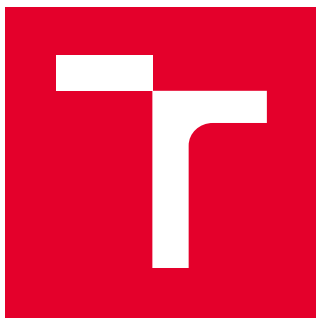


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

BAKALÁRSKA PRÁCA

Brno, 2016

Luboš Dovala



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

NÁVRH MANIPULÁTORU PRO ROBOTICKOU ZBRAŇOVOU VĚŽ

ROBOTIC GUN TOWER - MANIPULATOR DESIGN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

Ľuboš Dovala

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE

Ing. Lukáš Kopečný, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2018



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Luboš Dovala

ID: 173638

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Návrh manipulátoru pro robotickou zbraňovou věž

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Provedte rešerši v oblasti zbraňových věží.
- 2) Vyberte vhodnou kinematickou koncepci manipulátoru.
- 3) Pro vybranou koncepci vyberte vhodný servopohon, včetně výkonového měniče a snímače polohy. Realizujte pohon obou os.
- 4) Navrhněte a realizujte řídicí systém založený na platformě Raspberry Pi.
- 5) Ověřte parametry manipulátoru.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

CHEN, Tsung-Chien; LEE, Yung-Lung. Tactical Requirements Enforcing Ability Analysis of Different Weapon Manipulators for Military Unmanned Ground Vehicles. Defence Science Journal, 2008, 58.5: 664.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Kopečný, Ph.D.

Konzultant:

**doc. Ing. Václav Jirsík,
CSc.**

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

ABSTRAKT

Táto bakalárska práca sa zameriava na problematiku a návrh manipulátoru pre automatický zbraňový systém. V texte sa nachádzajú mnou vybrané súčasné riešenia používané v armádnom sektore. Ďalej sa zameriava na výber vhodnej kinematickej koncepcie pre zbraňové systémy a návrh použitia pohonov pre manipulátor. Riadenie vybranej koncepcie systému je založené na platforme raspberry Pi2b.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

autonómny systém, automatická veža, zbraňová veža, zbraňový systém

ABSTRACT

This thesis deals with design and issue of manipulators for automatic weapon system. There are shown some of the current solutions using in military and selection of the appropriate kinematic conceptions for weapon systems and motion actuators used for this manipulator. System management is based on the raspberry Pi2b. Results of the system properties are evaluated in conclusion.

KEYWORDS

autonomous system, automatic turret, gun turret, weapon system

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že moja bakalárska práca na tému Návrh manipulátoru pro robotickou zbraňovou věž som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho semestrálneho projektu 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 uvedeného semestrálneho projektu ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tohoto semestrálneho projektu som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich zákona č. 121/2000 Zb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníku č. 40/2009 Zb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

POĎAKOVANIE

Chcem sa poďakovať hlavne môjmu vedúcemu práce Ing. Lukášovi Kopečnému, Ph.D za užitočné odborné a praktické rady, ktorými ma usmerňoval a umožnil mi tak riešiť túto zaujímavú problematiku.

OBSAH

Zoznam obrázkov	14
Zoznam tabuliek	15
Úvod.....	10
1 Zbraňové systémy súčasnosti	11
1.1 Rozdelenie zbraňových veží	11
1.2 Slovenské a České zbraňové systémy	11
1.3 Zbrane pre námorníctvo	12
1.4 Vlastnosti.....	13
1.4.1 Výhody.....	13
1.4.2 Nevýhody.....	13
1.4.3 Autonómnosť systému	14
2 Kynematická koncepcia.....	15
2.1 Rotačný pohyb	15
2.1.1 Bočné uloženie.....	16
2.1.2 Centrované uloženie	17
2.1.3 Horné uloženie	18
2.2 Lineárny pohyb	19
2.3 Porovnanie.....	19
3 Pohony	21
3.1 Elektromotory	21
3.1.1 Jednosmerné motory	21
3.1.2 Striedavé motory.....	21
3.2 Hydraulické motory	22
3.3 Zhodnotenie a výber pohonu.....	22
4 Snímače polohy.....	24
4.1 Odporové snímače polohy.....	24
4.2 Indukčnosťné snímače polohy	24
4.3 Kapacitné snímače polohy	25
4.4 Optoelektronické snímače polohy.....	26

4.5	Magnetické snímače polohy.....	27
4.6	Ultrazvukové snímače polohy.....	27
4.7	Porovnanie snímačov	27
5	Trajektória projektilu	29
6	Vlastná koncepcia	31
6.1	Predpoklady systému a očakávané vlastnosti	31
6.1.1	Presnosť	31
6.1.2	Pracovná oblasť	31
6.1.3	Rýchlosť.....	31
6.2	Konštrukcia	32
6.2.1	Základňa.....	33
6.2.2	Horizontálne uloženie veže.....	33
6.2.3	Vertikálne uloženie veže.....	35
6.2.4	Kompletný zostavený model	36
6.3	Popis použitého hardvéru	37
6.3.1	Raspberry Pi 2b.....	37
6.3.2	Krokové motory	37
6.3.3	Ovládače motorov	38
6.3.4	Strelná zbraň	39
6.3.5	PC vstup.....	39
7	Riadiaci systém	40
7.1	Popis zapojenia.....	40
7.2	Popis ovládania	41
7.3	Riadiaci algoritmus - Inicializácia	41
7.4	Riadiaci algoritmus - Referencia.....	42
7.5	Riadiaci algoritmus - Výpočet polohy	43
7.6	Riadiaci algoritmus - Nastavenie polohy	44
7.7	Riadiaci algoritmus – Kontrola polohy	44
7.8	Riadiaci algoritmus – Predmierenie	44
8	Vyhodnotenie parametrov.....	46
8.1	Meranie	46

8.2	Namerané hodnoty	47
8.3	Grafické vyhodnotenie	50
8.4	Vyhodnotenie	51
9	Záver	52
10	Použitá literatúra	55
	Zoznam skratiek.....	57
	Zoznam príloh.....	58

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1 Gladius Dual – diaľkovo ovládaná zbraňová stanica [2]	11
Obrázok 2 TURRA 30 – diaľkovo ovládaná veža [4]	12
Obrázok 3 MK 110 Naval Gun [6]	12
Obrázok 4 Goalkeeper - autonómny zbraňový systém [7]	13
Obrázok 5 RR koncepcia s 2-DOF [9].....	15
Obrázok 6 Eulerove uhly [10]	15
Obrázok 7 Bočné uloženie	17
Obrázok 8 Centrovane uloženie.....	18
Obrázok 9 Horné uloženie	18
Obrázok 10 lineárne uloženie	19
Obrázok 11 Koncepcia veže	32
Obrázok 12 Základňa návrhu.....	33
Obrázok 13 Horizontálne uloženie - diely	34
Obrázok 14 Horizontálne uloženie veže	35
Obrázok 15 Vertikálne uloženie - uchopenie zbrane.....	35
Obrázok 16 Vertikálne uloženie	36
Obrázok 17 Kompletný model koncepcie	37
Obrázok 18 Momentová charakteristika motoru [21].....	38
Obrázok 19 Zapojenie driveru DRV8825 [22]	39
Obrázok 20 Navrhované schematické zapojenie	40
Obrázok 21 Schematické zapojenie riadiaceho systému	40
Obrázok 22 Vývojový diagram programu	42
Obrázok 23 Graf 1 závislosť poklesu guľky.....	45
Obrázok 24 Graf absolútnej chyby pre vzdialenosť terča 1,5 m	50
Obrázok 25 Graf absolútnej chyby pre vzdialenosť terča 2,7m	51
Obrázok 26 Vyhotovený model manipulátoru.....	52

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1 Úrovne autonómnosti [8]	14
Tabuľka 2 Porovnanie vlastností koncepcií.....	20
Tabuľka 3 Namerané hodnoty presnosti zbrane pre vzdialenosť 1,5 m	47
Tabuľka 4 Namerané hodnoty presnosti pre vzdialenosť 2,7 m.....	49

ÚVOD

Konflikty v ľudskej histórii sú už od samotného počiatku ľudskej existencie. S rozvojom civilizácie sa budovali mestá a kráľovstvá v rôznych častiach sveta a medzi nimi vznikala rivalita. Ľudia mali neskôr túžbu odstrániť túto rivalitu a ovládať stále väčšie územia. Snažili sa obsadiť ďalšie územia a ich bohatstvá, čím vznikali vojnové konflikty, ktoré viedli k veľkým obetiam a mnoho ľudí pritom zahynulo. Vojnové konflikty vznikajú neustále aj v dnešnej dobe ako napríklad je 2. svetová vojna, v ktorej sa zúčastnilo viac ako sto miliónov ľudí z viac ako tridsiatich krajín zeme. V dnešnej dobe sa však ľudstvo snaží riešiť problémy diplomatickými spôsobmi a predísť tak stratám na životoch. Pre prípad, keď sa nepodarí dosiahnuť cieľ diplomatickou cestou sa zase dostávame k agresívnemu riešeniu. Aby sme znížili počet obetí je snaha o vyvinutie technického riešenia, ktoré nahradí človeka v boji. Boli vyvinuté rôzne druhy zbraní, ktoré boli ovládané diaľkovo, tzv. drony. Spomínané drony ale stále vyžadujú obsluhu, ktorá musí byť dostatočne kvalifikovaná. Ľudský faktor nie je neomylný a preto je snaha nahradit' človeka plne automatizovaným systémom. Aktuálny stav vývoja je príliš rozmanitý a delí sa podľa účelu použitia. Jedným z možností sú systémy pre zabezpečenie parametru.

Robotická zbraňová vež pre zabezpečenie parametru je automatizovaný zbraňový systém umožňujúci zacielenie zbrane na cieľ pomocou vhodného manipulátoru v stanovenej oblasti. Túto problematiku môžeme rozdeliť na dve hlavné časti a to rozpoznanie a určovanie cieľa a mechanickú konštrukciu a jej riadenie. Určovanie cieľa je však komplexný problém, ktorý zahrňuje správne použitie snímačov a senzorov pre rozpoznanie cieľa a určenie jeho polohy v trojosom súradnicovom systéme. Výstupom by mala byť informácia o polohe bodu v 3D priestore. Na základe tejto informácii sa musí regulátor postarať pomocou pohonov na nastavenie požadovanej polohy veže. Robotické veže môžu byť rôzne špecializované na rozmanité druhy operácii – strelba na krátke vzdialenosti, na stredné vzdialenosti alebo na veľké vzdialenosti. Praktické využitie zbraňových manipulátorov je cielené na ochranu životov, zdravia a majetku osôb. Pokročilé zbraňové systémy môžu v budúcnosti nahradit' ľudí a tým môžu byť vysielané do náročných vojenských misií a tak predísť predovšetkým na stratách životov a v druhom rade zvýšiť úsporu finančných prostriedkov. Musia však byť ošetrené pred všetkými možnými rušeniami a hrozbami. Rušenia môžu byť v podobe rušenia okolitými vplyvmi, cieleným rušením, rušením pri sťažených podmienkach a narušenie z tretej strany.

1 ZBRAŇOVÉ SYSTÉMY SÚČASTNOSTI

1.1 Rozdelenie zbraňových veží

Využitie zbraňových veží závisí na druhu účelu misie. Defenzívne úlohy vyžadujú statické konštrukcie pevne ukotvené v zemi pre kontrolu, sledovanie a ochranu vyhradeného perimetru. Ofenzívne úlohy sú väčšinou v neznámej nepriateľskej oblasti a je nutné, aby boli zbraňové systémy schopné jednoduchého a rýchleho presunu. Často to bývajú upravené statické konštrukcie so zvýšenou odolnosťou a umiestnené na samohybnom podvozku.

1.2 Slovenské a České zbraňové systémy

Mnoho zbraňových systémov používa rovnakú koncepciu ako napríklad diaľkovo ovládané zbraňové systémy pre pozemné vozidlá Gladius mini alebo Gladius Dual, ktorý v mesačníku ministerstva obrany slovenskej republiky v júly 2016 v kategórii Zbrane a munícia získal Grand Prix 2016 EVPÚ, a. s., Slovenská republika za diaľkovo ovládanú zbraňovú stanicu a je určený pre akúkoľvek kolesovú alebo pásovú platformu. Gladius umožňuje použiť široké množstvo strelných zbraní. [1]



Obrázok 1 Gladius Dual – diaľkovo ovládaná zbraňová stanica [2]

Diaľkovo ovládaná veža *TURRA 30* z Českej firmy je navrhnutá pre rôzne druhy kolesových alebo pásových obrnených vozidiel. Vyzbrojená je 30mm delom a 7.62mm samopalom. [3]



Obrázok 2 TURRA 30 – diaľkovo ovládaná veža [4]

1.3 Zbrane pre námorníctvo

Zbraňový systém využívaný pre námornícke účely je napríklad zbraňový systém *MK 110 Naval Gun* vybavené 57 mm delom s veľkou kadenciou strelby a vysokou presnosťou. Táto zbraň je ovládaná jedným diaľkovým operátorom cez zbraňový ovládací systém. [5]



Obrázok 3 MK 110 Naval Gun [6]

Ďalší systém je automatický antiraketový zbraňový systém typu *Phalanx CIWS* alebo *Goalkeeper CIWS* (Close-in Weapon System). Typicky sú to semiautomatické

alebo plne automatické protiraketové systémy vybavené vlastnou kontrolou a sledovacím radarom a nevyžadujú ľudskú obsluhu. Oba sú určené pre autonómne ničenie rakiet a lietadiel na krátku vzdialenosť. Tento zbraňový systém je používaný s malým kalibrom s vysokou kadenciou strelby. [7]



Obrázok 4 Goalkeeper - autonómny zbraňový systém [7]

1.4 Vlastnosti

1.4.1 Výhody

Použitie automatizovaných zbraňových systémov prináša mnohé výhody. Hlavnou výhodou je oprostie človeka od fyzického kontaktu na bojisku a tak ochrany jeho života a zdravia. Elektronické systémy ďalej umožňujú používať vysoký výpočtový výkon a dokáže vypočítať trajektóriu strely a zasiahnuť cieľ už prvým výstrelom. Toto má za následok zlepšenie presnosti strelby s využitím veľmi malej reakčnej doby, ktorá je omnoho nižšia ako pri ľudskej obsluhe zbrane. Výhodou je taktiež cena výrobku pri dostupných zdrojoch a jeho vysoká replikovatelnosť oproti výcviku kvalifikovaného človeka.

1.4.2 Nevýhody

Hlavnou nevýhodou pri autonómnych systémoch je rozhodovacia sekvencia pri výbere cieľa. V tomto smere je zatiaľ ľudský faktor nenahraditeľný. Diaľkovo ovládané systémy musia byť zabezpečené proti zneužitiu z tretej strany a aby nespôsovali nežiadane straty. Taktiež tieto systémy sú obmedzené výpočtovým výkonom hardvéru.

1.4.3 Autonómnosť systému

Základná otázka je „Aký je to autonómny systém a čo taký systém musí vyhodnocovať?“. Thomas Sheridan vytvoril desaťbodovú stupnicu, ktorá určuje úroveň autonómnosti zariadenia. Z tabuľky 1 je vidieť, že zariadenie na prvej úrovni predstavuje automatické zariadenie, pričom až na desiatej úrovni sa nachádza plne autonómny systém. Od piatej úrovni môžeme hovoriť o autonómnom zariadení, ktoré je schopné samostatne konať a dovrieť tak cyklus OODA. OODA, Podľa Johna Boyda, predstavuje z anglických slov observation - pozorovanie, orientation - orientovanie sa, decision - rozhodnutie sa a action - konanie. [8]

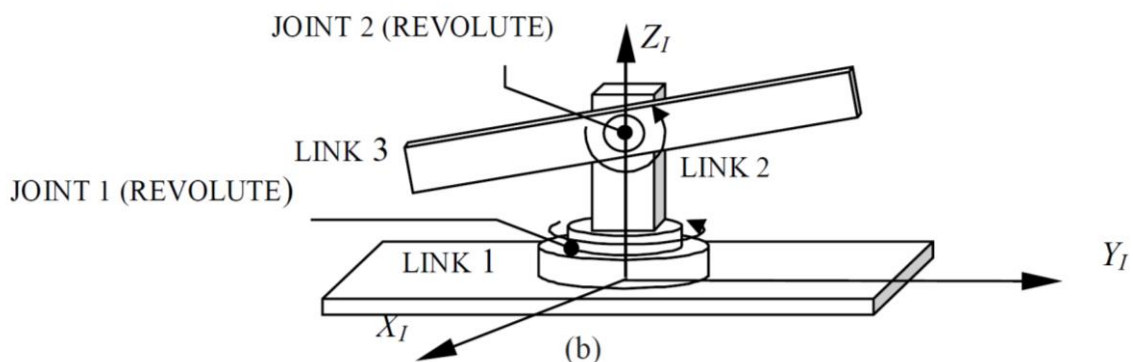
Tabuľka 1 Úrovne autonómnosti [8]

Úroveň	Popis
1	Počítač neumožňuje asistenciu, človek riadi všetko
2	Počítač umožňuje kompletnú zbierku úkonov a alternatív
3	Počítač zúži možnosti na niekoľko
4	Počítač navrhne jedno riešenie
5	Počítač vykoná jeden úkon iba po schválení človekom
6	Počítač umožní človeku vetovať akciu pred vykonaním
7	Počítač vykoná akciu a nevyhnutne informuje človeka
8	Počítač vykoná akciu a informuje iba na požiadanie
9	Počítač vykoná akciu a informuje iba keď sa tak sám rozhodne
10	Počítač rozhoduje o všetkom, úplne ignoruje človeka

2 KYNEMATICKÁ KONCEPCIA

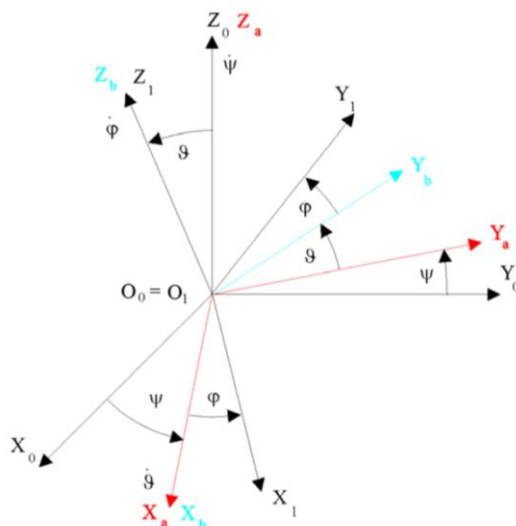
2.1 Rotačný pohyb

Najčastejšou používanou koncepciou je koncepcia s rotačným pohybom a vychádza z kombinácie dvoch rotácií znázornených na obrázku 5. Rotácie sú v horizontálnej rovine (JOINT 1) (z anglického slova - kĺb) okolo osy Z a vertikálnej rovine (JOINT 2) okolo osy X, čo dáva systému dva stupne voľnosti (2-DOF). Podložka (LINK 1) (z anglického slova – prepojenie) slúži ako vzťažný bod pohybu. Konštrukcia úchytu zbrane predstavuje (LINK 2) a samotnú zbraň (LINK 3). [9]



Obrázok 5 RR koncepcia s 2-DOF [9]

Táto konštrukcia koná teda sférický pohyb so stredom v ťažisku telesa. Pre určenie polohy a rýchlosti jednotlivých bodov telesa si zvolíme súradnicový systém pevne spojený s telesom tak, že jeho začiatok bude ležať v strede sférického pohybu. Súradnicový systém spojený s telesom môžeme do obcej polohy sférického pohybu dostať postupnými rotáciami ako je naznačené na obrázku 10.



