

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra technologií a měření

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Robotická ruka na principu sloního chobotu

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin FENCL**
Osobní číslo: **E18N0009P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Téma práce: **Robotická ruka na principu sloního chobotu**
Zadávající katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Prostudujte problematiku kinematiky robotických rukou, jejich využití, hardwarovou realizaci a způsoby řízení.
2. Prostudujte způsoby realizace robotické ruky inspirované pohybem sloního chobotu.
3. Navrhněte vhodnou konstrukci robotické ruky inspirované sloním chobotem a realizujte ji.
4. Vyberte vhodnou hardwarovou platformu a navrhněte potřebný hardware pro ovládání robotické ruky inspirované sloním chobotem a realizujte jej.
5. Vyberte vhodnou softwarovou platformu a vytvořte aplikaci pro ovládání pohybu robotické ruky s možností předepsání jejího pohybu a otestujte ji.




Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Kinematika robotů [online]. (c) 2015 [cit. 9.4.2019]. Dostupné z: http://cw.felk.cvut.cz/wiki/_media/courses/a3b99ro/robotismutnycz.pdf
2. Encyklopedie fyziky – kinematika [online]. (c) 2019 [cit. 9.4.2019]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/4-kinematika>
3. Shao T., Zhang L.B., Du M. Y., Bao G. J., Yang Q.H. Fruit harvesting continuum manipulator inspired by elephant trunk. Int J Agric & Biol Eng, 2015; 8(1): 57- 63.
4. Rolf M., Steil J.J. Efficient Exploratory Learning of Inverse Kinematics on a Bionic Elephant Trunk. Neural Networks and Learning Systems, IEEE Transactions on, vol.25, no.6, pp.1147,1160, June 2014. doi: 10.1109/TNNLS.2013.2287890
5. Robotic arm inspired by the Elephant trunk (c) 2015 [cit. 9.4.2019]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=Q1MBlaNuLa8>

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Kropík, Ph.D.**
Katedra elektrotechniky a počítačového modelování

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan





Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku návrhu robotického manipulátoru ve stylu sloního chobotu. V této práci je popsán celý vývoj robotického diskrétního manipulátoru. Hlavní částí této diplomové práce je návrh a realizace konstrukce, následný vývoj a sestavení manipulátoru. Dále bylo provedeno testování manipulátoru, vyhodnocení údajů a analýza možných budoucích změn.

Klíčová slova

Robotický diskrétní manipulátor, krokový motor, 3D tisk, Arduino, CNC Shield, akcelerometr, g-kód, GRBL, Universal Gcode Sender.

Abstract

The presented diploma thesis is focused on the design of a robotic manipulator in the style of an elephant trunk. This work describes the whole development of a robotic discrete manipulator. The main part of this diploma thesis is the design and implementation of the structure, subsequent development and assembly of the manipulator. Furthermore, testing of the manipulator, data evaluation and analysis of possible future changes were performed.

Key words

Robotic discrete manipulator, stepper motor, 3D printing, Arduino, CNC Shield, accelerometer, g-code, GRBL, Universal Gcode Sender.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 26.5.2021

Jméno příjmení

.

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Petr Kropík, Ph.D. za profesionální rady a připomínky, mému otci za cennou pomoc při vývoji robotického manipulátoru.

Obsah

ÚVOD	9
1 KINEMATIKA A ŘÍZENÍ	10
1.1 ÚVODNÍ SEZNÁMENÍ S PROBLEMATIKOU	10
1.2 KONTINUÁLNÍ ROBOTICKÝ MANIPULÁTOR	12
1.3 KROKOVÉ MOTORY	14
1.3.1 Skupiny krokových motorů	15
1.3.2 Výhody krokových motorů	15
1.3.3 Nevýhody krokových motorů	18
2 KONSTRUKCE	22
2.1 FÁZE VÝVOJE	22
2.2 POUŽITÉ KOMPONENTY	25
2.3 VYROBENÉ KOMPONENTY	27
2.4 VÝSLEDNÁ PODOBA ROBOTICKÉHO MANIPULÁTORU	31
2.5 STABILIZACE POČÁTEČNÍ POLOHY	32
2.5.1 Polohování pomocí akcelerometru	33
2.5.2 Další metody polohování	35
3 VÝVOJ ŘÍDÍCÍHO SOFTWARE	36
3.1 POUŽITÉ KNIHOVNY PRO VÝVOJ SW	37
3.2 OVLÁDÁNÍ POMOCÍ STREAMOVÁNÍ G-KÓDU	38
3.3 NÁVRH DALŠÍCH ROZŠÍŘENÍ	38
ZÁVĚR	39
SEZNAM LITERATURY	40

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na realizaci robotického manipulátoru ve stylu sloního chobotu, který bude schopen plnit předdefinované pohyby a úkony. V této práci se zabývám celým vývojem robotického manipulátoru od návrhu funkční konstrukce, po hardwarovou realizaci, až po vývoj softwaru pro ovládání robotické ruky.

Pro robotickou ruku jsem zvolil prostředí a hardware Arduino, které je známé svojí jednoduchostí při řešení technických specifik a dobré komunitní zázemí, nutné pro vývoj nového softwaru. Arduino se programuje v jazyce C# a prostředí je dostupné zdarma. Jako další možnost jsem se rozhodl využít známého geometrického kódu, využívaného v technologii CNC strojů a 3D tiskáren.

Pro návrh dílů jsem vybral program SolidWorks a posléze díly vytisknul na 3D tiskárnách Prusa Mk3 a Ender-5. Po úspěšné realizaci robotické ruky bude nutné zajistit kalibraci a správnou komunikaci celého technického sektoru, kterou na konci práce zajistíme testováním funkčních prvků a následně návrhu možností zlepšení.

Proč jsem si jako téma mé diplomové práce zvolil vývoj a konstrukci robotické ruky na principu sloního chobotu? Od téměř dětských let jsem vytvářel podobné projekty, jako například lunární vozidlo se zabudovanou kamerou, ovládané přes wifi pro zabezpečení domácnosti v naší nepřítomnosti, brushless DC motorem poháněný a skrze Bluetooth řízený longboard a mnoho dalšího.

Fascinuje mě propojení teorie s praxí, kdy je možno někdy zdánlivě nudné naučené postupy a definice z knih použít v denním životě.

1 Kinematika a řízení

1.1 Úvodní seznámení s problematikou

Během posledních několika desetiletí se oblast výzkumu robotických manipulátorů zaměřila hlavně na design, kdy se podobají lidské paži. Tyto konvenční roboty lze nejlépe popsat jako diskrétní manipulátory, jejichž konstrukce je založena na malém počtu spojů s možností aktivace, které jsou sériově spojeny diskrétními tuhými články (obrázek 1). Ukázalo se, že diskrétní manipulátory jsou velmi užitečné a efektivní pro mnoho různých úkolů, ale nejsou bez omezení [2].



Obrázek 1 Robotický manipulátor

Tito roboti mají nejčastěji pět až sedm stupňů volnosti, takže v prostorovém prostředí budou převážně potřebovat všechny své stupně volnosti jen k umístění koncového efektoru. Tento design je velmi efektivní pro otevřená prostředí, ale protože se do prostředí přidávají omezení, je možné, že manipulátor nemůže dosáhnout požadované polohy koncového bodu. Toto selhání je způsobeno nedostatkem stupňů volnosti v robotickém manipulátoru, který by splňoval podmínky prostředí a požadavky na polohu koncového bodu. Další nevýhodou diskrétních manipulátorů je, že pro manipulaci s objektem vyžadují určité specializované zařízení. Nejčastěji se tato manipulace provádí připojením kleští na konci robota. Tento

design opět funguje v mnoha případech dobře, ale je možné, že strategie, kde se úchopy sekcí manipulátoru provádějí, tj. uchopení celé paže, může být lepším řešením. Přidání více stupňů volnosti pro tyto konvenční manipulátory může dále zlepšit jejich manévrovací schopnosti a flexibilitu [3].

Můžeme tuto situaci spojit s rozmanitostí biologických manipulátorů. Jak již bylo uvedeno dříve, diskrétní manipulátory se strukturou podobají lidské paži, ale pokud se podíváme na jiné biologické manipulátory, zjistíme, že to není jediný design. Samci, jako jsou hadi, sloni a chobotnice, mohou produkovat pohyby svým tělem, popřípadě jejich částí, které umožňují efektivní manipulaci s objekty, i když jsou ve srovnání s lidskou rukou velmi odlišné ve struktuře. Dokonce i mezi těmito částmi těl, tj. choboty, chapadly, se jejich fyzická struktura může lišit, ale všechny sdílejí vlastnost, že mají relativně velký počet stupňů volnosti [4] [8].

Výzkum manipulátorů s velkým počtem stupňů volnosti nebo vysokým stupněm manévrovatelnosti přinesl mnoho různých návrhů. Nejoblíbenější design používá nějaký typ struktury „páteře“, který je ovládán sadami kabelů.

Další design používá pro ovládání trubky naplněné tekutinou. Existují také další návrhy, které jsou založeny na konvenčnější konstrukci robota. Tyto typy manipulátorů se běžně označují jako hyper-redundantní manipulátory, protože jejich počet ovladatelných stupňů volnosti je mnohem větší s porovnáním s počtem stupňů volnosti jejich zamýšleného pracovního prostoru.

Kvůli obrovským konstrukčním možnostem vyvinuli G. Robinson a J. B. C. Davies tři klasifikace pro různé možné designy [3].

- Diskrétní roboti
- Serpentine roboti
- Kontinuální roboti

Jak jsem již uvedl dříve, první třída, která popisuje konvenční manipulátory, se nazývá diskrétní roboti. Jak se manévrovatelnost manipulátoru zvyšuje oproti diskrétním manipulátorům zvyšováním počtu diskrétních spojů, přechází do druhé třídy známé jako serpentine / hadovití roboti. Tato klasifikace by zahrnovala hyper-redundantní manipulátory. Třetí klasifikace robotů, známá jako kontinuální roboti, neobsahuje diskrétní klouby a pevné články, jako u předchozích dvou klasifikací. Namísto toho se manipulátor neustále ohýbá podél své délky. Zvýšený počet stupňů volnosti, který umožňuje, aby se hyper-redundantní

roboti a roboti kontinua stali lépe ovladatelnými, má nepříznivý účinek na komplikování kinematiky těchto manipulátorů. G. S. Chirikjian a J. W. Burdick navrhli velkou část teorie, která položila základy se hyper-redundantním robotům. V mé práci jsem vyvinul robota v designu diskrétního manipulátoru (obrázek 3a) [4] [8].

