0]);
454 }
455 else if(DH[3][0] < 0){
456     angle_J5 = atan2(-sqrt(1 - R36[2][2]*R36[2][2]), R36[2][2]);
457     angle_J4 = atan2(-R36[1][2], -R36[0][2]);
458     angle_J6 = atan2(-R36[2][1], R36[2][0]);
459 }
460
461 //DH update
462 DH[3][0] = ValLim(degrees(angle_J4), limits[3][0], limits[3][1]);
463 DH[4][0] = ValLim(degrees(angle_J5), limits[4][0], limits[4][1]);
464 DH[5][0] = ValLim(degrees(angle_J6), limits[5][0], limits[5][1]);
465
466 time_d = micros() - time_s;
467 Serial.print("Cas ");
468 Serial.println(time_d);
469 }

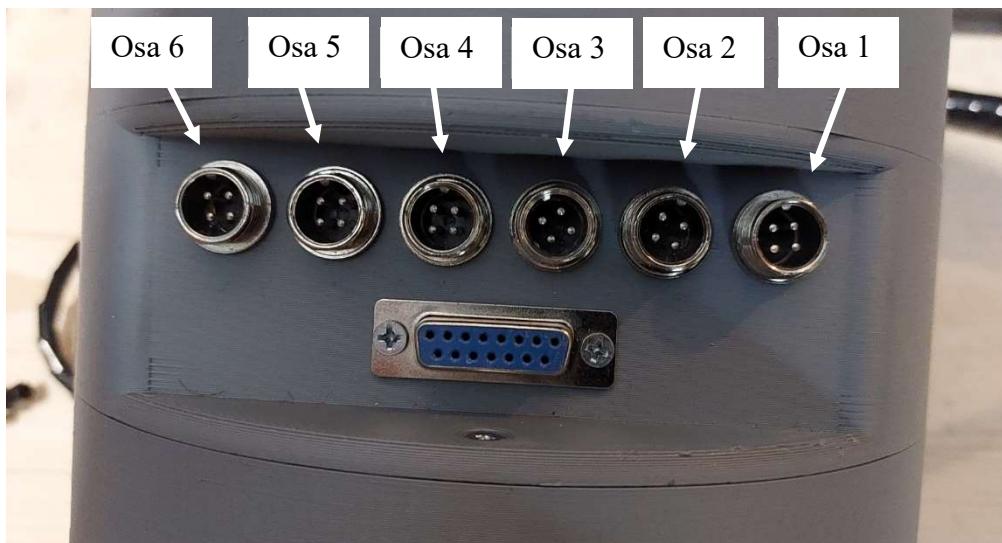
```

Zdroj Vlastní obrázek.

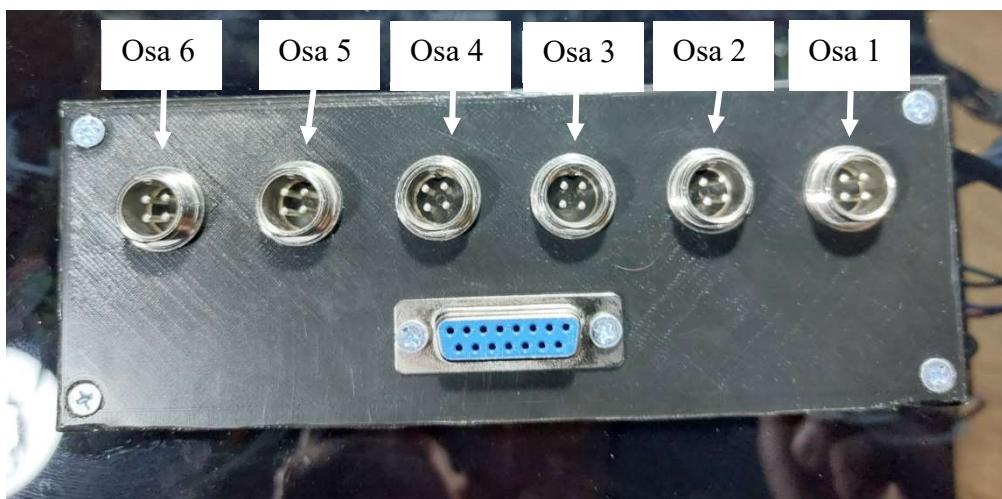
Příloha č. 8: Uživatelský manuál

Zapojení a zapnutí

Základem obsluhy je propojení robotické paže a boxu s elektrickými rozvody a řídicími jednotkami. Je třeba propojit drivery krokových motorů, jejichž GX-12 konektory jsou vyvedeny na stranu boxu, a konektory krokových motorů, které jsou vyvedeny na stranu základny. Pro správné propojení je třeba následovat zapojení viz následující obrázek.



Zdroj: Vlastní obrázek.



Zdroj: Vlastní obrázek.

Dále je třeba připojit senzory pomocí DSUB 15 konektorů, které se opět nachází na straně boxu a straně základny robotické paže.

Napojení pro modelářský servo motor, který je akčním členem gripperu, se nachází na vrchní straně boxu.



Zdroj: Vlastní obrázek.

Pro celkové napájení zde určen síťový konektor na zadní straně boxu. Na samém místě se také nachází hlavní vypínač.



Zdroj: Vlastní obrázek.

Po sepnutí je ještě potřeba aktivovat bezpečnostní obvod pomocí bezpečnostního tlačítka, které se zachází na vrchní straně boxu. Po kompletním zapnutí všech systému se rozsvítí indikátor, který se nachází na panelu spolu s bezpečnostním tlačítkem. Pro aktivaci driverů je třeba přepínač, nacházející se opět na stejném panelu, přepnout do polohy vlevo.



