



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

NÁVRH A REALIZACE MECHANICKÝCH PRVKŮ ROBOTICKÉ HLAVY

DESIGN AND REALIZATION OF MECHANICAL COMPONENTS OF THE ROBOTIC HEAD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Mikuláš Michal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Spáčil

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Mikuláš Michal
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	Ing. Tomáš Spáčil
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh a realizace mechanických prvků robotické hlavy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je realizace mechanismu s alespoň dvěma stupni volnosti, jehož kinematika bude respektovat možnosti pohybu lidské hlavy. Při výběru pohonů je třeba dbát na vhodné dimenzování výkonu, tak aby byla zaručena plynulost a přirozenost pohybu. Práce je součástí skupinového projektu, kterému by v rámci možností měla být přizpůsobena.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Navrhněte alespoň 2 varianty mechanismu.
- 2) Po konzultaci s vedoucím práce a dalšími členy projektu realizujte jeden vybraný. Vybraný mechanismus musí obsahovat rozhraní pro upevnění modelu hlavy a projekčního zařízení.
- 3) Vyberte vhodný pohon a výkonovou elektroniku pro navržený mechanismus.
- 4) Aplikace inverzní kinematiky realizovaného mechanismu a řízení z Matlab/Simulink prostřednictvím karty MF624.
- 5) Vytvořte vzorovou aplikaci.

Seznam doporučené literatury:

VALÁŠEK, Michael. Mechatronika. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01276-X.

ZÁHLAVA, Vít. Návrh a konstrukce desek plošných spojů. Vyd. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03351-1.

SKALICKÝ, Jiří. Teorie řízení 1. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické, 2002. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2112-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Na začátku této práce je popsán pohyb lidské hlavy a její omezení. Dále jsou popsány 2 mechanismy, kterými lze realizovat platformu buď se 2, nebo se 3 stupni volnosti, která by tento pohyb měla realizovat. Následuje popis sestavení prototypu a jeho řídicí algoritmus. V poslední části jsou návrhy různých možností jak realizovat platformu alespoň se 2 stupni volnosti, které se soustředí na konstrukci platformy a výběr vhodného pohonu. Jedna zvolená varianta je poté realizována.

Summary

In the beginning of this thesis the movement of human head and it's limitations are described afterwards 2 possible mechanisms with either 2 or 3 degrees of freedom which could realize the required movement are described. The following part focuses on the assembly of a prototype and it's control algorithm. The last part describes different ways a platform with at least 2 degrees of freedom could be realized with focus on construction of the platform and adequate propulsion. A chosen variant is then realized.

Klíčová slova

platforma se 3 stupni volnosti, platforma se 2 stupni volnosti, Simulink, robotická hlava

Keywords

platform with 3 degrees of freedom, platform with 2 degrees of freedom, Simulink, robotic head

Bibliografická Citace

MICHAL, M. *Návrh a realizace mechanických prvků robotické hlavy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 38 s., Vedoucí diplomové práce: Ing. Tomáš Spáčil.

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci *Návrh a realizace mechanických prvků robotické hlavy* jsem vytvořil sám pod vedením Ing. Tomáše Spáčilá.

Mikuláš Michal

Brno

.

Děkuji hlavně mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Spáčilovi za jeho vedení při vypracovávání této práce. Dále chci poděkovat všem v laboratoři, kteří mi byli ochotni poradit s různými problémy, na které jsem narazil.

Mikuláš Michal

Obsah

1	Úvod	8
2	Cíle řešení	9
3	Rešerše	10
3.1	Omezení pohybu krční páteře	10
3.2	Způsoby realizace plošiny s více DoF	11
3.2.1	Plošina s dvěma DoF	11
3.2.2	Plošina s třemi DoF	12
4	Postup řešení a výsledky	15
4.1	Zprovoznění prototypu	15
4.1.1	Konstrukce prototypu	15
4.1.2	Výpočty pro řídicí algoritmus prototypu	15
4.1.3	Řídicí algoritmus prototypu	17
4.2	Návrh plošin s více stupni volnosti	21
4.2.1	Plošiny s jedním DoF	21
4.2.2	Plošiny s dvěma DoF	22
4.2.3	Plošiny s třemi DoF	25
4.2.4	Zhodnocení návrhů	26
4.3	Realizace plošiny s třemi DoF CABLE	28
4.3.1	Konstrukce plošiny CABLE	28
4.3.2	Řídicí algoritmus plošiny CABLE	28
4.3.3	Posouzení plošiny CABLE	30
5	Závěr	33
	Seznam zkratk a symbolů	34
	Seznam obrázků	35
	Seznam tabulek	36
	Literatura	37

1 Úvod

Tato práce je jedna ze sedmi bakalářských prací, které se zabývají sestavením robotické hlavy s různými funkcemi (rozdělení práce je v tabulce 1.1). Motivací vytvoření robotické hlavy je zhotovení zajímavé interaktivní robotiky pro reprezentativní účely. Jednou z možností je vystavení konečného výrobku jako exponát na fakultě strojního inženýrství VUT v Brně.

Jméno studenta	<i>Téma a popis činnosti</i>
Gelo Lukáš	<i>Zpracování obrazu: rozpoznání lidského obličeje a jiných částí těla.</i>
Havelka Martin	<i>Zpracování zvukových signálů: zaznamenání zvukového vjemu a následná kalkulace polohy zdroje vjemu.</i>
Hrabina Kuba	<i>Zpracování obrazu: učení algoritmu rozpoznávat předměty pomocí deep-learningu.</i>
Michal Mikuláš	<i>Mechanická část robotické hlavy: konstrukce a rozhýbání prvotního prototypu, následně návrh a realizace vlastní plošiny s dvěma nebo více stupni volnosti.</i>
Ondryáš Adam	<i>Stavový automat a UI: spojení jednotlivých funkcí do jednoho celku a vytvoření uživatelského rozhraní.</i>
Pospíchal Tomáš	<i>Zadní projekce: vizualizace obličejové mimiky užitím zadní projekce.</i>
Voronin Artyom	<i>Zpracování obrazu: rozpoznání objektu (knihy) a následovně přečtení libovolné strany pomocí deep learningu.</i>

Tabulka 1.1: Rozdělení činností jednotlivých členů týmu, pracujících na robotické hlavě

2 Cíle řešení

Požadovaná robotická hlava je určena pro reprezentativní účely. Jmenovitě jako exponát na fakultu strojního inženýrství VUT v Brně. Na základě těchto kritérií můžeme zformulovat hlavní požadavky na konstrukci platformy:

- Minimalizovat potřebu údržby
- Dimenzovat komponenty za účelem snížení finanční náročnosti
- Zohlednit požadavky ostatních kolegů

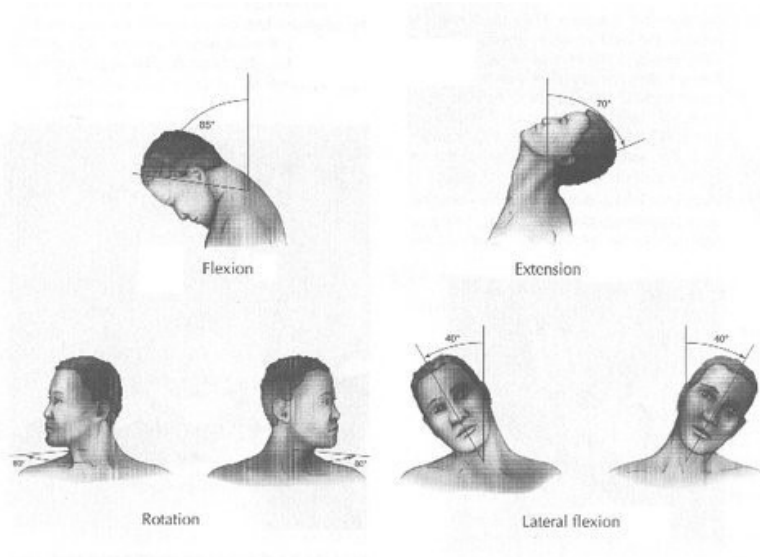
V první fázi je třeba co nejdříve zprovoznit prototyp, aby ostatní spolupracovníci měli funkční platformu, na kterou budou přidělovat a zkoušet své komponenty. Avšak nejdůležitější funkcí je integrace jednotlivých funkcí robotické hlavy již v ranné fázi vývoje.

Po zprovoznění prototypu je potřeba navrhnout několik variant, jak realizovat požadovanou plošinu s dvěma, nebo třemi stupni volnosti (degree of freedom dále jen DoF). Nakonec jednu variantu podle požadavků vybrat a realizovat, což mimo konstrukci samotnou zahrnuje i řídicí algoritmus.

3 Rešerše

3.1 Omezení pohybu krční páteře

Při modelování pohybů lidské hlavy lze intuitivně zahrnout všechny tři translační pohyby v prostoru. Tím pádem zůstávají tři rotační pohyby v prostoru a to rotace (rotation), postranní ohnutí (lateral flexion), ohnutí (flexion) a protažení (extension) (obrázek 3.1).



Obrázek 3.1: Rotační pohyby lidské hlavy (vlevo nahoře: ohnutí, vpravo nahoře: protažení, vlevo dole: rotace, vpravo dole: postranní ohnutí) [7]

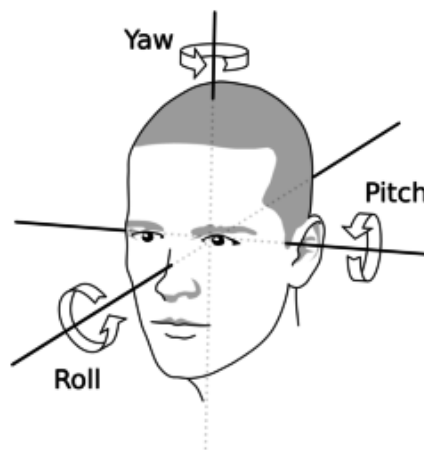
Pro imitování pohybu lidské hlavy je potřeba nejen vymezit způsob pohybu lidské hlavy (viz obrázek 3.1), ale i stanovit její fyziologická omezení, podle kterých se dále budou navrhovat platformy s více DoF. V tabulce 3.1 jsou data z článku [1], kde byl ústavem lékařských rehabilitačních věd změřen průměrný rozsah pohybu krční páteře 233 subjektů ve věku od desíti do osmdesáti let.