1.2 Kontinuální robotický manipulátor

Nejprve bych chtěl vysvětlit, proč se rozlišují kontinuální a hyper-redundantní robotické manipulátory. Hyper-redundantní robotické manipulátory jsou obvykle definovány jako ty, které mají mnohem více kinematically dostupných ovladatelných stupňů volnosti, než je počet stupňů volnosti pracovního prostoru robota. Kontinuální roboti však nemusí odpovídat této definici. Manipulátory stylu kontinuálních robotů mohou vykazovat velké množství kinematically dostupných stupňů volnosti, ale ne všechny tyto stupně volnosti jsou přímo aktivovány. Proto je možné mít kontinuálního robota, který technicky není hyper-redundantním robotem [4] [8].



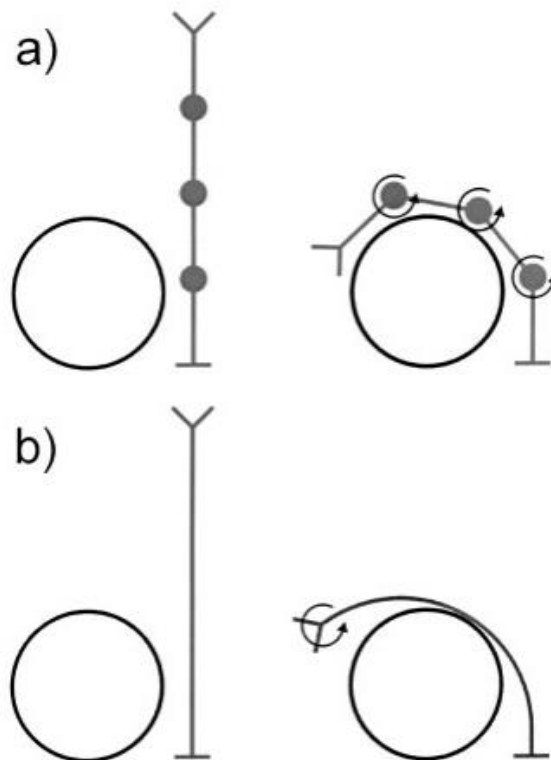
Obrázek 2 Diskrétní páteřní robotický manipulátor (zdroj <http://adaptivemotion.org/AMAM2000/papers/E11-walker.pdf>)

Konstrukční rozdíl mezi běžnými manipulátory a kontinuálními roboty spočívá v tom, že konvenční manipulátor je sériové připojení ovládaných kloubů. To znamená, že každý spoj na

robotu je aktivován a poté je pevně spojen s dalším spojím. Na druhou stranu kontinuální manipulátory nejsou takto definovány. Zvažme sekci se třemi stupni volnosti. Tradiční přístup by byl aktivovat všechny tři klouby, čímž by se získaly tři aktivované stupně volnosti. Robot ve stylu kontinua by poskytoval točivý moment na špičce robota a poté by se k přenosu točivého momentu na tři klouby použil nějaký typ spojky, tj. pružiny. Dostupné stupně volnosti jsou tedy spojeny takovým způsobem, že existuje pouze jeden aktivovaný stupeň [4].

Ačkoli se to na první pohled zdá být kontraproduktivní, kinematika generovaná touto konfigurací se v některých případech ukazuje jako velmi prospěšná. Jednoduchým příkladem je, pokud robot musí dosáhnout ohybu kolem překážky (obrázek 3). Diskrétní manipulátor musí zajišťovat ovládání všech tří kloubů, aby dosáhl kolem překážky, ale robot kontinua může dosáhnout stejného pohybu pouze s jedním pohonem místo tří. Rozšíření tohoto konceptu na roboty s hyper-stupňů volnosti (neboli hypermobilitou), pak lze vidět výhodu robotů kontinua [3].

Složitost mechanické konstrukce a ovládání všech akčních členů konvenčně navrženého robota by bylo nesmírně obtížné implementovat. Pomocí znaku robota kontinua můžeme dosáhnout mnoha stejných konfigurací, ale design lze výrazně zjednodušit [4] [8].



Obrázek 3 a) diskrétní manipulátor b) kontinuální manipulátor

V předešlé části jsem nastínil nejběžnější akční a konstrukční strategie pro kontinuální roboty. Převládající konstrukcí pro ovládání jsou kabelové neboli šlachovité systémy a systémy tlakových kapalin [4].

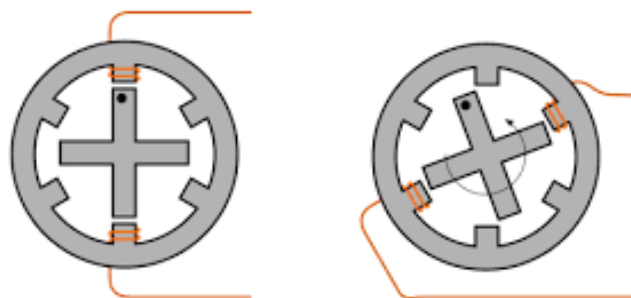
U obou z těchto konstrukcí se většina spouštěcích mechanismů nachází přímo na robotickém manipulátoru, protože použití akčních členů přímo na manipulátoru je konstrukčně nesmírně složité a neefektivní při implementaci.

V oblasti konstrukčních řešení můžeme zvažovat dva hlavní návrhy, kdy v obou případech se manipulátor skládá z určitých „páteřních“ segmentů, kde každý segment je určený pro co nejlepší manévrovatelnost manipulátoru a celkové možnosti ohybu [8].

1.3 Krokové motory

V dnešní době se využití krokových a synchronních motorků malých výkonů s rozvojem výpočetní a regulační techniky rapidně zvětšuje. Nejvíce se s krokovými motory můžeme setkat například u většiny druhů 3D tiskáren, ale pozadu není ani oblast regulační a řídicí techniky, kde se motorky využívají na otevírání ventilů, směšovačů a jakýkoliv pohyby X a Y.

Krokový motor si můžeme představit jako synchronní stroj. Jen místo 3fázového magnetického točivého pole si můžeme představit pole, kde s každým skokem je stejnosměrně napájena pólová dvojice (obrázek 1) [5] [6].



Obrázek 4 Krokový motor

Rozdělení krokových motorků.

Krokové motorky je možné podle jejich konstrukčního provedení rozdělit do tří základních skupin:

1.3.1 Skupiny krokových motorů

- Krokové motorky s pasivním rotorem, označované také jako reluktanční, reakční, s proměnnou reluktancí. Jsou to motorky s vyjádřenými póly na statoru i rotoru, využívající výrazně rozdílné magnetické reluktance (vodivosti) v příčné i podélné ose. Podmínkou funkce je rozdílný počet pólů (zubů) na statoru a rotoru [5].
- Krokové motorky s aktivním rotorem, jejichž rotor je tvořen permanentním magnetem (odtud i název aktivní). Podle uspořádání pólů magnetu odlišujeme dvě skupiny těchto motorků, s radiálně polarizovaným nebo s axiálně polarizovaným permanentním magnetem. Mají rozdílný počet pólů na statoru i rotoru, přičemž rotorové póly jsou tvořeny permanentními magnety [5].
- Krokové motorky hybridní – slučují konstrukční principy obou předchozích typů.

Při konstrukci robotické ruky jsem použil krokový motor SX17-1005VLQCEF. Národní sdružení výrobců elektrických zařízení (zkráceně NEMA) určují standardy pro elektrické produkty. V tomto případě se jedná o krokový motor NEMA17, kde číslo 17 značí velikost příruby. Číslo tedy definuje jen standardní rozměry pro montáž motoru, nedefinují ostatní technické parametry. Dva různé motory NEMA17 mohou mít zcela odlišné elektrické nebo mechanické specifikace a nemusí být nutně zaměnitelné [5].

Krokové motory NEMA17 se hojně využívají v 3D tiskárnách a menších CNC frézách. Menší motory nacházejí uplatnění v mnoha robotických a animatronických systémech, větší motory se využívají spíše v průmyslu u CNC strojů [5].

Dále bych rád zmínil výhody a využití krokových motorů, jedna z největších výhod je relativně nízká cena a dostupnost.

1.3.2 Výhody krokových motorů

- a) Flexibilita a větší točivý moment.

Krokové motory nabízejí flexibilitu při použití pro širokou škálu aplikací, protože konstrukce krokového motoru poskytuje konstantní přídržný moment bez nutnosti napájení motoru.

Točivý moment krokového motoru stejné velikosti jako servomotor je při nižších

otáčkách větší, než točivý moment servomotoru [7].

- b) Jsou levnější a bezpečnější než servomotory.

Krokový motor se často používá v systému s funkcí „open-loop“, který nevyžaduje zpětnou vazbu o poloze ani krouticím momentu, což činí krokový motor jednodušším a méně nákladným na ovládání. Krokový motor je levný, ve srovnání se systémy řízení pohybu servomotorů pro jejich vhodnější aplikaci při potřebě nižší akcelerace a vysokých požadavků na udržovací moment.

- c) Krokový motor je bezpečnější a nabízí delší životnost.

Krokové motory můžeme považovat za bezpečnější, kdy v případě softwarové nebo mechanické poruchy se motor vždy zastaví. V krokovém motoru se nenachází žádné kontaktní kartáče. Mnoho pohyblivých částí krokového motoru jsou bez frikce, proto se dá uvažovat o delší životnosti krokových motorů, kde ložiska jsou jediná část motorů s možností většího opotřebování [7].

- d) Vynikající nízký točivý moment při nízké rychlosti.

Krokové motory nabízejí vynikající točivý moment při nízkých otáčkách, což znamená, že motor bude pohánět velkou zátěž, aniž by musel využívat jakékoli další přídavné převody nebo převodové mechanismy.

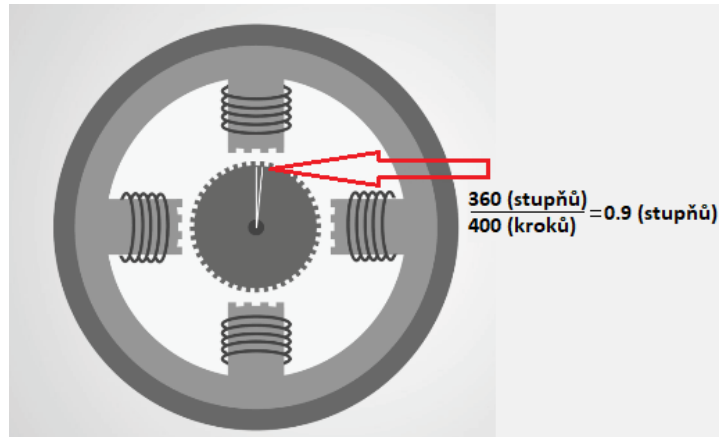
- e) Vynikající opakovatelnost a bezpečnost proti přetížení.

