

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

KONSTRUKCE UNIVERZÁLNÍHO PRŮMYSLOVÉHO ROBOTA

DEVELOPMENT OF THE VERSATILE INDUSTRIAL MANIPULATOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Veteška

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaromír Žák, Ph.D.

BRNO 2016



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**
Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Michal Veteška

ID: 146991

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Konstrukce univerzálního průmyslového robota

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V rámci práce budou nastudovány a aplikovány nejvhodnější principy konstrukce univerzálního manipulačního ramene průmyslového robota sestávající se z pohyblivé a uchopovací části. Rameno bude doplněno zejména o rozšiřující senzory detekující jeho polohu v prostoru, aktuální pozici uchopovací části a sílu úchopu předmětu. V rámci diplomové práce bude navržen koncept ramene, vytvořena jeho mechanická a elektronická konstrukce včetně implementace různých typů senzorů. V rámci práce bude také dokončeno softwarové vybavení pro univerzální řízení pohybu robota z počítače.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 26.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Jaromír Žák, Ph.D.

Konzultant diplomové práce:

doc. Ing. Lukáš Fucik, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Teoretická časť práce sa zaoberá základným rozdelením priemyselných robotov, ich štruktúrou a pracovným priestorom. Ďalej rozoberá pohony využívajúce sa v priemyselných robotov a senzory potrebné pre obsluhu robota. V praktickej časti je popísaný návrh mechanického ramena pre priemyselného robota manipulátora, vybraté senzory pre obsluhu robota a vybratá použitá riadiaca jednotka.

Kľúčové slová

Univerzálny manipulátor, priemyselný robot, pohony.

Abstract

The theoretical part deals with the basic division of industrial robots, their structure and working space. It analyzes propulsion using the industrial robots and sensors required to operate in the robot. The practical part describes the design of a mechanical arm for an industrial robot manipulator. The practical part also includes a description of the sensor and a description of the control unit.

Keywords

Universal manipulator, industrial robot, propulsion.

Bibliografická citácia

VETEŠKA, M. *Konstrukce univerzálního průmyslového robota*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 59 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaromír Žák, Ph.D.

Prehlásenie

Prehlasujem, že svoju diplomovú prácu na téma „**Konštrukcia univerzálneho priemyslového robota**“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tohoto projektu som neporušil autorské práva tretích osôb, hlavne som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomí následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia § 152 trestného zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....
podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce Ing. Jaromíru Žákovi za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornou pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní projektu. Ďalej ďakujem svojmu otcovi Stanislavovi Veteškovi a strýkovi Karolovi Veteškovi za odbornú pomoc pri výrobe mechanickej časti.

V Brně dne

.....

podpis autora



Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



Obsah

Úvod.....	10
1 Teoretická časť.....	13
1.1 Priemyselný robot.....	13
1.2 Štruktúra priemyselného robota	13
1.3 Pracovný priestor robota	14
1.4 Určovanie veľkosti pracovného priestoru	16
1.5 Pohony	17
1.6 Krokové motory.....	18
1.6.1 Krokové motory s pasívnym rotorom.....	18
1.6.2 Hybridný krokový motor	20
1.7 Sensory používané v robotike	21
1.7.1 Princíp činnosti senzorov polohy	21
1.7.2 Princíp činnosti magnetometrov.....	23
1.7.3 Princíp činnosti integrovaných senzorov tlaku	25
1.7.4 Princíp činnosti tenzometrických snímačov tlaku.....	26
2 Praktická časť.....	28
2.1 Mechanická časť.....	28
2.1.1 Konštrukcia robota.....	28
2.1.1.1 Spodná časť robota – podstava a otočnica	28
2.1.1.2 Stredná časť robota – rameno robota.....	29
2.1.1.3 Vrchná časť - efektor robota	30
2.1.2 Dimenzovanie motorov.....	32
2.2 Elektronická časť.....	35
2.2.1 Návrh elektroniky pre krokové motory.....	36
2.2.2 Sensory	38
2.2.2.1 Výber senzorov polohy a pohybu.....	38
2.2.2.2 Výber magnetosenzoru	40
2.2.3 Výber senzoru tlaku.....	40
2.2.4 Riadiaca jednotka	41
2.2.5 Uloženie elektroniky.....	42
2.3 Pracovisko robota	43
2.4 Programová časť.....	44
2.4.1 Program robota	44

2.4.2	Program pre MCU	44
2.4.2.1	Knižnice používané v programe.....	44
2.4.2.2	Hlavný riadiaci program	47
2.4.3	Návrh obvodu v FPGA	49
2.4.3.1	Návrh digitálneho obvodu.....	50
2.4.3.2	Verifikačné prostredie.....	53
2.4.4	Riadiaci program PC.....	53
2.4.4.1	Grafické prostredie	54
Záver	56
Použitá literatúra	57

Zoznam obrázkov

Obr. 1.1: Pracovný priestor okolo robota, prevzaté z [3].....	14
Obr. 1.2: Tvary kinematických štruktúr pracovných priestorov [4].....	15
Obr. 1.3: Kartézska kinematická štruktúra a jej rozsah pohybu v jednotlivých väzbách [3]	16
Obr. 1.4: Cylindrická kinematická štruktúra a jej rozsah pohybu v jednotlivých väzbách [3]	16
Obr. 1.5: Sférická kinematická štruktúra a jej rozsah pohybu v jednotlivých väzbách [3] .	16
Obr. 1.6: Angulárna kinematická štruktúra a jej rozsah pohybu v jednotlivých väzbách [3]	17
Obr. 1.7: Rez štvorfázovým krokovým motorom s pasívnym rotorom s veľkosťou kroku 15°, [7].....	19
Obr. 1.8: Znázornenie pohybu krokového motora v závislosti na prepínaní fázy vinutia. .	19
Obr. 1.9: Schéma hybridného krokového motora, prevzaté z [7].....	20
Obr. 1.10: MEMS senzory, a.) gyroskopický senzor reagujúci na natočenie, b.) akcelerometer reagujúci na pohyb. Prevzaté z [10].....	21
Obr. 1.11: Princíp činnosti akcelerometra [11]	22
Obr. 1.12: Princíp gyroskopu [10].....	23
Obr. 1.13: Schematické znázornenie princípu Hallovho napätia [12]	23
Obr. 1.14: Permalloy bez pôsobenia magnetického póla [13].	24
Obr. 1.15: Rozdiel medzi AMR a Hallovým efektom	24
Jednotlivé princípy sú zobrazené na obr. 1.16.	25
Obr. 1.17: Spôsoby merania tlaku	25
Obr. 1.18: Konštrukcia fóliového tenzometra, podľa [18].....	27
Obr. 1.19: Zapojenie senzorov v mostíku. Prevzaté z [19].	27
Obr. 2.1: Detail spodnej časti robota s pevnou podstavou a otočnicou	28
Obr. 2.2: Detail strednej časti robota s uchytením jednotlivých ramien a prevodov.....	29
Obr. 2.3: Detail vrchnej časti robota – efektora.	30
Obr. 2.4: Detail vrchnej časti použitého efektora.	31
Obr. 2.5: Detail na flexibilné kliešte.	31
Obr. 2.6: Vyrobený koncový efektor spolu s flexibilnými kliešťami a kužeľovým súkolím.	32
Obr. 2.7: Schematické znázornenie robotической ruky s pôsobiacimi silami	32
Obr. 2.8: Bloková schéma elektronickej časti robota.	35
Obr. 2.9: a.) H-mostík b.) Jednoduchý spínač z bipolárnym zdrojom.	36
Obr. 2.10: Schéma zapojenia obvodu lv8731v.....	37
Obr. 2.11: Modul použitého senzora MPU-6050	39
Obr. 2.12: modul magnetometru HMC5883L	40
Obr. 2.13: Použitý tenzometer, na detekciu zvieraného tlaku.	41
Obr. 2.14: Modul s osadeným 32-bitovým MCU STM32 a FPGA Altera CYCLONE IV.	41
Obr. 2.15: Osadená riadiaca doska s modulom iCore2.....	42
Obr. 2.16: Zapojenie elektroniky v škatule, a predná lišta škatuli.	42
Obr. 2.17: Rozloženie pracoviska robota.	43
Obr. 2.18: Reálne rozloženie pracoviska.	43
Obr. 2.19: Štruktúra knižnic CMSIS, podľa [25].	45

Obr. 2.20: Hierarchia USB portu, podľa [26].....	46
Obr. 2.21: komunikačný protokol medzi MCU a PC	47
Obr. 2.22: Algoritmus zobrazujúci základný pohyb v sekvenčnom a test móde.	48
Obr. 2.23: Algoritmus zobrazujúci pohyb joymode	49
Obr. 2.24: Bloková schéma digitálneho obvodu a jeho verifikačného prostredia.....	50
Obr. 2.25: Komunikácia na paralelnej 8 b. linke.	51
Obr. 2.26: Vnútorne usporiadanie pamäte.....	51
Obr. 2.27: Stavový automat entity Spracovanie dát zo senzorov	52
Obr. 2.28: Entita IP jadra I2C linky, prevzaté z [27].....	52
Obr. 2.29: Grafické prostredie riadiaceho programu	54

Úvod

Robotické ruky alebo roboti manipulátory sú v súčasnosti veľmi rozšírenými robotmi. Ich využitie je hlavne v priemysle ale rovnako aj v lekárstve alebo v priestoroch, ktoré sú ťažko dostupné pre človeka. Prvé roboty manipulátory sa začali vyrábať koncom 50-tych rokov a mali veľký úspech. Základné koncepcie dosiahli v súčasnosti vysokej technickej úrovne a rovnako aj spoľahlivosti. Kvôli novým technickým odvetviam sa stále navrhujú nové koncepcie robotov manipulátorov. Najčastejšie koncepcie sú roboti zo šiestimi stupňami voľnosti, ale postupne sa prechádza na návrh sedem stupňových robotov.

Táto práca vznikla na podnet vytvorenia univerzálneho manipulátora, ktorý by bol schopný pochybovať sa v priestore bez obmedzenia a manipulovať s predmetmi. V práci je rozobratá problematika návrhu mechanickej časti, elektroniky pre riadenie motorov, výber motorov, riadiaci program a program pre obsluhu. Taktiež je uvedený popis použitých senzorov a ich zapojenie do sústavy robotického ramena.

1 Teoretická časť

V súčasnosti sa roboti využívajú k veľkému množstvu prác. Roboty sa delia na niekoľko kategórii podľa využitia. Hlavné rozdelenie je na mobilné roboty a priemyselné roboty (manipulátory), ktoré sú upevnené k určitému pracovisku. Táto práca sa zaoberá hlavne manipulátormi, z dôvodu ich neustáleho vylepšovania a prispôsobovania k danému pracovisku.

1.1 Priemyselný robot

Pod pojmom priemyselný robot sa rozumie zariadenie, ktoré je schopné riešiť rôzne manipulačné úlohy. Všeobecná klasifikácia priemyselných robotov zahŕňa kategórie [1] :

- Manipulátory – manipulačné zariadenia, ovládané človekom. Ich úlohou je zosilňovanie sily respektíve moment a pohybové možnosti operátora.
- Robot – automatický alebo počítačom riadený integrovaný systém, ktorý je schopný autonómnej a cieľové orientovanej interakcie s priradeným prostredím, podľa inštrukcií od človeka.

1.2 Štruktúra priemyselného robota

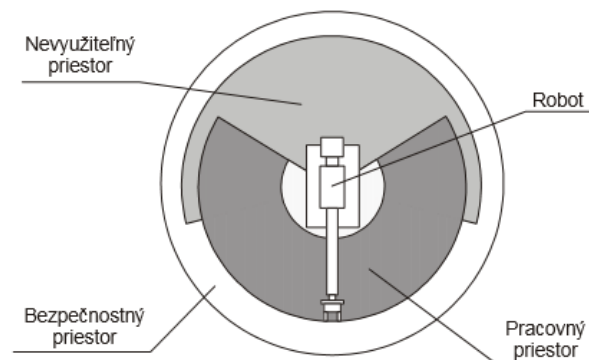
Štruktúru priemyselného robota delíme na tri základné časti:

- Mechanická časť – skladá sa z kĺbov a pohybových väzieb. Kĺby slúžia na realizáciu pohybu robota zatiaľ čo pohybové väzby tvoria tuhé telesá medzi nimi. Kĺby robota určujú počet stupňov voľnosti. Mechanická časť robota sa skladá z podstavy, karuselu (priestor kde sa nachádzajú motory) a ramien. Samostatnou časťou robota je koncový efektor, ku ktorému sú pripájané pracovné hlavice robota[2].
- Riadiaci systém robota – jeho úlohou je na základe uložených informácií v pamäti mikroprocesora a informácií získaných zo snímačov rozvrhovať a plánovať úkony, ktoré ma robot vykonať v danom čase [2]. Vstupno/výstupná úroveň riadenia môže byť reprezentovaná pomocou priemyselných zberníc alebo ako diskrétny vstupy, výstupy.
- Programovacia jednotka – ide o koncové zariadenie, ktoré je realizované pomocou programovacieho panelu alebo počítača [2]. Ten musí obsahovať potrebné komunikačné zbernice. Na zariadení musí byť vidno priebeh programu alebo jeho aktuálny stavový riadok.

1.3 Pracovný priestor robota

Pracovný priestor robotov sa delí na tri časti a to teoretický, nevyužitý a skutočný pracovný priestor. Tieto tri priestory určujú množinu, v ktorej sa robot môže nachádzať (Obr. 1.1). Nad týmto priestorom sa nachádza bezpečnostný priestor. Tento priestor robot nedokáže dosiahnuť ale nesmie sa v ňom nachádzať obsluha [2].

- Teoretický pracovný priestor: množina všetkých bodov, ktoré je robot schopný dosiahnuť v jeho pracovnom priestore. Poloha v priestore sa udáva pomocou súradníc x , y , z .
- Nevyužitý pracovný priestor: je priestor, ktorý je pokrytý časťami robota a preto tento priestor nemožno robotom dosiahnuť.
- Skutočný pracovný priestor: je rozdielom teoretického a nevyužitého pracovného priestora [3].



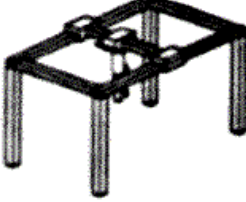

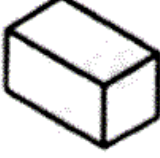
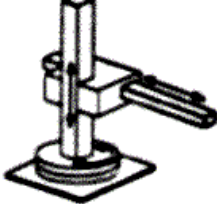


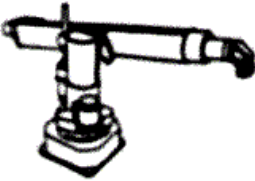


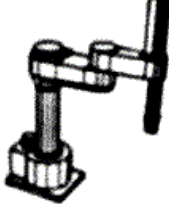





Obr. 1.1: Pracovný priestor okolo robota, prevzaté z [3]

Prvé tri pohybové väzby robota, určujú jeho tvar a veľkosť pracovného priestoru. Ostatné väzby sa neuvažujú a to kvôli veľmi komplexným tvarom priestoru, ktoré môže robot obsluhovať. Sériové kinematické štruktúry ramena robota, možno podľa usporiadanie tvaru ramena robota rozdeliť do piatich hlavných skupín (Obr. 1.2). Údaje charakterizujúce veľkosť a tvar pracovného priestoru vzhľadom na prírubu ukončujúcu rameno sa nachádzajú v technickej dokumentácii konkrétneho robota [1].

Najpoužívanejší spôsob kvantitatívneho vyhodnotenia pohybových možností robota je hodnotenie pracovného priestoru robota. Pracovný priestor robota sa hodnotí pomocou nasledujúcich kritérií [3]:

- Maximálne pracovné dráhy polohovacích väzieb – maximálny pohyb v jednotlivých osiach robota. V rotačných väzbách sa udáva natočenie v stupňoch, v posuvných väzbách vysunutie v milimetroch.
- Minimálne pracovné dráhy polohových väzieb - minimálny pohyb v jednotlivých osiach robota. V rotačných väzbách sa udáva natočenie v stupňoch, v posuvných väzbách vysunutie v milimetroch.
- Maximálne pracovné dráhy orientačných väzieb – maximálny rozsah orientačných väzieb robota.
- Minimálne pracovné dráhy orientačných väzieb - minimálny rozsah orientačných väzieb robota.

- Veľkosť pracovného priestoru.
- Poloha pracovného priestoru – je určená ťažiskom telesa, ktoré odpovedá pracovnému priestoru, vzhľadom na nulovú polohu ramena.

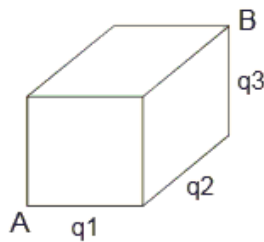
Princíp	Pochybová štruktúra	Pracovný priestor
 <p>Karteziánsky robot</p>		
 <p>Cylindrický robot</p>		
 <p>Sferický robot</p>		
 <p>SCARA robot</p>		
 <p>Angulárny robot</p>		

Obr. 1.2: Tvary kinematických štruktúr pracovných priestorov. Podľa [4]

1.4 Určovanie veľkosti pracovného priestoru

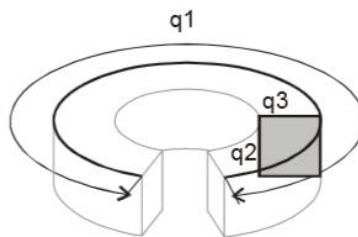
Pre jednotlivé kinematické štruktúry je odlišný postup určovania pracovného priestoru. Výsledný tvar sa určí postupným mapovaním pozícií koncového efektora, ktoré odpovedajú maximálnym alebo minimálnym hodnotám natočenia, prípadne vysunutia v jednotlivých väzbách. Súradnice týchto pozícií možno určiť výpočtom, simuláciou alebo meraním [3].

- Kartézska štruktúra – dĺžka hrán kvádra odpovedá veľkosti vysunutia vo väzbách. Bod A reprezentuje polohu žiadneho vysunutia väzieb, zatiaľ čo bod B reprezentuje vysunutie všetkých väzieb.



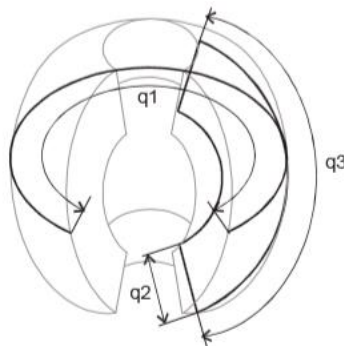
Obr. 1.3: Kartézska kinematická štruktúra a jej rozsah pohybu v jednotlivých väzbách [3]

- Cylindrická štruktúra – pracovný priestor má tvar dutého valca. Jeho výška odpovedá zdvihnutiu vo väzbe q_2 , šírka medzikružia zdvihu väzby q_3 a veľkosť medzikružia natočením väzby q_1 .