Druh pohybu	Rozsah [°]
Rotace doleva	71,81 ± 8,75
Rotace doleva	70,58 ± 5,83
Protažení	68,42 ± 10,30
Ohnutí	66,96 ± 8,62
Postranní ohnutí doleva	54,62 ± 7,13
Postranní ohnutí doprava	52,69 ± 7,32

Tabulka 3.1: Průměrný rozsah pohybu krční páteře

3.2 Způsoby realizace plošiny s více DoF

Pro zjednodušení popisu rotačních pohybů již nebudeme užívat termíny z obrázku 3.1, ale zavedeme jinou terminologii (obrázek 3.2), která se užívá v letectví. Zavedeme tři osy, okolo kterých lze konat rotační pohyb, osu bočení (yaw), osu klopení (pitch) a osu klonění (roll).



Obrázek 3.2: 3 osy rotace: bočení (yaw), klonění (roll) a klopení (pitch) [8]

3.2.1 Plošina s dvěma DoF

Způsob sestavení

Plošinu s dvěma DoF lze realizovat jednoduše, například prostým postavením dvou rotačních aktuátorů na sebe, takto jsou zkonstruovány například plošiny Robot Turrets [?]. První aktuátor koná rotační pohyb okolo osy bočení a druhý aktuátor koná rotační pohyb okolo osy klopení (obrázek 3.3).

Tímto, nebo velmi podobným způsobem lze sestavit velmi robustní plošinu, která může své čelo natočit do libovolného směru. Sice nelze uskutečnit rotační pohyb okolo osy klonění, avšak to není vždy potřebné.



(a) Spojení dvou rotačních aktuátorů [9] (b) Samotný rotační aktuátor [10]

Obrázek 3.3: Plošina s dvěma DoF: ScorpionX MX-64T Robot Turret [5]

Využití v praxi

Na takovém druhu plošin jsou přimontovány například reflektory pro světelné efekty při hudebních, nebo jiných vystoupeních (obrázek 3.4). Další ukázkou využití těchto plošin jsou dálkově ovládané zbraňové stanice (obrázek 3.4).

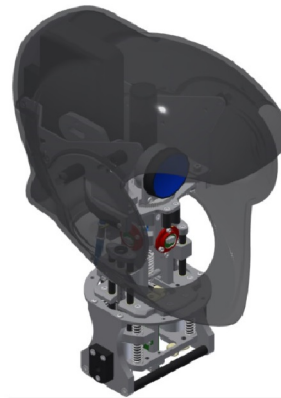
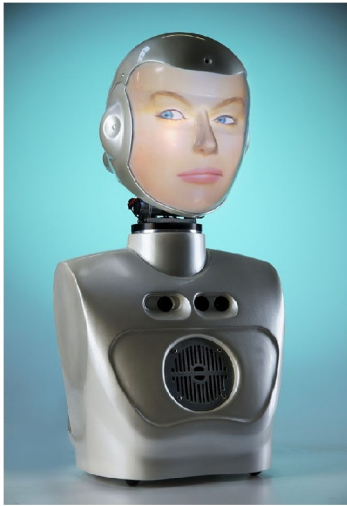


(a) Axcor Wash 600 [11] (b) Dálkově ovládaná zbraňová stanice Samson [12]

Obrázek 3.4: Příklady využití plošin s dvěma DoF v praxi

3.2.2 Plošina s třemi DoF

Konstrukce plošin s třemi DoF je obecně mnohem těžší. Ať už z hlediska sestavení nebo řízení. Z toho důvodu se podíváme na konkrétní příklad, jmenovitě na robotickou hlavu SociBot [6] (obrázek 3.5).

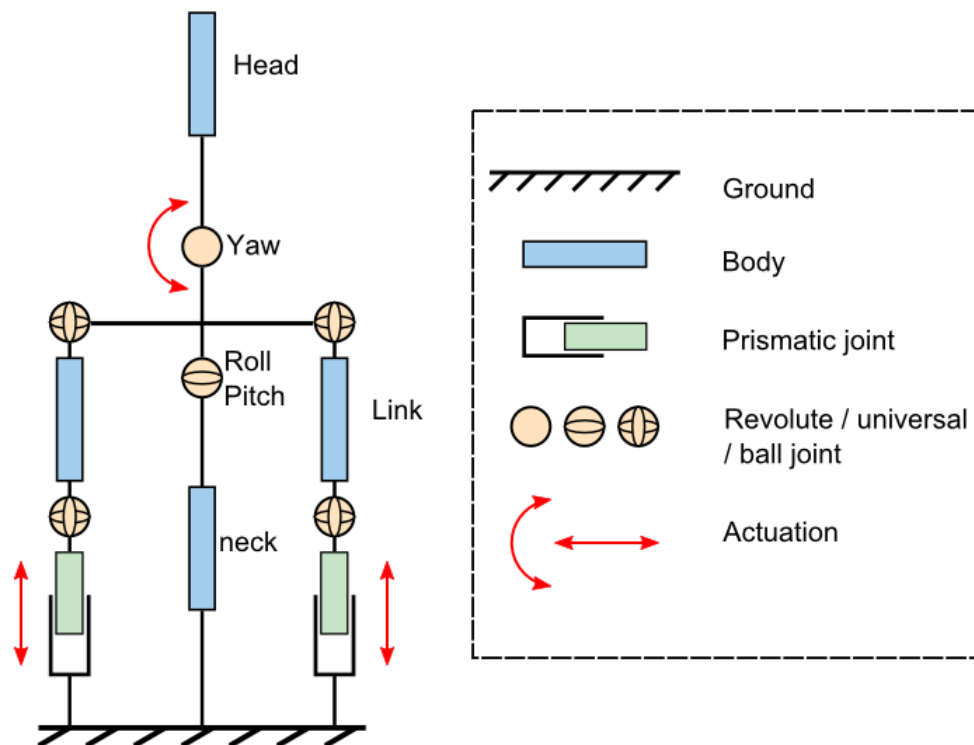


(a) Kompletní SociBotMini [14] (b) Mechanická část robotické hlavy SociBot Mini [15]

Obrázek 3.5: Plošina s třemi DoF: SociBot Mini [6]

Konstrukce plošiny pro SociBota

Schéma sestavení této plošiny lze vidět na obrázku 3.6.



Obrázek 3.6: Kinematické schéma plošiny s třemi DoF robotické hlavy SociBot [13]

Tělo plošiny je upevněno na kardanově čepu, který je upevněn k základně a umožňuje rotační pohyb okolo os klopení a klonění. Tento pohyb je dále realizovaný pomocí lineárních aktuátorů připevněných k základně. K těmto lineárním aktuátorům jsou připevněny tyče ukončené na obou koncích kulovými čepy, které jsou spojeny s tělem plošiny. Změnou proudloužení tyčí se ovládá natočení plošiny.

Pohyb v ose bočení je realizovaný rotačním aktuátorem připojeným k radiálnímu ložisku s vnějším ozubem, které je umístěno opět na těle plošiny.

Pro vymezení vůlí v tomto mechanismu je celý mechanismus předeprnut pomocí pružin k základně.

4 Postup řešení a výsledky

4.1 Zprovoznění prototypu

4.1.1 Konstrukce prototypu

Prvním úkolem bylo brzké vytvoření a rozpořehování funkční varianty plošiny s dvěma DoF. Pro účely modelování pohybu lidské hlavy by byl věrohodnější model s třemi DoF, avšak pro účely tohoto prototypu to není zapotřebí. Pro splnění prvního úkolu jsme dostali k dispozici starý světlomet s vlastním pohonem. Z něj byly odmontovány veškeré nepotřebné komponenty. Zbyla nám plošina složená z dvou radiálních ložisek, dvou krokových motorů a jednoho řemene. Jeden řemen chyběl, a tak pro něj byly změřeny potřebné rozměry a byl dokoupen. Výsledný prototyp lze vidět na obrázku 4.1.

Bohužel ke světlometu nebyla dodána žádná dokumentace a sám světlomet je tak starý, že jsme nedokázali najít žádné informace ani o světlometu, ani o samotných motorech. Jediné informace k motorům, které jsme měli jsou ze štítku motoru (obrázek 4.2). Pro nastavení napájecího napětí jsme si spočítali maximální proud procházející motorem:

$$i_{max} = \frac{U_{stitek}}{R_{stitek}} = \frac{12\text{ V}}{24\ \Omega} = 0,5\text{ A} \quad (4.1)$$

Dále jsme získali volný driver na krokové motory a to HY-TB3DV-S intelligent 3-axis drive board. Využila se ještě deska Humusoft pro komunikaci s počítačem a obsluhu periferií a zdroja napětí.

4.1.2 Výpočty pro řídicí algoritmus prototypu

Vzhledem k práci jednoho z kolegů bylo žádoucí tento algoritmus vytvořit v Matlabu nebo Simulinku. Zvolen byl Simulink. Bylo potřeba, aby se dalo jednoduše udat žádané natočení kolem osy bočení a osy klopení. Z měření jsme zjistili průměry ozubených řemenic na hřídelích motorů $d_{mot} = 11\text{ mm}$ a průměry ložisek s vnějším ozubem $d_{loz} = 45,6\text{ mm}$ (rozměry obou ozubených řemenic i ložisek jsou totožné). S těmito informacemi jsme zjistili převodový poměr našeho prototypu:

$$k_{prot} = \frac{d_{mot}}{d_{loz}} = \frac{11}{45,6} \doteq 0,24 \quad (4.2)$$

Pomocí převodového poměru a informace ze štítku motoru (obrázek 4.2) o velikosti jednoho kroku našich krokových motorů $\varphi_{motStep} = 1,8^\circ$, jsme byli schopni vypočítat minimální natočení celého prototypu v ose bočení nebo klopení při jednom kroku motoru (rovnice 4.3).



Obrázek 4.1: Prototyp konstrukce robotické hlavy pro účely vývoje



Obrázek 4.2: Štítek krokového motoru upevněného na starém světlometu

$$\varphi_{natMin} = \varphi_{motStep} \cdot k_{prot} = 1,8^\circ \cdot 0,24 = 0,432^\circ \quad (4.3)$$

Dále byly určeny rozsahy pohybů v rovinách bočení a klopení (tabulka 4.1). Vzhledem k účelům vytváření prototypu (kapitola 2) nebylo třeba přibližovat se k hodnotám v tabulce 3.1. Hodnota maximálního natočení okolo osy bočení byla určena, aby se dalo jednoduše prakticky zjistit, jestli algoritmus funguje. Hodnota maximálního natočení v ose klopení byla zvolena dle omezení prototypu.