Zdroj: Vlastní obrázek.

Ovládaní pomocí příkazů přes sériovou linku

Komunikace je provozována pomocí sérového spojení na rychlosti 9600 baudů. Jsou připraveny dva základní typy příkazů. Zásadním rozdílem mezi oběma typy je způsob odezvy na jednotlivé příkazy. První režim, který je učený pro běžné používání, zasílá zpět jen základní informace o provedení určitých kroků. Zatímco režim druhý, který je určený převážně pro debug nebo bližší průzkum jednotlivých funkcí, zasílá zpět i mnoho mezi kroků a dodatečných hodnot.

Možné příkazy:

Pro nastavení konkrétního úhlu na jednotlivé osy je k dispozici funkce *direct*. Správné formátování příkazu níže.

Pro základní režim:

Dxxx/xxx/xxx/xxx/xxx/xxx/;

Kde první písmeno značí funkci a režim a na pozice "xxx" lze dosadit až třícifernou hodnotu chtěného úhlu ve stupních. Řazení jednotlivých os je vzestupné, z čehož plyne, že na prvním místě se nachází hodnota úhlu pro osu první a tak dále.

Pro debug režim:

dxxx/xxx/xxx/xxx/xxx/xxx/;

Malé písmeno "d" zde představuje volbu režimu debugu a funkce *direct*. Zbývající část příkazu je shodná s příkazem v základní podobě.

Pro využití integrovaného kinematického modelu je zde k dispozici funkce *inverse kinematics*. Správné formátování příkazu níže.

Pro základní režim:

Ixxx/xxx/xxx/xxx/xxx/xxx/;

Kde první písmeno značí zvolenou funkci a režim a na pozice "xxx" lze dosadit až tříciferné souřadnice chtěného bodu v kartézském systému. Řazení souřadnic odpovídá standartnímu formátu $P[X; Y; Z; y; p; r]$.

Pro debug režim:

ixxx/xxx/xxx/xxx/xxx/xxx/;

Malé písmeno "i" zde představuje volbu režimu debug funkce *inverse kinematics*. Zbývající část příkazu je shodná s příkazem v základní podobě.

Pro ovládaní gripperu je k dispozici funkce *servo*. Funkce přijímá jediný parametr, a to procentní sevření ramen gripperu. Správné formátování příkazu níže.

Pro základní režim:

Sxxx;

Kde první písmeno symbolizuje zvolení režimu a funkce a na pozici "xxx" lze dosadit až tříčifernou hodnotu, která v procentech symbolizuje rozevření ramen. Kde 0 % je rovno plnému rozevření a 100 % je rovno plnému sevření.

Pro debug režim:

sxxx;

Malé písmeno "s" zde představuje volbu režimu debug funkce *servo*. Zbývající část příkazu je shodná s příkazem v základní podobě.

V případě, že zaslaný příkaz nebude rozpoznán bude vrácena chybová hláška "Unknown command!" a řídicí jednotka naslouchá pro další příkazy.

Ovládání pomocí uživatelského rozhraní vytvořeného v systému PROMOTIC

Pro možnost jednoduchého ovládání byla vytvořena uživatelská aplikace, které dovoluje základní operace. Aplikace zprostředkovává zadávání příkazů hlavní řídicí jednotce jednoduchou a uživatelsky přívětivou formou. Jelikož je aplikace vytvořena v bezplatné verzi v demo režimu, je možno ji mít nepřetržitě spuštěnou pouze jednu hodinu. Po následném restartu opět plně funguje.

Před zpuštěním aplikace je důležité zjistit na jakém COM portu je hlavní řídicí jednotka robotické paže hlásí. A dále správný COM port zvolit v nastavení parametrů komunikace. Toto nastavení lze nalézt pod objektem "Comm" a pod záložkou "parametry".

Základní funkce aplikace:

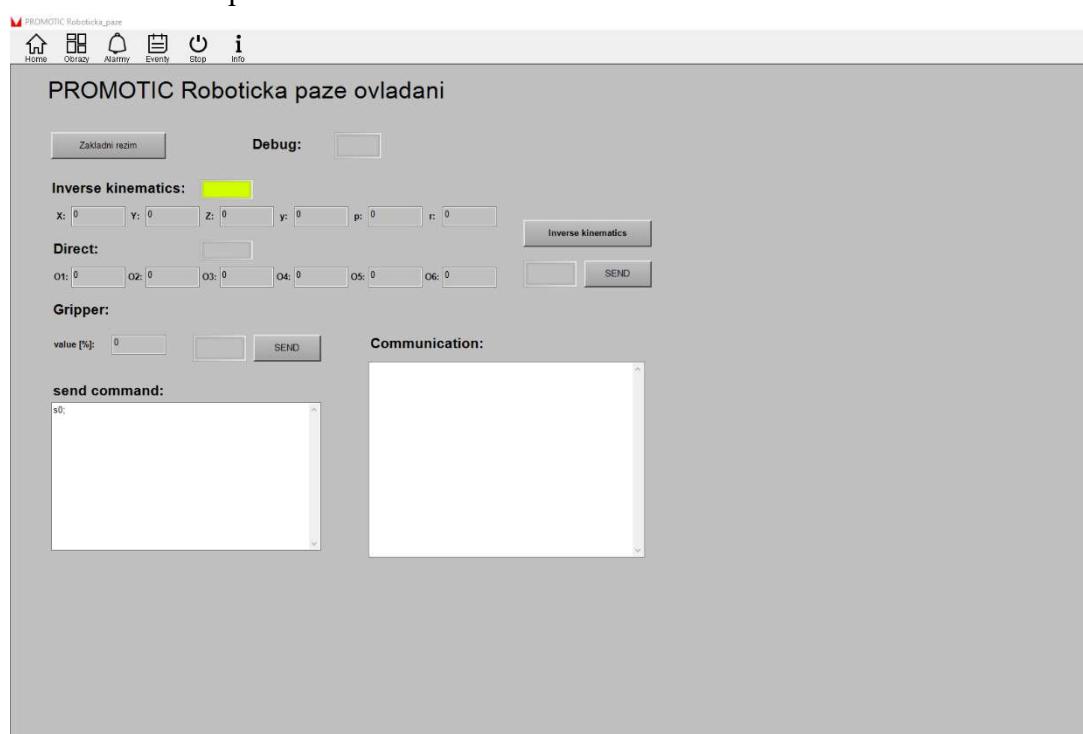
I ovládání aplikací disponuje dvěma režimy, které se dají volit pomocí tlačítka v levém horním rohu. Vpravo od tlačítka se pak nachází také indikátor režimu "debug". Funkce režimů je shodná jako při ovládání příkazy.