Jak jsem již zmínil dříve, inherentní schopnosti krokového motoru umožňují, aby se hřídel motoru vrátila na přesně stejné místo a poskytuje tak vynikající opakovatelnost. Krokové motory poskytují také přesné polohování, protože dobré krokové motory mají přesnost 3-5 % kroku a tato chyba není kumulativní z jednoho kroku do druhého. Krokový motor je v podstatě bezpečný proti přetížení. Motor nelze poškodit mechanickým přetížením, ale může dojít ke ztrátě polohy, která ovlivní přesnost a opakovatelnost, když se zatížení zvýší nad rámec návrhu. Proto jsou krokové motory vhodnější pro aplikace s konstantním zatížením [7].

- f) Úhel rotace krokového motoru je úměrný vstupnímu impulzu.

Pro přesun krokového motoru do určité polohy zašleme určitý počet impulzů, kde úhel otáčení krokového motoru je úměrný daným vstupním impulzům. V případě

krokového motoru o 400 inkrementálních krocích rozdělených na 360 stupňů motor poskytuje 0,9 stupně otočení na jeden krok. Výstup jednoho digitálního impulsu z ovladače je ekvivalentní jednomu kroku otáčení [7].



Obrázek 5 Úhel rotace krokového motoru

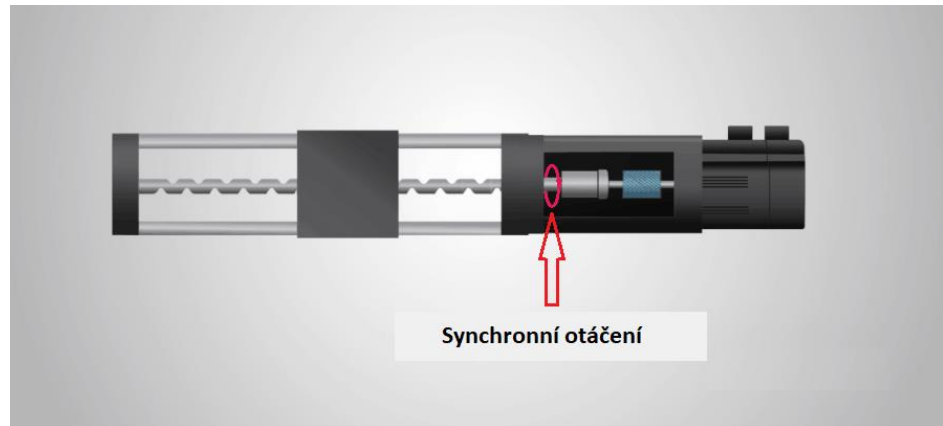
- g) Krokové motory poskytují plný krouticí moment při zastavení.

Jednou z mnoha výhod krokového motoru je funkce zajištění plného točivého momentu při zastavení, zatímco vinutí jsou pod napětím a rotor je stacionární. Jinými slovy výhoda, kterou nazýváme přídržný moment, což znamená, že motor může držet zatížení na místě, když se rotor neotáčí.

Krokový motor však může také udržovat zátěž na místě, když na vinutí není přiveden žádný proud nebo pokud je vypnutý. Toto se běžně označuje jako aretační moment nebo zbytkový moment [7].

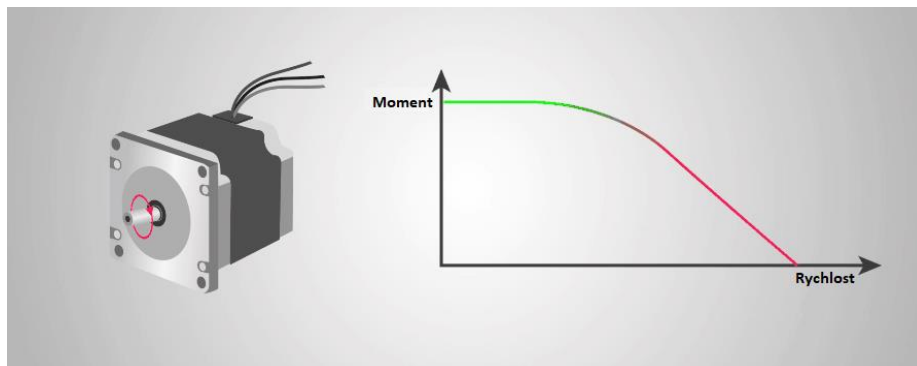
- h) Synchronní otáčení a přesnost při nízké rychlosti.

U krokových motorů je možné dosáhnout velmi nízké synchronní rotace se zátěží, která je přímo spojena s hřídelí a lze realizovat širokou škálu rychlostí otáčení, protože rychlost je úměrná frekvenci vstupních impulsů.



Obrázek 6 Synchronní otáčení

Normální stejnosměrné motory nemají při nižších otáčkách příliš velký točivý moment, krokový motor má maximální točivý moment při nízkých otáčkách, takže krokový motor je dobrá volba pro aplikace vyžadující nízké otáčky s vysokou přesností.



Obrázek 7 Poměr momentu k rychlosti

Krokové motory poskytují robustnost, vysokou spolehlivost, jednoduchost konstrukce, umožňují nízkou údržbu, nabízejí vynikající odezvu na spuštění / zastavení / couvání a budou fungovat v mnoha prostředích [7].

1.3.3 Nevýhody krokových motorů

- a) Nízká účinnost krokových motorů.

Některé z hlavních nevýhod krokových motorů jsou v tom, že motory poskytují nízkou účinnost. Krokový motor odebírá značný výkon (pamatuje si na přidržovací moment) bez ohledu na zatížení [7].

b) S rychlostí klesá točivý moment krokového motoru.

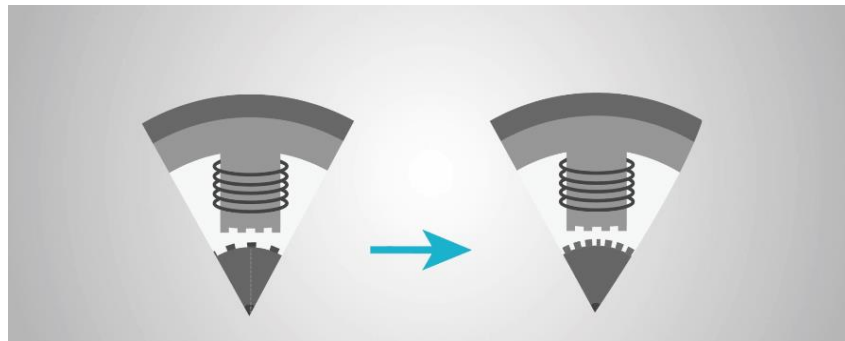
Točivý moment krokového motoru s rychlostí rychle klesá, protože točivý moment je inverzní k rychlosti definované v předchozím grafu (obrázek 7).

c) Nízká přesnost a nízký poměr točivého momentu k setrvačnosti.

Ve srovnání se servomotory můžeme krokový motor považovat za málo přesný.

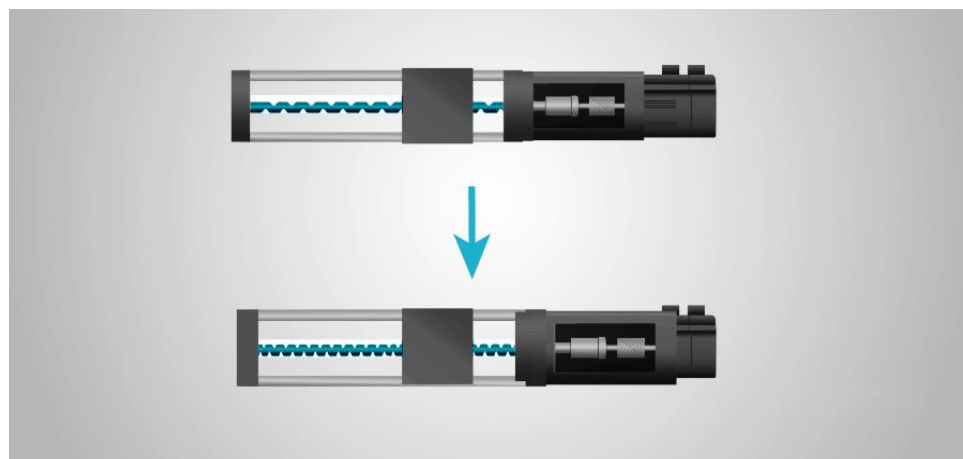
Existují však tři způsoby, jak zlepšit přesnost krokového motoru.

Jedním z nich je použití krokového motoru s více zuby.



Obrázek 8 Přesnost

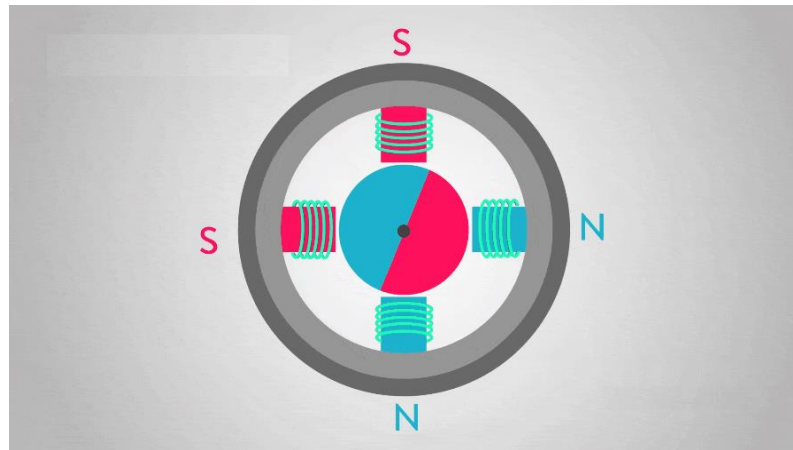
Další možností je použít ozubená kola ke snížení rozsahu pohybu na krok nebo ke zvýšení počtu závitů na palec vodicího šroubu.



Obrázek 9 Vodicí šroub

A poslední možností je použít metodu mikro krokování. Mikro-krokování umožňuje plynulejší pohyb motoru a snižuje náchylnost k rezonancím [7].

Krokové motory mají nízký poměr točivého momentu k setrvačnosti, což znamená, že nemohou velmi rychle zrychlit zatížení a motor se může při vysokých výkonových konfiguracích velmi zahřát.



