

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Přírodovědecká fakulta

**Laboratorní manipulátor pro manipulaci se
vzorky**

Bakalářská práce

Michal Studený

Školitel: doc. PaedDr. Petr Adámek, Ph.D.

České Budějovice 2019

Bibliografické údaje

Studený, M., 2019: Labaratorní manipulátor pro manipulaci se vzorky. [Laboratory manipulator for sample handling. Bc. Thesis, in Czech.] – p. 45, Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Anotace

Bakalářská práce pojednává o návrhu technického řešení a následném sestrojení laboratorního manipulátoru. Mezi hlavní aspekty a cíle patří řešení konstrukce, výběr vhodného pohonu (motorů), senzorů, řídicí jednotky a jiných součástí mechanismu. Další částí projektu je napsat program, který bude po nahrání do mikrokontroléru celý manipulátor řídit.

Manipulátor je schopný uchopit předmět a přemístit nebo ho přidršet v požadované pozici. Díky čidlům a přesnému řízení motorů je možné tyto úkony opakovat v naprogramovaných cyklech.

Hlavní důraz je kladen na funkčnost a dosažené parametry manipulátoru.

Annotation

The Bachelor thesis deals with technical solution design and ensuing constructing of laboratory manipulator. Among main aspects and goals belong solution of construction, selection of appropriate drive (motors), sensors, controlling unit and other parts of mechanism. The next part of the project is to write a program that will control the entire manipulator after uploading it to the microcontroller.

The manipulator is able to grip the object and move it or hold it in the required position. Thanks to the sensors and precise motor control, it is possible to repeat these operations in programmed cycles.

The main emphasis is on functionality and achieved parameters of the manipulator.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejich internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích, dne 8. dubna 2019

.....

Michal Studený

Poděkování

Děkuji školiteli své bakalářské práce doc. PaedDr. Petru Adámkovi, Ph.D. za odborné vedení, čas věnovaný konzultacím, cenné rady a připomínky a v neposlední řadě také za poskytnutí několika potřebných komponent.

Obsah

1 Úvod	1
2 Druhy manipulátorů a robotů	3
3 Návrh manipulátoru	6
3.1 Konstrukční řešení	6
3.2 Pohon	8
3.2.1 Krokový motor	9
3.2.2 Modelářské servo	18
3.3 Řídící jednotka	19
3.3.1 Arduino	19
3.3.2 A4988	23
3.4 Senzorika	23
3.4.1 Mechanický koncový spínač	24
3.4.2 Světelná závora	25
4 Realizace	27
5 Ověření funkce a dosažené parametry	41
6 Závěr	42
Literatura	45

1. Úvod

S nástupem masové výroby a výrobními linkami přichází potřeba automatizovat a optimalizovat výrobní procesy. Tzn. je urychlit, zpřesnit, synchronizovat, aby stroje mohly bezchybně spolupracovat a komunikovat mezi sebou. Proto se na scéně objevují manipulátory a roboty schopné všechny tyto požadavky splnit. Dochází k postupnému odstraňování lidského faktoru z výroby. Člověk není tak přesný, dělá chyby, musí odpočívat. Manipulátory jsou schopné pracovat nepřetržitě 24 hodin denně, 7 dní v týdnu. Mezi jejich další výhody patří velký dosah a možnost práce v prostředích nebezpečných pro člověka (vysoké teploty, chemikálie, nepřístupná místa, jedovaté výpary atd.).

Z široké oblasti mechatroniky mě nejvíce zaujala robotika, a proto jsem se rozhodl tomuto odvětví automatizace věnovat ve své bakalářské práci. Za téma jsem si vybral laboratorní manipulátor pro manipulaci se vzorky. Cílem práce bylo po stručném teoretickém úvodu týkajícím se robotů a manipulátorů navrhnout technické řešení manipulátoru, jeho pohon, konstrukci, řízení, sensoriku a software. Dále sestrojil tento laboratorní manipulátor a prakticky ověřit jeho funkce.

Práce je členěna do 4 kapitol. V první kapitole stručně shrnuji základní definice a teoretické poznatky týkající se druhů robotů a manipulátorů. Druhá kapitola se zabývá návrhem manipulátoru. Zde řeším a odůvodňuji navrženou konstrukci, geometrii a kinematickou strukturu manipulátoru a také výběr použitých součástí. Tato kapitola je rozdělena do několika částí, v každé z nich řeším jeden důležitý prvek manipulátoru – pohon, řídicí jednotku a sensoriku. Třetí kapitola popisuje samotné sestavení manipulátoru, postup, použité díly a součástky a naprogramování. Poslední kapitola se zabývá ověřením funkce manipulátoru a jeho dosažených parametrů.

Robotický manipulátor je určený k manipulaci s předměty, které může odebírat, přemisťovat, přidržovat, odkládat či zakládat. Mezi specifická využití manipulátoru patří např. zakládání předmětů ve výrobní lince.

V případě mého zařízení se jedná o laboratorní manipulátor, který musí být schopný jemně zacházet s drobnými a křehkými vzorky. Jednoduché laboratorní manipulátory většinou slouží v laboratoři jako tzv. dip-coaters (obr. 1.1) k potahování mikroskopových sklíček nebo jiného

laboratorního skla tenkým filmem roztoku.



Obrázek 1.1: Mnohonásobný dip-coater. Převzato z [1].

Dip-coater sjede se vzorkem (vzorky) do roztoku, tam ho definovanou dobu nechá ponořený a poté ho předem nastavenou rychlostí vytáhne [2]. Díky přesně naprogramovaným časům a rychlostem zůstává na stěněch skla požadovaná vrstva roztoku.

2. Druhy manipulátorů a robotů

Nejprve je třeba uvést základní definice týkající se manipulátorů a robotů. Dále představit jejich dělení na základě specifických kritérií.

Jedno z původních rozdělení robotů a manipulátorů bylo podle hlediska řízení a programování [3]:

1. **Manipulátor** – jednoúčelový manipulátor, manipulátor s pevným programem.
2. **Synchronní manipulátor** – zařízení řízené dálkově člověkem – operátorem, tvoří s činností operátora uzavřenou smyčku.
3. **Robot** – manipulátor s pružným programem.
4. **Adaptivní robot** – robot reagující na změny pracovní scény.
5. **Kognitivní robot** – robot s určitou mírou umělé inteligence.[3]

Dnešní definice manipulátoru je mírně odlišná a především specifičtější. Podle současné literatury je manipulátor druh průmyslového robota určeného k vykonávání manipulačních úkonů ve strojírenské výrobě, zpravidla pracujícího v cyklickém režimu. Z definice ISO vyplývá pro manipulátor tato charakteristika [4]: Pokud má zařízení tohoto typu méně než 3 pohybové osy, nebo více než 3 osy, ale nejsou přeprogramovatelné, jde vždy o manipulátor.

V případě konstruovaného manipulátoru se nejedná o průmyslový robot, ale o laboratorní robot. Tento robot je navržený k práci v laboratorním prostředí a až na tuto odlišnost pro něj předchozí definice plně platí.

S postupujícím časem a vývojem se nám objevují mnohé varianty robotů a manipulátorů a pro jejich aplikace a odlišení je potřeba používat více sofistikovaná rozdělení. Tato zařízení se mohou dělit podle různých kritérií [3]. Mezi tato kritéria patří: počet stupňů volnosti, kinematické struktury, použité pohony, geometrie pracovního prostoru, pohybové charakteristiky, způsob řízení a programování atd.

Klasifikace podle kritérií

Podle [3] se roboty dělí:

1. Podle počtu stupňů volnosti robotu

Ideální univerzální manipulátor by měl dosahovat šest stupňů volnosti, aby mohl volně pohybovat objektem ve všech třech dimenzích prostoru.

- (a) **Víceúčelový robot** (*general-purpose robot*) – 6 stupňů volnosti, volný pohyb a jednoznačný popis ve všech třech dimenzích prostoru.
- (b) **Redundantní robot** (*redundant robot*) – více než 6 stupňů volnosti, lepší manévrovatelnost (především při vyhýbání se překážkám nebo při provozu ve stísněných prostorech).
- (c) **Deficitní robot** (*deficient robot*) – méně než 6 stupňů volnosti, definovaný a postačující počet stupňů volnosti pro danou aplikaci.[3]

2. Podle kinematické struktury

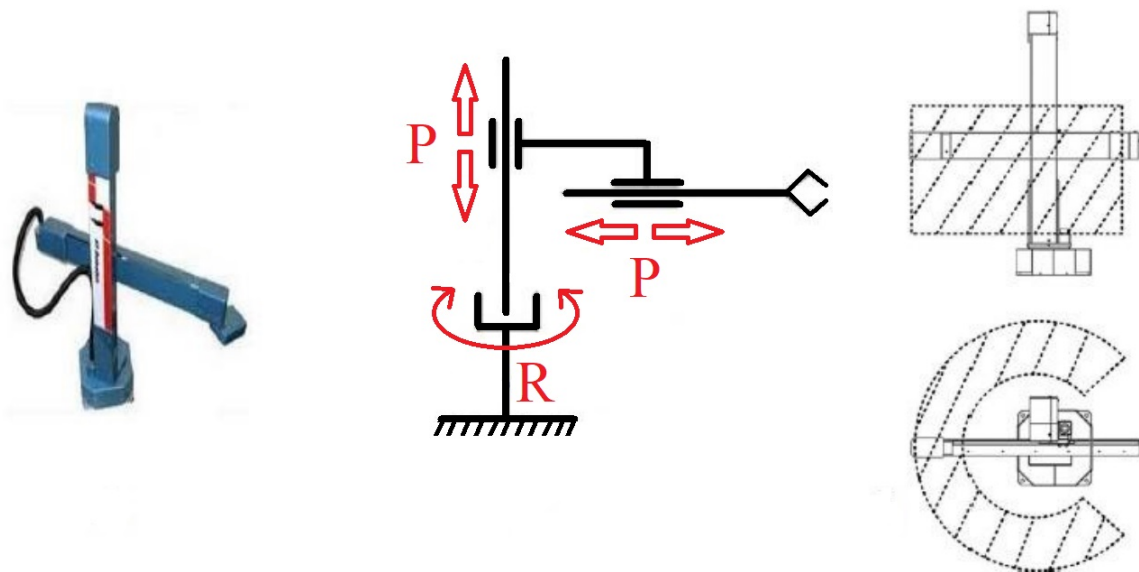
- (a) **Sériové roboty** (*serial robot* nebo *open-loop manipulator*) – otevřený kinematický řetězec, většinou jednodušší konstrukce a programování než paralelní roboty.
- (b) **Paralelní roboty** (*parallel manipulator*) – s uzavřeným kinematickým řetězcem manipulátoru, větší tuhost, nosnost a nižší setrvačnost než sériové roboty.
- (c) **Hybridní roboty** (*hybrid manipulator*) – kombinuje oba předchozí typy.[3]

3. Podle druhu pohonů

- (a) **Elektrické pohony** – nejčastější pohony, přesné ovládání polohy/natočení, většina manipulátorů používá stejnosměrné servomotory nebo krokové motory, popřípadě střídavé servomotory u větších robotů k dosažení větších výkonů (kroutících momentů a sil).
- (b) **Hydraulické pohony** – jejich doménou jsou větší nosnosti a síly.
- (c) **Pneumatické pohony** – dosahují velkých rychlostí, ale kvůli stlačitelnosti vzduchu nejsou přesné. Jsou omezené z hlediska řízení polohy.[3]

4. Podle geometrie pracovního prostoru

- (a) **Kartézský pracovní prostor** – tři na sebe kolmé posuvné vazby, lineární roboty s pracovním prostorem ve tvaru hranolu či kostky.
- (b) **Cylindrický pracovní prostor** – jedna rotační a dvě na sebe kolmé posuvné vazby, průmyslové nebo laboratorní manipulátory s pracovním prostorem ve tvaru válcového tělesa jako je na obr. 2.1.
- (c) **Sférický pracovní prostor** – dvě rotační a jedna posuvná vazba, roboty s pracovním prostorem ve tvaru kulového tělesa.
- (d) **Angulární pracovní prostor** – tři rotační vazby, robotická ramena s pracovním prostorem multiúhlového tělesa.
- (e) **Pracovní prostor robotů typu Scara** – dvě rotační a jedna posuvná vazba, roboty typu SCARA s pracovním prostorem ve tvaru prstence.[3]



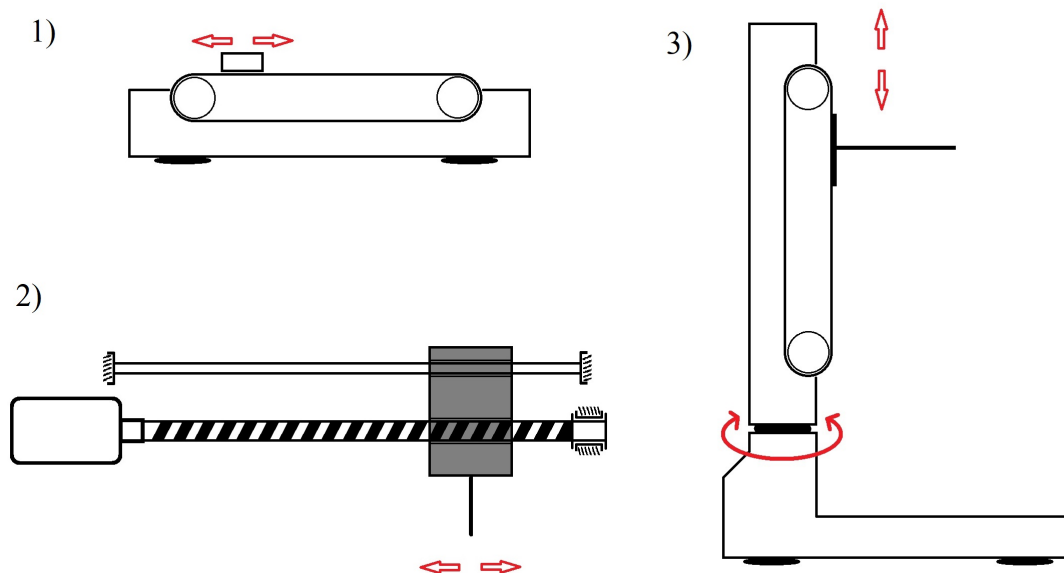
Obrázek 2.1: Manipulátor s cylindrickým pracovním prostorem. Upraveno podle [5].

