



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

NÁVRH MIKROMANIPULÁTORU PRO OPRAVY DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ

DESIGN OF A MICROMANIPULATOR FOR REPAIRS OF PRINTED CIRCUIT BOARDS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Kopřiva

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Student: Pavel Kopřiva

ID: 220879

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Návrh mikromanipulátoru pro opravy desek plošných spojů

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte problematiku převodu pohybu z velkého rozměru na menší (pantograf, převodovka ad.), které se používají u manipulace s nástroji a vzorky v laboratorních podmínkách i ve výrobě. Popište jednotlivé principy manipulace s nástroji a vyjmenujte odpovídající zástupce mikromanipulátorů. Realizujte návrh mikromanipulátoru ze semestrální práce, který bude ovládaný pomocí PC, popř. joystickem. Pohyb na konci manipulátoru, resp. hrotu nástroje by měl být v řádu jednotek mikrometrů. Síla pohybu by měla být dostatečná pro mechanické opravy DPS. Konstrukci a funkci mikromanipulátoru následně ověřte na některé z aplikací oprav DPS. Pokuste se stanovit přesnost přenosu pohybu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 2.6.2022

Vedoucí práce: Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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 se zabývá návrhem a konstrukcí mikromanipulátoru na bázi pantografického mechanismu s elektronickým řízením. V teoretické části jsou uvedeny možné principy konstrukcí a ovládání mikromanipulátorů. V praktické části je vytvořen návrh konstrukce pantografického převodu. Dále je navržen elektrický pohon využívající krokové motory s řídicí a napájecí elektronikou. Nakonec je navržený mikromanipulátor vyroben.

Klíčová slova

Opravy desek plošných spojů, Návrh, Konstrukce, Mikromanipulátor, Pantograf

Abstract

This thesis deals with design and construction of micromanipulator based on pantographic mechanism with electronic control. The theoretical part presents possible principles of construction and control of micromanipulators. The practical part contains design of the pantographic mechanism. Furthermore, stepper motor based electrical drive section was designed and appropriate control circuits and power supply were selected. Finally, the micromanipulator was constructed.

Keywords

Repair of printed circuit boards, Design, Construction, Micromanipulator, Pantograph

Bibliografická citace

KOPŘIVA, Pavel. *Návrh mikromanipulátoru pro opravy desek plošných spojů* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142475>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Alexandr Otáhal.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Pavel Kopřiva</i>
VUT ID studenta:	<i>220879</i>
Typ práce:	<i>Bakalářská práce</i>
Akademický rok:	<i>2021/22</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Návrh mikromanipulátoru pro opravy desek plošných spojů</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího 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 jsem si 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.

V Brně dne: 2. června 2022

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu Bakalářské práce Ing. Alexandru Otáhalovi, Ph.D. za účinnou odbornou a metodickou pomoc, poskytování konzultací, za cenné rady a za vstřícný přístup při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 2. června 2022

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
ÚVOD	10
1. MIKROMANIPULÁTORY	11
1.1 PŘEVODOVÉ MECHANISMY	11
1.1.1 <i>Mechanické převodové mechanismy</i>	11
1.1.2 <i>Elektrické převodové mechanismy</i>	14
1.1.3 <i>Hydraulické převodové mechanismy</i>	15
1.1.4 <i>Speciální převodové mechanismy</i>	15
1.2 OVLÁDACÍ ROZHRANÍ	16
1.2.1 <i>Joystick</i>	16
1.2.2 <i>Klávesnice a tlačítka</i>	17
1.2.3 <i>Ovladač s rotačními enkodéry</i>	17
2. NÁVRH PANTOGRAFICKÉHO MIKROMANIPULÁTORU	18
2.1 NÁVRH PANTOGRAFICKÉHO MECHANISMU	18
2.2 NÁVRH ELEKTRICKÉHO PŘEVODOVÉHO MECHANISMU	22
2.3 NÁVRH VÝSLEDNÉ KONSTRUKCE	25
2.4 NÁVRH ELEKTRONIKY	27
2.4.1 <i>Výběr motorů</i>	27
2.4.2 <i>Výběr řídicí elektroniky</i>	28
2.4.3 <i>Výběr zdrojů napájení</i>	30
3. KONSTRUKCE PANTOGRAFICKÉHO MIKROMANIPULÁTORU	32
3.1 VÝROBA PANTOGRAFICKÉHO MECHANISMU	35
3.2 VÝROBA ELEKTRICKÉHO PŘEVODOVÉHO MECHANISMU	37
3.3 VÝROBA ŘÍDÍCÍ DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ	42
3.4 KOMPLETACE ZAŘÍZENÍ	46
3.5 TVORBA PROGRAMU PRO ŘÍDÍCÍ ELEKTRONIKU	47
3.5.1 <i>Převod informací z ovládacích prvků</i>	48
3.5.2 <i>Přepočítání souřadnic z vodorovné do nakloněné soustavy</i>	49
3.5.3 <i>Přepočítání souřadnic na délky ramen elektrického pohonu</i>	50
3.5.4 <i>Přepočítání délky ramen na počet kroků</i>	50
3.5.5 <i>Ostatní</i>	50
3.6 TESTOVÁNÍ PŘESNOSTI POHYBU	51
3.7 NÁVOD K POUŽITÍ	53
4. ZÁVĚR	55
LITERATURA	56
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	59
SEZNAM PŘÍLOH	60

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Ukázka mikromanipulátoru s mikroposuvy [4].....	12
1.2	Ukázka pantografického mechanismu [7].....	12
1.3	Pantografický mikromanipulátor MK1 výrobce SINGER [9].....	13
1.4	Joystickový mikromanipulátor Leica microsystems [11].....	13
1.5	Princip funkce mikromanipulátoru Leica microsystems [11].....	14
1.6	Ukázka elektronického mikromanipulátoru [12].....	14
1.7	Ukázka hydraulického mikromanipulátoru [13].....	15
1.8	Ukázka piezoelektrického mikromanipulátoru [15].....	16
1.9	Ukázka normálního provedení elektronického joysticku [16].....	16
1.10	Ukázka zavěšeného provedení hydraulického joysticku [17].....	17
1.11	Ukázka ovladače s rotačními enkodéry [12].....	17
2.1	Výstupní graf simulace pantografu s popisky ramen.....	19
2.2	Testovací nastavitelný model pantografu.....	20
2.3	Detail překresleného obrazce.....	20
2.4	Vytvořený model pantografu.....	21
2.5	Detail vložky.....	21
2.6	Použitý kulový kloub KD130 [19].....	22
2.7	Navržený model pantografického mechanismu.....	22
2.8	Pěti-osý paralelní mikromanipulátor [20].....	23
2.9	Náš návrh elektrického převodového mechanismu.....	23
2.10	Detail návrhu motoru s trapézovým šroubem.....	25
2.11	Návrh výsledné konstrukce mikromanipulátoru.....	26
2.12	Princip funkce bipolárních krokových motorů [22].....	28
2.13	Detail umístění koncového spínače.....	30
3.1	Ukázka použitých ručních nástrojů.....	32
3.2	Ukázka použitých hliníkových desek.....	33
3.3	Fréza OPTIMUM Optimill BF20V.....	33
3.4	Soustruh Quantum D 210 x 40.....	34
3.5	Pokosová pila Metabo KGS 305 M.....	34
3.6	Ukázka vložky do kloubu ramen.....	35
3.7	Ukázka vyrobených pantografických mechanismů.....	36
3.8	Vyrobený pantografický mechanismus.....	37
3.9	Ukázka vyrobeného držáku motoru s jezdcem a vodící příčkou a držáky na kuličkový kloub.....	37
3.10	Ukázka částečně složeného ramene.....	38
3.11	Ukázka ramene s novým jezdcem.....	38
3.12	Ukázka ramene s otočným mechanismem.....	39
3.13	Ukázka ramene s novou verzí otočného mechanismu.....	39
3.14	Ukázka sestaveného elektrického pohonu.....	40
3.15	Ukázka vyrobené platformy pro spojení ramen.....	41
3.16	Ukázka vyztuženého nástavce.....	41
3.17	Ukázka výsledné konstrukce elektrického převodového mechanismu.....	42
3.18	Měření odběru proudu motorových driverů.....	43
3.19	Schéma zapojení řídicí desky plošných spojů.....	45
3.20	Řídicí deska plošných spojů.....	45
3.21	Ukázka procesu vkládání matic a hotového dna krabičky pro desku plošných spojů.....	46
3.22	Výsledná konstrukce mikromanipulátoru.....	47

3.23	Princip přepočtu souřadnic mezi dvěma soustavami.....	49
3.24	Ukázka měření přesnosti mikromanipulátoru.....	51

ÚVOD

Desky plošných spojů jsou nepostradatelnou součástí jakéhokoliv elektronického zařízení či obvodu, jelikož plní funkci jak mechanickou v tom, že drží součástky pohromadě, tak i elektrickou, kdy spojují jednotlivé součástky do většího celku – obvodu. V dnešní době je snahou co nejvíce elektrické součástky i desky plošných spojů miniaturizovat, aby zabíraly méně místa, ale přitom plnily stejnou, někdy i složitější funkci. Kvůli tomu se v deskách plošných spojů používají stále vyšší počty vnitřních vrstev s co nejtenčími vodivými cestami. V některých případech se i umisťují takzvané vnořené součástky (tzv. *embedded*) dovnitř struktury desek plošných spojů.

Se zvětšující se složitostí desek plošných spojů narůstá počet možných závad a chyb, které se mohou na těchto deskách objevit. Tyto vady mohou vzniknout při výrobě samotných desek, při nesprávném pájení, nebo při demontáži součástek a opravách. Opravy takovýchto defektů vyžadují vysokou přesnost pohybů, a proto se k nim používají přístroje zvané mikromanipulátory.

Výhodou použití mikromanipulátorů je zpřesnění a z pohodlnější obsluhy. Další výhodou může být eliminace chvění rukou operátora. U některých zařízení dokonce můžeme naprogramovat pohyby a docílit tak poloautomatických až automatických oprav.

Jak vyplývá z názvu, mikromanipulátory jsou zařízení, která jsou schopna pohybovat nástroji velmi přesně a na velmi malých vzdálenostech, řádově v mikrometrech. Existuje mnoho způsobů a řešení, jak takový mikromanipulátor vytvořit. Mikromanipulátory mohou být mechanické, elektrické, hydraulické nebo speciální. Všechny tyto principy jsou popsány a rozebrány v teoretickém úvodu.

Cílem této práce je navrhnout a zkonstruovat mikromanipulátor s pantografickým převodem, který bude ovládán operátorem pomocí klávesnice, myši nebo joysticku. Tyto pokyny budou vnitřní elektronikou zpracovány a přepočteny na pohyby krokových motorů. Pohyby motorů budou dále zmenšeny pomocí pantografického převodu tak, aby bylo dosaženo pohybů v rámci mikrometrů.

Samotný návrh pantografického mikromanipulátoru bude v praktické části práce rozdělen do několika částí. Nejdříve bude navrhnout pantografický mechanismus. Poté bude navrhnout elektrický pohon s krokovými motory, a nakonec bude vybrána vhodná řídicí elektronika s napájecími zdroji. Konstrukce pantografického mikromanipulátoru bude také rozdělena do částí podle návrhu. Nakonec bude ověřena funkce mikromanipulátoru.

1. MIKROMANIPULÁTORY

Mikromanipulátor je zařízení, které umožňuje převod makroskopických pohybů rukou operátora na mikroskopický pohyb nástroje. Nejčastěji se uplatňují v biologii, například při oplodňování vajíček spermii. Možnosti jejich využití jsou však neomezené a obecně se dají využít kdekoliv, kde je potřeba manipulovat s objekty v rozsahu mikrometrů. Výhodou jejich použití je například eliminace chvění rukou operátora. [1]

Mikromanipulátory mohou být jak jednoosé, tak převážně víceosé. Rozsah a přesnost pohybu záleží na daném typu mikromanipulátoru, stejně tak i způsob jeho ovládání. Mikromanipulátorů je proto velké množství druhů a každý se od sebe liší hlavně tím, pro jaké činnosti jsou navrženy. Zvýšení rozsahu pohybu většinou snižuje přesnost mechanismu, a proto je nutné najít ideální kompromis pro danou aplikaci. Podobně je na tom rychlost, která udává, jak bude mechanismus reagovat na pokyny operátora. Pokud máme větší plochu pohybu je vhodná vyšší rychlost pro rychlejší odezvy, naopak pro velmi jemné operace například s buňkami je zase přílišná rychlost nevhodná. [1]

Mikromanipulátor se obvykle skládá z ovládacího rozhraní a převodového mechanismu, který převádí pohyb rukou operátora na miniaturní pohyby nástrojů v rozsahu mikrometrů. Vzhledem k tomu, že výsledné pohyby nástrojů se pohybují v řádech mikrometrů, bývají často mikromanipulátory používány ve spojení s mikroskopy. [1, 2, 3]

1.1 Převodové mechanismy

Hlavním kritériem, podle kterého budeme převodové mechanismy dělit, je způsob, jakým je zajištěn pohyb nástroje. Rozlišujeme mechanické, elektrické, hydraulické a speciální. Toto rozdělení určuje, zda jsou dané převodové mechanismy přímo kompatibilní s vybraným ovládacím zařízením, nebo bude-li nutné použít nějaký převodní mechanismus, jako je například počítač. Každý z uvedených druhů převodových mechanismů dosahuje jiných velikostí zmenšení, jiných rozsahů pohybů a je vhodný pro jiné aplikace.

1.1.1 Mechanické převodové mechanismy

Mechanické převodové mechanismy jsou mechanismy, které mění velikost nějakého pohybu, nejčastěji rotačního, pomocí pouze mechanických součástí jako jsou ozubená kola, klouby a páky. Nejběžnějším zástupcem je převodovka, která pomocí soustavy ozubených kol mění počet otáček ze vstupu na výstup.

V komerčně dostupných mikromanipulátorech se nejčastěji používají mikroposuvy, někdy nazývané jako mikrošrouby. Mikroposuvy se také hojně využívají v mikroskopech. Každá osa, ve které se mikromanipulátor pohybuje, je osazena

samostatným mikroposuvem a každý mikroposuv je vybaven nejčastěji otočným knoflíkem, jehož rotací dochází k jeho pohybu. Dodatečně bývají mikroposuvy vybaveny stupnicí pro jednoduché zjištění jejich aktuální pozice. Mikroposuvy se také využívají v elektrických převodových mechanismech, kdy je rotační knoflík nahrazen elektrickým motorem. Ukázka mikromanipulátoru s mikroposuvy je na obrázku 1.1. [4]



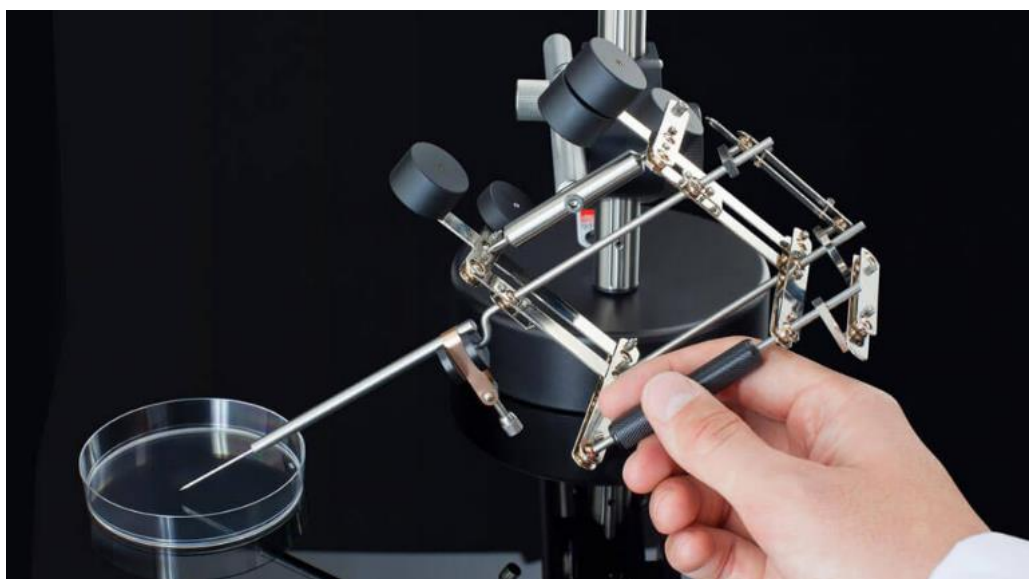
Obrázek 1.1 Ukázka mikromanipulátoru s mikroposuvy [4]

Dalším typem jsou mikromanipulátory, které využívají mechanických spojení pomocí ramen mezi vstupem a výstupem. Nejznámější a nejpoužívanější z nich je pantografický převod. Pantografický mechanismus se obecně skládá z čtyř ramen. Tato ramena jsou spolu spojena tak, jak je vyobrazeno na obrázku 1.2. Vyobrazené zařízení je výtvarnická pomůcka používaná k souběžnému překreslování a zmenšování obrázků a motivů. Zvětšení (zmenšení) a deformace výsledného obrazu je závislá na poměru délek jednotlivých ramen. Tento mechanismus se využíval také ve strojírenství, kde sloužil jako předchůdce moderních CNC zařízení. Tato zařízení fungovala tak, že na jednom stole se nacházel vzorový kus, který byl objížďen hrotem umístěným na rameni pantografu. Na druhém konci se nacházel nástroj, nejčastěji rotační, kterým se obráběl nový kus. Nejčastěji se takovýmto zařízením frézovaly nápisy a popisky na obrocích. [5, 6, 8]



Obrázek 1.2 Ukázka pantografického mechanismu [7]

V komerčních mikromanipulátorech se tento mechanismus používá velmi zřídka. Jedním z mála výrobců, který pantografický mechanismus využívá je SINGER Instruments. Ukázka jejich mikromanipulátoru je na obrázku 1.3. Jejich návrh je uzpůsobený k ručnímu ovládnání a je vybaven protizávažími, aby nástroj setrval ve stejné poloze, i když není ovládán. Tento návrh byl poprvé použit v roce 1950 pány Robertem Bayerem a A. E. Saunders-Singersem. Hlavní předností tohoto návrhu je odstranění chvění rukou operátora a také jeho snadná a pohodlná obsluha. Návrh mikromanipulátoru postavíme na tomto principu. [9, 10]

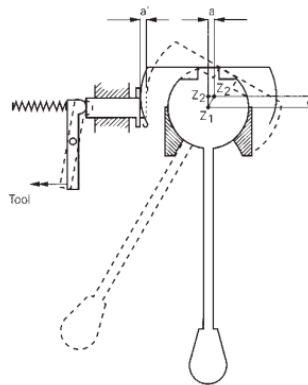


Obrázek 1.3 Pantografický mikromanipulátor MK1 výrobce SINGER [9]