Obrázek 10 Mikro-krokování

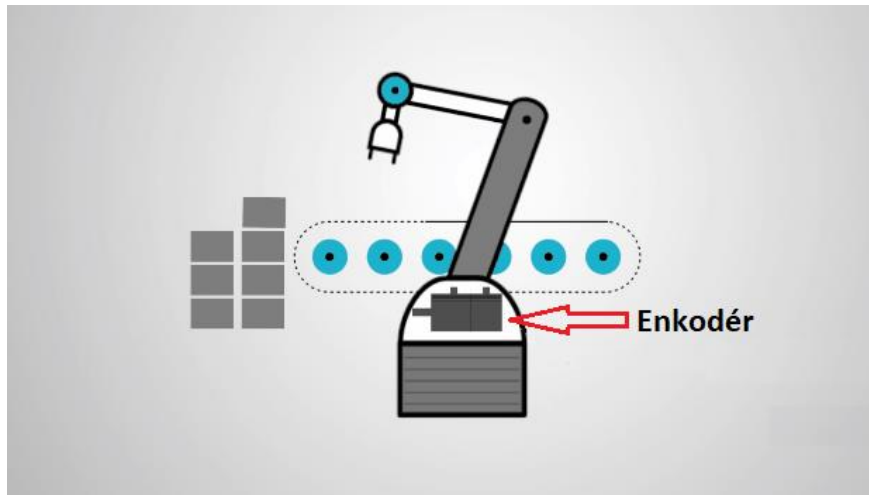
d) Žádná zpětná vazba pro zmeškané kroky.

Jak jsem již zmínil dříve, jednou z výhod používání krokového motoru je možnost pracovat v řízení otevřené smyčky (open-loop), ale tyto dva scénáře se při různých zatížení stávají nevýhodou, když není použita žádná zpětná vazba k řídicímu systému k indikaci potenciálních zmeškaných kroků.

A když už mluvím o systémech s otevřenou smyčkou (open-loop), nevýhodou řízení s otevřenou smyčkou pomocí krokových motorů je, že pokud je zatížení stroje příliš vysoké nebo se motor pokusí pohybovat příliš rychle, mohou být poziční kroky přeskočeny.

Řídicí jednotka nemá žádné prostředky k tomu, aby to detekovala, a tak stroj pokračuje v mírném vyčerpání nastavení, dokud není poloha resetována.

Z tohoto důvodu budou složitější roboti a obráběcí stroje využívat servomotory, které obsahují enkodéry a řadiče uzavřené smyčky (close-loop) [7].



Obrázek 11 Enkodér

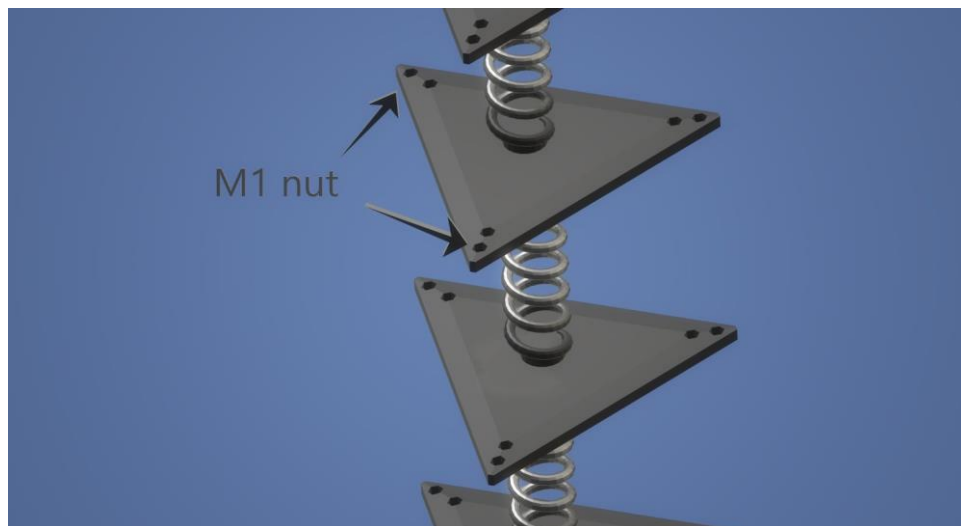
- e) Krokový motor může být velmi hlučný a nutnost překonání přidržovacího momentu. Krokový motor může být slyšitelně velmi hlučný při středních až vysokých rychlostech a má nízký výstupní výkon z hlediska velikosti a hmotnosti. Aby se motor mohl pohybovat, je třeba překonat zarážku nebo přidržovací moment, což snižuje ideální točivý moment, který může motor při běhu vytvářet.

Překonání aretačního momentu vyžaduje více energie od motoru a množství potřebné energie je úměrné rychlosti. Čím rychleji se motor otáčí, tím větší účinek bude mít přidržovací moment na skutečný výstup točivého momentu motoru [7].

2 Konstrukce

2.1 Fáze vývoje

Již dlouho jsem se zamýšlel, nejprve na obecné úrovni, nad možností vytvoření robotické ruky ve stylu sloního chobotu. Nejprve jsem přemýšlel nad strukturou jeho hlavní části páteřního segmentu (kapitola 1.2), kde jsem řešil různá technická specifika a postupné vývojové obtíže při konstrukci. V této části práce bych se zaměřil na prvotní myšlenku pro realizaci konstrukce robotického dikrétního manipulátoru, následný vývoj až po nynější stav robotického manipulátoru.



Obrázek 12 První návrh

Na obrázku (obrázek 12) můžeme vidět první návrh robotické ruky. Základní myšlenka byla realizovat manipulátor s pomocí pružin a ocelových lan, kdy se ocelová lana, procházející částmi robotického manipulátoru (obrázek 12), ukotví na konci robotické ruky a pomocí pohonné jednotky se bude lano navíjet. S navíjením ocelových lan se robotická ruka deformuje do strany (ohýbá). Na tomto principu jsem schopný ovládat všechny určené osy robotického manipulátoru.

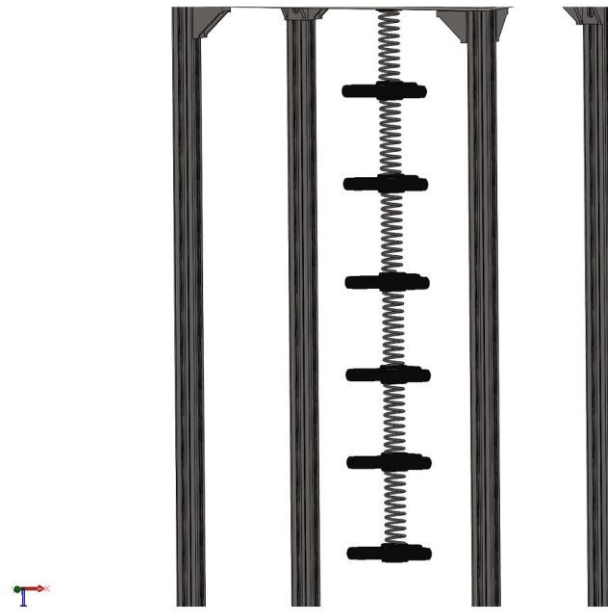
Po testování prvního prototypu manipulátoru nastala komplikace při snaze o stabilizaci ruky, kdy robotickou ruku nebylo možné udržet ve vzpřímené poloze. Jako řešení jsem přidal vnitřní pružinu, která stabilizovala páteřní segmenty částí robotického manipulátoru (obrázek 13).



Obrázek 13 Druhý návrh

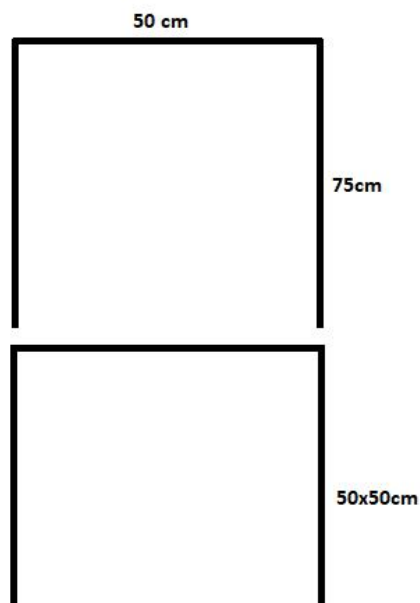
Na obrázku (obrázek 13) můžeme vidět vnitřní stabilizační pružinu (přidaná z důvodu nestability ve vzpřímené poloze). Také si můžeme všimnout, že oproti přechodí verzi zde mám upravený tvar páteřních segmentů. Při návrhu segmentů jsem se pomocí simulace snažil najít ideální tvar z hlediska konstrukční námahy, proto jsem nepoužil ostré hrany, které byly z výrobních a následně konstrukčních vlastností problematické.

Přidáním vnitřní pružiny jsem omezil potíže se stabilizací robotické ruky. Dále se však v následných testech se ukázalo problematické ukotvení pružin mezi každým článkem (vnější pružiny). Po dalších testech a úpravách návrhu jsem se rozhodl nepoužít vnitřní stabilizační pružinu a snažil se vyřešit stabilizaci páteřních segmentů jiným způsobem.



Obrázek 14 Třetí návrh (program SolidWorks)

Jako poslední návrh jsem se rozhodl vyřešit stabilizaci páteřních článků změnou polohy koncového bodu manipulátoru. Změnou polohy koncového bodu (tedy svěšením robotické ruky) jsem omezil většinu stabilizačních nedostatků. Pro konstrukci jsem se rozhodl použít železné profily 2x2 cm a 35x35 cm hliníkovou desku pro ukotvení páteřních článků (obrázek 15).