3. Návrh manipulátoru

3.1 Konstrukční řešení

Prvním krokem při navrhování manipulátoru bylo zvolení vhodné konstrukce a geometrie manipulátoru. Zpočátku jsem zvažoval tři konstrukční typy (viz obr. 3.1):

- 1) **Horizontální pásový posuvník** – jednoduchý laboratorní dopravník s 1 stupněm volnosti vhodný k přepravování drobných předmětů nebo sypkých látek.
- 2) **Horizontální posuvník poháněný závitovou tyčí** – jednoduchý laboratorní manipulátor s 1 stupněm volnosti. Díky závitové tyči je schopný velmi přesně nastavit polohu. Může sloužit k přenášení např. zkumavek.
- 3) **Vertikální posuvník s rotací** – jednoduchý laboratorní manipulátor se 2 stupni volnosti schopný odebrat a přemístit předmět. Disponuje větším pracovním prostorem než dva předchozí návrhy.



Obrázek 3.1: Původní návrhy manipulátorů: 1) horizontální pásový posuvník, 2) horizontální posuvník poháněný závitovou tyčí, 3) vertikální posuvník s rotací. Vlastní tvorba autora.

Rozhodl jsem se pro manipulátor podobný dip-coateru (znázorněný na obr. 3.1 s č. 3), který bude mít 2 stupně volnosti a bude vykonávat jak posuvný, tak rotační pohyb.¹ Díky tomu bude mít manipulátor větší dosah, bude flexibilnější, a tudíž bude mít i více možností využití.

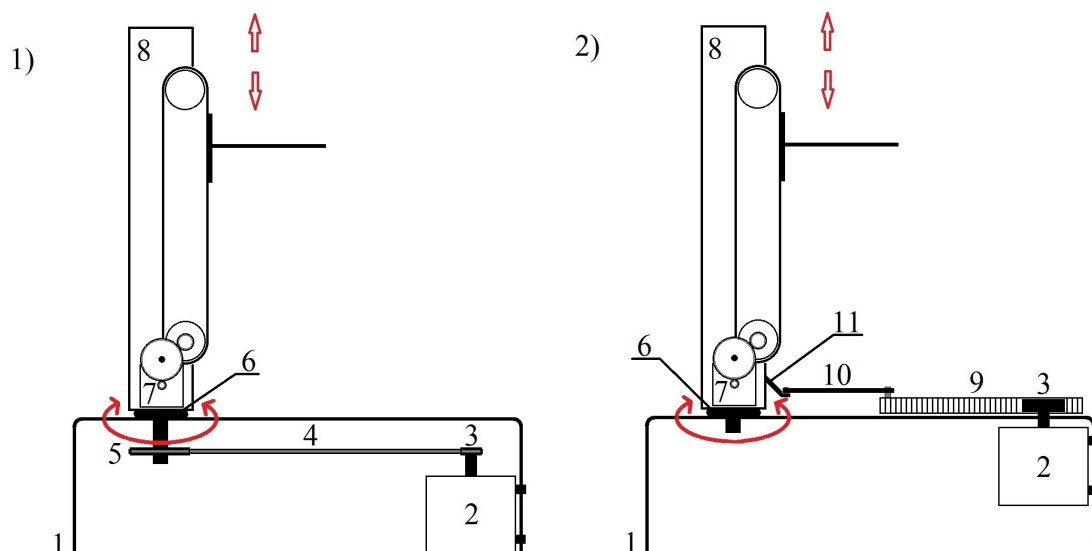
Bude se jednat o deficitního robota s otevřeným kinematickým řetězcem. Geometrie pracovního prostoru bude představovat přibližně výseč pláště válce – podobně jako cylindrický pracovní prostor (obr. 2.1), avšak pouze ve dvou dimenzích (bude zde chybět horizontální posuv). Celé zařízení bude napájeno stejnosměrným zdrojem. Manipulátor budou pohánět stejnosměrné elektrické motory.

Vertikální posuv bude realizován pojezdem z vyřazené tiskárny. Pojezd bude posazený na podstavci manipulátoru ve tvaru obráceného „U“ (obr. 3.2). Rotační pohyb pojezdu bude zajišťovat motor uložený v podstavci. Vytvořil jsem dva návrhy řešení (viz obr. 3.2):

- 1) **S ozubeným řemenem** – celý motor s hřídelí a pastorkem se nachází v podstavci, stejně tak ozubený řemen a řemenice vertikálního posuvu, která je uchycena na jeho spodní části. Rotační pohyb hřídele je přenesen na vertikální část manipulátoru přes pastorek motoru, ozubený řemen a řemenici.
- 2) **S ozubeným hřebenem** – motor je uložený pod horní plochou podstavce, jeho hřídel jí prochází a pastorek pak pohání ozubený hřeben, který klouže po povrchu. Hřeben za pomoci táhla připevněného ke klice tvoří páku a ta pootáčí v omezeném úhlu celým tělesem vertikálního posuvu.

Rozhodl jsem se použít řešení s ozubeným hřebenem. Hřeben i pastorek (původně ozubené kolo) jsem získal ze staré tiskárny. Nemusel jsem tedy shánět sestavu ozubeného řemene a dvou řemenic se specifickými parametry. Navíc u řešení s ozubeným řemenem bych měl problém s upevněním řemenice na osu vertikální otočné části manipulátoru z důvodu možného prokluzu.

¹většina dip-coaterů má 1 stupeň volnosti, konají pouze vertikálně posuvný pohyb



Obrázek 3.2: Návrhy řešení: 1) s ozubeným řemenem, 2) s ozubeným hřebenem (1 – podstavec, 2 – motor, 3 – pastorek, 4 – ozubený řemen, 5 – řemenice, 6 – axiální ložisko, 7 – motor s převodem, 8 – svislá část s vertikálním posuvem, 9 – ozubený hřeben, 10 – táhlo, 11 – klika).
Vlastní tvorba autora

3.2 Pohon

Pro pohon svého manipulátoru jsem si zvolil hybridní krokové motory a modelářské servo, který bude sloužit jako akční člen úchopu end efektoru.

Krokovým motorů jsem dal přednost před jinými typy motorů, neboť se o ně zajímám a jsem si vědom jejich výhod. U robotů a manipulátorů je důležité přesně kontrolovat polohu, rychlosti a zrychlení pohybů. Tyto požadavky dokáží nejlépe splnit právě krokové motory a servomotory, které jsou bez další sensoriky schopné řídit natočení své hřídele. U takovýchto zařízení jakými jsou robotické manipulátory je jejich aplikace jako pohonné jednotky asi nejlepší volbou.

Drobnějším zařízením, u kterých nejsou vyžadovány velké síly a kroučící momenty, postačí jako akční členy menší stejnosměrné stroje – např. hybridní krokový motor (obr. 3.3) či modelářské servo (obr. 3.11). Mezi výhody těchto elektrických pohonů patří jednoduchá zástavba, snadné použití, dobrá dostupnost a nízká pořizovací cena.



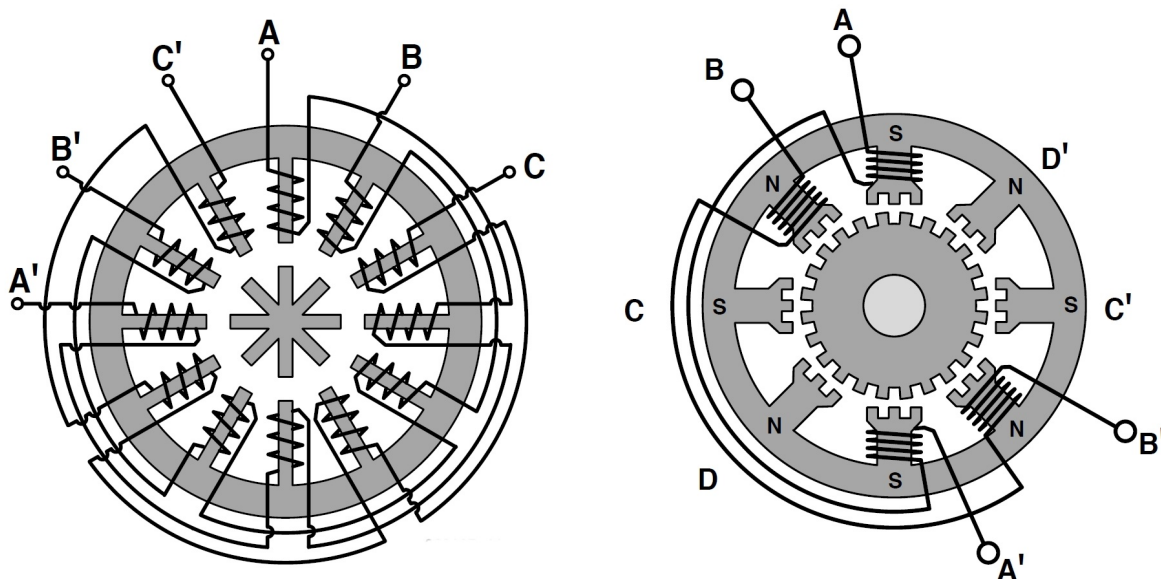
Obrázek 3.3: Hybridní krokový motor NEMA 17. Vlastní snímek autora.

3.2.1 Krokový motor

Krokový motor [7] (KM; *Step, stepping* nebo *stepper motor*) je točivý elektrický stroj, konkrétně bezkomutátorový stejnosměrný synchronní motor, u kterého je možné kromě řízení otáček také přesně řídit natočení rotoru. Motor je řízený impulzním napájením. Střídavým posíláním pulzů do vinutí, která jsou umístěna na výběžcích statoru, tedy dochází k tvoření a zanikání magnetického pole (mění se reluktance). Vzniklé magnetické pole pól rotoru následuje a tím se celý rotor pohybuje. Každý pulz se rovná změně polohy tzv. „kroku“, proto také tyto motory nazýváme krokovými. Na jednu otáčku rotoru je potřeba několik kroků. Jak je patrné z činnosti fungování KM, jejich hřídel se kvůli „skokovým/krokovým“ pohybům rotoru zapříčiněným změnami magnetického pole elektrickými pulzy netočí plynule nýbrž nespojitě.

Díky jejich jednoduché konstrukci se jedná o velmi spolehlivá zařízení. Jejich hlavními nevýhodami jsou nízká účinnost a náchylnost k rezonancím. Skládají se ze statoru obsahujícího dvojice vinutí (cívky), které mohou být zapojeny různými způsoby, a rotoru buď z magneticky měkkého, nebo tvrdého materiálu s vyniklými póly.[8]

Pokud je rotor tvořen feromagnetickým materiálem, mluvíme o KM s pasivním rotorem čili s proměnnou reluktancí (obr. 3.4 vlevo). Jeli rotor z permanentního magnetu, nazýváme KM motorem s aktivním rotorem [9]. V současné době se nejvíce používá kombinace obou zmíněných variant KM a tou je hybridní krokový motor (obr. 3.4 vpravo).



Obrázek 3.4: Schéma KM s pasivním rotorem (vlevo) a hybridního KM (vpravo).
Převzato z [11].

Většina krokových motorů má statorové a rotorové zuby. Statorové zuby jsou umístěny na statorových pólech směrem ke rotoru [12]. Na statorových pólech jsou namotána vinutí fází. U některých druhů KM se pojem pól a zub může zaměnit, protože mají tentýž význam (viz. obr. 3.4 vlevo). Nicméně to neplatí např. pro hybridní KM [8], ty mají konstrukci pólů jinou a na každém pólu je více zubů (viz. obr. 3.4 vpravo).