Obrázok 6 Eulerove uhly [10]

Systém 0 pootočíme do systému 1 postupne takto. Najskôr pootočíme systém 0 okolo osi X_0 o uhol Ψ a dostaneme tak systém označený indexom a . Potom pootočíme systém a okolo jeho okamžitej osi X_a o uhol ϑ , dostávame tak systém označený indexom b . Nakoniec pootočíme systém b o uhol ϕ okolo okamžitej osi Z_b a dostávame obecné pootočený systém 1 . Vyjadrením zložiek relácie medzi zložkami polohy nejakého bodu v systéme 1 a jeho zložkami v systéme 0 môžeme popísať nasledovne.

$$\mathbf{p}_0 = \mathbf{R}_{0az}(\Psi)\mathbf{R}_{abx}(\vartheta)\mathbf{R}_{b1z}(\phi)\mathbf{p}_1 = \mathbf{R}_{01}\mathbf{p}_1 \quad (1)$$

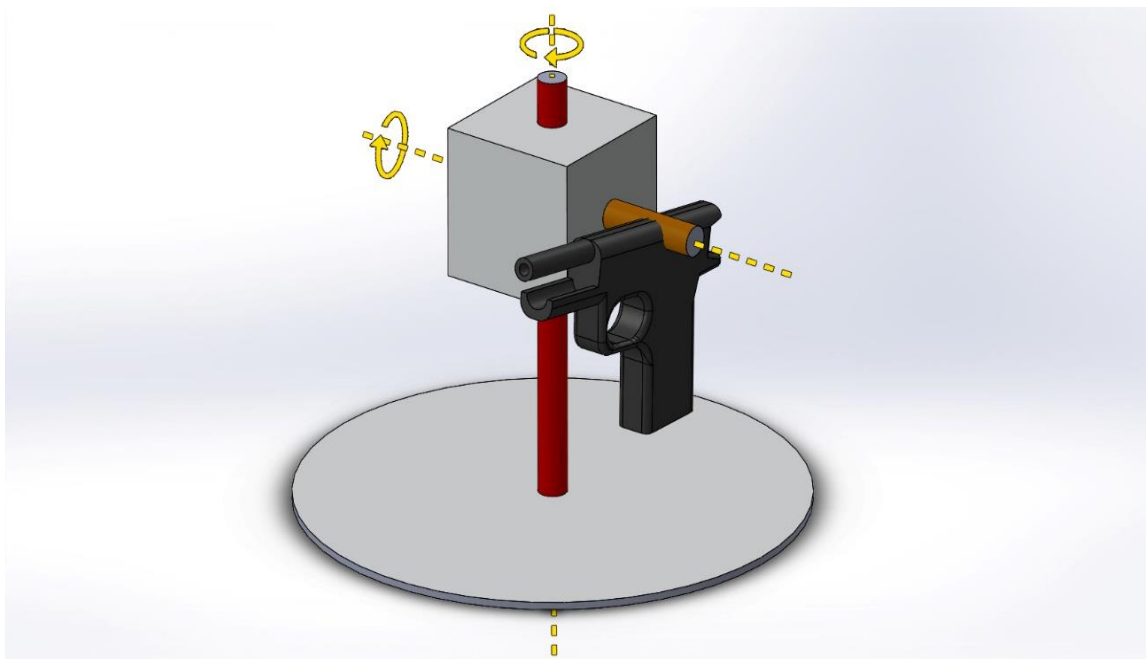
Dosadením za jednoduché matice rotácie do vzorca (1) a roznásobením dostávame maticu rotácie sférického pohybu s použitím Eulerových uhlov.

$$\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} c\Psi c\phi - s\Psi c\vartheta s\phi & -c\Psi c\phi - s\Psi c\vartheta c\phi & s\Psi s\vartheta \\ s\Psi c\phi + c\Psi c\vartheta s\phi & -s\Psi s\phi + c\Psi c\vartheta c\phi & -c\Psi s\vartheta \\ s\vartheta s\phi & s\vartheta c\phi & c\vartheta \end{bmatrix} \quad (2)$$

Vzhľadom na určovanie smeru natočenia a polohy zbrane pre výpočet dráhy letu je možné túto koncepciu s rotačným pohybom rozdeliť na tri základné kategórie vzhľadom na uloženie osi zbrane a osi otáčania. [10]

2.1.1 Bočné uloženie

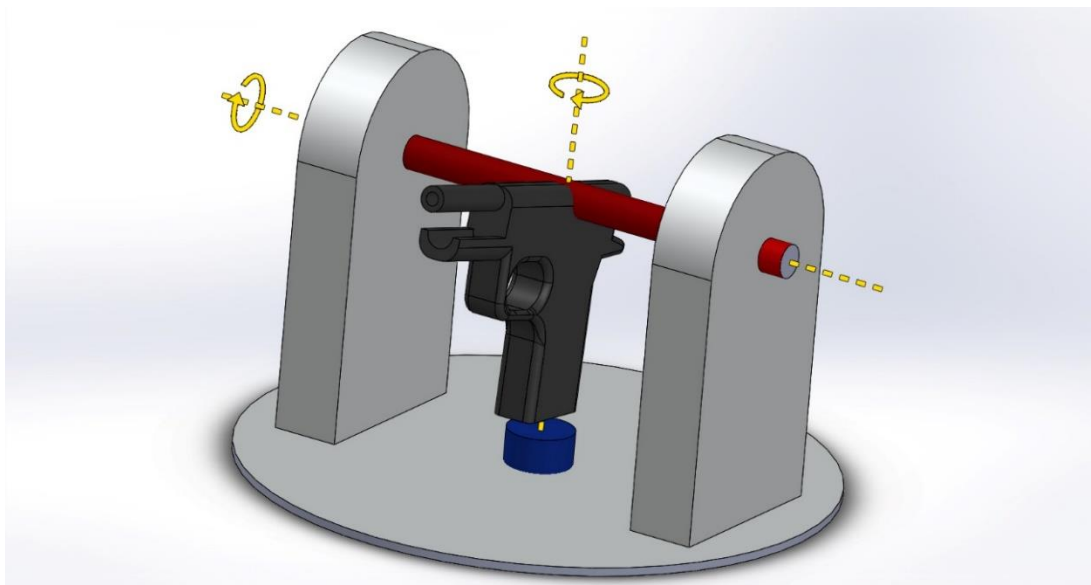
U bočného uloženia zbrane je horizontálna os otáčania umiestnená v osi zbrane, ako je vidieť na obrázku 7. Vertikálna os otáčania je kvôli držiaku zbrane posunutá voči osi zbrane. Toto rozloženie dáva manipulátoru voľnosť otáčania o 360° v oboch osách otáčania avšak výpočet pootočenia už je posunutý a treba počítať s korekčnými konštantami, čo mierne zvyšuje nároky na výpočet. Držiak môže byť ľahko navrhnutý pre rôzne druhy zbraní a variácii zbraní. Taktiež je nutné správne vyvážiť držiak zbrane tak, aby ťažisko konštrukcie bolo v osi otáčania, čím by sa zamedzilo radiálnemu tlaku, destabilizácii manipulátoru a zníženiu momentu zotrvačnosti celku manipulátora a teda potrebnému momentu sily vyvinutej na os. Vyváženie držiaka by mohlo byť riešené napríklad pridaním protizávažia na opozitnú stranu držiaka voči zbrani alebo vhodným návrhom držiaka samotného. U tejto konštrukcii však vzniká problém pri výstrele zo zbrane a jej spätným rázom. Výstrel spôsobí náraz do držiaka a ten túto energiu preniesie ako páka na vertikálnu os, čo spôsobí pootočenie veže. Týmto vznikajú požiadavky na tlmenie nárazovej energie.



Obrázok 7 Bočné uloženie

2.1.2 Centrovane uloženie

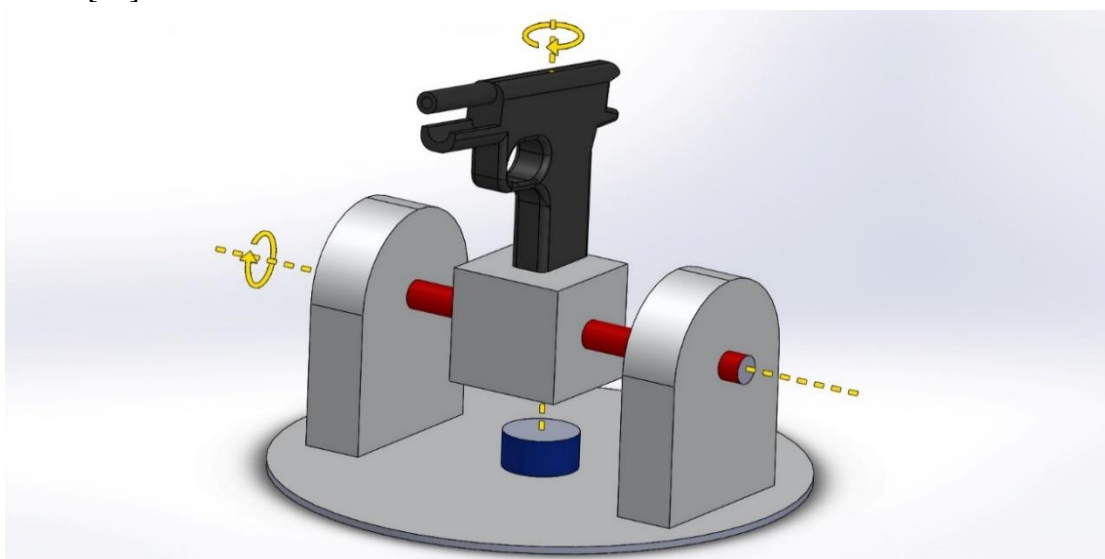
Centrovane uloženie, ako je zobrazené na obrázku 8, má obe osi otáčania umiestnené v osi zbrane čo vedie na minimalizáciu momentu zotrvačnosti sústavy a teda minimalizáciu potrebného dynamického momentu. Týmto sa potrebné výpočty na otočenie zbrane zjednodušia. Má to za následok obmedzené pracovné oblasti otáčania okolo horizontálnej osy na maximálnu hodnotu 180° . Pretože časti zbrane alebo jej držiaku narážajú do hlavnej konštrukcie alebo je blokovaná os zbrane vlastnými dielmi bude možný uhol natočenia menší. Z toho vyplývajú obmedzenia pre veľkosť a tvar zbrane a jej držiaku. Tieto rozmery by mali byť nižších hodnôt. Výhodou tejto konštrukcie je prenos spätného rázu zbrane do uloženia osi (ložísk) a je absorbovaný konštrukciou a nevytvára žiaden točivý moment na os. Spätný ráz sa teda eliminuje v samotnej konštrukcii a neprenáša sa rotačný pohyb na osi otáčania.



Obrázok 8 Centrované uloženie

2.1.3 Horné uloženie

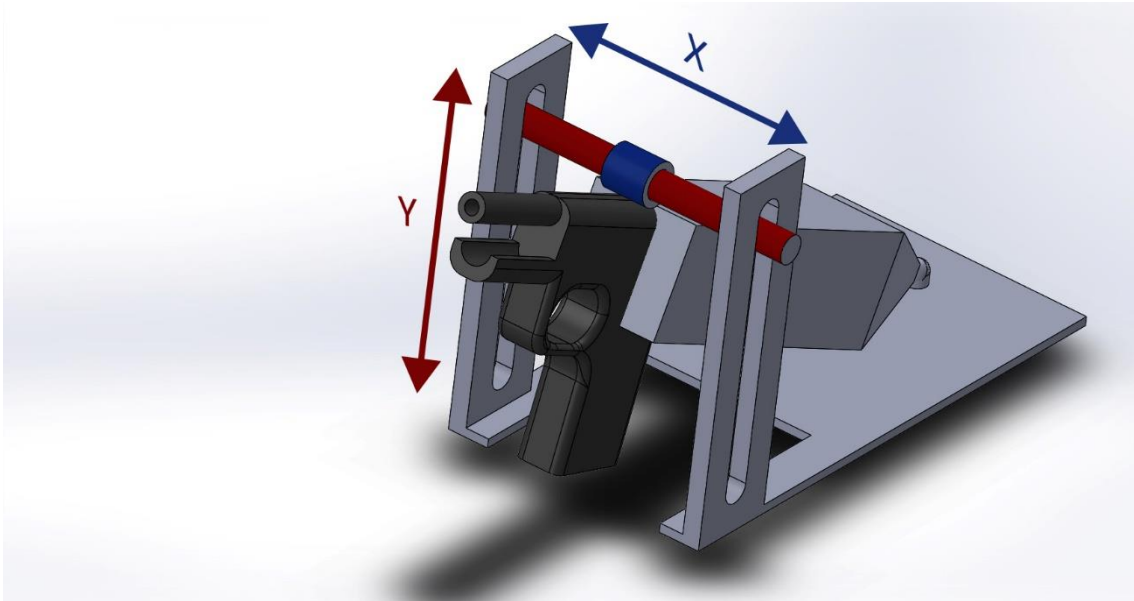
Horné uloženie zbrane má vertikálnu os otáčania v osi zbrane ale os zbrane spolu s držiakom zbrane sú umiestnené nad horizontálnou osou otáčania. Voľnosť pohybu okolo horizontálnej osi je obmedzená podobne ako u centrálneho uloženia ale uhol možného pohybu je obmedzený len na výsek, v ktorom je konštrukcia manipulátora. Z tohto vyplýva, že uhol natočenia môže byť aj viac ako 180° . Táto konštrukcia je teda vhodná pre použitie na mobilných platformách. Vzniká tu však problematika podobná ako u bočného uloženia len s prevrátenými zmyslami os. Výpočet pootočenia je potrebný počítať s konštantami posunu osi zbrane nad osou otáčania. Spätný ráz sa podobne prenáša cez držiak na rotačný pohyb do horizontálnej osi otáčania a je ho teda potrebné tlmiť. [11]



Obrázok 9 Horné uloženie

2.2 Lineárny pohyb

Koncepcia s lineárnym pohybom je tvorená držiakom zbrane, ktorý je na jednom konci ukotvený v jednom bode v osi zbrane a na druhom konci je pripravený ku posuvným častiam. Spätný ráz zo zbrane je teda priamo prenášaný do konštrukcie a teda je táto koncepcia vhodná pre zbrane s veľkým kalibrom a veľkými rozmermi. Posun v oboch osiach, horizontálnej aj vertikálnej osy je však značne obmedzený dosahom pohonov a konštrukcie (menej ako 90°). Výpočet rotácie osi zbrane je zložitejší, pretože pri lineárnom posune o ekvidištantné diely spôsobuje nelineárne pootočenie osi zbrane.



Obrázok 10 lineárne uloženie

2.3 Porovnanie

Porovnaním koncepcií v tabuľke 2 a priradením váhy vlastnostiam je zrejmé, že centrálné uloženie má najnižšie hodnotenie pretože má slabé hodnotenie v kľúčových parametroch rozsah pohybu (FOV), prispôsobivosť zbrani a využitie. Centrálné uloženie je vhodné pre aplikácie, ktoré potrebujú väčšiu odolnosť voči spätnému rázu zbrane a zároveň väčší pracovný rozsah ako má lineárne uloženie. Ostatné systémy získali podobný počet bodov hodnotenia a preto treba vyhodnotiť ich individuálne výhody a nevýhody. Lineárne uloženie je pre zložitost' výroby a ovládania nevhodné pre malé alebo testovacie aplikácie. Táto koncepcia je vhodná pre manipulátory určené pre veľké kalibre s veľkým spätným rázom a zároveň je dostačujúci úzky pracovný rozsah pohybu. V praxi sa táto koncepcia používala prevažne u stíhačov tankov, vozidiel určených proti obrnenej technike alebo samohybných delách. Bočné uloženie a horné uloženie sú si veľmi podobné. Rozsah pohybu u horného uloženia je veľmi málo obmedzený a teda bežne dosahuje skoro identické výsledky ako bočné uloženie. Horné uloženie je preto v praxi častejšie využívané pre jeho mierne lepšiu nosnosť a absenciu spätného nárazu. Pre túto prácu som sa teda rozhodol taktiež použiť koncepciu horného uloženia pre jej jednoduchšiu výrobu, lepšiu nosnosť a odolnosť voči spätnému rázu ako pri bočnom

uložení. Predpoklad na prenos spätného rázu je eliminovaný použitím zbrane s veľmi malým spätným rázom. [11]

Tabuľka 2 Porovnanie vlastností koncepcií

vlastnosť	bočné uloženie	centrálne uloženie	horné uloženie	lineárne uloženie
výrobná zložitosť	-1	-2	0	-3
stabilita systému	0	2	0	3
moment zotrvačnosti sústavy	-1	0	-1	1
rozsah pohybu (FOV)	5	2	4	0
absorpcia spätného rázu	0	3	1	4
prispôsobivosť zbrani	4	0	3	3
nosnosť	0	1	1	3
využitie	4	2	4	1
SUM	11	8	12	12

3 POHONY

3.1 Elektromotory

Elektrické točivé stroje pracujúce na elektromagnetickom princípe premeny elektrickej energie na mechanickú energiu môžeme rozdeliť na dve základné skupiny. Prvá možnosť ako sa tvorí točivý moment je vzájomným pôsobením dvoch magnetických polí – statorového a rotorového magnetického poľa. Na tomto princípe pracuje väčšina točivých strojov jednosmerných (DC) aj striedavých (AC). Druhá možnosť vytvorenia točivého momentu je premenným magnetickým odporom vo vzduchovej medzere medzi statorom a rotorom. Reluktančný moment vzniká snahou rotora zaujať takú polohu, aby bol magnetický odpor čo najmenší. [12]