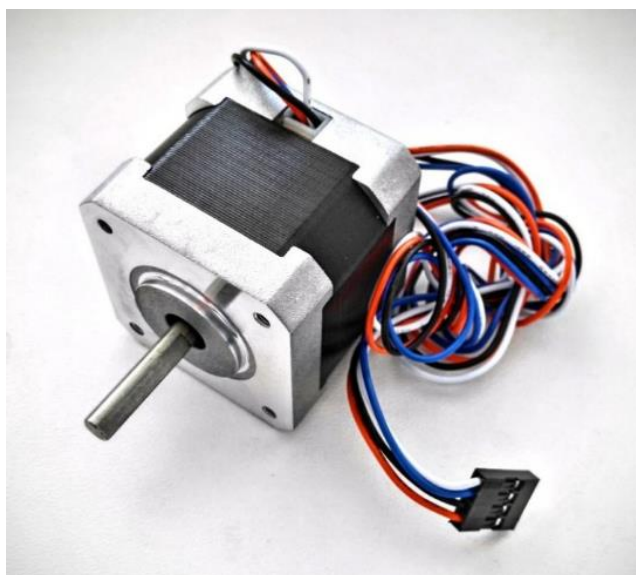
Obrázek 15 Porovnání

2.2 Použité komponenty

Pro výrobu robotické ruky jsem zvolil tyto komponenty:

1. 3x trapézová tyč
2. 3x trapézová matice
3. 5x pružina
4. 3x krokový motor SX17-1005VLQCEF
5. 6x vodící tyč (8mm)
6. 3x pružná spojka
7. 1x 350W, 12V zdroj
8. 6x kluzné lineární ložisko LM8UU
9. 1x Arduino UNO
10. 1x CNC Shield V3
11. hliníkový profil 35x35 cm
12. 4x železný profil 50 cm
13. 4x železný profil 35 cm

Krokový motor SX17-1005VLQCEF se běžně používá pro stavbu 3D tiskáren a většiny soustrojí využívající 8mm trapézovou tyč. Motor můžete vidět na obrázku (obrázek 16) a jeho zapojení v tabulce (tab. 1).



Obrázek 16 Krokový motor SX17-1005VLQCEF

Tabulka 1. Krokový motor SX17

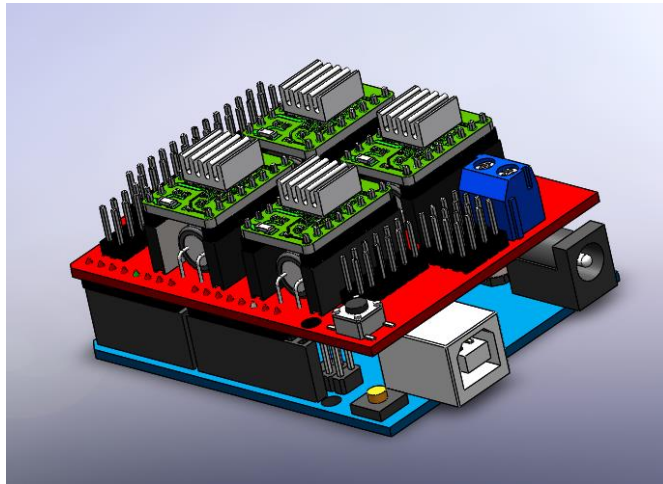
Krokový motor SX17-1005LQCEF Zapojení vinutí	
Zapojení vinutí bipolární	sériové
A (1. fáze)	Oranžový
/A (1. fáze)	Černý
B (2. fáze)	Modrý
/B (2. fáze)	Bílý

Pro napájení robotické ruky používám TLPZ-12-350, 350W 12V zdroj od firmy T-LED (obrázek 17).



Obrázek 17 zdroj TLPZ-12-350

Pro logické ovládání robotické ruky využívám Arduino UNO s CNC Shield V3, které mi umožní ovládat všechny tři osy současně (obrázek 18). Na Shieldu jsou zapojeny A4988 ovládací drivery, pro ovládání krokových motorů.



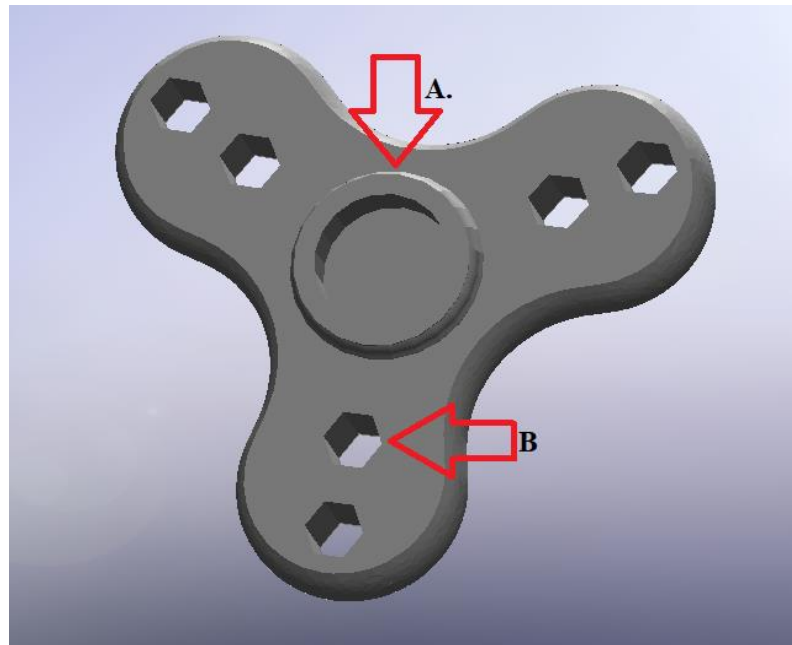
Obrázek 18 Arduino UNO + CNC Shield (SolidWorks)

2.3 Vyrobené komponenty

Všechny komponenty na seznamu níže jsou namodelované v programu SolidWorks a následně vytisknuté na 3D tiskárně značky Prusa MK2.

1. 7x článek sloního chobotu (obrázek 19)
2. 1x ukotvení pružiny (obrázek 23)
3. 3x pojezdový stav pro trapézovou a vodící tyč (obrázek 20)
4. 1x záchytný box pro napájecí zdroj (obrázek 21)
5. 1x kotvící deska (skládající se ze tří částí) (obrázek 22)
6. Úchyt hladkých tyčí a spodní kryt (obrázek 24)
7. 1x horní spojovací deska (obrázek 25)

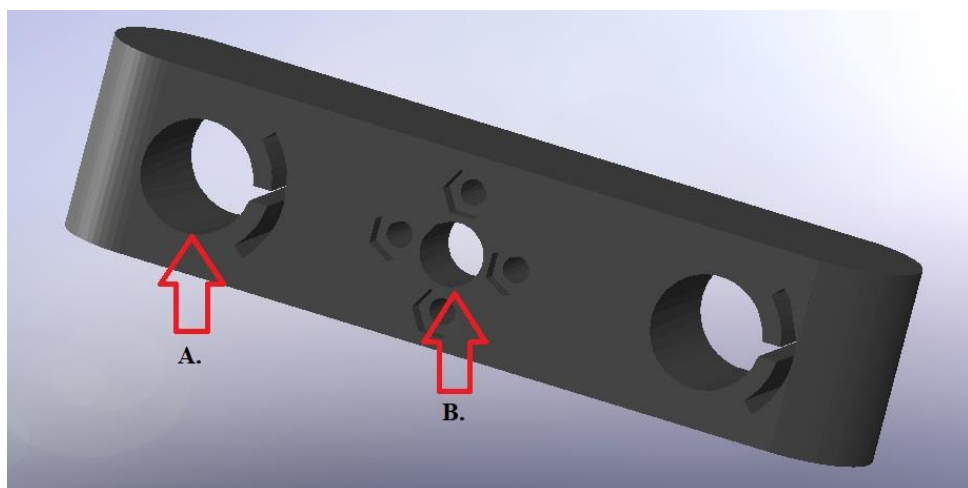
Článek sloního chobotu je hlavní konstrukční prvek celé robotické ruky, je tvořen otvory pro matky M4, kterými prochází ovládací ocelová lanka pro pohyb (obrázek 19 B). Také zde můžeme vidět hlavice pro usazení pružiny (obrázek 19 A).



Obrázek 19 Článek sloního chobotu (SolidWorks)

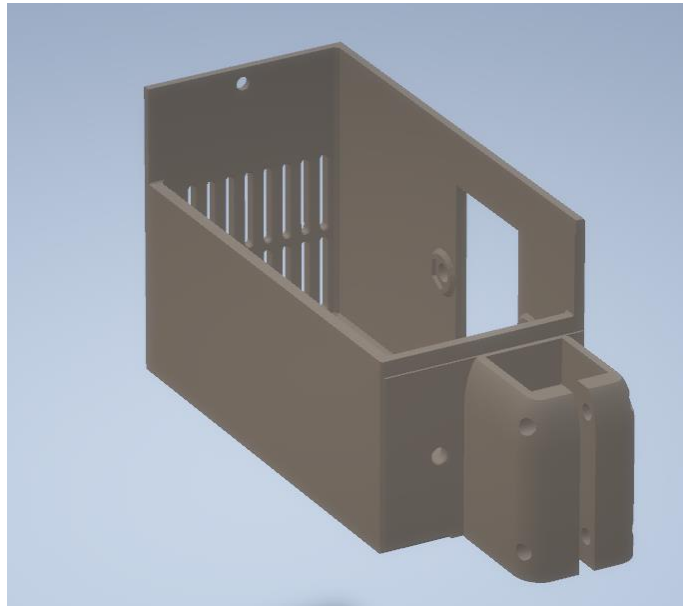
Ukotvení pružiny robotického manipulátoru slouží pro stabilizaci pružiny vně článku sloního chobotu.

Pojzdový stav pro trapézovou a vodící tyč se skládá z míst pro dvě kluzná ložiska pro stabilizační hladké tyče (obrázek 20 A) a místa pro trapézovou matku a uchycení vodících ocelových lan (obrázek 20 B).



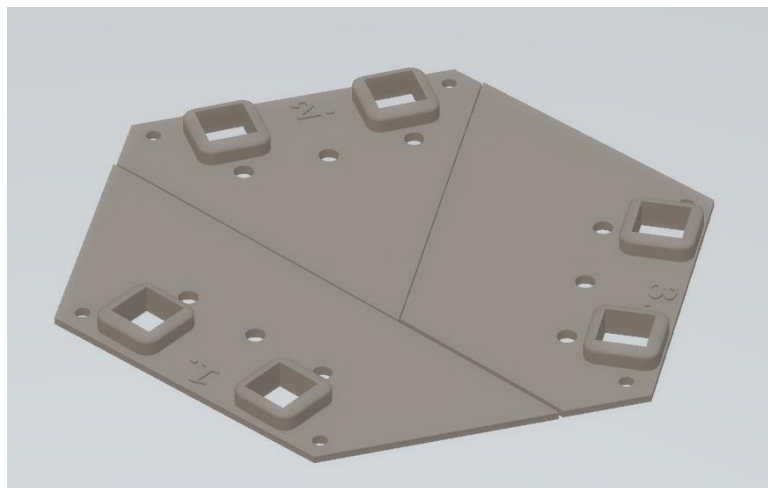
Obrázek 20 Pojezdový stav (SolidWorks)

Další část manipulátoru je záchytný box (obrázek 21) pro uchycení zdroje na konstrukci.