Rotorové zuby jsou umístěny na vnějším obvodu statoru a musí jich být vždy jiný počet než zubů statorových. Mezi počtem statorových zubů N_S a počtem rotorových zubů N_R platí následující vztah:

$$N_R = N_S \pm \frac{N_S}{m},$$

kde m je počet fází.[10]

Mezi další užitečné vztahy patří vzorec pro výpočet úhlu kroku α :

$$\alpha = \frac{360}{m \cdot N_R}, \quad (3.1)$$

kde N_R je počet zubů rotoru m počet fází a výsledné jednotky jsou ve stupních. Dále vzorec na výpočet počtu kroků na otáčku N_K :

$$N_K = \frac{360}{\alpha},$$

kde α je úhel kroku získaný výpočtem předchozího vzorce 3.1.[8]

Historie

Již v 19. století se vědci zabývali stroji s proměnlivou reluktancí. Ruský vědec Moritz Hermann Jacobi v roce 1834 vydal publikaci o elektromagnetických principech. Poprvé byl reluktanční motor použit k pohonu lokomotivy. Bylo to roku 1842 ve Velké Británii [10]. Lokomotiva však nedosahovala nijak značné rychlosti, jela pouhých 6 km/h.

První zmínky o krokových motorech pochází z 20. let 20. století z Velké Británie a později ze Spojených států. Poprvé byly využity v námořnictvu jako součást dálkově naváděných torpéd.[13]

Do širšího povědomí se však krokové motory dostaly až v 60. letech v souvislosti s nástupem polovodičové a výpočetní techniky [13]. Byly používány jako pohony v přesných polohovacích mechanismech (frézky), ve velkokapacitních diskových pamětech nebo v tiskárnách, plotterech atd.

Kolem roku 1970 dochází ke skutečnému rozšíření krokových motorů [13], o kterou se zasloužila především firma Sanyo výrobou řady hybridních krokových motorů. Využívat se začaly v periferiích počítačů (polohování hlaviček pevných a pružných disků, tiskárny, čtečky a děrovačky děrných štítků), NC stroje, pohony průmyslových robotů a manipulátorů, letecký průmysl a další.

Postupem času byly krokové motory v některých průmyslových aplikacích (manipulátory, roboty a další těžké stroje) nahrazeny dražšími ale výkonnějšími a moderními průmyslovými servomotory. Nicméně díky své nízké ceně, jednoduchosti, spolehlivosti a snadnému řízení se krokové motory používají dodnes – především jako pohony u 3D tiskáren, klasických tiskáren a plotterů, menších CNC strojů a jiných mechanismů, kde není potřeba tak velkých kroutících momentů a přídržných sil, které nejsou krokové motory schopné vyvinout.

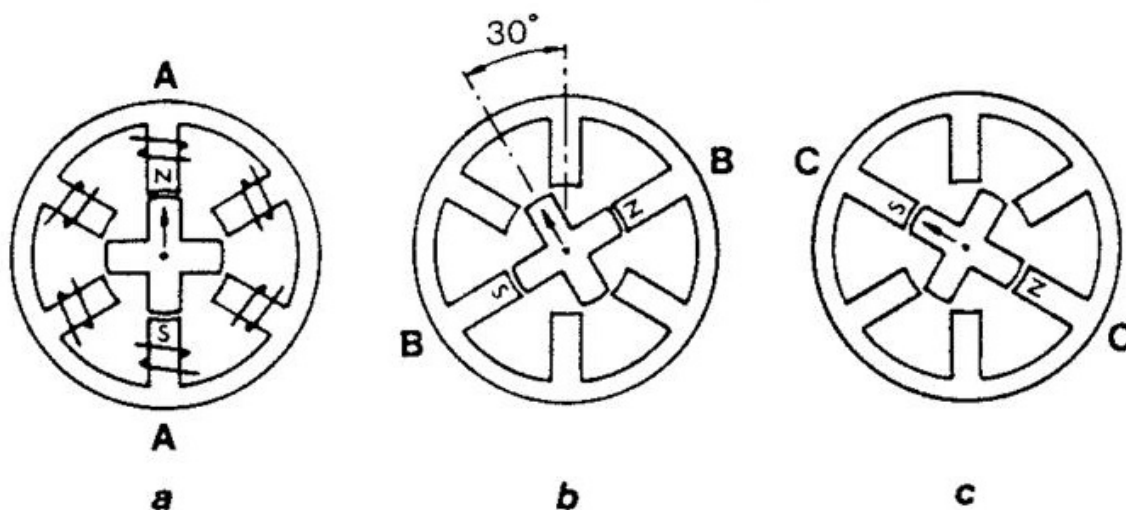
Krokový motor s pasivním rotorem

Krokový motor s pasivním rotorem [13], známý také jako reakční reluktanční nebo s proměnnou reluktancí (*variable reluctance stepper motor*), má rotor tvořený svazkem ocelových plechů

s výčnělky. Stator může být také ze svazku ocelových plechů nebo z jediného kusu oceli.

Směrem k rotoru vyčnívají ze statoru „výběžky“ neboli zuby [12], na kterých jsou navinuté měděné cívky jednotlivých fází (viz obr. 3.5).

Při průtoku proudu vinutími se ze statorových zubů stávají póly elektromagnetu, které jsou následovány zuby rotoru.



Obrázek 3.5: Schéma principu činnosti KM s proměnnou reluktancí. Převzato z [14].

Motor na obrázku 3.5 má šest statorových zubů a může být napájen třemi oddělenými stejnosměrnými zdroji. Rotor je vyroben ze svazku ocelových plechů a musí mít vždy odlišný, v tomto případě nižší, počet zubů než stator. Zde je rotor tvořen čtyřmi zuby. Díky tomu může být v daném okamžiku zarovnaný pouze jeden pár rotorových zubů se zuby statorovými.[8]

Na tomto nejjednodušším druhu KM si můžeme dobře vysvětlit činnosti krokových motorů včetně principu dělení kroků známého jako mikrokrokování.

Princip činnosti

Jako vzorové schéma k popisu činnosti použijí obr. 3.5 s kroky **a)**, **b)**, **c)**:

- a) Vinutí A je napájeno, tím se indukuje magnetické pole a nejbližší rotorové zuby jsou s ním osově zarovnané.
- b) Vinutí A je odpojeno od zdroje a je napájeno vinutí B. Rotor se začne pohybovat směrem doleva a zarovná se se zuby statoru, na kterých jsou cívky vinutí B. Z geometrie je jasné, že velikost jednoho kroku se rovná 30° .

- c) Aby se provedl další krok, přestane se napájet vinutí B a začne se napájet vinutí C. Poté se přestanou napájet cívky B a napájí se cívky vinutí A a rotor se opět pohybuje do polohy s nejmenší reluktancí a tím se dostáváme na začátek ke kroku a).[8]

Pro pohyb po směru hodinových ručiček spínáme fáze v sekvenci A, C, B, A,...., pro pohyb proti hodinovým ručičkám, jak je rozepsáno v předchozím odstavci – A, B, C, A,...., tedy v opačném pořadí.

Mikrokrokování

Pohyb hřídele KM není plynulý a kvůli velkým krokům se špatně polohuje. Chceme, aby se pohyboval co nejspojitěji a abychom měli velkou variabilitu polohování. Proto se snažíme o co nejmenší kroky, tedy o co největší počet kroků na otáčku. Jednoduše a logicky toho lze docílit zvyšováním počtů zubů rotoru a statoru. Ale i když máme KM s větším počtem zubů, pořád je pohyb hřídele dost nesouvislý a trhaný a kroky jsou moc velké. K dosažení menších kroků musíme přistoupit lepší a méně náročnou cestou. Řešením problému je metoda dělení kroků, také nazývána jako mikrokrokování (*microstepping*) [15]. Teoreticky existuje nekonečně úrovní mikrokrokování na 1/2 krok, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64,... Zjemněním krokování se navíc sníží vibrace a hlučnost motoru [8].

Prvním stupněm je půlení kroků (*halfstepping*). Z jednoho kroku uděláme dva (polo-)kroky (*halfsteps*) s polovičním úhlem pootočení.

S rotorem jsme znovu v pozici a) podle obr. 3.5 s buzeným vinutím A. Polovičního krokování docílíme tím, že pro další krok necháme na 50 % napájené vinutí A a společně s ním sepneme na 50 % vinutí B, takže zub rotoru se nastaví do pozice s nejmenší reluktancí, tedy do půlky cesty mezi statorové zuby A a B. Krok bude roven 15° . Pro další pootočení rotoru přestaneme budít vinutí A a vinutí B napájíme na 100 %. Rotor se nám pootočí opět o 15° směrem k pólu vinutí B, se kterým se zub rotoru následně zarovná. Sekvence napájených vinutí bude vypadat: A, AB, B, BC, C, CA, A, AB,... a pro reverzní pohyb opačně. V principu to znamená, že poměrným napájením dvou fází pro rotor vytvoříme, stabilní mezi-polohu, do které se pootočí.[15]

Mikrokrokování na 1/4 krok funguje obdobně. Vycházíme z obrázku 3.5. Fáze A je buzena 100 % proudem. Rotorový zub je zarovnán se statorovým pólem A. Aby došlo k požadovanému pootočení o $7,5^\circ$ napájíme vinutí A na 75 % a vinutí B na 25 %. Zub rotoru urazí 1/4 cesty k vinutí B. Následně budím fázi A i B na 50 %. Rotor se pootočí opět o $7,5^\circ$ a zub se bude

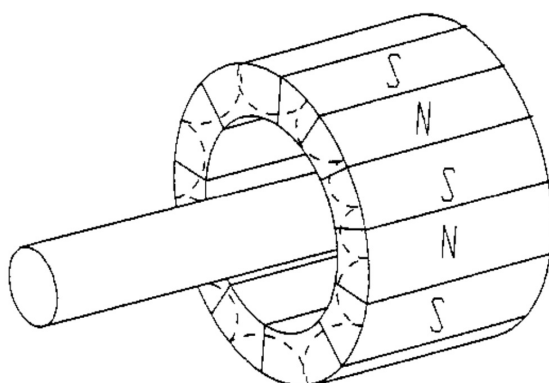
nacházet ve 2/4 mezi póly A a B. Pro další krok napájím A na 25 % a B na 75 %, tím docílíme pohybu zubu do 3/4 cesty k B. Přestaneme budít A, B napájíme 100 % a rotor se nám pootočí a zuby se zarovnajjí s póly fáze B. To samé proběhne s fázemi B a C.[15]

Mikrokrokování se nejčastěji používá u hybridních KM, o kterých se budu zmiňovat později v podkapitole 3.2.1.

Krokový motor s aktivním rotorem

U krokového motoru s aktivním rotorem [9] je rotor tvořen permanentním magnetem. Z obvodu rotoru vyčnívají směrem ke statoru zuby. Nicméně u některých druhů KM s aktivním rotorem je povrch rotoru hladký – nevyčnívají z něj žádné zuby (viz obr. 3.6).

Střídající se severní (N) a jižní (S) póly permanentního magnetu rotoru jsou obvykle radiálně orientované a tvoří válcový útvar (viz obr. 3.6).[12]

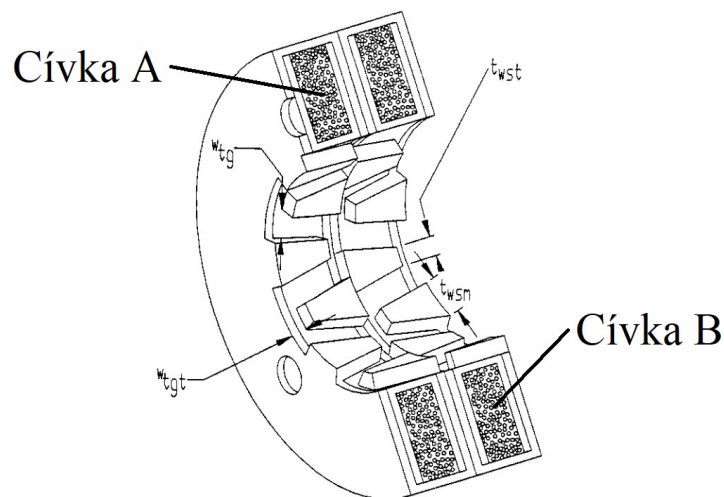


Obrázek 3.6: Uspořádání pólů rotoru. Převzato z [12].

Stator [12] je tvořen dvěma částmi („kapslemi“), přičemž každá část má stejný počet zubů jako je počet pólů rotoru. „Kapsle“ jsou vůči sobě pootočený o jednu polovinu zubu tak, aby se zuby vzájemně nepřekrývaly. V každé „kapsli“ je navinuta cívka jedné z fází (viz obr. 3.7).