3.1.1 Jednosmerné motory

Tieto motory premieňajú jednosmerný elektrický prúd na točivý pohyb. Stator motora sa skladá z permanentných magnetov a magnetického obvodu. Na rotore je navinutá cievka a tá je spojená cez komutátor a zberací systém uhlíkových kief na napájanie. Priložením napätia cievkou prechádza prúd a ten vytvára magnetické pole. Toto pole reaguje s magnetickým poľom statora a tým uvedie rotor do pohybu a ten urobí časť otáčky. Následne sa pomocou komutátora mechanicky prepóluje cievka a cyklus sa opakuje. Pre väčšie motory sa používa namiesto permanentných magnetov elektromagnet. Môže byť zapojený do série s rotorovou cievkou, tzv. sériový motor alebo paralelne, tzv. derivačný motor. Pre predĺženie životnosti motora sa kladie dôraz na odstránenie nežiadúcich vlastností - iskrenie komutátora. Komutátor sa teda nahradzuje riadiacou elektronikou, ktorá sa stará o prepólovanie cievok elektronicky, ide teda o tzv. bezkomutátorové motory. [12]

3.1.2 Striedavé motory

Striedavé motory sú napájané jednofázovým alebo trojfázovým striedavým harmonickým napätím. To je pripojené na statorové vinutie a vytvára vo vinutí cievok prechodom prúdu striedavé točivé magnetické pole a to interaguje s magnetickým poľom rotora a vytvára tak moment. Magnetické pole rotora môže byť tvorené permanentnými magnetmi alebo rotorovým vinutím. Základné rozdelenie striedavých motorov je na dve skupiny. Prvá skupina sú asynchrónne striedavé stroje, ktoré majú rozdielne otáčky pohyblivých častí voči točivému magnetickému poľu. Druhá skupina sú synchronne striedavé stroje, ktoré majú rovnaké otáčky pohybujúcich sa častí a točivého magnetického poľa. [12]

Špeciálnou skupinou motorov sú krokové motory. Stator motora tvorí súprava vinutí vzájomne pootočených o rovnaký uhol. Rotor môže byť buď s permanentnými magnetmi alebo s magneticky vodivým jadrom (reluktančné krokové motory). Priložením jednosmerného napätia na jedno vinutie sa rotor pootočí vzhľadom na

pôsobiace magnetické sily a túto polohu drží. Následne sa prepne napájanie na vedľajšie vinutie a rotor sa opäť pootočí. Takto je motor schopný sa otáčať po presne definovaných krokoch. Je možné napájať aj dve susediace cievky súčasne a pomerom ich napájania sa určí medzipoloha rotora. Ide o tzv. mikrokrokovanie motora a môže byť s polovičným krokom alebo až do 64 mikrokrokov. [13]

3.2 Hydraulické motory

Zdroj energie hydraulických pohonov je tlaková energia vytváraná čerpadlami kvapaliny u hydraulických pohonov. Tlaková energia kvapaliny prenášajúca sa na moment alebo silu v pieste tvorí pohon, ktorý sa nazýva hydrostatický pohony. Natlakovaná kvapalina je ovládaná cez tlakové ventily a pôsobí na piest. Pohony, ktoré menia kinetickú energiu kvapaliny na moment alebo silu sa nazývajú hydrodynamické pohony. Prúdením kvapaliny cez turbínu vytvárajú točivý moment na turbíne. Hydraulické pohony rozdeľujeme na štyri základné skupiny. Priame pohony, nepriame (akumulátorové) pohony, multiplikátorový pohon a kombinovaný pohon. Hydraulické pohony sa vyznačujú veľkou vyvinutou silou, malým rozsahom a malou rýchlosťou pohybu. [14]

3.3 Zhodnotenie a výber pohonu

Pre vhodný výber pohonu je potrebné určiť jeho pracovné zaťaženie. Jedným z cieľov práce je navrhnutie modelu zbraňovej veže pre bližšie nešpecifikované použitie. Z tohto vyplýva, že nie je stanovené minimálne zaťaženie motorov a je možné vybrať pohony s malým výstupným výkonom. Pri správnom umiestnení osi otáčania do ťažiska sústavy bude statické zaťaženie nulové a teda zaťaženie motorov bude závisieť len na dynamických vlastnostiach sústavy. Zaťaženie pri otáčaní okolo horizontálnej osi je tvorené hmotnosťou zbrane a hmotnosťou držiaku zbrane. Zaťaženie pri otáčaní okolo vertikálnej osi pozostáva taktiež z hmotnosti zbrane a držiaku zbrane, pričom najväčší moment zotrvačnosti je pri vodorovnom umiestnení zbrane, s pridanými prvkami krokových motorov a konštrukcie veže. Dynamický moment je vypočítaný z momentu zotrvačnosti a predpokladaného zrýchlenia, ktorý popisuje nasledujúci vzťah:

$$M_d = J * \frac{d\omega}{dt} [Nm] \quad (3)$$

J - celkový moment zotrvačnosti [kg/m²]

ω – uhlová rýchlosť [rad/s]

Moment zotrvačnosti je vypočítaný zo vzťahu:

$$J = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 [kg/m^2] \quad (4)$$

m_i – elementárna hmotnosť [kg]

r_i – vzdialenosť od osi otáčania [m]

Výpočet momentu zotrvačnosti pre otáčanie okolo horizontálnej osi určený z 3D modelu navrhnutého manipulátora vypočítaný podľa vzorca (4) softvérom Solidworks:

$$J_z = 0,8 * 10^{-3} [kg/m^2]$$

Dynamický moment pôsobiaci na otáčanie okolo horizontálnej osi bude podľa vzťahu (3) pri uhlovom zrýchlení $\pi/6$ [rad*s⁻¹]. Výpočet dynamického momentu pre otáčanie okolo horizontálnej osi podľa vzorca (3):

$$M_d = 0,8 * 10^{-3} * 0,5236 \cong 0,4 * 10^{-3} [Nm]$$

Moment zotrvačnosti konštrukcie veže je počítaný podľa vzťahu (4) v programe Solidworks.

$$J_v \cong 2,7 * 10^{-3} [kg/m^2]$$

Dynamický moment pôsobiaci na otáčanie okolo vertikálnej osi bude podľa vzťahu (3) pri uhlovom zrýchlení $\pi/6$ [rad*s⁻¹]. Výpočet dynamického momentu pre otáčanie okolo vertikálnej osi podľa vzorca (3):

$$M_d = 2,7 * 10^{-3} * 0,5236 \cong 1,41 * 10^{-3} [Nm]$$

Z modelových výpočtov vychádza, že na motory bude pôsobiť minimálny dynamický moment pri danom zrýchlení. Nie je preto nutné použiť motory s veľkým krútiacim momentom.

Trecie sily vzniknuté na ložiskových spojoch vzhľadom na nízku hmotnosť sú zanedbateľné ale pre nepresnosti výroby 3D tlače môžu vzniknúť pnutia a zväčšiť tak trenie. Pretože zaťažovací moment bude veľmi malý, navrhujem použiť krokové motory, ktoré sa jednoducho ovládajú po presne definovaných krokoch. Za predpokladu, že nedôjde ku strate krokov pri pohybe sa dá presne definovať poloha otočenia osi a teda odpadá potreba spätne snímať polohu osi.

4 SNÍMAČE POLOHY

Snímanie polohy potrebné pre spätnú väzbu systému je možné vyhotoviť rôznymi spôsobmi. Pre konkrétne riešenie manipulátoru pre zbraňové systémy sú požiadavky na použiteľné snímače polohy so spojitým výstupom alebo s kódovým výstupom. Ďalej sa predpokladá veľká citlivosť a menší pracovný rozsah. Preto nepripadá do úvahy použiť ultrazvukové snímače polohy, ktoré sú pre rozsahy od desiatok centimetrov. Vhodné by bolo použitie snímačov s veľkou citlivosťou, presnosťou a rýchlou odozvou ako napríklad optické snímače polohy.

4.1 Odporové snímače polohy

Odporové snímače polohy sú založené na jednoduchom princípe. Meraná posuvná časť je mechanicky spojená s jazdcom (pohyblivým kontaktom) potenciometra, ktorý sa pohybuje po odporovom vinutí. Je zapojený ako delič aby sa vylúčila chyba zmeny rezistivity odporovej dráhy ako je to u reostatového zapojenia. Spracovanie signálu je teda jednoduché ale dochádza ku stratám a teda snímače majú obmedzený stratový výkon. Spôsoby vyhotovenia môžu byť s lineárnym posunom, rotačným posunom a so špirálovitým posunom (helipot).

Linearita týchto snímačov je pomerne dobrá, od 0,002 % pre väčšie priemery odporového vinutia a pre snímače s posuvným jazdcom je chyba nelinearity 0,05 % až 0,1 %. Odporové snímače sú pri pohybe jazdca rušené šumom a pri dlhodobom nastavení jazdca na stálu polohu vzniká šum ako kolísanie výstupného napätia tzv. drift napätia. Vďaka mechanickému treniu a momentu zotrvačnosti tieto snímače nemajú dobré dynamické vlastnosti. Vďaka veľkému momentu zotrvačnosti sú ale odolné voči vibráciám. Životnosť potenciometrov sa pohybuje od $2 \cdot 10^6$ do $5 \cdot 10^7$ cyklov. [15] [16]

4.2 Indukčnosťné snímače polohy

Indukčnosťné snímače polohy sú pasívne senzory. Meraná poloha je prevádzaná na zmenu indukčnosť jednej cievky tzv. tlmivkové senzory alebo vzájomnej indukčnosti dvoch cievok tzv. transformátorové senzory. Magnetický obvod je buď otvorený alebo uzavretý a usporiadanie jednoduché alebo diferenciálne.

Indukčnosťné snímače s premennou vzduchovou medzerou majú otvorený magnetický obvod a magnetický tok je ovplyvňovaný zmenou veľkosti vzduchovej medzery medzi časťami jadra magnetického obvodu. Táto závislosť indukčnosti na veľkosti vzduchovej medzery je hyperbolická. Mechanické vyhotovenie môže byť jednoduché, diferenciálne a s posuvným jadrom.

Transformátorové snímače majú posunom jadra transformátorov ovplyvnenú vzájomnú indukčnosť dvoch vinutí. Primárna cievka je napájaná z referenčného zdroja striedavého napätia a v závislosti na polohe jadra v magnetickom obvode sa indukuje

napätie na sekundárnej cievke. Najčastejšie usporiadanie je diferenciálne s posuvným jadrom.

Indukčnosťné senzory s vírivými prúdmi pracujú na princípe generovania v detekovanom materiáli vírivé prúdy. Cievka je napájaná striedavým referenčným zdrojom, a priblížením cievky ku elektricky vodivým materiálom vytvára striedavé magnetické pole, ktoré generuje v materiáli elektrické prúdy. Tieto prúdy zase generujú magnetické pole, ktoré je v opačnom zmysle ako pôvodné magnetické pole podľa Lenzovho zákona a tým sa znižuje indukčnosť cievky.

Ako indukčnosťný snímač uhlového natočenia sa používa resolver. Ten pracuje tak, že na statore má dve signálové vinutia, ktoré sú vzájomne pootočené o 90° . Sú označované ako sínusová a kosínusová cievka. Rotačným pohybom rotorového vinutia, ktoré je napájané referenčným napätím, sa indukuje na signálových cievkach napätie, ktoré je úmerné natočeniu rotoru voči snímačej cievke.

Ďalším používaným indukčnosťným snímačom je selsyn. Selsyny sú podobné ako resolvery len s rozdielom, že na statore majú trojicu vinutí vzájomne pootočených o 120° pre trojfázové vinutie a jednofázové vinutie pre jednu cievku rotora. Uhlová poloha sa teda prenáša indukovaním napätia s amplitúdami v troch zložkách závislých na vzájomnej polohe rotora a statora.

Pre lineárny posun sú vhodné snímače s posuvným skratom. Senzor s posuvným skratom pracuje tak, že na strednom stĺpiku feromagnetického obvodu sa pohybuje skratovací prstenec z vodivého materiálu, v ktorom sa indukujú vírivé prúdy. Vzniknuté vírivé prúdy vytvárajú magnetické pole s opačným zmyslom, čo má za následok pokles indukčnosti budiacej cievky.

Magnetostriekčné senzory majú vlnovod vo forme trubky z magnetostriekčného materiálu. Vo vnútri je vodič, ktorý je napájaný prúdovými impulzami. Merací magnetický prstenec je navlečený na tejto trubke. Axiálne pole prstenca a magnetické pole vodiča vytvoria impulz krútiaceho momentu, ktorý sa šíri ku koncom trubky a tam sa utlmí. Táto mechanická deformácia je magnetostriekčným meničom prevedená na napät'ový impulz. Vyhodnocuje sa čas medzi prúdovým impulzom a napät'ovým impulzom z konca trubky. [15] [16]

4.3 Kapacitné snímače polohy

Kapacitné snímače polohy rozdeľujeme na dve základné skupiny – kontaktné a bezkontaktné. Snímače využívajú zmenu kapacity kondenzátoru z geometrickej podstaty kondenzátoru alebo zmenu kapacity zmenou permitivity izolantu.

Kapacita ovplyvnená zmenou geometrických vlastností je docielená zmenou medzery medzi elektródami kondenzátoru. Jedna elektróda je pripevnená ku pohyblivej meracej časti a druhá elektróda je na meracom zariadení. Vyhotovenie môže byť s jednodoskovými kondenzátormi, trojdoskovými kondenzátormi alebo s premennou šírkou dielektrika.

Druhou možnosťou je zmena plochy prekrytia elektród. Pre väčšie rozsahy sa používa zapojenie so zmenou plochy prekrytia, kde je jedna elektróda pripevnená na meraciu časť a druhá elektróda je rozprestretá po celej dĺžke meracieho priestoru, pričom je rozdelená na malé časti. Kapacita je teda závislá na prekrytí s jednotlivými časťami elektródy. Výstup z merania je trojuholníkový priebeh závislý na posunutí.

Bezkontaktné snímače využívajú zmenu permitivity priestoru medzi elektródami na vyhodnotenie prítomnosti materiálu pri elektróde. Elektródy sú usporiadané vedľa seba v jednej línii a vytvárajú elektrické pole pred sebou. Keď do vytváraného poľa zasiahne prekážka, zmení sa hodnota permitivity kondenzátoru a tým aj jeho kapacita. [15] [16]

4.4 Optoelektronické snímače polohy

Polohu objektu môžeme merať optoelektronickými snímačmi viacerými metódami. Meraná veličina je ovplyvňovaná zmenou polohy zdroja žiarenia, zatienia svetelného toku, uhlu odrazu lúča alebo interferencie zdrojového a odrazeného lúča.

Metóda merania vzdialenosti dobou letu lúča (TOF – z anglického slova Time Of Flight) pracuje na princípe vysielania svetelného lúča, ktorý sa odráža od meranej plochy a vracia sa späť do snímača. V impulznom režime sa vyhodnocuje časový rozdiel medzi vyslaným a prijatým signálom a v kontinuálnom režime sa vyhodnocuje moduláciu amplitúdy alebo fázy signálu.

Interferomertické snímače využívajú princíp polopriepustného zrkadla, ktoré rozdelí svetelný lúč na dve časti. Jedna časť lúča mieri k referenčnému zrkadlu a druhá časť lúča mieri k pohyblivému (meraciemu) zrkadlu alebo meranej ploche. Odrazené lúče sa následne sčítajú a sú vyhodnotené optoelektronickým sensorom. Rozdiel dráh lúčov je dvojnásobok skutočnej meranej vzdialenosti. Pre meranie rotačného pohybu sa využíva koherentné žiarenie, ktoré je clonené lineárnymi štrbinami alebo polarizovanými zrkadlami, ktoré vzájomným pootočením menia intenzitu dopadajúceho žiarenia na snímač.

CCD a CMOS (CCD, CMOS z anglických slov Charged Coupled Device, Complementary Metal Oxide Semiconductor) sú obrazové snímače riadkové alebo maticové, kde jednotlivé pixely, ktoré sú tvorené fotodiódami, sú osvetlené. Postupne sa meria náboj vygenerovaný ožiarením pomocou analógového posuvného registra. Získame teda informáciu o osvetlení celej plochy pred snímačom.

Polohovo citlivé snímače (PSD z anglického slova Position Sensitive Detector) využívajú trianguláciu lúča. Vysielač a prijímač svetelného lúča sú od seba vzdialené presne definovanú vzdialenosť. Lúč vyslaný zo zdroja žiarenia sa odrazí od prekážky a dopadá pod určitým uhlom na snímač. Tento uhol je závislý na vzdialenosti prekážky od snímača.

Inkrementálne snímače využívajú princípu optickej závery, čiže zatienie svetelného lúča prekážkou medzi zdrojom svetla a snímačom. Na pohybujúcu časť (hriadeľ u rotačného pohybu, pravítko u lineárneho pohybu) je pripevnená clona

s otvormi. Pohybom sa striedavo prerušuje svetelný tok a vyhodnocuje sa počet impulzov. Aby bolo možné vyhodnotiť smer posunu je potrebné vytvoriť druhú rovnakú clonu, ktorá bude pootočená voči prvej clone. Smer posunu sa potom určí z fázového posunu výstupného signálu. Tento princíp je však pre relatívny posun voči štartovacej polohe. Pre absolútny posun je nutné pridať tretiu referenčnú clonu so značkou referencie alebo použiť clonu s kódovaným usporiadaním okien. Používajú sa napríklad clony s Grayovým kódom alebo pseudonáhodný kódom. [15] [16]

4.5 Magnetické snímače polohy

Magnetické snímače polohy využívajú pre vyhodnotenie zmeny polohy zmenu magnetického poľa permanentných magnetov. Snímače rozdeľujeme na dve základné skupiny – s Hallovou sondou a magnetorezistory.

Hallova sonda je snímač polohy, ktorý využíva Hallov jav, ktorý funguje na princípe Lorentzovej sily. Hallova sonda je na stranách pripojená ku zdroju prúdu. Vložením sondy do magnetického poľa sú nosiče prúdu týmto poľom kolmo vychýľované. Takto vznikne rozdiel potenciálov na dolnej a hornej strane sondy, ktorý je úmerný intenzite magnetického poľa.