Pod volbou režimu se nachází blok pro práci s jednotlivými funkcemi. Zde si opět pomocí tlačítka můžeme zvolit funkci, kterou chceme používat. O aktivaci funkce vypovídá indikátor nacházející se vedle jejího názvu. Po aktivaci chtěné funkce lze zadávat hodnoty jednotlivým parametry a tyto hodnoty následně odeslat pomocí tlačítka "SEND". Při stále aktivaci tlačítka "SEND", kterou symbolizuje indikátor nacházející se vlevo od tlačítka, se nové hodnoty zasílají hned po zadání.

Pod blokem funkcí se nachází blok pro ovládání koncového efektoru, konkrétně Gripperu. Zde se opět nachází pole pro zadání chtěné hodnoty parametru a také tlačítko pro odeslání. Odesílání hodnot funguje zcela stejným způsobem jako v předchozím případě.

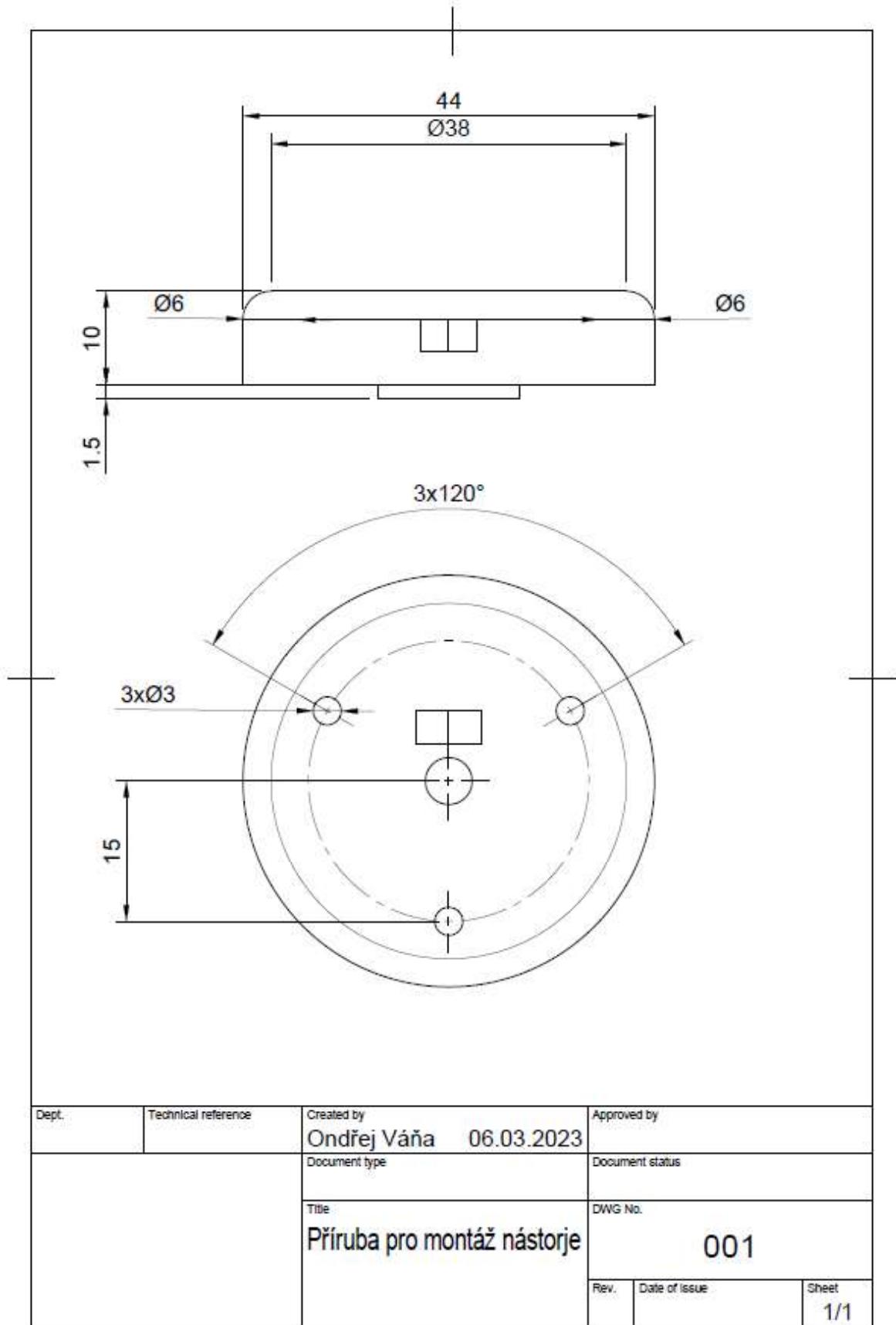
V pravém dolním rohu se nachází pole pro výpis, jíž zaslanych hodnot. Vlevo od toho pole se nachází pole pro výpis zpětné komunikace ze strany hlavní řídicí jednotky.