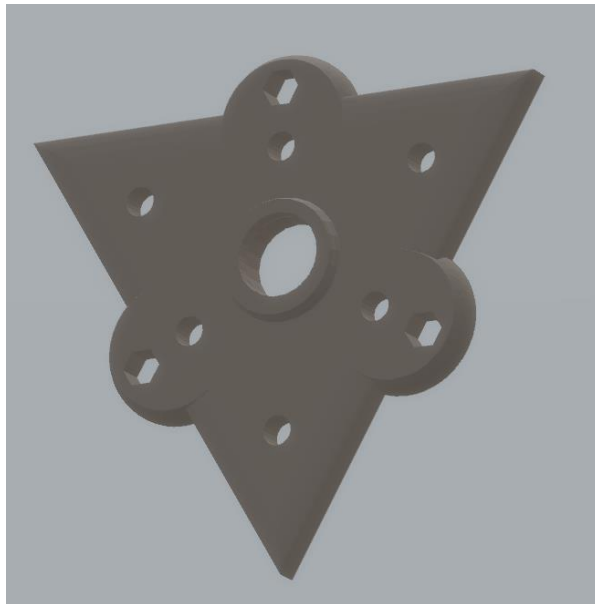
Obrázek 21 Záchytný box pro napájecí zdroj

Díleč část pro ovládací prvky robotického manipulátoru je kotvící deska, která je připevněná na hliníkovém profilu pro usazení horní části pojezdové a ovládací konstrukce (obrázek 22). Zde můžeme vidět otvory pro usazení konstrukčních železných profilů, hladkých a trapézových tyčí a otvorů pro uchycení.



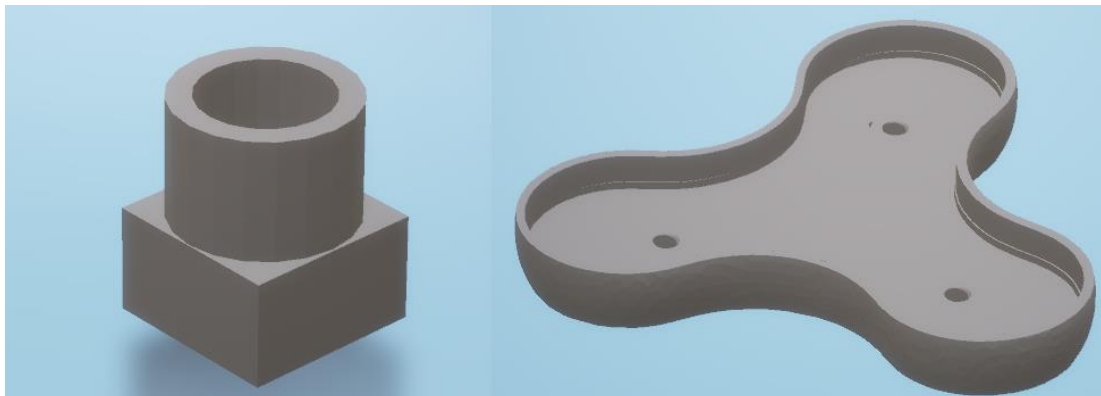
Obrázek 22 kotvící deska

Další částí je ukotvení pružiny, nacházející se mezi hliníkovým profilem a páteřními články, sloužící pro pevné uchycení posledního článku ke konstrukci (obrázek 23).



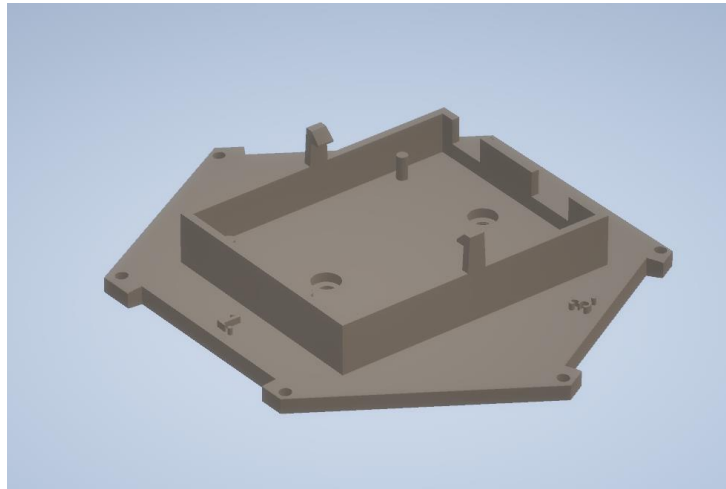
Obrázek 23 Ukotvení pružiny

Na obrázku (obrázek 24) vidíme držák hladkých tyčí pro lepší stabilitu systému a spodní kryt manipulační ruky.



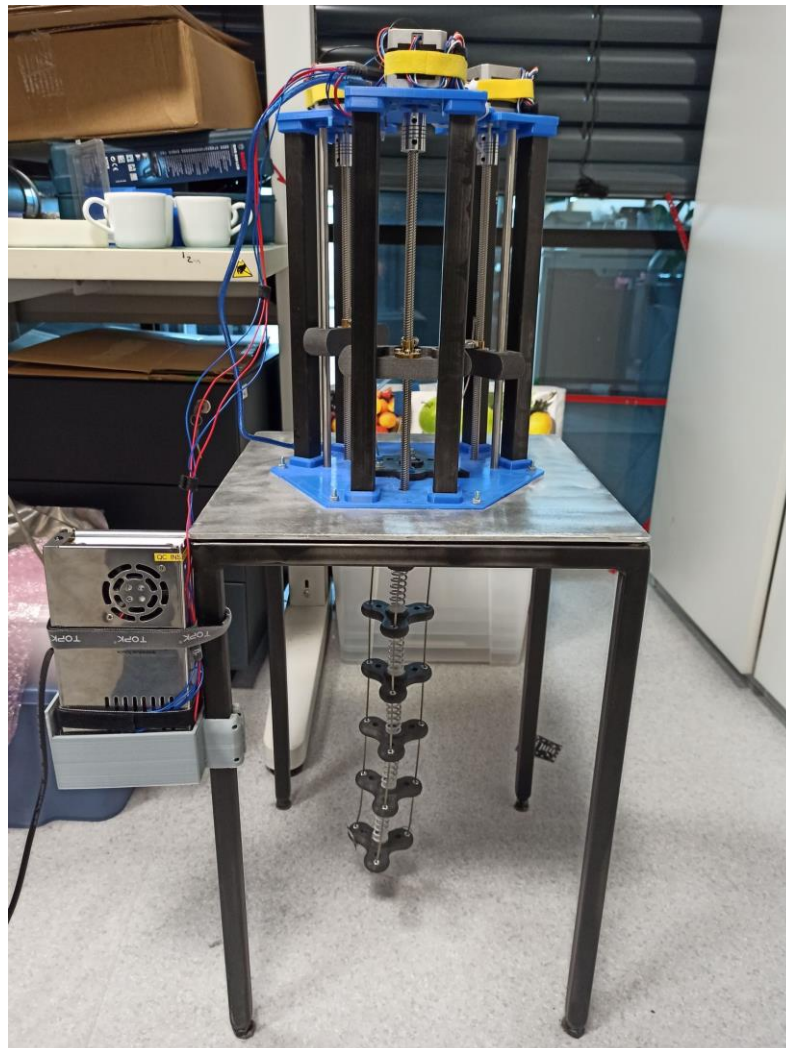
Obrázek 24 Úchyt hladkých tyčí a spodní kryt

V poslední řadě máme horní spojovací desku, která slouží ke spojení všech tří segmentů os a následné uchycení logického ovládání pro krokové motory (obrázek 25).

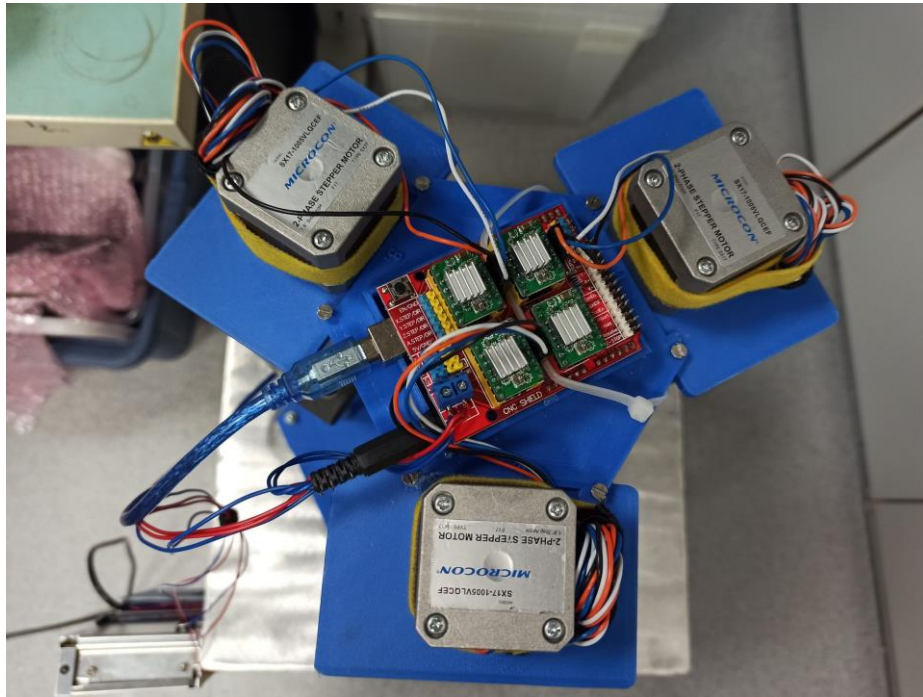


Obrázek 25 horní spojovací deska

2.4 Výsledná podoba robotického manipulátoru



Obrázek 26 Konečná podoba robotického diskretního manipulátoru



Obrázek 27 horní detail manipulátoru

2.5 Stabilizace počáteční polohy

Při počátečních pokusech psaní ovládacího softwaru jsem narazil na zajímavý problém se stabilizací počáteční polohy, která musí nastat:

- a) Při výpadku napájení.
- b) Při softwarové chybě vedoucí ke ztrátě polohy.
- c) Při zapnutí/vypnutí robotické ruky.
- d) Při mechanické manipulaci s robotickou rukou.