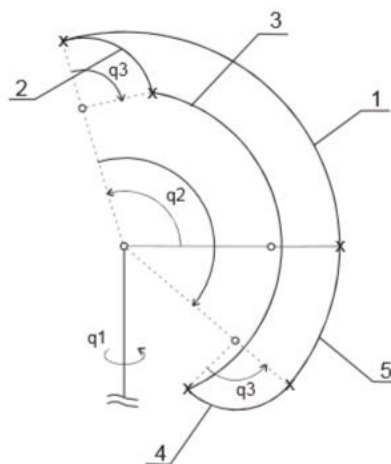
Obr. 1.4: Cylindrická kinematická štruktúra a jej rozsah pohybu v jednotlivých väzbách [3]

- Sférická štruktúra: Veľkosť prierezu pracovného priestoru medzikružia je daná pohybom vo väzbách q_2 a q_3 . Celkový tvar priestoru sa potom určí rotáciou tohto priestoru okolo zvislej osi o uhol vo väzbe q_1 .



Obr. 1.5: Sférická kinematická štruktúra a jej rozsah pohybu v jednotlivých väzbách [3]

- Angulárna štruktúra: Tvorí ju obrys plochy na seba nadväzujúcich oblúkov. Na začiatku sa rameno nachádza v nulovej polohe. Výsledný pracovný priestor vzniká rotáciou väzby q_1 . Jednotlivé kruhy reprezentujú pohyb ramien:
 - Oblúk 1 – rotácia koncového efektora vo väzbe q_2 z nulovej do hornej koncovej polohy.
 - Oblúk 2 – rotácia druhého ramena vo väzbe q_3 pri hornej koncovej polohe prvého ramena.
 - Oblúk 3 – rotácia prvého ramena pri dolnej koncovej polohe druhého ramena vo väzbe q_2 .
 - Oblúk 4 – rotácia druhého ramena vo väzbe q_3 pri dolnej koncovej polohe prvého ramena vo väzbe q_3 .
 - Oblúk 5 – rotácia koncového efektora vo väzbe q_2 z nulovej do dolnej koncovej polohy.



Obr. 1.6: Angulárna kinematická štruktúra a jej rozsah pohybu v jednotlivých väzbách [3]

1.5 Pohony

Funkciou pohonu manipulátora aj priemyslového robota je premena vstupnej primárnej energie na mechanický pohyb. Pohon je tvorený motorom, ktorý vykonáva túto premenu, blokom pre dodávanie a ovládanie energie motoru a spojovacím blokom, ktorý sprostredkováva väzbu medzi výstupom motora a pohyblivou časťou pohybovej jednotky [5]. Pohyb z výstupu motora sa na vstup pohybovej jednotky prenáša priamo alebo cez transformačný blok, prevodovku.

Pre optimálnu prevádzku robotov musia byť splnené požiadavky na pohon [6]:

- plynulý rozbeh a brzdenie,
- vysoká presnosť, polohovanie,
- dostatočná polohová tuhosť,
- minimálna hmotnosť,
- minimálny moment zotrvačnosti,
- vysoký merný výkon,
- minimálne rozmery,
- vhodné tvarové a priestorové usporiadanie.

Okrem týchto obecných požiadavkou sa uplatňujú aj špecifické požiadavky, ktoré sú určované podmienkami v ktorých robot pracuje.

Pohon robotov sa delí podľa primárnej použitej energie na [6]:

- mechanické,
- elektrické,
- hydraulické,
- pneumatické,
- kombinované,

a podľa typu pohonu na [6]:

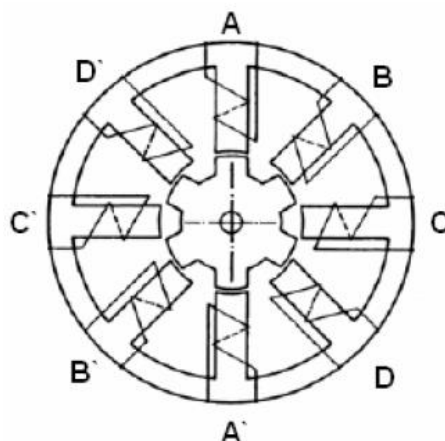
- rotačné,
- priamočiare,
- kyvné.

1.6 Krokové motory

Krokové motory patria do skupiny elektrických rotačných pohonov. Ich veľkou výhodou je ich schopnosť presného riadenia preto sú vhodné na použitie v malých priemyselných robotov. Pri krokových motorov je daný ich pohyb pomocou takzvaných krokov. Tieto kroky sú zabezpečené spínaním jednotlivých fáz. Význam pre robotiku majú hlavne krokové motory s pasívnym rotorom a hybridné krokové motory, pretože sú ľahko ovládateľné a majú jednoduchšiu konštrukciu, teda sú ľahšie na výrobu. Ich rozdiel je v počte fáz a rôznym spôsobom vyhotovenia rotora.

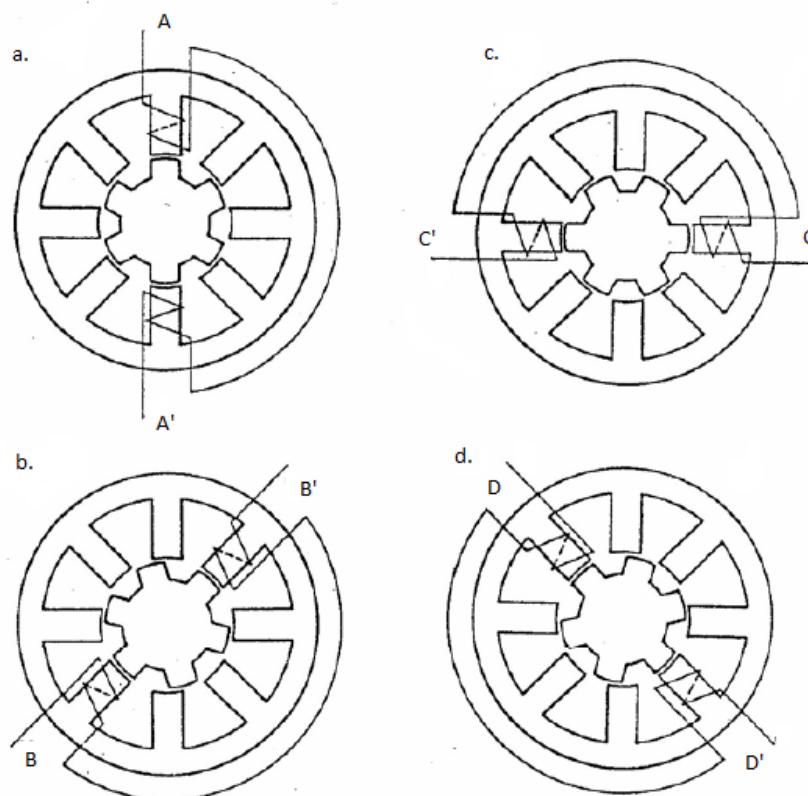
1.6.1 Krokové motory s pasívnym rotorom

Krokový motor s pasívnym rotorom je taktiež označovaný ako reakčný alebo reluktančný. Tieto motory majú vyjadrené póly na statore aj rotore a využívajú rozdielnej reluktancie teda vodivosti v priečnej aj pozdĺžnej osy. Podmienkou pre fungovanie je aby bol rozdielny počet pólov teda zubov na statore a rotore. Na obr. 1.7 je rez krokového motora s uhlom kroku 15° . Medzi pólovými nástavcami statoru a rotoru je veľmi malá vzduchová medzera obvykle 0,02 až 0,2 mm. Protiľahlé páry statorových vynúti sú zapojené v sérii a tvoria severný a južný pól [7].



Obr. 1.7: Rez štvorfázovým krokovým motorom s pasívnym rotorom s veľkosťou kroku 15° . Prevzaté t [7]

Na statore motoru uvedeného na obr. 1.7 je osem pospájaných zubov a na každom zube je navinutá cievka. Dvojica protiľahlých cievok je vždy spojená a tvorí jednu fázu. Rotor má šesť zubov a je bez vinutia. Fáze vinutia sú pripojené na výkonový prvok, ktorý riadi ich spínanie. Pred pripojením k zdroju napätia sa nachádza motor v jednej z možných náhodných polôh, ktorá je daná zbytkovým magnetizmom rotoru.



Obr. 1.8: Znáznornenie pohybu krokového motoru v závislosti na prepínaní fázy vinutia.

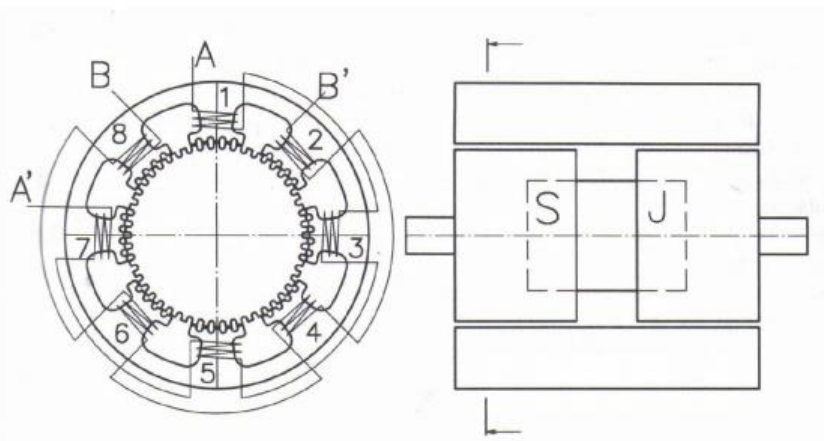
Názorný pohyb motoru je vidieť na Obr. 1.8. Pokiaľ je prvá kombinácia zopnutia fázy (1, 0, 0, 0), potečie fázou A prúd a motor sa nastaví do prvej polohy (Obr. 1.8a). Postupným spínaním fázy nastáva posun osy motoru, pretože sa rotor snaží zaujať kľudovú polohu tak aby pretekal maximálny magnetický tok daným smerom pôsobenia magnetickej indukcie. Krokovanie motoru neprebíha skokovou zmenou ale

rotor najskôr prekývne a až potom sa ustáli v kludovej polohe. Veľkosť prekmitu závisí od momentu zotrvačnosti poháňaného zariadenia. Celková veľkosť pootočenia sa určí z rovnice, kde m je počet fázy vinutia statoru, N je počet zubov rotora a $\Delta\Phi$ je veľkosť pootočenia [8].

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{m \cdot N} \text{ [}^\circ\text{]} \quad 1.1$$

1.6.2 Hybridný krokový motor

Hybridný motor je v súčasnosti najpoužívanejší krokový motor. Na nákrese krokového motora (Obr. 1.9) je stator tvorený ôsmimi pólovými nastavcami. Každý nastavec je ďalej rozdelený do piatich zubov. Na každom nastavci je navinutá cievka. Rotor musí byť tvorený hriadeľom nemagnetickej oceli, na ktorej sú nalisované dva pólové nastavce. Medzi pólovými nastavcami je uložený permanentný magnet, ktorý je polarizovaný axiálne. Pólové nastavce sú rozdelené na päťdesiat zubov. Týmto rozostavením je motor schopný kroku o veľkosti $1,8^\circ$. Dôležité je, aby bola dodržaná podmienka, že rotorové pólové nastavce sú vzájomne natočené o polovicu rotorového drážkového rozmeru [8].



Obr. 1.9: Schéma hybridného krokového motora, prevzaté z [7]

Pokiaľ nie je žiadna cievka budená je rotor udržiavaný v kludovej polohe pomocou magnetického poľa permanentného magnetu. Cievky sú pozapájané do dvoch fáz, pričom fáza A je tvorená cievkami 1, 3, 5, 7 a B 2, 4, 6, 8. Pri začatí budenia fázy A sa spolarizujú póly 1, 5 južne a 3, 7 severne. Zuby na severnom konci rotora budú pritiahnuté pólmi 1, 5 a na južnom konci sa pritiahnu posunuté zuby 3, 7. Pre jeden krok je treba ukončiť budenie fázy A a začať budiť fázu B kladným alebo záporným prúdom, podľa toho ktorým smerom sa má motor otáčať. Postupnosť budení je pre otáčanie v smeru hodinových ručičiek: +A, -B, -A, +B, +A. V proti smeru hodinových ručičiek je budenie: +A, +B, -A, -B, +A. Z tohto vyplýva, že na posun je potrebné bipolárne napájanie, ktoré je najčastejšie vytvorené pomocou H-mostíka. Úpravou vinutia hybridného krokového motora, je počet vyvedení výstupov z fáz. Rozdeľujeme základne tri druhy a to [7]:

- Osem vodičov – každá polovica fáze je vyvedená samostatne.
- Šesť vodičov – oba konce fáz a zvlášť vyvedené ich stredy.
- Päť vodičov – oba konce fáz a ich spojené stredy.

1.7 Sensory používané v robotike

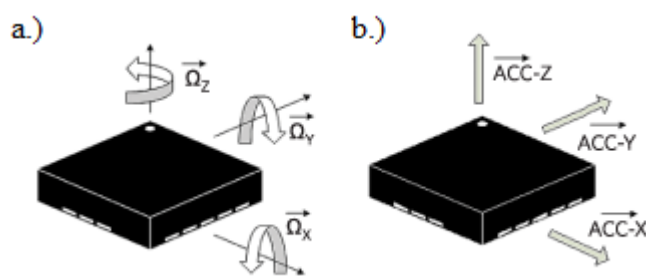
Presnejšie priemyselné roboty potrebujú pre svoju prácu minimálne senzory, ktoré zabezpečujú spätnú väzbu pre pohony a natočenie jednotlivých pohybových väzieb.

Najčastejšie používané senzory v robotike sú senzory určujúce polohu, rýchlosť pohybu, natáčanie, sledovanie magnetického poľa, určovanie tlaku a podobne. Sensory môžu byť podľa vyhotovenia na presné mechanické senzory alebo mikroelektromechanické senzory (MEMS). V súčasnosti sa začínajú viac používať práve MEMS senzory z dôvodu ich zvyšujúcej sa presnosti a nízkej ceny.

Mikroelektromechanické senzory (MEMS) kombinujú mechanické a elektrické komponenty v malej štruktúre. Výrobné procesy týchto senzorov teda kombinujú polovodičovú a mikrotechnologickú výrobu a výstupom je snaha o zminimalizovanie a integrovanie všetkých súčastí do obyčajného plastového puzdra [9].

1.7.1 Princíp činnosti senzorov polohy

MEMS senzory majú viacero aplikácií v zmysle pohybu senzora. Rozdeľujú sa na dva hlavné smery, ktoré môžu byť kombinované v jednom puzdre. Jeden typ je meranie natočenia v jednom alebo vo viacerých osiach (Obr. 1.10a) a druhým je meranie akcelerácie v jednom alebo vo viacerých smeroch (Obr. 1.10b).



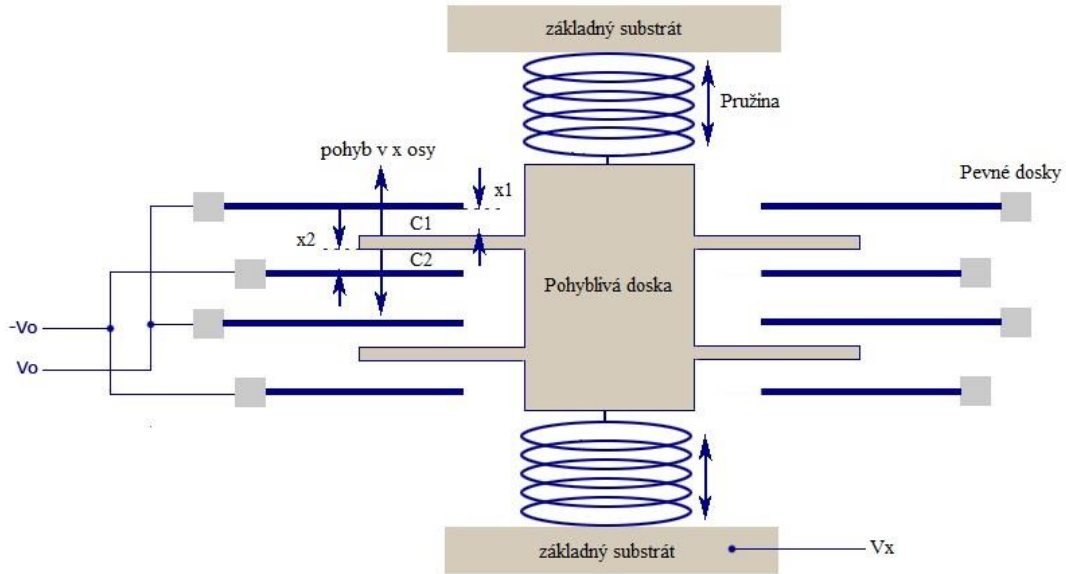
Obr. 1.10: MEMS senzory, a.) gyroskopický senzor reagujúci na natočenie, b.) akcelerometer reagujúci na pohyb.
Prevzaté z [10]

Základný princíp akcelerometra vychádza z druhého Newtonovho zákona (viz. rovnica 1.2), kde F je výsledná pôsobiaca sila na telesa, m je hmotnosť telesa a a je zrýchlenie v danej osi.

$$F = m \cdot a \quad [N] \quad 1.2$$

Akcelerácia vytvára silu, ktorá je pomocou akcelerometru v jednom smere meraná. Štruktúra senzora je založená na premenlivej kapacite trojelektrodového vzduchového kondenzátoru (Obr. 1.11). Pri zmene akcelerácie sa mení výchylka pohyblivej časti, ktorá

je prichytená na základnom substráte pomocou mikropružín. Následne vychýlením elektród sa mení rozdiel kapacít, ktorý sa prevádza na digitálny signál [10].

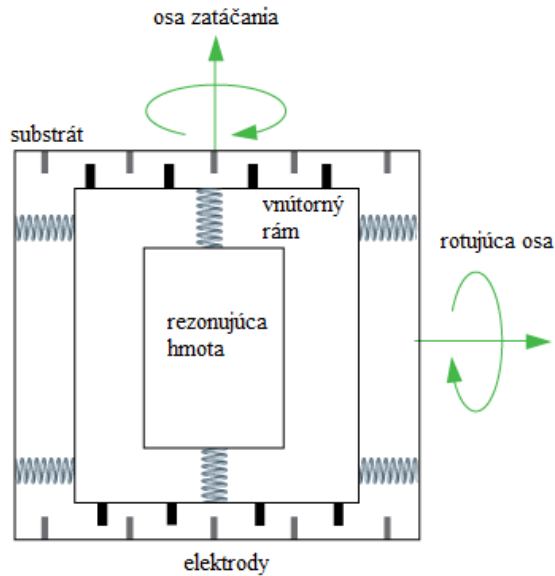


Obr. 1.11: Princíp činnosti akcelerometra [11].