Princip činnosti

Když cívkou A teče proud, rotor zarovná své póly se zuby napájené části statoru opačné polarity. K dalšímu kroku je potřeba přestat napájet cívku A a začít napájet cívku B, tím se motor opět pootočí. To samé pro následující kroky s tou výjimkou, že jsou cívky napájeny proudem s opačnou polaritou. Sekvence napájení je +A, +B, -A, -B, +A atd. nebo v opačném pořadí pro otáčení opačným směrem.[12]



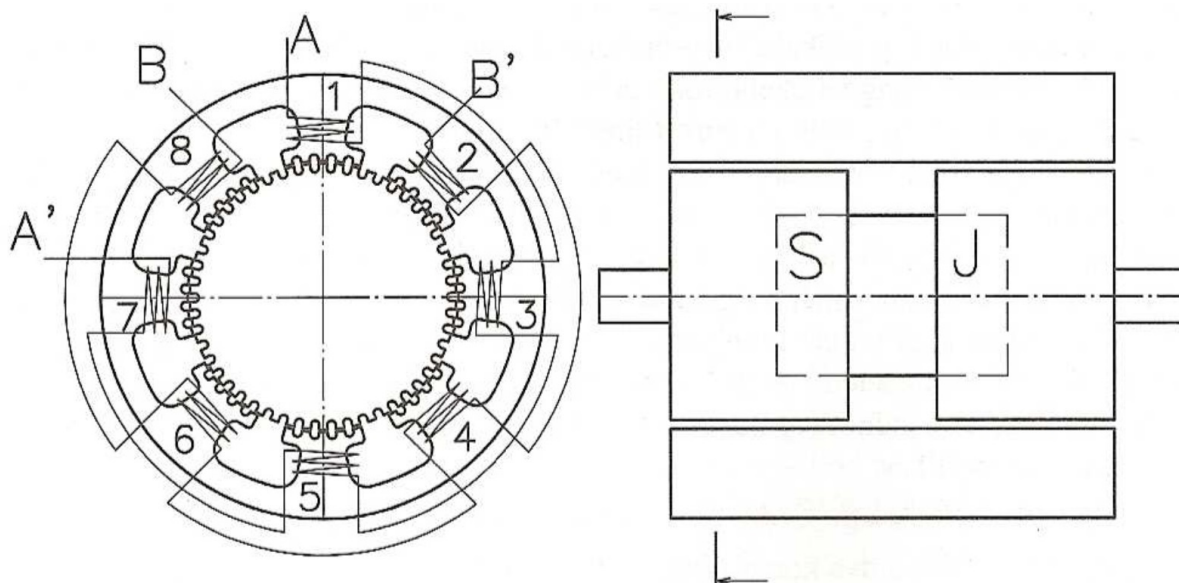
Obrázek 3.7: Stator. Upraveno podle [12].

Hybridní krokový motor

Hybridní krokový motor [13] je nejpoužívanější druh krokových motorů s nejlepšími parametry. Vyniká především přesností. Nazývá se hybridní, protože jsou v něm skloubeny prvky z reluktančního krokového motoru a z krokového motoru s aktivním rotorem.

Podle úhlu natočení na jeden krok existuje mnoho verzí motoru: od $0,9^\circ$ do $3,6^\circ$. Avšak nejznámější verze je hybridní krokový motor s úhlem natočení jednoho kroku o $1,8^\circ$ (*1,8° step-angle motor*). Jeho stator (velmi podobný jako krokový motor s pasivním motorem) je tvořen osmi hlavními pólovými nástavci s pěti zuby na „obloukovitých“ vrcholech. Na nástavcích je vinutí cívek. Rotor se skládá z permanentního magnetu ve tvaru válce a z obalu, který má zpravidla dvě nebo čtyři části prstenců s 50 zuby o stejné šířce jako rotorové. Zuby na prstencích jižního a severního pólu rotoru jsou vzhled k sobě pootočený o $7,2^\circ$, aby docházelo ke správnému zarovnání zubů jižních a severních pólů rotoru a statoru při otáčení.[12]

Když není žádné z vinutí napájeno, magnetický tok je tvořen pouze permanentním magnetem rotoru, a tím je rotor držen v klidové poloze. Nicméně přídržná síla je velmi malá a s rotorem jde (např. rukou) snadno otáčet.

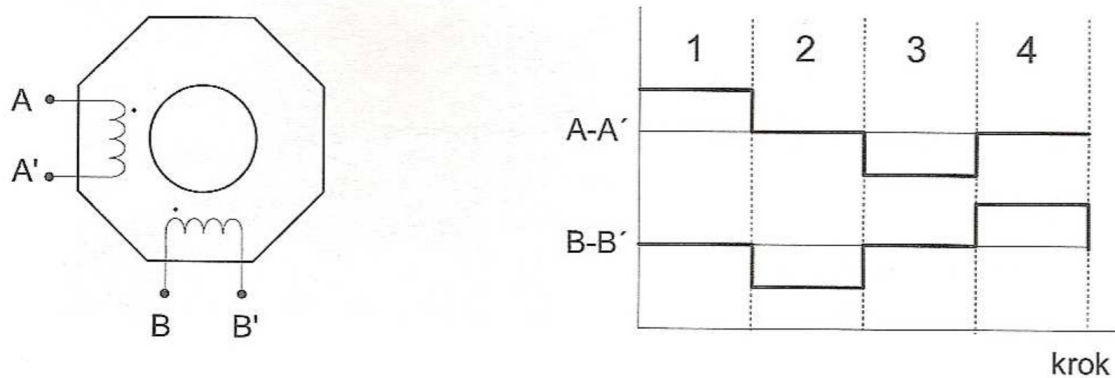


Obrázek 3.8: Řez dvoufázovým hybridním KM s úhlem kroku $1,8^\circ$. Převzato z [13].

Princip činnosti

Jak je patrné z obr. 3.8, první fázi AA' tvoří vinutí 1, 3, 5 a 7 a druhou fázi BB' vinutí 2, 4, 6 a 8. Napájíme-li fázi A kladným proudem, jsou póly 1 a 5 magnetizovány jižně a póly 3 a 7 severně. Tudíž jižně magnetizované póly 1 a 5 přitahují severní rotorové zuby a severně magnetizované póly 3 a 7 se zarovnají s jižními rotorovými zuby.[8]

Aby se rotor pootočil o krok, je potřeba přestat napájet vinutí A a začít napájet vinutí B. Podle polarity napájení vinutí B dosáhneme požadovaného směru pootočení. Když si napíšeme sekvenci spínání (buzení) fází v pořadí +A, -B, -A, +B, +A atd. (obr. 3.9 vpravo) dojdeme ke zjištění, že se rotor začne otáčet ve směru hodinových ručiček. Naopak spínáme-li fáze v pořadí +A, +B, -A, -B, +A atd. rotor se bude otáčet v opačném směru, tedy proti směru hodinových ručiček.[13]

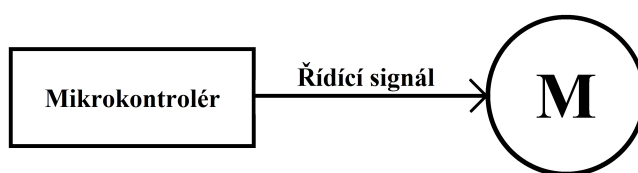


Obrázek 3.9: Zapojení vinutí dvoufázové HKM s bipolárním zapojením fází (vlevo) a jeho čtyřtaktní řízení (vpravo). Převzato z [13].

K řízení natočení hřídele KM stačí otevřený systém (*open-loop system*) (znázorněn na obr. 3.10), což znamená, že není potřeba zpětné vazby. Kolik pulzů se do motoru pustí, tolik kroků provede. To vše řídí mikrokontrolér prostřednictvím nahraného programu. Celkový úhel natočení hřídele β se vypočítá ze vztahu:

$$\beta = N_k \cdot \alpha,$$

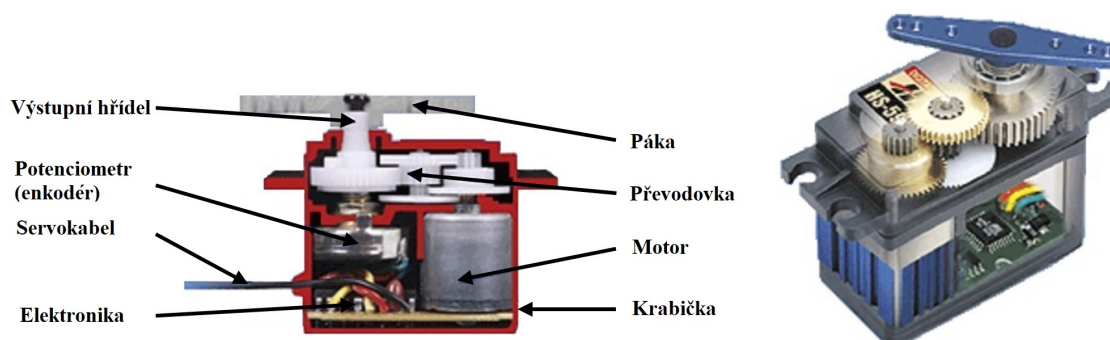
kde N_k je počet kroků a α úhel natočení jednoho kroku ve stupních. Výsledné jednotky vyjdou také ve stupních.



Obrázek 3.10: Otevřený systém řízení. Vlastní tvorba autora.

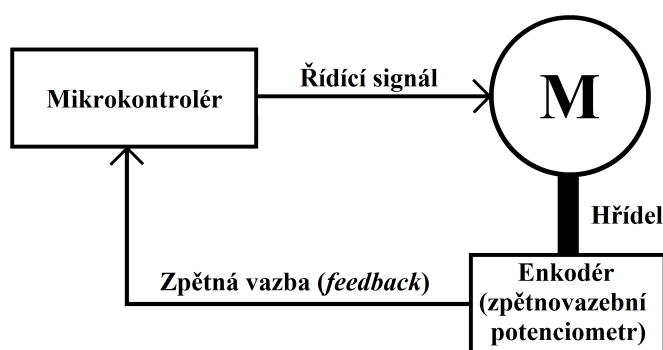
3.2.2 Modelářské servo

Modelářské servo [16] je zařízení skládající se ze stejnosměrného elektromotoru, převodovky a řídicí elektroniky. Kromě klasického převodu sil nebo rychlostí převodovka u modelářského serva také převádí velikost úhlu natočení z motoru na zpětnovazební potenciometr.



Obrázek 3.11: Popis stavby modelářského serva. Upraveno podle [13].

Potenciometr snímá polohu natočení výstupního hřídele. Jedná se o uzavřený systém se zpětnou vazbou (*Closed-loop system with feedback*) (znázorněn na obr. 3.12) a jde tedy o odlišný systém řízení polohy než u krokových motorů.



Obrázek 3.12: Uzavřený systém řízení. Vlastní tvorba autora.

Z modelářského serva vedou tři kabely. Dva vodiče slouží pro napájení serva (5 V a 0 V) a třetím kabelem do serva přichází řídicí signál obdélkových pulzů.[17]

Pro řízení natočení [13] se tedy používá pulzně šířkové modulace (*PWM*) s frekvencí asi 50 Hz. Perioda signálu je 20 ms a jeho šířka $1 \div 2$ ms. Tyto hodnoty odpovídají maximálním

otočením od -90° do $+90^\circ$ od střední polohy, které odpovídá šířka signálu 1,5 ms.

O vyhodnocování a natáčení motoru se stará řídicí elektronika [16], která porovnává aktuální natočení výstupního hřídele podle hodnoty na zpětnovazebním potenciometru s požadovaným natočením a otočí motorem potřebným směrem.

3.3 Řídicí jednotka

Pro řízení celého manipulátoru jsem si vybral mikrokontrolér Arduino zejména proto, že se s ním jednoduše pracuje – při použití není potřeba znát pokročilé programování, vývojová prostředí pro programování Arduina je možné nainstalovat na většinu operačních systémů osobních počítačů, se kterými lze samotný mikrokontrolér lehce propojit atd. Zařízení je také velmi rozšířené a jsou k němu dostupné různé návody, příručky, zpracované projekty, schémata zapojení a další informace usnadňující vlastní tvorbu. Díky své multifunkčnosti je tato platforma vhodná k navrhování a prototypování. Další výhodou Arduina je, že patří do skupiny open-source projektů, tudíž se uživatel nemusí obávat, že by svou vlastní kreativitou, doděláváním či předěláváním samotného mikrokontroléru porušoval autorská práva. V neposlední řadě je jeho velkou předností cenová dostupnost.

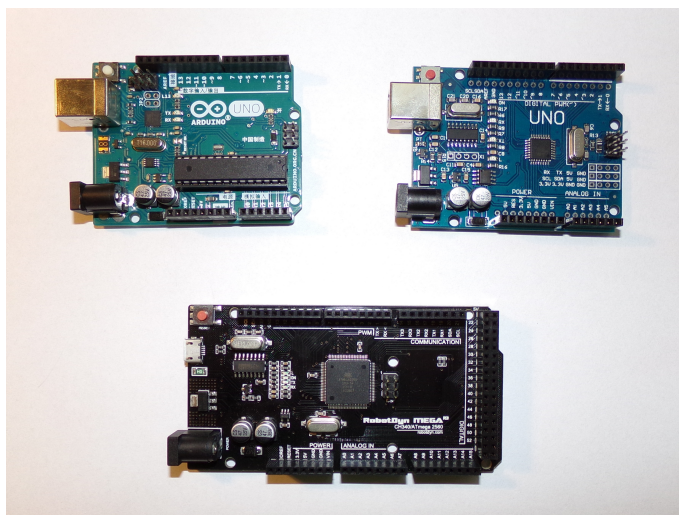
K buzení KM mi slouží ovladač A4988, který byl součástí balení Arduina Mega s shieldem a dalším příslušenstvím pro tvorbu vlastní 3D tiskárny. Vyhledal jsem si bližší informace o ovladači, návod na jeho zapojení a napsání kódu v Arduino IDE pro A4988. Ovladač mě svou funkčností a jednoduchostí zaujal, a proto jsem se ho rozhodl použít ve svém projektu.