Náhled ovládacího prostředí:



Zdroj: Vlastní obrázek.

Příloha č. 9: Technický nákres příruby pro montáž koncového efektoru



Zdroj: Vlastní výkres.

Příloha č. 10: Cenová kalkulace

Tabulka zakoupených položek pro zhotovení projektu:

číslo položky	položka	počet kusů	cena za kus [Kč]	cena celkem za položku [Kč]
1	NEMA23-03 3 Nm 3 A	3	1590	4770
2	Creality PLA 1.75 1 kg	8	369	2952
3	Průmyslový zdroj S-400-24	1	495	495
4	Průmyslový zdroj S-20-5	1	155	155
5	ATTINY1614	6	40	240
6	Cuprexit 100x160x0.6	5	28	140
7	Mag. Enkodér AS5600	6	78	468
8	Driver TB6600	6	288	1728
9	NEMA17 17HS4401	3	328	984
10	Arduino NANO	1	208	208
11	Servo MG996	1	164	164
12	Drobná elektronika + konektory	1	500	500
13	Kabely a dráty	1	500	500
14	Spojovací materiál + hliníkové profily	1	800	800
15	Ložiska mnoha velikostí	1	600	600
16	Ozubené řemeny mnoha velikostí	1	500	500
17	Plexisklo GUTTA černé	4	389	1556
18	Plexisklo GUTTA čiré	4	79	316

Celková cena za všechny zakoupené položky je 17 076 korun českých. Do této ceny není započítávána cena energií a prototypů.

Příloha č. 11: Fotodokumentace výroby a jednotlivých částí výrobku

Foto šesté na páté osy:



Zdroj: Vlastní obrázek.

Foto řemenových rozvodů k páté ose:



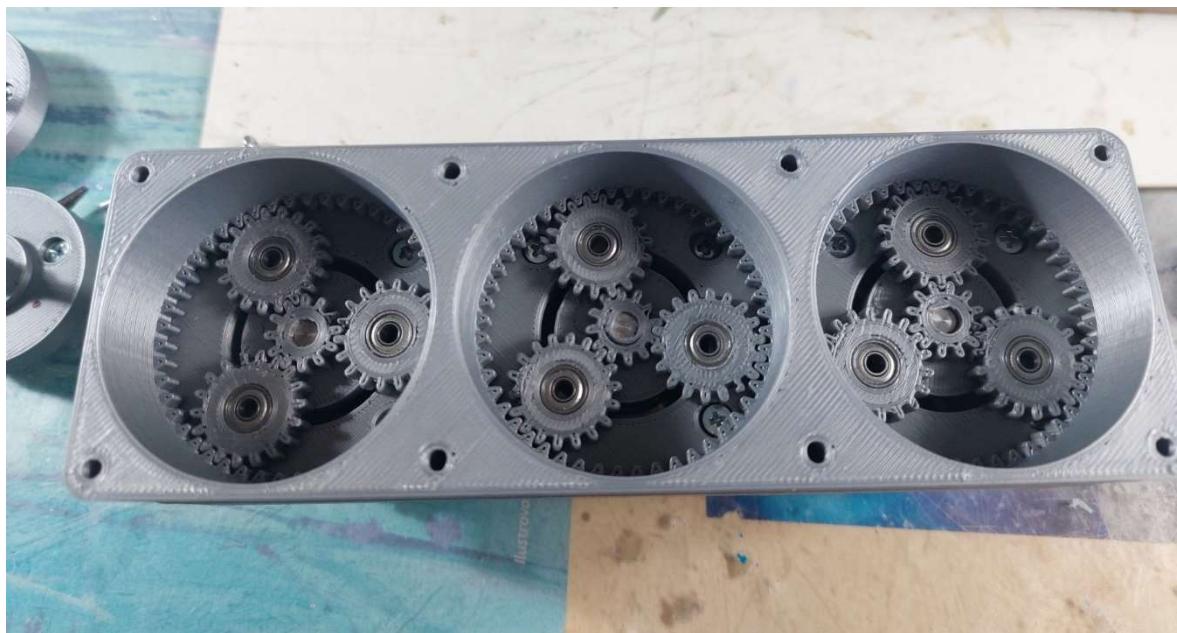
Zdroj: Vlastní obrázek.

Foto řemenových rozvodů a napojení na planetové motory s převody:



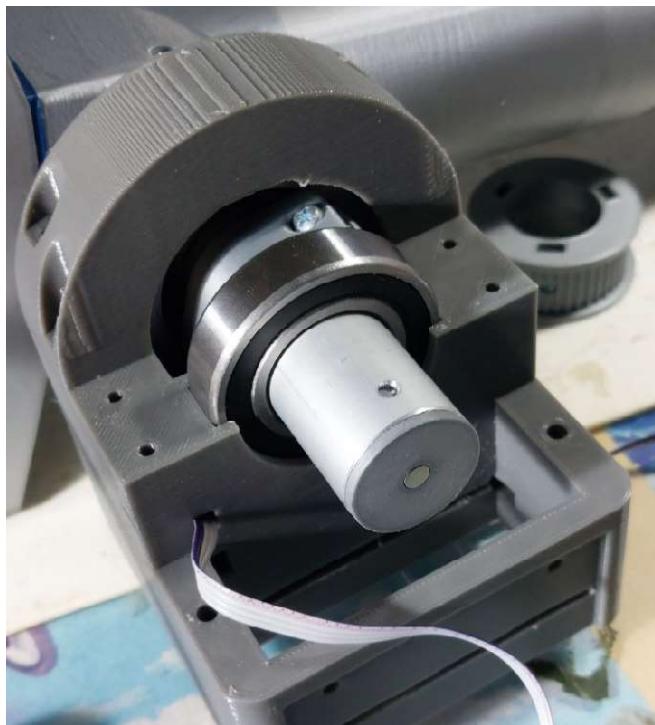
Zdroj: Vlastní obrázek.