Ještě se zmíníme o joystickových mikromanipulátorech. Tento typ mikromanipulátorů vyrábí firma Leica microsystems. Jejich ukázka je na obrázku 1.4. a princip jeho funkce je vyobrazen na obrázku 1.5. [11]



Obrázek 1.4 Joystickový mikromanipulátor Leica microsystems [11]



Obrázek 1.5 Princip funkce mikromanipulátoru Leica microsystems [11]

1.1.2 Elektrické převodové mechanismy

Elektrické převodové mechanismy nejčastěji využívají nějakého mikroposuvu doplněného o elektrický motor. Elektrické mikromanipulátory můžeme považovat za mechanické s přidanými elektronickými prvky pro jejich ovládní. Pro pohyb se využívají přesné krokové motory, lineární pohony nebo motory s převodovkami. Výsledná přesnost mikromanipulátoru bude poté závislá na mechanické části a na velikosti nejmenšího kroku, který jsme s elektrickým pohonem schopni vykonat. Pod krokem si můžeme představit jeden krok krokového motoru nebo jednu otáčku motoru s převodovkou. [2, 3]

Elektronické mikromanipulátory jsou v současné době jedny z nejpoužívanějších. Jejich hlavní předností je možnost propojit je s počítačem. Díky tomu je možné přesně zaznamenávat pohyby nástroje a následně tyto pohyby opakovat. Elektronické řízení také umožňuje libovolnou volbu ovládacího rozhraní a poskytuje také možnost personalizace ovládacích prvků dle požadavků operátora. Výhodou je také možnost přidání vyššího počtu os pohybu. Elektrický mikromanipulátor je vyobrazen na obrázku 1.6. [3, 12]



Obrázek 1.6 Ukázka elektronického mikromanipulátoru [12]

1.1.3 Hydraulické převodové mechanismy

Hydraulické mikromanipulátory jsou speciálně navrženy pro aplikace s vysokým zmenšením pohybu. V mechanických a elektrických mechanismech je vyšší míra vůle a nepřesnosti při velkých zmenšeních. Hydraulické mechanismy pracují na principu přesouvání kapaliny z menšího válce do většího. Tímto dojde k výraznému zmenšení pohybu. Toto zmenšení je poté čistě závislé na poměru průměrů obou válců. [1, 2]

V hydraulických mikromanipulátorech používáme dvě základní kapaliny vodu a olej. Olej má lepší vlastnosti z pohledu přesnosti a rychlosti pohybu – olej je méně stlačitelný než voda. Proto se olejové mechanismy používají v aplikacích, kde je zapotřebí rychlých pohybů a častých změn směru pohybu. Nevýhodou oleje je, že může degradovat a jeho výměna bývá složitá. Naopak voda je vhodná pro aplikace, kde dochází ke kolísání teplot, jelikož olej více mění svůj objem s teplotou což může způsobit nepřesnosti. Její výměna je také méně složitá. [1]

Hydraulické mikromanipulátory se ovládají výhradně pomocí joysticků, převážně těch zavěšených, a rotačních ovladačů. Ukázku hydraulického mikromanipulátoru s rotačním ovladačem můžeme vidět na obrázku 1.7.



Obrázek 1.7 Ukázka hydraulického mikromanipulátoru [13]

1.1.4 Speciální převodové mechanismy

Zástupcem speciálních mikromanipulátorů je piezoelektrický mikromanipulátor. Tyto mikromanipulátory jsou určeny pro pohyby na velmi malé vzdálenosti 1-10 μm a pracují na principu piezoelektrického jevu. Uvnitř mikromanipulátoru jsou umístěny piezoelektrické krystaly, které se po přiložení napětí různě deformují. Jejich deformací dochází k pohybu nástroje. Kvůli velmi malým rozsahům pohybů bývají piezoelektrické manipulátory nejčastěji doplněné o elektrické mikromanipulátory. Ukázku takovéto kombinace můžeme vidět na obrázku 1.8. [14, 15]



Obrázek 1.8 Ukázka piezoelektrického mikromanipulátoru [15]

1.2 Ovládací rozhraní

Za ovládací rozhraní budeme považovat prvky a zařízení, se kterými operátor ovládá daný mikromanipulátor. Nejběžněji se používají například Joysticky. Ovládací rozhraní můžeme rozdělit podle jeho ergonomičnosti a počtu ovládacích prvků.

1.2.1 Joystick

Ovládání zařízení pomocí joysticků bývá velmi intuitivní a ergonomické, protože pohyby joysticku se přímo přenášejí v pohyby nástrojů. Například nahnutí joysticku doleva způsobí pohyb nástroje stejným směrem. Nevýhodou joysticků může být v určitých případech omezený počet ovládacích prvků. Joysticky se vyrábějí ve dvou hlavních provedeních. Normální provedení vyobrazené na obrázku 1.9 a invertované (někdy nazývané zavěšené) provedení ukázané na obrázku 1.10. Normálně provedené joysticky bývají zpravidla elektronické, ale mohou být i mechanické. Zavěšené joysticky se používají častěji pro ovládání mikromanipulátorů a mnohdy jsou hydraulické. [16, 17]



Obrázek 1.9 Ukázka normálního provedení elektronického joysticku [16]



Obrázek 1.10 Ukázka zavěšeného provedení hydraulického joysticku [17]

1.2.2 Klávesnice a tlačítka

Ovládání pomocí klávesnic, různých externích ovladačů a tlačítek eliminuje omezení počtu ovládacích prvků, které je přítomno u joysticků. Nevýhodou však je, že mačkání tlačítek na klávesnici nereprezentuje správně výsledný pohyb nástroje. Operátor získá větší kontrolu nad ovládaným zařízením, ztratí ale vizuální reprezentaci svých pohybů. Proto se většinou společně s klávesnicemi využívají monitory, které dodávají obsluze potřebné informace o pohybu nástroje.

1.2.3 Ovladač s rotačními enkodéry

Specializovaným ovladačem pro mikromanipulátory je ovladač s rotačními enkodéry. Tento ovladač se skládá z několika, obvykle 3 až 4, rotačních enkodérů a pomocných tlačítek. Pohyb mikromanipulátoru je řízen tak, že každý rotační enkodér přímo ovládá jednu osu mikromanipulátoru. Operátor si tak může velmi jasně představit, jak jakým enkodérem pootočit, aby dosáhl požadované polohy nástroje. Nevýhodou je, že tento způsob ovládání se hodí pouze pro mikromanipulátory se 3 až 4 osami. Ukázka takového ovladače je vidět na obrázku 1.11. [12]



Obrázek 1.11 Ukázka ovladače s rotačními enkodéry [12]

2. NÁVRH PANTOGRAFICKÉHO MIKROMANIPULÁTORU

Tato kapitola se bude zabývat samotným návrhem pantografického mikromanipulátoru. Celý návrh, z důvodu přehlednosti, bude rozdělen do jednotlivých kapitol na Návrh pantografického mechanismu, Návrh elektrického převodového mechanismu, Návrh výsledné konstrukce, a nakonec Návrh elektroniky.

2.1 Návrh pantografického mechanismu

Návrh pantografického mechanismu byl postaven na návrhu firmy SINGER Instruments s názvem MK1 Manipulator ukázaném na obrázku 1.3. Tento návrh využívá dva samostatné pantografické mechanismy, které jsou propojeny pomocí spojek s kuličkovými klouby, pro umožnění pohybu ve více osách. Samostatný pantografický mechanismus totiž umožňuje pohyb pouze ve dvou osách. Touto kombinací tedy dosáhneme toho, že hrotem nástroje bude možné pohybovat ve třech základních osách x, y, z a také jej bude možno libovolně naklánět.[9]

Nejdříve bylo zapotřebí určit rozměry samotného pantografického mechanismu. Délky jednotlivých ramen pantografu jsou velmi důležité, jelikož jejich kombinací se zásadně mění chování převodu. Nevhodnou kombinací délek ramen může dojít i k deformaci výsledného obrazce nebo pohybu. Tato vlastnost může být vhodná pro aplikace, kdy je předem stanoveno, že potřebujeme, aby pohyb v jednom směru byl výrazně více zmenšen než pohyb v druhém směru. Pro tuto aplikaci je však tato vlastnost zcela nevhodná, a proto bylo zapotřebí nalézt vhodnou kombinaci délek, pro kterou se tato vlastnost neprojevuje.

Pro určení rozměrů byl použit tabulkový procesor Microsoft Excel z důvodu práce s velkým množstvím dat. V tomto tabulkovém procesoru byl vytvořen jednoduchý matematický model pantografického mechanismu za použití základních goniometrických funkcí

$$\sin \alpha = \frac{a}{c}, \cos \alpha = \frac{b}{c}, \tan \alpha = \frac{a}{b} \quad [18], \quad (2.1)$$

pythagorovy věty

$$c^2 = a^2 + b^2 \quad [18], \quad (2.2)$$

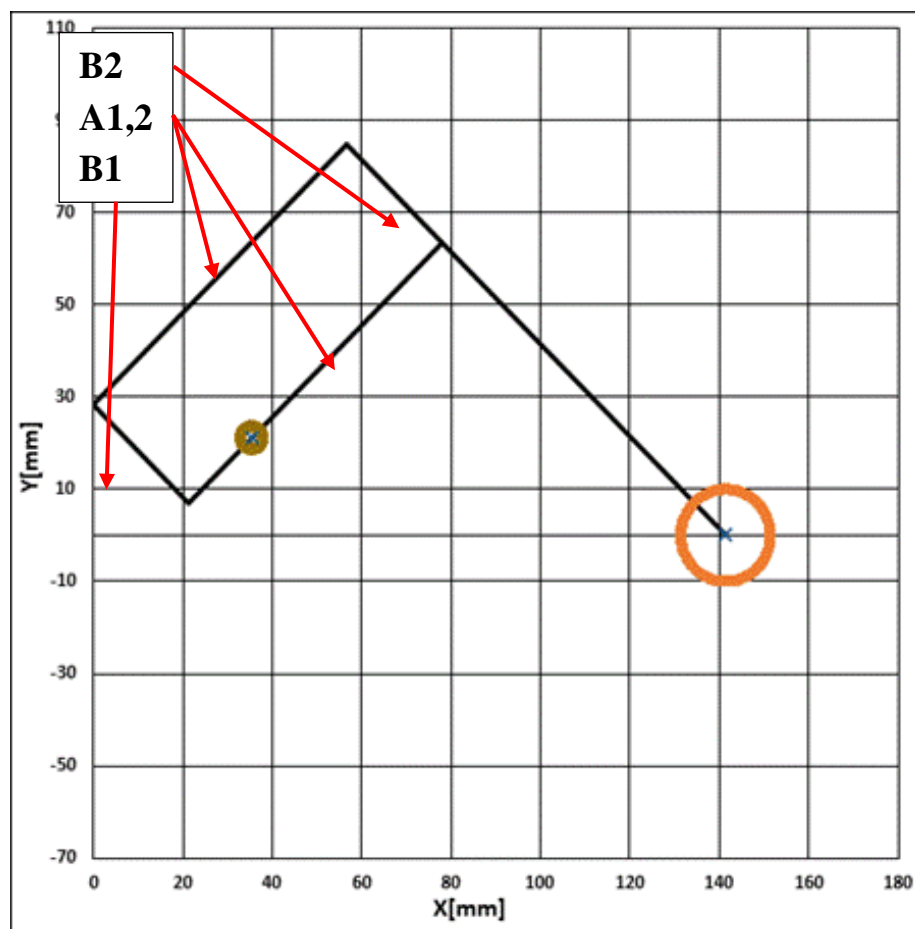
a kosinové věty

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2 * a * b * \cos \gamma \quad [18], \quad (2.3)$$

kde a a b jsou odvěsny obecného trojúhelníku, c je přepona a úhel γ je úhel mezi odvěsnami a a b. V případě pythagorovy věty musí být trojúhelník pravoúhlý. Kosinová

věta a goniometrické funkce se dají dále upravovat tak, aby se pomocí nich daly vypočítat všechny strany a úhly v trojúhelníku. [18]

Výsledný matematický model funguje tak, že zpracovává zadané hodnoty délek jednotlivých ramen, ve vygenerovaném grafu zobrazí náčrt pantografu v základní pozici a poté se otestuje, jak se pohyb vstupního ramene přenese na výstup. Pro názornost je použito kolečko o průměru 10 mm. Toto kolečko se rozloží do bodů s kartézskými souřadnicemi a pomocí matematického modelu se souřadnice těchto bodů přepočítají na souřadnice nově vzniklých bodů. Tyto nové body odpovídají pohybu pantografu. Výstupní graf ze simulace je vyobrazen v obrázku 2.1. Tento matematický model je přiložen v příloze A.

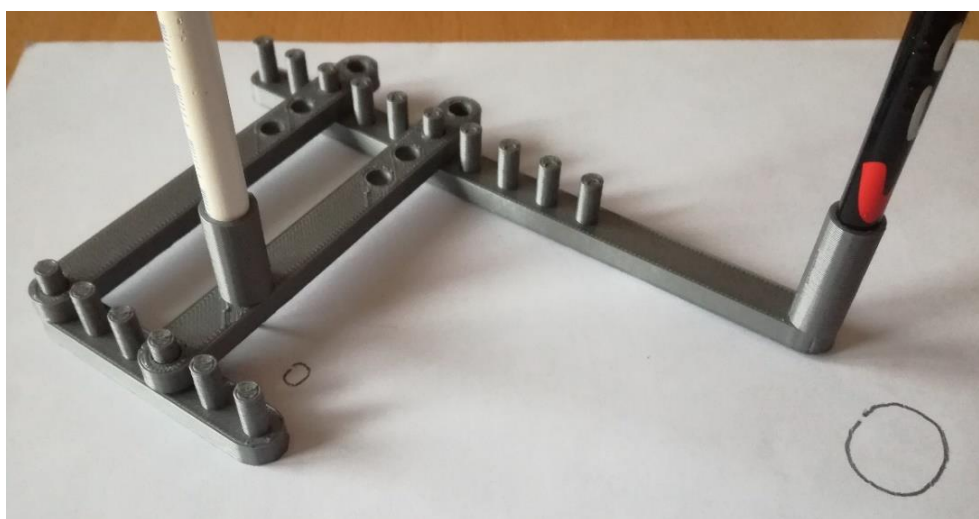


Obrázek 2.1 Výstupní graf simulace pantografu s popisky ramen

Pomocí tohoto modelu byla nalezena nejvhodnější kombinace délek ramen pantografického mechanismu. Vhodnost jednotlivých kombinací byla hodnocena podle toho, jak velkého zmenšení bylo dosaženo a jak byl výsledný obraz zdeformován. Svou roli také hrála celková velikost mechanismu. Výsledný mechanismus musel být rozměrově vhodný k ostatním částem zařízení, aby je bylo možné provozovat společně.

Zvolené délky ramen byly následující: A_1 a $A_2 = 80$ mm, $B_1 = 30$ mm a $B_2 = 120$ mm. Vzdálenost výstupního bodu od konce ramene A_2 byla 20 mm. Takovou kombinací délek bylo dosaženo nulové deformace výsledného obrazu a výsledné zmenšení bylo čtyřnásobné.

Údaje zjištěné simulací byly následně prakticky ověřeny na nastavitelném modelu pantografu vytištěném na 3D tiskárně Prusa i3 MK2. Výsledky byly takřka identické. Použitý model pantografu je na obrázku 2.2. Na první pohled by se mohlo zdát, že obrazec byl zdeformován, toto je však optická iluze. Na obrázku 2.3 je vidět, že oba obrazce mají stejný tvar. Drobné odchylky v přenesení tvaru byly způsobeny vřelymi vyrobeného modelu.



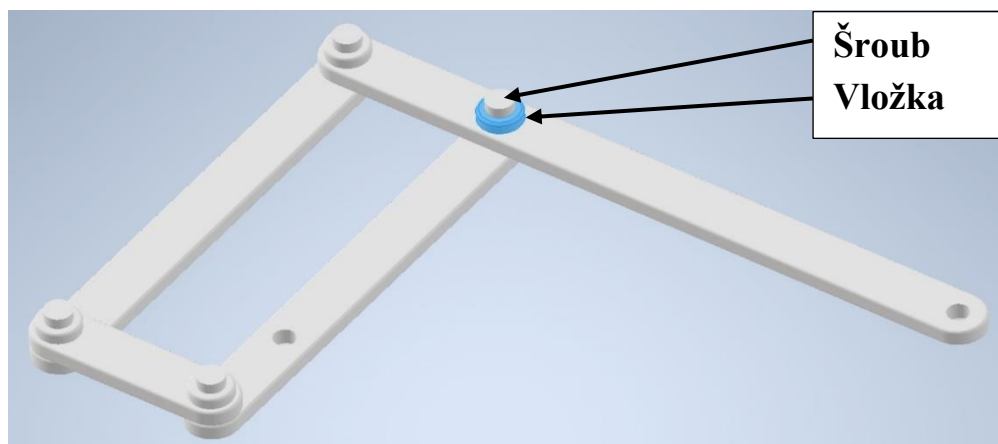
Obrázek 2.2 Testovací nastavitelný model pantografu



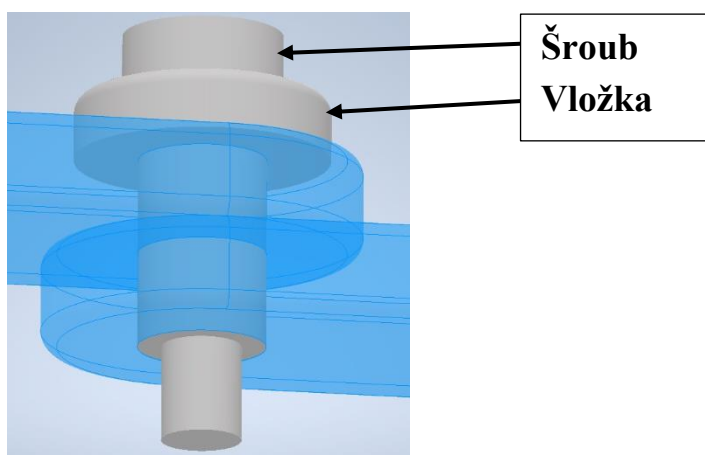
Obrázek 2.3 Detail překresleného obrazce

Následně byl podle stanovených rozměrů vytvořen 3D model v programu Autodesk Inventor 2022. Tento model je vyobrazen na obrázku 2.4. Z důvodu minimalizace vůle ve spojích ramen, budou tyto spoje vybaveny vložkou. Z toho důvodu jsou tolerance

na otvory v ramenech a na vnější průměr vložky zapotřebí co nejpřesnější. Detailní pohled na funkci vložky je vidět na obrázku 2.5.



