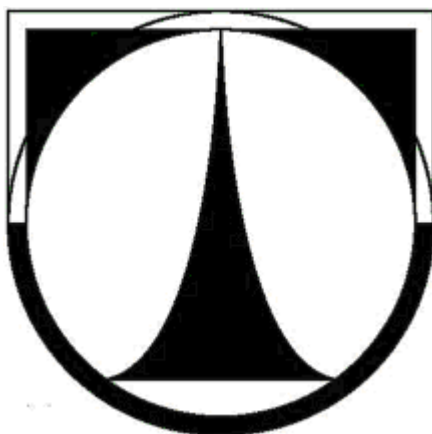


**Technická univerzita v Liberci**  
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrství

ÚSTAV INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ A ELEKTRONIKY



## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Návrh a konstrukce robotického manipulátoru  
(robotic manipulator design and construction)

**Autor:** Bc. Luděk Fedurca

**Vedoucí práce:** Doc. Mgr. Ing. Václav Záda, CSc.



### **Prohlášení**

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

# OBSAH

|                                       |           |
|---------------------------------------|-----------|
| <b>RESUMÉ</b> .....                   | <b>5</b>  |
| <b>Motivace</b> .....                 | <b>6</b>  |
| <b>Úvod</b> .....                     | <b>7</b>  |
| Sériové a paralelní manipulátory..... | 8         |
| Pohony manipulátorů .....             | 10        |
| Exoskeleton .....                     | 13        |
| <b>Návrh konstrukce</b> .....         | <b>14</b> |
| Konstrukční materiály .....           | 15        |
| Servo.....                            | 16        |
| Modelářská RC serva .....             | 17        |
| Proudový odběr .....                  | 24        |
| Taktilní senzor .....                 | 24        |
| Senzor tlaku.....                     | 25        |
| Dálkoměr .....                        | 25        |
| Konstrukce jako celek .....           | 27        |
| Ložiska .....                         | 29        |
| Uložení pohonů .....                  | 33        |
| Mikrořadiče .....                     | 36        |
| <b>Realizace konstrukce</b> .....     | <b>39</b> |
| Přímá kinematická úloha .....         | 42        |
| Inverzní kinematická úloha .....      | 42        |
| Řídící aplikace .....                 | 53        |
| <b>Závěr</b> .....                    | <b>59</b> |
| <b>Poděkování</b> .....               | <b>60</b> |
| <b>Seznam použitých zdrojů</b> .....  | <b>61</b> |
| <b>Seznam obrázků</b> .....           | <b>64</b> |
| <b>Seznam použitých zkratk</b> .....  | <b>66</b> |
| <b>Seznam příloh</b> .....            | <b>67</b> |

# RESUMÉ

## Česky

*Tato práce se zabývá návrhem a konstrukcí robotického manipulátoru s pěti stupni volnosti s použitím RC modelářských servopohonů. První kapitola popisuje jednotlivé konstrukce a současný vývoj manipulátorů. Druhá kapitola popisuje vlastní návrh konstrukce manipulátoru z teoretické pohledu. Poslední kapitola popisuje realizaci konstrukce, shrnuje dosažené výsledky a popisuje řídicí systém manipulátoru a použité algoritmy.*

**Klíčová slova:** manipulátor, návrh, konstrukce, servo, řízení

## English:

*This paper describes the design and construction of robotic manipulator with five degrees of freedom using the RC model servo. The first chapter describes the various construction and development of the current manipulators. The second chapter describes the design of the manipulator theoretical perspective. The last chapter describes the implementation structure, summarizes the results and describes the manipulator control system and algorithms used.*

**Keywords:** manipulator, design, construction, servo, control

## MOTIVACE

Už na počátku mého studia, když jsem objevil, že k počítači lze připojit vlastní hardware, začala mě zajímat automatizace a robotika. Prvním pokusem byl potenciometr s kondenzátorem zapojený do sériového portu ovládající raketku, která se na monitoru vyhýbala meteoritům. Později jsme během studia s kolegou a kamarádem Martinem Čermákem vytvořili několik mobilních robotů a touto činností jsme trávili většinu volného času.