Foto planetových převodů pro osy čtyři až šest:



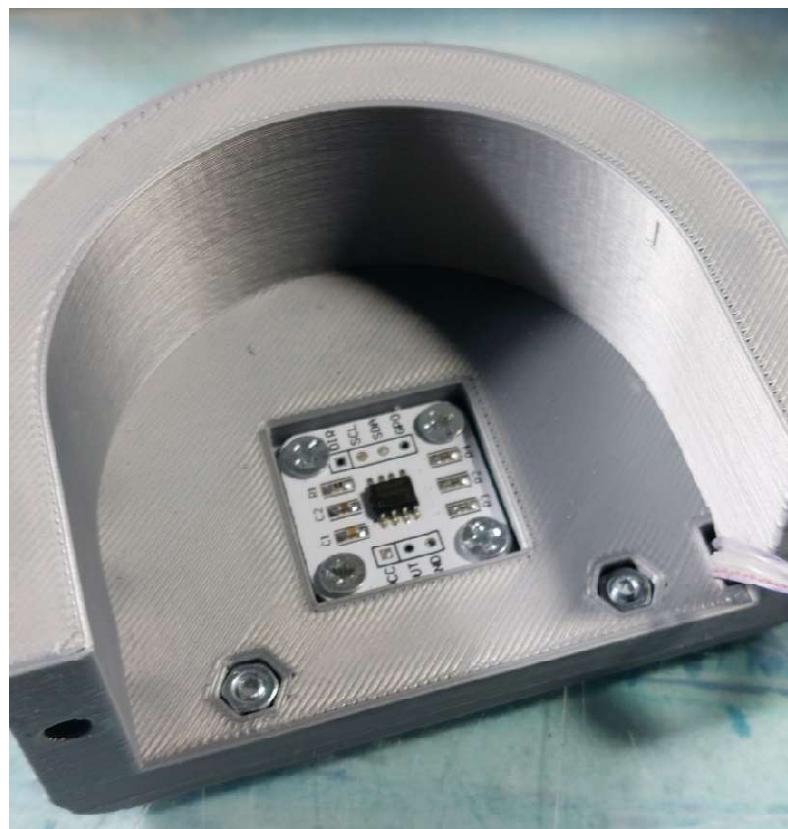
Zdroj: Vlastní obrázek.

Foto napojení osy tří:



Zdroj: Vlastní obrázek.

Umístění rotačního enkodéru pro osu tří:



Zdroj: Vlastní obrázek.

Vedení řemene osy tří:



Zdroj: Vlastní obrázek.

Napojení osy dvě a prostor pro umístění rotačního enkodéru:



Zdroj: Vlastní obrázek.

Planetový převod pro osu dvě a tři:



Zdroj: Vlastní obrázek.

Převodový mechanismus osy jedna:



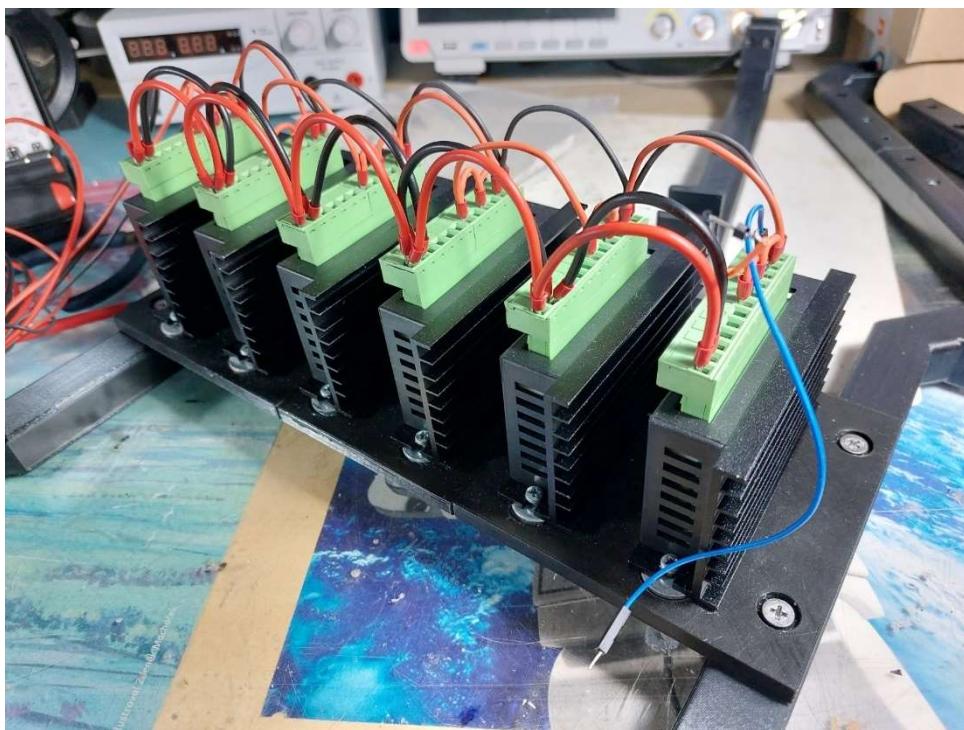
Zdroj: Vlastní obrázek.