Obrázek 2.4 Vytvořený model pantografu



Obrázek 2.5 Detail vložky

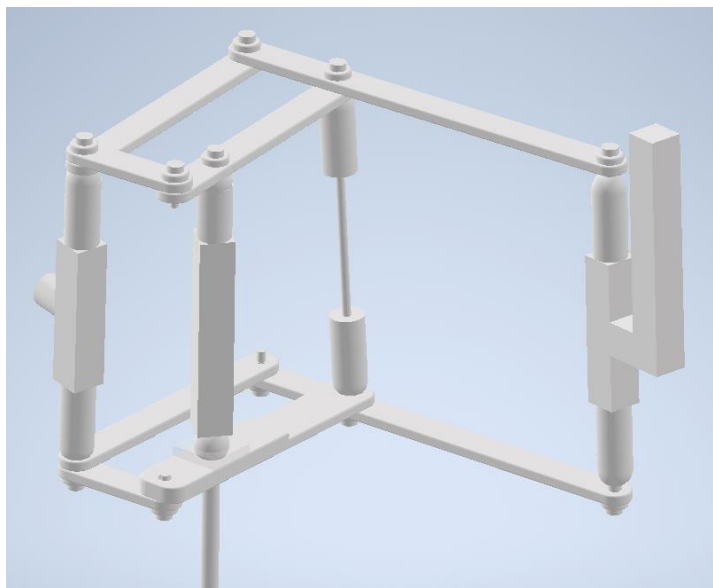
Jak již bylo uvedeno, pro dosažení pohybu ve více osách je nutné zapojit dva pantografy paralelně k sobě a propojit je spojkami s kuličkovými klouby. Tyto kuličkové klouby jsou velmi složité na výrobu, a proto bylo rozhodnuto, že budou vybrány z dostupných řešení na trhu. Nejvhodnější pro tuto aplikaci byly magnetické kuličkové klouby dostupné na AliExpressu [19]. Tyto klouby jsou dostupné v několika různých konfiguracích a rozměrech. Jejich hlavním použitím bývá aplikace v 3D tiskárnách deltového typu. Pro navržený pantografický mechanismus byl nejvhodnější kloub s označením KD130. Tento kloub rozměrově souhlasí s navrženým pantografickým mechanismem, je také vybaven šroubovicí o přijatelné délce, a hlavně je v místě spojení šroubovice s kuličkou vybaven rovnou plochou, která

je vhodná pro zmenšení celkové vůle ve výsledném mechanismu. Ukázkou tohoto kloubu můžeme vidět na obrázku 2.6.



Obrázek 2.6 Použitý kulový kloub KD130 [19]

Oba pantografy byly navrženy tak aby byly od sebe vzdáleny 100 mm. Pro spojení obou pantografů dohromady a jejich následnému připevnění do zařízení bylo navrženo více způsobů. Podle postupu výroby byl později vybrán nejvýhodnější z nich. Výsledný návrh pantografického mechanismu je vyobrazen na obrázku 2.7.

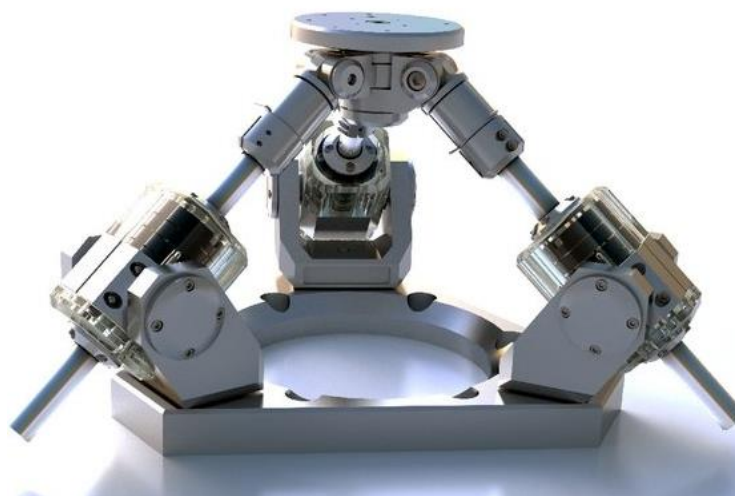


Obrázek 2.7 Navržený model pantografického mechanismu

2.2 Návrh elektrického převodového mechanismu

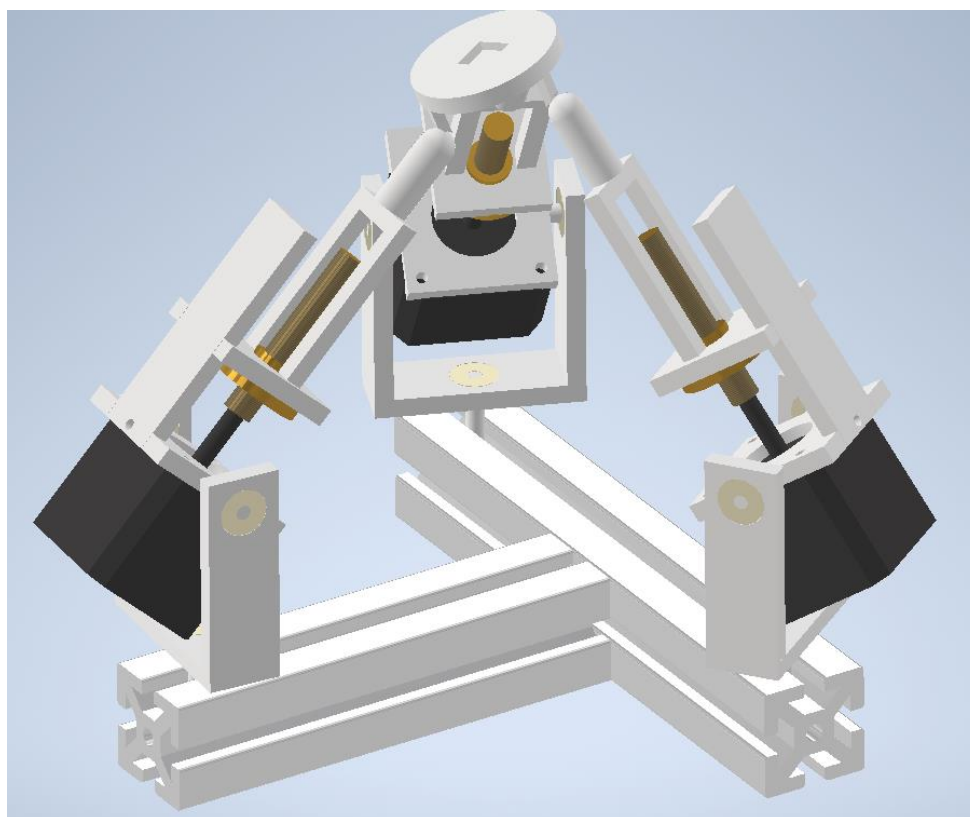
Navržený pohybový mechanismus bude muset být schopný pohybu v pěti osách. Tedy pohyb v základních 3 osách x , y , z a také musí zvládat naklání v dalších dvou osách. Pěti-osý pohyb je ideální pro snadný ergonomický pohyb při opravách DPS.

Náš návrh byl postaven na návrhu pěti-osého paralelního mikromanipulátoru navrženého pány Danielem Prusákem, Konradem Kobusem a Grzegorzem Karpiem z AGH univerzity Vědy a Techniky v Krakově. [20]



Obrázek 2.8 Pěti-osý paralelní mikromanipulátor [20]

Ukázku tohoto mikromanipulátoru můžeme vidět na obrázku 2.8. Tento mikromanipulátor je pouze teoretický návrh nového přístupu k mikromanipulaci. Pro účely této práce byl využit základní princip funkce pohybu. Návrh s použitím stejného principu je vyobrazen na obrázku 2.9.



Obrázek 2.9 Náš návrh elektrického převodového mechanismu

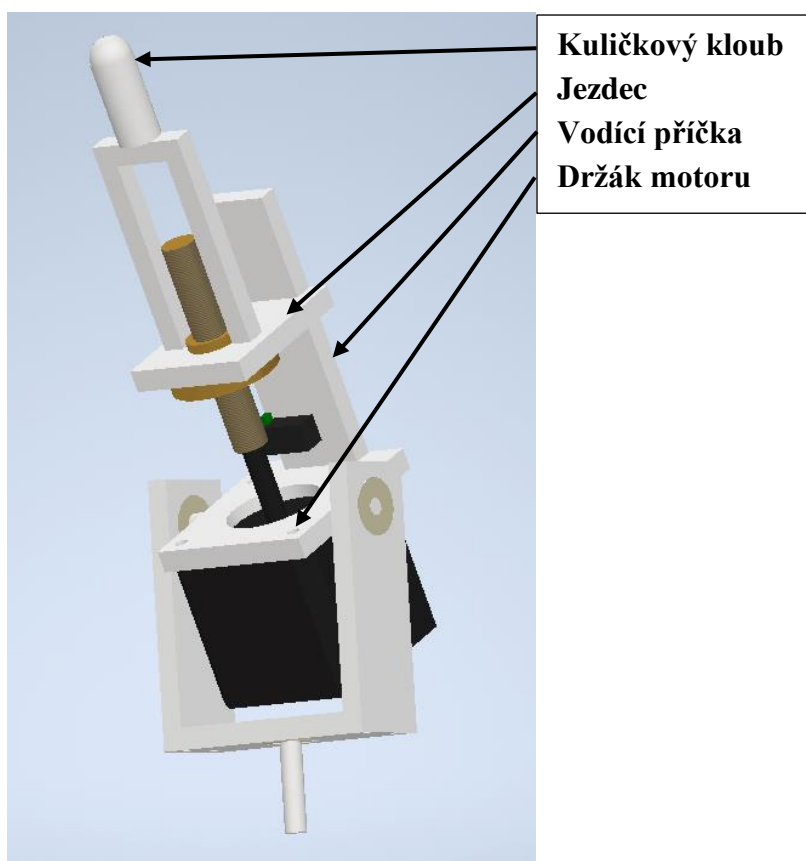
Způsob uchycení motorů byl ponechán stejný. Všechny motory se mohou volně natáčet okolo středu jejich umístění a také se mohou naklánět. K usnadnění jejich pohybu byly tyto klouby opatřeny kuličkovými ložisky. Jelikož původní návrh počítal se speciálními motory, které měly pohyblivou osu a která zároveň tvořila rotor motoru, bylo zapotřebí navrhnout vlastní řešení.

Existuje více způsobů, jak převést rotační pohyb motoru na lineární pohyb, nejčastěji používaným a nejjednodušším jsou trapézové závitové tyče. Složitější, dražší ale přesnější metodou jsou kuličkové tyče. Pro potřeby mikromanipulátoru plně postačovaly trapézové závitové tyče. [21]

Trapézové tyče se dělí podle dvou základních parametrů: průměr a stoupání závitu. Díky podobnosti konstrukce mikromanipulátoru ke konstrukcím 3D tiskáren budou použity trapézové tyče o rozměrech používaných v těchto aplikacích. Ve 3D tiskárnách se používají trapézové tyče s průměrem nejčastěji 8 mm. Stoupání bylo požadováno co nejmenší, jelikož bylo zapotřebí dosáhnout co nejmenšího pohybu mikromanipulátoru. Vybraná trapézová závitová tyč s matkami měla průměr 8 mm a stoupání 2 mm. [21]

Tato trapézová tyč byla uchycena k motoru pomocí speciální spojky určené pro tuto aplikaci ve 3D tiskárnách. Aby nedocházelo k otáčení matky společně s trapézovým šroubem, bylo zapotřebí ji mechanicky spojit se samotným motorem. Toho bylo dosaženo připojením vodící příčky k držáku motoru. Po této vodící příčce se pohybuje jezdec, ke kterému je přišroubovaná matka. Jezdec tak zabrání rotaci matky a rotační pohyb motorů je převeden na lineární pohyb. Pokud se bude vyskytovat přílišná vůle mezi trapézovou maticí a trapézovým šroubem, bude jezdec upraven tak aby tyto vůle omezil. K jezdcí byl připojen nástavec, na který byly umístěny kuličkové klouby. Tyto klouby posloužily k připojení ke společné platformě, která spojuje pohyb všech tří ramen. Popisovaný mechanismus je detailně vyobrazen na obrázku 2.10.

Mechanismus vyobrazený na obrázku 2.10 byl vyroben třikrát. Všechna tři ramena byla přimontována na společnou základnu tak, aby mezi sebou tvořily rovnostranný trojúhelník (vyobrazeno na obrázku 2.9). Všechna tři ramena byla připojena pomocí kuličkových kloubů k platformě. Touto platformou bude možné díky tomu pohybovat v pěti osách. K této platformě se poté připojil Pantografický mechanismus.

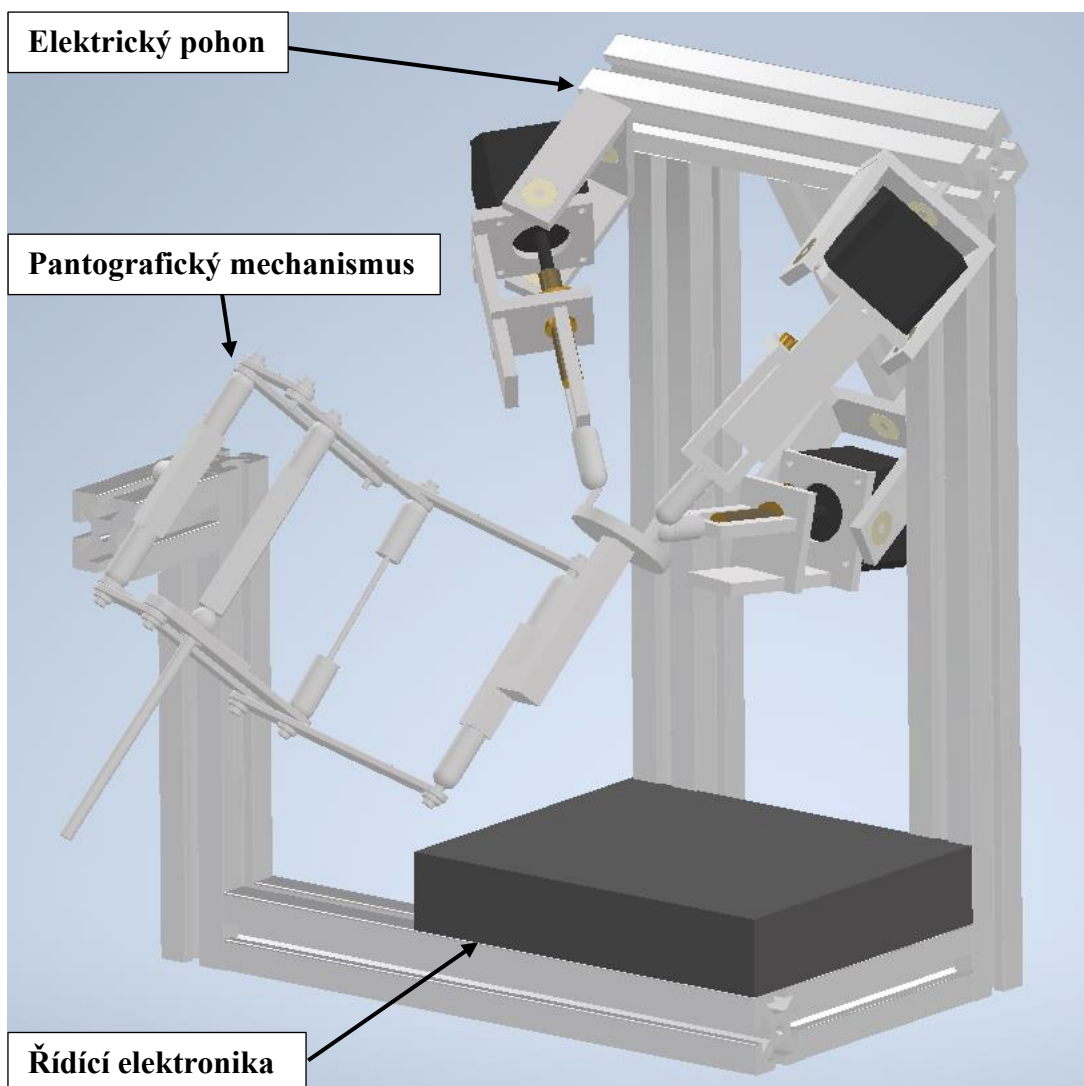


Obrázek 2.10 Detail návrhu motoru s trapézovým šroubem

2.3 Návrh výsledné konstrukce

Všechny mechanické komponenty byly navrženy. Tyto komponenty je třeba propojit dohromady. Pro jejich spojení budou využity hliníkové profily rozměru 30x30 mm. Tyto profily byly zvoleny, protože se s nimi dobře pracuje a jsou dostupné.

Existuje více způsobů, jak může být Pantografický mechanismus spojen s Elektrickým pohonem. Jejich spojení bylo navrženo z pohledu jejich vzájemné pozice. Elektrický pohon například může být umístěn přímo pod Pantografickým mechanismem. Tímto spojením by však byla omezena možnost pohybu nástroje v jedné ose, konkrétně by nebylo možné hrotem natáčet ve vodorovné rovině. Aby bylo umožněno využít a přenést celý rozsah pohybu motorů na nástroj, musí být Elektrický pohon umístěn paralelně k ramenům pantografu. Takové uspořádání je na obrázku 2.11.



Obrázek 2.11 Návrh výsledné konstrukce mikromanipulátoru

Elektrický převodový mechanismus byl umístěn na dva sloupy z hliníkových profilů kvůli stabilitě a omezení možnosti vzniku vůle v systému. Tento mechanismus byl nakloněn pod úhlem 33° za účelem dosažení lepší ergonomičnosti. Velikost tohoto úhlu může být posléze při konstrukci zařízení upravena, aby bylo dosaženo co nejoptimálnějšího naklonění.

Pantografický mechanismus byl upevněn také na hliníkové profily. Výsledná pozice jeho uchycení byla upravena a doladěna při samotné konstrukci. Výsledná napájecí a řídicí elektronika byla umístěna v základně zařízení, na obrázku 2.11 je vyobrazena jako tmavě šedý kvádr.

2.4 Návrh elektroniky

Návrh mechanické konstrukce mikromanipulátoru byl představen v předešlé kapitole. Dalším krokem je navrhnutí napájecí a řídicí elektroniky, kterou bude mikromanipulátor ovládán. Nejdříve budou vybrány motory, poté vhodné řídicí komponenty s motorovými drivery a zdroje napájení.