Celkové usporiadanie na čipe je pospájanie paralelnej kombinácie takýchto systémov. Výstupné napätie sa meria na základnom substráte V_x a je dané rovnicou 1.3 [11].

$$V_x = V_0 \cdot \frac{C2 - C1}{C2 + C1} = \frac{\Delta x}{d} \cdot V_0 \quad [mV/g] \quad 1.3$$

Rozdiel medzi akcelerometrom a gyroskopom je v rozdiely citlivosti na iný typ pohybu. Pri akcelerometroch je pohyb lineárny špecifikovaný v jednotkách mV/g, zatiaľ čo u gyroskopoch je meraná hodnota natočenia v mV/deg/s. Pri klasickej štruktúre akcelorometru, ak by nastávalo natáčanie senzora zmena rozdielu kapacít by nenastávala. Preto musí byť pre meranie rotácie štruktúra upravená (Obr. 1.12) [10]



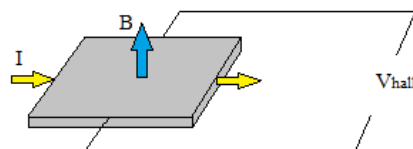
Obr. 1.12: Princíp gyroskopu [10]

Takto upravená štruktúra pozostáva z rezonujúcej základne (hmota, ktorej hmotnosťou je posúvaný vnútorný rám). Tá je upevnená k vnútornému rámu pod 90° uhlom pomocou vnútorných pružín. Vnútorný rám je prichytený pomocou vonkajších pružín na substrát. Pri natočení senzora teda dochádza vplyvom zotrvačnosti k zasúvaniu pohyblivých elektród v smere rotujúcej osi a v smere zatáčajúcej osi zas posúvanie elektród. Zmena je rovnako ako v prípade akcelerometra následne prevedená na výstupný signál senzoru, často v digitálnej podobe.

1.7.2 Princíp činnosti magnetometrov

V súčasnosti najpoužívanejšie princípy v MEMS magnetometroch sú Hallov efekt, magneto-rezistencia a fluxgate efekty. Magnetometre na princípe Hallovho efektu majú malú citlivosť a veľký teplotný posun. Sensory na princípe magneto-rezistencie sú iba na posúdenie intenzity magnetického poľa a fluxgate senzory sú ťažké na výrobu.

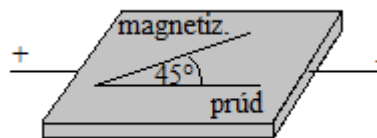
Najjednoduchšie na výrobu sú senzory založené na princípe Hallovho efektu. Hallóv jav spôsobuje, že na tenkom kovovom elemente môže byť namerané priečne napätie, keď na element pôsobí magnetické pole kolmo na pretekajúci pracovný prúd. Vznik napätia je spôsobený zakrivením prietoku prúdu pri pôsobení indukcie a tak k rozdielu potenciálu na koncoch a k vzniku napätia medzi nimi. Vzniknuté napätie je označované ako Hallovo napätie [12].



Obr. 1.13: Schematické znázornenie princípu Hallovho napätia [12]

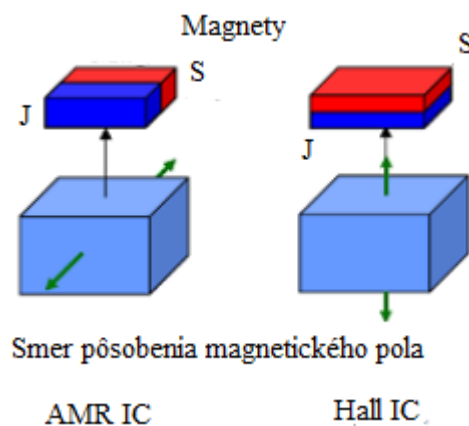
Ako už bolo spomínané nevýhody tejto metódy sú malá citlivosť a teplotná závislosť. Ale výhodou je relatívne malá veľkosť senzoru, malá spotreba energie a nízka cena. Citlivosť Hallovhovho efektu môže byť zväčšená zvýšením magnetického toku. Toto zvýšenie má za následok celkové zväčšenie rozmeru senzora a taktiež môže u senzora nastať nelinearita alebo hysterézy efekt [12].

V súčasnosti najvyvrábanejšie sú senzory založené na princípe anizotropickej magnetorezistencie – AMR. Tento koncept je založený na tenkej fólie, ktorá je zložená s 80 % niklu a 20 % železa (permalloy). V kludovej polohe sú všetky magnetické domény nasmerované v jednom smere.



Obr. 1.14: Permalloy bez pôsobenia magnetického póla [13].

Pri pôsobení magnetického poľa sa tieto domény natáčajú v smere pôsobenia poľa. Smer natočenia magnetických domén má vplyv na veľkosť pretekajúceho prúdu a teda na jeho odpor. Pokiaľ je smer prúdu zhodný s vektorom magnetického poľa odpor je maximálny a naopak ak je magnetické pole kolmé na smer pretekajúceho prúdu je odpor minimálny. Vyhotovenie permalloye je potom také aby pretekajúci prúd bol vychýlený o 45° oproti natočeniu magnetických domén v kludovom stave. Zmena odporu nastáva už pri veľmi malých indukciách rádovo v mT. S rastúcou hodnotou indukcie odpor skoro lineárne klesá ale maximálne o 3 % hodnoty pôvodného odporu, potom sa ďalej už nemení. Na rozdiel od Hallova javu, AMR senzory nerozlišujú kolmé magnetické pole ale horizontálne a teda nerozlišujú severný a južný pól ale smer natočenia magnetu [13].



Obr. 1.15: Rozdiel medzi AMR a Halloým efektom

Posledným druhom nízko cenových magnetometroch sú senzory využívajúce Lorentzové sily. Výhodou týchto sensorov je, že sa dajú vyrábať ako MEMS zariadenia. Ich nevýhodou je, že sú veľmi citlivé na okolný šum.

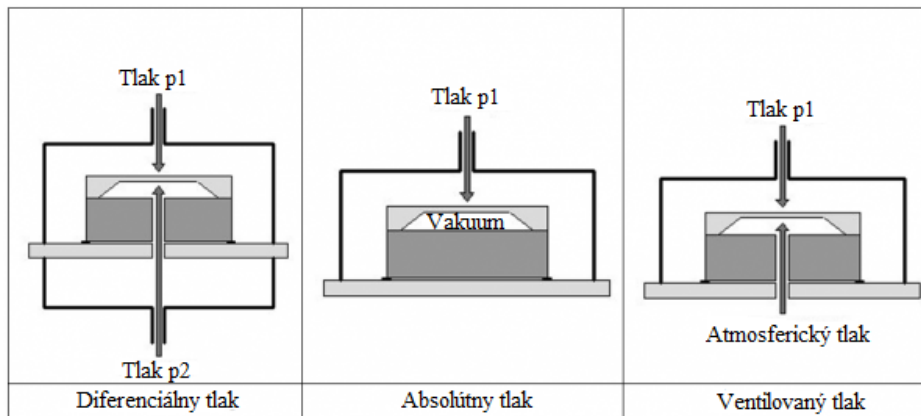
1.7.3 Princíp činnosti integrovaných senzorov tlaku

V súčasnosti sa tak ako aj v iných typoch senzorov hľadí hlavne na rozmery senzoru, jeho cenu, presnosť a spoľahlivosť. Preto sa aj senzory tlaku začali vyrábať v technológii MEMS.

Možné princípy merania sú [14]:

- Diferenčné meranie - kde pôsobia na senzor dva tlaky proti sebe a výsledná hodnota tlaku sa určuje rozdielom týchto tlakov.
- Absolutné meranie - pôsobený tlak je vzťahovaný na vákuum, ktoré pôsobí na meracia plochu z druhej strany.
- Ventilované meranie - tlak je vzťahovaný proti atmosférickému tlaku.

Jednotlivé princípy sú zobrazené na Obr. 1.16.



Obr. 1.16: Spôsoby merania tlaku

Najpoužívanejšie technológie snímania tlaku sú založené na silovom pôsobení na mechanickú časť ako sú napríklad membrány, piesty, Bourdonové trubice, alebo manžety, pre meranie napätia spôsobeného aplikovaním sily na plochu. Najčastejšie ide o piezorezistívne, piezoelektrické, elektromechanické tenzometre, premenné kapacitory, elektromagnety a taktiež opticky snímané vlákno.

Piezorezistívne snímače tlaku, sa vyrábajú ako membrány v ktorých sú nadifundované kremíkové piezorezisty na základnom silikónovom materiále. Základným princípom je zmena odporu pri pôsobení tlaku, pričom táto zmena je podstatne väčšia než zmena pri odporu v tenzometroch. Princíp vyhodnotenia výsledného tlaku je určený pomocou mostíka, kde sa meria jeho rozladenie, ktoré je závislé na tlaku pôsobiacom na silikónovú membránu. Tieto senzory sú veľmi citlivé na zmenu tlaku, majú dobrú linearitu ale ich nevýhody sú veľká citlivosť na zmenu teploty a veľký počiatočný ofset [15].

Piezoelektrické snímače sú založené na priamom piezoelektrickom jave. Sú to obojstranné snímače, ktoré sú schopné premeniť pôsobiaci tlak na napätie. Základnou zložkou je metalizovaný kremeň alebo keramické materiály. Dôležitým faktorom je, že ide o dynamický účinok, teda výstup poskytujú len vtedy keď sa mení vstup.

Piezoelektrické senzory majú veľkú výstupnú impedanciu a preto musia byť pripojené na výstupný zosilňovač [15].

Kapacitné senzory sú založené na princípe prehybania tenkej vodivej membrány, na ktorú pôsobí meraný tlak. Táto membrána je prehybaná k pevnej referenčnej membráne. Prehybom je spôsobná zmena kapacity, ktorá určuje tlak na ňu pôsobiaci. Táto zmena môže byť lineárna, podľa vyhotovenia senzoru, a je rádovo v pF. Výhodou týchto senzorov je vysoká teplotná stabilita, možnosť merania absolútneho tlaku. Nevýhodou môže byť zanášanie chyby pri akcelerácii senzora, kedy na membránu pôsobí sila a tá ju deformuje [15].

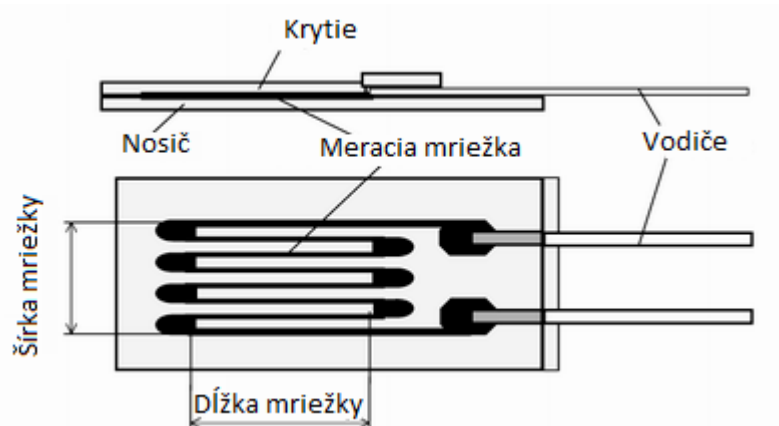
1.7.4 Princíp činnosti tenzometrických snímačov tlaku

Ďalším možným snímaním tlaku je použitie súčiastky, ktorá prevádza pnutie na zmenu elektrického odporu. Túto zmenu možno merať a tým vyhodnocovať tlak pôsobiaci na teleso [16]. Tenzometer využíva princíp piezorezistívneho javu – ak je vodič mechanicky deformovaný, menia sa jeho parametre, teda dĺžka l plocha S a tým sa mení aj jeho odpor R . Najviac sa ale uplatňuje pozdĺžna deformácia, preto platí [17]:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l} \quad [-] \quad 1.4$$

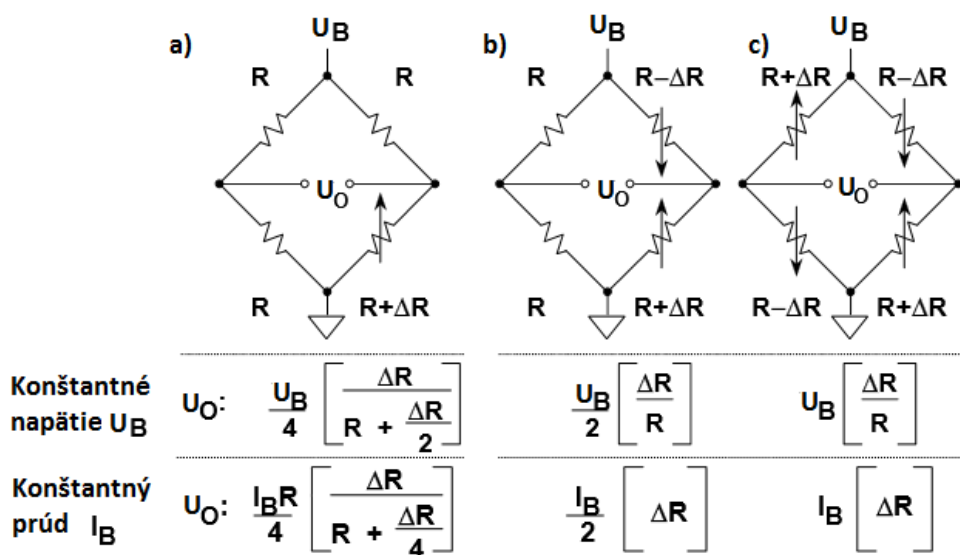
Kde K je súčiniteľ deformačnej citlivosti závislí na od použitého materiálu. Podľa použitého materiálu možno tenzometre rozdeliť na:

- Odporové polovodičové – majú vyšší súčiniteľ deformačnej citlivosti ale majú nelineárnu závislosť relatívnej zmeny odporu na meranej deformácii. Využívajú piezorezistívneho javu, ktorý je daný hlavne zmenou nosičov nábojov. Pracovná teplota je obmedzená kritickou teplotou, pri ktorej stráca polovodič tenzometrické vlastnosti. Ako materiál sa používajú monokryštaly germánia alebo kremíka.
- Odporové kovové – majú naopak nižší súčiniteľ deformácie ale lineárnu závislosť relatívnej zmeny odporu. Ďalej sa delia podľa vyhotovenia na drôtové, fóliové (Obr. 1.17), vrstvomé. Najvyužívanejšie sú v súčasnosti fóliové a to kvôli ich dobrým mechanickým vlastnostiam a jednoduchosti výroby. Kovové tenzometre sa vyrábajú s odporom v rozsahu od 50 Ω až do 2500 Ω pritom najbežnejšou hodnotou je 120 Ω .



Obr. 1.17: Konštrukcia fóliového tenzometra, podľa [18]

Zmeny odporu fóliových senzorov sú niekedy pomerne malé ale treba ich presne merať, preto sa používa zapojenie do Wheatstonovho mostíka. Zapojenie obsahuje štyri odpory, ktoré sú napájané konštantným napätím U_B a meria sa zmena jeho výstupného napätia U_O . Ak je mostík vo vyváženom stave výstupné napätie je nulové. Pre meranie sa môže použiť jeden alebo aj viacej tenzometrov, to potom ovplyvňuje presnosť merania [19]. Možno použiť zapojenie vo štvrtinovom mostíku (Obr. 1.18a), v polovičnom (Obr. 1.18b) alebo plnom (Obr. 1.18c) mostíku. Ramená, kde nie je senzor pritom nahradíme pevným odporom R , najlepšie takej hodnoty, ktorá zodpovedá odporu odporového senzora v stave bez budenia meranou veličinou (v klúde). Zmena hodnoty senzora vplyvom meranej veličiny je označená ako ΔR .



Obr. 1.18: Zapojenie senzorov v mostíku. Prevzaté z [19].

Namiesto napájania mostíka zdrojom konštantného napätia sa môže použiť aj zdroj konštantného prúdu. Výhoda je, že odpor prívodových vodičov k mostíku nemá vplyv na jeho výstupné napätie. Elektronická jednotka, ktorá zabezpečuje spracovanie signálov musí obsahovať aspoň dve časti - zdroj napájacieho napätia pre mostík a zosilňovač signálu.

2 Praktická časť

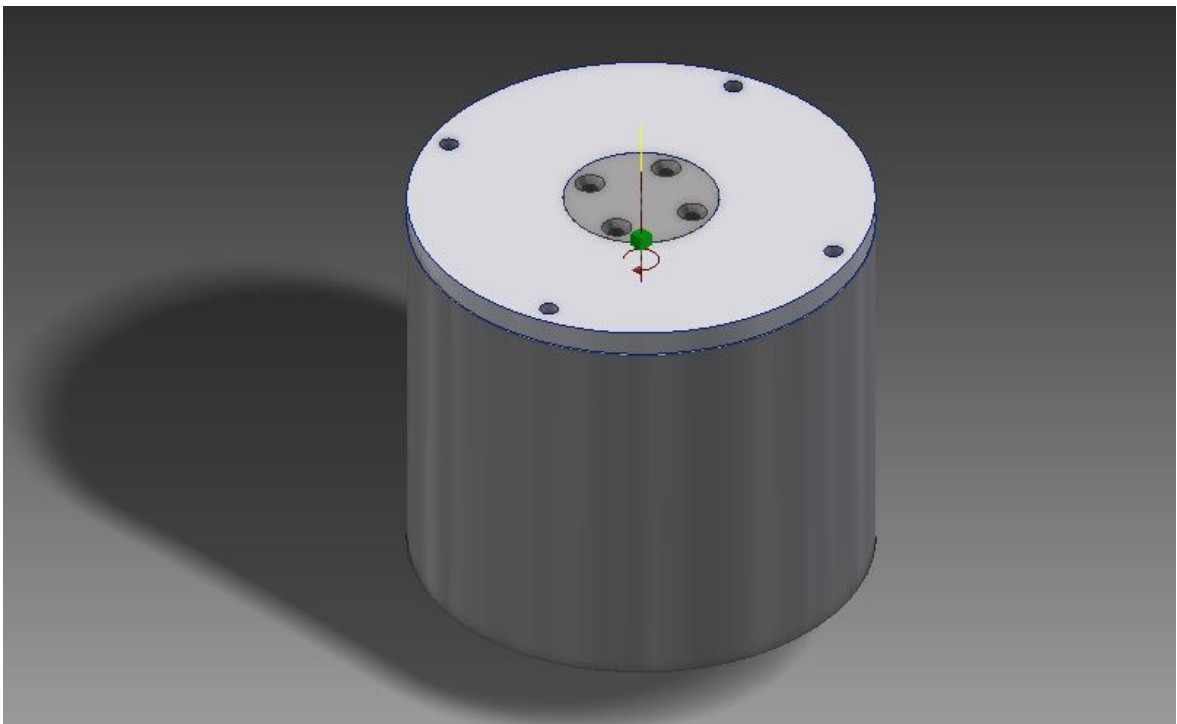
2.1 Mechanická časť

V tejto kapitole je rozobratý výber mechaniky robota a jeho návrh. Pri návrhu robota sa muselo dbať na jeho odolnosť, jednoduchosť návrhu a účinnosť. Pri návrhu každého robota treba zohľadniť a vybrať správnu konštrukciu, senzory, pohon, riadenie a rôzne ďalšie komponenty, ktoré zabezpečujú jeho správny pohyb a ovládanie. Ako návrhové prostredie bol zvolený program Autodesk Inventor 2015. Program bol vybraný kvôli možnosti návrhu v 3D a zároveň obsahuje komponentu Design Accelerator, ktorá dokáže navrhnuť správne prevodové pomery, potrebnú pevnosť materiálov a dĺžky použitých remeňov. Ako štruktúra robota bola zvolená anregulárna, ktorej parametre sú popísané v kapitole 1.3.