Rotace v ose	Zvolený rozsah [°]	$\varphi_{minKrokProt}$ [°]	Počet poloh [-]	Výsledný rozsah [°]
Bočení	±90	12,96	15	±90,72
Klopení	±40	12,96	7	±38,88

Tabulka 4.1: Rozsah natočení prototypu

Empiricky byl určen minimální počet kroků pro jedno posunutí $N_{min} = 30$ a tím jsme rozdělili pohyb v obou rovinách na pohyb mezi několika polohami (obrázek 4.3) s minimálním krokem $\varphi_{protMin}$ (rovnice 4.4). V případě rotace kolem osy bočení nám vyšel celkový počet kroků N_{boceni} a z toho byl dopočítán počet poloh při rotačním pohybu okolo osy bočení $N_{polohyBoceni}$ (rovnice 4.5 a 4.6). Stejným způsobem byl napočítán celkový počet kroků $N_{klopeni}$ a počet poloh $N_{polohyKlopeni}$ při rotačním pohybu okolo osy klopení (rovnice 4.7 a 4.8).

$$\varphi_{minKrokProt} = N_{Min} \cdot \varphi_{natMin} = 30 \cdot 0,432^\circ = 12,96^\circ \quad (4.4)$$

$$N_{boceni} = \frac{180^\circ}{\varphi_{natmin}} = \frac{180^\circ}{0,432^\circ} \doteq 416,7 \quad (4.5)$$

$$N_{polohyBoceni} = \frac{N_{boceni}}{N_{min}} + 1 = \frac{416,7}{30} + 1 \doteq 14,9 \quad (4.6)$$

$$N_{klopeni} = \frac{80^\circ}{\varphi_{natmin}} = \frac{80^\circ}{0,432^\circ} \doteq 185,2 \quad (4.7)$$

$$N_{polohyKlopeni} = \frac{N_{klopeni}}{N_{min}} + 1 = \frac{185,2}{30} + 1 \doteq 7,2 \quad (4.8)$$

Výsledné rozsahy pohybu našeho prototypu jsou zapsány v tabulce 4.1¹.

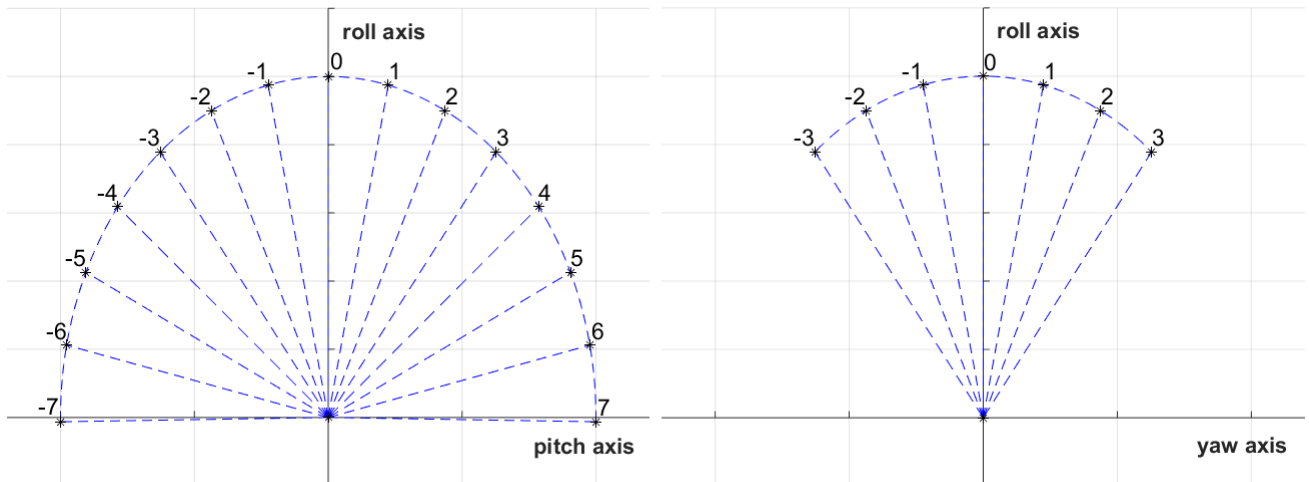
Kvůli neudržovaným ložiskům nebyl vykonán vždy požadovaný počet kroků. S ohledem na to, že se jednalo jen o prototyp s účelem poskytnout možnost integrování jednotlivých funkcí robotické hlavy, se ložiska jen promazala a tento problém jsme více neřešili. Aby výše uvedený algoritmus fungoval, bylo třeba jej začít v předdefinované poloze. Toho bylo docíleno tak, že u obou krokových motorů byly nadefinovány základní polohy (označenou páskou: obrázek 4.4), do které se musel prototyp natočit. Jinak by prototyp mohl narazit na omezení konstrukce.

4.1.3 Řídicí algoritmus prototypu

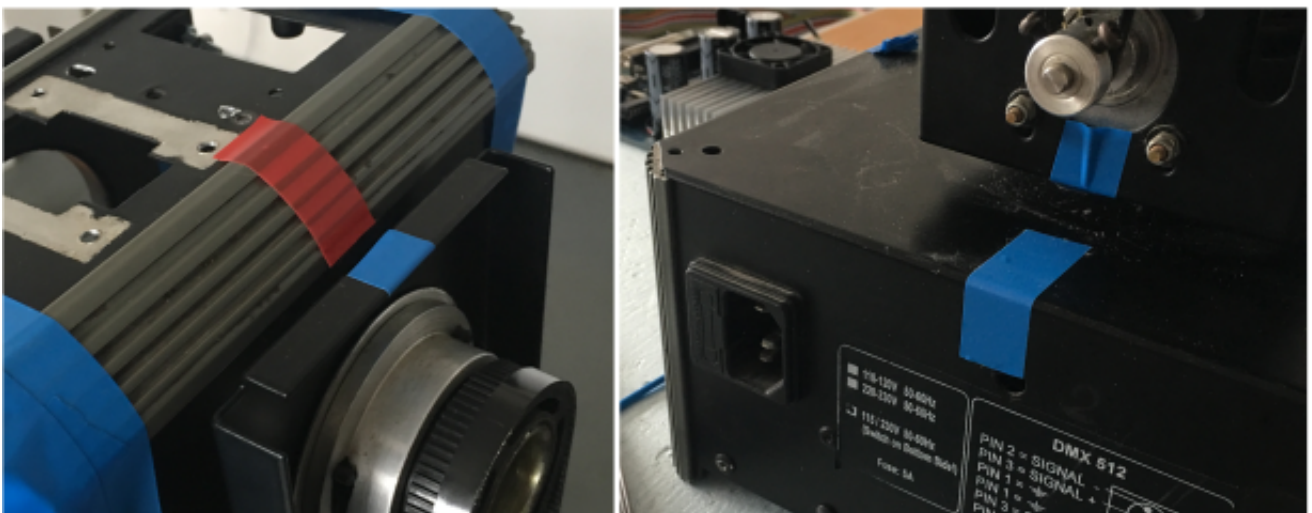
Krokové motory mají tři vstupy a to STEP, ENABLE a DIR. ENABLE určuje, zda-li motory mají být zapnuté, nebo vypnuté. STEP udává, zda-li se motor má otáčet, nebo stát. DIR udává

¹V rovnicích 4.6 a 4.8 je přičítána jednička, aby byla zohledněna úvodní poloha při natočení $\varphi = 0^\circ$.

případný směr otáčení.

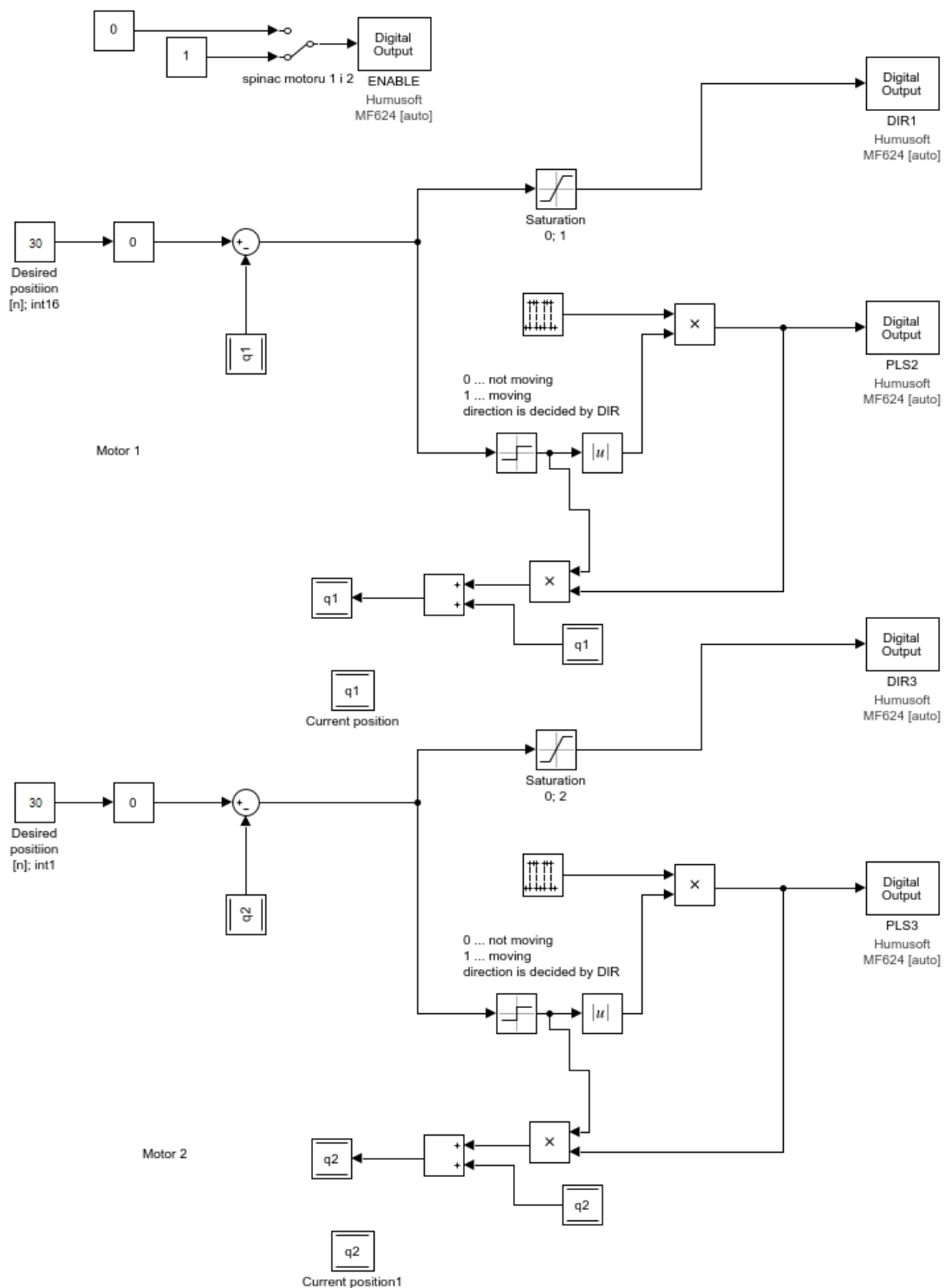


Obrázek 4.3: Rozsah natočení prototypu okolo osy bočení (vlevo) a osy klopení (vpravo)