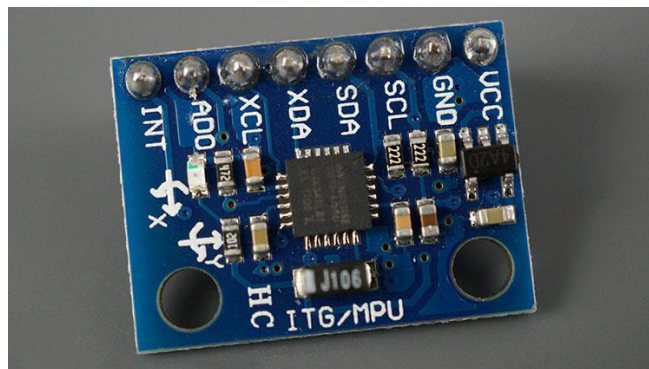
Při úvahách o možnostech stabilizace a kalibrace počáteční polohy musíme brát v potaz nestálost celého systému, kde jakýkoli z výše uvedených vlivů může mít razantní vliv na počáteční polohu.

Dále uvedené metody jsou popsány ve vývojovém stádiu, kde jsem se snažil popsat a porovnáváním dat vybrat nejlepší metodu pro polohování a následnou aplikaci na problematiku stabilizace počátečního polohovacího bodu.

2.5.1 Polohování pomocí akcelerometru

Pro polohování pomocí akcelerometru jsem se rozhodl použít modul MPU6050 s využitím zmíněné desky Arduino (obrázek 18). Modul MPU6050 (obrázek 28) je tříosý akcelerometr a gyroskopický snímač.

Akcelerometr měří gravitační zrychlení, teplotu a rychlost otáčení. Pro účely určení orientace objektu, v mém případě stabilizaci počátečního polohovacího bodu, modul splňuje všechny potřebné předpoklady.



Obrázek 28 modul MPU6050

Na obrázku můžeme vidět použitý modul MPU6050, kde logické výstupy jsou:

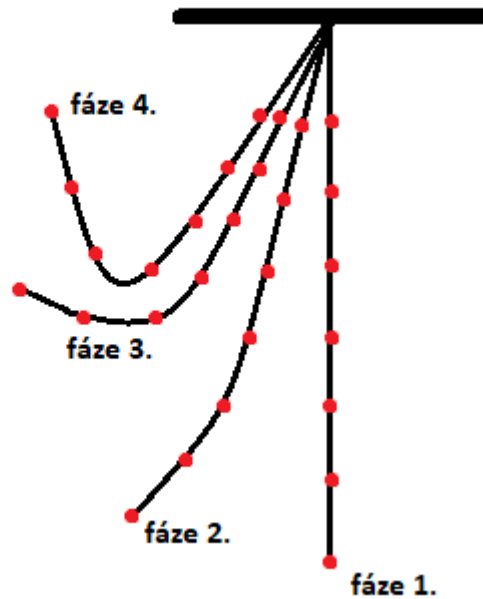
- **VCC** Napájení senzoru (3,3 V nebo 5 V)
- **GND** Společný GND
- **SCL-SCL** pin pro komunikaci I2C
- **SDA-SDA** pin pro komunikaci I2C
- **XDA** Slouží k propojení jiných snímačů I2C s MPU-6050
- **XCL** Slouží k propojení dalších snímačů I2C s MPU-6050
- **AD0** Tento pin slouží ke změně adresy I2C
- **INT** Přerušovací pin, lze použít k indikaci nových dat z měření

Akcelerometr měří zrychlení, rychlost změny rychlosti objektu, tedy v tomto případě konec robotické ruky. Pro zjištění údajů z akcelerometru existuje mnoho způsobů, v mém případě jsem použil knihovnu Adafruit MPU6050.

Pro porovnání výsledku z nastavení polohování pomocí akcelerometru jsem se rozhodl podrobit metodu sérii testů s definovaným výstupem. První test se bude týkat nalezení určité

polohy pro koncové body jedné z os.

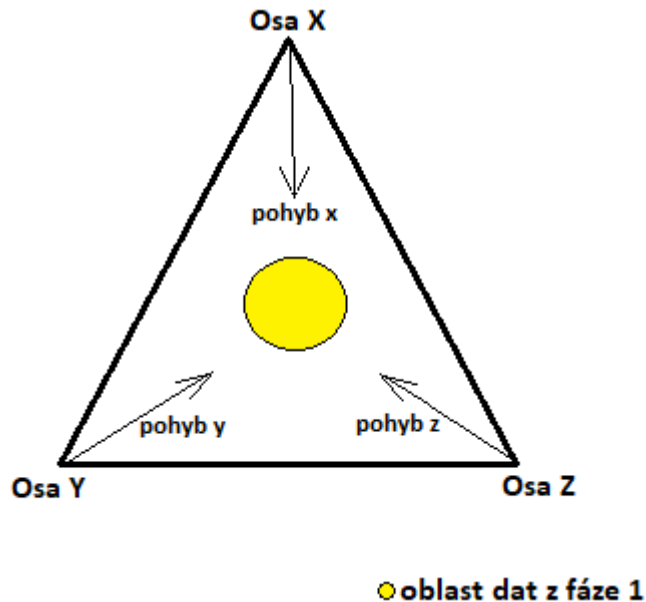
Osa X = max [°]
Osa Y = Osa Z = 0 [°]



Obrázek 29 test koncových bodů pomocí akcelerometru

V obrázku (obrázek 29) můžeme vidět naměřené hodnoty pomocí akcelerometru pro 4 fáze pohybu v jedné ose. Při opakování testu jsem porovnáním dat docílil soudržnosti systému při pohybu v jedné ose, kdy bylo možné test zrekapitulovat bez větších datových rozdílů pro každou fázi testu.

Další provedený test byl pro nalezení koncového, stabilizačního bodu (obrázek 29 fáze 1). Při testu jsem použil naměřená data z prvního testu pro fázi jedna, k nalezení stabilního koncového bodu při neznámé poloze os. Jedná se o pokus stabilizovat robotický manipulátor při zapnutí.



Obrázek 30 test pro nalezení stabilizačního bodu

Pro nalezení stabilizačního bodu jsem se v každém cyklu snažil vytvořit stejný rozdíl vzdálenosti os od oblasti dat, pohybem jsem postupně v každém cyklu dokázal osy posunout do vymezené oblasti z fáze jedna. Opakovaným testem jsem dokázal ověřit možnost kalibrace všechny tří os pomocí akcelerometru s chybovostí $\pm 1-5$ [°] pro jednu osu (obrázek 30).

2.5.2 Další metody polohování

Další možnost pro nalezení stabilizačního bodu je pomocí strojového neboli počítačového vidění. Počítačové vidění znamená použití jedné nebo více kamer pro kontrolu, analýzu a následné systémové testování objektu. Nasnímaná data pak lze použít k vylepšení procesu výroby, nebo v našem případě nalezení stabilizačního bodu.

V případě použití počítačového vidění musíme pro kamerový systém určit základní bod, ze kterého pak snímkováním bude vycházet. Kamera může být naprogramována tak, aby kontrolovala pozici určeného předmětu, jeho tvar i barvu a popřípadě jestli je objekt vůbec k nalezení.

Pro náš případ je možné nastavit stabilizační bod určením pro nás ideálního stavu všech os, následné určení místa libovolným předmětem nebo nápisem. V případě nutnosti znova určit stabilizační bod (viz. 2.5) jsme schopni jeho nalezení porovnáním os se záznamem dat snímku z kamer.

3 Vývoj řídicího software

Pro vývoj ovládacího softwaru jsem se rozhodl použít vývojové prostředí Arduino IDE, psané v jazyce C++. Hlavní důvod pro využití tohoto nástroje je jednoduchá a rychlá aplikace vyvíjeného softwaru, velká komunitní podpora i množství knihoven pro usnadnění práce. První verze vyvíjeného ovládacího softwaru bylo použito na testování konstrukce robotického manipulátoru a posléze jeho testování a nalezení stabilizačního bodu. Většina částí softwaru se skládá z mechanismů pro sběr dat z akcelerometru, pro hlídání poloh os a jejich následnou manipulaci.

Druhá verze vyvíjeného ovládacího softwaru slouží pro práci s geometrickým kódem neboli G-kódem (Geometric Code), který se hojně používá v 3D tiskárnách a CNC (Computer Numerical Control) strojích. Příkazy v G-kódu dávají stroji pokyn, kam se má pohybovat, jak rychle se má pohybovat a jakou cestou se má řídit.

V případě obráběcího stroje, jako je soustruh nebo fréza, je řezací nástroj poháněn těmito příkazy, aby sledoval konkrétní dráhu nástroje a odřezával materiál, aby získal požadovaný tvar. Podobně v případě aditivní výroby nebo 3D tiskáren příkazy v G-kódu dávají stroji pokyn, aby ukládal materiál vrstvu po vrstvě a vytvořil přesný geometrický tvar [9].

Názorná ukázka jednoho řádku G-kódu:

```
G01 X247.951560 Y11.817060 Z-1.000000 F400.000000.
```

G-kód má následující strukturu:

G ## X ## Y ## Z ## F ##

- První příkaz **G01** znamená „pohybuj se po přímce do určité polohy“
- Polohu nebo souřadnice deklaruje pomocí hodnot **X**, **Y** a **Z**.
- Nakonec s hodnotou **F** nastavíme rychlost posuvu nebo rychlost, kterou bude pohyb proveden.

Z ukázky G-kódu můžeme vyčíst, že stroj se bude pohybovat po přímce ze své aktuální polohy na souřadnice X,Y,Z s rychlostí 400 mm/min. Jednotky se nastavují také pomocí G-kódu, v našem případě se jedná o kód G21 pro nastavení milimetrů za minutu. V případě použití palců, použijeme kód G20.

Z názorné ukázky je možno vidět, že geometrický kód je ucelený pro systematické nastavení stroje, proto jsem se rozhodl využít tento vysoce rozšířený jazyk pro pohyb mého robotického diskrétního manipulátoru.

3.1 Použité knihovny pro vývoj SW

Pro ovládání krokových motorů jsem využil knihovnu AccelStepper.h, která poskytuje objektově orientované rozhraní pro 2,3 a 4 pinové krokové motory a jejich ovladače.

Knihovna vychází ze standardní knihovny pro ovládání krokových motorů Stepper.h, obsažené v prostředí Arduino IDE.

Na rozdíl od obsažené knihovny Stepper.h, AccelStepper.h podporuje zrychlení a zpomalení krokových motorů, podporuje více simultánně spuštěných krokových motorů s nezávislým souběžným krokováním na každém motoru. Také vylepšuje práci s API funkcemi, u kterých nezpůsobuje zdržení a ani neblokuje jejich průběh.

Knihovna grbl.h je výkonná a nízkonákladová alternativa k řízení pohybu pomocí paralelního portu. Řadič je napsán ve vysoce optimalizovaném C s využitím všech chytrých funkcí čipů AVR k dosažení přesného načasování a asynchronního provozu. Je schopen udržovat až 30kHz stabilních řídicích pulzů bez chvění.