3.3.1 Arduino

Arduino je jednodeskový počítač s procesorem ATmega od firmy Atmel [18]. Řadí se mezi tzv. open-source software (OSS) a hardware projekty (OSH) [19].

„U OSS se sdílí kód softwarového řešení. U OSH jsou volně dostupné všechny podklady potřebné k designu a výrobě vlastního hardwaru. Jedná se například o mechanické výkresy, schémata, kusovníky, vrstvy desek plošných spojů, zdrojový kód HDL, či data o rozvržení součástek.“ [19]

Platforma Arduino je vhodná k výuce programování, k prototypování, pro hobby projekty a nadšence z oblasti elektroniky, pro umělce a designéry, kteří využívají elektroniku při své



Obrázek 3.13: Druhy mikrokontrolérů platformy Arduino. Vlastní snímek autora.

kreativní činnosti. Nicméně není vhodná do konečných a sériově vyráběných produktů a nesmí být použita tam, kde na funkcionalitě, stabilitě a bezpečnosti systému závisely lidské životy a zdraví uživatelů. Navíc jednoduchost programování a použití platformy je na úkor výkonu a pokročilých možností a to zkušené konstruktéry, programátory, vývojáře aj. omezuje a zne-možňuje jim vytěžit z hardwaru maximum.[19]

Hardware

Většina Arduino desek obsahuje 8-bitové Atmel AVR mikroprocesory (ATmega8, ATmega168, ATmega328, ATmega1280, ATmega 2560), sběrnice (I²C nebo SPI), paměti (flash, RAM, EEPROM), časovace (např. Watchdog), A/D a D/A převodníky, analogové a digitální vstupně/výstupní piny, tlačítko reset a další. Pro komunikaci s PC se používá sériový port USB, Ethernet port nebo bluetooth modul pro bezdrátovou komunikaci. Na některých deskách dokonce najdeme i slot pro micro SD karty.[18]

Mikroprocesor AVR

Mikroprocesory AVR pracují se třemi typy paměti [19]:

1. **Flash paměť** – Programovaná paměť (PROGMEM), kde je uložen řídicí program. Paměť je non-volatilní – po odpojení napájení je obsah zachován.
2. **RAM** – Statická paměť s náhodným přístupem. Ukládají se do ní hodnoty proměnných běžícího programu. Paměť RAM je volatilní – po vypnutí napájení se paměť vymaže

a data nelze obnovit.

3. **EEPROM** – Non-volatilní paměť, do které se za běhu mikrokontroléru ukládají informace dlouhodobějšího charakteru (např. konfigurační parametry, nastavení).

Součástí mikroprocesorů AVR je také časovač Watchdog a systém Bootloader [19]:

1. **Watchdog** – Elektronický časovač, který při výskytu chyby restartuje zařízení. Watchdog neustále odpočítává, při správném chodu počítadlo v pravidelných intervalech nuluje. Jakmile dojde k prodlevě nebo ke zdržení v důsledku chyby (většinou jde o zacyklení, neproveditelný příkaz...), odpočítávání se nestihne vynulovat a když dojde ke konci, automaticky restartuje systém.
2. **Bootloader** – Je to systém podobný BIOSu, který se spustí při zapnutí zařízení. Bootloader je uložený ve flash paměti a provádí tyto dvě hlavní funkce [19]:
 - (a) Očekává nové naprogramování zařízení (uložení hlavního programu do aplikační části flash paměti).
 - (b) Pokud k novému naprogramování nedojde, načte a spustí původní program, který je uložený v aplikační části flash paměti.

Vstupy a výstupy, tzv. *GPIO (general purpose input–output)* piny [19], se u mikroprocesorů AVR nastavují pomocí tří 8-bitových registrů: **DDRx** (Data Direction Register), **PORTx** (Pin Output Register) a **PINx** (Pin Input Register).

Nejrozšířenější deska, Arduino Uno [18], poskytuje 14 I/O digitálních a 6 analogových pinů, z čehož 6 digitálních pinů lze použít jako řízený výstup PWM signálu.

Software

Kód programu pro Arduino a mikroprocesory AVR lze psát v mnoha programovacích jazycích (Java, C, C++, atd.) na low-level úrovni. Arduino je tolik oblíbené díky tomu, že k programování používá vlastní vývojové prostředí Arduino IDE, které „sázení“ kódu velmi usnadňuje.

Arduino IDE

Jak již bylo řečeno, Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) je vývojové prostředí pro platformu Arduino. Jako programovací jazyk se v tomto vývojovém prostředí používá Wiring, který byl vytvořený pro programování mikrokontrolérů bez specifických znalostí hard-

waru zařízení. Vychází z dalšího OS projektu Processing a podobá se jazyku C++. Hlavní strukturou jeho kódu jsou dvě funkce [19]:

- **void setup ()** – funkce, která proběhne pouze jednou a to hned na začátku po zapnutí či restartování programu. Většinou obsahuje počáteční nastavení. Jedná se například o definici vstupních a výstupních pinů nebo volání inicializačních a kalibračních funkcí.
- **void loop ()** – spustí se až po doběhnutí funkce setup () a provádí se cyklicky stále dokola.

The image shows a screenshot of the Arduino IDE interface. The title bar reads "dioda | Arduino 1.8.7". The menu bar includes "Soubor", "Úpravy", "Projekt", "Nástroje", and "Nápověda". The toolbar contains icons for file operations and execution. The main text area shows the following code:

```
int d = 400 ;

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(9600);
  pinMode(3, OUTPUT);
  pinMode(4, OUTPUT);
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  digitalWrite(3, HIGH);
  delay(d);

  digitalWrite(3, LOW);
  delay(d);

  digitalWrite(4, HIGH);
  delay(d);

  digitalWrite(4, LOW);
  delay(d);
}
```

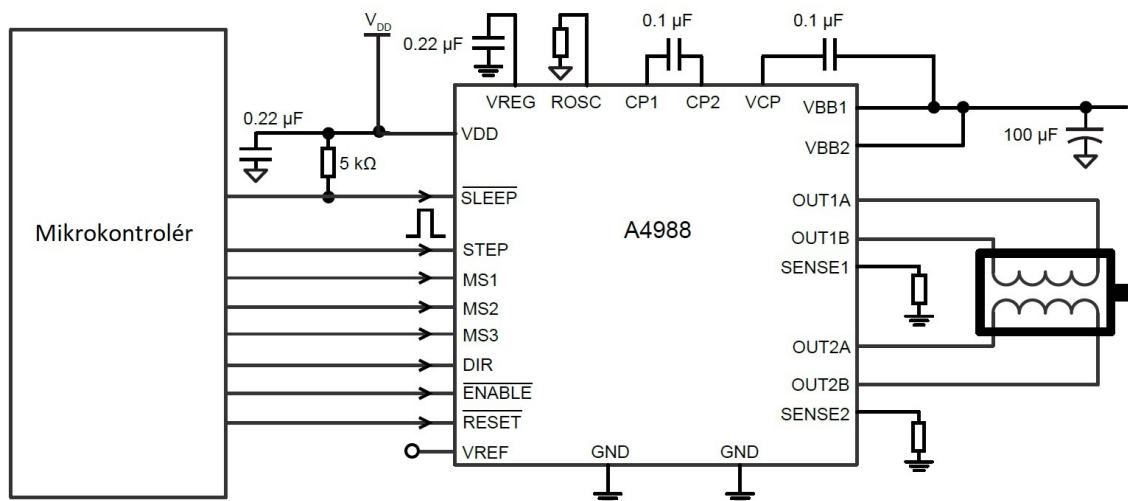
The status bar at the bottom indicates "23" and "Arduino/Genuino Uno na COM4".

Obrázek 3.14: Prostředí Arduino IDE s kódem na blikání diod. Vlastní tvorba autora.

Arduino IDE překládá příkazy z high-level úrovně napsané jazykem Wiring do low-level úrovně a nastavuje registry [19]. Jako příklad bych uvedl příkazy digitalWrite, digitalRead nebo INPUT a OUTPUT, kterými deklarujeme nastavení vstupů a výstupů.

3.3.2 A4988

A4988 [20] je mikrokrokový ovladač (driver) s vestavěným překladačem („translátorem“) pro řízení KM. Driver je navržený k ovládání bipolárních KM v celo, 1/2, 1/4, 1/8 a 1/16 krokových módech s výstupní kapacitou až 35 V a ± 2 A.



Obrázek 3.15: Schéma a zapojení ovladače A4988. Upraveno podle [20].

3.4 Senzorika

Jak už bylo řečeno dříve u KM se dá snadno řídit natočení hřídele, nicméně při spuštění zařízení (např. manipulátoru) se na rozdíl od modelářského serva nedá počáteční hodnota natočení zjistit. Ke zjištění tohoto parametru je zapotřebí další sensoriky. Abych mohl kontrolovaně otáčet KM a tím pohybovat manipulátorem, vybral jsem koncové senzory k inicializaci os. Zvolil jsem mechanické koncové spínače a světelnou závoru, které se používají u 3D tiskáren a malých CNC frézek. Tato čidla jsou kompatibilní s Arduinem a jsou také určena pro kutily a elektrotechnické nadšence na tvorbu různých robotů, vlastních 3D tiskáren a CNC frézek a podobných doma vyrobených strojů.

Senzor

Dle [21] je senzor definován jako „*funkční prvek tvořící vstupní blok měřicího řetězce, který je v přímém styku s měřeným prostředím. Místo pojmu senzor se používají též termíny snímač, převodník (angl. transducer) nebo detektor. Citlivá část senzoru se někdy označuje jako čidlo. Senzor snímá sledovanou fyzikální, chemickou nebo biologickou veličinu a transformuje ji na výstupní (měronosnou) veličinu – nejčastěji analogový nebo číslicový elektrický signál.*“

Čidla se u robotů a manipulátorů používají (jako vstupní veličiny) k zajištění zpětné vazby. Tím získáváme informace o systému nebo o jeho okolí potřebné k řízení samotného stroje. Mezi tato čidla patří např. senzory polohy ramen pro inicializaci os, teplotní čidla, čidla rychlosti nebo zrychlení a další.

Čidla polohy

Čidla polohy se řadí mezi nejdůležitější části sensoriky systému. U robotů a manipulátorů je nezbytné znát přesnou polohu os, rychlost a zrychlení jejich pohybů a zajistit tak další bezchybné posuvy a natočení.

Nejčastěji používané senzory polohy jsou koncové spínače (*endtop*), enkodéry a resolversy.

Koncový spínač je jednoduchý senzor, který má za úkol sledovat, zda-li bylo dosaženo určité polohy či nikoliv. Existuje mnoho druhů koncových spínačů. Rozdělujeme je podle použití, podle principu snímání (optické, mechanické, piezoelektrické, indukční...) atd.[21]

3.4.1 Mechanický koncový spínač

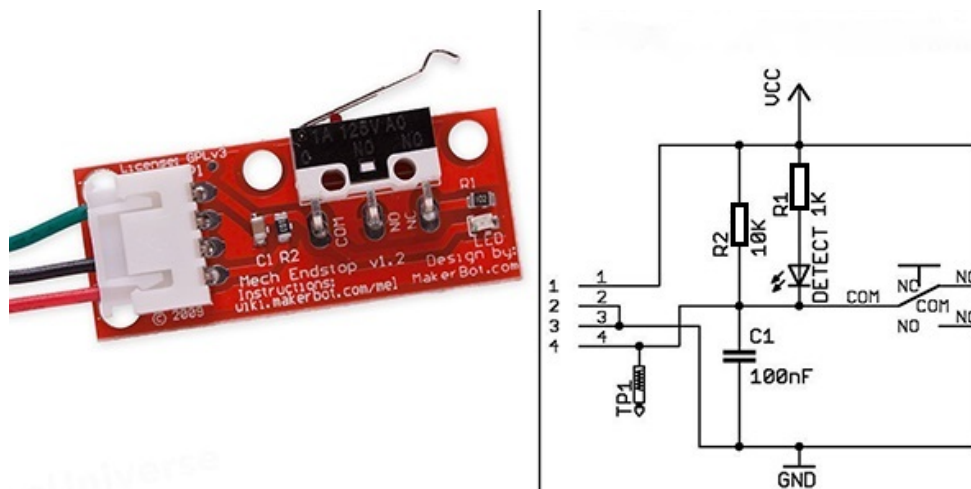
Mechanický koncový spínač (*endstop*) je dvoustavový kontaktní senzor [21]. Dvoustavový znamená, že snímač generuje binární signál (signál může nabývat jen dvou hodnot: 0/1 neboli true/false). Změna signálu (jeho aktivace) je inicializována fyzickým kontaktem s předmětem.

Mechanický koncový spínač je pasivní (parametrický) snímač [22], což znamená, že ke svému fungování potřebuje být napájen.