Panel zdrojů:



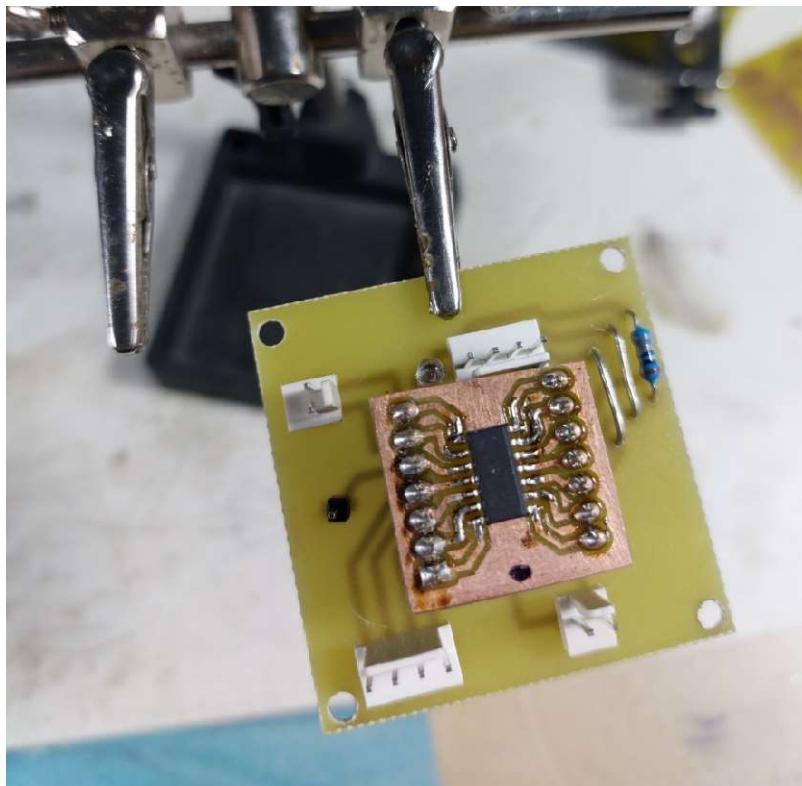
Zdroj: Vlastní obrázek.

Panel driverů krokových motorů:



Zdroj: Vlastní obrázek.

Osazená deska plošného spoje vedlejší řídicí jednotky:



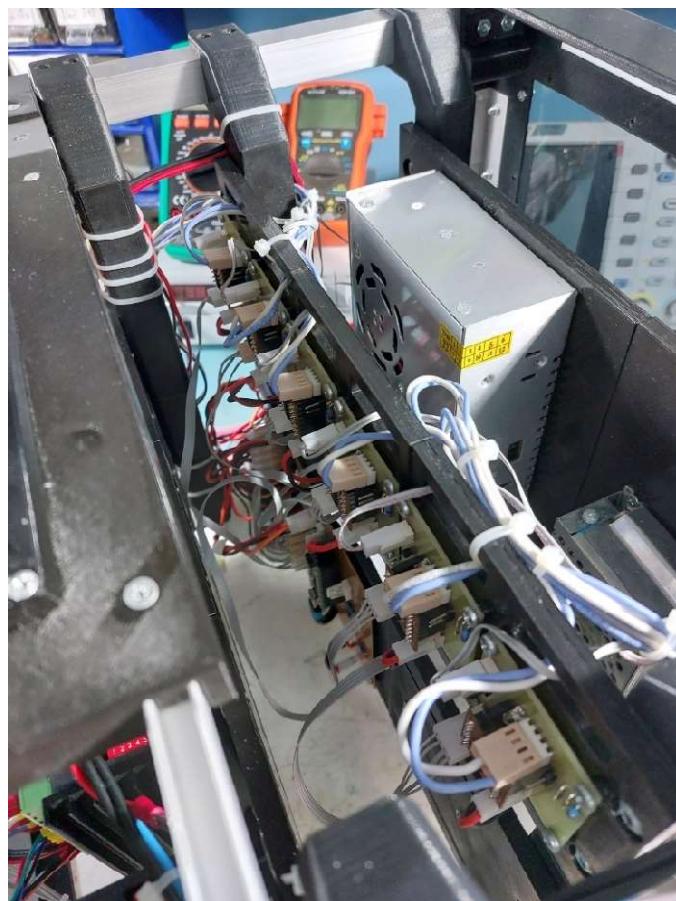
Zdroj: Vlastní obrázek.

Umístění desky plošného spoje hlavní řídicí jednotky na panel elektroniky:



Zdroj: Vlastní obrázek.