Magnetorezistory využívajú zmenu odporu vplyvom magnetického poľa. Posuvom permanentného magnetu smerom k alebo od magnetorezistívnej vrstvy sa mení hodnota odporu tejto vrstvy. Pre rotačný pohyb je magnetorezistívna vrstva nanosená v štyroch vrstvách, ktoré sú vzájomne pootočené vždy o 45° . Vznikajú tak dve zložky signálu, sínusová zložka a kosínusová zložka. Podobne ako u resolveru sa vyhodnocuje poloha porovnaním intenzít týchto signálov. [15] [16]

4.6 Ultrazvukové snímače polohy

Ultrazvukové snímače polohy využívajú podobne ako optoelektronické snímače polohy princíp doby letu zvukovej vlny priestorom. Snímače majú zdroj zvukového impulzu, najčastejšie piezomenič, ktorý vyšle zvukový impulz šíriaci sa prostredím. Keď impulz narazí na prekážku odrazí sa od nej. Odrazený signál je prijatý snímačom a následne sa vyhodnocuje časový rozdiel medzi vyslaným a prijatým impulzom, ktorý odpovedá dobe letu zvukového impulzu v danom prostredí a teda polovici vzdialenosti, ktorú zvuková vlna prešla. [15] [16]

4.7 Porovnanie snímačov

Pre snímanie polohy, teda uhlového natočenia pre vybranú koncepciu zbraňového manipulátoru nie sú všetky vyššie vymenované metódy vhodné. Kapacitné snímače s princípom ovplyvňovania geometrických vlastností, transformátorové indukčné snímače a indukčné snímače s premennou vzduchovou medzerou alebo posuvným jadrom majú síce veľkú citlivosť ale malý rozsah pohybu a preto nie sú vhodné pre zbraňový manipulátor. Naopak snímače na princípe doby letu signálu (ultrazvukové

a optické) sú vhodné na meranie veľkých vzdialeností s veľkým rozsahom a menšou citlivosťou, takže tiež nie sú vhodné pre manipulátor. CCD a CMOS sa používajú vo videogeometrii a tým sú snímače vhodné pre celkové meranie plôch, čo je nepotrebné pri daných požiadavkách. Magnetostrikčné snímače a polohovo citlivé optoelektronické snímače sa používajú na meranie lineárneho posunu a preto by bolo nutné pridať prevod rotačného pohybu na lineárny, čo je nevýhodné. Odporové snímače majú pomerne malý rozsah a veľký šum. Vplyvom starnutia materiálu menia svoje vlastnosti a majú veľkú teplotnú závislosť a preto tiež nie sú vhodným kandidátom. Uhlové meranie polohy s použitím metódy s Hallovou sondou a magnetorezistorom vyžadujú pre ich funkciu magnetické pole, čím sú citlivé na magnetické alebo elektromagnetické rušenie. Preto sa tieto snímače nehodia do praktického riešenia ale iba do laboratórneho prostredia.

Kapacitné snímače bezkontaktné a indukčné snímače s vírivými prúdmi sú vhodné na detekciu objektu pred snímačom a pracujú v binárnom režime. Pre meranie polohy sa dajú použiť iba v zapojení ako impulzné snímače otáčok na rovnakom princípe ako inkrementálne optické snímače v kapitole 4.4. Ich rozlíšenie závisí na mechanickom vyhotovení cloniaceho ozubeného kolesa pripevneného na os otáčania a potrebného pre detekciu. Vlastnosti spomínaných snímačov ovplyvňujú veľkosť zubu, ktorého rozmery sú pomerne veľké oproti využitiu optického inkrementálneho snímača. Z tohoto vyplýva, že snímače majú nižšiu citlivosť.

Najvhodnejšie je teda použitie kapacitného senzora s premenlivou plochou prekrytia v kruhovom usporiadaní. Tento snímač ale pracuje ako relatívny snímač posunu a je potrebné ho referovať pri zapnutí alebo strate napájania. Pre meranie absolútnej polohy s vysokou presnosťou je vhodné použiť optoelektronický absolútny inkrementálny senzor.

Pre koncepciu nachádzajúcej sa v bakalárskej práci som sa rozhodol použiť pohony s krokovými motormi, ktoré sa pohybujú po stanovených krokoch. Za predpokladu správnej inicializácie a referencie pred spustením a obmedzením maximálneho zrýchlenia, čím sa zabezpečí maximálny moment zaťaženia je systém zabezpečený proti strate krokov motora. Vďaka týmto opatreniam môžeme jeho polohu determinovať len jeho ovládaním. Preto som sa rozhodol pre model nepoužiť žiaden snímač polohy. [15] [16]

5 TRAJEKTÓRIA PROJEKTILU

Skúmaniu trajektórie strely sa venuje balistika, čo je náuka o pohybe strely. Je rozvetvená do rôznych smerov, ako napríklad vojenská, raketová, kriminalistická, forenzná, experimentálna, ranivá, lovecká, športová, atď. Balistika strely je rozdelená do štyroch základných okruhov. Vnútorňá balistika skúma deje pri výstrele, teda horenie strelného prachu, expanzia plynov, priebeh tlaku a podobne. Skúma všetky deje a chovanie zbrane a náboja, kým je náboj v hlavni zbrane. Prechodová balistika skúma deje v ústi zbrane. Napríklad zdvih zbrane, hlučnosť, plamene a podobne. Vonkajšia balistika skúma let strely prostredím v priestore. Terminálna balistika sa zaoberá účinkami strely na dopadnutie na cieľ. Môže byť ďalej špecifikovaná pre živé alebo neživé ciele. Moderná balistika skúma aj deje pred výstrelom (nabíjanie) ale aj po zásahu cieľa, tzv. posttermálna balistika. [17]

Výpočet trajektórie strely je veľmi komplexný. Na strelu pôsobí najmä odpor, tlak, teplota a vlhkosť vzduchu, poveternostné podmienky, gravitačná sila, úst'ová rýchlosť projektilu, uhol výstrelu, aerodynamický odpor projektilu, rotácia projektilu. Pre malé vzdialenosti môžeme zanedbať väčšinu týchto parametrov a trajektóriu aproximovať priamkou. Pre veľké vzdialenosti je nutné počítať so všetkými parametrami a dokonca aj so zakrivením zeme a rotáciou zeme, ktorú popisuje Couriolisova sila. Základné sily, ktoré pôsobia na dráhu letu, sú gravitácia a odpor vzduchu, ako je vidieť vo vzorci (5).

$$F = F_g + F_{DF} \quad (5)$$

F_g – vektor gravitačnej sily [N]

F_{DF} – vektor odporu vzduchu (DF – z anglického Drag Force) [N]

Odpor vzduchu projektilu je závislý na tvare projektilu a rýchlosti. Popisuje ho vzťah (6):

$$F_{DF} = \frac{1}{2} C * S * \rho * v^2 \quad (6)$$

C – koeficient odporu projektilu (závislý na rýchlosti projektilu) [-]

S – prierez projektilu [m²]

ρ – hustota vzduchu (závislý na atmosferických vplyvoch) [kg/m³]

$v(t)$ – rýchlosť projektilu (závislá v čase a na poveternostných podmienkach) [m/s]

Pričom rýchlosť guľky sa mení v čase podľa vzorca (7)

$$v(t) = \frac{v_0}{1+k*t*v_0} \quad (7)$$

v_0 – počiatočná rýchlosť guľky [m/s]

k – koeficient guľky [-]

Koeficient guľky sa počíta podľa vzorca (8)

$$k = \frac{C * S * \rho}{2m} \quad (8)$$

m – hmotnosť guľky [kg]

C – koeficient odporu projektilu (závislý na rýchlosti projektilu) [-]

S – prierez projektilu [m²]

ρ – hustota vzduchu (závislý na atmosferických vplyvoch) [kg/m³]

Tento vzťah sa dá ďalej upraviť a rozdeliť na určenie vzdialenosti a poklesu náboja v závislosti na čase t [s] podľa vzorcov (9) a (10) [18] [19]

$$X_D(t) = v_0 * \cos(\alpha) * t - F_{DF} * \frac{t^2}{m} \quad (9)$$

$$Y_P(t) = v_0 * \sin(\alpha) * t - 0.5 * g * t^2 \quad (10)$$

X_D – dostrelená vzdialenosť [m]

Y_P – pokles guľky [m]

α – uhol zbrane od vodorovného smeru [rad]

t – čas [s]

g – gravitačné zrýchlenie [m/s]

6 VLASTNÁ KONCEPCIA

6.1 Predpoklady systému a očakávané vlastnosti

Z dôvodu komplexnosti úlohy pre prvotný prototyp zariadenia sú odvodené niektoré parametre ako konštantné alebo s definovaným rozsahom. Manipulátor bude navrhovaný na airsoftovú elektrickú zbraň Beretta mod. 92 FS. Projektily do tejto zbrane sú plastové BB guľičky s priemerom 6 mm a maximálna energia, ktorú zbraň dodáva do projektilu je 0,5 J. Z tohto vyplýva, že zbraň vytvára iba zanedbateľne malý spätný ráz. Predpokladá sa, že vzdialenosť zbrane od terča l bude známa a konštantná v čase. Terč sa bude pohybovať len v ploche kolmej na os zbrane. Maximálna vzdialenosť terča od zbrane je desať metrov a bude zadávaná ako konštanta pri kalibrácii. Táto maximálna vzdialenosť je odvodená od presnosti spomínanej použitej zbrane a trajektórii projektilu, ktorá je so vzrastajúcou vzdialenosťou silno ovplyvnená okolitým prostredím a z tohto dôvodu nemôžeme determinovať jej dráhu letu. Nesmie dochádzať k ovplyvňovaniu poveternostnými podmienkami a atmosférickými vplyvmi. Systém bude pevne ukotvený a určenie jeho polohy a polohy cieľa budú body v 2D priestore.

6.1.1 Presnosť

Presnosť je kľúčovým parametrom robotickej zbraňovej veže. V závislosti na použitej zbrani by mal manipulátor dosahovať lepšiu presnosť ako samotná zbraň a dodržanie tohoto parametru má najvyššiu prioritu. Rozptyl airsoftovej zbrane umožňuje zasiahnuť terč o rozmeroch 15x15 cm na vzdialenosť desať metrov v priemere každou druhou strelou. Podľa uvedeného parametra je presnosť zbrane približne s rozptylom 15 mm na jeden meter. Manipulátor by teda mal mať vyššiu presnosť. Pre vzdialenosť 1 m odpovedá uhlovému natočeniu $\alpha < 15 \cdot 10^{-3}$ rad ($0^{\circ}3'26,26''$).

6.1.2 Pracovná oblasť

Pracovná oblasť manipulátoru určuje praktické použitie manipulátoru. Keďže model zbraňovej veže bude testovaný pri laboratórnych podmienkach predpokladá sa, že terč bude umiestnený priamo pred zbraňou a bude sa pohybovať len v blízkom okolí. Minimálna požiadavka pre manipulátor je aby bol schopný pootočená do každého smeru o minimálne 45° .

6.1.3 Rýchlosť

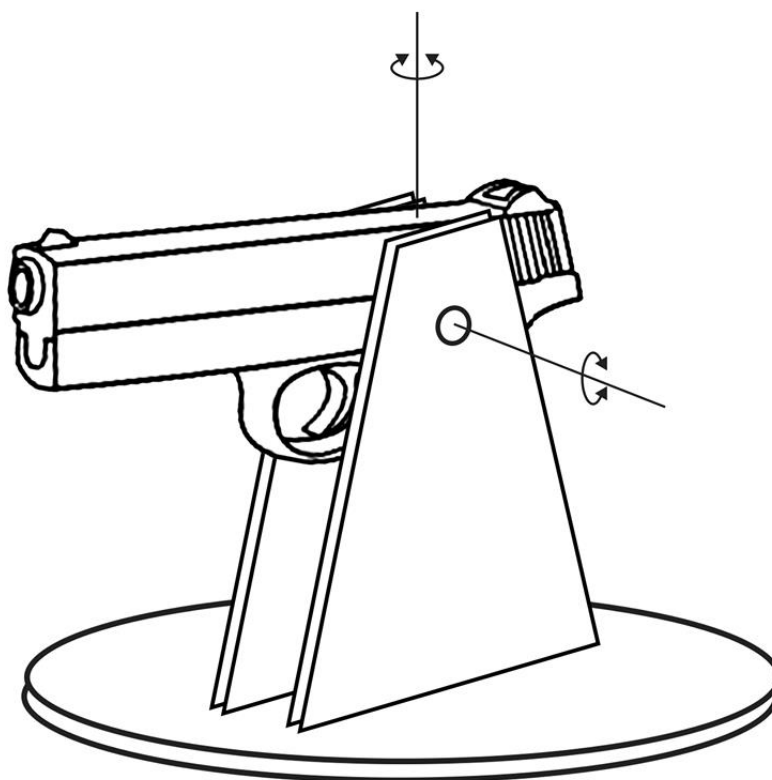
Tento parameter určuje čas, za ktorý je manipulátor schopný dosiahnuť požadovanú polohu. Cieľom je aby manipulátor dosahoval zrovnateľné alebo lepšie výsledky ako dosahuje človek strelec (vojaci, policajti alebo športovci). Pre vybranú koncepciu systému som sa rozhodol zrovnávať rýchlosť reakcie a výsledky so športovou strelbou biatlonistov. Biatlonisti zaciľujú na terč v priemere 2-3 sekundy v závislosti na výcviku a schopnostiam jedinca. Manipulátor by teda mal dosahovať minimálne

zrovnateľné výsledky. Vzhľadom na očakávanú pracovnú oblasť $\pm 45^\circ$ plyní, že manipulátor by mal byť schopný pri hraničnom stave prejsť celú túto oblasť a ustáliť sa na cieľovej polohe za menej ako tri sekundy.

6.2 Konštrukcia

Navrhovaný systém má dva stupne voľnosti. Otáčanie okolo horizontálnej osi a vertikálnej osi, ktoré sú znázornené na obrázku 11. Táto koncepcia je zvolená z dôvodu jej odolnosti a mechanickej nenáročnosti. V ťažisku zbrane je umiestnená horizontálna os otáčania. Os zbrane sa nachádza nad osou otáčania a preto sa jedná o horné uloženie. Spätný ráz zbrane sa bude prenášať do osi otáčania a spôsobovať šokové namáhanie. Pre zvolený systém je použitá airsoftová zbraň s veľmi malým spätným rázom a preto je možné použiť toto uloženie. Konštrukciu rozdeľujem na 3 časti:

- Základňa
- Vertikálne uloženie veže
- Horizontálne uloženie veže



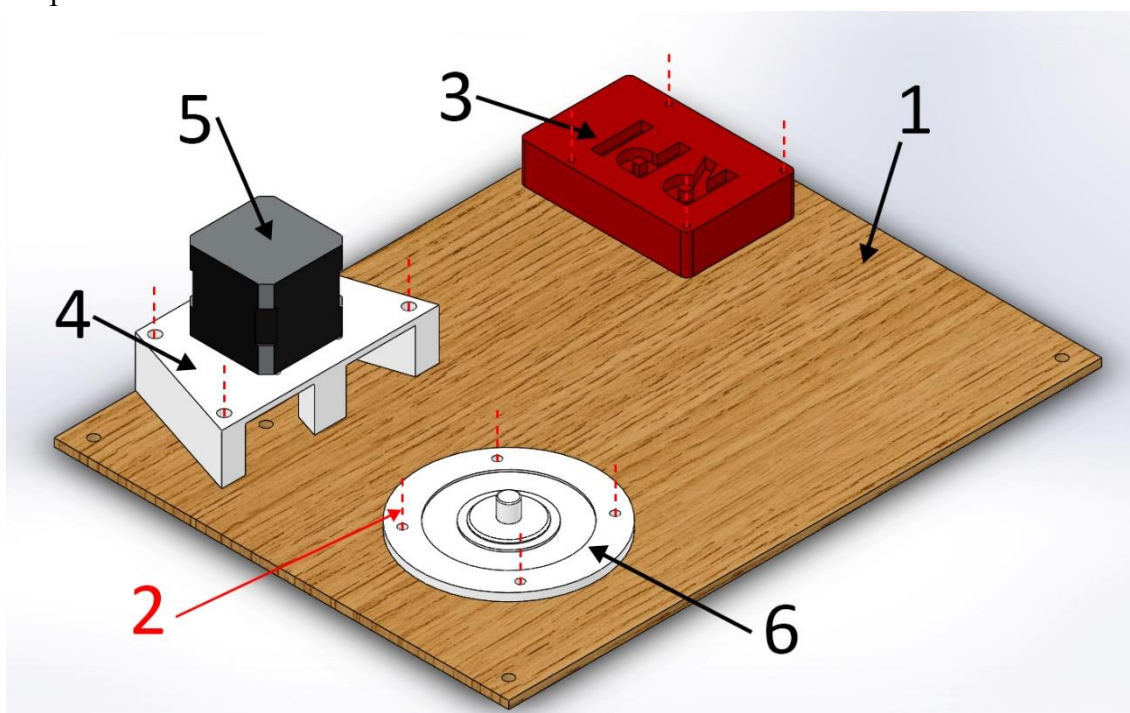
Obrázok 11 Koncepcia veže

Pre zachovanie dobrých dynamických vlastností manipulátora musia mať pohyblivé časti malý moment zotrvačnosti. Toto je dosiahnuté umiestnením len nutných prvkov na vežu. Strelná zbraň, motor pre vertikálny posun a navrhnuté diely by mali prenášať točivý pohyb na osu otáčania priamo cez ťažisko zostavy. Týmto je

minimalizovaný moment zotrvačnosti. Pre ďalšie zlepšenie dynamických vlastností je nutné minimalizovať trenie pri pohybe. Použitím uloženia do ložísk trenie minimalizuje natoľko, že je zanedbateľné.

6.2.1 Základňa

Základňa (1) je nepohyblivá časť, ku ktorej sa bude vzťahovať natočenie veže. Je teda nutné upevnenie základne ku pevnej podložke a pomocou upevňovacích otvorov (2) pripevniť všetky diely ku základni. Ku základni sú ukotvené všetky nepohyblivé prvky a to raspberry Pi2b (3), držiak motoru (4), krokový motor (5) SX17-1005QCEF pre horizontálny posun, ako je znázornené na obrázku 12. Skladá sa zo súčastí: základňa (1), raspberry Pi2b (3), držiak motoru (4), krokový motor (5) a podstava veže (6). Všetky tieto diely sú napevno ukotvené o základňu skrutkami.