Podle [22] princip fungování lze popsat takto: „*Pasivní (parametrické) snímače účinkem měřené veličiny mění některý ze svých parametrů (polohu, tlak, odpor...), přičemž ke své funkci vyžadují vnější zdroje energie.*“

Klasické malé páčkové koncové spínače mají 3 kontakty. Jeden vstup – COM, tím je přivedeno

napájení, a dva výstupy – NO – normálně rozeplý (*normal opened*) a NC – normálně sepnutý (*normal closed*).



Obrázek 3.16: Mechanický koncový spínač a jeho schéma. Upraveno podle [23].

Popis funkce

Není-li páčka na koncovém spínači předmětem stlačená, jsou kontakty COM a NC sepnuté a NO zůstává rozeplutý. V případě že páčku zmáčkne, NC je rozeplutý a COM s NO jsou sepnuté. Co se týká detekce předmětu, záleží na tom, jaký výstup používáme pro odesílání signálu. Jestliže NC, pak je předmět detekován, když je výstupní napětí 0 V, což znamená, že signál je pro mikrokontrolér logická nula (LOW). Pokud NO, tak je tomu právě naopak – výstupní napětí je < 4 V, tudíž je signál v mikrokontroléru vyhodnocen jako logická jednička (HIGH).

3.4.2 Světelná závora

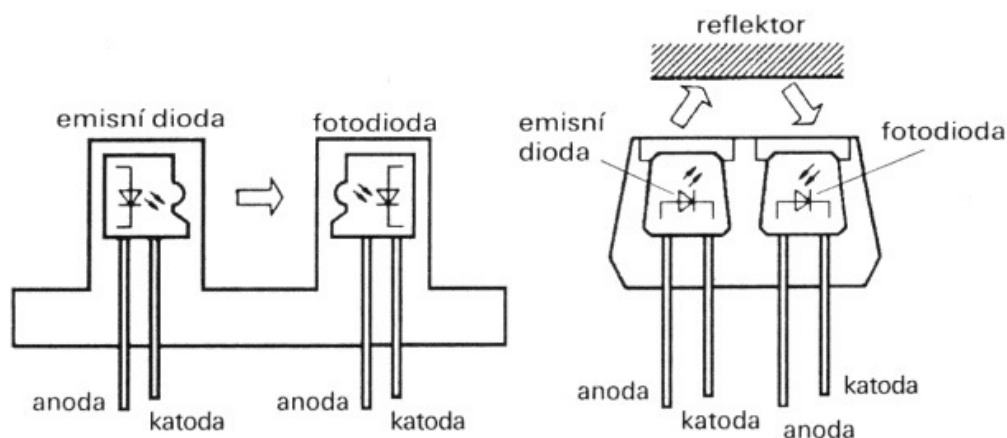
Optické senzory pro nespojitě měření polohy [22] se dělí na průchozí (jednocestná závora s odděleným vysílačem a přijímačem) a reflexní (vyhodnocující odraz od snímaného objektu).

Světelná závora [22] (někdy nazývaná také jako fotozávora, optozávora či optoelektrická závora) se řadí mezi průchozí optické snímače polohy. Je to dvoustavový bezkontaktní senzor. Stejně jako mechanický koncový spínač generuje binární signál. Jedná se o aktivní (generátorický) snímač. To znamená, že se působením měřené veličiny chová jako zdroj elektrické energie.

Mezi výhody fotozávor patří necitlivost na elektromagnetická a jiná pole a možnost použití ve výbušném prostředí.[24]

Senzor se skládá ze dvou hlavních funkčních částí [24]:

1. **Vysílač** – nekoherentní, či laserová dioda vyzařující ve viditelné nebo infračervené oblasti. Potřebuje napájení.
2. **Přijímač** – detekce dopadajícího záření, vyhodnocení, odlišení záření vysílače a světlo dopadající z okolí, fotodioda, fototranzistor, či složitější optron, jehož citlivost odpovídá vlnové délce vysílače.



Obrázek 3.17: Světelná závora (vlevo), reflexní snímač (vpravo). Převzato z [24].

Popis funkce

Pokud se mezi vysílačem a přijímačem nenachází předmět, vysílač (svítivá dioda) emituje záření, které dopadá na přijímač (fotodioda, fototranzistor). Ten dopadající záření detekuje, vyhodnocuje a přetváří přijaté záření na elektrickou energii. Jestliže je přijaté záření dostatečně silné, pak čidlo generuje dostatečně velké napětí, aby bylo v mikrokontroléru vyhodnoceno jako logická jednička (HIGH).

Jeli ve fotozávoře přítomný objekt, záření tvořené vysílačem je jím zastaveno, tudíž nedopadá a nemůže být detekováno přijímačem. Ten negeneruje dostatek elektrické energie, aby napětí dosáhlo hodnoty, kterou mikrokontrolér vyhodnotí jako logickou jedničku (HIGH). Odesílaný signál je tedy v mikrokontroléru dešifrován jako logická nula (LOW).

4. Realizace

Seznam použitého materiálu

č.	název komponentu	počet	poznámka	cena Kč/ks
1.	Deska děrovaná pozink.	1	100 × 200 × 2 mm	25,-
2.	Úhelník děrovaný pozink.	2	100 × 100 × 2 mm	39,-
3.	Zkušební nepájivé kontaktní pole	1	400 pinů	99,-
4.	Krokový motor NEMA 17 17HS4401	1	0,4 Nm	308,-
5.	Držák pro krokový motor NEMA 17	1	3 mm ocel	79,-
6.	A4988	2	Ovladač bipol. KM	48,-
7.	Kondenzátor 100 μ F	2	16,0 V; 105°C	—
8.	Plastové micro servo SG90 9g	1		78,-
9.	Dccduino UNO ATmega328	1	Arduino kompatibilní	139,-
10.	Koncový spínač mechanický	3		30,-
11.	Koncový spínač optický	1		35,-
12.	Šroub M10 × 50 mm	1		—
13.	Axiální ložisko velké	1		—
14.	Axiální ložisko malé	1		—
15.	Propojovací kabely	x		—
16.	Plechový profil z tiskárny	1		—
17.	Pojezd z tiskárny/scanneru ¹	1		—
18.	Úhelník hliníkový	1	80 × 40 × 2,5 mm	—
19.	Ozubený hřeben plastový	1		—
20.	Ozubené kolo plastové	1		—
21.	Univerzální prepínací adaptér	1	2250 mA	450,-
22.	Usměrňovač (měnič) napětí	2	Stabilizovaný zdroj s LM317	38,-
23.	U profil	1	70 mm	—
24.	Pěnový polymerový hranol	2	délka 3 mm a 4 mm	—
25.	Další spojovací a jiný materiál a díly	—	šrouby, rezistory, diody aj.	—

¹profil s kolejničí, krokový motor TECO Type 4H4018F0207 (1,8°; 6,8 V a 1,0 A), držák na motor, převod (ozubené kolo), ozubený řemen s vozíkem, kladka

Specifikace krokového motoru Nema 17 17HS4401:

Bipolární dvoufázový hybridní KM

Vnitřní odpor: 1,6 Ω

Maximální proud: 1,7 A

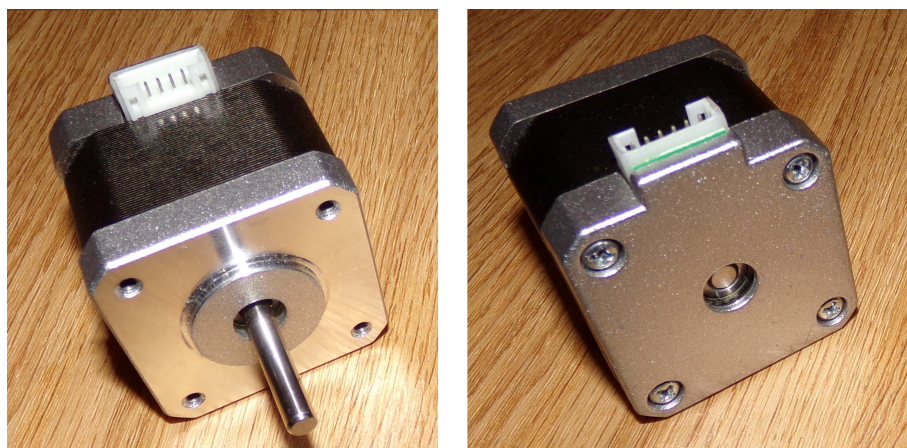
Krouticí moment: 0,4 Nm

Velikost kroku: 1,8°

Počet kroků na otáčku: 200

Rozměry: délka 40 mm, hřídel 20 × 5 mm

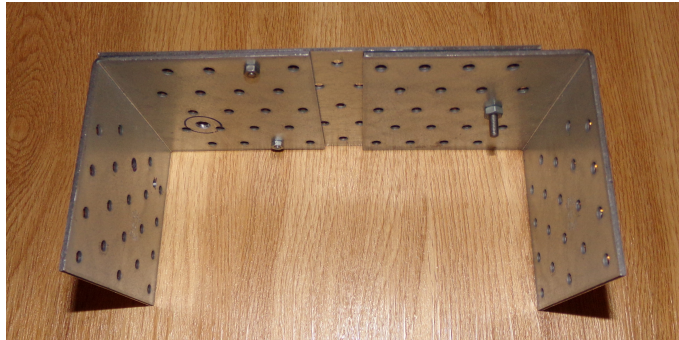
Váha: 280 g



Obrázek 4.1: Hybridní krokový motor Nema 17 17HS4401. Vlastní snímek autora.

Podstavec

Na zhotovení podstavce tvaru obráceného písmene „U“ (obr. 4.2) jsem použil pozinkovanou vrtanou spojovací desku $100 \times 200 \times 2$ mm a dva pravouhlé L profily $100 \times 100 \times 2$ mm. Než jsem podstavec sešrouboval, naměřil jsem a vyvrtal do něj díry $\varnothing 5$ mm na přišroubování držáku pro krokový motor Nema 17 a díru $\varnothing 10,5$ mm na šroub M10 k připevnění otočného vertikálního posuvu (pojezdu z tiskárny).

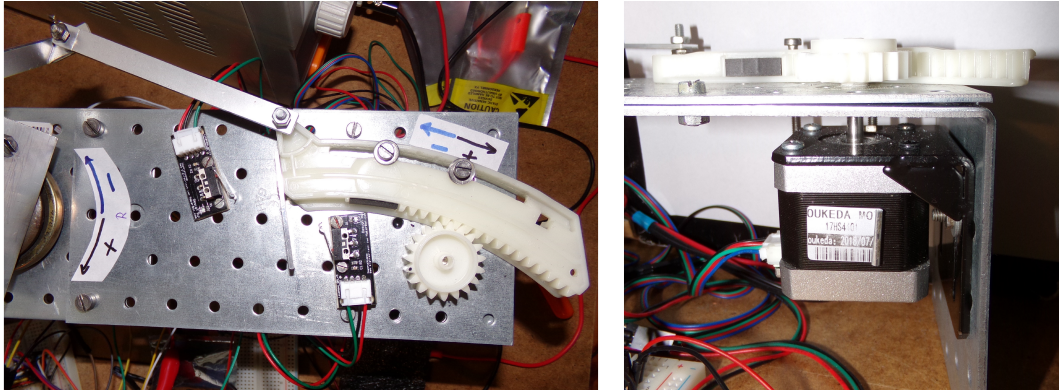


Obrázek 4.2: Podstavec. Vlastní snímek autora.

Profily a desku jsem sešrouboval čtyřmi šrouby. V podstavci jsem provrtal díru na hřídel KM, držák pro KM i s motorem jsem přidělal na podstavec tak, že část hřídele ční nad povrch horní plochy podstavce. Prohloubil a rozšířil jsem díru u ozubeného kola, které jsem poté natlačil na hřídel KM jako pastorek (viz. obr. 4.3 vpravo)

V ozubeném hřebenu jsem vrtákem profrézoval obloukovitou drážku na štěrbinu. Hřeben vodí 2 čepy ve štěrbině tvořené šrouby. Na šrouby jsem vyvrtal díry a vyřezal do nich závity. Hřeben jsem usadil a zajistil vodícími čepy. Hřídel a celý motor jsem výškově nastavil tak, aby ozubení pastorku bylo v záběru s ozubením hřebenu, nebyly zde velké vůle a aby pastorek za hranu pod ozubením hřebenu přitlačoval hřeben k ploše podstavce. Hřeben je tedy aretován mezi pastorkem a 2 výše popsanými čepy v celém rozsahu pohybu. Čepy navíc slouží jako koncové mechanické dorazy (viz. obr. 4.3 vlevo).

K ozubenému hřebenu jsem přidělal hliníkový plíšek, který bude stlačovat páčky mechanických spínačů. Před a vedle ozubený hřeben jsem přidělal dva koncové mechanické spínače, které budou sloužit k inicializaci polohy pro rotaci a také jako virtuální dorazy. (viz. obr. 4.3 vlevo).



Obrázek 4.3: Podstavec s hnacím mechanismem pro rotaci vertikálního ramene. Vlastní snímek autora.

Vertikální část manipulátoru

Hlavní část vertikálního ramene manipulátoru je tvořena pojezdem z vyřazené tiskárny (viz. obr. 4.4).