2.4.1 Výběr motorů

Motory budou vybrány podle velikosti jejich nejmenšího kroku, rozměrů a způsobu jejich řízení. Pro tuto aplikaci jsou vhodné pouze dva typy motorů, a to motory s převodovkami nebo krokové motory. Motory s převodovkami jsou složitější na používání, jelikož na rozdíl od krokových motorů potřebují zpětnou vazbu udávající jejich polohu. [22]

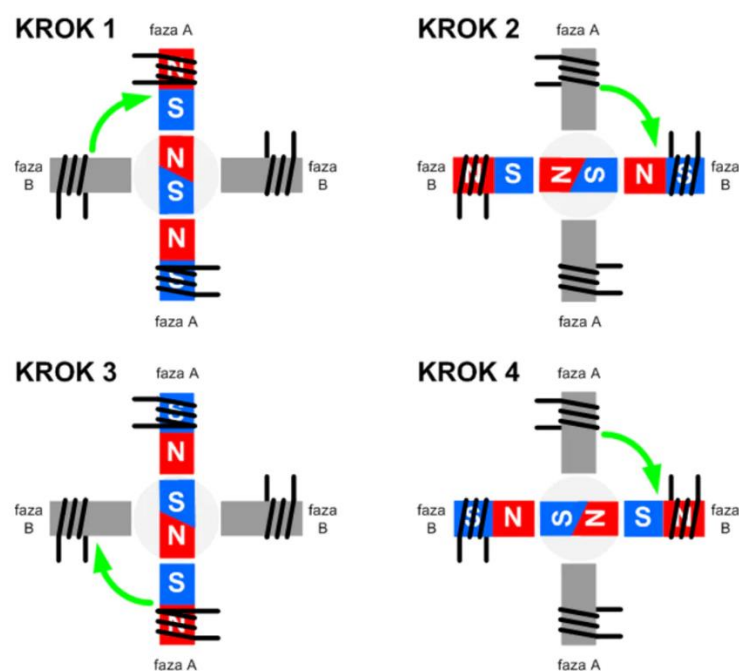
Oproti tomu krokové motory se pohybují po předem stanovených krocích. To znamená, že pro aplikaci krokových motorů jsou zapotřebí pouze koncové spínače umístěné na jednom konci rozsahu pohybu. Pomocí nich se provede kalibrace při každém zapnutí, kdy si mechanismus najde svoji aktuální polohu a dále už svůj pohyb počítá pomocí počtu vykonaných kroků motorů. [22]

Krokové motory jsou také schopny držet svoji pozici. Nevýhodou toho je však skutečnost, že neustále odebírají proud, i když se nepohybují. Krokové motory mají také horší poměr výkonu vůči hmotnosti. [22]

Vybrány byly krokové motory. Hlavním důvodem byla schopnost držení pozice, když se motor neotáčí a také jejich relativně nenáročné ovládání. Konkrétně byl vybrán krokový motor 17HS4401. Tento motor disponuje v porovnání s podobnými krokovými motory jiných výrobců vyšší silový moment otáčení, až 400 Nm. Krok tohoto motoru je $1,8^\circ$, což je standardně používaná hodnota. Tento krokový motor je dvoufázový a maximální proud jeho cívkami je 1,5 A. [23]

Vybraný krokový motor je bipolární, to znamená že v jednu chvíli jsou vždy aktivní pouze dvě cívky ze čtyř. Konstrukčně jsou uvnitř uspořádány tak, že protilehlé cívky jsou k sobě zapojeny sériově. Proto se v popisku uvádí, že motor je dvoufázový. Princip funkce bipolárních motorů je vyobrazen na obrázku 2.12. [22]

U bipolárních motorů lze ještě zmenšit velikost kroku, který motor provádí. Toho lze docílit tak, že cívky budou napájeny napětím, které bude střídat polaritu tak, aby udrželo rotor v mezi poloze mezi dvěma sousedními cívkami. Tomuto procesu se říká „mikrokrokování“ a může se tak dosáhnout dělení základního kroku až 256 krát. Při použití mikrokrokování roste přesnost, se kterou jsme schopni motorem pohybovat, dosahuje se také „hladkého“ otáčení rotoru. Snižuje se však rychlost výsledného pohybu. [22]



Obrázek 2.12 Princip funkce bipolárních krokových motorů [22]

2.4.2 Výběr řídicí elektroniky

Různých mikrokontrolerů a mikroprocesorů existuje velké množství. Pro vybranou aplikaci byly zvažovány dva nejznámější a nejrozšířenější představitelé, jeden mikrokontroler a jeden mikroprocesor. Za představitele mikrokontrolerů byl zvolen Arduino MEGA 2560 a za představitele mikroprocesorů byl vybrán Raspberry PI ZERO 2W.

Hlavním rozdílem mezi mikrokontrolerem a mikroprocesorem je, že mikrokontroler obecně obsahuje pouze procesor, paměť RAM, paměť ROM a případné obvody pro připojení k dalším zařízením. Oproti tomu mikroprocesor je v podstatě miniaturní počítač. To znamená, že má také procesor a paměť RAM. Navíc také může obsahovat grafické ovladače a podporu pro připojování zařízení pomocí standardu USB a HDMI. [24]

Konkrétně mikrokontrolery Arduino jsou specializovány na aplikace, které vyžadují velké množství digitálních i analogových vstupů a výstupů. Arduino nemá vlastní operační systém, přes počítač se do paměti ROM nahraje program a ten je poté vykonáván. Programování se provádí přes program Arduino IDE. Tento program zjednodušuje nahrávání programu do mikrokontroleru na stisk pouze jednoho tlačítka. Kód pro Arduino se píše v programovacím jazyce C++. [24]

Mikroprocesory Raspberry PI jsou konstruovány jako opravdové počítače, a proto jsou velmi univerzální. Mají konektory na připojení periférií pomocí rozhraní USB a HDMI, jsou vybaveny sloty pro SD karty a většina Raspberry PI desek je vybavena

možností pro připojení internetu pomocí Wi-Fi nebo ethernetového kabelu. Raspberry PI disponují vlastními operačními systémy. Díky tomu je možno vytvořit ovládací program v jakémkoliv programovacím jazyce. Pro programování Raspberry PI se nejvíce používá programovací jazyk Python. [24]

V tabulce 2.1 je vypsáno podrobné porovnání parametrů. Vybraná aplikace nebude potřebovat velké množství výstupních pinů. Matematický model pro vypočítání pohybů motorů bude však složitější. Díky tomu se Raspberry PI ZERO 2W jeví jako vhodnější varianta. V zadání práce je také požadavek na ovládání mikromanipulátoru pomocí PC nebo joysticku. Arduino je pro práci s počítačem zcela nevhodné, použití joysticku je možné, musí však být speciálně upraven. Oproti tomu Raspberry je miniaturní počítač samo o sobě a je vybaveno USB sběrnici, to umožňuje připojení jakéhokoliv ovládacího zařízení, které je touto sběrnici vybaveno. Nakonec byl vybrán mikroprocesor Raspberry PI ZERO 2W.

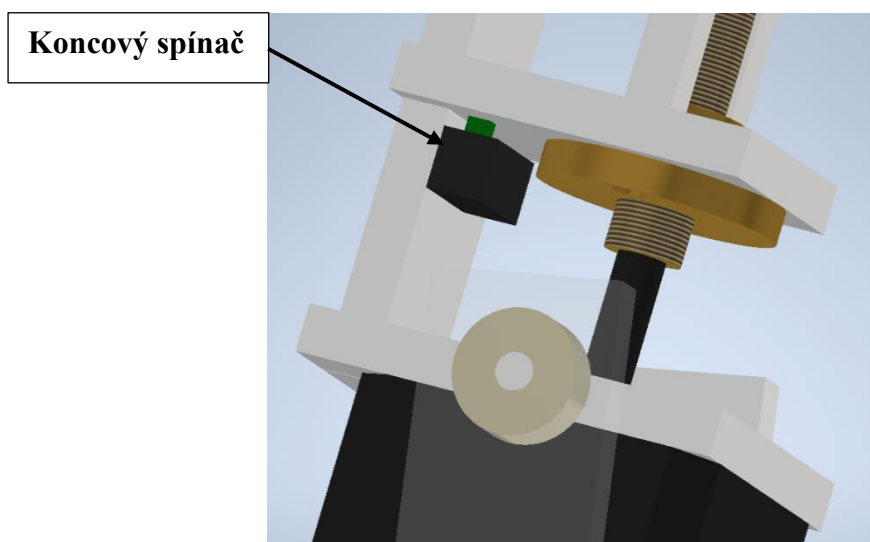
Tabulka 2.1 Porovnání parametrů mezi Arduino MEGA 2560 a Raspberry PI ZERO 2W [25, 26]

Parametr	Arduino MEGA 2560	Raspberry PI ZERO 2W
Frekvence CPU	16 MHz	4x 1 GHz
RAM	8 kB	512 MB
Paměť	256 kB FLASH 4 kB EEPROM	Slot pro SD kartu (maximálně 32 GB)
Vstupy/Výstupy	54 digitálních I/O pinů 14 analogových vstupů	40 GPIO (univerzální vstupní/výstupní pin)
Sběrnice	4x UART 3x SPI 1x I2C	1x UART 2x SPI 1x I2C
Napájecí napětí	6 - 20V, 5V přes USB	5V
Konektivita	USB pouze pro programování a napájení	USB HDMI Wi-Fi
Cena	898Kč	410Kč

Dalším krokem bylo vybrání vhodných driverů (řadičů) pro ovládání krokových motorů. Radiče krokových motorů se vybírají podle parametrů zvolených motorů, převážně podle proudu cívkami motoru. Zvolený motor 17HS4401 má maximální proud cívkami 1,5 A. Byl vybrán motorový řadič A4988. Maximální povolený proud procházející cívkami motoru řízeném tímto řadičem je 1 A bez chladiče a 2 A s chladičem. Napětí motoru může být až 32 V. Použitý motor bude napájen 12 V. Napájecí napětí řídicí elektroniky v řadiči je 5 V, což je stejná hodnota jako pro Raspberry PI ZERO 2W. Ke každému řadiči je zapotřebí zapojit kondenzátor pro pokrytí proudových špiček, které vznikají při zapínání cívek motorů.

Ovládání krokového motoru pomocí řadiče A4988 není nijak složité. Pro ovládání směru otáčení motoru je určen jeden pin, připojením tohoto pinu na logickou 1 nebo 0 měníme směr otáčení motoru. Samotná rotace motoru je zajištěna druhým pinem, každý impuls logické jedničky způsobí otočení krokového motoru o jeden krok v nastaveném směru. Pomocí dalších tří pinů se nastavuje mikrokrokování. Nastavování se provádí přiváděním logických 1 a 0, jejich binární kombinace určuje, jak velké mikrokrokování bude nastaveno. Například 0 = Plný krok (000), 2 = čtvrtinový krok (010). Řadič je také vybaven ochranou proti zkratu, přetížení a přehřátí. [27]

Spolu s řadičem budou ještě pro provoz krokových motorů potřeba koncové spínače. Koncové spínače jsou zapotřebí proto, aby bylo možné zkalibrovat celý mechanismus. Tyto koncové spínače budou přišroubovány na vodící příčku tak, aby byly stisknuty jezdcem, když bude dojíždět do své krajní polohy. Detail umístění koncových spínačů je na obrázku 2.13.



Obrázek 2.13 Detail umístění koncového spínače

2.4.3 Výběr zdrojů napájení

Navrhovaný mikromanipulátor bude potřebovat dvě úrovně napětí, 12 V pro napájení krokových motorů a 5 V pro řídicí elektroniku. Krokové motory potřebují každý maximálně 1,5 A. Vzhledem k tomu, že krokové motory odebírají proud, i když se neotáčejí, bude počítáno s nejhorší variantou, a to takovou, že všechny motory budou odebírat svůj maximální proud. Vybraný napájecí zdroj 12 V bude muset být schopný dodat minimálně 4,5 A.

Raspberry PI ZERO 2W má uvedený maximální proud 2,5 A. Tato uvedená hodnota je uvedena výrobcem z důvodu použití USB pro napájení. Reálný odběr Raspberry PI ZERO 2W je v klidovém stavu okolo 250 mA. Při zátěži se proud zvedá,

jeho hodnota závisí na počtu vytížených jader procesoru, zda je zapnutý HDMI konektor, WIFI a podobně. Návrh přepokládá, že odběr nepřevyšší 600 mA. Odběr motorových řadičů je podle jejich technického listu okolo 10 mA. [28]

Pro praktičnost bude navrhnout zdroj napájení tak, aby mikromanipulátor potřeboval pouze jeden zdroj napájecího napětí. Z tohoto úhlu pohledu je nejvýhodnější pořídit síťový zdroj pro 12 V, protože musí být schopen dodat vyšší proud. Pro získání 5 V z 12 V byl použit Step-Down DC-DC měnič. Síťový zdroj 12 V musí být schopen dodat 4,5 A pro krokové motory a dále díky použití DC-DC měniče musíme připočíst proud pro řídicí obvody. Těmto parametrům nejlépe vyhovuje zdroj 50959 QOLTEC. Tento zdroj může při 12 V dodat až 6 A. [29]

Výběr Step-Down DC-DC měniče byl výrazně ovlivněn nízkými skladovými zásobami těchto obvodů. Požadované parametry jsou vstupní napětí 12 V, výstupní napětí 5 V a výstupní proud 1 A. Těmto parametrům se nejvíce přiblížil zdroj OKY3502 1 OKYSTAR se vstupním napětím v rozsahu 2,5-40 V, výstupním napětím 1,25-35 V a výstupním proudem maximálně 2 A. [30]

3. KONSTRUKCE PANTOGRAFICKÉHO MIKROMANIPULÁTORU

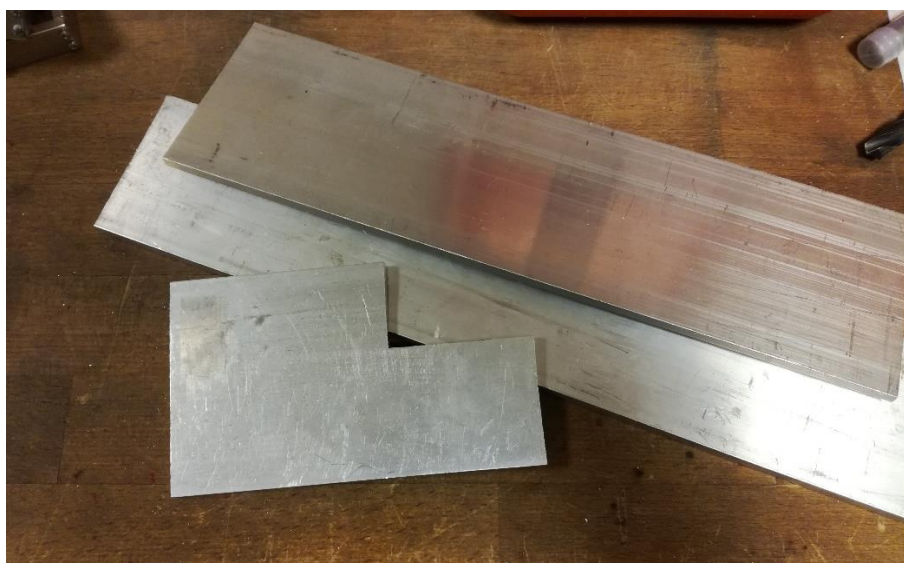
V této kapitole bude popsán postup samotné výroby pantografického mikromanipulátoru. Nejdříve bude vyroben pantografický mechanismus, poté bude vyroben elektronický převodový mechanismus. Dalším krokem bude výroba desky plošných spojů s řídicí elektronikou. Posledním krokem bude kompletace zařízení a tvorba programu pro řídicí elektroniku.

Výroba veškerých mechanických dílů proběhla v mechanické dílně ústavu Mikroelektroniky. Pro výrobu byly použity základní ruční nástroje jako jsou například posuvné měřítko, ruční pila, pilník, kladivo, šroubováky, kružítko a další. Většina použitých nástrojů je vyobrazena na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1 Ukázka použitých ručních nástrojů

Většina konstrukčních dílů byla vytvořena z hliníkových desek různých tlouštěk. Ukázka použitých materiálů je na obrázku 3.2. Při výrobě požadovaných dílů byly tyto desky vždy nařezány pomocí ruční pily na rozměry zhruba o 1 mm větší než požadované rozměry. Tyto rozměry byly posléze doladěny na požadované hodnoty pomocí frézy. Použitá fréza OPTIMUM Optimill BF20V je vyobrazena na obrázku 3.3. Fréza byla použita proto, že je možné dosáhnout výrazně přesnějších rozměrů. Dále je také možné dosáhnout vzájemné kolmosti jednotlivých povrchů.

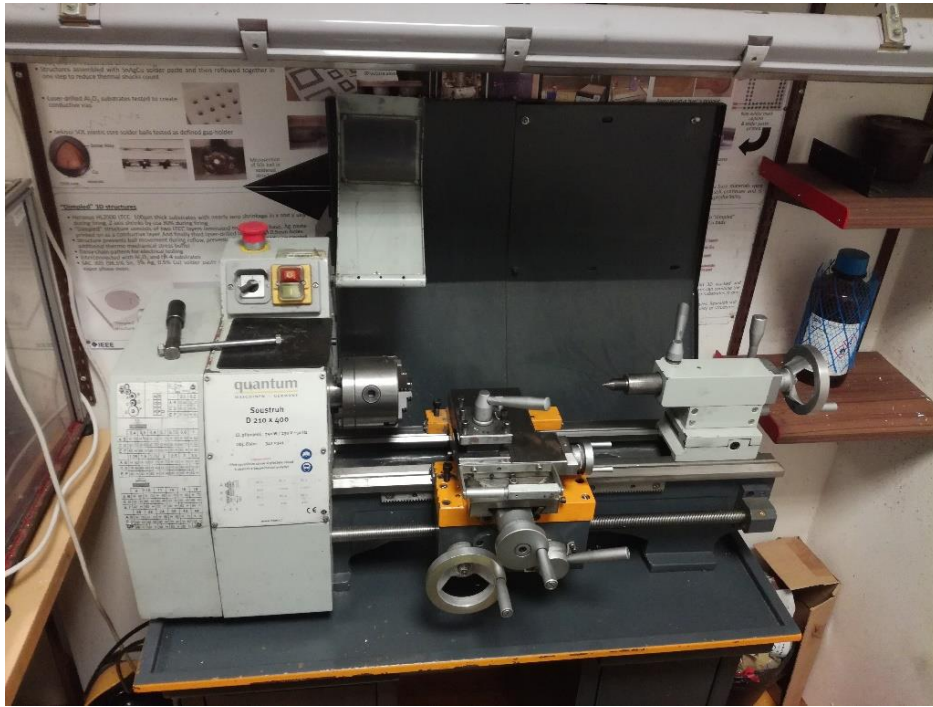


Obrázek 3.2 Ukázka použitých hliníkových desek



Obrázek 3.3 Fréza OPTIMUM Optimill BF20V

Výroba kulatých dílů byla provedena z hliníkové tyče pomocí soustruhu. Použitý soustruh Quantum D 210 x 400 je na obrázku 3.4. Pokosová pila Metabo KGS 305 M, vyobrazená na obrázku 3.5, byla použita k nařezání potřebných hliníkových profilů použitých k výrobě kostry mikromanipulátoru. Pokosová pila byla použita proto, že tyto profily měly příliš velké rozměry na to, aby bylo možné jejich hrany zahladit pomocí frézy.