S každým dalším výtvořem se otevíraly nové možnosti, ale pořád tomu něco scházelo. Zanechat po sobě nějaký výsledek, ovlivnit vnější prostředí, to vyžaduje vytvořit ruku – manipulátor, který může pohybovat předměty.

Tato práce je tak dalším krokem k vytvoření o trošku lepšího robota, než byl jeho předchůdce. Manipulátor popsany v této práci je určen pro amatérskou hobby robotiku. Přestože existuje spousta hotových řešení, cílem této práce bylo pokusit se postavit manipulátor, který by svými vlastnostmi předčil hotová řešení.

Nejdůležitějšími parametry proto byla cena a dostupnost použitých součástek a maximální možná jednoduchost konstrukce s ohledem na co nejširší možnosti uplatnění.

# ÚVOD

Tato práce popisuje návrh a konstrukci robotického manipulátoru. V úvodní kapitole jsou popsány základní konstrukce současných manipulátorů a nejnovější pokroky v tomto oboru.

Druhá kapitola popisuje teoretickou část konstrukce s použitím metod počítačového návrhu a teoreticky popisuje jednotlivé použité komponenty.

Poslední část se zabývá samotnou výrobou navrženého manipulátoru a jeho řízením.

Práce obsahuje několik ilustračních obrázků pro názorné pochopení vlastního textu číslovaných vždy (obr.x.y), kde x je pořadové číslo kapitoly a y je pořadové číslo obrázku v kapitole. Při uvádění zdrojů volných citací se v textu odkazují na seznam použitých zdrojů, a to pořadovými čísly v hranatých závorkách [i] na použitou literaturu a pořadovými čísly v hranatých závorkách s předponou [www i] na použité informační zdroje z Internetu. *Kurzivní písmo* je vyhrazeno pro doslovné citace. Zdrojové kódy příkladů jsou odlišeny **proporcionálním písmem**.

## Sériové a paralelní manipulátory

Každý kloub manipulátoru představuje jeden stupeň volnosti. Stupeň volnosti můžeme rovněž chápat jako možnost pohybu v jedné ose. V trojrozměrném prostoru máme 3 osy a pro každou realizujeme posun a rotaci pomocí dvou kloubů. Abychom v operačním prostoru manipulátoru dosáhli na libovolné souřadnice, potřebujeme 5 stupňů volnosti. 6. stupeň volnosti nám pak umožní dosáhnout libovolné pozice z libovolného směru.

Další redundantní stupně volnosti zvyšují flexibilitu - umožňují více způsobů jak dosáhnout požadované pozice z požadovaného směru, ale komplikují řešení kinematiky robota.

Výsledná pozice koncového členu manipulátoru se skládá z pohybů jednotlivých pohonů. Pohony se mohou pohybovat nezávisle na sobě – pak hovoříme o sériových manipulátorech.



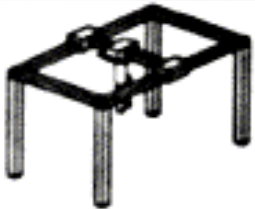
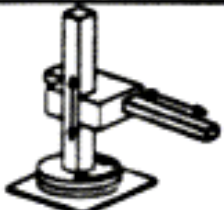
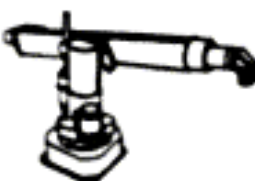
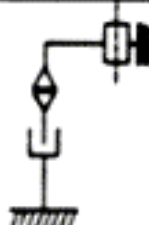
obr. 1.1 sériový manipulátor firmy KUKA s 6 stupni volnosti

Pokud je jeden pohyb řízen více pohony, jedná se o paralelní manipulátor. Paralelní manipulátory se nejčastěji využívají v leteckých simulátorech.



obr. 1.2 Stewart platform – paralelní manipulátor

Existují i manipulátory s kombinovanou konstrukcí. Jejich kinematika se pak řeší užitím kombinace postupů pro sériové i paralelní manipulátory.