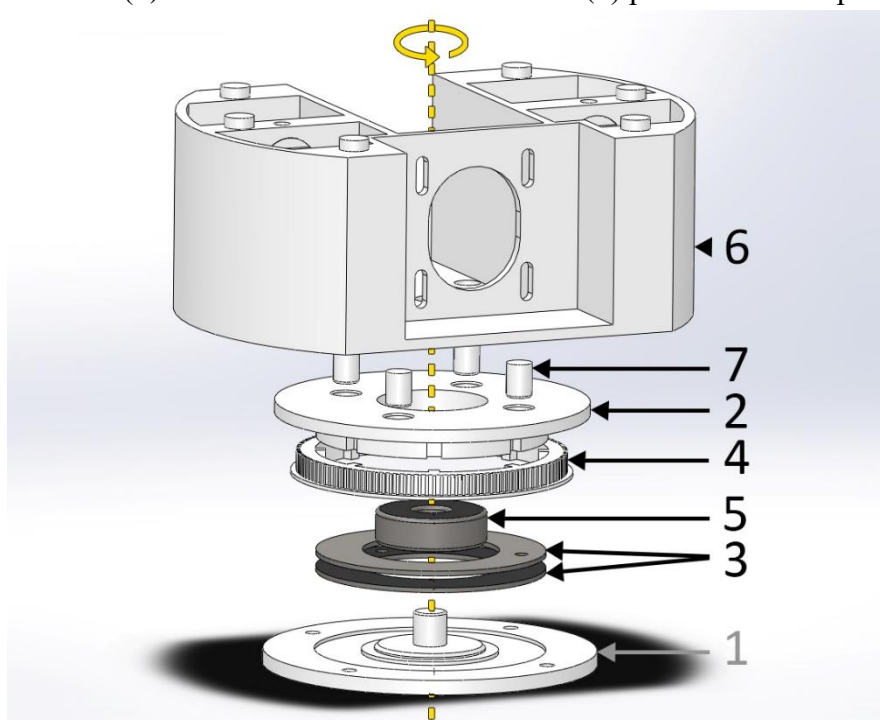


Obrázok 12 Základňa návrhu

6.2.2 Horizontálne uloženie veže

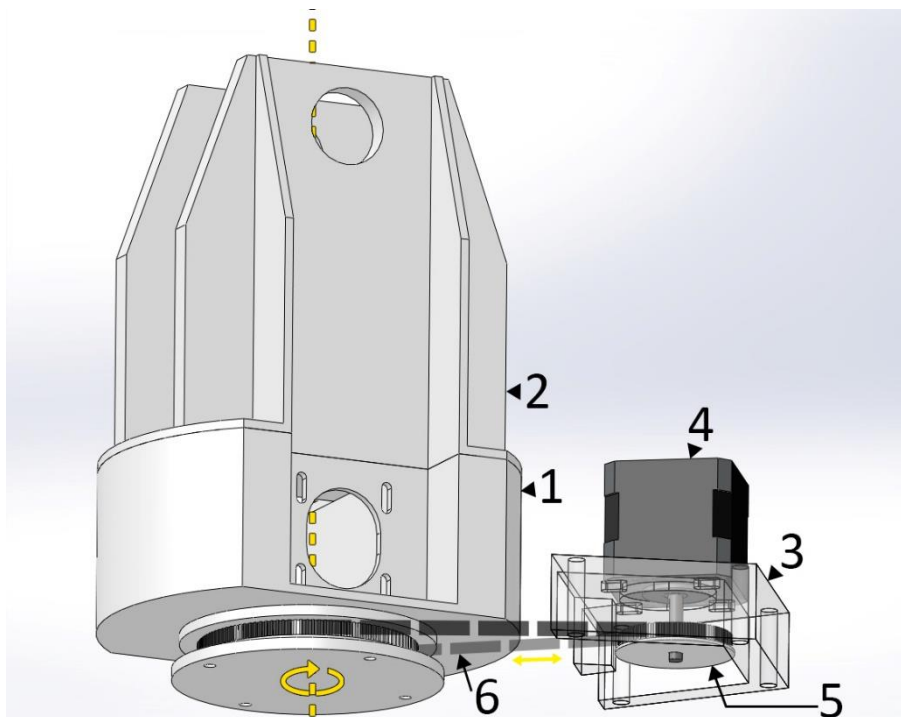
Horizontálny rotačný posun je tvorený modulárne a teda s ohľadom na schopnosť ozubené koleso. Kvôli vyhotoviteľnosti pomocou 3D tlače je konštrukcia rozdelená do viacerých dielov. Ako je možné vidieť na obrázku 13 celá zostava sa opiera o pevne ukotvenú podstavu veže (1). Váha celku sa prenáša voľným uložením zo spojky točne (2) cez grafitové ložiská (3) (grafitové ložiská – plechy s nanosenou grafitovou vrstvou na jednej strane pre zníženie trenia) na podstavu (1). Ozubené koleso (4) s priemerom 71,1 mm a počtom zubov 115 je pripojené voľne ku spojke úchyty (2). špecifický tvar na vonkajšej strane sopke úchyty (2) s vybraním na

ôsmich miestach a výstupkami na ozubenom kolese (4) zabezpečujú pevné uchytenie a prenos točivej sily. Na 2 bodoch je prilepené pre prípadnú nutnosť vymenenia ozubeného kolesa. Radiálne ložisko (5) slúži na vymedzenie spojky točne (2) voči podstave veže a zaistenie tak súososti zostavy. Spojka točne (2) je ďalej prilepená na spodnú časť točne (6) a zaistená zaist'ovacími kolíkmi (7) pre zamedzenie pretočenia.



Obrázok 13 Horizontálne uloženie - diely

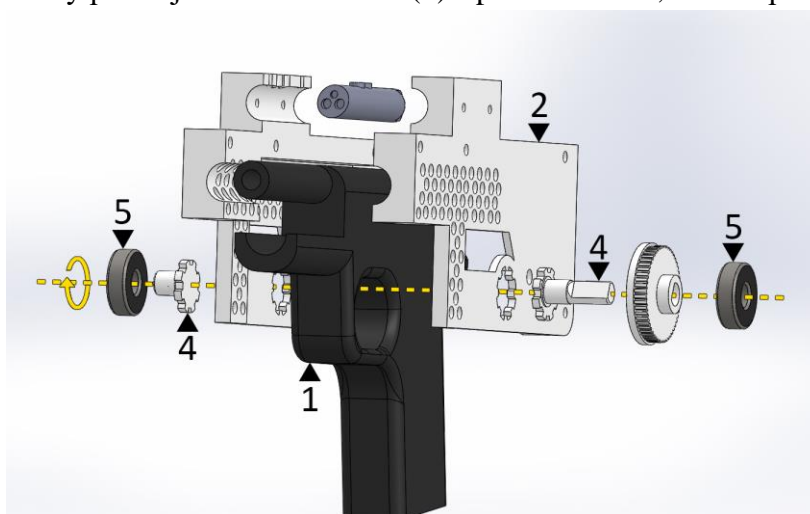
Zostava z obrázku 13 po skompletizovaní je ďalej znázornená na obrázku 14 ako točna (1) už aj s pevne pripevnenou hornou časťou točne (2) pomocou lepidla. Ukotvený držiak motoru (3) o základňu (viď. Obrázok 12) nesie upevnený krokový motor (4) SX17-1005QCEF ako pohon pre otáčanie okolo vertikálnej osy. Otáčavý pohyb je prenášaný od ozubeného kolesa motora (5) s počtom zubov 61 a priemerom 35,6 mm. Cez ozubený remeň (6) sa na ozubené koleso točne, ktoré bolo znázornené na predošlom obrázku. Prevodový pomer týchto ozubených kolies je 115/61. Otáčanie točne je teda možné v celom rozsahu a teda 360°.



Obrázok 14 Horizontálne uloženie veže

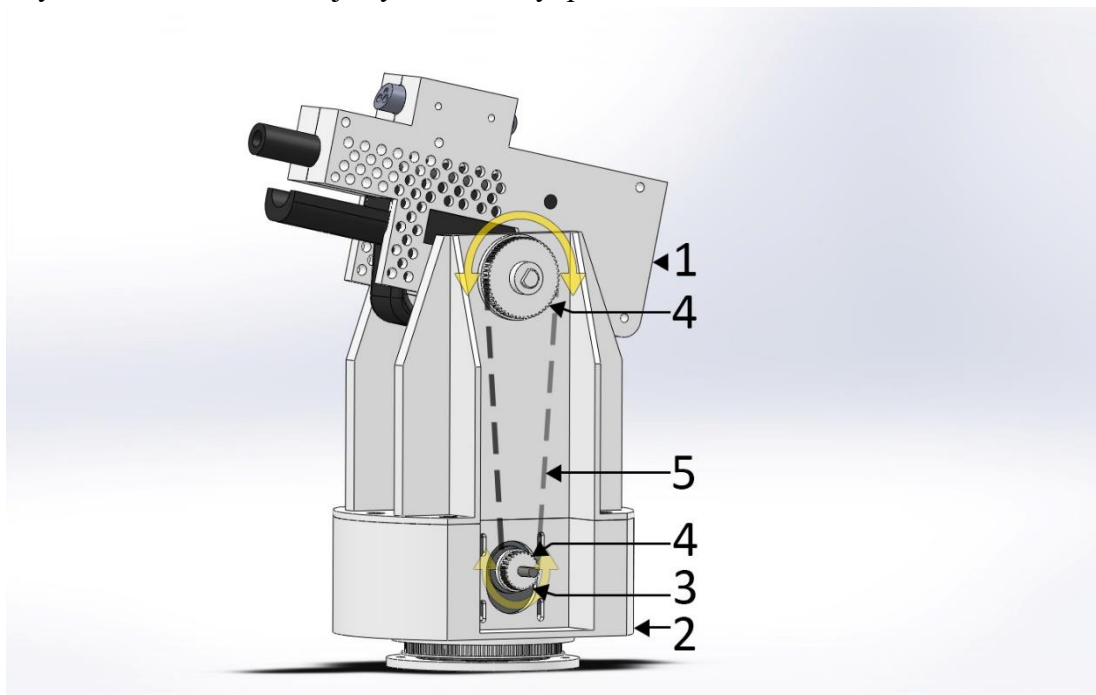
6.2.3 Vertikálne uloženie veže

Vertikálne uloženie, znázornené na obrázku 15, umožňuje pohyb okolo vertikálnej osi. Je tvorené zbraňou (1), ktorá je uchopená v držiaku zbrane (2) a súčasne je rovnobežne s hlavňou zbrane uchopené aj laserové ukazovátko (3). Držiak zbrane sa skladá z dvoch dielov (ľavý a pravý), ktoré sú spojené skrutkami. Do otvorov na stranách držiaku je vlepovaná spojka osy otáčania (4). Spojka je excentricky tvarovaná tak aby bolo možné umiestniť os otáčania presne do ťažiska zostavy. Ďalej je spojka uložená v ložisku (5). Posledný prvok je ozubené koleso (6) s priemerom 35,5 mm a počtom zubov 61.



Obrázok 15 Vertikálne uloženie - uchopenie zbrane

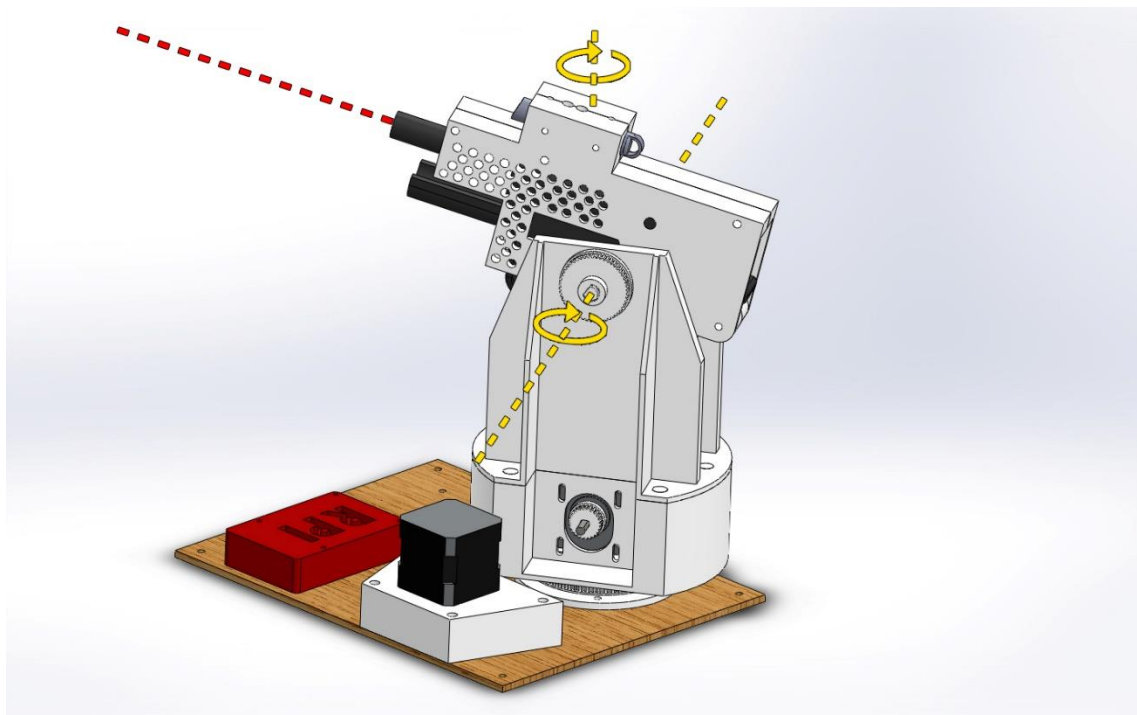
Táto zostava (1) z obrázku 15 je vložená medzi nosné stĺpy držiaku hornej časti točne horizontálneho uloženia (2). V spodnej časti točne je upevnený krokový motor (3) SX17-1005QCEF ako pohon pre otáčanie okolo horizontálnej osy. Cez ozubené kolesá (3 a 4) sa prenáša točivý pohyb cez ozubený remeňový prevod (5) s prevodovým pomerom 61/29 ako je to znázornené na modelovom obrázku 14. Zbraň má rozsah pohybu okolo horizontálnej osy obmedzený, pretože zbraň naráža o nosnú konštrukciu.



Obrázok 16 Vertikálne uloženie

6.2.4 Kompletný zostavený model

Skompletizovaný model manipulátora je znázornený na obrázku 17. Možný rozsah pohybu je vo vertikálnej ose neobmedzený a v horizontálnom smere obmedzený aby os zbrane nezasahovala do nosnej konštrukcie a nedochádzalo ku blokovaniu dráhy strely. Navrhnutý model dosahuje predpokladu pohybu v pracovnej oblasti $\pm 45^\circ$ v každom smere od vodorovnej polohy kolmej na terč pred manipulátorom. Os zbrane je nad horizontálnou osou otáčania.



Obrázok 17 Kompletný model koncepcie

6.3 Popis použitého hardvéru

Výber vhodného hardvéru je do značnej miery ovplyvnený dostupnosťou. Všetky prvky sú volené tak, aby bola dosiahnutá čo najväčšia úspora finančných prostriedkov a teda sú kladené minimálne nároky. Taktiež je snahou o čo najväčšiu miniaturizáciu rozmerov a hmotnosti a využitie už dostupného materiálu, ktorý je pre tento modelový manipulátor postačujúci. Ako riadiaci prvok je v zadaní určený mikropočítač raspberry Pi 2b.

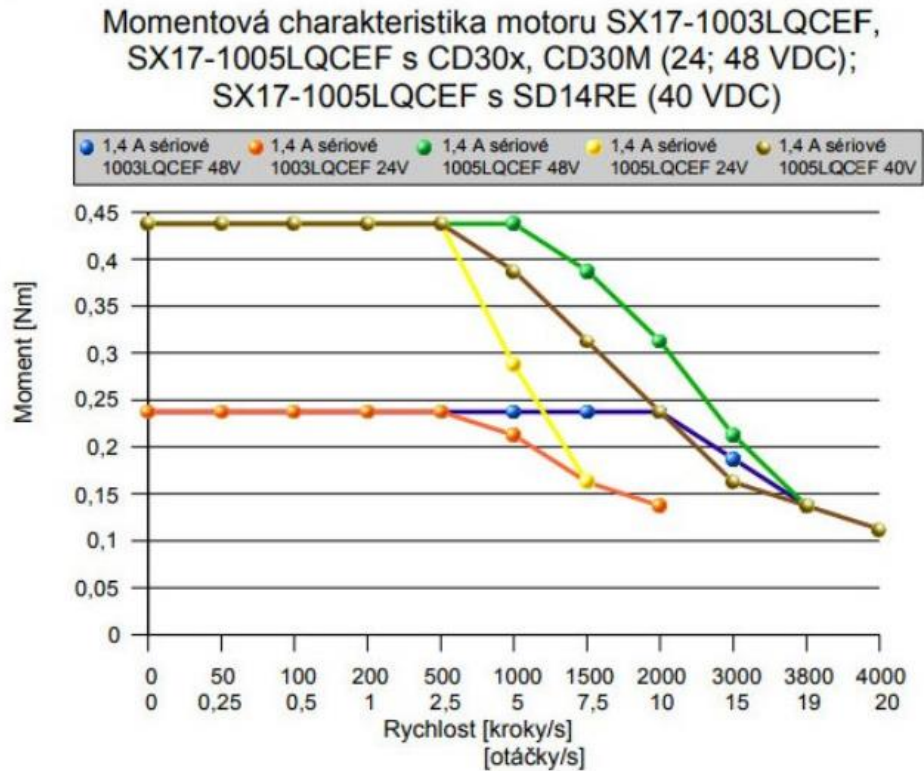
6.3.1 Raspberry Pi 2b

Raspberry Pi 2b je použitý ako hlavný riadiaci prvok pre výpočet, komunikáciu a ovládanie periférii. Výpočtový modul umiestnený na jednej doske o rozmeroch 76,6x30 mm, ktorý obsahuje štvorjadrový procesor Broadcom BCM2836 ARMv7 s frekvenciou 900 MHz, 1 GB pamäte RAM, grafický procesor VideoCore IV, 4x USB 2.0 porty, 40x GPIO pinov, HDMI port, ethernet port, CSI camera port, Micro SD port. Napájacie napätie je 5 V buď z USB portu počítača alebo z modulu Main driver board pre KAMbot. [20]

6.3.2 Krokové motory

Ako pohonné jednotky sú použité dva krokové motory SX17-1005QCEF o rozmeroch 42,3x42,3x40 mm s hmotnosťou 0,3 kg. Uhol natočenia kroku je 1,8°

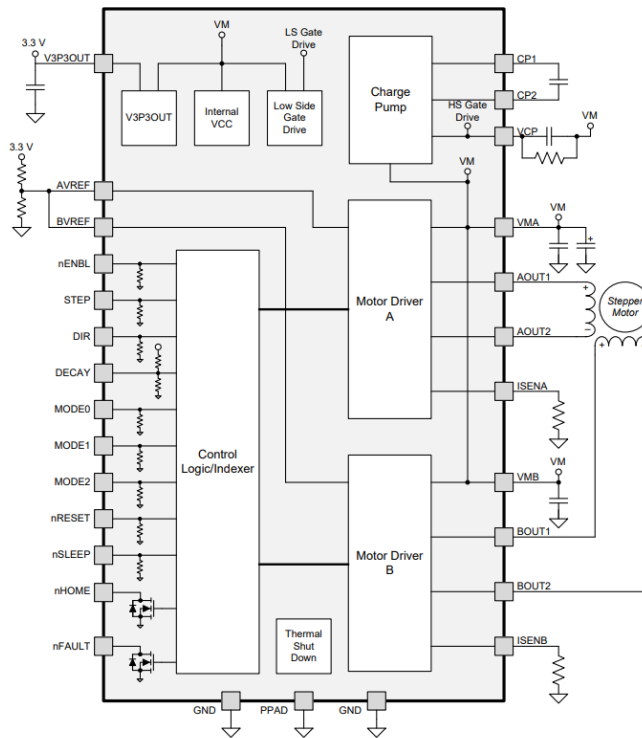
pri presnosti $\pm 0,1^\circ$. Motory disponujú prídržným momentom 0,52 Nm a pracovným zaťažením 0,4 Nm pri napájacom napätí 12V do maximálnej rýchlosti 500 krokov za 1 s. Tieto hodnoty sú plne dostačujúce na použitie pre manipulátor. [21]



Obrázok 18 Momentová charakteristika motoru [21]

6.3.3 Ovládače motorov

Použitie ovládača motorov slúži pre odľahčenie vytťaženia hlavného riadiaceho modulu raspberry Pi2b. Modul KM2b s dvomi modulmi DRV8825 (stepper driver) riadené procesorom ATmega88PA. Pre splnenie podmienky presnosti je nutné, aby ovládač umožňoval mikrokrokovanie 32 μ -krokov alebo viac. Pre mikrokrokovanie 32 μ -krokov sa zjemní krok motoru z $1,8^\circ/\text{krok}$ na $0,05625^\circ/\mu\text{-krok}$. [22]



Obrázok 19 Zapojenie driveru DRV8825 [22]

6.3.4 Strelná zbraň

Z hľadiska bezpečnosti je zvolená zbraň elektrická airsoftová zbraň MOD. 92 FS BERETTA s energiou $< 0,5 \text{ J}$. Strieľa projektily 6 mm BB airsoftové guľičky so zásobníkom na 16 rán. Hmotnosť projektilu je 0,2 g a úšťová rýchlosť projektilu je 65 m/s. Napájanie zbrane sú štyri batérie 1,5V zapojené do série.