Obrázek 3.4 Soustruh Quantum D 210 x 40



Obrázek 3.5 Pokosová pila Metabo KGS 305 M

3.1 Výroba pantografického mechanismu

Konstrukce jednotlivých základních pantografických mechanismů, které jsou posléze paralelně spojeny pomocí kuličkových ložisek pro přenos pohybu ve více osách, je principiálně velmi jednoduchá. Nejsložitější a zároveň také nejdůležitější částí jsou místa spojení jednotlivých ramen. Pro správnou funkci pantografického mechanismu, která zahrnuje velmi vysokou přesnost, je nutné tyto spoje vyrobit co nejpřesněji. Dalším důležitým komponentem jsou díly sloužící k uchycení pantografického mechanismu ke kostře zařízení a k elektrickému převodovému mechanismu.

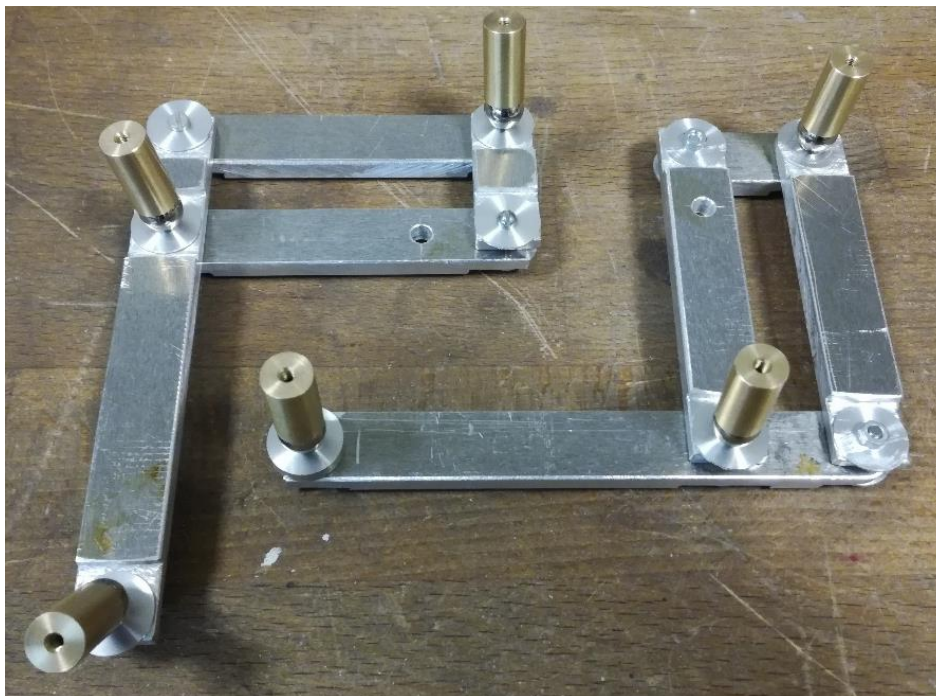
Všechna ramena byla vyrobena z hliníkové desky o tloušťce 6 mm. Tato deska byla nařezána na pásky o tloušťce 15 mm pomocí pokosové pily. Tyto pásky byly poté nařezány na délky ramen, které byly vypočteny z matematického modelu. V místech, kde budou ramena spojena byly vyvrtány díry o průměru 5 mm. Z důvodu omezené délky šroubu u magnetické kuličky kuličkového kloubu bylo nutné v místech spojení ztenčit ramena na tloušťku 4 mm.

Pro dosažení co nejmenší vůle v místech spojení ramen byly navrženy speciální vložky, které byly do spojů vloženy. Tyto vložky byly vytvořeny tak, aby jimi mohl procházet šroub a zároveň aby měly při vložení do spoje co nejmenší vůli s rameny. Toho bylo dosaženo tak, že byl průměr vložky nejdříve nahrubo pomocí soustruhu přiblížen k rozměru díry v ramenech. Poté byl však na přesnou hodnotu dostaven pomocí smirkového papíru. Z jedné strany byl také ponechán na vložce okraj, pomocí kterého byl spoj utažen. Na druhou stranu musela být obrobena podložka podobná okraji, aby bylo možné spoj utáhnout. Všechny styčné plochy byly poté vyhlazeny pomocí smirkového papíru, aby se minimalizovalo tření mezi jednotlivými díly. Díly byly také promazány vazelínou. Matky byly nakonec zajištěny pomocí lepidla na závity LOCTITE 243 aby nedocházelo k jejich povolování. Ukázka vyrobených vložek je na obrázku 3.6.



Obrázek 3.6 Ukázka vložky do kloubu ramen

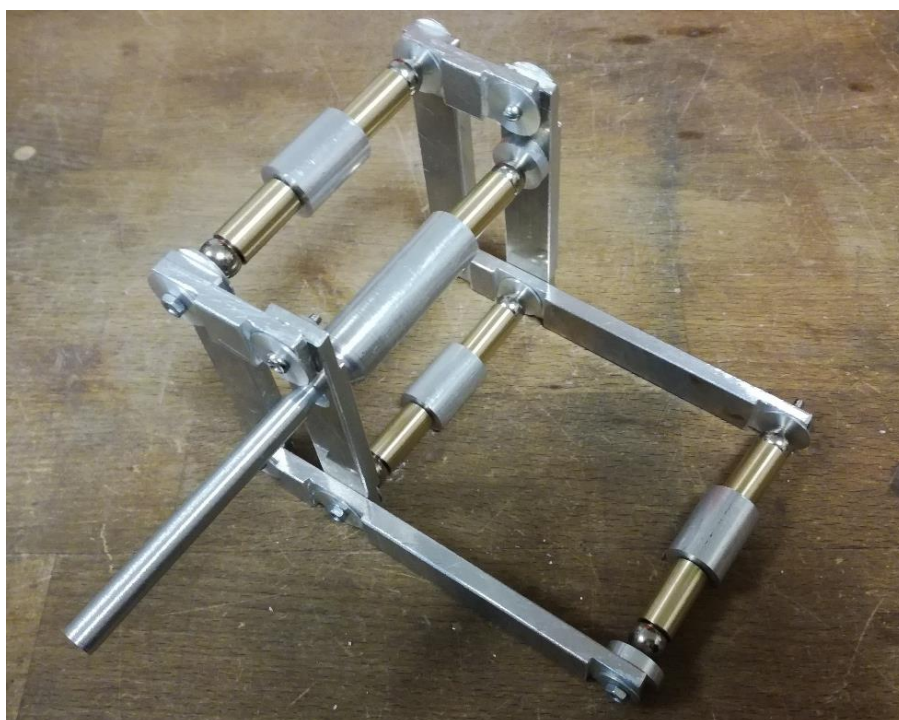
Tímto popsaným způsobem bylo vyrobeno všech osm ramen a také jedenáct vložek. Tyto ramena s vložkami byly poté složeny do dvou pantografických mechanismů. Vyrobené pantografické mechanismy jsou vyobrazeny na obrázku 3.7.



Obrázek 3.7 Ukázka vyrobených pantografických mechanismů

Pro vzájemné spojení těchto dvou pantografických mechanismů byly vyrobeny speciální spojky. Tyto spojky byly vyrobeny na soustruhu z hliníkové tyče se závity M3 na obou stranách pro našroubování magnetů z kuličkových kloubů. Pro zajištění správné funkce výstupu pantografického mechanismu bylo zapotřebí, aby byla výstupní spojka vytvořena z jednoho kusu materiálu a procházela skrz spodní ramena pantografického mechanismu. Proto nebylo v tomto případě možné použít magnetické kuličkové klouby. V místě spojení této výstupní spojky a spodního pantografického ramene byla na spojce vysoustružena polokoule. Pro tuto polokouli byla do pantografického ramene vytvořena odpovídající prohlubeň.

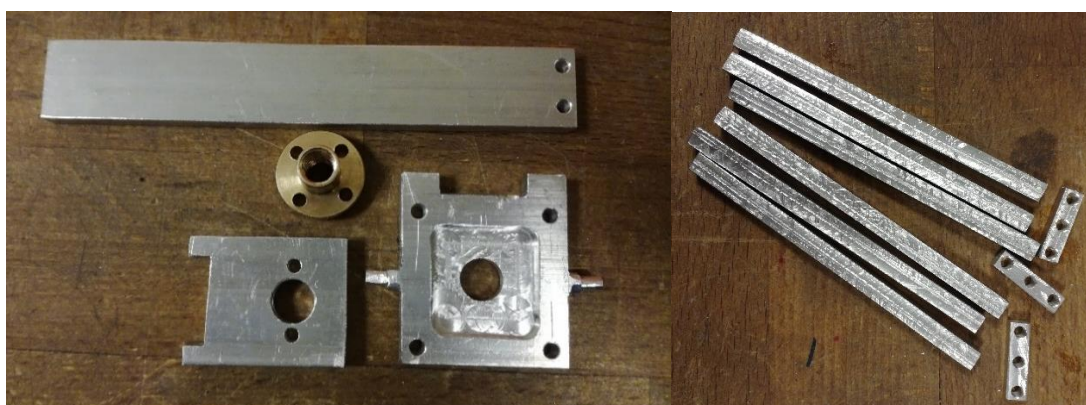
Pro přichycení pantografického mechanismu byly vytvořeny dvě speciální spojky, na kterých byly vyrobeny rovné plochy tak, aby bylo možné je přichytit k dalším dílům, které mají rovné plochy. Toto přichycení bylo provedeno vždy pomocí dvou šroubů proto, aby bylo možné tyto spoje správně utáhnout a zamezit tak nechtěné vůli, která by v nich mohla vznikat rotací okolo jednoho šroubu. Výroba spojek byla posledním krokem ve výrobě pantografického mechanismu. Zhotovený pantografický mechanismus je vyobrazen na obrázku 3.8.



Obrázek 3.8 Vyrobený pantografický mechanismus

3.2 Výroba elektrického převodového mechanismu

Elektronický převodový mechanismus byl také vyroben z hliníkových dílů obrobených na fréze. K výrobě těchto dílů byla převážně použita hliníková deska o tloušťce 6 mm. Jako první byly vyrobeny díly pro jednotlivá ramena, a to konkrétně držáky motorů, jezdců, vodící příčky a držáky na kuličková ložiska. Tyto díly jsou vyobrazeny na obrázku 3.9. Na obrázku 3.10 je poté vidět ukázka ramene složeného z těchto dílů.



Obrázek 3.9 Ukázka vyrobeného držáku motoru s jezdcem a vodící příčkou a držáky na kuličkový kloub



Obrázek 3.10 Ukázka částečně složeného ramene

Po sestavení však bylo zřejmé, že tento návrh nebude dostatečný, jelikož matice měla na trapézovém šroubu příliš velkou vůli a způsobovala nežádoucí vůli v mechanismu v řádů jednotek milimetrů. Proto bylo nutné upravit návrh jezdce. Jednou z možností bylo jej společně s vodící příčkou nahradit lineárním vedením. Volba lineárního vedení by umožnila zcela eliminovat vliv vůle mezi trapézovým šroubem a trapézovou maticí. Přesnost elektrického pohonu však není tak kritická, jelikož jeho pohyby budou dále čtyřikrát zmenšeny a malé vůle se tak v mechanismu ztratí. Lineární vedení jsou také výrazně dražší. Proto byl vyroben nový prototyp jezdce, který obsahoval vozíček jezdící po vodící příčce. Toto řešení je ukázáno na obrázku 3.11. Tento mechanismus je schopen dosáhnout velmi malé vůle v rameni, a proto byl zvolen.



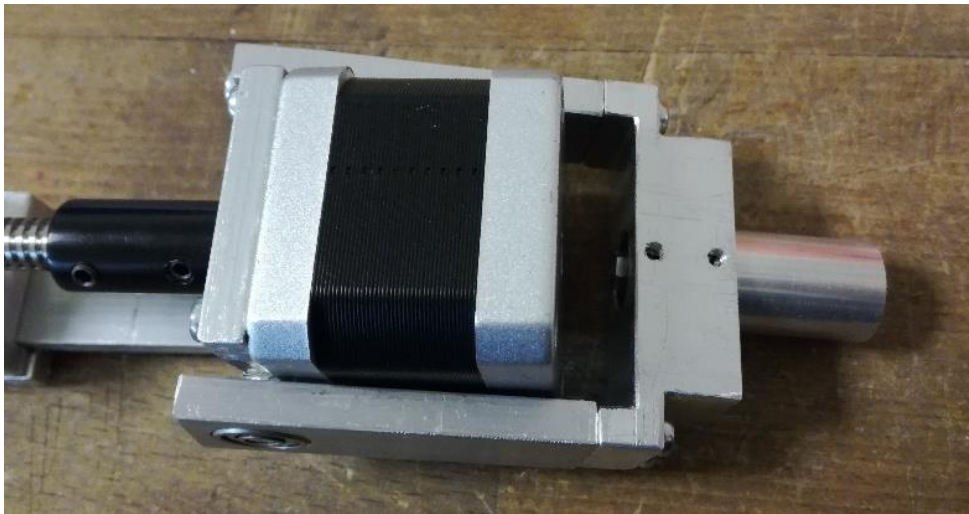
Obrázek 3.11 Ukázka ramene s novým jezdcem

Dalším krokem byla výroba otočného mechanismu pro motory. Tento mechanismus se skládal ze tří dílů a 3 kuličkových ložisek. Tento mechanismus je vyobrazen na obrázku 3.12. Výroba těchto držáků byla provedena ještě před dodáním objednaných krokových motorů. V návrhu bylo počítáno s tolerancí rozměrů krokových motorů ± 2 mm, která byla uvedena výrobcem. Při změření reálných rozměrů krokových motorů byla zjištěna nepřesnost 3 až 4 mm. Proto bylo nutné předělat jednotlivé díly držáku motorů. Vybraná ložiska měla také velkou vůli mezi jejich vnitřním a vnějším kruhem. Toto mělo za následek kývání celého ramene okolo středu jeho otáčení.



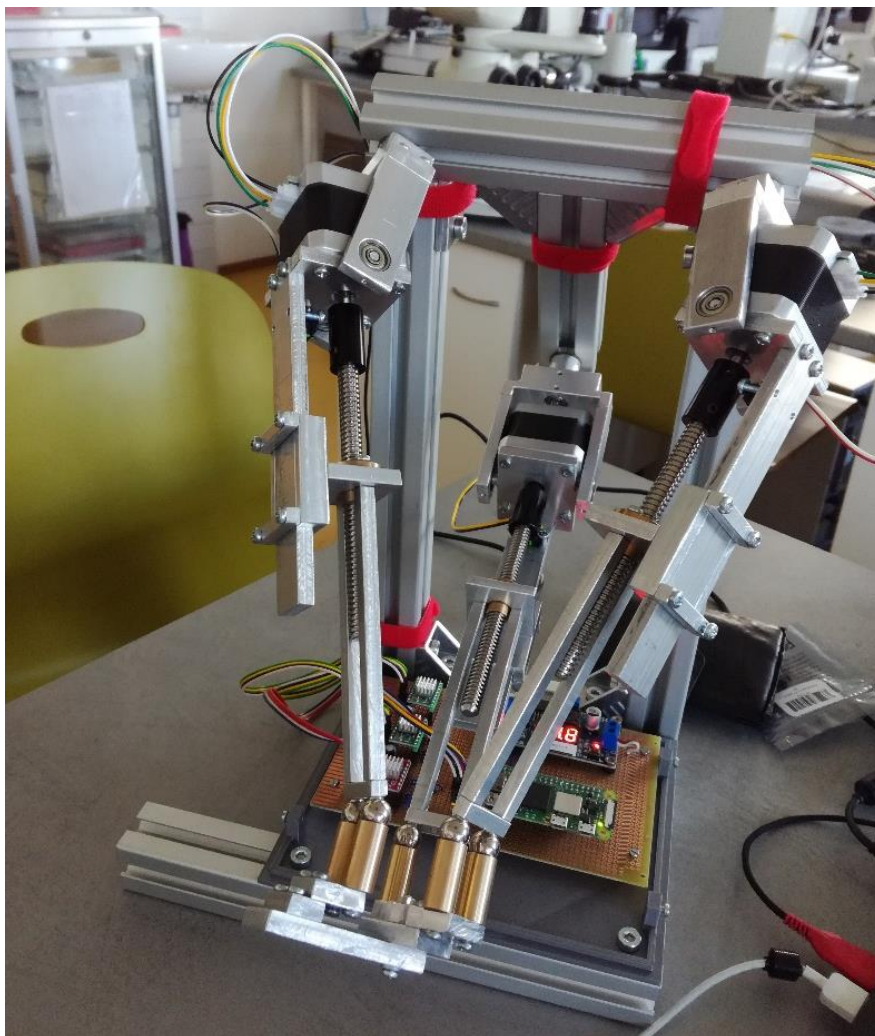
Obrázek 3.12 Ukázka ramene s otočným mechanismem

Problém s vůlí v ložiscích a rozměry motorů byl opraven změnou spodního dílu držáku motorů. Tento díl byl upraven tak aby byly pro každou osu rotace použity minimálně dvě ložiska. Takovéto umístění vystředí osu rotace mezi dva pevné body a tím zamezí nežádoucímu kývání ramene. Problém s rozměry motorů byl vyřešen zvětšením vzdálenosti mezi příčkami držící motor a do nového dílu byla vyfrézována drážka tak, aby byl umožněn volný pohyb motorů. Ukázka nového uchycení pro dvě ložiska je na obrázku 3.13.



Obrázek 3.13 Ukázka ramene s novou verzí otočného mechanismu

Následovalo sestavení elektrického pohonu. Ramena byla připevněna na základnu pomocí speciálně vytvořených spojek. Tyto spojky byly vytvořeny pomocí soustruhu. Na jedné straně se nacházely dvě ložiska, která se připevnila do základny otočného mechanismu a na druhé straně byl závit M6 pomocí kterého byly ramena přichycena k matkám určených do hliníkových profilů. Základna byla posléze připevněna k výsledné konstrukci kostry. Výroba kostry je popsána v další kapitole. Výsledný elektrický převodový mechanismus je vyobrazen na obrázku 3.14.