Obrázek 4.4: Pojezd z tiskárny. Vlastní snímek autora.

Na spodní část pojezdu jsem přidělal L profil (patku) o délce 80 mm se šroubem $M10 \times 50$ mm. Vertikální rameno jsem osadil dvěma senzory – světelnou závorou nahoře a mechanickým koncovým spínačem dole, které fungují jako virtuální dorazy. Jeden ze senzorů slouží k inicializaci polohy posuvu. Na šroub $M10$ jsem matkou přidělal větší axiální ložisko.

Vertikální část jsem nainstaloval na podstavec a upevnil šroubem $M10$. Patka spočívá velkým axiálním ložiskem na podstavci. Pro snadnější otáčení jsem umístil ještě jedno malé axiální ložisko dospodu pod horní plochu podstavce. Vůli ložisek jsem nastavil zatáhnutím kontra-

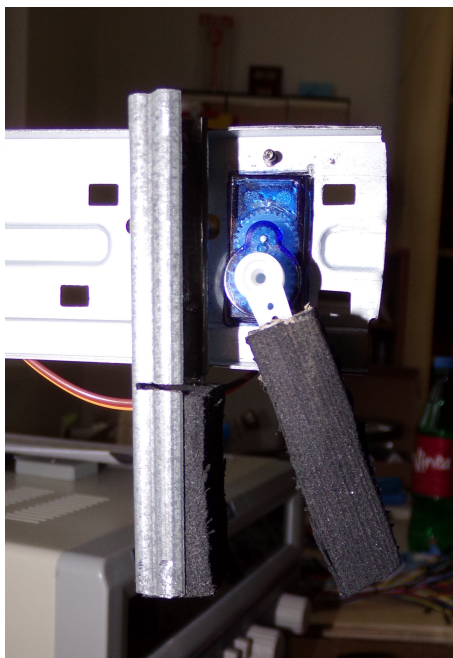
tek.

Na ozubený hřeben jsem připevnil táhlo a na spodek vertikálního ramene kliku, tyto dva prvky jsem spojil a tím vytvořil páku. Pohyb hřebenu hnaného pastorkem KM je přenášen pákou na vertikální část manipulátoru a ta koná rotační pohyb. Celý mechanismus je vyobrazen na obr. 4.3.

Horizontální část s end efektem

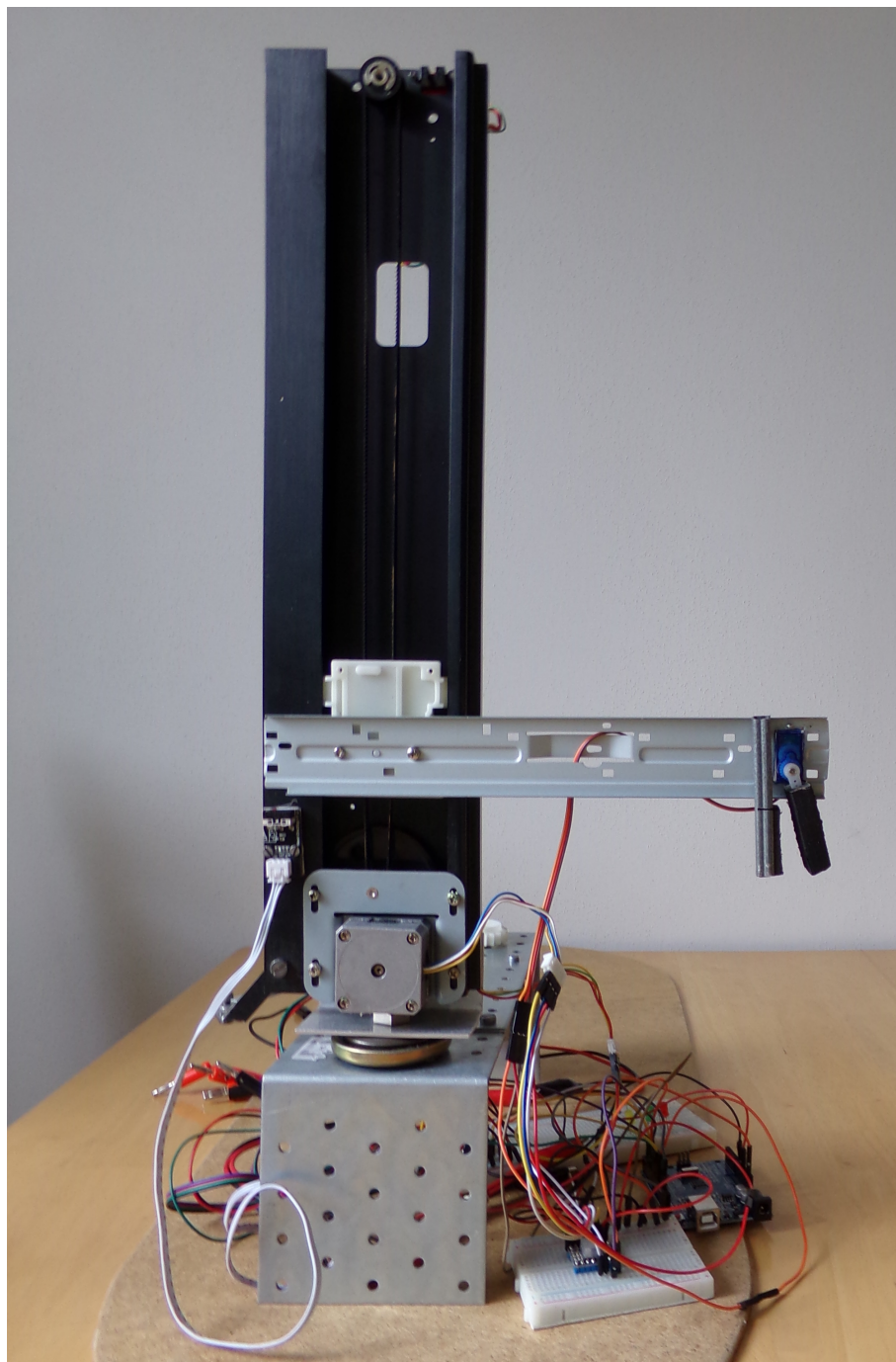
Z plechového profilu získaného z tiskárny jsem vytvořil horizontální rameno manipulátoru. Na konci profilu jsem vyřízl obdélníkový tvar a vyvrtal dvě díry pro připevnění modelářského serva samořeznými šrouby. Modelářské servo slouží jako pohon end efektoru. End efektor bude představovat uchopovač (*gripper*) podobný čelistem kleští.

Uchopovač (viz. obr. 4.6) jsem vyrobil ze dvou pěnových polymerových hranolů a uříznutého kusu U profilu o délce 70 mm. Jeden z hranolů jsem na horní ploše navrtal a následně nasunul na páčku hřídele serva, tím vznikla pohyblivá čelist. Druhý hranol jsem vsunul do U profilu, který jsem přidělal samořeznými vruty k horizontálnímu rameni, čímž se vytvořila druhá nepohyblivá čelist. Protěžší plochy hranolů tvoří uchopovací plochy gripperu.



Obrázek 4.5: Uchopovač - end efektor. Vlastní snímek autora.

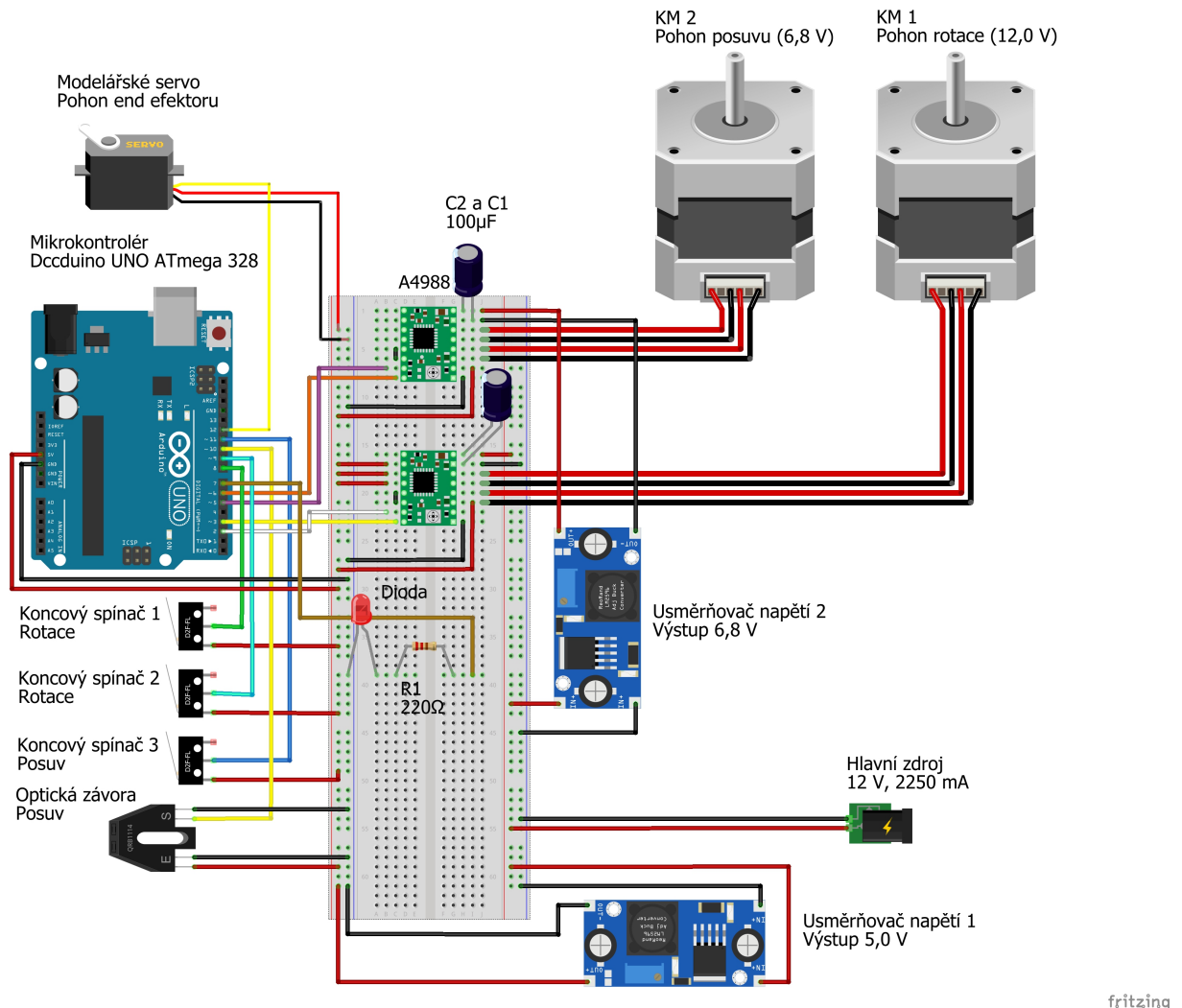
Horizontální rameno jsem přidělal dvěma šrouby na vozík posuvu vertikálního posuvu. Tím jsem dokončil sestavení konstrukce manipulátoru.



Obrázek 4.6: Sestrojený manipulátor. Vlastní snímek autora.

Zapojení

Krokové motory a jejich ovladače A4988 jsem zapojil dle schématu na obr. 3.15. Zapojení elektroniky celého manipulátoru je vyobrazeno na obrázku 4.7.



Obrázek 4.7: Zapojení. Vlastní tvorba autora.

Polohování

Rotace vertikální části manipulátoru je možná v rozmezí $0^\circ \div 30^\circ$. To se rovná zhruba 150° pootočení pastorku, což je 80 celých kroků KM, tedy 1280 $1/16$ kroků – motor je řízený v módu mikrokrokování s $1/16$ krokem. Z toho vyplývá, že na 1° rotace svislé části manipulátoru je potřeba $\frac{128}{3}$ mikrokroků ($1/16$).

Pohon posuvu je řízen v celých krocích. 1 cm posuvu se rovná asi 476 kroků, tedy na 1 mm připadá zhruba 48 kroků. Rozsah posuvu je 30 cm.