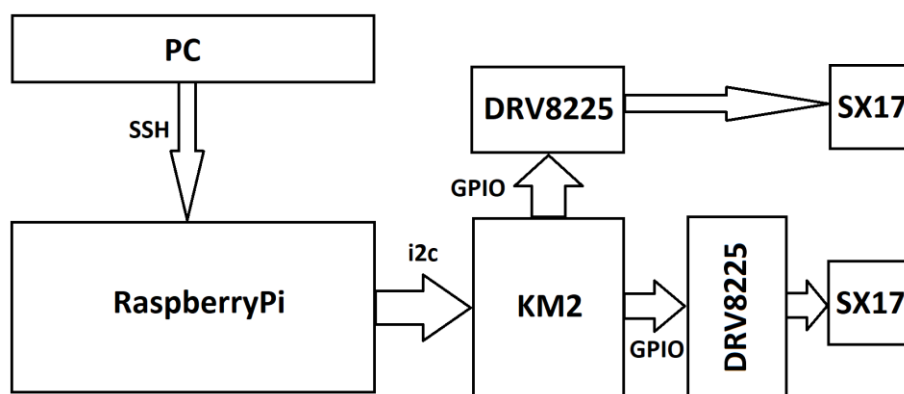
6.3.5 PC vstup

Pre simulovanie vstupných parametrov a ovládanie manipulátoru a určovanie polohy terča je použitá PC zostava (notebook).

7 RIADIACI SYSTÉM

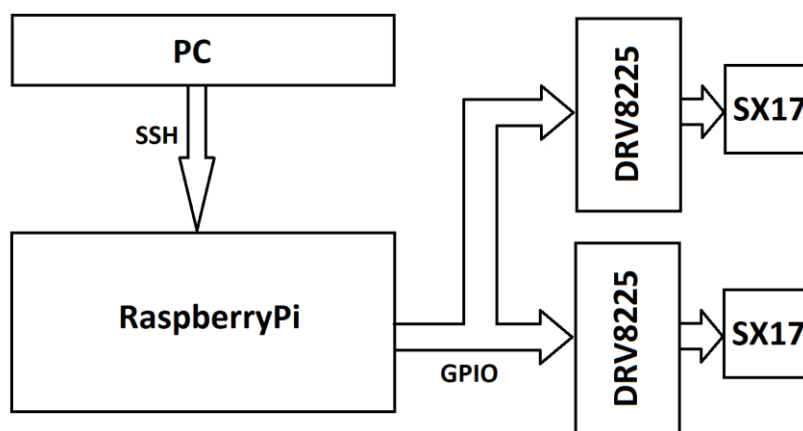
7.1 Popis zapojenia

Riadiaci systém sa skladá z raspberry ako hlavnej riadiacej jednotky. Z externého počítača prijíma raspberry vstupné informácie o polohe terča, ovládanie manipulátoru a zobrazovanie priebehu pohybu. Raspberry potom pomocou linky i2c ovláda modul KM2. Tento modul na základe príkazov z raspberry ďalej ovláda cez GPIO výstupy dva drivery DRV8225 pre krokové motory SX17-1005QCEF, ako je znázornené na obrázku 20.



Obrázok 20 Navrhované schematické zapojenie

Pri praktickom zapájaní som ale dospel k rozhodnutiu, že modul KM2 s procesorom ATmega88PA, ktorý bol pôvodne navrhnutý pre ovládanie motorov v rýchlostnom režime, je nadbytočný z dôvodu malých rýchlostí motorov. Pre polohovanie manipulátoru sú dostatočné drivery DRV8825, ktoré je možné priamo ovládať GPIO výstupmi raspberry a tým zjednodušiť zapojenie. Výsledné zapojenie je teda znázornené na nasledujúcom obrázku 21.



Obrázok 21 Schematické zapojenie riadiaceho systému

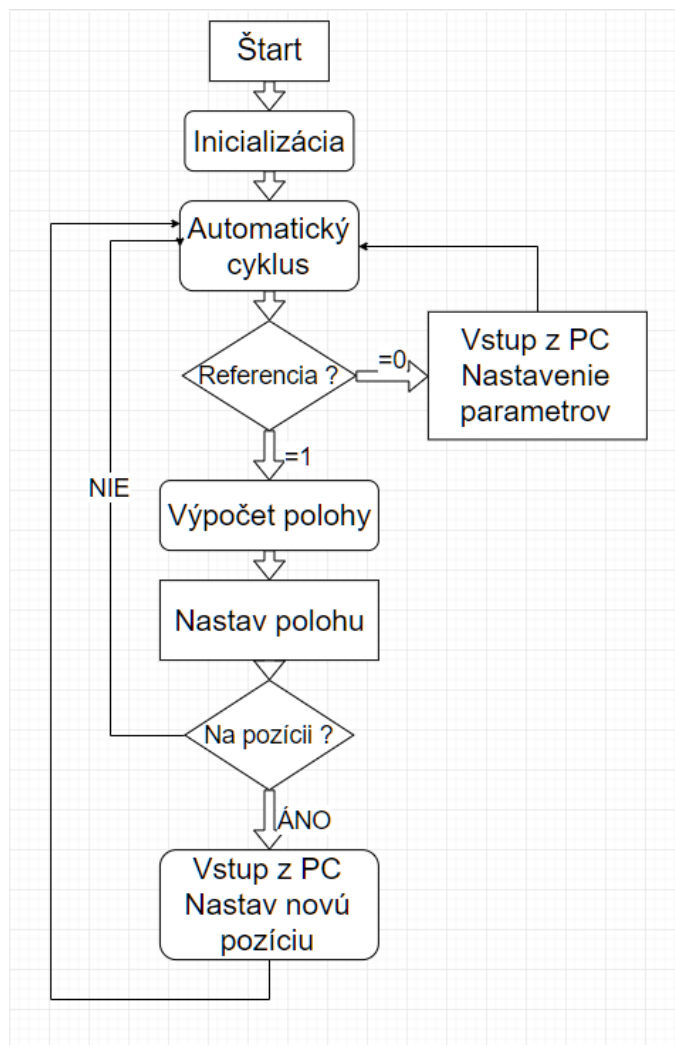
Výstupy GPIO portu z raspberry sú prepojené na oba drivery podľa obrázku 20. Pre ovládanie sú použité piny nENBL, STEP a DIR driverov DRV8825. Piny MODE 0-2 sú pripojené trvale na napätie +3,3 V, ktoré je potrebné pre nastavenie driverov na mikrokrokovanie o veľkosti 32 μ -krokov. Na výstupy driverov DRV8825 sú priamo pripojené krokové motory SX17-1005QCEF. Napájacie napätie +12 V pre drivery je tvorené Li-ion batériou s kapacitou 1300 mAh. Raspberry je napájané z USB portu počítača napätím +5 V. Raspberry komunikuje s počítačom pomocou ethernetového prepojenia prostredníctvom SSH protokolu.

7.2 Popis ovládania

Pri zapnutí systému prebehne vnútorná inicializácia parametrov programu. Po inicializácii parametrov program vstúpi do automatického režimu. V prvom kroku sa kontroluje nastavenie referencie systému. Pokiaľ nie je referencia nastavená, systém vypíše na konzolu informáciu a očakáva vstup z PC. Pri nastavovaní referencie je možné nastaviť vzdialenosť zbrane od terča. Ďalej je nutné ručne nasmerovať zbraň na stred terča. Potvrdením sa povolia drivery a tie zamknú motory na aktuálnej pozícii. Následné je možné softwarovo presne upraviť počiatočnú pozíciu. Po úspešnej inicializácii sa pomocou ovládacieho prvku aktivuje hlavný program. Algoritmus pre sledovanie cieľa najskôr vypočíta pozíciu na ktorú sa má dostať a toto číslo prevedie na potrebný počet mikrokrokov na vykonanie pohybu. Následne vyšle príkaz driveru na vykonanie kroku. Pokiaľ funkcia na nastavenia polohy vracia príznak vykonávania pohybu manipulátora na žiadanú pozíciu cyklus sa opakuje. Pokiaľ sa dostal na cieľovú pozíciu, funkcia na nastavenie polohy vracia príznak dokončenia pohybu a program očakáva nový vstup žiadanej pozície z PC. Tento program je znázornený vo vývojovom diagrame na obrázku 22.

7.3 Riadiaci algoritmus - Inicializácia

Inicializácia programu zahŕňa vkladanie štandardných knižníc do programu a inicializovanie premenných použitých v programe. Ďalej sa inicializujú knižnice wiringPi a wiringPisys pre umožnenie pracovania s GPIO portami raspberry. Po úspešnom načítaní knižníc je ďalej nutné nastaviť príslušné piny GPIO. Pre ovládanie driverov DRV8825 je nutné ovládanie troch vstupov. Raspberry teda musí mať nastavené šesť pinov ako výstup. Ako výstupy sú nastavené piny 0-5 podľa knižnice wiringPi. Piny 0 a 1 sú pripojené podľa zapojenia z obrázku 19 ako vstup nENBL, piny 2 a 4 sú pripojené ku vstupu STEP a piny 3 a 5 sú pripojené ako vstupy DIR do driverov DRV8825. Po tomto nasleduje inicializácia logických úrovní. Pre vstupy STEP a DIR sa nastavuje logická úroveň 0 a pre vstupy nENBL na logickú úroveň 1. Týmto sa zabezpečí, že drivery DRV8825 zakážu výstupné napätie na motory.



Obrázok 22 Vývojový diagram programu

7.4 Riadiaci algoritmus - Referencia

Nastavenie referencie sa určuje podľa príznaku „Referencia“. Ak je príznak nastavený na logickú úroveň 1, tak je referencia nastavená a tento blok sa preskakuje. Pokiaľ nie je nastavená na logickú 1 program sa dostane do cyklu pre nastavenie referencie ako bolo znázornené na vývojovom diagrame z obrázku 22. Na konzolu sa vypíše informácia o nutnosti nastaviť referenciu o aktuálnej nastavenej vzdialenosti zbrane od terča. Výstupy GPIO portov pre ovládanie vstupov diverov DRV8825 nENBL sa nastaví na logickú úroveň 1, čím drivery zakážu výstupné napätie motorom a tie sú uvoľnené. Ďalej sa na konzolu vypíše aký vstup očakáva. Zadaním čísla a potvrdením sa nastaví nová vzdialenosť terča od zbrane. Po zadaní novej hodnoty sa znova vypíše na konzolu nastavená vzdialenosť. Príkazom „g“ do konzoly sa povolí napätie na cievkach motoru a teda motory sa zablokujú na aktuálnej polohe nastavením GPIO portov 0 a 1 a teda vstupov nENBL pre drivery na logickú úroveň 0. Program potom pokračuje v sekcii pre softvérové doladenie polohy. Na konzolu sa vypíše oznámenie o softvérovom doladení polohy a očakáva sa vstup dvoch čísel. Tieto čísla predstavujú počet mikrokrokov posunu pre jednotlivé osi X a Y. Po nastavení polohy na súradnice X = 0 a Y

= 0 je nutné potvrdiť referenciu opäť príkazom „g“. Potvrdením sa vynulujú parametre pre meranie odometrie a žiadanej polohy. Výpis na konzole oznámi úspešné nastavenie referencie.

7.5 Riadiaci algoritmus - Výpočet polohy

V prvej časti sa softvérovo obmedzí pracovná oblasť manipulátoru. Vychádza to zo očakávanej pracovnej plochy $\pm 45^\circ$. Z tohoto parametru podľa vzorca (11) teda vyplýva, že žiadaná poloha v absolútnej hodnote pre obe osi X a Y musí byť väčšia ako je vzdialenosť terča od zbrane.

$$\text{artg}\left(\frac{a}{b}\right) < 45^\circ \quad (11)$$

a – žiadaná poloha [m]

b – vzdialenosť terča od zbrane [m]

Ďalej sa prepočítava výsledná posunutá pozícia z počtu vykonaných mikrokrokov. Prepočet reálnej pozície je podľa vzorca (12)

$$R = n_o * \tan(\varphi) * d \text{ [m]} \quad (12)$$

R – reálna vzdialenosť [m]

n_o – počet vykonaných krokov z odometrie [-]

φ – uhlové natočenie zbrane pre jeden mikrokrok [rad]

d – vzdialenosť [m]

Pri tomto prepočítaní sa ale predpokladá, že pomer vzdialenosti a žiadanej hodnoty bude malý aby nedochádzalo ku načítavaniu chyby výpočtu. Následne sa vypočíta cieľová poloha manipulátora podľa vzorca (13):

$$P_c = P_z + P_p \text{ [m]} \quad (13)$$

P_c – Cieľová poloha [m]

P_z – žiadaná poloha [m]

P_p – Predmierenie [m]

Z cieľovej polohy sa následne prepočíta potrebný počet krokov na vykonanie pohybu podľa vzorca (14)

$$n = \frac{P_c}{\tan(\varphi) * d} \text{ [-]} \quad (14)$$

n – počet mikrokrokov [-]

P_c – cieľová poloha [m]

φ – uhlové natočenie zbrane pre jeden mikrokrok [rad]

d – vzdialenosť [m]

7.6 Riadiaci algoritmus - Nastavenie polohy

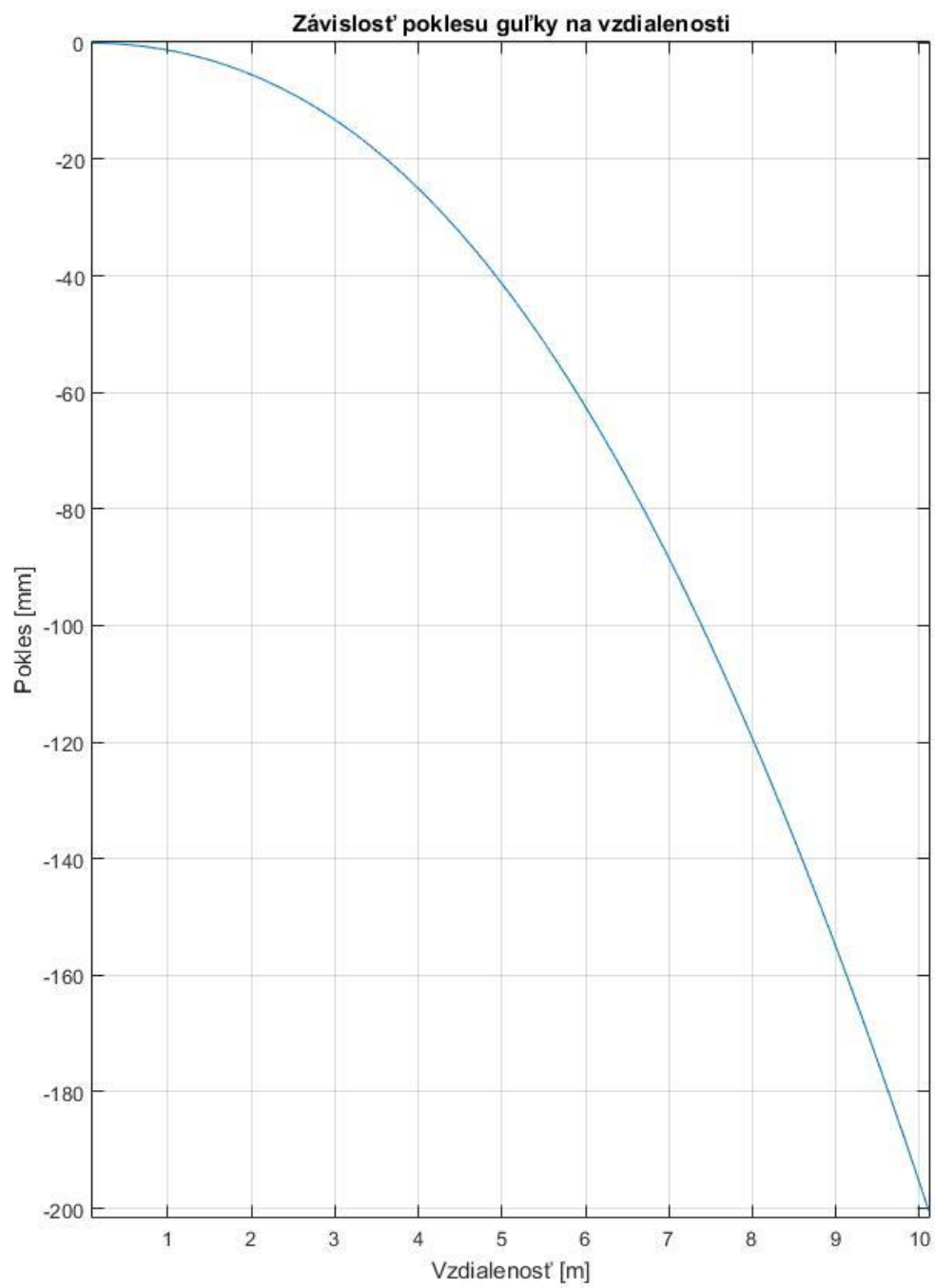
Nastavenie polohy používa funkciu „SetPosition()“ do ktorej sa zadávajú dva parametre. Prvým parametrom je počet mikrokrokov pre os X a druhým parametrom je počet mikrorokov pre os Y. Táto funkcia z rozdielu týchto zadaných parametrov a z odometrie spaví rozdiel a podľa toho určí smer pre jednotlivé motory. Ak sa tento rozdiel nerovná nule funkciou „DoStep()“ vykoná jeden mikrokrok. Funkcia vykonania mikrokroku potrebuje zadať ako prvý parameter povolenie pre prvý motor a druhým parametrom sa nastavuje smer otáčania. Tretí parameter je povolenie druhého motora a štvrtý parameter je smer druhého motora. Funkcia podľa týchto parametrov nastavuje výstupy GPIO 2-5. Vykonaním kroku nastavením vstupom STEP driveru DRV8825 sa pričíta alebo odčíta jeden mikrokrok odometrie v závislosti na smere pohybu. Po vykonaní tejto funkcie sa vlákno pozastaví príkazom „usleep()“, do ktorého sa zadáva premenná *speed*. Táto premenná predstavuje periódu čakania po vykonaní mikrokroku. Jej hodnota sa mení v závislosti na veľkosti rozdielu. Ak je rozdiel veľký hodnota sa dekrementuje a teda motory zrýchľujú a ak je rozdiel menší hodnota sa inkrementuje a teda sa motory spomaľujú. Premenná *speed* je obmedzená na maximálnu a minimálnou hodnotou v intervale (9900 – 400). Funkcia vracia hodnotu 1, ak nastavuje ďalší mikrokrok a hodnotu 0, ak je už očakávaná poloha rovná skutočnej polohe z odometrie.