| Principle                                                                                                | Kinematic Structure                                                                 | Workspace                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <br>Cartesian Robot     |    |    |
| <br>Cylindrical Robot   |    |    |
| <br>Spherical Robot    |   |   |
| <br>SCARA Robot       |  |  |
| <br>Articulated Robot |  |  |

obr. 1.3 nejběžnější konstrukce sériových manipulátorů

Všechny výše popsané manipulátory pracují s tuhou konstrukcí. Tím je dána řada jejich technických konstrukčních omezení. Řešení kinematiky pro ohebné manipulátory je totiž podstatně složitějším problémem (velikost ohybu nosných dílů záleží na pozici manipulátoru i na jeho zatížení předmětem manipulace). Přesto existuje několik experimentálních konstrukcí, které se například snaží napodobovat lidské svaly.

## Pohony manipulátorů

Nejčastěji používané pohony v robotice lze rozdělit do tří základních skupin - hydraulické, pneumatické a elektrické.

Z historického pohledu byly dříve ve vyšší míře používány častěji pohony hydraulické a pneumatické. Dnes je ale již ve většině aplikací vytlačily elektromotory.

Jedním z nejběžnějších strojů, které se dosud neobejdou bez hydrauliky jsou bagry a další prvky těžké mechanizace.



obr. 1.4 hydraulický manipulátor

Pneumatické systémy jsou pak hojně k vidění v automatizovaných velkoskladech, kde se jejich pohony používají třeba na přerovnávání zboží a třídění boxů putujících po pásových dopravnících.

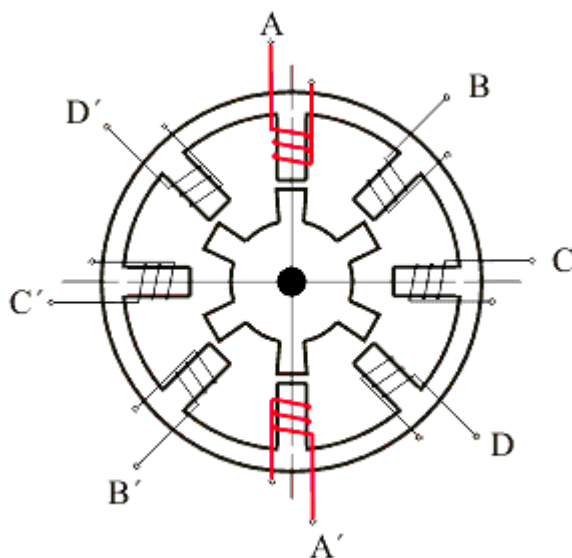
Velkou výhodou pneumatických pohonů, danou stlačitelností vzduchu, je možnost skladování energie k jejich pohonu v tlakových nádobách. Například pro použití k pohonu manipulátoru mobilního robotu, by se tím částečně vyřešil problém se složitým nabíjením baterií. Dnešní nejmodernější LiPol a LiFe baterie jsou stále ještě dost drahé a pro své nabíjení potřebují speciální pulzní mikroprocesorové nabíječky, které během nabíjení průběžně hlídají jejich teplotu.

Oproti tomu dostatečně výkonný kompresor, jinak velký, těžký a s velkou spotřebou, může být umístěn mimo robota a během nabíjení nebo výměny baterií stihne opět rychle natlačit zásobník stlačeným vzduchem.



obr. 1.5 komponenty systému pneumatického manipulátoru

Nejčastěji používanými elektromotory v robotice jsou krokové motory. Jejich předností je možnost přesného řízení v malých krocích pomocí změny konfigurace magnetického pole.