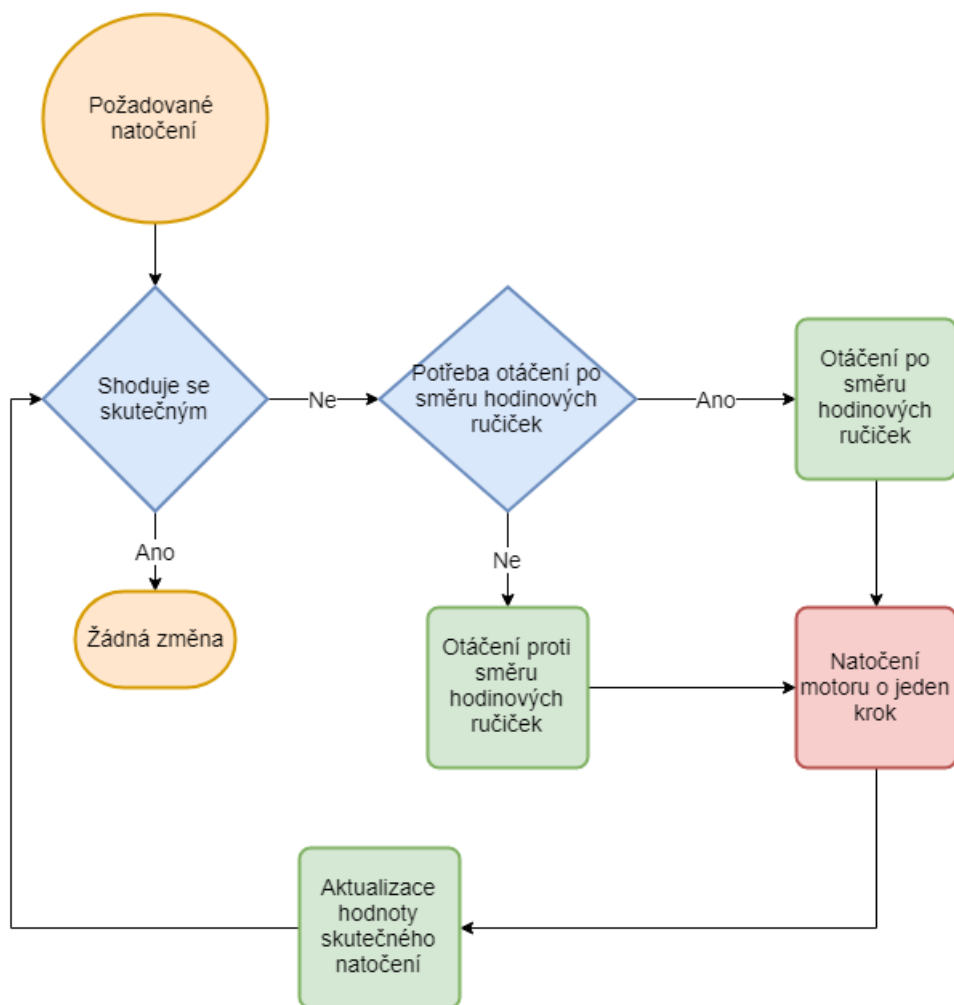


Obrázek 4.4: Základní poloha prototypu

Dále je ukázán řídicí algoritmus obou motorů (obrázek 4.5), které jsou až na různé rozsahy natočení stejné (tabulka 4.1 a obrázek 4.3). Pro přehlednost byl vytvořen flowchart popisující algoritmus při zadání požadovaného natočení (obrázek 4.6).



Obrázek 4.5: Řídicí algoritmus v prostředí SimuLink



Obrázek 4.6: Flowchart řídicího algoritmu prototypu

4.2 Návrh plošin s více stupni volnosti

4.2.1 Plošiny s jedním DoF

Nad problematikou konstrukce plošiny s jedním DoF jsme se také zamýšleli. Ty sice nesplňují naše požadavky, ale lze je využít pro konstrukci plošiny s třemi DoF přimontováním na plošinu s dvěma DoF.

Pro tyto plošiny byla stanovena následující kritéria:

- Cena
- Náročnost sestavení
- Maximální výška
- Umístění projektoru

Cena se týká celé zvažované varianty. Náročnost sestavení zahrnuje problémy po zakoupení komponent, které se budou muset vyřešit. Maximální výška byla zahrnuta do kritérií, neboť se plošina s jedním DoF bude dále připojovat na plošinu s dvěma DoF a bylo žádoucí se vyhnout příliš velké konstrukci. Umístění projektoru zohledňujeme, protože nám byla zdůrazněna potřeba mít projektor uprostřed plošiny.

Radiální ložisko s vnějším ozubem

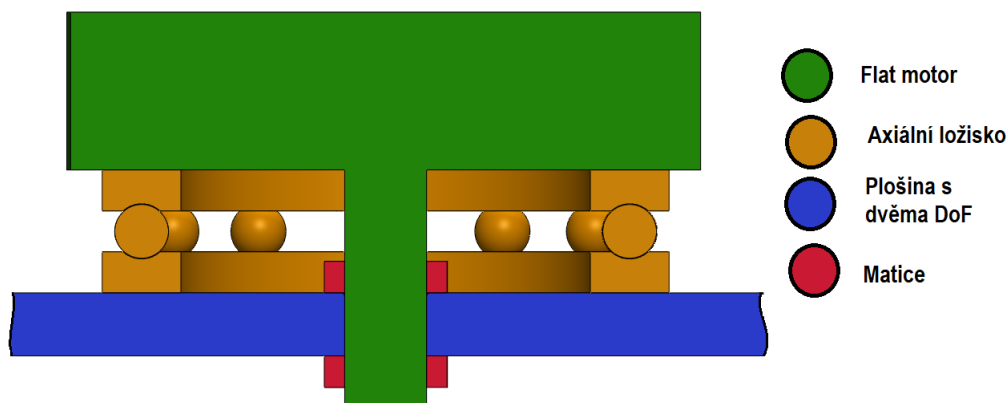
Jednalo by se o radiální ložisko s přidaným vnějším ozubením (ložisko pro otoče), ke kterému by byl připojen rotační aktuátor. Buď přímo ozubením na hřídeli motoru, nebo přes řemen.

Hlavním problémem této varianty bylo ložisko otoče. Součásta by byla příliš drahá a konstrukce vlastní varianty příliš náročná. Celková výška by se odvíjela od výšky aktuátoru. Pro vytvoření dostatku místa pro projektor by bylo potřeba mít dostatek místa nad ložiskem otoče. V případě spojení hřídele motoru s ložiskem otoče pomocí řemene by byl nutný dostatečně velký řemen. Při přímém kontaktu hřídele motoru s ložiskem otoče by bylo potřeba dostatečně velkého ložiska, aby se nad něj mohl umístit projektor.

Flat Motor

Tato varianta byla navržena, aby vyřešila problém s drahým ložiskem otoče. Radiální ložisko bylo v této verzi úplně vynecháno. Motor by se připevnil přímo hřídeli ke zbylé plošině s dvěma DoF. Poté by se z tohoto motoru stala výsledná plošina. Pro minimalizaci celkové výšky této varianty by bylo potřeba použít tzv. flat motor, který má velice malou délku podél osy rotace hřídele. U této varianty by také nebyl problém s místem pro projektor.

Varianta s flat motorem má dva problémy. Prvním je dražší cena flat motoru spojená se specifickou konstrukcí. Druhým problémem je malá zátěžná výdrž v axiálním směru. Což lze kompenzovat například vložením axiálního ložiska mezi motor a plošinu s dvěma DoF (obrázek 4.7, motor by se v tomto případě upevnil k plošině maticemi). Tím by se rozložila síla, která by bez tohoto kompenzačního ložiska jinak působila na motor přes hřídel. Ovšem i to je trochu problematické. Výrobci totiž v dokumentacích často neuvádějí detaily o přední straně např. polohy šroubů nebo povrchovou úpravu. Přitom pro dobré rozložení síly v axiálním směru by bylo potřeba hladkého povrchu po celém obvodu ložiska. Tato varianta má výhodu malé maximální výšky.



Obrázek 4.7: Řez sestavení plošiny s jedním DoF s flat motorem a kompenzačním axiálním ložiskem

base Rotation kit

Řešením je rovněž koupit celou plošinu s jedním DoF. Byla zvažována plošina jménem base Rotation kit (obrázek 4.8). Plošina je tvořena plastovým tělem a rotačním aktuátorem.



Obrázek 4.8: Plošina s jedním stupněm volnosti base Rotatio kit [16]

Finančně vychází tato varianta velmi výhodně. Zakoupením již celého produktu odpadá řešení dodatečných konstrukčních problémů. Stačí plošinu pouze zkompletovat. Nevýhodou je fixní nezanedbatelná výška plošiny.

4.2.2 Plošiny s dvěma DoF

Následující plošiny byly hodnoceny podle těchto kritérií:

- Cena
- Náročnost sestavení
- Omezení pohybu v prostoru

První dvě kritéria byla totožná jako v 4.2.1. Třetím kritériem je myšlen rozsah pohybu mechanismu v prostoru.

První navržená varianta (**plošina s 2DoF „viz prototyp“**) je spíše záložní. Poté je popsán jen jeden další návrh plošiny (**plošina s 2DoF pomocí lineární aktuace**), ale různé způsoby jak realizovat jeho **akční členy** a **potřebné vazby**.

viz prototyp

Tato varianta byla již krátce popsána v 3.2.1. Také byla sestavena a rozpohybována v 4.1. Tato varianta byla dále brána jako záložní.

Finančně i konstrukčně se jedná o jednoduché a elegantní řešení plošiny s dvěma DoF. Další velkou výhodou této plošiny je schopnost natočit se v obou osách rotace o celých 360 stupňů. Důvody, proč jsme se této variantě chtěli vyhnout: Prvním důvodem je chybějící třetí stupeň volnosti a druhým je přílišně strojový druh pohybu.

plošina s 2DoF a lineární aktuace

Plošina byla inspirována realizací v 3.2.2. Podle volby akčních členů se změní stav oproti kinematickému schématu na obrázku 3.6. A to sice volbou rotačního pohonu, nebo uspořádáním akčních členů a vazeb. U všech následujících návrhů plošin s dvěma DoF se nesmí umístit vazby, pomocí kterých se vykonává lineární aktuace, na jednu osu rotace. Tím by sice vznikla plošina s dvěma DoF, ale dokázali bychom řídit jen jeden rotační pohyb.