Obrázek 3.14 Ukázka sestaveného elektrického pohonu

Všechna tři ramena byla spojena dohromady k jedné pohyblivé platformě. Původní návrh platformy se ukázal jako velmi nevhodný a prakticky nepoužitelný. Proto jej bylo nutné poupravit tak, aby plnil svou funkci správně. Ramena jsou připojena pomocí dvou magnetických kuličkových kloubů, které omezují pohyb kloubu tak, aby se hýbal pouze v jedné ose. Při pohybu platformy rovnoběžně s deskou stolu, dochází k pootáčení ramen v jejich držácích u základny. Tento pohyb je nutné také umožnit v uchycení ramen k platformě. Proto jsou ramena spojena pomocí kuličkových ložisek. V tomto návrhu je pro každé rameno použito pouze jedno kuličkové ložisko. Toto místo by mohlo být ovlivněno vůlí v ložiskách samotných, při konstrukci však byly povrchy jednotlivých hliníkových součástek vyleštěny, namazány a přitlačeny k sobě. Toto do jisté míry kompenzuje vůli v ložiskách. Při měření přesnosti se tyto vůle neprojevovaly. Popisovaný mechanismus je na obrázku 3.15.



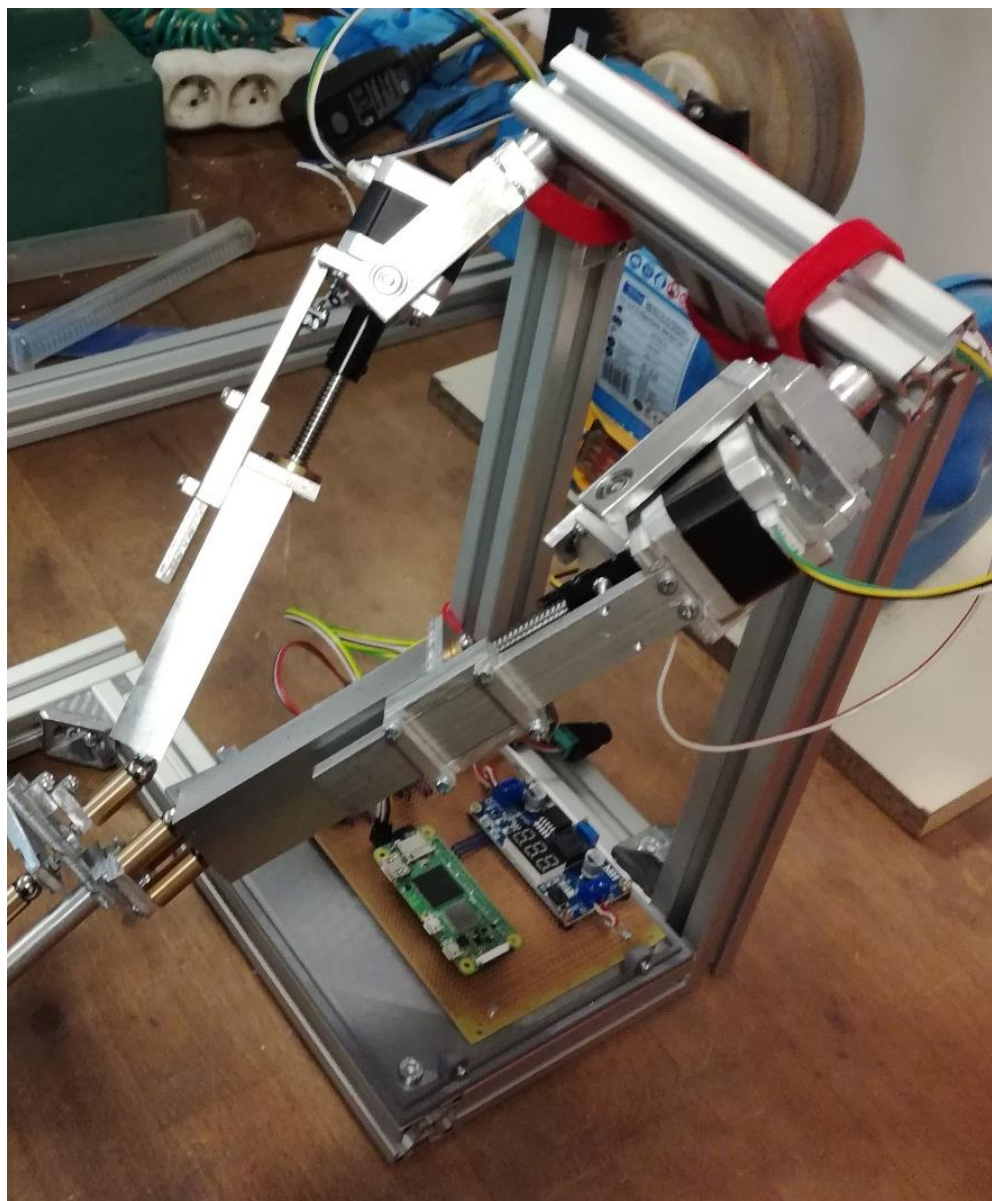
Obrázek 3.15 Ukázka vyrobené platformy pro spojení ramen

V této fázi již byly krokové motory propojeny s řídicí deskou a docházelo k testům matematického modelu mechanismu. Při testech se ukázalo, že mechanismus je schopen na sebe vyvinout takovou sílu při které docházelo ke zkrucování nástavce držícího kuličkové klouby. Popisovaný nástavec je vyobrazen na obrázku 3.15, konkrétně v horní části. Šrouby nebyly schopny zabránit rotaci jednotlivých dílů mezi sebou. Toto se negativně projevovalo na výslednou přesnost mechanismu a docházelo také k vyskakování magnetických kuličkových kloubů ze svých uložení. Proto byl tento nástavec nahrazen kusem vyrobeným z jednoho kusu hliníku. Ukázka nového vyztuženého nástavce je na obrázku 3.16.



Obrázek 3.16 Ukázka vyztuženého nástavce

Toto byla poslední úprava v rámci výroby elektrického převodového mechanismu. Jeho výsledná konstrukce je vyobrazena na obrázku 3.17.

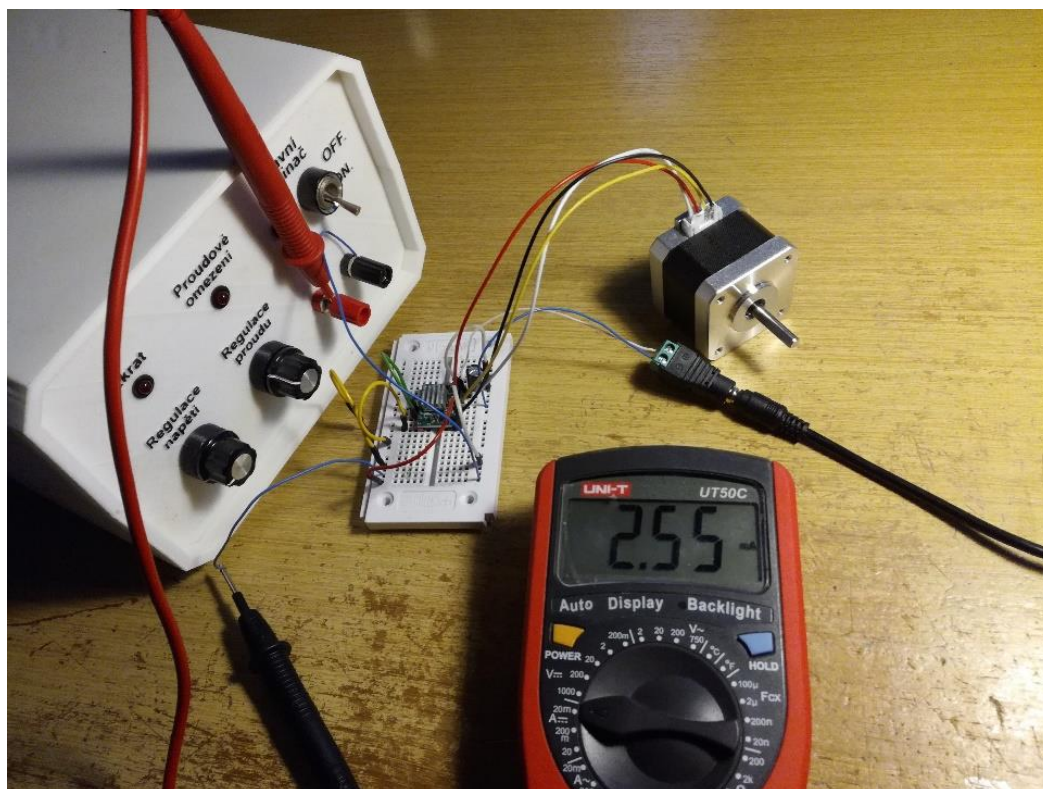


Obrázek 3.17 Ukázka výsledné konstrukce elektrického převodového mechanismu

3.3 Výroba řídicí desky plošných spojů

Před tím, než bylo možné navrhnout schéma zapojení řídicí desky, bylo nutné ověřit, zda bude možné napájet řídicí elektroniku motorových driverů ze stabilizátoru napětí 3,3 V umístěném v Raspberry PI ZERO. Toto bylo nutné z toho důvodu že výstupy z Raspberry PI využívají právě 3,3 V logiku. Stabilizátor v Raspberry PI je schopen dodat až 50 mA. Výrobce motorových driverů udává v technickém listu odběr 10 mA. Reálná hodnota

odběru při velikosti napájecího napětí 3,3 V byl zhruba 2.5 mA. Zároveň s měřením průměrného odběru proudu byl u řadičů motorů nastaven maximální proud motory při nejvyšším zatížení na 1,5 A. Na obrázku 3.18 je ukázka měření a nastavování proudů. Výsledkem měření bylo, že na vnitřní 3,3 V stabilizátor Raspberry PI ZERO můžeme provozovat všechny tři motorové drivery A4899.



Obrázek 3.18 Měření odběru proudu motorových driverů

Schéma zapojení řídicí desky plošných spojů bylo vytvořeno v programu EAGLE 9.6.2. Toto schéma je vyobrazeno na obrázku 3.19. V pravé horní části se nachází konektor pro napájecí zdroj s DC-DC měničem OKY3502. V pravém dolním rohu se nacházejí motorové drivery A4988 s konektory pro cívky jednotlivých motorů. V levé dolní části se nachází Raspberry PI ZERO a v levé horní části jsou konektory a pull-down rezistory pro koncové spínače.

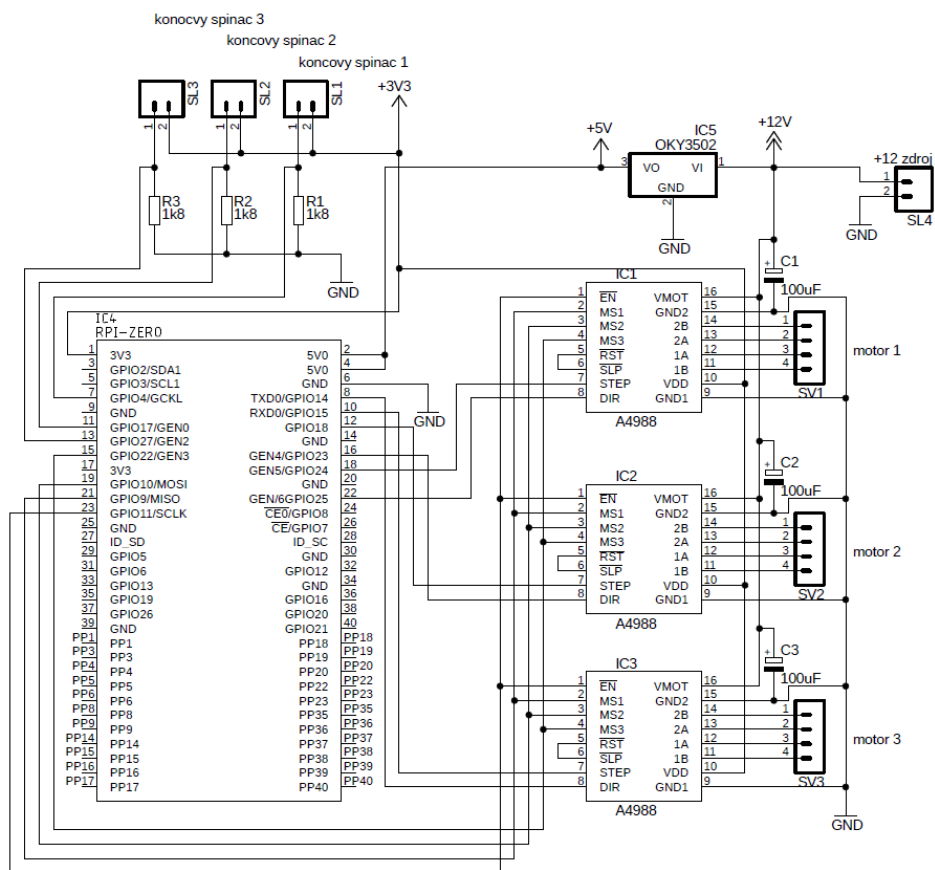
Pro zapojení koncových spínačů bylo využito zapojení s pull-down rezistory, které v případě rozpojení spínače přivedou na digitální vstup logickou nulu. Tím se tak zamezí ovlivňování těchto vstupů náhodnými jevy, které by mohly vyvolat nežádoucí falešné sepnutí spínačů. Při sepnutí spínačů se poté na pull-down rezistor připojí napájecí napětí, které se tak dostane i do digitálního vstupu. Toto napětí vyvolá průchod proudu, a proto je nutné zvolit dostatečně vysokou hodnotu rezistoru, aby obvodem neprotékal zbytečně příliš velký proud. Zvolena byla hodnota 1,8 k Ω . Tato hodnota vybudí při přiložení napájecího napětí 3,3 V proud 1,8 mA. Tento proud je dostatečně nízký,

aby nezpůsobil zbytečný odběr energie a zároveň také omezí zákmity vzniklé při sepnutí koncového spínače. Případné další zákmity, které nebyly odstraněny pomocí rezistoru, budou potlačeny v rámci řídicího programu.

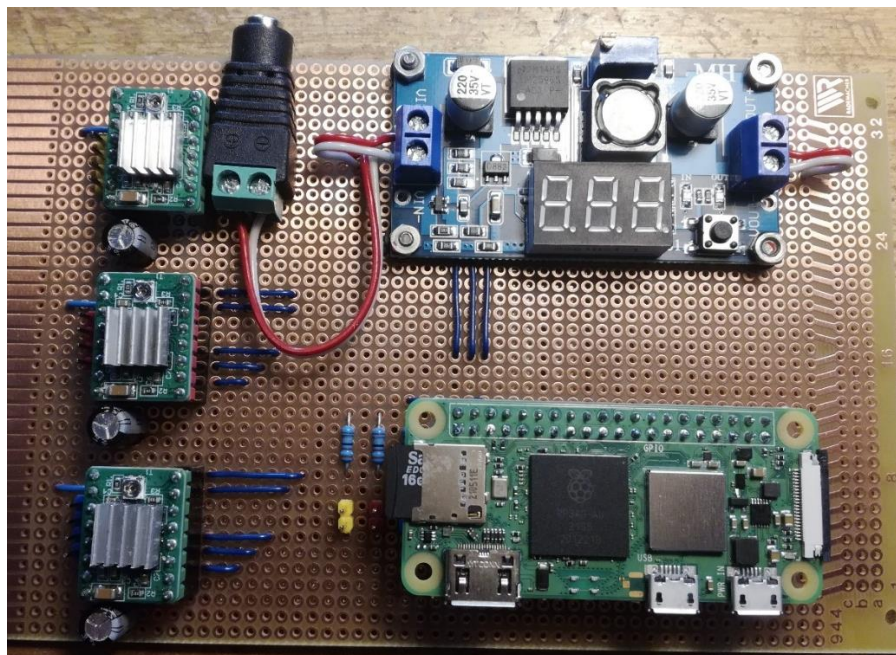
Řadiče krokových motorů jsou ovládány přes řídicí desku Raspberry PI pomocí digitálních výstupů. Každý řadič má vyvedené dva výstupy pro řízení směru otáček motoru a také počtu kroků. Další čtyři digitální výstupy jsou společné pro všechny motorové řadiče. Pomocí tří z nich je prováděno nastavování velikosti mikrokrokování motorů. Poslední vývod slouží pro zapojení funkce ENABLE. Tato funkce umožňuje vypnout a zapnout všechny motory najednou.

Každý motorový řadič potřebuje vlastní elektrolytický kondenzátor pro pokrytí nárazových odběrů krokových motorů. Hodnota těchto elektrolytických kondenzátorů byla zvolena vyšší, než je požadovaná hodnota výrobce řadičů. Výrobce doporučuje použití minimální hodnoty 10 μF . Námi zvolené kondenzátory mají hodnotu 100 μF . Vytvořené schéma je také přiloženo v příloze B ve formátu .sch. Toto je formát souborů programu EAGLE.

Podle schématu na obrázku 3.19 byla posléze vytvořena řídicí deska na univerzální desce plošných spojů. Komponenty na ní byly uspořádány tak, aby bylo co nejvíce usnadněno pozdější natahování vodičů, a zároveň, aby byl minimalizován počet propojek na desce plošných spojů. Například DC-DC měnič byl umístěn na okraj desky plošných spojů poblíž místa, kde bude umístěn konektor pro zdroj napájení. Řídicí deska Raspberry PI ZERO byla umístěna co nejvíce doprostřed desky plošných spojů, aby bylo umožněno připojení všech potřebných GPIO konektorů. Zároveň ale byla umístěna tak, aby její vstupní konektory pro sběrnici USB byly umístěny na okraji desky plošných spojů. Pro připojení vodičů od jednotlivých motorů a koncových spínačů byly použity pinové lišty. Pro zlepšení přehlednosti o tom, který motorový řadič ovládá, který motor a tomu odpovídající koncový spínač, jsou tyto pinové lišty barevně označeny. Hotová řídicí deska plošných spojů je na obrázku 3.20.