Umístění vedlejších řídicích jednotek na panel elektroniky:



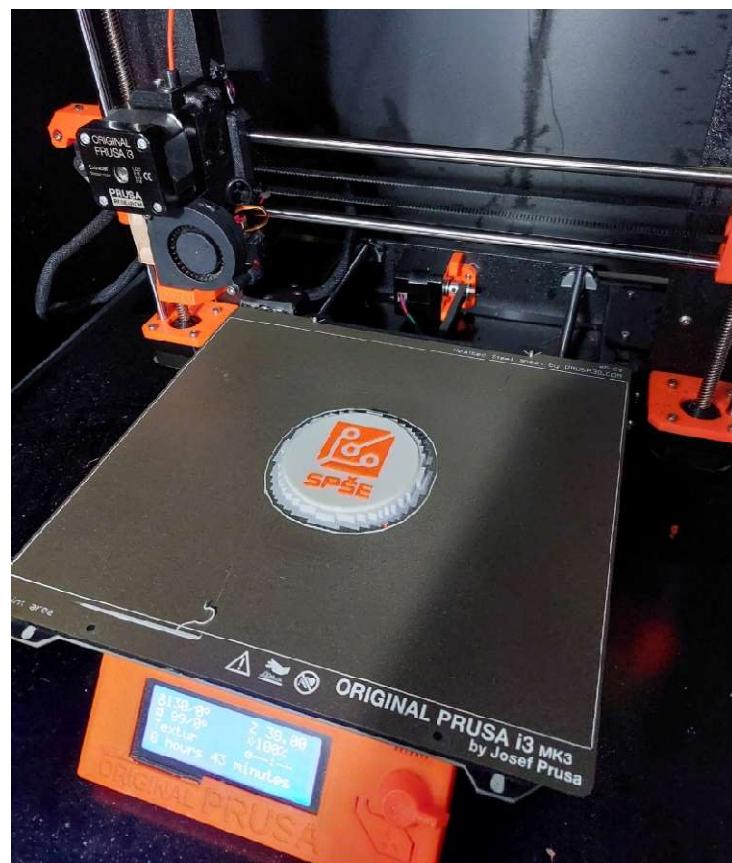
Zdroj: Vlastní obrázek.

Box s elektronikou pro řízení robotické paže:



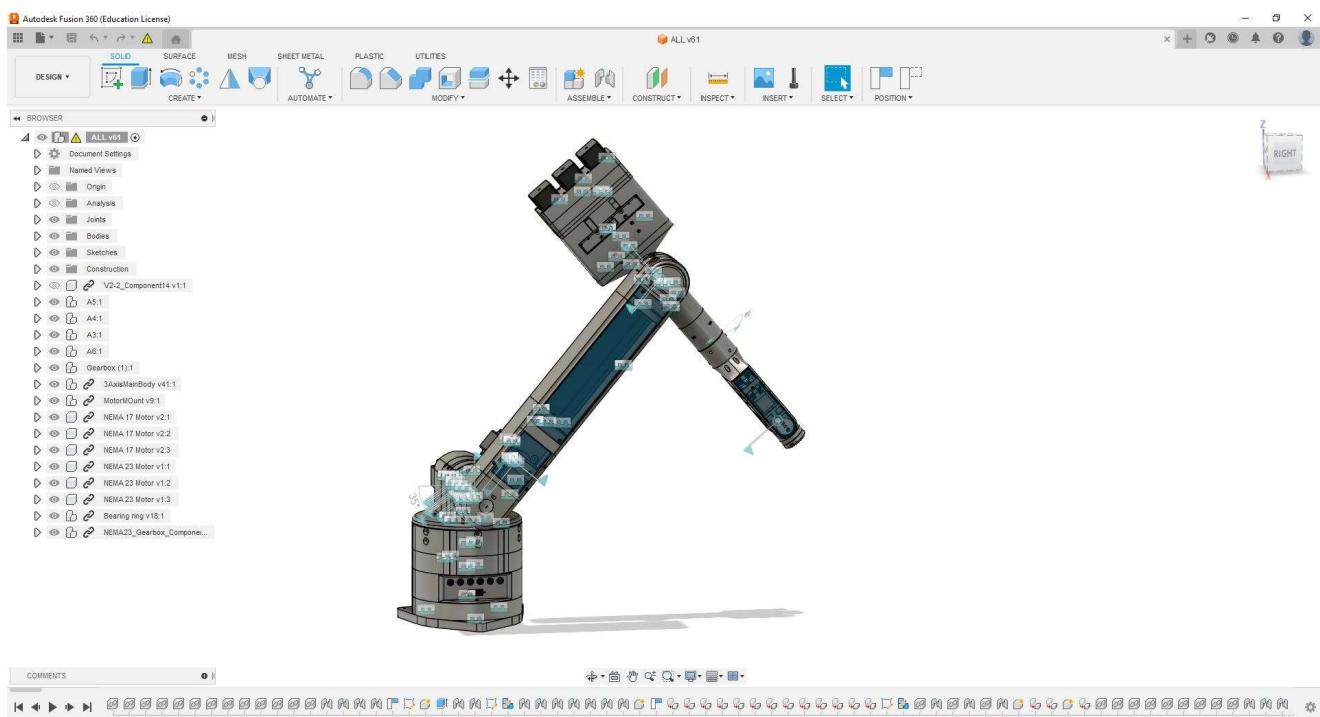
Zdroj: Vlastní obrázek.

3D tiskárna Průša i3 MK3 použitá pro výrobu dílů robotické paže:



Zdroj: Vlastní obrázek.