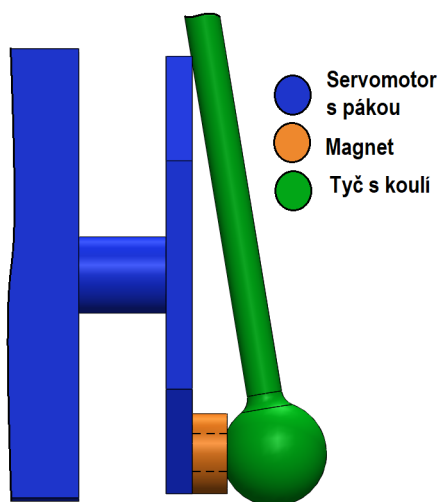
možnosti akčních členů

Jednou z možností je realizovat pohyb pomocí vačky. To by spočívalo v umístění kulového čepu na jeden konec páky (obrázek 4.10) o poloměru r_{paka} umístěné na hřídeli servomotoru. Tím pádem by se nejednalo přímo o lineární pohyb. Pokud by však délka tyče s kulovými čepy na koncích l_{tyc} splňovala podmínku 4.9, šlo by posun do stran zanedbat.

$$l_{tyc} \gg r_{paka} \quad (4.9)$$

$$\Delta l = 2r_{paka} \quad (4.10)$$

Avšak tento předpoklad přináší jisté problémy. Hlavním problémem je, že požadovaný rozsah proudloužení tyče Δl se bude rovnat dvojnásobku délky ramene páky (rovnice 4.10). A pro splnění podmínky 4.9 bude muset celý mechanismus být nezanedbatelně velký. Dalším možným problémem je spodní hraniční poloha této „vačky“ (obrázek 4.9). Při této poloze by se celá plošina naklonila dopředu a tyč s kulovými čepy by mohla narazit na opačnou polovinu páky (v případě křížové páky), nebo na motor (v případě jednoramenné páky).



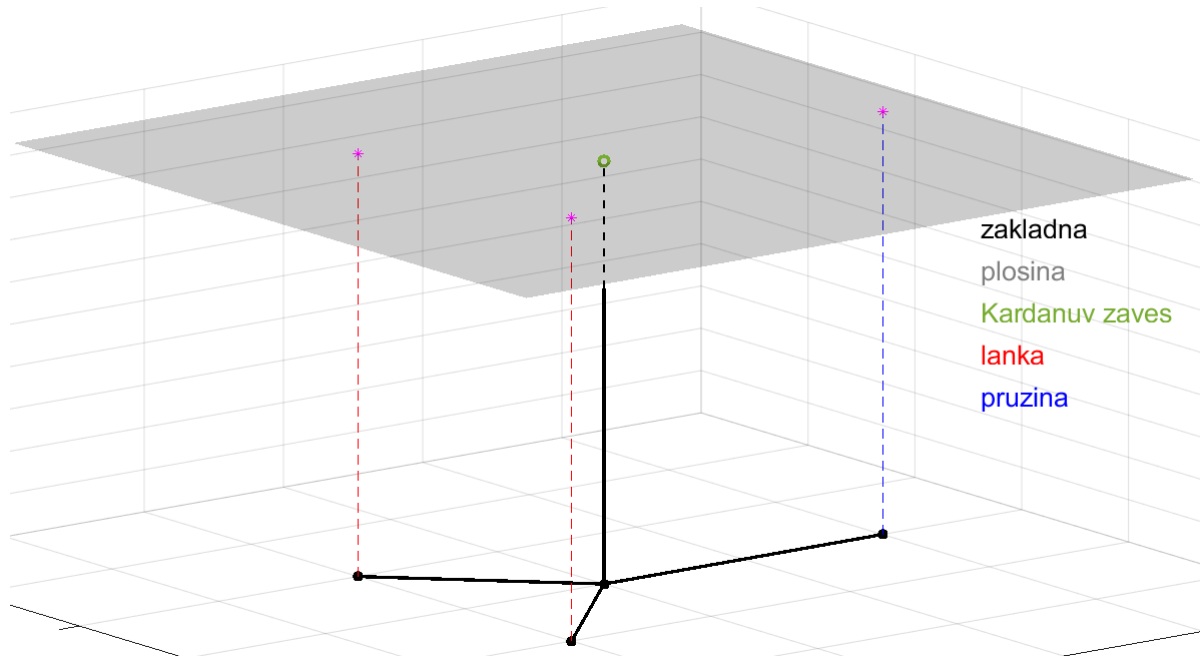
Obrázek 4.9: Možný problém při spodní hraniční poloze vačky



Obrázek 4.10: Příkladová páka na hřídeli servomotoru HS-5945MG

Další z možností, jak realizovat lineární pohyb, je užitím lineárních aktuátorů. Tento druh akčního členu je dražší, avšak eliminuje jak podmínku 4.9, tak i možný problém, na který jsme narazili při zvažování lineárního pohybu pomocí vačky (obrázek 4.9).

Další zvažovanou variantou je použití lanového mechanismu Zjednodušený model je na obrázku 4.11. Plošina by se na jedné straně předepla pomocí pružiny a na straně druhé by se připevnila dvě lanka, která by byla dále navinuta na navijácích připevněných na hřídelích motorů. Tyto lanka by nahrazovala tyče s dvěma kulovými čepy na koncích, které jsou potřebné při obou předešlých variantách. Tento mechanismus nevyžaduje dražší lineární akční členy a dále eliminuje problém s dolní polohou u varianty s vačkou.



Obrázek 4.11: Zjednodušený model plošiny s dvěma DoF s užitím lanového mechanismu

možnosti realizace vazeb

Pro všechny varianty by byla použita jedna vazba, která musí být schopná konat rotační pohyb ve dvou osách. A v případech užití varianty s lineárními akčními členy, nebo varianty s vačkou je potřeba čtyř sférických vazeb umožňujících rotační pohyb okolo všech tří os.

Při volbě vazby umožňující rotační pohyb okolo dvou os byl zvolen kardanův závěs (=univerzální) závěs (obrázek 4.12). Vzhledem k předpokládaným dimenzím naší robotické hlavy by nám postačil velmi malý kardanův závěs. Kardanův závěs by se vybíral podle pohodlnosti usazení, jak k základně, tak k plošině. K plošině by se dále připojily sférické vazby (v případě použití lineárních aktuátorů, nebo vačky), nebo konce lan (pro lanový mechanismus).

Složitější je to s realizací sférické vazby. Sestavení jednoduše realizovatelné a přitom robustní vazby, která by umožňovala dobrý rozsah natočení okolo jednotlivých os je konstrukčně náročné. Rozšířené jsou kulové čepy (obrázek 4.13a). Okolo jedné osy rotace, procházející otvorem, je umožněno natočení o celých třistašedesát stupňů. Okolo zbylých dvou os je rotační pohyb značně omezený a to zhruba $\Delta\varphi = \pm 18^\circ$ od střední polohy.

V našem případě, kdy předpokládáme váhu robotické hlavy do 3 kilogramů, lze uvažovat o vytvoření vlastní varianty sférické vazby. Bylo navrženo využít neodymové magnety, které na své malé rozměry mají velkou odtržnou sílu (dle rozměrů zhruba od $F = 2 \text{ N}$ po $F = 130 \text{ N}$) srovnatelnou s odtržnou silou kulových čepů. Dále lze vybrat z různých tvarů magnetů. Za

nejvhodnější variantu jsme zvolili magnet válcového tvaru s dírou, ke kterému by se připojila kovová koule, nebo polokoule připevněná na tyči (obrázky 4.9, 4.13b). Zajisté by fungovala i varianta s magnetem ve tvaru koule, která by se připojovala k nemagnetickému válci s dírou. Avšak problematictější by bylo připevnit tuto kouli na tyč. Tím pádem byla jako výhodnější varianta vyhodnocena verze magnetického válce s dírou.

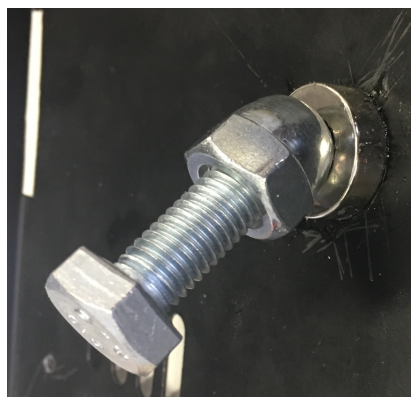


Obrázek 4.12: Kardanův (=univerzální) závěs [17]

Pro naše účely by byla tato magnetická vazba vhodnější než-li kulový čep. a to z důvodu mnohem většího rozsahu natočení. o byla pro tento způsob realizace plošiny s dvěma DoF dále uvažována jen magnetická vazba.



(a) Sférická vazba realizovaná kulovým čepem [18]



(b) Sférická vazba realizovaná pomocí magnetu

Obrázek 4.13: Možné realizace sférické vazby

4.2.3 Plošiny s třemi DoF

plošiny s třemi DoF pomocí superpozice

Plošinu s Třemi DoF lze získat kombinací libovolné plošiny s jedním DoF a s dvěma DoF. Avšak bylo zavrhnuto spojování varianty **viz prototyp**. Přidání dalšího stupně volnosti by bylo mnohem problematictější, než u ostatních zvažovaných plošin s dvěma DoF. Tím pádem nám zbývá devět kombinací jak sestavit plošinu s třemi DoF spojením dvou oddělených plošin. V myšlenkové mapě na obrázku 4.14 jsou vhodné varianty plošin s dvěma DoF od varianty **viz prototyp** barevně odděleny.

lanový mechanismus s třemi DoF

Jako poslední návrh byla zvažována plošina s třemi DoF, která by byla poháněna pouze lanovým mechanismem. Kritéria na tuto plošinu vznikla spojením kritérií na plošiny s jedním DoF 4.2.1 a na plošiny s dvěma DoF 4.2.2:

- Cena
- Náročnost sestavení
- Omezení pohybu v prostoru

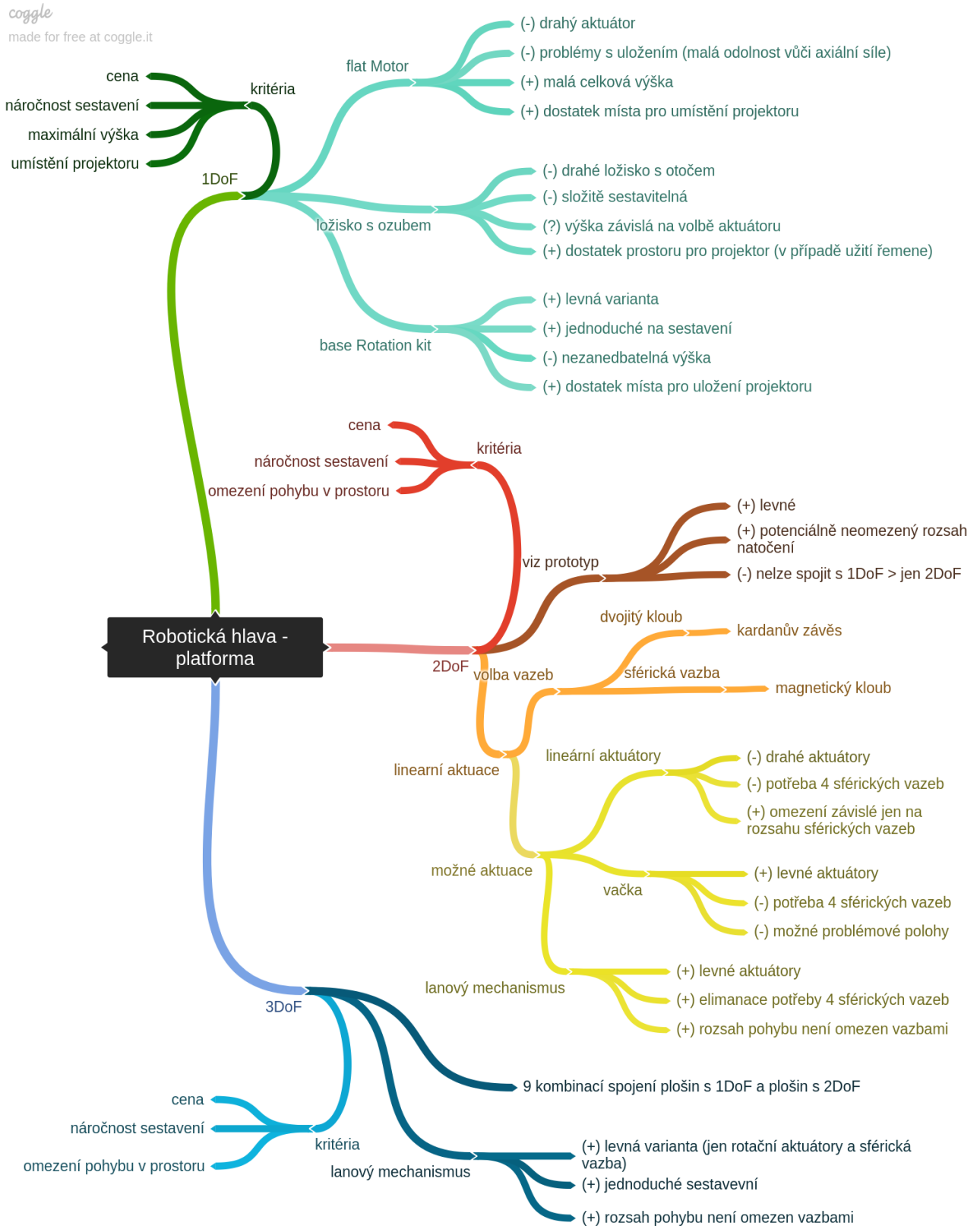
O sestavení plošiny s dvěma DoF pomocí lanového mechanismu jsme již uvažovali v 4.2.2. Tam jsme navrhli variantu, kdy na jedné straně by k plošině byla připojené dvě lanka, která by byla dále navinuta na navijáky připevněné k aktuátorům. Na druhém konci plošiny by byla pak umístěna pružina, která by předepínala celou plošinu a díky tomu kompenzovala neschopnost lanek vytvořit tlak.

Pro získání posledního rotačního stupně volnosti by bylo třeba pozměnit uspořádání. Nahrazením pružiny dalším lankem na navijáku s rotačním aktuátorem bychom získali lepší ovladatelnost plošiny s dvěma DoF. Abychom dosáhli dalšího stupně volnosti bylo by také potřeba u zbylých dvou lanek změnit umístění na plošině. Dřívější svislou rovnoběžnou polohu lan (obrázek 4.11) by bylo třeba nahradit polohou do „kříže“ (obrázek 4.19). Tím pádem by mechanismus byl schopný konat pohyby jako lanový mechanismus s dvěma DoF, ale i rotační pohyb okolo třetí osy.

Užitím lanek bychom eliminovali potřebu použít více pohyblivých vazeb. Lanka by se jednoduše upnula na plošinu, např. by se protáhla dírou a poté by se zajistila šroubem a maticí s podložkou. Náročnější nároky by si ovšem kladla vazba, okolo které má celá plošina rotovat. V případě dvou DoF stačil kardanův závěs (obrázek 4.12), ale ten by bylo potřeba nahradit sférickou vazbou. Pro tuto plošinu by varianta kulového čepu (obrázek 4.13a) byla nevhodná, neboť má příliš omezený rozsah možného natočení okolo dvou ze tří os. Vhodnější by tedy byla sférická vazba realizovaná pomocí magnetu (obrázek 4.13b).

4.2.4 Zhodnocení návrhů

Hodnocení jednotlivých plošin dle stanovených kritérií lze vidět na myšlenkové mapě (obrázek 4.14). Bylo rozhodnuto, že dále se bude realizovat poslední popisovaný návrh mechanismu. Pracovně byl pojmenován CABLE. Tento mechanismus je finančně i konstrukčně velmi přívětivý. Zvláštní položkou jsou navijáky, avšak ty lze dotisknout pomocí 3D tisku. Další zvláštností tohoto mechanismu je neschopnost lanek vyvíjet tlak, tím pádem se motory budou muset neustále přetlačovat.



Obrázek 4.14: Myšlenková mapa uvažovaných možností pro konstrukci platformy

4.3 Realizace plošiny s třemi DoF CABLE

4.3.1 Konstrukce plošiny CABLE

Byly použity servomotory HS-5945MG (obrázek 4.10). Serva mají jen omezený rozsah natočení a to v našem případě bylo necelých 180° . Tím pádem bylo potřeba naviják o velkém průměru, abychom měli k dispozici dostatečně velké protáhnutí lanka.

Pro konstrukci této plošiny byly pořízeny potřebné součástky:

- Šrouby a matice potřebných velikostí
- Podložky k maticím
- Ocelová lanka
- Neodymové magnety
- Klobouková matice
- Ocelová deska

Šrouby a matice byly využity k upevnění lanek k desce, připevnění lanka k navijáku, sestavení základny a jako držák kloboukové matice. Klobouková matice sloužila jako protikus neodýmového magnetu, se kterým tvořila sférickou vazbu. Ocelová deska by poté sloužila jako plošina, na kterou by se umísťovaly zbylé komponenty robotické hlavy.

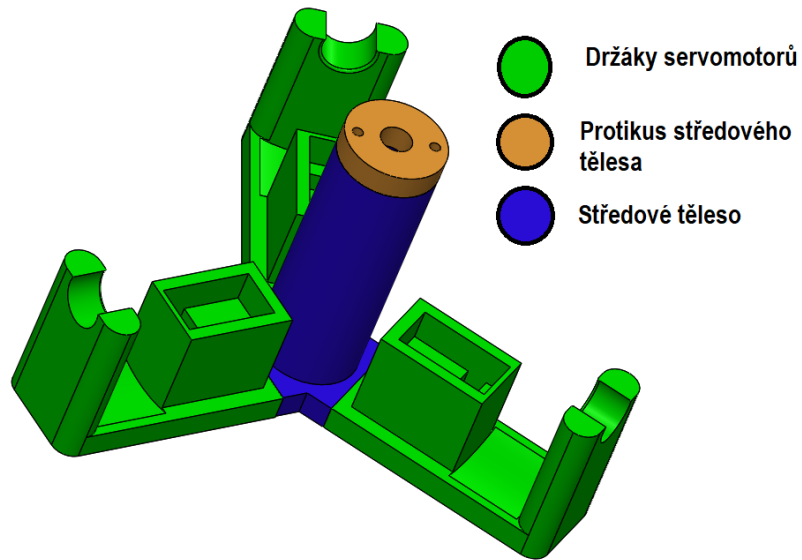
Abychom mohli začít s konstrukcí plošiny, potřebovali jsme základní těleso, ke kterému bychom připevnili jak kloboukovou matici, tak naše servomotory. To jsme si vytiskli na 3D tiskárně. Na obrázku 4.15 je vidět sestava základního tělesa plošiny CABLE. Model složený ze tří součástí: středová část, držáky na servomotory s navijáky a protikus ke středové části. Protikus sloužil k upevnění kloboukové matice. Poslední část, kterou bylo potřeba vytisknout byly navijáky (obrázek 4.16). Navijáky jsme připevnily k servomotorům pomocí přídavné páky (obrázek 4.10). Magnet jsme k plošině upevnili pomocí vteřinového lepidla na předem zdrsněný povrch (obráze 4.13b). Kompletní plošina je na obrázku 4.17.

4.3.2 Řídicí algoritmus plošiny CABLE

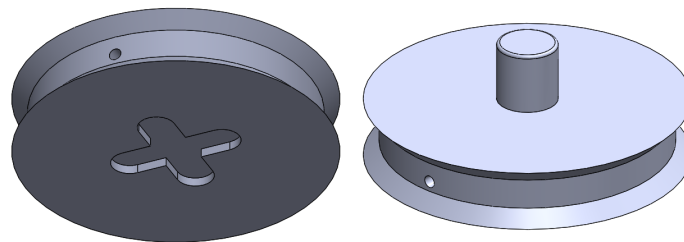
Z servomotorů vedou tři kabely. Jeden se připojil na zdroj napětí, druhý k zemi a třetím se přivedl řídicí PWM signál generovaný pomocí desky Humusoft. Natočení servomotorů se poté řídilo šířkou posílaného PWM signálu. Z datasheetu jsme zjistili, že při frekvenci pulsů $f = 50$ Hz a tím pádem při periodě $T = 20$ ms je šířka řídicích impulsů $T_{min} = 0,9$ ms až $T_{max} = 2,1$ ms. Řídicí algoritmus ze stejných důvodů jako v 4.1.2 jsme vytvářeli v prostředí Simulink (obrázek 4.18). Pro ovládání servomotorů existuje dedikovaný bloček Servo Output. Do něj se zapsala šířka řídicích impulsů a změnou hodnoty v bločku GAIN se posílá požadovaná hodnota natočení navijáků a tím i délka lanka.