7.7 Riadiaci algoritmus – Kontrola polohy

Po vykonaní nastavenia polohy sa program rozhoduje, či je ešte potrebné nastaviť pozíciu. Ak funkcia „SetPosition()“ vrátila hodnotu 1 sa cyklus sa opakuje alebo ak funkcia „SetPosition()“ vrátila hodnotu 0 nachádza sa manipulátor na pozícii. Pokiaľ je manipulátor na pozícii tak sa na konzole objaví hláška s nastavenou pozíciou a očakáva sa ďalší vstup. Zadaním dvoch čísel sa nastaví nová žiadaná poloha. Príkazom „c“ sa resetuje referencia teda sa uvoľnia motory a prejde sa na sekvenciu nastavovania referencie. Zadaním príkazu „g“ sa spustí polohovanie na novú polohu.

7.8 Riadiaci algoritmus – Predmierenie

Zistenie polohy dopadu guľky pre danú vzdialenosť sa počíta podľa vzorcov 10 a 11. Výpočet trajektórie pre parametre zbrane je v skripte programu MATLAB ktorý je v prílohe B.4. Výsledná závislosť poklesu guľky je znázornená na obrázku 23. Z grafu je zrejmé že pokles pre malé vzdialenosti je zanedbateľný. Vzhľadom na presnosť zbrane a jej poruchovosť sa nedá overiť tento výpočet a preto v programe nie je použitý.



Obrázok 23 Graf 1 závislosť poklesu guľky

8 VYHODNOTENIE PARAMETROV

8.1 Meranie

Overenie parametrov manipulátora prebiehalo pri podmienkach domáceho prostredia. Skúmané vlastnosti manipulátora bola jeho presnosť a rýchlosť, za ktorú sa dostane manipulátor na polohu. Referencia systému bola nastavená na súradnice X a Y [0;0] mm. Následne sa nastavovali hodnoty žiadanej polohy manipulátora. Pri spustení cyklu polohovania sa do internej pamäte procesora raspberry uložila aktuálna hodnota času. Po dokončení pohybu sa znova zaznamenal čas a ich rozdiel sa zobrazuje na konzole čo určuje čas trvania polohovania. Systém vykonal pohyb na polohu s potrebným počtom krokov. Počet vykonaných krokov je následne prepočítaný na očakávanú polohu podľa vzorca (14) a výsledok sa zobrazí na konzole. Po odmeraní skutočnej dosiahnutej pozície bola zadaná nová žiadaná poloha. V tabuľke 3 sú zaznamenané hodnoty pre nastavenú vzdialenosť terča od zbrane 1,5 m. V tabuľke 4 sú zaznamenané hodnoty pre nastavenú vzdialenosť terča od zbrane 2,7 m. Pre obe nastavené vzdialenosti bolo zmeraných 21 hodnôt. Pre overenie presnosti a rýchlosti jednotlivých motorov je päťica hodnôt žiadanej pozície s konštantnou žiadanou hodnotou $X = 0$ mm a druhá päťica hodnôt $Y = 0$ mm pre obe nastavené vzdialenosti.

Pre namerané hodnoty sú vypočítané absolútne chyby podľa vzorca (15)

$$\Delta_x = \check{Z} - N \text{ [mm]} \quad (15)$$

\check{Z} – žiadaná hodnota [mm]

N – nameraná hodnota [mm]

Rýchlosť manipulátora je určená zmeraním času prejdením celou uhlopriečkou pracovnej oblasti. Čas je meraný procesorom, ako už bolo spomenuté vyššie v texte, z rozdielu času na začiatku pohybu a na konci pohybu.

Voľnosť v prevodoch a uložení systému bola zmeraná pri zablokovanom pohybe motorov. Zmeraním vzdialenosti terča od zbrane a zmeraním posunu v rámci vôle zubov je zmeraný posuv na terči. Následne je zo vzdialenosti vypočítaný uhol pootočenia podľa vzorca (16)

$$\emptyset = \arctg\left(\frac{x}{d}\right) \text{ [rad]} \quad (16)$$

\emptyset – uhol pootočenia [rad]

x – posun na terči [m]

d – vzdialenosť zbrane od terča [m]

8.2 Namerané hodnoty

Tabuľka 3 Namerané hodnoty presnosti zbrane pre vzdialenosť 1,5 m

Mer. číslo	Žiadaná poloha		Očakávaná poloha		Skutočná poloha		Čas polohovania	Absolútna chyba krokovania		Absolútna chyba polohovania	
	X [mm]	Y [mm]	X _o [mm]	Y _o [mm]	X _s [mm]	Y _s [mm]	t [ms]	ΔX _k [mm]	ΔY _k [mm]	ΔX [mm]	ΔY [mm]
1	120,0	60,0	119,5	59,5	112,0	60,0	1543,0	0,5	0,5	8,0	0,0
2	-90,0	42,0	-89,9	41,3	-101,0	41,0	810,0	-0,1	0,7	11,0	1,0
3	-130,0	-80,0	-129,7	-79,8	-128,0	-78,0	1314,0	-0,3	-0,2	-2,0	-2,0
4	60,0	-20,0	59,4	-19,6	54,0	-20,5	1381,0	0,6	-0,4	6,0	0,5
5	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	2,0	772,0	0,0	0,0	-4,0	-2,0
6	8,0	26,0	7,8	25,9	1,0	24,5	376,0	0,2	0,1	7,0	1,5
7	-30,0	-5,0	-29,7	-4,9	-32,0	-3,0	487,0	-0,3	-0,1	2,0	-2,0
8	65,0	-32,0	64,8	-31,5	58,0	-29,0	1225,0	0,2	-0,5	7,0	-3,0
9	-40,0	28,0	-39,8	27,3	-42,0	27,0	1354,0	-0,2	0,7	2,0	1,0
10	21,0	12,0	20,3	11,9	13,0	13,0	782,0	0,7	0,1	8,0	-1,0
11	300,0	0,0	300,0	0,0	298,0	0,0	637,0	0,0	0,0	2,0	0,0
12	600,0	0,0	599,9	0,0	630,0	0,0	624,0	0,1	0,0	-30,0	0,0
13	-800,0	0,0	-799,9	0,0	-840,0	0,0	1533,0	-0,1	0,0	40,0	0,0
14	-650,0	0,0	-649,9	0,0	-675,0	0,0	1127,0	-0,1	0,0	25,0	0,0
15	260,0	0,0	259,3	0,0	258,0	0,0	591,0	0,7	0,0	2,0	0,0
16	0,0	400,0	0,0	399,8	0,0	410,0	758,0	0,0	0,2	0,0	-10,0
17	0,0	683,0	0,0	682,6	0,0	655,0	637,0	0,0	0,4	0,0	28,0
18	0,0	-222,0	0,0	-221,9	0,0	-216,0	581,0	0,0	-0,1	0,0	-6,0
19	0,0	-145,0	0,0	-144,9	0,0	-141,0	840,0	0,0	-0,1	0,0	-4,0
20	0,0	320,0	0,0	319,9	0,0	326,0	818,0	0,0	0,1	0,0	-6,0
21	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	4,0	753,0	0,0	0,0	-1,0	-4,0
Pozn: vzdialenosť terča je 1500 mm, napätie batérie 10,84 V							Priemerný čas Δt [ms]	ΔX _{kMAX} [mm]	ΔY _{kMAX} [mm]	ΔX _{MAX} [mm]	ΔY _{MAX} [mm]
							902,0	0,7	0,7	40,0	28,0

Príklad výpočtu absolútnej chyby krokovania pre prvý riadok tabuľky 3 podľa vzorca (15)

$$\Delta X_K = X - X_O = 120 - 119,5 = 0,5 [mm]$$

$$\Delta Y_K = Y - Y_O = 60 - 59,5 = 0,5 [mm]$$

Príklad výpočtu absolútnej chyby pre prvý riadok tabuľky 3 podľa vzorca (15)

$$\Delta X = X - X_S = 120 - 112 = 8 [mm]$$

$$\Delta Y = Y - Y_S = 60 - 60 = 0 [mm]$$

Príklad výpočtu priemerného času polohovania pre tabuľku 3:

$$\Delta t = \frac{\sum_{n=1}^{21} t_n}{21} = \frac{18943}{21} = 902,0 [ms]$$

Tabuľka 4 Namerané hodnoty presnosti pre vzdialenosť 2,7 m

Mer. číslo	Zadaná poloha		Očakávaná poloha		Skutočná poloha		Čas polohovania	Absolútna chyba krokovania		Absolútna chyba polohovania	
	X [mm]	Y [mm]	X ₀ [mm]	Y ₀ [mm]	X _s [mm]	Y _s [mm]	t [ms]	ΔX [mm]	ΔY [mm]	ΔX [mm]	ΔY [mm]
1	600	0	599	0	607	0	664	1,0	0,0	-7,0	0,0
2	-500	0	-499,1	0	-487	0	881	-0,9	0,0	-13,0	0,0
3	280	0	279,8	0	272	0	734	0,2	0,0	8,0	0,0
4	-333	0	-331,8	0	-318	0	656	-1,2	0,0	-15,0	0,0
5	25	0	23,9	0	18	0	539	1,1	0,0	7,0	0,0
6	0	600	0	599,8	0	635	858	0,0	0,2	0,0	-35,0
7	0	-500	0	-499	0	-477	940	0,0	-1,0	0,0	-23,0
8	0	-135	0	-134,8	0	-133	563	0,0	-0,2	0,0	-2,0
9	0	240	0	239,4	0	239	568	0,0	0,6	0,0	1,0
10	0	428	0	427,2	0	450	557	0,0	0,8	0,0	-22,0
11	0	0	0	0	0	17	608	0,0	0,0	0,0	-17,0
12	450	450	449,9	449,9	447	455	957	0,1	0,1	3,0	-5,0
13	0	0	0	0	19	17	957	0,0	0,0	-19,0	-17,0
14	-120	60	-119,5	59,2	-103	67	863	-0,5	0,8	-17,0	-7,0
15	80	-15	78,7	-13,9	79	-8	568	1,3	-1,1	1,0	-7,0
16	29	36	28,1	35,3	25	40	397	0,9	0,7	4,0	-4,0
17	120	30	119,5	29	113	37	661	0,5	1,0	7,0	-7,0
18	-30	50	-29,5	49,1	-30	53	1040	-0,5	0,9	0,0	-3,0
19	-40	-28	-39,4	-27,7	-39	-23	619	-0,6	-0,3	-1,0	-5,0
20	60	48	59,1	47,9	52	52	711	0,9	0,1	8,0	-4,0
21	0	0	0	0	2	4	427	0,0	0,0	-2,0	-4,0
Pozn: vzdialenosť terča je 2700 mm, napätie batérie 10,6 V							Priemerný čas [ms]	ΔX _{KMAX} [mm]	ΔY _{KMAX} [mm]	ΔX _{MAX} [mm]	ΔY _{MAX} [mm]
							703,2	1,3	-1,1	-19,0	-35,0

Príklad výpočtu absolútnej chyby krokovania pre dvadsiaty riadok tabuľky 4 podľa vzorca (15)

$$\Delta X_K = X - X_O = 60 - 59,1 = 0,9 [mm]$$

$$\Delta Y_K = Y - Y_O = 48 - 47,9 = 0,1 [mm]$$

Príklad výpočtu absolútnej chyby pre prvý riadok tabuľky 4 podľa vzorca (15)

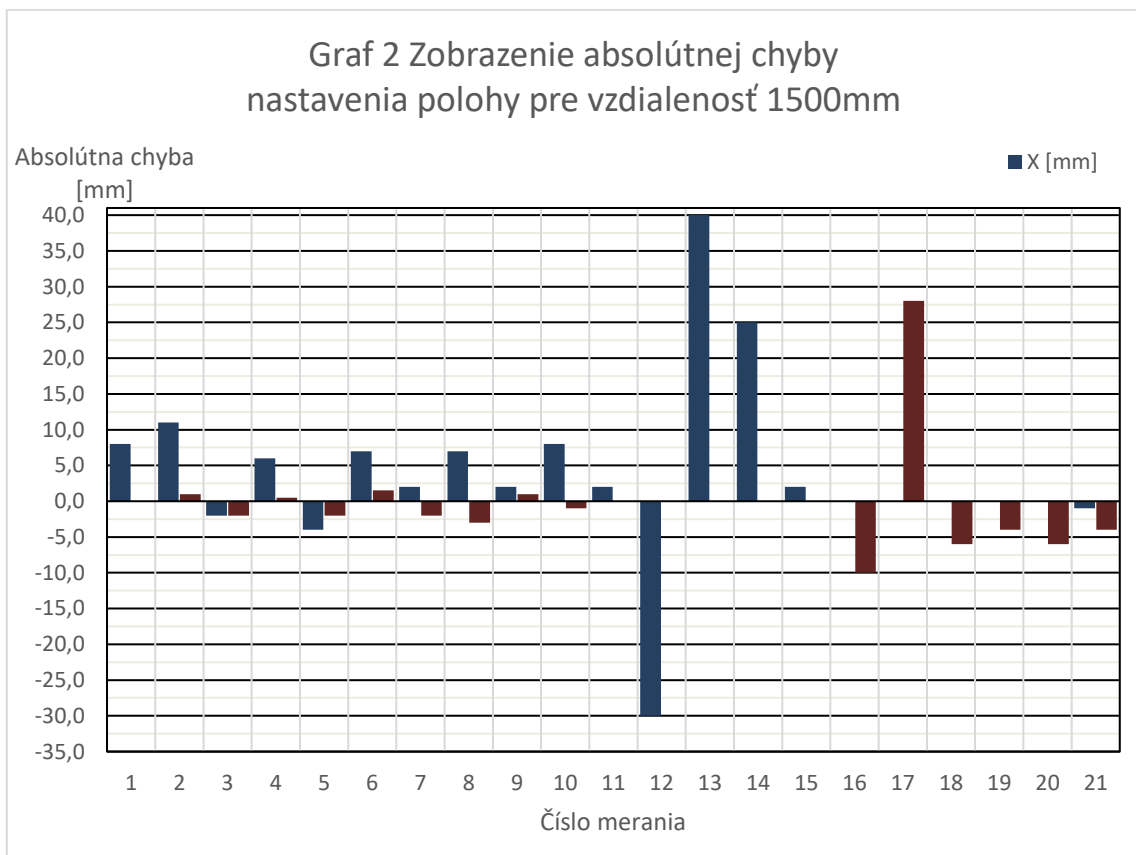
$$\Delta X = X - X_S = 60 - 52 = 8 [mm]$$

$$\Delta Y = Y - Y_S = 48 - 52 = -4 [mm]$$

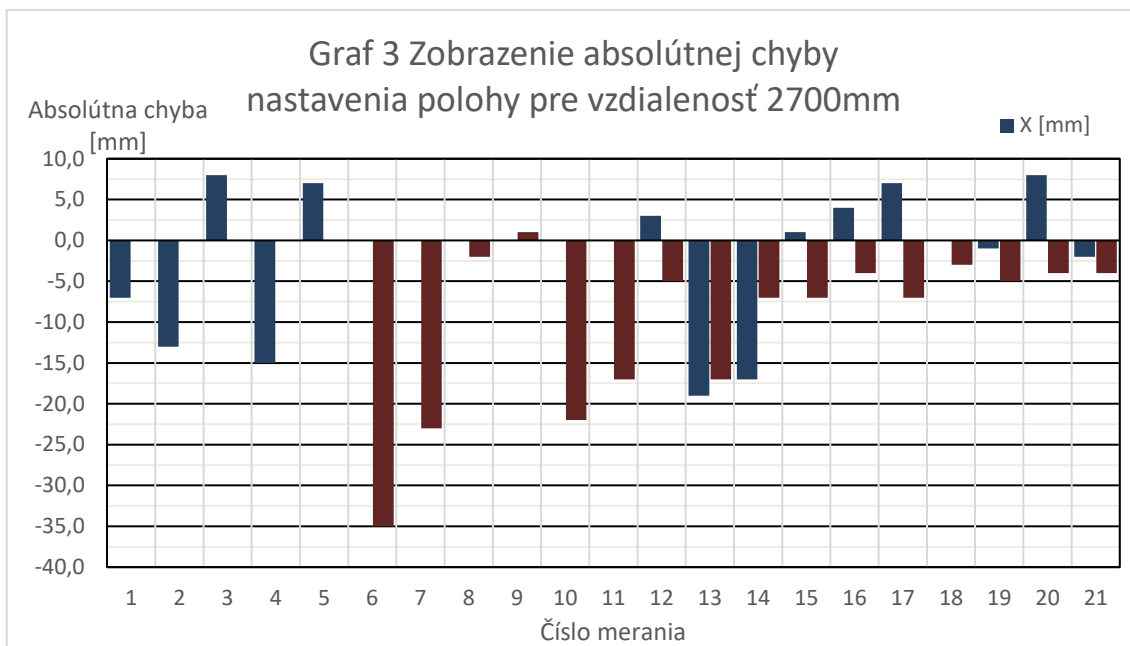
Príklad výpočtu priemerného času polohovania pre tabuľku 3:

$$\Delta t = \frac{\sum_{n=1}^{21} t_n}{21} = \frac{14768}{21} = 703,2 [ms]$$

8.3 Grafické vyhodnotenie



Obrázok 24 Graf absolútnej chyby pre vzdialenosť terča 1,5 m



Obrázok 25 Graf absolútnej chyby pre vzdialenosť terča 2,7m

8.4 Vyhodnotenie

Vypočítané odchýlky sú zobrazené v grafoch na obrázku 23 a obrázku 24. Maximálna hodnota odchýlky pre vzdialenosť terča je 40 mm. Pre vzdialenosť 1,5 m bola očakávaná presnosť $\pm 22,5$ mm a teda manipulátor nesplnil očakávanie presnosti. Z grafu 1 na obrázku 23 sú zrejme veľké odchýlky len pri veľkých žiadaných posunoch nameraných v kroku 12, 13, 14 a 17. Je to spôsobené tým, že systém počíta s konštantnou vzdialenosťou pre jeden mikrokrok a akékoľvek natočenie má ekvidistančné posunutie pri jednom mikrokroku, čo spôsobuje systematickú chybu. Pre menšie žiadané hodnoty sa táto chyba neprejavuje v takej miere a rozptyl nameranej chyby je menší ako ± 11 mm. Táto hodnota rozptylu už splňuje očakávaný cieľ. Systém dosahuje presnosti chyby krokovania $\pm 0,7$ mm.