2.1.1 Konštrukcia robota

Konštrukcia robota bola rozdelená do troch častí daných anregulárnou štruktúrou robota. Ide o spodnú časť, ktorú tvorí podstava a otočnica, strednú časť obsahujúcu samotné rameno s remeňmi a karuselom a vrchná časť, efektor.

2.1.1.1 Spodná časť robota – podstava a otočnica



Obr. 2.1: Detail spodnej časti robota s pevnou podstavou a otočnicou

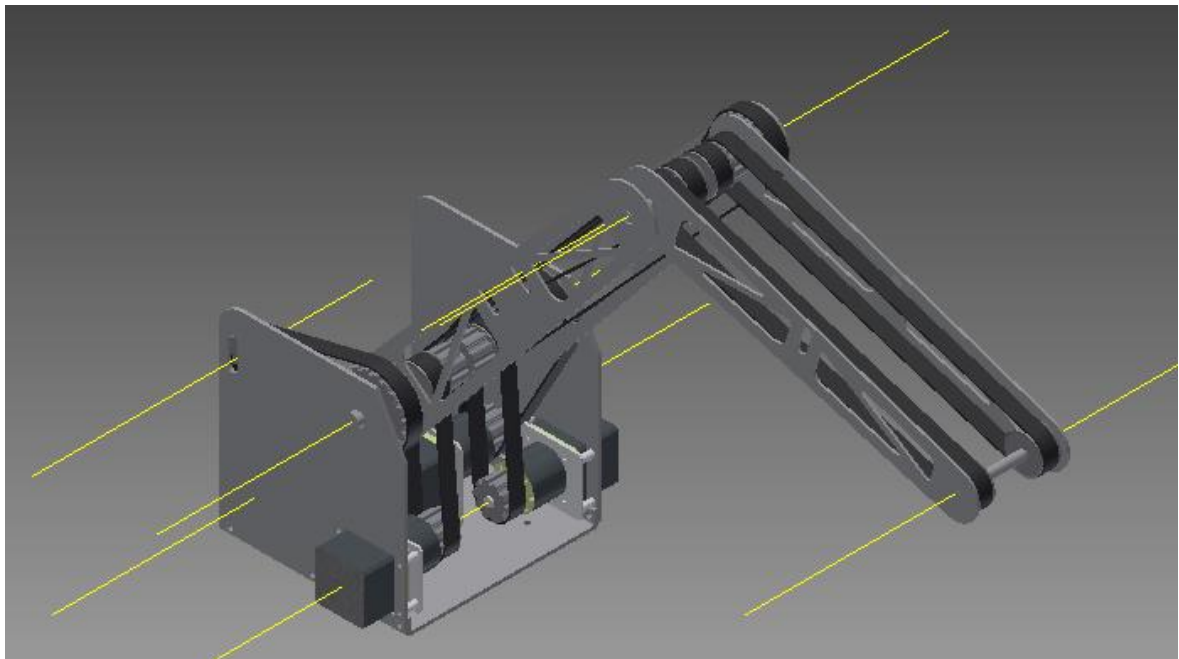
Spodná časť robota slúži ako podstava robota, vlastné ťažisko robota a zastáva rotačný pohyb robota. Skladá sa z podstavy v ktorej je umiestnené axiálne-radialné valčekové ložisko, na ktorom je umiestnená otočnica. Medzi otočnicou a podstavou je

uložené vymedzovacie axiálne ložisko. Otočnica je pritiahnutá k podstave pomocou stredného hriadeľa a skupiny dvoch skrutok.

Motor zabezpečujúci rotačný pohyb robota je umiestnený zo spodnej strany, kde je prichytený pomocou modulu k podstave a jeho hriadeľ je prichytená k otočnici.

Tento spôsob vyhotovenia spodnej časti robota zabezpečuje maximálne odľahčenie motora, teda na motory neleží žiadna záťaž a zabezpečuje iba otočnú funkcie nie aj nosiacu.

2.1.1.2 Stredná časť robota – rameno robota



Obr. 2.2: Detail strednej časti robota s uchytením jednotlivých ramien a prevodov.

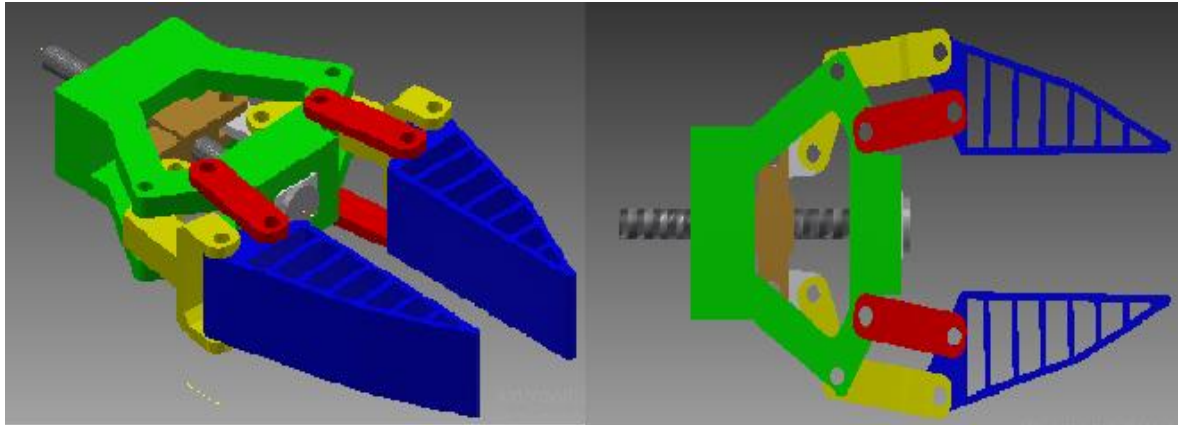
Stredná časť (Obr. 2.2) sa skladá z karuselu v ktorom sú uchytené štyri krokové motory. Tieto motory prenášajú svoj krútiaci moment pomocou remeňov na spodnú hriadeľ. Hriadeľ slúži len na uchytenie remeňov a ramena, to znamená, že je pevná ku karuselu. Na hriadeľ sa nachádza sedem remeňov z toho je jedna prichytená ku spodnej časti ramena na pevno a ostatné sú pospájané v dvojiciach. Podobne je prenášaný krútiaci moment aj na druhé rameno. Na hornej remenici sa nachádza kuželové súkolie (nie je zobrazené na Obr. 2.2, ku ktorému sú pripojené remenice). Mechanizmus slúži na pohybovanie horných kliešťov robota v dvoch smeroch a to rotačný pohyb kolmý na hriadeľ a rotačný pohyb po hriadeľi. Výber, ktorý z pohybov bude použitý sa rozhodne na základe pohybu motorov:

- Pohyb proti sebe: súkolie sa otáča, nastáva rotačný pohyb kolmý na hriadeľ.
- Pohyb rovnaký : súkolie sa neotáča, je zakliesnené v sebe a tým pádom nastáva pohyb rotačný po hriadeľi.

Pri návrhu sa postupovalo od spodu na vrch. Prvé boli určené veľkosti motorov z využitím parametrov udávaných v ich datasheetu. Podľa týchto rozmerov bol skonštruovaný ich modely a umiestnené do karuselu robota. V ďalšom kroku boli určené

parametre motorov s ohľadom na približnú váhu celého ramena. Remenice boli vybraté s tým, že remenice prenášajúce moment mali mať desať zubov a remenice vykonávajúce pohyb ramien boli zvolené s dvojnásobnou veľkosťou teda dvadsať zubov. Tieto parametre boli vložené do programu Inventor 2015, ktorý určil potrebné parametre pre remene. S ohľadom na už vyrátané remene boli určené potrebné veľkosti ramien.

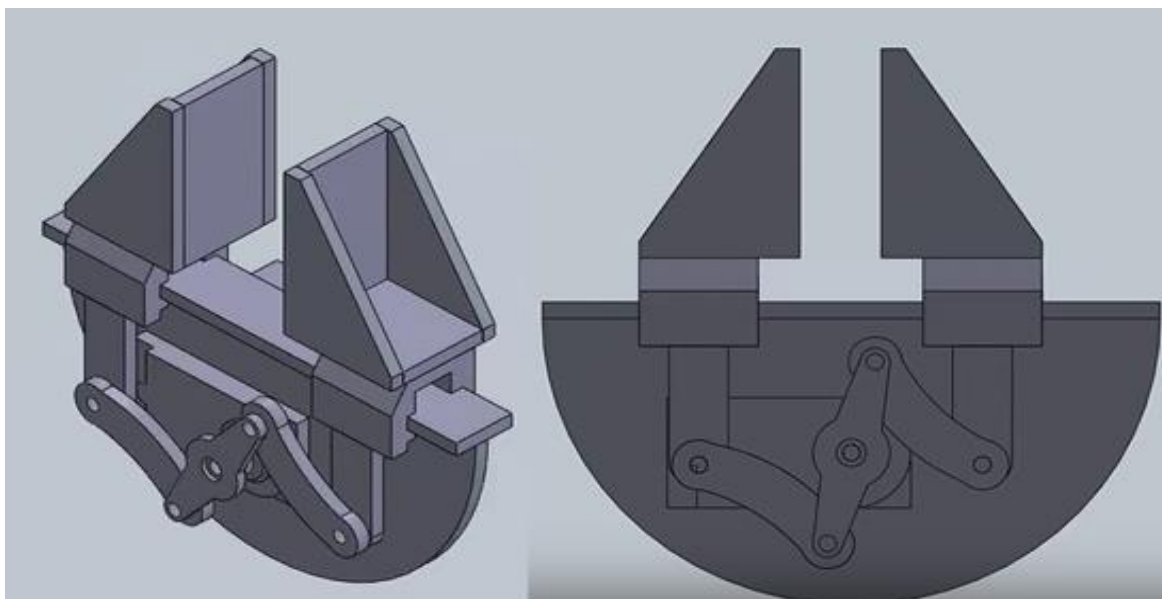
2.1.1.3 Vrchná časť - efektor robota



Obr. 2.3: Detail vrchnej časti robota – efektora.

Prvý návrh vrchného efektora je zobrazený na obrázku (Obr. 2.3). Efektor je uchytený na kužeľovom súkolí, ktoré zabezpečuje rotačný a súčasne aj zdvíhací pohyb. Kliešte efektora sa pohybujú pomocou šróbovice (šedá časť) a šróbu (hnedá časť), tie sú uchytené v kolíske (zelená časť). Šróbovica je prichytená cez hriadeľ súkolia na krokový motor. Aby nastala kompenzácia a pri rotácii efektora sa kliešte samovoľne neotvárali alebo zatvárali musí byť vždy krokový motor ovládajúci kliešte odpojený od napájania, aby sa mohla jeho hriadeľ voľne otáčať. Na to aby kliešte ostali stále pod uhlom 90° je použitá sústava troch pák (strieborná, žltá a červená časť), simuláciou vyplynulo, že ich výstupný uhol musí byť vždy rovný 180° . Pokiaľ je táto podmienka splnená tak kliešte ostanú pri otváraní a zatváraní stále v kolmej polohe.

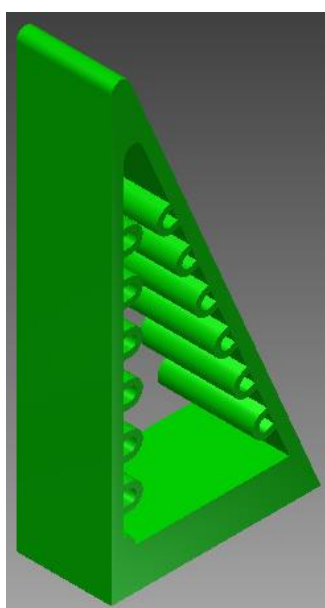
Výhodou tohto návrhu je jeho veľká presnosť a pevnosť pri otváraní, zatváraní. Taktiež tlak, ktorým dokážu kliešte zvierat' predmet. Ďalej šróbovica so šróbom je samosvorná čiže pri odpojení napätia od motora si kliešte uchovávajú svoj zvierací tlak na uchopený predmet. Nevýhodou tejto sústavy je jej zložitosť pri výrobe a vysoká cena výroby. Preto tento návrh efektora nebol prakticky vyrobený.



Obr. 2.4: Detail vrchnej časti použitého efektora.

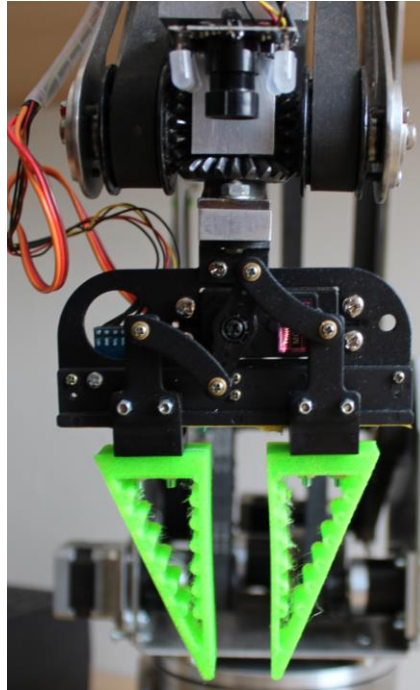
Na Obr. 2.4 je znázornená použitá štruktúra efektora. Princíp pohybu je o podstatne jednoduchší. Servo motor, ktorý je uložený zo spodnej časti pohybuje cez jedno rameno kliešte, ktoré sú umiestené na bežci. Rameno musí mať radiálny tvar, ktorý je daný maximálnou možnou roziahnutou vzdialenosťou medzi kliešťami. Ak by nebol zachovaný radiálny tvar nastávala by situácia (rameno uchytené na hriadeli motora so stredným ramenom by zvierali uhol 45° a súčasne by stredné rameno zvieralo s ramenom s kliešťami tiež uhol 45°), kedy by sa kliešte zasekávali v pohybe. Radiálnym tvarom je zabezpečené, že táto situácia nenastane.

Výhodou tejto štruktúry je jej jednoduchosť a dobrá ovládateľnosť. Nevýhodou je že sústava nie je samosvorná, preto treba musí servo motor stále tlačil na uchopovaný predmet. Hlavne z finančných a konštrukčných možností bola použitá táto štruktúra efektora.



Obr. 2.5: Detail na flexibilné kliešte.

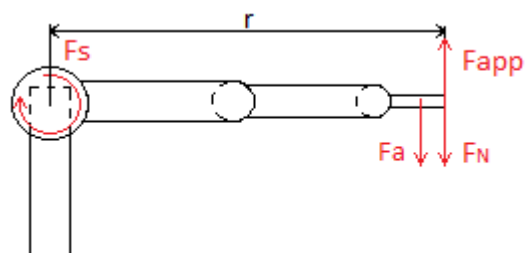
Ďalšou výhodou tejto štruktúry efektora je jeho jednoduchá odnímateľnosť uchopovacích klieští. Pre tento model boli špeciálne navrhnuté flexibilné kliešte (Obr. 2.5). Ich hlavnou výhodou je prispôbiť sa uchopovanému predmetu. Možné je s nimi efektívne uchopovať oblé predmety, pri ktorých by bol s pevnými kliešťami problém. Ďalšia výhoda je, že jeden predmet bude vždy uchopený rovnakým tlakom. Tlak, ktorým je predmet uchopený je daný flexibilitnosťou klieští. Návrh týchto klieští bol inšpirovaný firmou Festo [20].



Obr. 2.6: Vyrobený koncový efektor spolu s flexibilnými kliešťami a kužeľovým súkolím.

2.1.2 Dimenzovanie motorov

Pri výbere pohonu pre ruku sa muselo dbať na jej váhu tak aby zostal dostatočný výkon aj na zdvihnutie manipulovaného telesa. Schematické zobrazenie ruky je na Obr. 2.7.



Obr. 2.7: Schematické znázornenie robotickej ruky s pôsobiacimi silami

Keďže najväčšia záťaž pôsobí na motor, ktorý pohybuje celým ramenom, tak je braný ako východiskový bod pre dimenzovanie motorov. Na obrázku je znázornený najhorší prípad, kedy je ruka kolmá na otáčajúcu sa hriadeľ. V každom ďalšom prípade bude sila F_N pôsobiaca proti sile F_{app} znížená o sínus uhla, ktoré zvierá rameno zo základňou. Sila F_a znázorňuje zrýchlenie ramena a je vždy kolmá na rameno.

Celková sila potrebná na zdvihnutie ramena je daná rovnicou 2.1.

$$F_{app} = F_N + F_a + F_S \quad [N] \quad 2.1$$

- F_{app} – sila potrebná na zdvihnutie telesa.
- F_N – normálová sila.
- F_S – je odpor zrýchlenia spôsobený zotrvačnosťou rotujúcich hmôt.
- F_a – sila potrebná na zrýchlenie ramena.

Normálová sila je určená súčinom hmotnosti ramena a gravitačného zrýchlenia. Odpor zrýchlenia je daný celkovým momentom zotrvačnosti, ktorý je ale v praxi ťažko zistiteľný preto je zavedený bezrozmerný súčiniteľ rotačných odporov [21]. Výsledná sila je potom daná vzťahom 2.2.

$$F_{app} = mg + ma + \frac{1}{r} J_{C^{\varepsilon}} \quad [N] \quad 2.2$$

Po úprave dostaneme rovnicu 2.3.

$$F_{app} = mg \left(1 + \frac{a}{g} \vartheta \right) \quad [N] \quad 2.3$$

- m – hmotnosť ramena.
- g – gravitačné zrýchlenie.
- $J_{C^{\varepsilon}}$ – celkový moment zotrvačnosti.
- ϑ – súčiniteľ rotačných odporov.

Požadovaný výkon je daný rovnicou 2.4.

$$P_m = F_{app} \cdot v \quad [N] \quad 2.4$$

Potrebný moment ide dopočítať pomocou rovnice 2.5.

$$M = \frac{P_m}{\omega} \quad [Nm] \quad 2.5$$

Pri uvažovaní, že rameno bude poháňané z jednej remenice a chceme vybrať správny typ motora uvažujeme o týchto parametroch (Tabuľka 1). Parametre boli určené z návrhu rozmerov robota.