Požadovaného natočení plošiny se dosáhne nastavevním potřebných délek lanek. Pro lepší znázornění výpočtů potřebných délek lanek slouží obrázek 4.19. Jednotlivé délky dopočítáme jednoduše jako vzdálenost dvou bodů (rovnice 4.11). Prvními body jsou umístění motorů resp. navijáků (F_m , R_m a L_m). Ty jsou fixně spřaženy se základnou. Druhými body jsou místa upevnění lanek k plošině (F_p , R_p a L_p). V případě vodorovné polohy plošiny je lehce dopočítáme, jen je potřeba mít změřenou vzdálenost upevnění lanek a výšku plošiny od navijáků. Pro

ostatní libovolná natočení lze dopočítat souřadnice jednotlivých bodů na plošině dle rovnice 4.12 pomocí rotačních matic 4.13, 4.14 a 4.15.



Obrázek 4.15: Sestava základního tělesa



Obrázek 4.16: Dva pohledy na model navijáku



Obrázek 4.17: Sestavená plošina CABLE

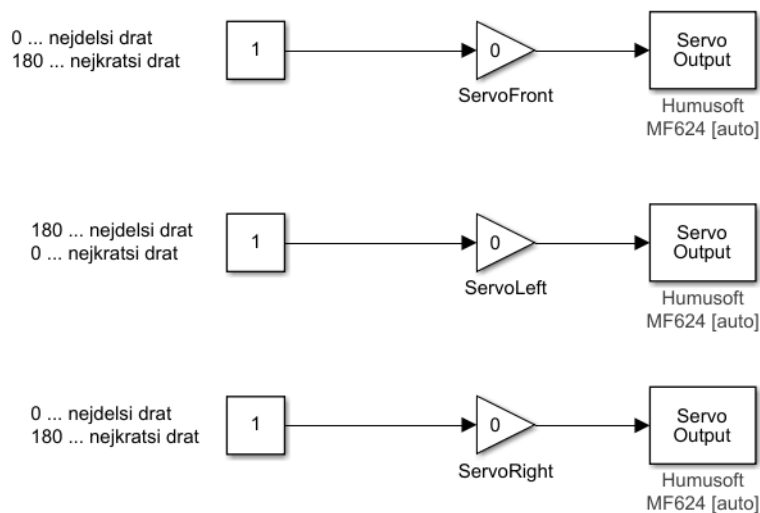
$$|AB| = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2} \quad (4.11)$$

$$A' = \mathbf{R}A \quad (4.12)$$

$$\mathbf{R}_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$\mathbf{R}_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$\mathbf{R}_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$



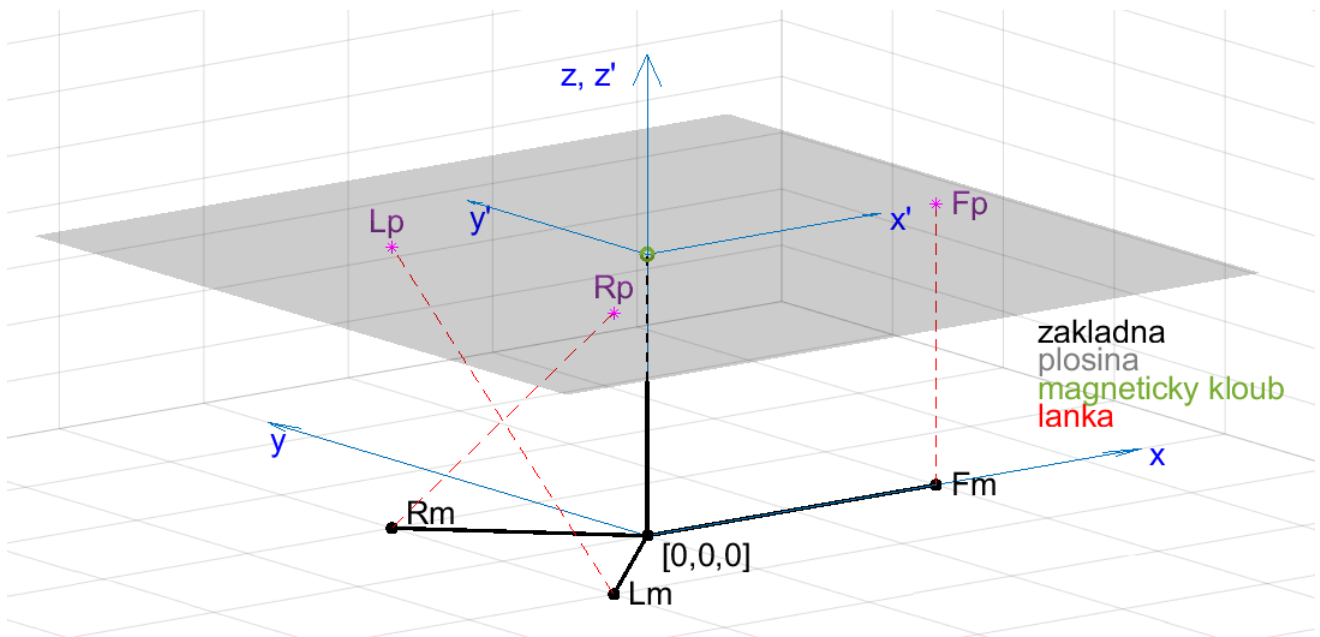
Obrázek 4.18: Řídicí rozhraní v prostředí Simulink

4.3.3 Posouzení plošiny CABLE

Sestavená plošina byla neschopná realizovat žádaný pohyb. Problémy byly dva a to:

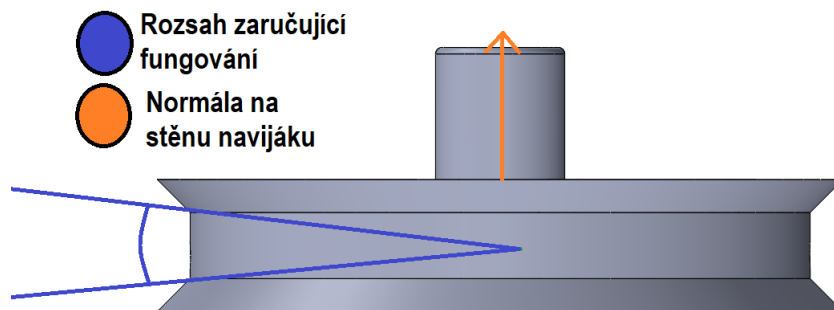
Prvním problémem byla poloha servomotorů (obrázek 4.20). U dvou zadních servomotorů byl problém při uchycení lanek k plošině. Při uchycení pro dostatečné natočení v ose bočení měla lanka tendence sjíždět z navijáků. Tento problém lze kompenzovat změnou umístění lanek, tak aby svíraly lanka skoro pravý úhel s normálami stěn navijáků. Tím by se sice zamezilo zklouzávání lanek z navijáků, ale příliš by se tím omezil rozsah natočení v ose bočení.

Druhým problémem byla nízká výška sestavené plošiny (obrázek 4.21). Při konstrukci této



Obrázek 4.19: Řízení plošiny CABLE pomocí rotační matice

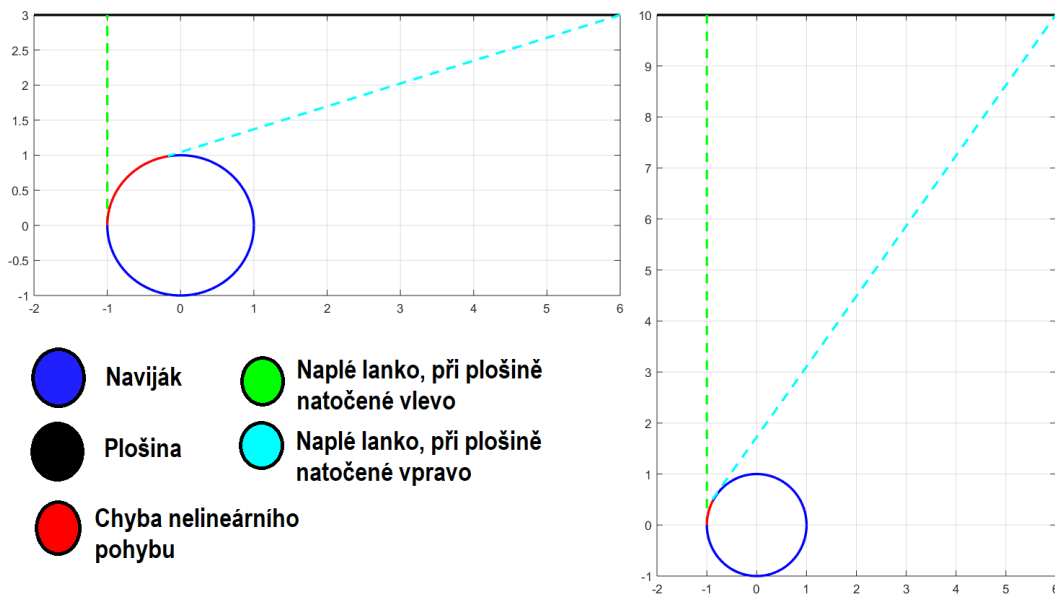
plošiny, jsme přehlédli fakt, že zde musí platit podobná podmínka jako 4.9. Jen v našem případě se nejedná o délku tyče a poloměr páky, ale délku odvinutého lanka od navijáku k plošině a poloměr navijáku. To znamená, že realizovaný pohyb nešel aproximovat jako lineární. Tento problém byl hlavně důsledkem akčního členu v podobě servomotoru, jehož použití jsme kompenzovali navijákem o velkém poloměru.



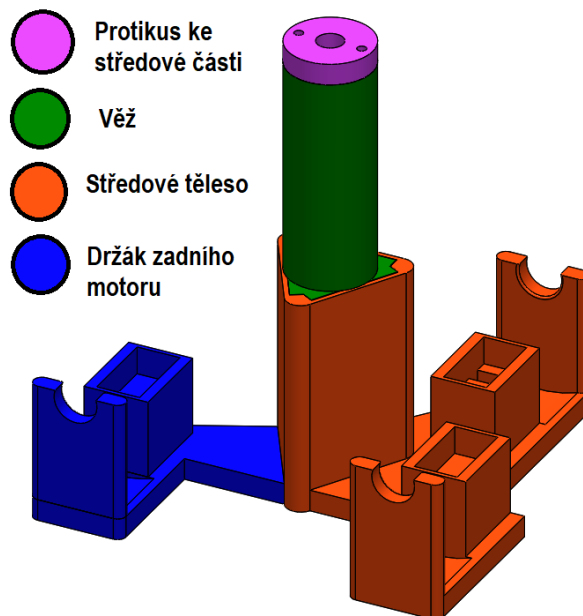
Obrázek 4.20: Znázornění problému sjiždění lanek

Kompensace nedostatků

Dále je popsána kompenzace výše popsaných nedostatků návrhem nové základny pro plošinu. Sestava základna (obrázek 4.22) by se skládala ze čtyř nepohyblivých kusů. Těmi by byly středové těleso, ke kterému by se připojil držák zadního motoru. Na středové těleso by se také umístila věž. K věži by ještě přišel protikus (obrázek 4.15), který by držel kloboukovou matici. Až na protikus jsou tyto díly odděleny, jen kvůli nedostatečně velké tiskové ploše dostupné 3D tiskárny.