Knihovna je primárně určená na přijímání g-kódu pro obrábějící CNC stroje, pro moje účely postačí a podpora g-kódy vyhovuje všem standardům. Oblouky, kruhy a spirálový pohyb jsou plně podporovány, stejně jako všechny ostatní primární příkazy g-kódu.

Seznam podporovaných G-kódů v knihovně Grbl v1.1:

- Nemožné příkazy: G4, G10L2, G10L20, G28, G30, G28.1, G30.1, G53, G92, G92.1
- Režimy pohybu: G0, G1, G2, G3, G38.2, G38.3, G38.4, G38.5, G80
- Režimy rychlosti posuvu: G93, G94
- Režimy jednotek: G20, G21
- Distance Modes: G90, G91
- Arc IJK režimy vzdálenosti: G91.1
- Režimy výběru roviny: G17, G18, G19
- Režim pro nástroj délky offsetu: G43.1, G49
- Režimy kompenzace: G40
- Režimy souřadnicového systému: G54, G55, G56, G57, G58, G59
- Režimy ovládání: G61
- Průběh programu: M0, M1, M2, M30*
- Ovládání chladicí kapaliny: M7*, M8, M9
- Ovládání vřetena: M3, M4, M5
- Platná příkazy bez přiřazení: F, I, J, K, L, N, P, R, S, T, X, Y, Z

3.2 Ovládání pomocí streamování G-kódu

V případě použití g-kódu musíme nejprve vytvořit jeho syntaxi, zahrnující počáteční nastavení, konfigurace krokových motorů a posléze pohyby os a zastavení.

Pro ovládání manipulátoru pomocí G-kódu využívám plně vybavenou g-kód platformu, používanou k propojení s pokročilými CNC řadiči jako GRBL, TinyG, g2core a Smoothieware. Název platformy je Universal Gcode Sender a je to samostatná aplikace psaná v jazyce Java, která zahrnuje všechny externí závislosti a lze ji použít na většině počítačů se systémem Windows, MacOSX nebo Linux (viz příloha) [9].

3.3 Návrh dalších rozšíření

V případě možného vylepšení můžeme diskutovat o konstrukčních a softwarových částech robotického manipulátoru.

V případě možného konstrukčního vylepšení by se jednalo například o přidání end-point bodů na každou osu, pro kontrolu maximálních a minimálních souřadnic a zamezení problémů při nesprávném nastavení pohybu. Jako další vylepšení bych se vyvaroval použití kokových lanek u kterých docházelo ke zbytečně velikému tření. Uvažoval bych o změně plastových trubiček pro klouzáni lanek v ukotvení pružiny (obrázek 23) za mosazné, z důvodu zlepšení plynulosti v pohybu.

Před vylepšení softwarové části bych využil nejprve jiné hardwarového rozhraní, kde nám pro naše účely stačilo Arduino a CNC Shield (obrázek 18), ale pro další testy a vylepšení bych využil výkonnější hardwarovou platformu.

Celý software, skládaný ze spouštěného scriptu nebo zasílání g-kódu, bych zaštitil potřebným GUI pro lepší orientaci v pohybech robotického manipulátoru. Zmíněný ovládací script se skládá převážně z testovacích sekvencí a pro vylepšení by bylo potřeba přeorganizovat celou strukturu kódu.

Závěr

Při vývoji jsem se potýkal především se systematickým řešením kalibrace, neboli nalezení koncového bodu robotického manipulátoru, kdy se mi vlivem okolních vlivů, chybě v konstrukci a nestálosti systému nedařilo stabilizovat a kalibrovat počáteční pozici.

Problém jsem následně vyřešil lepším upevněním pružin, vylepšením konstrukce a pozicováním pomocí akcelerometru. V průběhu testování se objevil nedostatek s vytištěnou částí pojezdového stavu, kdy se vlivem mechanickému pnutí uvolňovala kluzná ložiska. Vypadávání ložisek bylo vyřešeno přidáním další vrstvy epoxidového lepidla mezi obě součástky. Následně v průběhu vývoje manipulátoru jsem nalézal další možnosti vylepšení konstrukce, například přidáním ložiska na koncový bod trapézové tyče, zamezení uvolňování kluzných tyčí přidáním materiálu na vytištěnou kotvící desku a mnoho dalšího.

V poslední řadě jsem se snažil o zavedení automatické kalibrace při spuštění systému, kde jsem narazil na technický nedostatek použitého hardwaru.

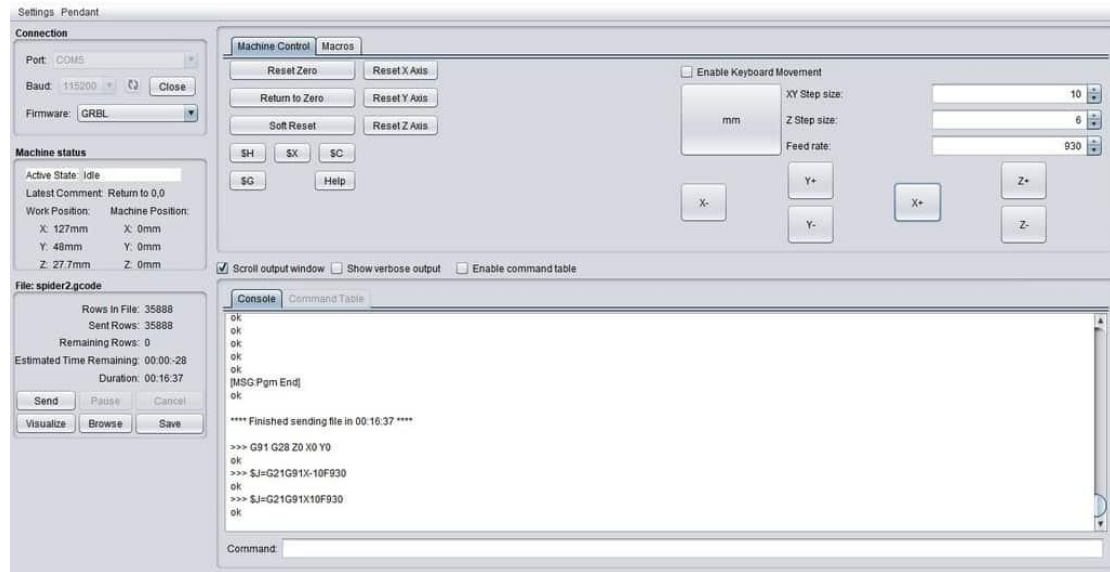
Zde se nabízí široké využití robotické ruky v oblasti práce ve zdravotnictví, jako například roboticky ovládaný endoskop, díky velkému množství stupňů volnosti manipulátoru najde i uplatnění v průmyslu a zemědělství, nebo například při kontrole těžko přístupných míst, částí technických staveb nebo reaktoru jaderné elektrárny. Jako další využití můžeme zmínit například záchranářství, kde se manipulátor může využít pro průchod skrze překážky pro pátrací nebo záchranné mise.

Seznam literatury

- [1] Kinematika robotů [online]. (c) 2015 [cit. 10.01.2021]. Dostupné z: http://cw.felk.cvut.cz/wiki/_media/courses/a3b99ro/robotismutnycz.pdf
- [2] Robotický manipulátor [online]. (c) 2014 [cit. 21.03.2021]. Dostupné z: <https://mcwhizzone.wordpress.com/2014/05/24/13-robot-manipulator/>
- [3] Synthesis and analysis of a flexible elephant trunk robot [online]. (c) 2006 [cit.21.4.2021]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Jingzhou-Yang-2/publication/220671097_Synthesis_and_analysis_of_a_flexible_elephant_trunk_robot/links/5b6c59f2a6fdcc87df701423/Synthesis-and-analysis-of-a-flexible-elephant-trunk-robot.pdf
- [4] Synthesis and analysis of a flexible elephant trunk robot [online]. (c) 2006 [cit. 10.12.2020]. Dostupné z: <https://www.ccad.uiowa.edu/sites/www.ccad.uiowa.edu.vsr/files/files/Continuum-Robot-AR.pdf>
- [5] Pohony s krokovými motorky [online]. (c) 2021 [cit. 19.10.2020]. Dostupné z: <https://adoc.pub/pohony-s-krokovymi-motorkyc027e23d846fc89b2610da084571f1b122588.html>
- [6] Krokový motor - princip [online]. (c) 2012 [cit. 16.03.2021]. Dostupné z: <https://www.mylms.cz/krokovy-motor-princip>
- [7] Krokové motory [online]. (c) 2013 [cit. 12.02.2021]. Dostupné z: <http://profirobot.cz/wp-content/uploads/2018/03/Krokov%C3%A9-motory.pdf>
- [8] Kinematics and the Implementation of an Elephant's Trunk Manipulator and Other Continuum Style Robots [online]. (c) 2002 [cit. 17.11.2020]. Dostupné z: https://iwalker.people.clemson.edu/Hannan_Walker_JRS.pdf
- [9] Universal Gcode Sender [online]. [cit. 26.04.2020]. Dostupné z: https://winder.github.io/ugs_website/

Přílohy

Příloha A



Příloha B

Setting	Value	Description
\$0	10	Step pulse time
\$1	25	Step idle delay
\$2	0	Step pulse invert
\$3	0	Step direction invert
\$4	0	Invert step enable pin
\$5	0	Invert limit pins
\$6	0	Invert probe pin
\$10	1	Status report options
\$11	0.010	Junction deviation
\$12	0.002	Arc tolerance
\$13	0	Report in inches
\$20	0	Soft limits enable
\$21	1	Hard limits enable
\$22	0	Homing cycle enable
\$23	0	Homing direction invert
\$24	25.000	Homing locate feed rate
\$25	500.000	Homing search seek rate
\$26	250	Homing switch debounce delay
\$27	1.000	Homing switch pull-off distance
\$30	1000	Maximum spindle speed
\$31	0	Minimum spindle speed
\$32	0	Laser-mode enable
\$100	250.000	X-axis travel resolution
\$101	250.000	Y-axis travel resolution
\$102	250.000	Z-axis travel resolution
\$110	100.000	X-axis maximum rate
\$111	100.000	Y-axis maximum rate
\$112	100.000	Z-axis maximum rate
\$120	10.000	X-axis acceleration
\$121	10.000	Y-axis acceleration
\$122	10.000	Z-axis acceleration
\$130	100.000	X-axis maximum travel
\$131	100.000	Y-axis maximum travel
\$132	100.000	Z-axis maximum travel