Software

Program jsem napsal jazykem Wiring v prostředí Arduino IDE. Program je rozdělen do 3 částí:

- V první části připojuji („zahrnuji“) potřebné knihovny a deklaruji proměnné.

```
1 #include<Servo.h>
2
3 // Rotace
4 const int stepPin1 = 2;
5 const int dirPin1 = 3;
6 const int endStop1 = 8;
7 const int endStop2 = 9;
8 int dly1 = 1000;
9 int steps1;
10
11 // Svislá osa – horizontální posuv
12 const int stepPin2 = 5;
13 const int dirPin2 = 6;
14 const int endStop3 = 10;
15 const int optoZav = 11;
16 int dly2 = 500;
17 int steps2;
18
19 bool state_ES1;
20 bool state_ES2;
21 bool state_ES3;
22 bool state_OZ;
23
24 const int diod = 7;
25 // Uchopovač – end efektor
26 Servo gripper;
```

- **Druhá část programu** – funkce **void setup()** – provádí základní nastavení po zapnutí či restartování zařízení. Nastavují se zde vstupy a výstupy (GPIO) a také je zde kód pro provedení inicializace os manipulátoru a pro najetí do výchozí pozice pro daný program.

```
1 void setup()
2 {
3   pinMode(stepPin1, OUTPUT);
4   pinMode(dirPin1, OUTPUT);
5   pinMode(stepPin2, OUTPUT);
6   pinMode(dirPin2, OUTPUT);
7
8   pinMode(endStop1, INPUT);
9   pinMode(endStop2, INPUT);
10  pinMode(endStop3, INPUT);
11  pinMode(optoZav, INPUT);
12
13  state_ES1 = digitalRead(endStop1);
14  state_ES2 = digitalRead(endStop2);
15  state_ES3 = digitalRead(endStop3);
16  state_OZ = digitalRead(optoZav);
17
18  pinMode(diod, OUTPUT);
19  gripper.attach(12);
20
21  // Inicializace osy rotace – dojde na koncový spínač
22  while (digitalRead(endStop2) != LOW)
23  {
24    digitalWrite(dirPin1, LOW);
25
26    digitalWrite(stepPin1, HIGH);
27    delayMicroseconds(dly1);
28    digitalWrite(stepPin1, LOW);
29    delayMicroseconds(dly1);
30  }
31  delay(1000);
```

```

32
33 // Poodjetí od koncového spínače
34 digitalWrite(dirPin1,HIGH);
35
36 for(int x = 0; x < 90; x++)
37 {
38     digitalWrite(stepPin1,HIGH);
39     delayMicroseconds(dly1);
40     digitalWrite(stepPin1,LOW);
41     delayMicroseconds(dly1);
42 }
43 delay(1000);
44
45 // Inicializace svislé osy – dojde na koncový spínač
46 while (digitalRead(endStop3) != LOW)
47 {
48     digitalWrite(dirPin2,LOW);
49
50     digitalWrite(stepPin2,HIGH);
51     delayMicroseconds(dly2);
52     digitalWrite(stepPin2,LOW);
53     delayMicroseconds(dly2);
54 }
55 delay(100);
56
57 // Poodjetí od koncového spínače
58 digitalWrite(dirPin2,HIGH);
59
60 for(int x = 0; x < 200; x++)
61 {
62     digitalWrite(stepPin2,HIGH);
63     delayMicroseconds(dly2);
64     digitalWrite(stepPin2,LOW);
65     delayMicroseconds(dly2);

```

```

66 }
67 delay(100);
68
69 // Výchozí pozice pro daný program
70 move_up (5000, 500);
71 delay(100);
72 rotate_right (213, 1000);
73 delay(100);
74 }

```

- **Ve třetí části programu**, jež představuje funkce **void loop ()**, je kód, kterým je prováděn hlavní pracovní cyklus manipulátoru.

```

1 void loop()
2 {
3   move_down (2380, 500);
4   delay(100);
5
6   gripper.write(65); // Odložení/uvolnění uchopovače
7   delay(2000); // Doba čekání na nový vzorek
8
9   gripper.write(90); // Uchopení
10  delay(500);
11
12  move_up (2380, 500);
13  delay(100);
14
15  rotate_right (853, 1000);
16  delay(100);
17
18  move_down (3800, 500);
19  delay(100);
20
21  ..delay(10000) // Doba ponoření vzorku
22

```

```

23  move_up (3800, 400);
24  delay(100);
25
26  rotate_left (853, 1000);
27  delay(1000);
28 }

```

- **V poslední (čtvrté) části programu**, jsou vypsány funkce pro pohyb manipulátoru a funkce pro chybové hlášení, kdyby došlo k překročení rozmezí pohybu pro rotaci či posuv. Tyto funkce jsou volané ve funkci **void setup ()** a především ve funkci **void loop ()**.

```

1  void error()
2  {
3    digitalWrite(stepPin1, LOW);
4    digitalWrite(stepPin2, LOW);
5
6    while(1)
7    {
8      digitalWrite(diod, HIGH);
9      delay(100);
10     digitalWrite(diod, LOW);
11     delay(100);
12    }
13 }
14
15 void rotate_right (int steps1, int dly1)
16 {
17   digitalWrite(dirPin1, HIGH);
18
19   for (int x = 0; x < steps1; x++)
20   {
21     digitalWrite(stepPin1, HIGH);
22     delayMicroseconds(dly1);
23     digitalWrite(stepPin1, LOW);

```

```

24     delayMicroseconds(dly1);
25
26     if (state_ES1 != LOW || state_ES2 != LOW)
27     {
28         error ();
29     }
30 }
31 }
32
33 void rotate_left (int steps1, int dly1)
34 {
35     digitalWrite(dirPin1, LOW);
36
37     for (int x = 0; x < steps1; x++)
38     {
39         digitalWrite(stepPin1, HIGH);
40         delayMicroseconds(dly1);
41         digitalWrite(stepPin1, LOW);
42         delayMicroseconds(dly1);
43
44         if (state_ES1 != LOW || state_ES2 != LOW)
45         {
46             error();
47         }
48     }
49 }
50
51 void move_up (int steps2, int dly2)
52 {
53     digitalWrite(dirPin2, HIGH);
54
55     for (int x = 0; x < steps2; x++)
56     {
57         digitalWrite(stepPin2, HIGH);

```



```

58     delayMicroseconds(dly2);
59     digitalWrite(stepPin2, LOW);
60     delayMicroseconds(dly2);
61
62     if (state_ES3 != LOW || state_OZ == HIGH)
63     {
64         error();
65     }
66 }
67 }
68
69 void move_down (int steps2, int dly2)
70 {
71     digitalWrite(dirPin2, LOW);
72
73     for (int x = 0; x < steps2; x++)
74     {
75         digitalWrite(stepPin2, HIGH);
76         delayMicroseconds(dly2);
77         digitalWrite(stepPin2, LOW);
78         delayMicroseconds(dly2);
79
80         if (state_ES3 != LOW || state_OZ == HIGH)
81         {
82             error ();
83         }
84     }
85 }

```

5. Ověření funkce a dosažené parametry

Manipulátor byl otestován nahráním výše uvedeného programu. Po zapnutí se jednotlivé osy inicializují (*homing*). Tím se nastaví základní poloha end efektoru. Poté manipulátor najede do výchozí pozice pro daný program a v dalším kroku začne provádět pracovní cykly.

Tímto bylo ověřeno několik parametrů:

1. schopnost uchopit předmět
2. schopnost manipulovat s ním v daných souřadnicích
3. dostatečná přesnost odpovídající řízenému procesu
4. rychlost dostačující pro daný proces

Možnost kolize v důsledku přjetí limitních hodnot rotace či posuvu byla také otestována. Manipulátor automaticky odpojí krokové motory při stlačení koncových snímačů. K signalizaci poruchy slouží blikající červená dioda.

6. Závěr

Práce se zabývá laboratorním manipulátorem typu „dip-coater“. Nejprve představuji základní druhy manipulátorů a robotů a jejich klasifikaci na základě různých kritérií jako je např. počet stupňů volnosti a druh pohonu. Poté se věnuji návrhu manipulátoru. Zde uvádím různé možnosti řešení prvků manipulátoru a především zdůvodňuji mnou vybraná řešení. Zabývám se zde také základními teoretickými poznatky o krokových motorech, jednodeskovém počítači Arduino a senzorech polohy. Následuje podrobný popis realizace manipulátoru demonstrováný fotografickou dokumentací. Poslední část je věnována ověření funkčnosti jednotlivých prvků, manipulátoru jako celku, dále zjištění a kontrola dosažených parametrů.

Ve své práci se snažím porovnat některá alternativní řešení pomocí výčtů vlastností, charakteristik, výhod a nevýhod použití.

Cílem práce bylo především navrhnout a zkonstruovat laboratorní manipulátor a dále k němu vytvořit program. Všechny aspekty se mi povedlo splnit. Funkčnost a parametry zařízení byly prakticky ověřeny. Všechny vzniklé problémy během navrhování, sestrojování i programování se mi povedlo zdárně vyřešit. Navíc díky propracovanému návrhu manipulátoru a použití alternativních komponent jsem většině očekávaných komplikací zcela předešel.

Moje práce může být využita jako modul do praktik mechatroniky. Vlastní text pak může posloužit studentům technických oborů jako studijní materiál zejména ke krokovým motorům a k mikrokontroléru Arduino. Předností práce je mimo jiné vytvoření návodu k ovládání krokových motorů ovladačem A4988 prostřednictvím jednodeskového počítače Arduino. Součástí textu je i celý kód programu s vysvětlením, které může dobře posloužit studentům učícím se programovat mikrokontroléry.

Přínos bakalářské práce je pro mne veliký, naučil jsem se jak navrhnout vlastní projekt, realizovat technická řešení. Zjistil jsem, jak vymýšlet a zvažovat různá alternativní řešení. Zdokonalil jsem se v programování mikrokontroléru a také jsem se dozvěděl více o jeho hardwaru. Dále jsem si prohloubil znalosti o stejnosměrných motorech, především krokových motorech a jejich řízení. V neposlední řadě jsem se naučil jsem se psát odborný text a osvojil si základy potřebné pro pracování s programem \LaTeX .

K napsání práce byl použit sázecí systém L^AT_EX. Pro vytvoření kódu programu byl použit jazyk Wiring a prostředí Arduino IDE. Schéma zapojení bylo vytvořeno pomocí aplikace Fritzing.

Literatura

- [1] HOLMARC, Opto-mechatronics PVT.LTD. Dostupné z: <https://www.holmarc.com/>
- [2] ADÁMEK, Petr. Construction of Dip-Coater. *Edukacja – Technika – Informatyka* [online]. 2016, 16(2), 152-156 [cit. 2019-02-15]. DOI: 10.15584/eti.2016.2.20. ISSN 20809069. Dostupné z: <http://repozytorium.ur.edu.pl/handle/item/1991>
- [3] TSAI, Lung-Wen. *Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators*. New York: Wiley, c1999. ISBN 0-471-32593-7.
- [4] SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, [2008] [cit. 2018-12-29]. ISBN 978-80-248-1522-0.
- [5] RUBIŠAR, Václav. *Obrábění kompozitních materiálů pomocí robotů*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [6] *Automatizace & robotizace Santy.cz: Krokové motory* [online]. [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: <http://www.santy.cz/>
- [7] Stepper motor. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Stepper_motor.
- [8] ACARNLEY, P. P. *Stepping motors: a guide to theory and practice*. 4th edition. United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, [2007]. ISBN 978-0-85296-417-0.
- [9] UHLÍŘ, Ivan. *Elektrické stroje a pohony*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03730-0.
- [10] HRABOVCOVÁ, Valéria. *Moderné elektrické stroje*. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita, 2001. Vysokoškolské učebnice. ISBN 80-7100-809-5.
- [11] Krokové motory 1 - typy motorů. RoboDoupě: Web nejen o robotice [online]. [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: <http://robodoupe.cz/2013/krokove-motory-1-typy-motoru/>
- [12] YEADON, William H. a Alan W. YEADON. *Handbook of small electric motors*. New York: McGraw-Hill, c2001. ISBN 0-07-072332-x.

- [13] NOVÁK, Petr. *Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-141-1.
- [14] Variable Reluctance Motors. *Electrical and Electronics Engineering Portal!* [online]. [cit. 2019-02-19]. Dostupné z: <https://mediatoget.blogspot.com/2011/11/variable-reluctance-motors.html>
- [15] Microstepping. *New Japan Radio CO., Ltd.* [online]. [cit. 2019-02-19]. Dostupné z: https://www.njr.com/semicon/PDF/application_notes/Microstepping_APP_E.pdf
- [16] Servo (radio control). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-01-03]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Servo_\(radio_control\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Servo_(radio_control)).
- [17] Serva. *PELIKANDANIEL.COM* [online]. [cit. 2019-01-03]. Dostupné z: <http://www.pelikandaniel.com/?sec=page&id=22>
- [18] VODA, Zbyšek. *Průvodce světem Arduina*. Vydání druhé. Bučovice: Martin Stříž, 2017. ISBN 978-80-87106-93-8.
- [19] SELECKÝ, Matuš. *Arduino: uživatelská příručka*. Přeložil Martin HERODEK. Brno: Computer Press, 2016. ISBN 978-80-251-4840-2.
- [20] A4988: DMOS Microstepping Driver with Translator and Overcurrent Protection [online]. Allegro MicroSystems, 2016 [cit. 2019-02-23]. Dostupné z: <http://www.allegromicro.com/ /media/Files/Datasheets/A4988-Datasheet.ashx>
- [21] RIPKA, Pavel. *Senzory a převodníky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03123-3.
- [22] BENEŠ, Pavel. *Automatizace a automatizační technika*. Vyd. 2. Brno: CP Books, 2005. ISBN 80-251-0795-7.
- [23] Endstops. Marlin [online]. [cit. 2019-02-19]. Dostupné z: <http://marlinfw.org/docs/hardware/endstops.html>
- [24] HAVLÍČEK, Tomáš. *Snímače mechanických veličin* [online]. [cit. 2019-01-03]. Dostupné z: <http://skriptum.wz.cz/autom/poloha.htm>.