Tabuľka 1: Vlastnosti pohybu ramena

Celková hmotnosť ramena.	$m = 2,2 \text{ kg}$
Rýchlosť pohybu.	$v = 0,15 \text{ m/s}$
Zrýchlenie pohybu	$a = 0,8 \text{ m/s}^2$
Súčiniteľ rotačných odporov	$g = 1,3$
Polomer hnaného kola	$r = 0,7 \text{ m}$

Po dosadení do rovnice (2.3) určíme potrebný výkon motora:

$$P_{app} = 2,2 \cdot 9,8 \cdot 0,15 \left(1 + \frac{0,8}{9,8} \cdot 1,3 \right) = 3,6 \text{ W} \quad 2.6$$

Požadovaný výkon musí byť predimenzovaný tak, aby bola zahrnuté straty prevodov, nepresnosti výroby potrebnú záťaž ramena. Preto bol výkon predimenzovaný na dvojnásobnú veľkosť. Výsledný potrebný moment je určený vzťahom 2.7:

$$M = \frac{2 \cdot P_m \cdot r}{v} = \frac{2 \cdot 3,6 \cdot 0,7}{0,15} = 33,6 \text{ Nm} \quad 2.7$$

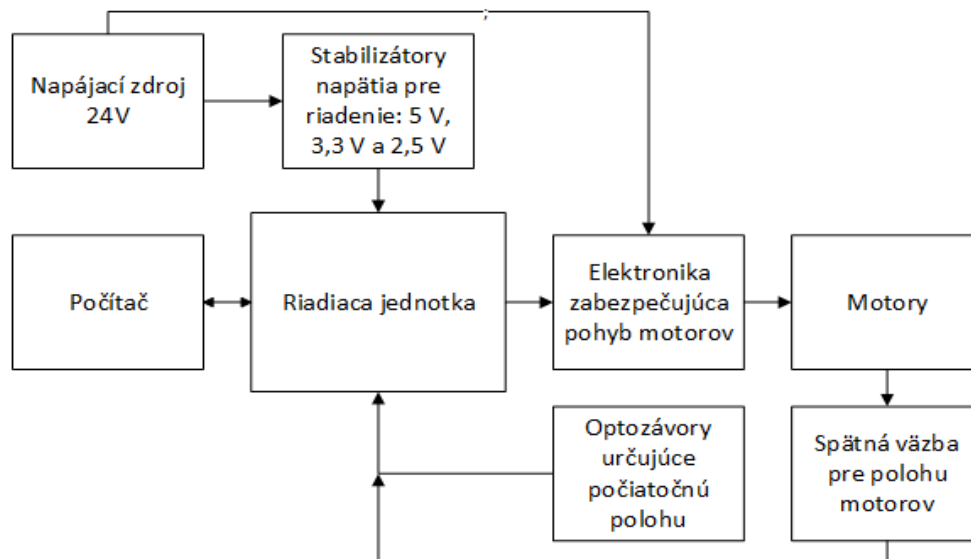
Pre tento moment bol zvolený krokový motor Nema 17 s prevodovkou od spoločnosti Bohua motor s parametrami:

- Krútiaci moment: 34 Nm.
- Pomer prevodu: 99:1.
- Typ: Hybridný.
- Fáze: 2.
- Prúd cez fázu: 1,68 A.
- Veľkosť kroku: 1,8 °.
- Presnosť kroku: 5%.
- Efektivita prevodu: 90%.

Všetky ostatné motory boli vybraté od rovnakej spoločnosti s postupne nižšími hodnotami krútiaceho momentu, ktoré boli určené rovnakým výpočtom ako pre tento motor.

2.2 Elektronická časť

Návrh elektroniky bol rozdelený do troch častí a to je elektronika pre krokové motory, ktorá zabezpečuje správny pohyb motorov, senzory zabezpečujúce spätnú väzbu pre krokové motory a správnu koordináciu robota v priestore. Poslednou časťou je samotná riadiaca jednotka, ktorá spája senzory a pohon, taktiež zabezpečuje komunikáciu medzi riadiacim programom v počítači a robotom. Blokovaná schéma na Obr. 2.8 zobrazuje jednotlivé komponenty navrhnutého ramena.

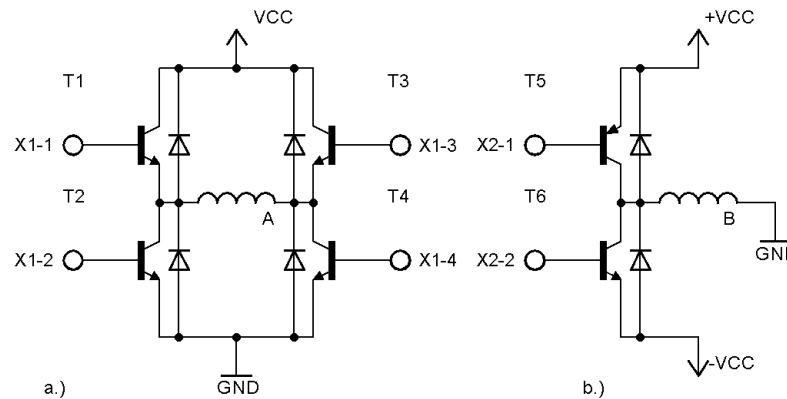


Obr. 2.8: Blokovaná schéma elektronickej časti robota.

Ako je na schéme znázornené celá sústava je napájaná spínaným zdrojom, ktorého menovitá hodnota napätia je 24 V a hodnota maximálneho prúdu 10 A. Tento zdroj bol z ekonomických a praktických dôvodov zakúpený. Toto napätie je stabilizované na referenčné hodnoty 5 V, 3,3 V a 2,5 V. Riadiaca jednotka priíma príkazy od PC, ktoré spracováva a podľa nich riadi elektroniku pre krokové motory. Elektronika krokových motor následne spína jednotlivé fázy krokových motorov a hýbe celou sústavou. Na správne určenie polohy jednotlivých ramien slúžia celkovo tri druhy spätných väzieb. Prvú obsahuje samotná elektronika pre krokové motory, ktorá vie na základe prúdu pretekajúceho cez fázu motora určiť polohu hriadele motora a počtu spravených otáčok motora určiť polohu hriadele prevodovky motora. Druhou sú senzory polohy a pohybu, ktoré určujú jeho relatívnu polohu a poslednou sú optozávory a dorazové spínače, ktoré určujú jeho absolútnu počiatočnú polohu.

2.2.1 Návrh elektroniky pre krokové motory

V práci boli zvolené hybridné krokové motory zo štyrmi vývodmi a bipolárnym riadením a to kvôli dostatočnému krútiacemu momentu a vysokej presnosti polohy rotora. Základným riadiacim prvkom pre riadenie hybridných krokových motorov je H-mostík (Obr. 2.9a) alebo jednoduchý spínač s potrebou zložitého bipolárneho zdroja (Obr. 2.9).



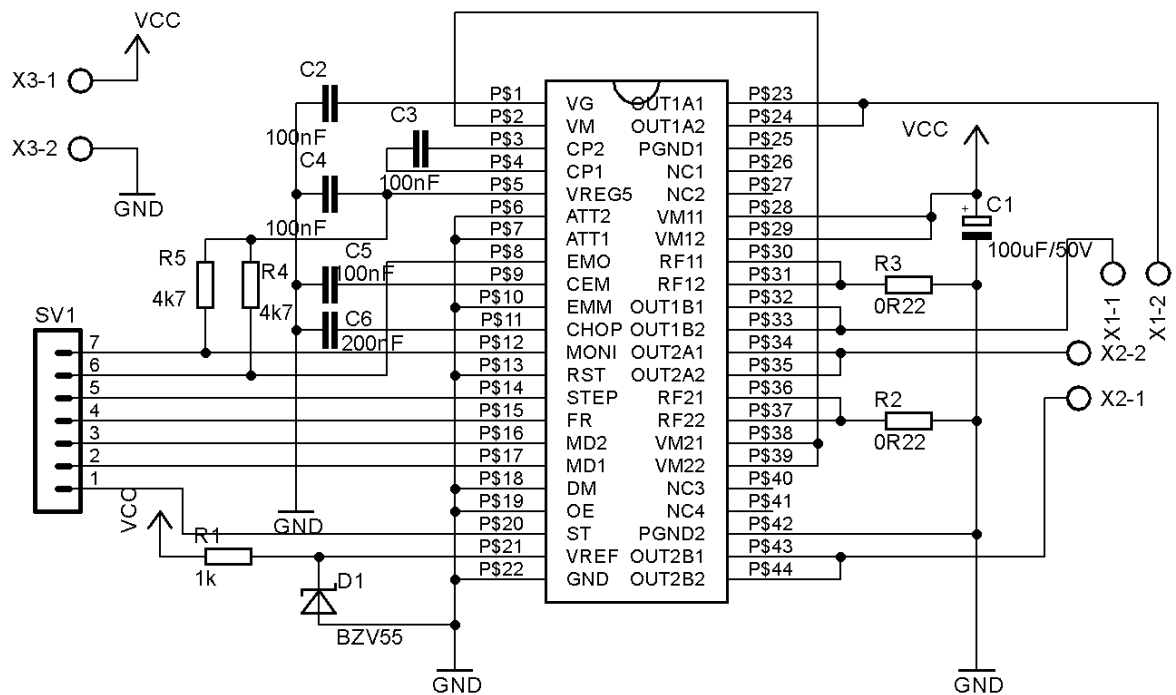
Obr. 2.9: a.) H-mostík b.) Jednoduchý spínač z bipolárnym zdrojom.

Výhoda použitia H-mostíka je jeho jednoduchosť a možnosť nastavenia potrebných výkonov. Nevýhodami je veľké množstvo použitých súčiastok (osem tranzistorov na jeden motor), veľká spotreba miesta, zložité ovládanie [7].

Pre ovládanie bol zvolený integrovaný obvod lv8731 od spoločnosti ON-SEMICONDUCTOR. Špecifikácie tohto obvodu sú [22]:

- Vstupné napätie 36 V, výstupné napätie 32 V.
- Špičkový prúd 2,5 A, pracovný prúd 2 A.
- Riadenie kroku pomocou jedného vstupu PWM reguláciou.
- Možnosť nastavenia výstupného prúdu.
- Indikácia problému, preťaženia motora.
- Teplotný strážiaci obvod.

Zapojenie tohto integrovaného obvodu ukazuje Obr. 2.10 a vychádza z doporučeného zapojenia výrobcu udávaného v datasheetu. Hodnoty jednotlivých súčiastok nastavujú maximálny pracovný prúd, oneskorenie odpojenia napätia pri preťažení motora a maximálnu spínaciu frekvenciu.



Obr. 2.10: Schéma zapojenia obvodu lv8731v

Pre nastavenie maximálneho pracovného prúdu je dôležitá hodnota referenčného napätia na vstupe VREF. Nastavovaná hodnota bola získaná pomocou zenerovej diódy D1, zo záverným napätím 2,4 V. Výstupná hodnota prúdu je daná vzťahom 2.8.

$$I_{OUT} = \frac{VREF}{RF \cdot 5} = \frac{2,4}{0,22 \cdot 5} = 2,18 A \quad 2.8$$

Odpojenie od napätia pri preťažení je daná hodnotou kondenzátora C5. Kapacita kondenzátora bola zvolená 100 nF a hodnota oneskorenia sa určila pomocou vzťahu 2.9, kde V_{TCEM} a I_{CEM} sú vnútorné referencie integrovaného obvodu.

$$T_{CEM} = \frac{C_6 \cdot V_{TCEM}}{I_{CEM}} = \frac{100 \cdot 10^{-9} \cdot 1}{10 \cdot 10^{-6}} = 10 \mu s \quad 2.9$$

Maximálna hodnota krokovania motora vychádza z hodnoty kondenzátora C6. Hodnota kondenzátora bola zvolená 200 nF podľa odporúčanej hodnoty z datasheetu a frekvencia sa dopyčítala pomocou vzťahu 2.10.

$$F_{CHOP} = \frac{I_{CHOP}}{C_6 \cdot V_{TCHOP} \cdot 2} = \frac{10 \cdot 10^{-6}}{200 \cdot 10^{-9} \cdot 0,5 \cdot 2} = 50 kHz \quad 2.10$$

Riadenie obvodu lv8731 je dané osem bitovou sériovou linkou vyvedenou na konektor SV1. Výhodou sériovej linky je okamžitá reakcia na zmenu podnetu a rýchlosť prenosu dát, ktorá prevyšuje paralelne linky ako sú SPI alebo I2C. Nevýhodou je väčšia spotreba výstupov na riadiacej jednotke.

Popis jednotlivých logických vstupov/výstupov:

- ST – určuje či je obvod v pracovnom alebo pohotovostnom režime. Ak je na ST privedená logická jednotka, tak sa obvod nachádza v pracovnom režime. V režime pohotovostnom je vypnutý vnútorný oscilátor a obvod sa resetuje a začína krokovanie od počiatkovej hodnoty.
- MD1, MD2 – vstupy určujú veľkosť kroku. Výhodou tohto obvodu je možnosť mikrokrokovania až do šestnástiny kroku. Nastavenie veľkosti kroku je dané tabuľkou:

Tabuľka 2.2: Popis vstupov MD1 a MD2

MD1	MD2	Mikrokrok
0	0	Plný krok
1	0	Pól krok
0	1	Štvrt' krok
1	1	Šestnástinový krok

- FR – Určuje smer pohybu otáčania motorčeka. Ak je FR v logickej jednotke, tak je pohyb v smere hodinových ručičiek ak je v logickej nule je pohyb obrátený.
- STEP – Udáva krok pre motorček. Pokiaľ je na ST privedená logická jednotka a príde nábežná hrana na vstup STEP nastáva posun o jeden krok. Pri zostupnej hrane je hodnota zachovaná.
- EMO – Tento výstup oznamuje chybu. Pri nastáti chyby sa výstup preklopí do logickej nuly ináč zotrúva v logickej jednotke. Chyby vyvolávajúce aktivovanie výstupu EMO sú skrat na niektorej z fázy alebo prehriatie obvodu.
- MONI – Výstupný pin, ktorý detekuje pozíciu motora. Nataví sa do logickej nuly vtedy, ak sa zopakuje inicializačná poloha.

2.2.2 Senzory

Hlavnými senzormi pre funkciu robota sú senzory polohy a magnetického poľa. Tieto zabezpečujú spätnú väzbu pre krokové motory. Ďalším typom je senzor merania tlaku. Ten určuje potrebný krútiaci moment motorčeka kliešťov, aby bol predmet dostatočne pridržený.

2.2.2.1 Výber senzorov polohy a pohybu

Pre zariadenie bol vybraný senzor polohy od spoločnosti InvenSense a to MPU-6050. Tento integrovaný obvod kombinuje trojsmerový akcelerometer súčasne s gyroskopom. Podporuje zbernicu I2C, pomocou ktorej je zabezpečená komunikácia s procesorom. Obvod je vybavený vlastnou logikou, ktorá zabezpečuje zber údajov a aj ich spracovávanie na rozdiel od iných obvodov kde výstupom sú len hodnoty napätia, ktoré treba ďalej spracovávať (napr. obvod MMA7360L od spoločnosti freescale) .

Kľúčové vlastnosti senzora MPU-6050 [23]:

Gyroskop:

- Digitálny výstup X, Y a Z osi s plne programovateľným rozlíšením ± 250 , ± 500 , ± 1000 a ± 2000 °/sec.
- Externý synchronizačný signál pripojený k FSYNC pinu, podporujúci obraz, video a GPS synchronizáciu.
- Integrovaný 16-bitový ADC prevodník.
- Nízko šumové vylepšenie.
- Digitálne programovateľný dolný filter.
- Operačný prúd 3,6 mA.
- Výrobne nastavený rozlišovací faktor.

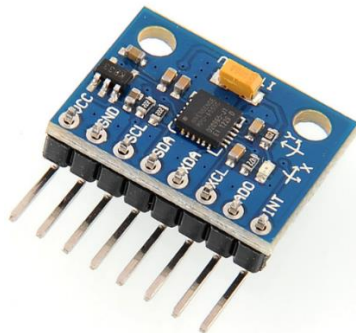
Akcelerometer:

- Digitálny výstup trojosového akcelerometra s programovateľným rozlíšením $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ a $\pm 16g$.
- Integrovaný 16-bitový ADC prevodník, ktorý nepotrebuje externý multiplexor.
- Normálny pracovný prúd 500 μA .
- Používateľsky nastaviteľné prerušenie.

Ostatné vlastnosti:

- Digital Motion Processor (DMP) schopný spracovávať až 9-osí senzor.
- I2C zbernica schopná čítať dáta s externého senzora.
- 3,9 mA operačný prúd pri využití všetkých osí a DMP.
- Napájacie napätie 2,375 V - 3,46 V.
- QFN púzdro.
- Minimálna citlivosť medzi akcelerometrom a gyroskopom.
- 1024 bytová FIFO pamäť.
- Teplotný senzor.

V práci bol použitý už vyrobený modul s osadeným MPU-6050 pre prácu s ardurínom. Modul bol zakúpený kvôli kvalitnému vyhotoveniu osadenia súčiastok a nízkej cene.



Obr. 2.11: Modul použitého senzora MPU-6050

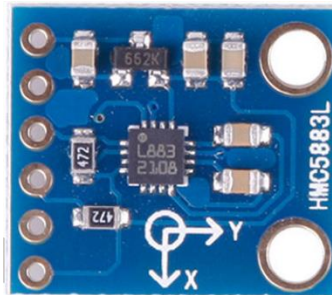
2.2.2.2 Výber magnetosenzoru

Na základe výhod popísaných vyššie bol vybraný senzor na základe AMR od spoločnosti Honeywell a to HMC5883L. Tento integrovaný obvod je navrhnutý pre nízko magnetické snímanie s digitálnym rozhraním zabezpečujúcim spracovanie dát a komunikáciu s procesorom pomocou I2C zbernice. Presnosť tohto obvodu je zabezpečená 12-bitovým ADC prevodníkom a rozlíšenie je medzi 1 až 2 stupňami [24].

Vlastnosti senzora HMC5883L:

- 3-osí magnetorezistívny senzor s integrovaným ASIC obvodom.
- 12-bitový ADC prevodník s nízko šumovým AMR senzorom.
- Vstavaný Self Test.
- Nízko napäťový operačný mód od 2,16 do 3,6 V zo spotrebou maximálne 100 μ A.
- I2C zbernica.

Tento senzor bol tiež zakúpený ako vyrobený modul do ardurina. Výhodou tohto modulu sú jeho malé rozmery a jednoduchosť použitia.



Obr. 2.12: modul magnetometru HMC5883L

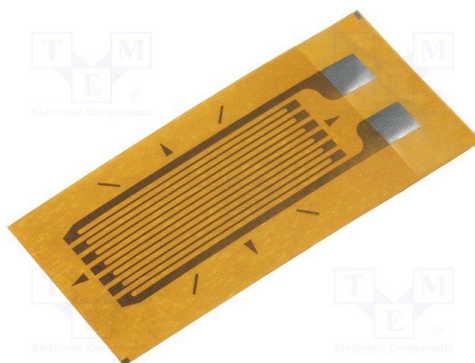
2.2.3 Výber senzoru tlaku

Na snímanie tlaku bol vybraný fóliový tenzometer (Obr. 2.13). Tento spôsob bol zvolený kvôli flexibilným kliešťom efektora. Takže meraná vlastnosť nie je priamo tlak ale ohyb klieští. Na základe ohybu je potom určené či je predmet dostatočne uchopený.

Meranie je zabezpečené pomocou Wheatstonovho mostíka, ktorý je popísaný v kapitole 0 (Obr. 1.18). Výsledné napätie je zosilnené a merané pomocou AD prevodníka procesora. Spracované hodnoty sú potom na požiadanie poslané do PC.

Vlastnosti použitého tenzometra:

- Pracovná teplota: -40 až 200 °C.
- Konštanta tenzometra K: 2,15.
- Vonkajšie rozmery: 8 x 19 x 0,06 mm.
- Maximálna deformácia: 5%.
- Tolerancia: 0,5%.
- Odpor: 120 Ω .



Obr. 2.13: Použitý tenzometer, na detekciu zvieraného tlaku. Prevzaté z [25].