Obrázek 4.21: Znázornění problému aproximace lineárního pohybu (vlevo je nízko položená plošina)



Obrázek 4.22: Model sestavy základny pro kompenzovanou verzi plošiny CABLE

5 Závěr

Prvním výstupem této práce bylo zprovoznění prototypu za účelem poskytnout ostatním kolegům možnost spolupracovat již v ranné fázi vývoje robotické hlavy. Z konstrukčního hlediska se jen odebraly nepotřebné komponenty ze starého světlometu a dokoupil se jeden řemen. Dále byl popsán výpočet potřebných veličin pro řídicí algoritmus a samotný řídicí algoritmus. Jedná se o zpětnovazební řízení s předdefinovaným minimálním počtem kroků krokových motorů.

Poté se práce věnuje různými návrhy plošin s dvěma, nebo třemi DoF. Byl popsán i návrh tří plošin s jedním DoF. Ty sice nesplňují naše kritéria, ale z nich se spojením s plošinou s dvěma DoF dá vytvořit plošinu s třemi DoF. U plošin s jedním DoF se vždy jednalo o rotační aktuátor, který musel otáčet svoji plošinu. U plošin s dvěma DoF se rozváděly dva rozdílné způsoby realizace. První kopíroval způsob aktuace jako realizovaný prototyp. Druhý způsob vyžadoval lineární aktuaci. Pro druhou variantu pohybu bylo navrženo několik možností dle volby aktuátorů a realizace vazeb. Plošiny s třemi DoF lze získat výše zmíněným spojením plošiny s jedním a dvěma DoF. Pro tento způsob realizace byla zavržena plošina s dvěma DoF sestavené na bázi prototypu. Kombinací vyšlo devět možných plošin s třemi DoF, které lze takto získat. Dále byla rozvedena varianta plošiny s třemi DoF realizovaná pomocí lanového mechanismu.

Jeden výše popsáný návrh byl realizován. Jednalo se o plošinu s třemi DoF realizovanou pomocí lanového mechanismu „CABLE“. Byla popsána konstrukce této plošiny, což spočívalo v realizaci jedné sférické vazby a návrhu základny a navijáků. Vazba byla realizovaná pomocí neodymového magnetu a základna s navijáky byly vytištěny pomocí 3D tisku. Také byl navržen způsob řízení. Ten spočívá v dopočítání potřebných délek lanek pomocí rotačních matic.

V poslední části byla zhodnocena realizovaná plošina CABLE. Tato plošina měla dva problémy. Prvním problémem bylo špatné natočení zadních dvou servomotorů. To způsobovalo, že lanka z navijáků buď sklouzávala, nebo při změně polohy upnutí lanek sice nesklouzávala, ale rozsah natočení byl příliš omezen. Druhým problémem byla nízká výška plošiny. Kvůli tomu se nemohlo odvíjení a navíjení lanka na naviják aproximovat jako lineární pohyb. Pro kompenzaci těchto problémů byla navržena nová základna, která zohledňuje výše popsané nedostatky.

Seznam zkratek a symbolů

DoF Degree of Freedom

STEP z angličtiny krok

ENABLE z angličtiny povolení

DIR z angličtiny směr

PWM Pulse Width Modulation

DC motor Stejnoseměrný motor

φ Natočení $[rad]$

r Poloměr $[m]$

l Délka $[m]$

F Síla $[N]$

N Počet $[-]$

i Elektrický proud $[A]$

k Převodový poměr $[-]$

Seznam obrázků

3.1	Rotační pohyby lidské hlavy (vlevo nahoře: ohnutí, vpravo nahoře: protažení, vlevo dole: rotace, vpravo dole: postranní ohnutí) [7]	10
3.2	3 osy rotace: bočení (yaw), klonění (roll) a klopení (pitch) [8]	11
3.3	Plošina s dvěma DoF: ScorpionX MX-64T Robot Turret [5]	12
3.4	Příklady využití plošin s dvěma DoF v praxi	12
3.5	Plošina s třemi DoF: SociBot Mini [6]	13
3.6	Kinematické schéma plošiny s třemi DoF robotické hlavy SociBot [13]	13
4.1	Prototyp konstrukce robotické hlavy pro účely vývoje	16
4.2	Štítek krokového motoru upevněného na starém světlometu	16
4.3	Rozsah natočení prototypu okolo osy bočení (vlevo) a osy klopení (vpravo)	18
4.4	Základní poloha prototypu	18
4.5	Řídicí algoritmus v prostředí SimuLink	19
4.6	Flowchart řídicího algoritmu prototypu	20
4.7	Řez sestavení plošiny s jedním DoF s flat motorem a kompenzačním axiálním ložiskem	22
4.8	Plošina s jedním stupněm volnosti base Rotatio kit [16]	22
4.9	Možný problém při spodní hraniční poloze vačky	23
4.10	Přídavná páka na hřídeli servomotoru HS-5945MG	23
4.11	Zjednodušený model plošiny s dvěma DoF s užitím lanového mechanismu	24
4.12	Kardanův (=univerzální) závěs [17]	25
4.13	Možné realizace sférické vazby	25
4.14	Myšlenková mapa uvažovaných možností pro konstrukci platformy	27
4.15	Sestava základního tělesa	29
4.16	Dva pohledy na model navijáku	29
4.17	Sestavená plošina CABLE	29
4.18	Řídicí rozhraní v prostředí Simulink	30
4.19	Řízení plošiny CABLE pomocí rotační matice	31
4.20	Znázornění problému sjíždění lanek	31
4.21	Znázornění problému aproximace lineárního pohybu (vlevo je nízko položená plošina)	32
4.22	Model sestavy základny pro kompenzovanou verzi plošiny CABLE	32

Seznam tabulek

1.1	Rozdělení činností jednotlivých členů týmu, pracujících na robotické hlavě	8
3.1	Průměrný rozsah pohybu krční páteře	11
4.1	Rozsah natočení prototypu	17

Literatura

- [1] ALAHMARI, KhalidA. *Normal cervical spine range of motion using digital inclinometer in male asymptomatic subjects of Aseer, Saudi Arabia*. Saudi Journal of Sports Medicine. 2017, 17(1), 40-44. DOI: 10.4103/1319-6308.197469. ISSN 1319-6308. Dostupné také z: <http://www.sjosm.org/text.asp?2017/17/1/40/197469>
- [2] VALÁŠEK, Michael. *Mechatronika*. Praha: České vysoké učení technické, 1995. ISBN isbn80-01-01276-x.
- [3] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN isbn80-01-03351-1.
- [4] SKALICKÝ, Jiří. *Teorie řízení 1*. Brno: Vysoké učení technické, 2002. Učební texty vysokých škol. ISBN isbn80-214-2112-6.

Trossen Robotics - Robotic Arms, Crawlers Turrets and more!: Robot Turrets [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.trossenrobotics.com/c/robot-turrets.aspx>
- [5] Trossen Robotics - Robotic Arms, Crawlers Turrets and more!: ScorpionX MX-64T Robot Turret [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.trossenrobotics.com/p/ScorpionX-RX-64-robot-turret.aspx>
- [6] SociBot | The Robot that can Wear any Face - Engineered Arts. Engineered Arts - Humanoid Robots for communications [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://www.engineeredarts.co.uk/socibot/>
- [7] Neck range of motion. In: *KEEPING MY HEAD UP HIGH A blog on recovering from a broken neck injury* [online]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: https://dpleblanc.files.wordpress.com/2016/03/rsz_1neck-movements-thehealthybackblogcom.jpg
- [8] The yaw, pitch, and roll angles in the human head motion. In: *ResearchGate | Share and discover research* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Jorma_Laaksonen/publication/305684696/figure/fig1/AS:391458059243523@1470342282144/The-yaw-pitch-and-roll-angles-in-the-human-head-motion-11.png
- [9] ScorpionX MX-64 Robot Turret Kit. In: *Trossen Robotics - Robotic Arms, Crawlers Turrets and more!* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.trossenrobotics.com/Shared/Images/Product/ScorpionX-MX-64-Robot-Turret-Kit/scorpionxturret.jpg>
- [10] Dynamixel MX-64T Robot Actuator. In: *Trossen Robotics - Robotic Arms, Crawlers Turrets and more!* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.trossenrobotics.com/shared/images/PImages/RO-902-0060-000-a.jpg>
- [11] Axcor Wash 600. In: *Clay Paky - professional lighting* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.claypaky.it/media/productentries/images/CL3000.jpg>

- [12] Samson (dálkově ovládaná zbraňová stanice). In: *Wikipedie, otevřená encyklopedie* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/71/M2-Catlanit002.jpg/1068px-M2-Catlanit002.jpg>
- [13] Simplified kinematic diagram of compliant neck. In: *Compliant neck - Engineered Arts Wiki* [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://wiki.engineeredarts.co.uk/w/images/2/27/Sb1-rfsea-kinematics.png>
- [14] SociBot Mini. In: *SociBot Mini - Engineered Arts* [online]. [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: https://www.engineeredarts.co.uk/wp-content/uploads/2017/08/sb_mini_front_woman_sm-600x900.jpg
- [15] Compliant Neck. In: *Compliant neck - Engineered Arts Wiki* [online]. [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: https://wiki.engineeredarts.co.uk/w/images/1/1f/Compliant_neck.png
- [16] Base Rotate Kit. In: *Lynxmotion Robot kits* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.lynxmotion.com/images/product/medium/br01.jpg>
- [17] Kardanové klouby KE z ocele. In: *eshop.ameco.cz* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.components.sk/images/products/Kreuzgelenke-KE.jpg>
- [18] Kulový čep hliníkový M4. In: *Dron s kamerou, RC modely, RC letadla, RC kvadroptéry - RC modely Káně* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: https://rckane.cz/132923-tm_large_default/kulovy-cep-hlinikovy-m4-m4-2-gf-2146-006.jpg