Obrázek 3.19 Schéma zapojení řídicí desky plošných spojů



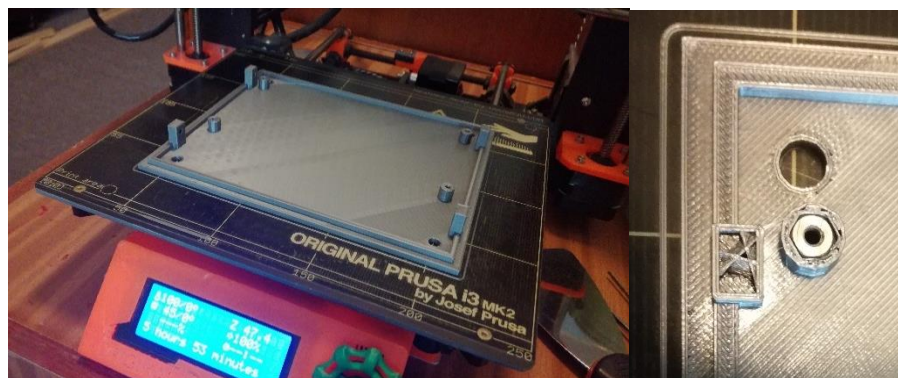
Obrázek 3.20 Řídicí deska plošných spojů

3.4 Kompletace zařízení

Kostra mikromanipulátoru byla vytvořena z hliníkových profilů 30x30 mm, které byly nařezány pomocí pokosové pily. Tyto profily byly spojeny dohromady pomocí standardních šroubů a matic do drážek hliníkových profilů za pomoci 90° úhelníků. Kostra byla konstruována tak, aby poskytovala stabilní základnu pro výsledné zařízení. Podstava byla vytvořena ve tvaru čtverce s rozměry 180x180 mm. Do tohoto prostoru byla umístěna řídicí deska plošných spojů. Ve dvou rozích podstavy byly umístěny věže vysoké 300 mm pro přichycení elektrického převodového mechanismu.

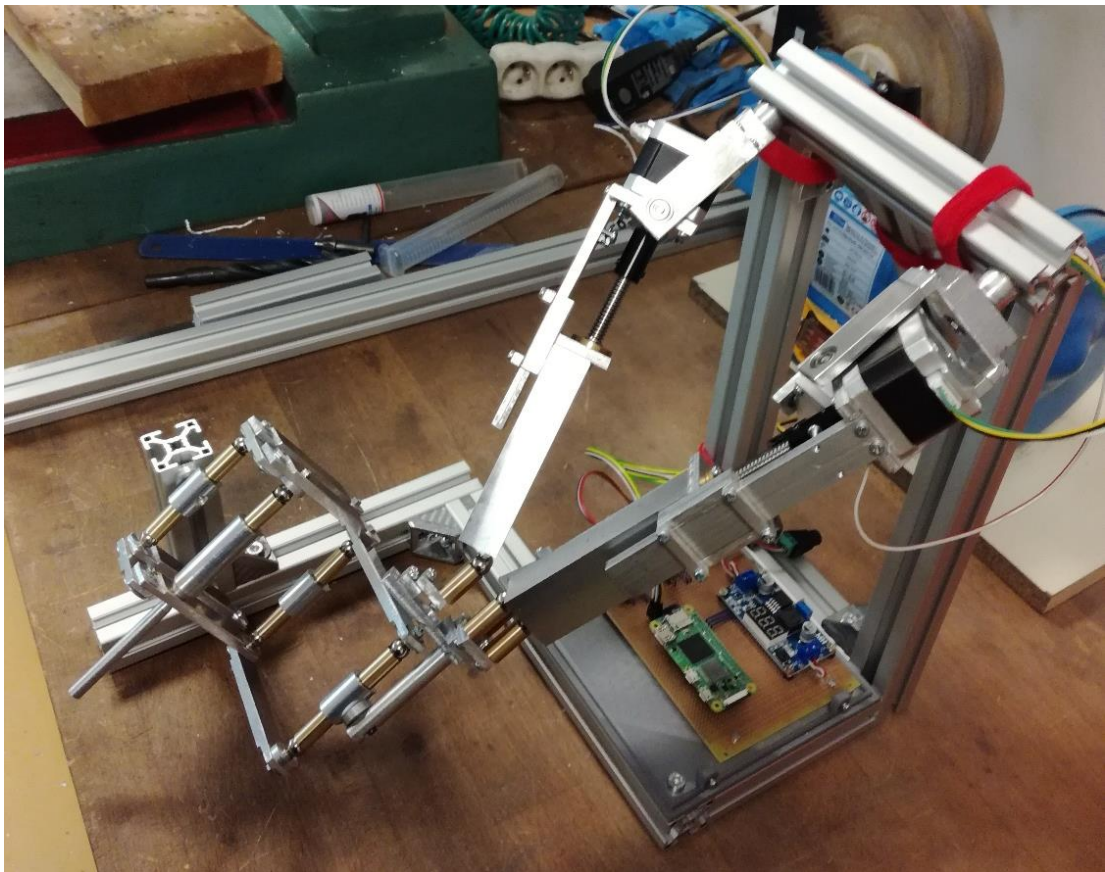
Elektrický převodový mechanismus byl k věžím připevněn pomocí spojek z hliníkových profilů, které byly uříznuty pod úhlem 33° na pokosové pile. Základna je se spojkami propojena pomocí šroubů, pro které byly do spojek vyvrtány otvory. Tyto spojky jsou následně připevněny k věžím pomocí spojovacích destiček.

Pro připevnění řídicí desky plošných spojů k podstavě byla vytvořena krabička. Tato krabička byla vyrobena na 3D tiskárně Průša i3 MK2. Pro usnadnění výroby byla tato krabička rozdělena na dno a víčko. Dno bylo navrženo tak aby jej bylo možno připevnit k podstavě pomocí čtyř šroubů M6. Pro připevnění desky plošných spojů do dna byly do dna zatištěny matice M3. Stejně matice byly umístěny také pro připevnění víčka. Vložení matic bylo provedeno tak, že v modelu byla pro ně připravena odpovídající štěrbina. Při následném tisku na 3D tiskárně byl tisk ve vhodný okamžik pozastaven. Při tomto pozastavení byly vloženy matice do připravených štěrbin. Následně byl tisk obnoven a tím došlo k zatištění matic do dílu. Ukázka tohoto procesu je vyobrazena na obrázku 3.21 společně s hotovým dnem.



Obrázek 3.21 Ukázka procesu vkládání matic a hotového dna krabičky pro desku plošných spojů

Pro uchycení pantografického mechanismu bylo ze základny vyvedeno rameno z hliníkových profilů. Rozměry tohoto ramene byly doladěny podle rozměrů pantografického mechanismu. Výsledná konstrukce je vyobrazena na obrázku 3.22.



Obrázek 3.22 Výsledná konstrukce mikromanipulátoru

3.5 Tvorba programu pro řídicí elektroniku

Řídicí program pro Raspberry PI ZERO byl vytvořen v programovacím jazyce Python. Program byl vytvořen tak, aby bylo možné mikromanipulátor ovládat pomocí různých periférií disponujícími rozhraním USB. Pro toto použití existuje v jazyce Python knihovna nazvaná Pygame. Tato knihovna napomáhá přenášet do programu informace o stiscích kláves a pohybech joysticků. Výsledné řídicí programy jsou přiloženy v příloze C. Všechny názvy funkcí, které jsou v této kapitole uvedeny odpovídají funkcím v kódu.

Požadavek je takový, aby obsluha ovládala pohyb v rovině rovnoběžné s deskou stolu. Proto byl program vytvořen na základním principu toho, že pomocí ovladačů pohybujeme bodem v kartézských souřadnicích. Osy x a y jsou uloženy rovnoběžně s deskou stolu a osa z je umístěna kolmo k nim. Jelikož je celý mechanismus nakloněný pod úhlem 33° , je nutné tyto souřadnice přepočítat do identického kartézského systému, který je oproti původnímu o tento úhel pootočen. Tento přepočet je důležitý proto, aby bylo možné z pohybu správně vypočítat délky jednotlivých ramen a tím i počty otáček motorů. Nová nakloněná soustava je tedy vztažena ke středu mezi jednotlivými

rameny elektrického pohonu. I když je tento přepočítání principiálně velmi jednoduchý, prakticky tvoří nejrozměrnější část kódu.

Z takto vzniklých souřadnic jsou dále určeny vzdálenosti mezi pohyblivou platformou a středy jednotlivých ramen. Z těchto vzdáleností se poté pomocí znalosti výšky určí délky ramen. Délky ramen se poté přepočítají na počty otáček motorů a ty jsou poté motory vykonány.

3.5.1 Převod informací z ovládacích prvků

Pro převod informací z ovládacích prvků do programu je použita knihovna pygame určená pro Raspberry PI. Tato knihovna umožňuje zpracovávat informace ze všech běžných druhů periférií. Program je vytvořený tak, aby umožňoval ovládání jak pomocí klávesnice, tak i joysticku.

Při stisku klávesy na klávesnici se tato událost zaznamená pomocí funkce `pygame.event.get()`. Z této funkce se poté vyčte, jaká klávesa byla stisknuta. Tato klávesa se poté porovnává přes jednu funkci `elif` s různými nastavenými možnostmi a pokud byla stisknuta nadefinovaná klávesa dojde k vykonání její funkce. Tímto způsobem však lze zaznamenávat stisk pouze jedné klávesy najednou. Pro pohyb v osách x , y a z byla vytvořena globální hodnota kroku, která se přičítá k hodnotě osy, pokud je stisknuta odpovídající klávesa na klávesnici. Při podržení klávesy dochází k opětovnému přičítání hodnoty při každém průběhu programu.

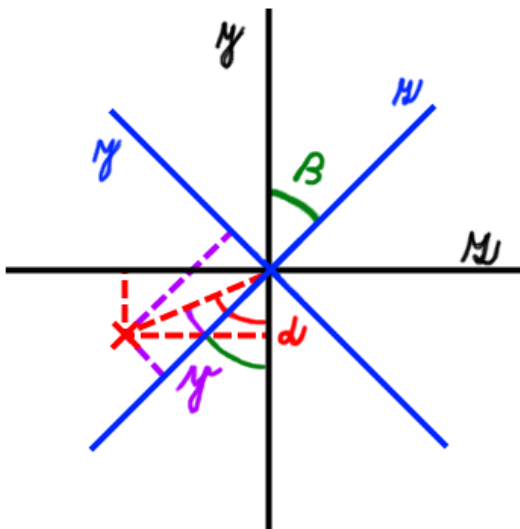
Joysticky fungují obdobně. U nich je však možné zaznamenat stisk všech ovládacích prvků najednou. Změna stavu joysticku se zaznamenává pomocí stejného příkazu `pygame.event.get()`. U joysticků dochází k zaznamenávání tlačítek a pohyblivých os zvlášť. Pomocí cyklů `for` jsou tyto hodnoty postupně vyčteny a uloženy do odpovídajících proměnných. Jednotlivé osy joysticků mívají střední hodnotu v 0. Pohyb do jedné strany se poté projevuje jako kladný nárůst hodnoty až k hodnotě 1 a pohyb opačným směrem naopak způsobuje pokles hodnoty směrem k -1. Intervaly od 0 do 1 nebo -1 byly vždy rozděleny na třetiny. První třetina přidává do výpočtu polohy bodu poloviční hodnotu velikosti kroku. Druhá třetina přidává celou hodnotu kroku a třetí třetina přidává dvojnásobnou hodnotu kroku. Takto je dosaženo možnosti, jak zpomalovat, tak i zrychlovat pohyb podle toho, jak moc bude osa joysticku vychýlena.

Použití knihovny `pygame` umožňuje připojení jakéhokoliv ovládacího prvku. Preferovanou připojovací sběrnici je sběrnice USB. Raspberry PI ZERO však disponuje i konektivitou na síť WIFI a Bluetooth. Při připojení nové klávesnice není v programu třeba nic měnit, jelikož všechny klávesnice se chovají stejně podle zavedeného standardu. Připojení nového joysticku může být obdobně bezproblémové. Může však dojít k nevhodné konfiguraci os nebo tlačítek. Navíc pokud bude připojen ovladač s větším počtem tlačítek je nutné těmto tlačítkům v programu přiřadit funkci.

3.5.2 Přepočítání souřadnic z vodorovné do nakloněné soustavy

Tento přepočítání je proveden pomocí čtyř výpočtů za pomoci pythagorovy a kosinovy věty a je vestavěn do hlavní výpočetní funkce mathematics, která se volá při každém průběhu programu. Princip tohoto přepočítání je vyobrazen na obrázku 3.23.

Černá soustava souřadnic odpovídá vstupním souřadnicím, které jsou rovnoběžné s deskou stolu. Modrá soustava souřadnic odpovídá naklonění elektrického pohonu. Úhel β je tedy 33° . Obě soustavy se sestávají z os y a z . Osu x není nutno přepočítávat, jelikož se její hodnoty s náklonem nijak nemění. Vstupními informacemi jsou souřadnice červeného bodu, na obrázku jsou označeny červenými čerchovanými čarami. Nejprve je proveden výpočet vzdálenosti bodu od středu souřadnic pomocí pythagorovy věty. Tato vzdálenost tedy odpovídá přeponě pravoúhlého trojúhelníku. Dále se postup výpočtu rozdělí podle pozice bodu do 4 kvadrantů. V každém kvadrantu se totiž následně vypočtené úhly vztahují k jiným osám. Následně je určena hodnota úhlu mezi přeponou a osou z . Tato přepona je vyznačena v grafu čerchovanou červenou čarou a spojuje bod se středem souřadnic. Vypočtený úhel je úhel β . Od tohoto úhlu se následně odečte hodnota úhlu α . Výsledek označíme jako γ . Zde se opět kód větví podle toho, zda je úhel γ kladný nebo záporný. Toto rozdělení je provedeno, jelikož by záporná hodnota úhlu tvořila problém v matematické funkci. Znaménko úhlu také zároveň určuje, zda bude výsledná hodnota výpočtu jedné osy záporná nebo kladná. Ze znalosti úhlu γ můžeme dopočítat všechny ostatní úhly v pomyslném novém pravoúhlém trojúhelníku. V nákresu jsou strany tohoto trojúhelníku vyobrazeny fialově. Pomocí vzdálenosti od středu je poté dopočtena pomocí kosinovy věty nová hodnota jedné odvěsny. Druhá odvěsna je dopočítána pomocí pythagorovy věty. Délky odvěsen se poté přiřadí se správným znaménkem jako souřadnice bodu v natočené soustavě.



Obrázek 3.23 Princip přepočítání souřadnic mezi dvěma soustavami

3.5.3 Přepočítání souřadnic na délky ramen elektrického pohonu

Díky rozmístění jednotlivých ramen elektrického převodového mechanismu do rovnostranného trojúhelníku je možné provést tento výpočet pouze pomocí dvou pythagorových vět. Nejdříve se vypočte vzdálenost vzdušnou čarou mezi bodem a jednotlivými rameny. Tento výpočet probíhá v osách x a y . Od souřadnic jednotlivých ramen jsou odečteny souřadnice bodu. Z těchto vzdáleností se poté pomocí pythagorovy věty vypočte přepona pravoúhlého trojúhelníku. Druhým krokem je poté započítání výšky. Výška se vypočítá ze znalosti minimální vzdálenosti mezi základnou motorů a pohyblivou platformou. Tato vzdálenost je odvozena z nejmenších rozměrů ramen. K této vzdálenosti se přičtou hodnoty osy z . Za pomoci vzdálenosti bodu od ramene s výškou určíme pomocí další pythagorovy věty požadovanou délku ramen. Tento proces je také součástí funkce `mathematics`.

3.5.4 Přepočítání délky ramen na počet kroků

Prvním krokem je zjištění velikosti jednoho kroku, tedy vzdálenost, o kterou se změní délka ramene při provedení jednoho kroku krokového motoru. Tato vzdálenost je závislá na velikosti zvoleného mikrokrokování. Druh mikrokrokování určuje počet kroků na otáčku. Základní krok motorů je 200 kroků na otáčku. Při použití nejjemnějšího mikrokrokování se dostaneme až na 3200 kroků na otáčku. Trapézová matice se posune za jednu otáčku o dva milimetry. Tuto délku podělíme počtem kroků a dostaneme velikost kroku.

K výpočtu počtu požadovaných kroků již stačí od požadovaného rozměru ramene odečíst jeho délku v jeho nejkratší pozici. Podělením této nově vzniklé hodnoty velikostí jednoho kroku dostaneme požadovaný počet kroků krokových motorů. Jelikož můžeme vykonávat pouze celé kroky, je nutné tento podíl provést jako celočíselné dělení. Tento proces je zapracován do funkce s názvem `length_to_rotation`. V této funkci se také nacházejí virtuální koncové spínače, které zabraňují vyjetí trapézových matic z trapézových šroubů. Také se zde nacházejí limity, které zamezují tomu, aby se ramena dostaly do polohy, kdy by došlo k vyskočení kuličkových magnetických kloubů.

3.5.5 Ostatní

Program také obsahuje funkce, které slouží například pro kalibraci, kdy se všechny motory otáčejí, dokud nenarazí na koncové spínače. Dále je možnost měnit velikost mikrokrokování libovolně za provozu mikromanipulátoru. Další funkcí je možnost vypnutí a zapnutí krokových motorů. Při vypnutí motorů může dojít k jejich samovolnému pohybu, a proto je doporučeno vždy po jejich opětovném zapnutí provést kalibraci. Poslední funkcí je možnost mechanického odpojení pantografického mechanismu od elektrického pohonu, kdy se elektrický pohon odsune stranou, aby bylo možné pantografický mechanismus ovládat přímo rukou operátora.

3.6 Testování přesnosti pohybu

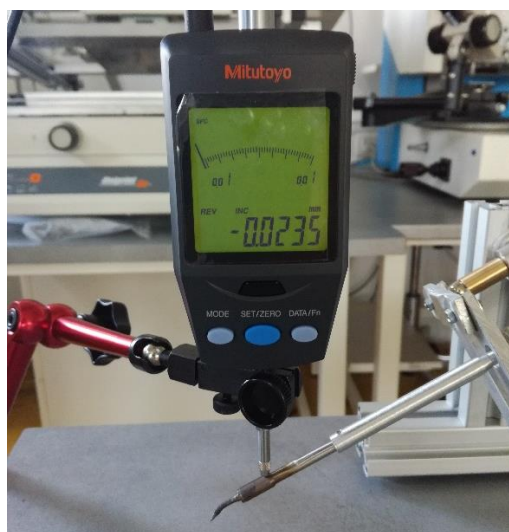
Přesnost pohybu je jedním z hlavních kritérií, podle kterých můžeme určit, zda námi vyrobený mikromanipulátor je vhodný pro opravy desek plošných spojů. Nejdříve bude provedeno určení velikosti teoretické přesnosti, které by byl mechanismus schopen dosáhnout, pokud by byl vyroben naprosto přesně a s nulovými vůlemi. Poté bude prakticky určena reálná přesnost vyrobeného mikromanipulátoru.