Prostředí programu Fusion 360 použité pro návrh robotické paže:



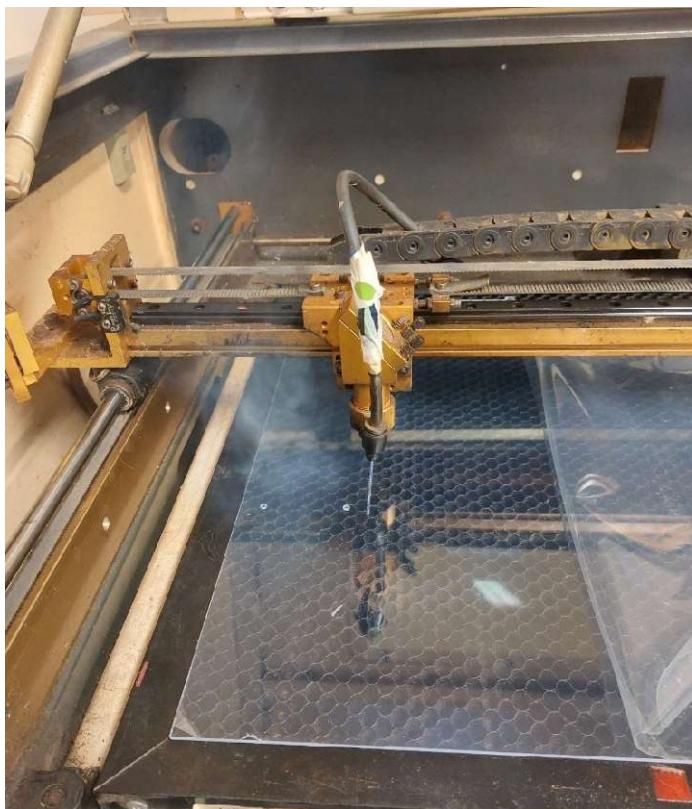
Zdroj: Vlastní obrázek.

CNC fréza použita při výrobě plošných spojů:



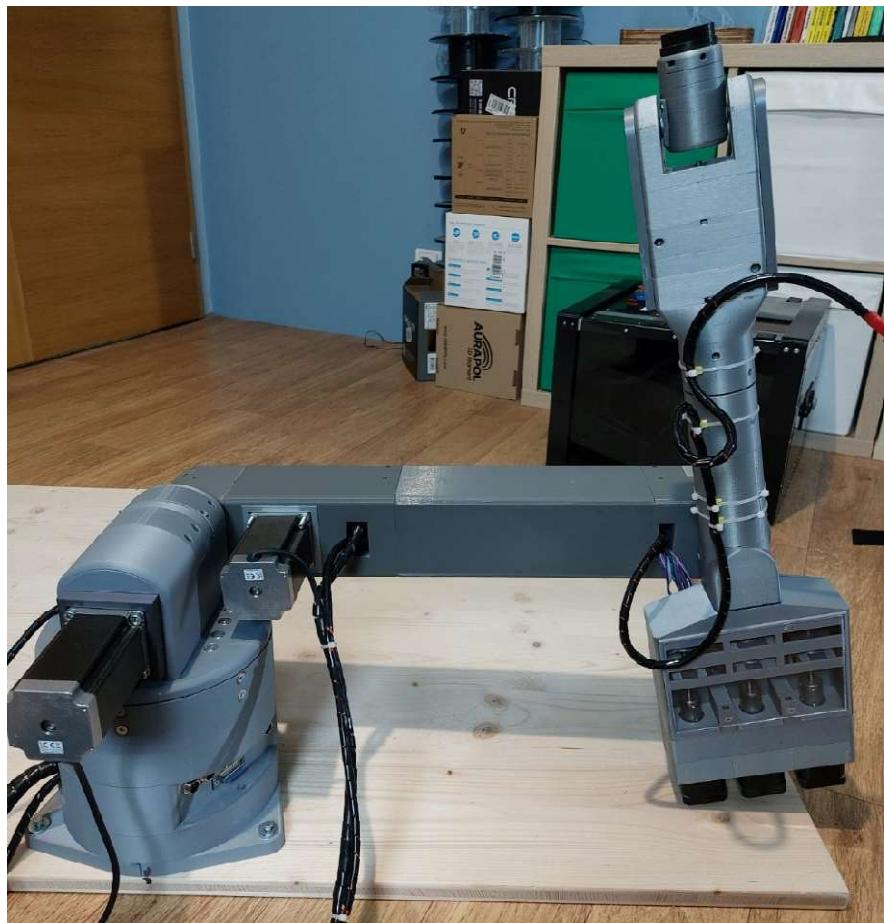
Zdroj: Vlastní obrázek.

80 W CNC LASER použit pro výrobu krycích částí robotické paže:



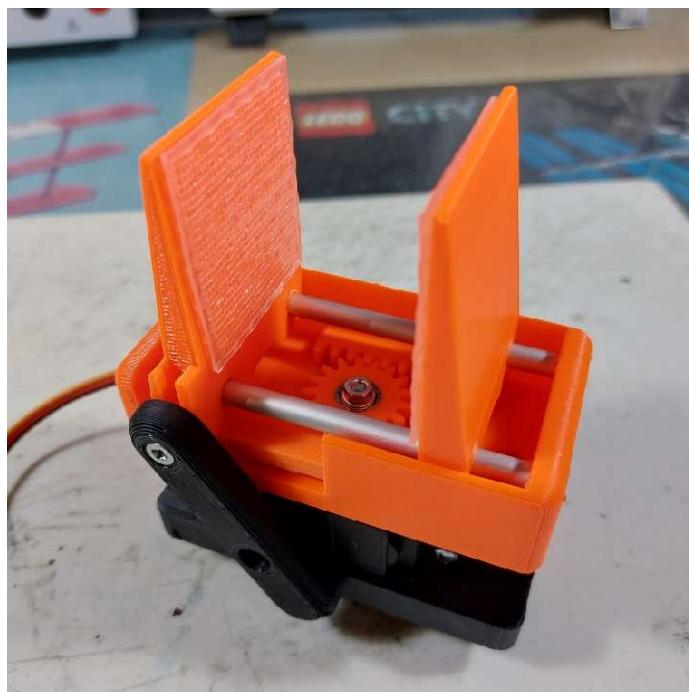
Zdroj Vlastní obrázek.

Kompletní robotická paže:



Zdroj: Vlastní obrázek.

Základní efektor:



Zdroj: Vlastní obrázek.