2.2.4 Riadiaca jednotka

Pri výbere riadiacej jednotky muselo byť dbané na:

- Riadenie krokových motorov.
- Získavanie a spracúvanie signálov s polohových a pohybových senzorov.
- Vyhodnocovanie tlaku v kliešťoch a prispôsobenie krútiaceho momentu motorčeka pre zvieranie kliešťov.
- Zabezpečenie komunikácie medzi počítačom a robotom.

Pre vyššiu náročnosť riadenia musela byť vybraná výkonnejšia riadiaca jednotka. Pre takto náročné riadenie boli 8-bitové mikroprocesory (MCU) nevyhovujúce. Ako zvolený typ riadenia bola kombinácia 32-bitového MCU a logického programovateľného poľa FPGA.

Túto špecifikáciu splňoval produkt iCore2 od spoločnosti GINKO, ktorý je zobrazený na Obr. 2.14.

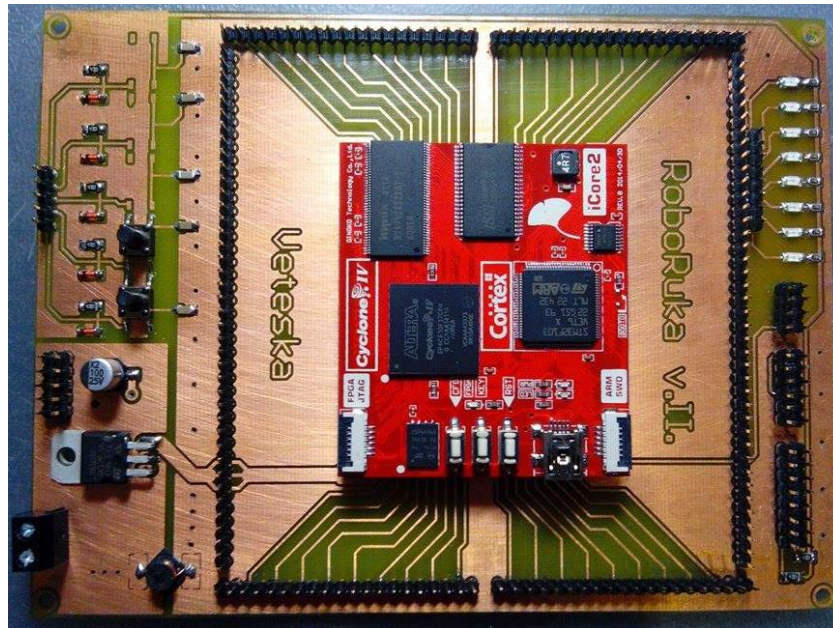


Obr. 2.14: Modul s osadeným 32-bitovým MCU STM32 a FPGA Altera CYCLONE IV

Tento modul obsahuje:

- FPGA EP4CE10F17C8N – Cyclone IV,
- ARM STM32F103VET6 – 32-bitový MCU,
- EPCS64,
- SDRAM W9812G2IH,
- SRAM IS61WV5128BLL-10,
- W25Q64 8M flash.

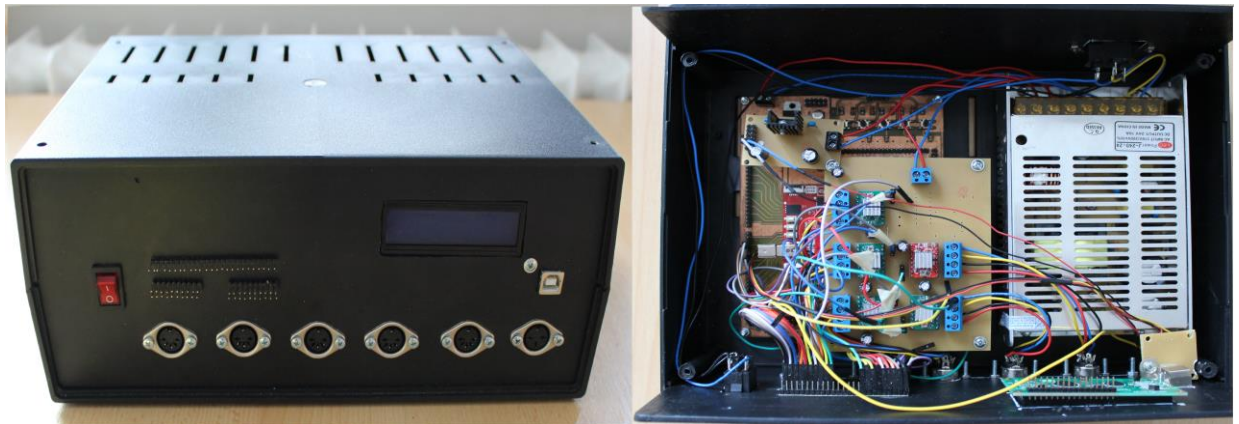
Taktiež musela byť pre tento modul navrhnutá doska, ktorá zabezpečuje prepojenie medzi jednotlivými komponentami a riadením. Pri návrhu dosky muselo byť hľadanie na oddelenie od analógovej zemi, a správne odrušenie od šumu aby nedochádzalo ku skresľovaniu signálov. Hotová doska je zobrazená na Obr. 2.15.



Obr. 2.15: Osadená riadiaca doska s modulom iCore2

2.2.5 Uloženie elektroniky

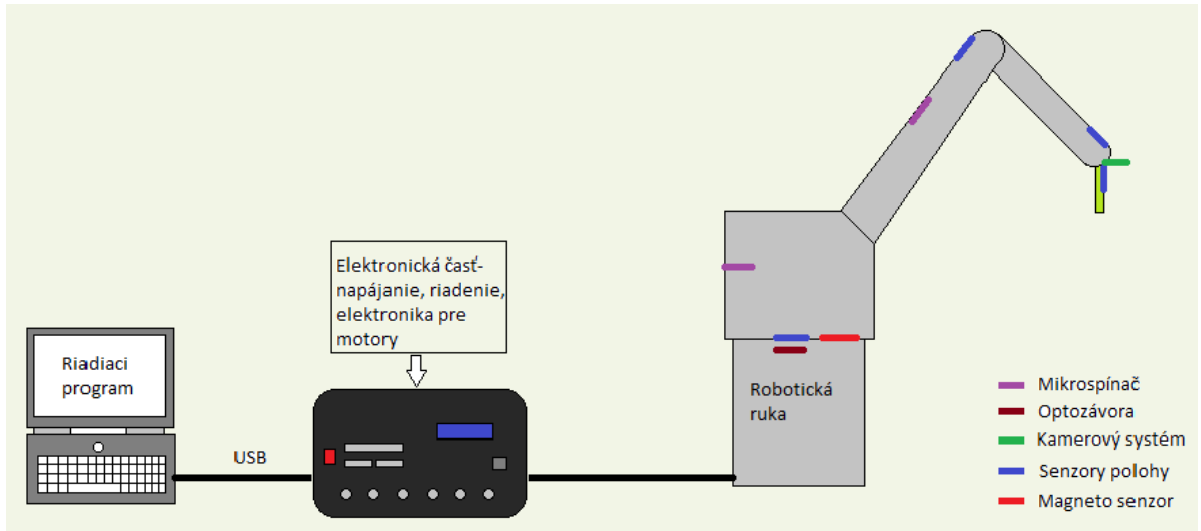
Celá elektronika bola uložená v plastovej škatule, ktorá ma rozmery 120 x 295 x 215 mm.



Obr. 2.16: Zapojenie elektroniky v škatule, a predná lišta škatuli.

2.3 Pracovisko robota

Pracovisko robota sa skladá z oddeleného robota od jeho riadiacej elektroniky a z počítača komunikujúceho s riadiacou elektronikou. Rozostavenie pracoviska je na Obr. 2.17.



Obr. 2.17: Rozloženie pracoviska robota.

Na obrázku je ďalej vidieť rozloženie senzorov na ruke. Celkovo ide o štyri senzory polohy, z toho tri slúžia na určenie polohy ramena a jeden, ktorý je umiestnený na základni robota udáva východziu polohu podľa ktorej sa senzory kalibrujú. Magnetosenzor, ktorý sa taktiež nachádza na základni slúži na určenie rotačnej polohy ramena. Dva mikrosplínače majú nastavenú polohu tak aby pri zapnutí robota nastavili dve ramená do počiatkovej polohy. Pod otočnicou sa nachádza optozávora, ktorá nastavuje východziu polohu rotačného pohybu.

V oddelenej elektronickej časti sa nachádza zvyšná elektronika, ktorá pozostáva z riadenia, napájania, a elektroniky pre riadenie motorov vid'. Obr. 2.16.



Obr. 2.18: Reálne rozloženie pracoviska.

2.4 Programová časť

Program robota je rozdelený na dve hlavné časti. Program pre riadenie elektroniky robota, spracúvanie signálov a zabezpečenie prenosu dát do počítača a na riadiaci program, ktorý je nainštalovaný v počítači.

2.4.1 Program robota

Riadenie robota zabezpečuje riadiaca doska iCore 2, ktorej parametre sú popísané v kapitole 2.2.4. Ide teda o súbežnú spoluprácu MCU a FPGA, kde MCU riadi pohyb ramien, komunikuje s PC a zabezpečuje vonkajšie periférie. FPGA spracováva dáta prichádzajúce zo senzorov polohy a pohybu, vyhodnocuje výsledky a posiela upravené dáta do MCU. Zároveň slúži ako kontrola pre MCU, ak by nastala situácia kedy by procesor prestal reagovať alebo by posúval ramená do nesprávnych polôh tak FPGA celý systém reštartuje. Týmto spôsobom je zabezpečená vysoká spoľahlivosť celého systému.

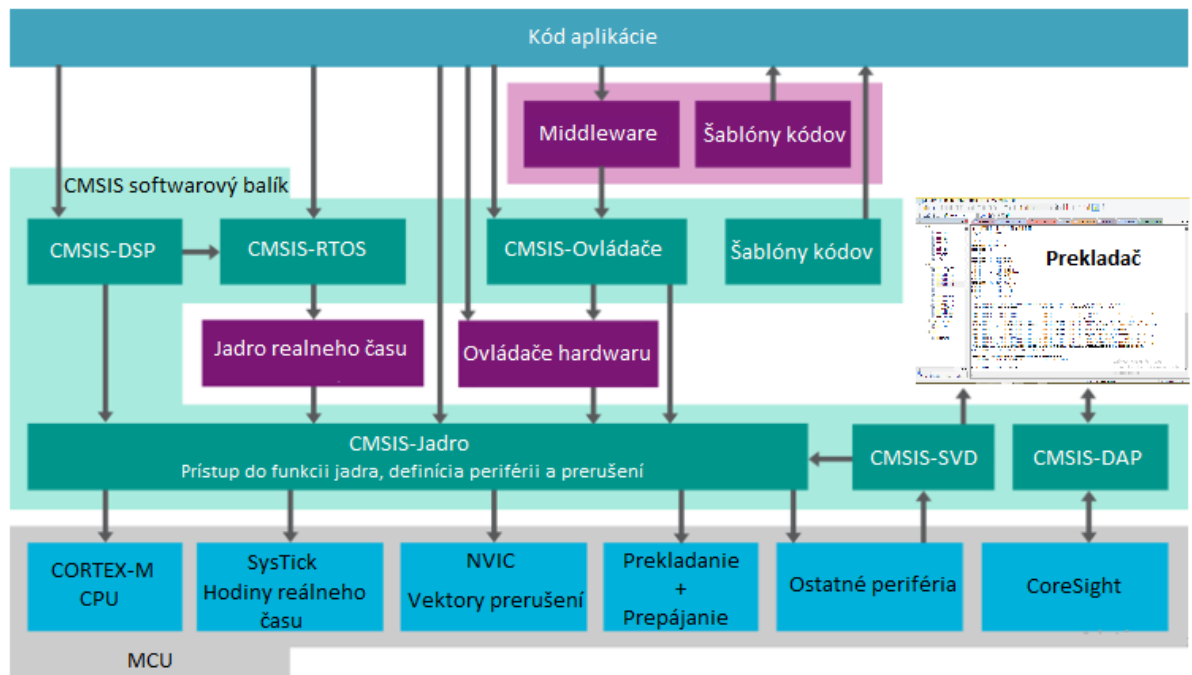
2.4.2 Program pre MCU

Program, bol písaný v jazyku C vo vývojovom prostredí Keil uVision5. Tento vývojový nástroj poskytuje knižnice, ktoré priamo riadia periférie pre daný MCU, ďalej poskytuje krokovanie a nahrávanie programu prostredníctvom SWJ a JTAG zbernice. Taktiež obsahuje kompilér, ktorý prekladá kód v jazyku C do zdrojového kódu.

2.4.2.1 Knižnice používané v programe

Základné knižnice pri práci s procesorom STM a jadrom ARM-Cortex sú knižnice obsluhujúce popis jeho jadra a možných využiteľných periférii. Ide o súbor knižníc, ktoré sú uložené v CMSIS (skratka pre Cortex Microcontroller Software Interface Standard) súbore [26]. Hlavné komponenty CMSIS sú:

- CMSIS-CORE (CMSIS-jadro): obsahuje aplikačné rozhranie pre programovanie procesorov s jadrom Cortex-M.
- CMSIS-Driver (CMSIS-ovládače): definuje existenciu periférnych zariadení pre Middleware (software zabezpečujúci prepojenie komponenty a aplikácie).
- CMSIS-DSP: súbor knižníc, ktoré obsahujú funkcie pre dátové typy s pevnou alebo pohyblivou čiarkou.
- CMSIS-RTOS: aplikačné prostredie pre operačný systém reálneho času.
- CMSIS-Pack: balenie popisov pre jednotlivé kódy, hlavičky knižníc, vzorových príkladov.
- CMSIS-SVD: systémový popis periférii.
- CMSIS-DAP: štandardizovaný firmware pre prekladanie jednotky, ktorý je pripojený na prekladací bod CoreSight (hardwarová časť zabezpečujúca prekladanie a prepájanie procesora s vývojovým prostriedkom, využívaná pre doladovanie programu) .



Obr. 2.19: Štruktúra knižníc CMSIS, podľa [26].

Knižnice pre prácu s perifériami (Standard Peripherals Library) dopĺňujú knižnice CMSIS. Zabezpečujú nastavovanie a ovládanie jednotlivých periférií. Obsahujú kolekcie obslužných rutín, dátových štruktúr a makier.

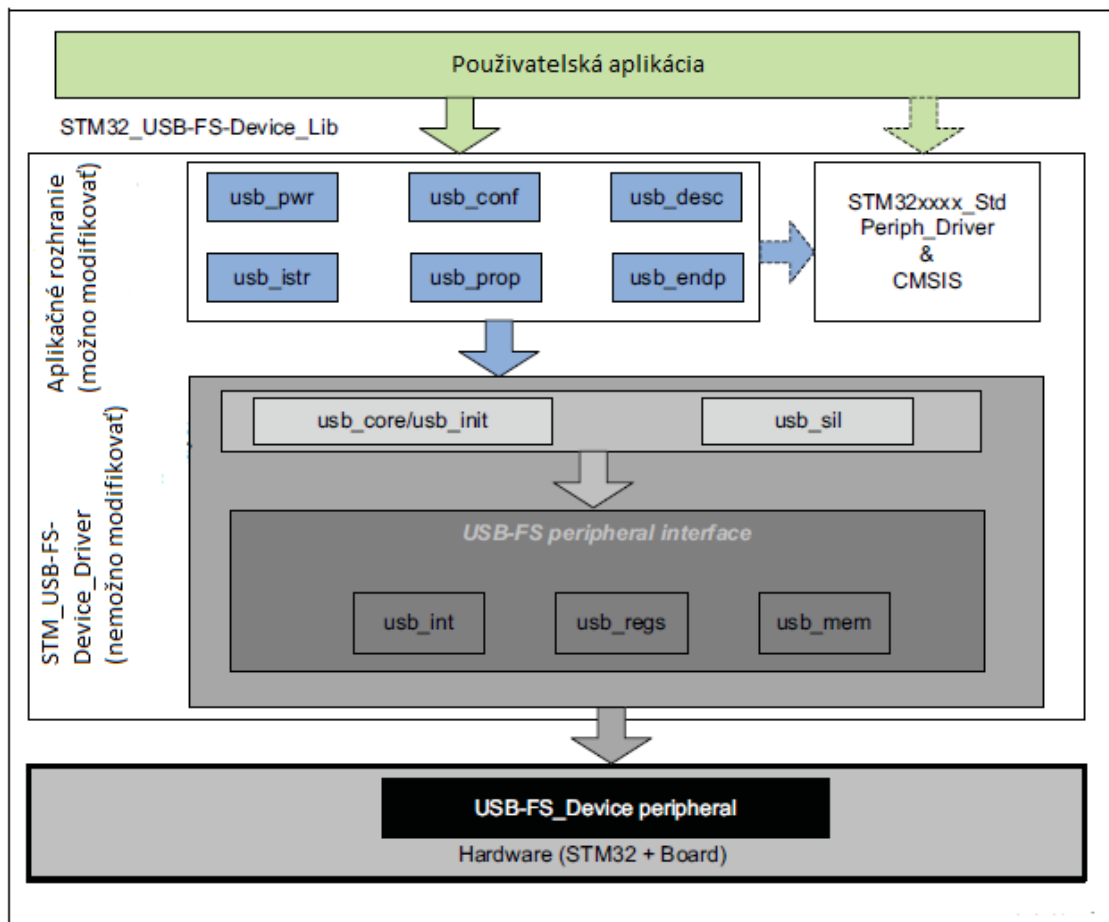
Ďalšou použitou knižnicou je knižnica pre USB port. Túto knižnicu poskytuje firma ST pre každý svoj procesor, ktorý obsahuje periférie pre USB port. Hierarchia využitia USB portu je zobrazená na Obr. 2.20.

Ako je vidno na Obr. 2.20, knižnica USB-FS-Device je rozdelená do dvoch vrstiev:

- STM32_USB-FS_Device_Driver: táto vrstva zabezpečuje komunikáciu medzi perifériami USB-FS a štandardom USB protokolu. Tiež je kompatibilná s USB 2.0 a je oddelená od štandardných knižníc periférií [27].
- Aplikačné rozhranie: táto vrstva poskytuje užívateľom celé rozhranie medzi jadrom USB knižnice a štandardnými perifériami [27].

Knižnica poskytuje využitie USB v troch hlavných režimoch:

- USB VCP – Virtuálny com port (Virtual Com Port),
- USB Veľkokapacitné úložisko (Mass storage),
- USB HID – užívateľské prostredie (human interface device).



Obr. 2.20: Hierarchia USB portu, podľa [27]

Režim USB HID má ovládač a podporu Windowsu od verzie Windows 2000, preto netreba žiadne ďalšie nástroje pre jeho používanie. Taktiež ide o plnohodnotné USB zariadenie, ktoré sa riadi štandardmi pre USB zbernicu a je možné dosiahnuť aj plnú prenosovú rýchlosť USB 2.0. Nevýhodou je zložité ovládanie procesora cez takto definované rozhranie.

USB Mass storage nastavuje USB do režimu veľkokapacitného úložného priestoru. V tomto nastavení je možné pristupovať ku pamäti procesora a priamo nahrávať/čítať dáta na nej uložené. Ovládač pre tento mód je taktiež podporovaný Windowsom.