Teoretická přesnost se dá jednoduše vypočítat. Budeme počítat pouze ten nejpřesnější případ, přesnost je velmi ovlivněna velikostí mikrokrokování. Pokud je vypnuté mikrokrokování, tak má krokový motor 200 kroků na jednu otáčku. Pokud zapneme mikrokrokování 16krát bude jedné otáčky odpovídat 3200 kroků. Matice se pohne na trapézové tyči při jedné otáčky o 2 mm. Tento pohyb je dále ještě 4krát zmenšen pantografickým mechanismem. Popisovaný výpočet vypadá takto

$$A = \left(\frac{2}{3200}\right) / 4 = 0,000156mm = 156nm, \quad (3.1)$$

kde A je velikost minimálního kroku, který by byl teoreticky schopen mikromanipulátor vykonat. Můžeme vidět, že teoretická přesnost mechanismu výrazně převyšuje očekávání. To však nijak nevádí, jelikož reálná přesnost mechanismu je výrazně nižší kvůli nepřesnostem vzniklých ve výrobě a vůlím mezi jednotlivými součástkami.

Reálná přesnost mikromanipulátoru byla ověřena pomocí digitálního úchylkoměru Mitutoyo ID-H0530. Tento úchylkoměr umožňuje měření pohybu v řádu mikrometrů. Minimální zaznamatelný krok tohoto přístroje je $0,5 \mu m$. Na obrázku 3.24 je zobrazen princip jakým bylo měření mikromanipulátoru provedeno. Úchylkoměr byl vždy umístěn v ose pohybu, který byl měřen.



Obrázek 3.24 Ukázka měření přesnosti mikromanipulátoru

Měření bylo provedeno pro všechny čtyři stupně mikrokrokování. Při měření se ukázalo, že zmenšení pantografického mechanismu není zcela stejné ve všech osách. Osa pohybu x vykazuje mírně menší zmenšení pohybu než osy y a z. To je pravděpodobně způsobeno nakloněním elektrického pohonu. Osy y a z mají potom složitější princip přenosu jejich pohybu přes pantografický mechanismus. Toto měření bylo provedeno při pohybu hrotu bez zátěže, hrot se tedy pouze pohyboval v prostoru a jeho pohybu nebyl kladen žádný odpor.

Reálné hodnoty jsou vždy porovnány teoretickými hodnotami vypočtenými pomocí vztahu (3.1). Při prvním stupni mikrokrokování byla teoretická přesnost vypočítána jako $1,25 \mu\text{m}$. U osy x byla změřena velikost minimálního pohybu $2 \mu\text{m}$. Pro osy y a z byla změřena hodnota $1,5\text{-}2 \mu\text{m}$. Přesnou hodnotu nebylo možno změřit kvůli malé přesnosti měřícího zařízení.

Pro druhý stupeň mikrokrokování byla teoretická hodnota $0,6 \mu\text{m}$. Reálný interval hodnot byl stejný pro všechny osy a to $0,5\text{-}1 \mu\text{m}$. Pro zbylé dva stupně nebylo možné velikost jejich minimálního kroku změřit. Toto bylo opět způsobeno malou přesností měřícího zařízení.

I když nebylo provedeno měření přesnosti všech stupňů mikrokrokování, tak bylo zjištěno, že již při druhém stupni dosahuje vyrobený mikromanipulátor požadované přesnosti nutné k opravám desek plošných spojů. Tato přesnost se navíc shoduje s přesností běžně dostupných mikromanipulátorů. Přesnost při nejvyšším stupni mikrokrokování by teoreticky mohla odpovídat i velmi přesným a finančně náročným mikromanipulátorům. Tuto přesnost však nemůžeme potvrdit ani vyvrátit, protože nedisponujeme dostatečně přesnými měřícími zařízeními.

Při zatížení pohybu dojde k většímu projevení vůlí v mechanismu. Tyto vůle se projevují tak, že mechanismus „dosedává“ na plochu desky plošných spojů. Síla přítlaku se při dosedávání pozvolna zvedá. Toto dosedávání by mohlo být nežádoucí v běžných aplikacích ve kterých se mikromanipulátory používají. Při opravách desek plošných spojů může být však toto dosedávání i přínosem. Umožňuje totiž pozvolna měnit jakou silou působí mikromanipulátor na výrobek. Některé výrobky mohou být například velmi křehké a aplikace příliš velké síly by vedla k jejich zlomení.

Obdobný proces k procesu dosedávání se projevuje při změně pohybu mikromanipulátoru. Nejprve dojde k sesednutí vůlí v mechanismu a až poté se začne pohybovat hrot mikromanipulátoru. Tato funkce může být opět žádoucí i nežádoucí.

3.7 Návod k použití

Mikromanipulátor byl navržen tak, aby byla jeho obsluha co nejjednodušší. Zapnutí přístroje se provádí připojením napájecího 12 V zdroje napájení k zařízení a poté do sítě. Mikroprocesor provede inicializaci. Po inicializaci se automaticky spustí kalibrace, která zkalibruje elektrický pohybový mechanismus a přesune ho do základní pozice. Po provedení kalibrace je již možno mikromanipulátor volně ovládat pomocí připojených periférií. V současné době je program uzpůsoben pro ovládání pomocí klávesnice a joysticku. Postup zapnutí a může být shrnut následovně:

1. Připojení ovládacího prvku pomocí USB (klávesnice, joystick),
2. Připojení síťového zdroje napájení k mikromanipulátoru (kulatý konektor ze zadní strany zařízení),
3. Připojení síťového zdroje napájení do sítě,
4. Vyčkání na inicializaci a kalibraci mikromanipulátoru,
5. Ovládání mikromanipulátoru pomocí připojeného ovladače.

Při použití klávesnice se samotný pohyb mikromanipulátoru ovládá pomocí kláves „w“ a „s“ v ose x, „a“ a „d“ v ose y a „q“ a „e“ v ose z. Dále je možné pomocí alfanumerických kláves „1“ až „5“ ovládat velikost nastaveného mikrokrokování. Klávesa „1“ odpovídá plnému kroku a klávesa „5“ odpovídá nejvyššímu stupni mikrokrokování. Pomocí klávesy „h“ se zopakuje průběh počáteční kalibrace a mikromanipulátor se přesune do základní pozice. Klávesy „n“ a „m“ je možno použít pro zapnutí a vypnutí motorů. Tato funkce je vhodná pro testování, kdy je zapotřebí volně hýbat s motory. Po opětovném zapnutí je však nutné opět provést kalibraci pomocí klávesy „h“ jelikož by matematický model nebyl schopen správně vypočítat pohyb mikromanipulátoru. Poslední funkcí je stisk klávesy „esc“ který ukončí program. Knihovna pygame bohužel neumožňuje načítat stisk více kláves na jednou. Při stisku více kláves se tak zaznamená ta, která má nejmenší číslo přiřazené v ovladači klávesnice.

Joystick je v základu naprogramován tak, aby jeho osy odpovídaly osám mikromanipulátoru x, y a z v pořadí, jakém jsou vedeny v ovladači joysticku. Obdobně je tak provedeno s nastavením tlačítek joysticku. Program umožňuje ovládat obdobné parametry jako klávesnice. Mezi ně patří velikost nastaveného mikrokrokování, kalibrace, zapnutí a vypnutí motorů. Každý joystick má jinak řazené pořadí os a tlačítek, a proto je pro vhodné provést namapování os a tlačítek joysticku k jednotlivým funkcím speciálně pro každý joystick. Tento proces je popsán v následujících odstavcích. Knihovna pygame umožňuje zaznamenávat stisk více tlačítek i pohyb více os najednou a díky tomu je možné pohybovat mikromanipulátor ve více osách na jednou.

Pokud operátor chce změnit nějakou hodnotu v programu, nebo namapovat nový joystick, musí k mikroprocesoru připojit klávesnici a monitor. Monitor je možné připojit pouze pomocí HDMI. Poté musí být zařízení zapnuto a musí proběhnout počáteční kalibrace. Po kalibraci je možné ukončit program pomocí klávesy „esc“ a tím dojde

ke spuštění grafického rozhraní mikroprocesoru. Na ploše se nacházejí dva podstatné soubory a to Program aktualni.py a JoystickTest.py. Pro otevření, úpravu, kompilaci a spuštění těchto souborů je doporučeno použít program Geany. Program aktualni.py obsahuje aktuální verzi programu. Tento soubor však není ten, který se spouští při zapnutí mikroprocesoru. Ten se nachází v adresáři „pi“ a je pojmenován Program.py. Je velmi důležité, aby veškeré změny provedené v souboru Program.py byly odzkoušeny a nezpůsobovaly žádné chyby. Pokud by došlo k chybě v programu při inicializaci mikroprocesoru, mohlo by dojít k zaseknutí inicializace a zařízení by přestalo správně pracovat. Takovýto stav by mohl poté být vyřešen pouze pomocí smazání souboru Program.py z SD karty pomocí jiného zařízení. Pro odzkoušení změn se na ploše vyskytuje Program aktualni.py.

Na začátku kódu se nacházejí dvě proměnné, pomocí kterých je možno doladovat funkci mikromanipulátoru. Proměnná increment_size odpovídá velikosti jednoho kroku. Tento krok se přičte vždy při průběhu programu, pokud je stisknuta některá klávesa na klávesnici, nebo se přičte jeho násobek podle velikosti vychýlení osy joysticku. Další proměnnou je motor_wait_time, který odpovídá časovému intervalu impulsů udávající krok pro řadiče krokových motorů. Čím nižší je nastavená hodnota, tím vyšší je rychlost pohybu a naopak. Touto proměnou je tak možno měnit rychlost pohybu mikromanipulátoru. Pokud však bude tato hodnota nastavena nižší než 0,7 ms může docházet k přeskokování kroků, jelikož je řadiče nebudou schopny včas zaregistrovat a vykonat. To se tak projeví nadměrným vrčením motorů a nebudou se otáčet.

Pro namapování joysticku je nutné nejprve zjistit, jak jsou jednotlivé osy a tlačítka označeny. Pro tento účel je na ploše umístěn program JoystickTest.py. Po spuštění tohoto programu se objeví tabulka, ve které jsou vypsány aktuální hodnoty os a tlačítek na joysticku. Pohybem os a stiskem tlačítek se určí jaké číslo odpovídá které ose a tlačítku. Tyto hodnoty se poté přepíší v hlavním programu v sekci označené komentářem „deklarace a nastavení joysticku“.

Nastavení os joysticku se provede ve for cyklu s podmínkou range(axis) který obsahuje tři if podmínky. Nastavené hodnoty proměnné „i“ v těchto podmínkách odpovídají číslům os joysticku. Změna jejich přiřazení se provádí změněním čísla v podmínce na požadovanou hodnotu. Otočení směru pohybu osy se provádí pomocí přidání znaménka při přiřazování hodnot.

Nastavení tlačítek joysticku se provádí obdobně ve for cyklu s podmínkou range(buttons). Přiřazování se opět provádí pomocí proměnné „i“ v if podmínkách. Hodnota proměnné opět odpovídá číslům zjištěným z programu joystickTest.py.

Celý kód je opatřen komentáři vysvětlujícími jeho funkci. Hodnoty ostatních proměnných se nedoporučuje měnit, jelikož jejich změna ovlivňuje výsledky výpočtů matematického modelu. Pokud by však chování matematického modelu neodpovídalo chování pro určité nastavce, je možné změnou těchto proměnných chování modelu doladit.

4. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo nastudovat problematiku mikromanipulátorů, následně navrhnout mikromanipulátor s pantografickým převodem, a nakonec tento pantografický mikromanipulátor zkonstruovat. Požadavkem bylo, aby byl mikromanipulátor uzpůsoben pro opravy desek plošných spojů a umožňoval ovládání pomocí joysticků nebo počítače.

V teoretickém rozboru byly uvedeny používané principy, jakými je možné vytvořit mikromanipulátor. Probírány byly převodové mechanismy a ovládací rozhraní. Navržený mikromanipulátor využívá mechanického pantografického převodového mechanismu s elektrickým pohonem.

Nejprve byl navržen pantografický mechanismus. Jeho rozměry byly stanoveny pomocí matematického modelu pantografu v programu Microsoft Excel. Pro dosažení přenosu vícesměrného pohybu byly přidány dva pantografy paralelně na sebe. Tyto pantografy byly spojeny pomocí kuličkových ložisek. Další část se zabírala návrhem elektrického pohonu, který je složen ze tří identických ramen. Každé rameno je vybaveno vlastním krokovým motorem a může se libovolně otáčet a naklánět.

Navržený pantografický mechanismus byl společně s elektrickým převodovým mechanismem vyroben z hliníkových dílů. K výrobě těchto dílů byla použita fréza a soustruh z mechanické dílny na ústavu Mikroelektroniky. Při výrobě bylo značné množství dílů upraveno oproti původnímu návrhu tak, aby byla zajištěna funkčnost a zároveň byla co nejvíce zlepšena přesnost mechanismu.

Pro řízení mikromanipulátoru byla vybrána řídicí deska je Raspberry PI ZERO 2W. Pro ovládání motorů byly vybrány motorové řadiče A4988. Pro napájení celého zařízení ze sítě byl vybrán 12 V zdroj 50959 QOLTEC a DC-DC měnič OKY3502 1 OKYSTAR. Tyto prvky byly mezi sebou propojeny pomocí univerzální desky plošných spojů.

Přesnost vyrobeného pantografického mikromanipulátoru byla určena pomocí digitálního úchylkoměru. Bylo zjištěno že jsme schopni dosáhnout větší přesnosti, než bylo rozlišení měřicího přístroje a to 0,5 μm . Rychlost pohybu mikromanipulátoru může být libovolně upravována podle potřeby. Síla pohybu je omezena silou magnetických kuličkových kloubů. Toto do jisté míry omezuje sílu motorů. Na druhou stranu však mechanismus získal bezpečnostní funkci, kdy magnetické kuličkové klouby povolí dříve, než by mohlo dojít k poškození zařízení.

Vyrobený pantografický mikromanipulátor představuje výrazně levnější alternativu ke komerčně dostupným mikromanipulátorům, jejichž ceny se pohybují od 150 000 Kč. Jeho parametry se dokážou zcela vyrovnat levnějším komerčně dostupným mikromanipulátorům. Cena použitých materiálů byla zhruba 4500 Kč. Samotná výroba však byla velmi časově náročná.

LITERATURA

- [1] SMITH, Caitlin. *Guide to Micromanipulators*. LabCompare [online]. [cit. 2021-11-08]. Dostupné z: <https://www.labcompare.com/10-Featured-Articles/125207-Guide-to-Micromanipulators/>
- [2] *Mikromanipulace s buňkami - principy, možnosti a technické vybavení*. *OrganoNET* [online]. Masarykova Univerzita, , 21 [cit. 2021-11-08]. Dostupné z: http://organonet.med.muni.cz/media/62511/vy_05.pdf,
- [3] ROBERT BARER, ROBERT a A. E. SAUNDERS-SINGER. *A New Single-control Micromanipulator*. In: *Journal of Cell Science* [online]. s. 10 [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: <https://journals.biologists.com/jcs/article/s3-89/8/439/63950/A-New-Single-Control-Micromanipulator>
- [4] *Manual Micromanipulator*. World Precision Instruments [online]. [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: <https://www.wpiinc.com/var-3093-manual-micromanipulator>
- [5] *Enlarging and Reducing Sculpture 3D Pantograph*. Keropiansculpture [online]. [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: http://www.keropiansculpture.com/enlarging_machine.html
- [6] *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, Svazek 13. In: *Knihy Google* [online]. s. 626 [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=paBbAAAACAAJ&q=Account+of+the+Invention+of+the+pantograph+and+a+description+of+the+eidograph,+a+copying+instrument+invented+by+William+Wallace&pg=PA418&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- [7] *Pantograph in Case by Cary of London*. National Museum of American History [online]. [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: https://americanhistory.si.edu/collections/search/object/nmah_904626
- [8] *The Pantograph in Context*. Circuitousroot [online]. [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: <https://www.circuitousroot.com/artifice/letters/press/typemaking/making-matrices/pantograph-in-context/index.html#note-01>
- [9] *MICROMANIPULATION: MK1 MANIPULATOR*. SINGER instruments [online]. [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: <https://www.singerinstruments.com/solution/mk1/>
- [10] BARER, Rober a A. E. SAUNDERS-SINGER. *A low-power micromanipulator and microdissector* [online]. 1950, 17.8., , 4 [cit. 2021-11-09]. Dostupné z: <http://www.singerinstruments.net/singerinstruments/images/stories/Mk1/a%20low-power%20micromanipulator%20and%20microdissector.pdf>
- [11] *Leica Mechanical Micromanipulator*. Bairesac [online]. [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: <https://www.bairesac.com/uploads/microscopios/leica-mech-micromanipulator.pdf>
- [12] *Trio 3-Axis Micromanipulator*. World Precision Instruments [online]. [cit. 2021-11-09]. Dostupné z: <https://www.wpiinc.com/var-8302-trio-3-axis-micromanipulator>

- [26] *Raspberry Pi Zero 2 W*. RPishop [online]. [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://rpishop.cz/zero/4311-raspberry-pi-zero-2-w-5056561800004.html>
- [27] A4988. Google drive [online]. [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: https://drive.google.com/file/d/1v1lys_F0r6-mba__vmlsGXL9dvjcyGTh/view
- [28] *Raspberry Pi Zero 2 W Review: The Long Awaited Sequel*. Toms hardware [online]. [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://www.tomshardware.com/reviews/raspberry-pi-zero-2-w-review>
- [29] 50959 *QOLTEC*. TME [online]. [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/zsi-50959/stolni-napajeci-zdroje/qoltec/50959/>
- [30] *OKY3502-1 OKYSTAR*. TME [online]. [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/oky3502-1/menice/okystar/>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

CNC	Computer Numerical Control
μm	mikrometr
mm	milimetr
Nm	newton metr
RAM	Random Access Memory
ROM	Read Only Memory
USB	Universal Serial Bus
HDMI	High Definition Multimedia Interface
IDE	Integrated Development Enviroment
C++	Programovací jazyk
SD	Secure Digital (paměťová karta)
WiFi	Wireless Fidelity (bezdrátová komunikace počítačů)
kB	kilobajt
MB	Megabajt
GB	Gigabajt
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
SPI	Serial Peripheral Interface
I2C	Inter Integrated Circuit
GPIO	General Purpose Input/Output
3D	three-dimensional (prostorový)

Symboly:

U	napětí	(V)
I	proud	(A)
C	kapacita	(F)

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A - Matematický model pantografického mechanismu, uložen na CD

Příloha B - Schéma řídicí desky plošných spojů, uloženo na CD

Příloha C - Zdrojové kódy programu, uloženy na CD