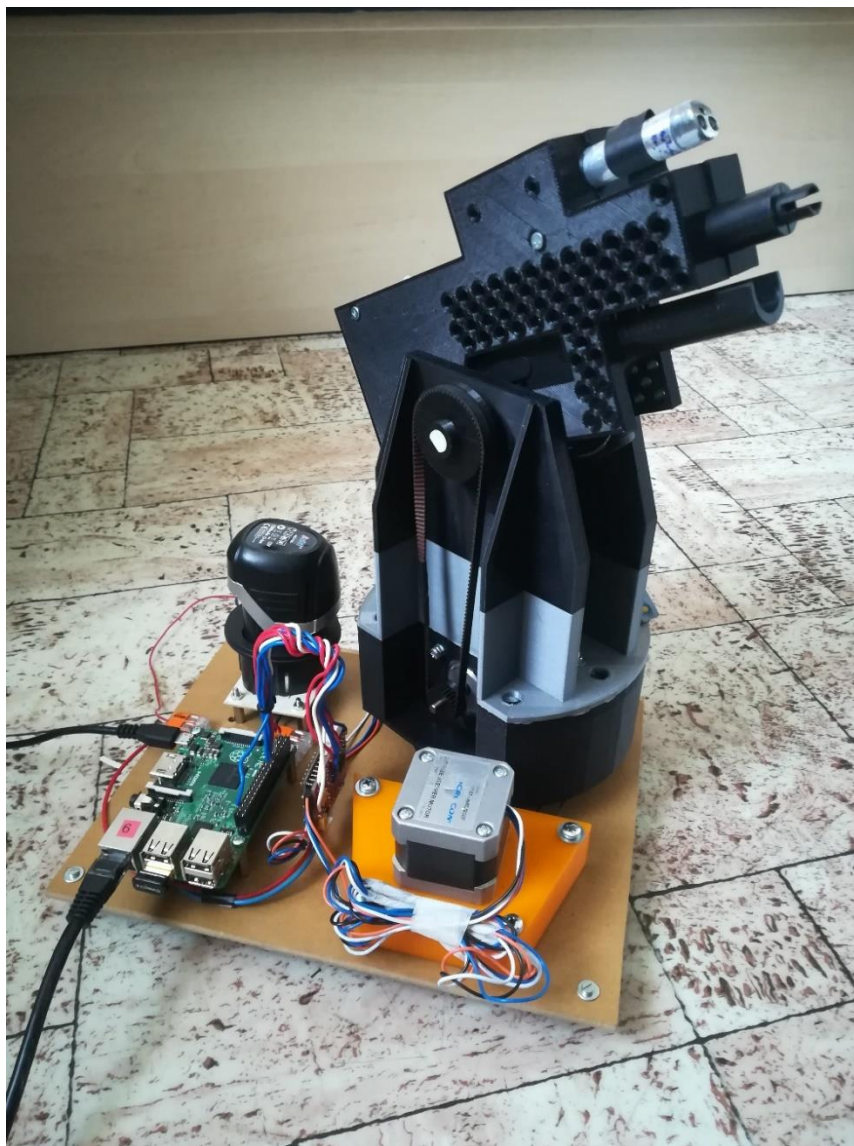
Pri vzdialenosti 2,7 m terča od zbrane je už vplyv systematickej chyby výpočtu menej ovplyvňujúci presnosť a najväčšia hodnota absolútnej chyby je -35 mm. Pre túto vzdialenosť je očakávaná presnosť už $\pm 40,5$ mm. Teda pre tieto uhly je systém dostačujúci.

Rýchlosť systému bola najhoršia pri prvom meraní na vzdialenosť 1,5 m s hodnotou 1543 ms. V priemere však manipulátor nastavil polohu za 902 ms pre vzdialenosť 1,5 m a 703 ms pre vzdialenosť 2,7 m. Tento čas je teda menší ako sa predpokladalo pri návrhu a systém reaguje rýchlejšie ako 3 s. Prechod manipulátora celou uhlopriečkou pracovnej oblasti trvá 3507 ms, čo je väčšia hodnota času aká bola predpokladaná.

Voľnosť v prevodoch bola meraná zo vzdialenosti 500 mm. Posun v ose X bol 10 mm a posun v ose Y 23 mm. Tento posun odpovedá uhlovému natočeniu $19,99 \cdot 10^{-3}$ [rad] a pre vertikálnu os a $45,968 \cdot 10^{-3}$ [rad] pre horizontálnu os podľa prepočtu zo vzorca (16)

9 ZÁVER

Vybraná kinematická koncepcia je pre daný model funkčná. Spätný ráz zbrane nie je dostatočne veľký aby spôsobil pootočenie okolo horizontálnej osy a tým stratu kroku motorov. Pri použití zbrane s väčším spätným rázom je nutné upraviť konštrukciu tak, aby tento spätný ráz utlmila a neprenášala na os otáčania. Samotná zbraň sa ale zasekáva a plastové projektily uviaznu vo vnútri hlavne. Preto je potrebné ju neustále čistiť a používať len nové projektily pre strelbu. Použitá zbraň sa dopúšťa veľkých nepresností pri zásahu cieľa a nedá sa podľa dopadu striel určiť presnosť manipulatoru. Preto bola vyhodnotená presnosť manipulatoru podľa laserového lúča, ktorý reprezentuje os hlavne zbrane s miernym ofsetom 34 mm vo vertikálnom smere. Vyhotovený model manipulatoru podľa navrhnutého modelu je skompletizovaný a znázornený na obrázku 26.



Obrázok 26 Vyhotovený model manipulatoru

3D tlač, pri vyhotovovaní jednotlivých dielov, spôsobila nepresnosti vďaka obmedzeným možnostiam tlače. Výrobky sa pri nesúmernom chladnutí materiálu mierne deformovali. Tieto deformácie spôsobili dva hlavné problémy. Prvý problém vznikol pri úchytoch zbrane. Tieto úchyty nie sú symetrické a preto sa uchytenie zbrane jemne vychýľuje od vertikálnej osy. Táto výchylka spôsobuje, že sa úchyt dotýka steny uloženia a vzniká tak malé trenie. Toto trenie vo výsledku zvyšuje potrebnú silu na pohyb okolo horizontálnej osy. Druhý problém vznikol pri tlači ozubených kolies. Vzhľadom na malé rozmery osky motorov a malé rozmery ozubenia prevodov je tlač na hraničných hodnotách vyhotoviteľnosti. Následne spomínané nepresnosti spôsobili malú voľnosť v prevodoch. Prilepením ozubených kolies na osy motora sa jedna z nepresností odstránila a výsledná nepresnosť vo voľnosti prevodov tvorí hysterézu posunu približne 20 mm na 1m. Pre odstránenie týchto problémov navrhujem upraviť model, tak aby mal väčšiu toleranciu a tým väčšie medzery. Tiež by bolo vhodnejšie prevodové diely nevyhotoviť 3D tlačou ale obrábaním materiálu alebo inou presnejšou metódou výroby.

Vybrané pohony pre tento manipulátor sú podľa očakávania dostačujúce. Pri pohybe nedochádza ku strate krokov a teda je možné očakávať výslednú pozíciu. Prídržný moment krokových motorov je dostačujúci na udržanie manipulátoru na pozícii. Pre dosiahnutie lepších parametrov presnosti je však nutné použiť prevod s vyšším pomerom. To však vedie na zvýšenie rýchlosti systému. Ďalším možným zlepšením je použitie väčších krokových motorov s väčším počtom vinutí, čím by na jednu otáčku pripadalo viacej krokov a krokovanie by bolo jemnejšie. Pre návrh veľkých manipulátorov pre zbrane s veľkým kalibrom sú ale krokové motory nedostačujúce a je nutné ich nahradiť výkonnejšími motormi, napríklad asynchrónnymi motormi. Zapojenie s asynchrónnymi motormi nutne vyžaduje snímač polohy pre spätnú väzbu a najvhodnejšie by bolo použitie optického enkodéru.

Pôvodný navrhovaný riadiaci systém s použitím KM2 modulu na ovládanie motorov sa ukázal zbytočný pre dané použitie. Komunikácia s modulom po linke i2c zbytočne komplikovala ovládanie a drivery DRV8825 je možné priamo ovládať výstupmi GPIO portov raspberry. Výpočtový výkon raspberry je pre túto aplikáciu dostačujúci. Ako vylepšenie však navrhujem použitie snímača polohy pre overenie reálnej polohy a plnohodnotnej spätno-väzobnej regulácii. Riadiaci program pre navrhnutý systém umožňuje ovládanie oboch krokových motorov. Navrhnutá metóda ovládania sa však vykazuje nepresnosti. Polohovanie prepočítava žiadanú polohu cez konštantu uhlového natočenia pre jeden mikrokrok, vid'. vzorec (10), čo spôsobuje pri veľkom uhlovom natočení systematickú chybu, ktorá sa s každým mikrokrokom zvyšuje. Presnejší výpočet by mal počítat' uhlové natočenie ako súčin počtu krokov a uhlové natočenie jedného kroku. Keďže ďalej systém nastavuje oba motory súčasne, rýchlosť sa nastavuje najprv pre motor s menšou požadovanou dráhou a až po dosiahnutí tejto dráhy sa nastavuje rýchlosť pre zvyšok dráhy druhého motoru. Toto spôsobuje spomalenie regulácie na výslednú pozíciu. Spomínané spomaľovanie by sa dalo odstrániť napríklad rozdelením ovládania motorov do dvoch vlákien procesoru.

Parametre manipulátoru ako bolo zhodnotené v podkapitole 8.4 vyhodnotenie nedosahujú očakávaných parametrov. Keďže vyhotovený manipulátor má voľnosť v prevodoch a uložení vôľu $19,99 \cdot 10^{-3}$ [rad] a pre vertikálnu os a $45,968 \cdot 10^{-3}$ [rad] pre horizontálnu os a pri prepočte žiadanej polohy na mikrokroky dochádza ku systematickej chybe, nie je manipulátor schopný dosiahnuť presnosť ± 15 mm na jeden meter v celom očakávanom pracovnom priestore. Rýchlosť manipulátoru tiež nesplňuje očakávanie keďže prekonanie vzdialenosti uhlopriečky pracovnej oblasti mu trvá až 3507 ms čo je o 507 ms viac ako sa očakávalo. Avšak pre menšiu pracovnú oblasť $\pm 20^\circ$ dosiahnuté hodnoty splňujú očakávanie. Pre vzdialenosť terča 1,5 m bola presnosť v prepočte na jeden meter menšia ako $\pm 7,3$ mm a pre vzdialenosť 2,7 m bola presnosť v prepočte ± 13 mm na jeden meter. Rýchlosť zacielenia pri týchto hodnotách vzdialenosti od terča neprekročila 1,6 s. V praktickom použití pri zacielení na malý terč vo väčšej vzdialenosti priamo pred vežou by manipulátor dosahoval očakávané parametre. Odstránením nepresnosti výpočtu polohy a zmenšením voľnosti zubov by sa rapídne parametre zlepšili. Presnosť by sa dala zlepšiť už spomínaným použitím prevodu s vyšším prevodovým pomerom.

10 POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] *Obrana* [online]. 2016, (6) [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: https://www.mod.gov.sk/data/disk/casopis/Obrana_06_2016.pdf
- [2] Remote controlled weapon station GLADIUS 12. In: *EVPU* [online]. Nová Dubnica: EVPU, 2012 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <http://www.evpu.sk/english/fire-control-systems-and-control-electronic>
- [3] Turra 30. *Army Guide* [online]. ATEN, 2002 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <http://www.army-guide.com/eng/product4923.html>
- [4] EPVU Turra 30 2. In: *ThinkDefence* [online]. UK, 2018 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <https://www.thinkdefence.co.uk/2015/07/an-8x8-for-less-than-four-hundred-thousand-million-gazillion/epvu-turra-30-2/>
- [5] 57 mm/70 (2.25") SAK Marks 1, 2 and 3: Sweden. *NavWeaps* [online]. Tony DiGiulian, 2018 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: http://www.navweaps.com/Weapons/WNSweden_57-70_mk123.php
- [6] 57MM Naval Gun System. In: *BAE Systems* [online]. UK: BAE Systems, 2018 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <https://www.baesystems.com/en-us/product/57mm-naval-gun-system>
- [7] 20 mm Phalanx *Close-in Weapon System (CIWS)*. *NavWeaps* [online]. Tony DiGiulian, 2018 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: http://www.navweaps.com/Weapons/WNUS_Phalanx.php
- [8] MARRA, William a Sonia MCNEIL. *Understanding 'The Loop': Regulating the Next Generation of War Machines* [online]. Harvard Law School: bepress, 2012 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: https://works.bepress.com/william_marra/2/
- [9] CHEN, Tsung-Chien a Yung-Lung LEE. *Tactical Requirements Enforcing Ability Analysis of Different Weapon Manipulators for Military Unmanned Ground Vehicles* [online]. 5. Taiwan: Chung-Cheng Institute of Technology National Defense University, 2008 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <https://search.proquest.com/openview/e9c0363a2dcc46c19570ec694970640b/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2028808>
- [10] ŠOLC, František a Luděk ŽALUD. *Robotika* [online]. 1.11.2006. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2006 [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=24441
- [11] Robotic turret. In: *Cal Poly* [online]. San Luis Obispo, 2011 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1110&context=mesp>
- [12] IMRE, Michal. ELEKTROMOTORY. IMRE [online]. Koprivnica: IMRE, 2012 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <https://www.michal-imre.sk/news/druhy-elektromotorov/>

- [13] HRABOVCOVÁ, Valéria, Ladislav JANOUŠEK, Pavol RAFAJDUS a Miroslav LIČKO. Moderné elektrické stroje. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2001. ISBN 80-7100-809-5.
- [14] PEŇÁZ, Václav. Strojní soustavy oboru *Hydraulické mechanismy*. 1. vyd. Praha: Mezinárodní organizace novinářů, 1991. ISBN 80-214-0238-5.
- [15] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí Obvody*. Praha: ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01500-9.
- [16] RIPKA, Pavel. *Senzory a převodníky*. 2. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-800-1046-968.
- [17] PLANKA, CSc.. Kriminální balistika [online]. Praha: Kriminální ústav, b.r., , 15 [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: file:///C:/Users/ASUS/Downloads/2008-03_-_Planka.pdf
- [18] Balistika.cz [online]. Jan Krčmář, 2007 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: http://www.balistika.cz/vnejsi_theorie.html
- [19] Calculating bullet velocity reduction over time *Reference* <https://www.physicsforums.com/threads/calculating-bullet-velocity-reduction-over-time.652727/> [online]. Physics Forums, 2012 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.physicsforums.com/threads/calculating-bullet-velocity-reduction-over-time.652727/>
- [20] Raspberry Pi 2, Model B. In: *Adafruit [online]*. NYC, 2005 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <https://cdn-shop.adafruit.com/pdfs/raspberrypi2modelb.pdf>
- [21] KROKOVÝ MOTOR NEMA SX17 - 1005LQCEF. In: *MATERIALPRO3D [online]*. Brno: Solidify 3D, s.r.o., 2018 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/nahradni-dily-pro-3d-tiskarny/krokovy-motor-nema-sx17-1005lqcef/?gclid=Cj0KCQjwxN_XBRCFARIsAIufy1YAeGBLvGplPuSFXXAdmsnsaZHDTUF-aa2GNuABj0VRM3wtWiIzb2MaAuvYEALw_wcB
- [22] DRV8825 Stepper Motor Controller IC. In: *Texas Instruments [online]*. USA: Texas Instruments Incorporated, 1995 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8825.pdf>

ZOZNAM SKRATIEK

- M_d - Dynamický moment [Nm]
 J - celkový moment zotrvačnosti [kg/m²]
 ω - uhlová rýchlosť [rad/s]
 m_i - elementárna hmotnosť [kg]
 r_i - vzdialenosť od osi otáčania [m]
 F - celková sila [N]
 F_g - vektor gravitačnej sily [N]
 F_{DF} - vektor odporu vzduchu [N]
 C - koeficient odporu projektilu [-]
 S - prierez projektilu [m²]
 ρ - hustota vzduchu [kg/m³]
 v - rýchlosť projektilu [m/s]
 v_0 - počiatočná rýchlosť guľky [m/s]
 k - koeficient guľky [-]
 m - hmotnosť guľky [kg]
 X_D - dostrelená vzdialenosť [m]
 Y_P - pokles guľky [m]
 α - uhol zbrane od vodorovného smeru [rad]
 t - čas [s]
 g - gravitačné zrýchlenie [m/s]
 a - žiadaná poloha [m]
 b - vzdialenosť terča od zbrane [m]
 R - reálna vzdialenosť [m]
 n_o - počet vykonaných krokov z odometrie [-]
 φ - uhlové natočenie zbrane pre jeden mikrokrok [rad]
 d - vzdialenosť [m]
 P_C - Cieľová poloha [m]
 P_Z - žiadaná poloha [m]
 P_P - Predmierenie [m]
 n - počet mikrokrokov [-]
 P_C - cieľová poloha [m]
 d - vzdialenosť [m]

ZONAM PRÍLOH

A. Výkresová dokumentácia

A.1 Kompletná zostava pohľad spredu

A.2 Kompletná zostava pohľad zľava

A.3 Kompletná zostava pohľad zhora

B. Obsah priloženého CD

B.1 Elektronická forma práce

B.2 Zdrojový kód

B.3 3D model konštrukcie

B.4 Výpočet trajektóre.m

B. OBSAH PRILOŽENÉHO CD

B.1 Elektronická forma práce

B.2 Zdrojový kód

B.3 3D model konštrukcie

B.4 Výpočet trajektórie