Zariadenie nainštalované ako USB VCP emuluje USB port ako zbernicu pre COM port. Pre tento režim je potrebný ovládač, ktorý je poskytnutý od spoločnosti ST. Procesor súčasne využíva UART štandard, ktorý komunikuje cez zbernicu USB. Nevýhodou je maximálna dosiahnuteľná rýchlosť, ktorá je limitovaná pre COM port na 115 200 baud. Možnosť ako nepriamo zvýšiť rýchlosť komunikácie je rozdelenie vysielača a prijímača na dva COM porty. Tento spôsob zaberie dva využiteľné UART porty procesora ale komunikácia je cez jednu USB zbernicu, pritom vysielať a prijímať sa môže súčasne a to rýchlosťou 115 200 baud.

2.4.2.2 Hlavný riadiaci program

Riadiaci program robota je rozdelený do niekoľkých častí. Prvou časťou je inicializácia použitých komponent a periférii. K tomu sa používajú knižnice popísané v predchádzajúcej kapitole. Z periférii sú použité:

- UART: slúži ako virtuálna komunikačná linka.
- GPIO: nastavuje vstupno/výstupné porty.
- RCC: povoľuje alebo zakazuje používania jednotlivých periférii.
- Timer: časovače, pomocou nich sú vytvárané potrebné impulzy, ktoré krokujú motory.
- Flash: pamäť do ktorej je umožnený zápis dát.

Po správnej inicializácii procesor nastaví robota do základnej pozície a čaká na dáta z PC, pomocou ktorých sa určí čo má riadenie vykonať. V stave nečinnosti procesor odpojí napájanie z motorov.

Ako komunikačná zbernica je použitá USB zbernica, ktorá je nastavená pomocou USB-FS knižnice do VCP módu. Rýchlosť komunikácie je nastavená na 115 200 baut. Komunikačný protokol je zobrazený na Obr. 2.21.



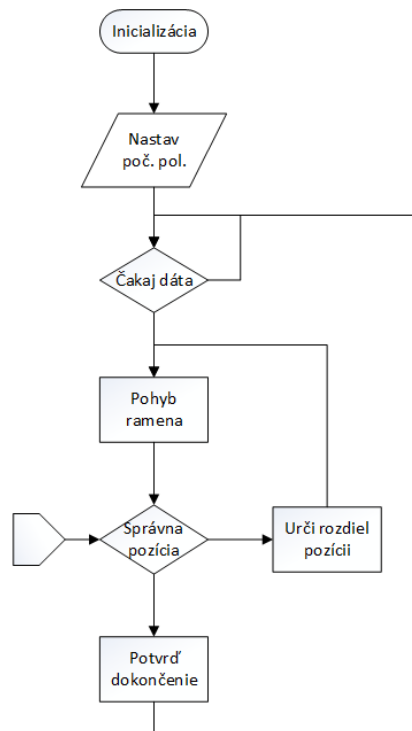
Obr. 2.21: komunikačný protokol medzi MCU a PC

Procesor po dokončení predchádzajúcej obslužnej rutiny alebo po reštarte je v stave nečinnosti a čaká na prebudenie od UART jednotky, ktorá mu prideli ďalšiu úlohu. Po prijatí dát sú všetky najprv uložené do pamäte. Prvý prijatý bajt rozhoduje, v ktorom móde ma robot pracovať. Potom nasledujú dáta, ktoré hovoria o pozícii motorov. Mógy v ktorých má robot pracovať sú nasledovné:

- Test mód: priame jednorazovo dáta o natočení motorov, po dokončení odošle dáta potvrdzujúce ukončenie pohybu.
- Sekvenčný mód: priama kontinuálne dáta porovnáva ich s predchádzajúcimi dátami a odosiela po každom dokončení natočení motorov potvrdzujúci bajt.
- Joystick mód: po prepnutí do módu joysticku priama dáta, na ktorú stranu sa má motor točiť a ktorý motor sa má točiť. Súčasne si zapamätáva počet krokov koľko motor spravil. Po prijatí ukončenia otáčania odosiela uhol natočenia motora.
- Počiatková poloha: v tomto móde je nanovo nastavená počiatková poloha robota. Tento mód ma najvyššiu prioritu, to znamená, že ak príde požiadavka od PC aby sa robot znova nastavil prestane vykonávať všetky akcie a bez toho aby niečo odosiela sa nastaví. Takéto správanie je dosiahnuté softwarovým resetom (všetky dáta ostanú uložené v pamäti ale program preskočí na nultý riadok programu).

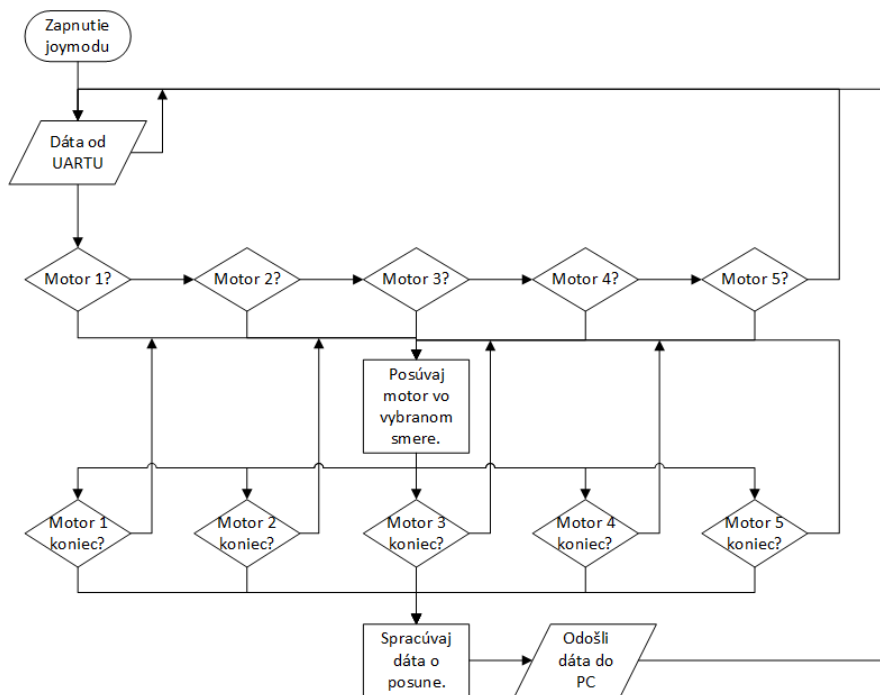
Základný algoritmus priebehu programu je na Obr. 2.22. Tento algoritmus zobrazuje správanie sa v test móde a v sekvenčnom móde. Tieto dva módy majú rozdiel v tom, že v sekvenčnom móde dáta určujú presne danú polohu motorov a ďalšie dáta priame až v momente keď dokončí predchádzajúci posun motorov. V test móde môže nastať situácia

že motory sa ešte otáčajú a príde požiadavka na iné natočenie motorov pred ukončením obslužnej rutiny. Vtedy je posun ramena pozastavený, odošle sa správa o nedokončení pohybu, nanovo sa prepočíta výsledná poloha a začne pohyb. Po dokončení pohybu si vyžiada MCU dáta od FPGA, ktoré po celý čas zbieralo dáta zo senzorov pohybu, a určí, či sa pozícia robota zhoduje s dátami z polohových senzorov.



Obr. 2.22: Algoritmus zobrazujúci základný pohyb v sekvenčnom a test móde.

Pri zapnutí joymodu začne procesor krokovať motory (posúvať ich v danom smere). Po prepnutí do tohto módu procesor očakáva dáta, ktoré budú hovoriť o tom, ktorý motor sa má posúvať a do ktorej strany. Pre ukončenie posunu musí procesor prijať správu o ukončení posunu. Posun sa ukončí tiež v prípade, že niektoré rameno sa dostane do krajnej polohy. Po ukončení posunu procesor prepočíta kroky, ktoré spravil na uhol o ktorý sa posunul, vyžiada si dáta od FPGA zo senzorov polohy, porovná či sa uhol zhoduje. Ak áno pošle dáta o natočení do PC, ak nie spraví korekciu a pošle opravené dáta a správu o korekcii. To znamená, že pošle dáta zo senzoru, ktoré bude nasledovať bit hovoriaci o aké ide dáta. Potom už je len na užívateľovi, či dané dáta pridá do zoznamu alebo nie.

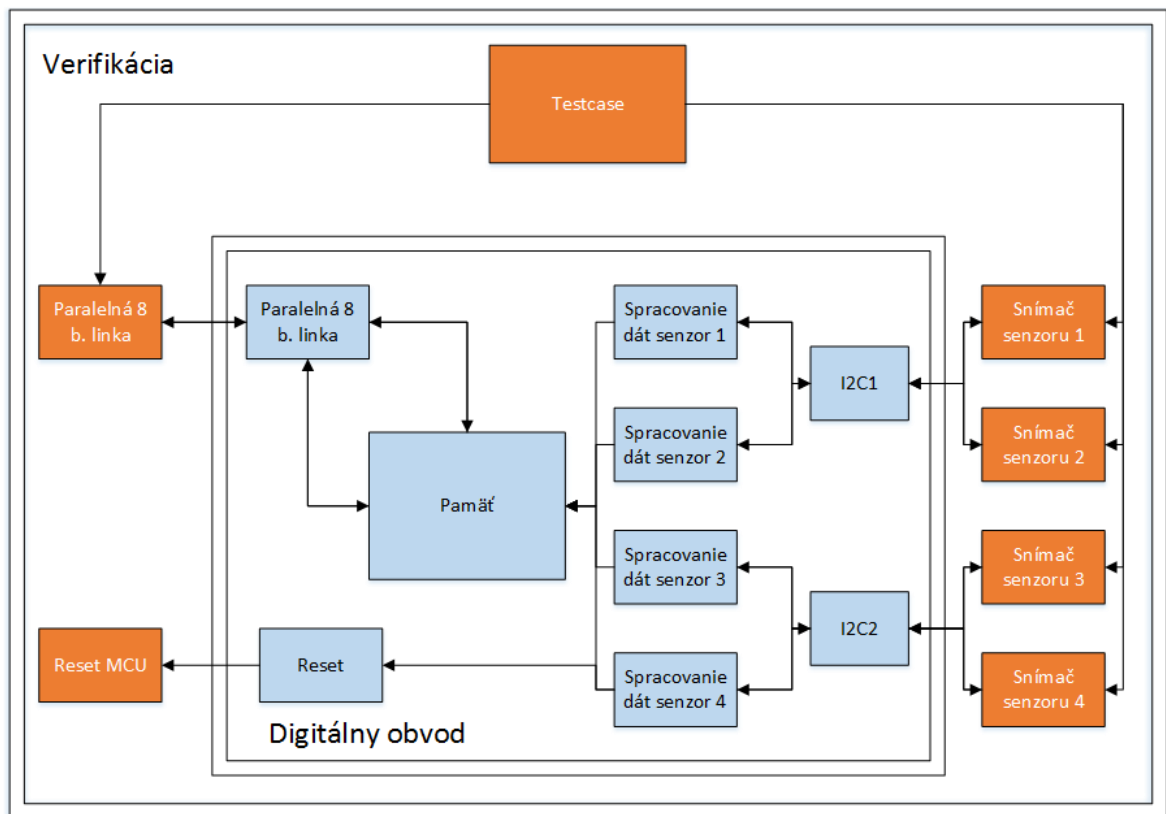


Obr. 2.23: Algoritmus zobrazujúci pohyb joymode

2.4.3 Návrh obvodu v FPGA

Funkciou navrhnutého obvodu v FPGA je snímanie polohy ramena robota, spracovanie dát a ich odoslanie do MCU za pomoci senzorum polohy a pohybu, ktoré sú popísané v kapitole 2.2.2.1. Pomocou senzora sa meria len jedna poloha, ktorou sa daný senzor pohybuje. Výnimkou je senzor snímajúci polohu efektora, kedy horných osem bytov reprezentuje pohyb v smere x a dolných v smere y. Ďalšou úlohou je hardwarové resetovanie MCU v prípade načítania hodnoty senzora, pri ktorej by mohlo nastať poškodenie robota.

Návrh obvodu bol rozdelený do dvoch častí. Návrh samotného obvodu a návrh jednoduchej verifikácii. Blokové usporiadanie vnútorného obvodu a verifikačného prostredia je na Obr. 2.24.



Obr. 2.24: Bloková schéma digitálneho obvodu a jeho verifikačného prostredia.

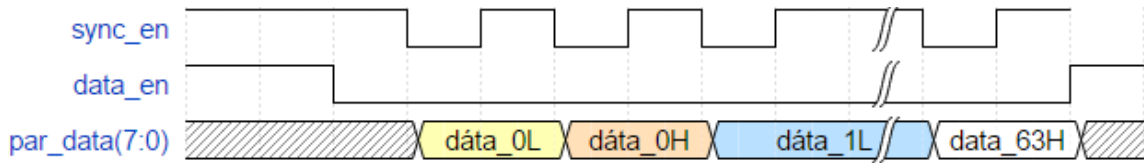
2.4.3.1 Návrh digitálneho obvodu

Návrh digitálneho obvodu je rozdelený do piatich entít a to sú:

- Pamäť: slúži na ukladanie už spracovaných dát zo senzorov.
- Entita na spracovanie dát: táto entita komunikuje so senzormi cez I2C zbernicu, spracováva dáta a ukladá ich do pamäti. Súčasne sa v FPGA nachádza štyri krát, pre každý senzor jedna.
- Komunikačné rozhranie I2C: Ide o štandardnú I2C zbernicu, ktorá je nastavená na prenosovú rýchlosť 100 kHz. Táto zbernica ja v FPGA nahratá tiež dvakrát a to kvôli tomu, že maximálny počet pripojených senzorov MPU6050 na jednu I2C zbernicu sú dva.
- Paralelná 8 bitová zbernica: táto zbernica spojuje FPGA a MCU.
- Reset: ide o časť obvodu, ktorá porovnáva dáta z entity spracovania dát senzorov a porovnáva ich s referenčnými hodnotami, ktoré sú nastavené na maximálnu polohu, v ktorých sa môžu ramená nachádzať. V prípade, že dôjde k prekročeniu tejto hodnoty je vyvolaný reset MCU.

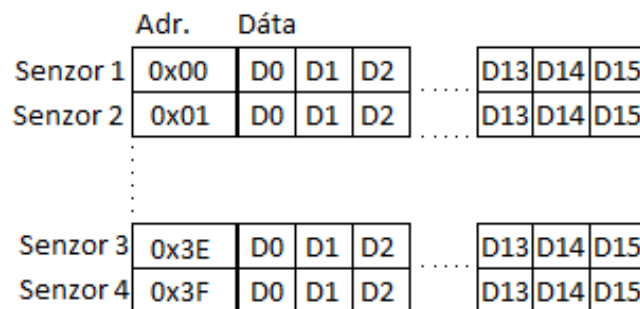
Paralelná 8 b. linka slúži na komunikáciu medzi MCU a FPGA. Obsahuje osem bitov na prenos dát ($par_data(7:0)$), jeden bit, ktorý slúži na synchronizáciu ($sync_en$) a jeden bit slúžiaci na začiatok zberu dát ($data_en$). Dáta ktoré sú na $par_data(7:0)$, musia byť vždy pripravené k odoslaniu keď príde nábežná hrana na $sync_en$. Pulzy na $sync_en$ sú riadené procesorom. Ak príde požiadavka od procesora na čítanie dát, je daná zostupnou hranou na $sync_en$, tak *paralelná 8 b. linka* začne posielat' dáta od prvého bajtu uloženom v pamäti. Teda pošle vždy 128 bajtov. Súčasne musí byť $data_en$, ktorý určuje či má

entita *Spracovanie dát zo senzorov* zbierať a ukladať dáta zo senzorov v log. nule. FPGA musí dáta nastaviť vždy na zostupnej hrane *sync_en* aby mohli byť na nábežnej hrane čítané procesorom.



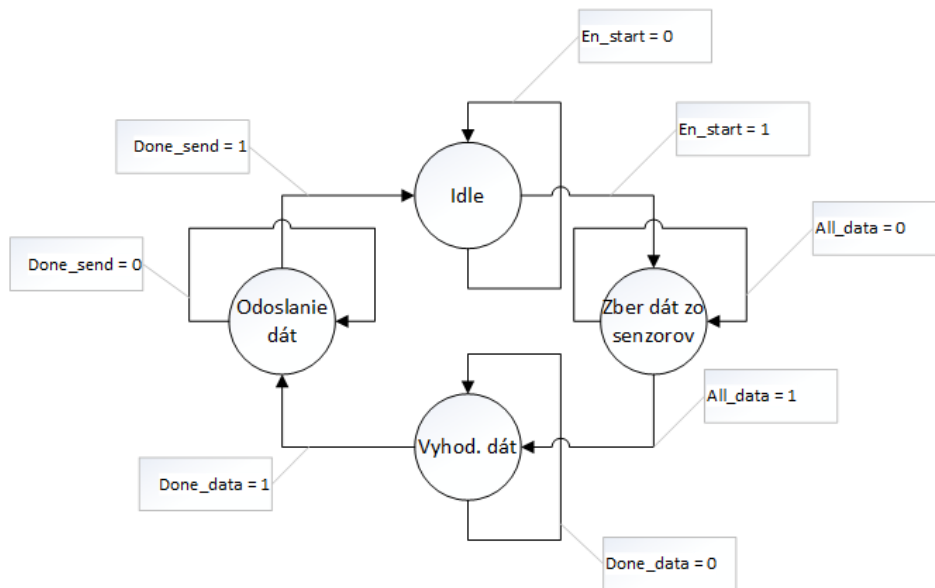
Obr. 2.25: Komunikácia na paralelnej 8 b. linke.

Pamäť je v FPGA vyskladaná ako RAM pamäť. Ide o pamäť o veľkosti 16 x 64 bitov, to znamená, že pre každý obvod je vyhradených 16 x 16 bitov. V prípade ak nastane prepĺnenie pamäte, tak sa začne prepisovať od prvého uloženého znaku. Pamäť je jedno prístupová takže sa buď do nej môže zapisovať alebo čítať. Aby nenastala kolízia medzi zápisom a čítaním tak je vnútorný povoloovací signál, ktorý prichádza z entity *Paralelná 8 b. zbernica*. Ten nastavuje MCU, ak je nastavený do log. 1 tak to znamená, že z pamäte sa bude čítať a entity *Spracovanie dát zo senzorov* nebudú nič zapisovať a nebudú ani primáť dáta z I2C zbernice. Dáta v pamäti sú ukladané postupne, to znamená, že na prvý riadok sú uložené dáta z prvého senzora na druhý riadok dáta z druhého senzora atď. Takže pokiaľ treba len jedno meranie tak stačí spustiť meranie pomocou *data_en* a prečítať len prvé štyri riadky.



Obr. 2.26: Vnútorné usporiadanie pamäte

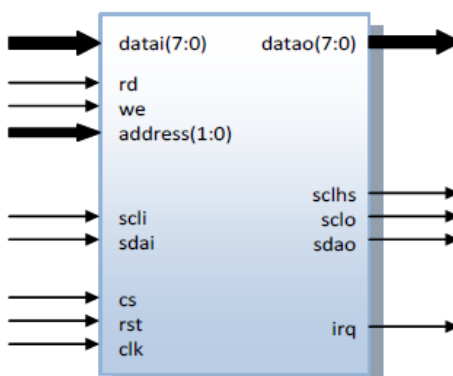
Entita *Spracovanie dát zo senzorov* sa skladá zo stavového automatu, ktorý číta dáta zo senzorov cez I2C zbernicu a logiky, ktorá robí priemer z každých desiatich načítaných hodnôt. Stavový automat je zobrazený na Obr. 2.27.



Obr. 2.27: Stavový automat entity Spracovanie dát zo senzorov

Automat sa nachádza v stave *Idle* dovtedy, pokiaľ nedostane príkaz aby začal zbierať dáta. Potom sa presunie do stavu kde nazbiera desať hodnôt. Obvod MPU6050 obsahuje vonkajšie prerušenie, keď dokončí prevod polohy na digitálny signál. Toto prerušenie indikuje, že sa môže hodnota prečítať. Po dokončení zberu dát sa automat presunie do stavu kedy vyhodnotí dáta, teda spraví ich priemer. V poslednom stave sú dáta odoslane do pamäte. Po úspešnom uložení dát sa znova presúva do stavu *Idle* a čaká na požiadavku pre nový zber dát.

Pre komunikačné rozhranie medzi FPGA a senzormi bolo použité voľne dostupné IP jadro I2C – master od spoločnosti digital core design (DCD). Ide o kompletne IP jadro, ktoré pre svoju činnosť potrebuje minimum obsluhy. Pri odosielaní sa dáta posielajú na osem bitovú zbernicu *datai(7:0)* a čítajú sa tiež s osem bitovej zbernice *datao(7:0)*. Na to kedy dáta sú čítané a kedy zapisované do senzora rozhodujú bity *rd* a *we*. Adresa senzora sa nastavuje pomocou vstupu *address(1:0)*. Výhodou tejto linky je, že nepoužíva trojstavové vstupy/výstupy ale má rozdelené piny na *SDAI/SDAO* a *SCLI/SCLO*. Presne popísané zapojenie a využitie tejto linky je v datasheete [28].



Obr. 2.28: Entita IP jadra I2C linky, prevzaté z [28]

2.4.3.2 Verifikačné prostredie

Návrh verifikačného prostredia bol písaný v jazyku VHDL okrem entity, ktorá zabezpečovala komunikáciu I2C medzi FPGA a senzormi. Táto entita bola voľne dostupná spolu s entitou pre I2C. Entity *Snímač senzoru* boli nastavované z Testcasu. Testcase do nich zapisoval hodnoty, ktoré simulovali senzor pri práci. Tie boli potom cez komunikačné rozhranie posielané do FPGA. Testovaná bola teda komunikácia na *paralelnej 8 b. linke*:

- Nastavenie en_data a sync_en do log. 1 – spustenie nahrávania dát do pamäte.
- Nastavenie en_data do log. 0 a sync_en do log. 0 – obvod je v nečinnosti nič sa nezapisuje do pamäte, komunikácia cez I2C a paralelnú 8 b. linku je zastavená.
- Nastavenie en_data do log. 0 a na sync_en sú privádzané pulzy – obvod začne posilať dáta po linke, súčasne sa resetuje počítač aby sa začalo pri ďalšom zápise zapisovať do pamäte od začiatku.

Výsledky verifikácie sa zhodovali s požiadavkami na fungovanie systému. Výsledky boli vypisované do konzoly.

2.4.4 Riadiaci program PC

Riadiaci program pre počítač bol písaný v jazyku C# vo vývojovom prostredí Microsoft Visual Studio 2015. Jazyk C# využíva platformu .NET Framework. Ide o skupinu knižníc, tried, rozhraní, definovaných typov premenných, ktoré poskytujú prístup k funkciám systému [29]. Využívane menné priestory v riadiacom programe sú:

- System - tento menný priestor obsahuje základné triedy, ktoré definujú bežne používané hodnoty, referenčné dátové typy, udalosti a obslužné rutiny udalostí, rozhrania, atribúty a výnimky.
- System.IO – menný priestor obsahuje typy, ktoré podporujú vstupy a výstupy. Taktiež podporuje čítanie a zapisovanie do zdieľaných dát, synchronne či asynchronne. Vytvárať a používať oddelené dátové priestory. Ďalej zabezpečuje portovanie a komunikáciu sériových portov.
- System.Windows.Forms – menný priestor obsahujúci grafické animácie pre používateľské prostredie.
- System.Threading – menný priestor, ktorý dovoľuje viac vláknové programovanie (programovanie kedy sa pristupuje k viacerým jadram procesora, alebo sa vytvárajú viaceré rady, ktoré pristupujú k jednému jadru).

Ďalšie použité knižnice slúžia na ovládanie joysticku a webovej kamery. Na ovládanie joysticku slúži knižnica SharpDX. Ide o skupinu knižníc, ktoré sú spravované pod .NET a využívajú prístup k DirectX [30]. Teda obsahujú menné priestory:

- SharpDX.Graphics3D,
- SharpDX.Graphics2D,
- SharpDX.GraphicsCore,
- SharpDX.Sound,
- SharpDX.Input.

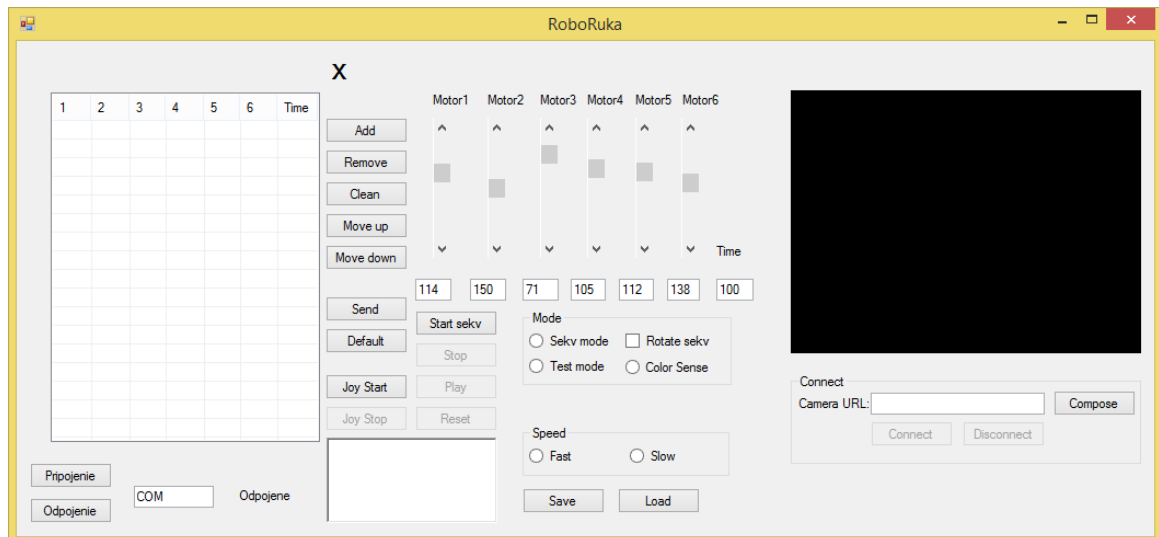
V riadiacom programe je využitý iba menný priestor SharpDX.Input, ktorý pristupuje HID zariadeniam ako sú gamepady, joysticky, myši, klávesnice atď. Poslednou použitou knižnicou je knižnica Ozeki. Ide o nástroj na ovládanie a pristupovanie k zariadeniam, ktoré podporujú spracovanie obrazu a zvuku. Obsahuje veľké množstvo menných priestorov [31]. Využívané menné priestory sú iba:

- Ozeki.Camera,
- Ozeki.Media.

Tieto priestory pristupujú k driverom ovládajúcich webkamery, lankamery, zdieľanie ich dát, triedenie obrazu (kódovanie a dekódovanie bit mapy do iných formátov), streamovanie videa.

2.4.4.1 Grafické prostredie

Grafické prostredie bolo písane pomocou využitia windows form. Prostredie je rozdelené na tri časti. Prvá časť slúži na ovládanie sekvencie, druhá na test mode a tretia na streamovanie videa z webkamery. Prostredie je zobrazené na Obr. 2.29.



Obr. 2.29: Grafické prostredie riadiaceho programu

Grafické prostredie pre komunikáciu s užívateľom sa skladá z:

- Tabuľky – ukladajú sa do nej hodnoty, ktoré sú posielané do MCU pri sekvenčnom móde. Hodnoty predstavujú absolútny uhol natočenie od východzej polohy pre jednotlivé motory. V stĺpci *Time* je uložený čas (10.hodnota v ms), po ktorý sekvencia čaká po dokončení pohybu.
- Tlačidlá *Add* – Pridáva hodnoty do tabuľky z textboxov. Hodnoty musia byť celočíselné v rozmedzí $<0, 360>$, s tým že sú rešpektované polohy, ktoré sú automaticky zarátané.
- Tlačidlá *Remove* – odstráni označený riadok z tabuľky.
- Tlačidlá *Clean* – odstráni všetky hodnoty z tabuľky.
- Tlačidiel *Move up* a *Move down* – posunú označený riadok o pozíciu hore alebo dole.
- Tlačidlá *Send* – pošle hodnotu označeného riadka.

- Tlačidla *Default* – spustí default mód viz. kap. 2.4.2.2 .
- Tlačidiel *Joy Start* a *Joy Stop* – spúšťa/ukončuje prácu s joystickom.
- Tlačidiel *Pripojenie* a *Odpojenie* – pripája ku COM portu, na ktorom je pripojený MCU.
- Tlačidiel *Start sekv.*, *Stop*, *Play*, *Reset* – ovládajú chovanie sa sekvencie. Sekvencia začína stlačením tlačidla *Start sekv.*, *Stop* je ju možné pozastaviť, *Play* znova spustiť a *Resotom* resetovať sekvenciu od prvého riadku.
- Skupiny *Mode* – je vyberaný mód v ktorom má robot pracovať. Výber je možný z Test módu a Sekvenčným módom. Pri zaškrtnutí *Rotate sekv.* sa sekvencia po dokončení spustí sama od začiatku.
- Posuvníkov – slúžia na ovládanie robota v test móde. Taktiež nastavujú hodnoty do textboxov aby mohli byť pridané do tabuľky.
- Skupiny *Speed* – sa nastavuje rýchlosť pohybu. Pri označení *fast* sa motory pohybujú maximálnou rýchlosťou naopak pri *slow* sa všetky pohybujú rovnakou rýchlosťou, ktorá je daná najrýchlejšou možnou rýchlosťou motora pohybujúceho prvé rameno.
- Tlačidla *Save* – uloží tabuľku do textového súboru, aby mohla byť znova použitá. Ukladá ju po riadkoch a hodnoty sú oddelené tabulátorom.
- Tlačidla *Load* – načíta tabuľku hodnôt.
- Skupiny *Connect* - Obsahuje tlačidlá *Compose* – otvorí okno v ktorom je možné vybrať pripojenú kameru. Tlačidlami *Connect* a *Disconnect* slúžia na pripojenie a odpojenie vybranej kamery k prehrávaču videa.

Záver

Úlohou tejto práce bolo navrhnuť univerzálneho priemyselného robota manipulátora, ktorý by bol schopný obsluhovať pracovisko na pracovnom stole alebo v priestoroch kde je obtiažne pracovať pre človeka.

V úvode práce sú popísané jednotlivé konštrukčné princípy priemyselných robotov, ich vyhotovenie. Ďalej sa zameriava na pohon robotov, konkrétne výber krokových motorov. Taktiež sú spracované jednotlivé princípy použitých senzorov.

V praktickej časti bol navrhnutý mechanický koncept priemyselného robota, ktorý je založený na anregulárnej štruktúre. Robot bol navrhnutý v 3D programe Inventor 2015 a podľa návrhu vyrobený. Ako pohon robota boli vybraté krokové motory s dostatočným krútiacim momentom určeným simuláciou, ktoré sú ovládané pomocou vyhotovených riadiacich modulov.

Výsledkom tejto práce je zhotovený priemyselný robot, naprogramovaný jeho riadiaci program a vyrobená elektronická časť. Mechanická časť bola zhotovená podľa návrhu z nerezovej oceli. Robot má celkovo šesť stupňov voľnosti, maximálna dosiahnuteľná dĺžka ramien je 760 mm a dĺžka efektora 130 mm. Pohyblivosť ramien je obmedzená kabelážou, cez ktoré sú primané dáta zo senzorov. Elektronická časť bola uložená v plastovej krabici. Riadiaca jednotka pozostáva zo stabilizátorov, ktoré napájajú procesor ARM STM32F103 a FPGA Cyclone IV. Procesorom sú ovládané moduly, ktoré riadia motory. FPGA má na starosti senzory zabezpečujúce spätnú väzbu. Program v PC zabezpečuje ovládanie robota pomocou joysticku alebo nahrávanie do robota sekvencie, podľa ktorej sa robot bude pohybovať.

V ďalšom vývoji tejto práce budú odstránené programové nedokonalosti. Taktiež by bolo pridané strojové videnie, ktoré by rozširovalo možnosti využitia robota. Ďalším vylepšením by bolo navrhnutie dokonalejšieho vedenia kabeláže, čím by bola zlepšená pohyblivosť robota.

Použitá literatúra

- [1] RUMÍŠEK, P. AUTOMATIZACE (roboty a manipulátory) 2003, s. 31.
- [2] VITRALAB Průručka Automatizační a robotická technika. 5, 2011, s. 64.
- [3] ČERVENÁK, A. Průvodka výrobných systémů. *Hodnotenie pracovného priestoru robota*, 2005, s. 14.
- [4] SCIOLY. Robot Arm. [online]. [cit. Dostupné z: <http://scioly.org/wiki/index.php/Robot_Arm>.
- [5] LINDA, M. Roboty a manipulátory Pohony RaM I. 2006, s. 72.
- [6] SKAŘUPA, J. *Průmyslové roboty a manipulátory* Ostrava: Technická univerzita Ostrava, 2007. 229 s. ISBN 978-80-248-1522-0.
- [7] NOVÁK, P. *Mobilní roboty : pohony, senzory, řízení*. Praha : Ben technické literatury, 2005. s. ISBN 80-7300-141-1.
- [8] RYDLO, P. Krokové motory a jejich řízení: Studijní texty 2000, s. 15.
- [9] ČIŽMÁR, J. SOUČASNOST A BUDOUCNOST INERCIÁLNÍCH MEMS SENZORŮ s. 9. Dostupné z:<<http://www.roznovskastredni.cz/dwnl/pel2011/06/cizmar.pdf>>.
- [10] DADAFSHAR, M. Accelerometer and Gyroscopes Sensors: Operation, Sensing, and Applications. 2015, sv. APPLICATION NOTE 5830 Dostupné z:<<https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/5830>>.
- [11] JOHN, P. MEMS Accelerometer. [online]. Transducers: [cit. Dostupné z: <<http://www.instrumentationtoday.com/mems-accelerometer/2011/08/>>.
- [12] CAI, Y. Magnetometer basics for mobile phone applications. *Sensors & Transducers* 2012. Dostupné z:<http://www.memsic.cn/userfiles/files/publications/Articles/Electronic_Products_Feb_%202012_Magnetometer.pdf>.
- [13] HONEYWELL. Magnetoresistive Sensors. *Position and Solid State Sensing* 2003, s. 3. Dostupné z:<http://sensing.honeywell.jp/index.php?ci_id=50272&la_id=1>.
- [14] INTEGRATED, M. Demystifying Piezoresistive Pressure Sensors. 2002, s. 12. Dostupné z:<<https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/871>>.
- [15] BICKING, R. Pressure Fundamentals of Pressure Sensor Technology. [online]. [cit. Dostupné z: <<http://www.sensorsmag.com/sensors/pressure/fundamentals-pressure-sensor-technology-846>>.

- [16] EMSYST. Tenzometrické snímače sily - základné pojmy. [online]. [cit. Dostupné z: <<http://www.tenzometre.sk/index.php/dokumenty/39-tenzometricke-snimace-sily-zakladne-pojmy-dokumenty>>].
- [17] ČUKAN, J. Princíp funkcie tenzometrického snímača sily. [online]. [cit. Dostupné z: <http://www.emsyst.sk/dok/Princip_tenzometrickeho_snimaca_sily.pdf>].
- [18] VOJÁČEK, A. Fóliové tenzometry - princíp, provedení, použití, historie. [online]. [cit. Dostupné z: <<http://automatizace.hw.cz/images/folietermoclanky/smallstruktura.gif>>].
- [19] TUKE, K. F. Tenzometre. [online]. [cit. Dostupné z: <kemt-old.fei.tuke.sk/info/_personal/_predmety/.../SKR_cvicenie_tenzometer.docx>].
- [20] STOLL, W. Bionic Tripod with FinGripper Dostupné z: <https://www.festo.com/rep/en_corp/assets/pdf/Tripod_en.pdf>].
- [21] VLK, F. *Dynamika motorových vozidel*. Brno: Vydavatelství a nakladatelství Vlk, 2001. 444 s. ISBN 80-7300-115-2.
- [22] SEMICONDUCTOR, O. PWM Constant-Current Control Stepper Motor Driver - LV8731V. 2005. Dostupné z: <http://www.onsemi.com/PowerSolutions/search.do?query=LV8731V¶m1=type¶m1_val=base_part>].
- [23] INVENSENSE. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4. [online]. [cit. Dostupné z: <https://www.cdiweb.com/datasheets/invensense/MPU-6050_DataSheet_V3%204.pdf>].
- [24] HONEYWELL. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L [online]. [cit. Dostupné z: <<http://www.acmesystems.it/download/datasheets/HMC5883L.pdf>>].
- [25] TENMEX. Senzor: fóliový tenzometer. [online]. [cit. Dostupné z: <http://static4.tme.eu/products_pics/a/9/c/a9c5f75099f100a8ba27d64b5e705660/46392.jpg>].
- [26] LTD., A. CMSIS Version 4.5.0 [online]. [cit. Dostupné z: <<http://www.keil.com/pack/doc/CMSIS/General/html/index.html>>].
- [27] STMICROELECTRONICS. STM32 USB-FS-Device development kit. [online]. [cit. Dostupné z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/01/c6/32/df/79/ad/48/32/CD00158241.pdf/files/CD00158241.pdf/jcr:content/translations/en.CD00158241.pdf>].
- [28] DCD. DI2CM IP Core. [online]. [cit. Dostupné z: <http://www.dcd.pl/workspace/documentation/alt/di2cm_ds.pdf>].

- [29] MICROSOFT. .NET Framework Class Library. [online]. [cit. Dostupné z: <[https://msdn.microsoft.com/en-us/library/gg145045\(v=vs.110\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/gg145045(v=vs.110).aspx)>.
- [30] MUTEL, A. SharpDX. [online]. [cit. Dostupné z: <<http://sharpdx.org/>>.
- [31] LTD., O. S. Ozeki Camera SDK - Product Guide. [online]. [cit. Dostupné z: <http://www.camera-sdk.com/p_14-online-manual-for-the-ozeki-camera-sdk-onvif.html>.