obr. 1.6 krokový motor – funkční schéma

## Chirurgický robot Da Vinci

Tohoto chirurgického robota lze v současné době považovat za jeden z nejvyspělejších robotických systémů. Byl vyvinut v roce 1995 firmou Intuitive Surgical ve spolupráci s americkou armádou. Primární myšlenkou bylo umožnit chirurgům na dálku operovat zraněné vojáky v bezprostřední blízkosti válečné zóny. Robot sám nepracuje zcela autonomně, ale je řízen k tomu účelu vyškoleným chirurgem. V roce 2000 se tento robot poprvé dočkal civilního použití a dnes jich několik operuje i v České republice. První zařízení u nás zakoupila v roce 2005 pražská fakultní Nemocnice Na Homolce za 70 mil. Kč. V současné době v této nemocnici vzniká i mezinárodní školicí středisko pro výcvik dalších

lékařů schopných operovat pomocí tohoto přístroje. Od počátku svého nasazení se neustále rozrůstaly možnosti operací prováděných tímto strojem. Nejnovější operací, kterou je možno takto provádět je šití cév.



obr. 1.7 chirurgický robot Da Vinci se 4 rameny

Operace provedená tímto robotem je zhruba o 1000 euro dražší, než operace prováděná klasickým způsobem. Pro pacienta je největším přínosem kratší čas zotavení po operaci, neboť zákrok probíhá mikroinvazivní metodou. To přináší rovněž výhodu v menší ztrátě krve pacienta během operace. Od dob první laparoskopie provedené v roce 1901 se tak otevřela nová cesta k jejímu výraznému zdokonalení.

Jedno z ramen tohoto robota je vybaveno miniaturní stereoskopickou kamerou, která chirurgovi umožňuje sledovat operační prostor malým otvorem v těle pacienta.



obr. 1.8 robot během operace

Pro lékaře je zde výhod hned několik. První výhodou je stoprocentní eliminace třesu rukou operujícího chirurga, neboť ten pouze vzdáleně řídí pohyb manipulátoru. Dokážeme si jistě představit i čtyři lékaře stojící společně nad operovaným pacientem. Máme-li však přímo z těla operovaného pacienta vyveden videosignál, mohou teoreticky jednu operaci sledovat všichni lékaři na celém světě současně. Následné rozbory a použití těchto dat pro výuku nových lékařů jsou rovněž velkým přínosem.

## Exoskeleton

Tato konstrukce byla primárně vyvinuta rovněž pro armádní účely. Možná se jedná o první prototyp terminátora. Voják vybavený tímto zařízením si podstatně zvýší fyzickou sílu. V současné době toto zařízení umožňuje vojákům běhat s 300kg nákladem na zádech. Přínosy tohoto zařízení v boji jsou diskutabilní, ale v civilním použití by toto zařízení v budoucnosti mohlo usnadnit pohyb seniorům nebo zdravotně postiženým. Zařízení sleduje vlastní pohyb uživatele a následně mu v požadovaném směru pomáhá svým pohonem. Existují i prototypy, které se ovládají náklonem těla, podobně jako populární vozítko segway.



obr. 1.9 exoskeleton – vnější kostra s pohony (na zádech baterie)

## NÁVRH KONSTRUKCE

Tento manipulátor je prodáván v České republice firmou Hobbyrobot a je dodáván jako stavebnice se všemi potřebnými díly. Myšlenkou mé práce je vývoj manipulátoru dokonalejšího, než je ten na obrázku 2.1.



obr. 2.1 hotové řešení – prvotní inspirace

Manipulátor uvedený na obrázku používá modelářské servopohony. Jeho dosah je 240mm a nosnost 180g. Je napájen pomocí stejnosměrného 5V stabilizovaného zdroje. Jeho řídící mikrokontroler ATmega8 přeposílá z PC aplikace po sériovém portu polohové instrukce. Cena tohoto řešení je 12 835 Kč včetně pohonů.

## Konstrukční materiály

Při návrhu vlastní konstrukce bylo třeba vybrat materiál, ze kterého budou vyrobeny jednotlivé nosníky. Pro finální konstrukci jsem při rozhodování vycházel z předchozích experimentálních konstrukcí. Nejružnější stavebnicové konstrukční prvky typu stavebnice Merkur jsem zavrhl, jelikož jsem chtěl, aby finální konstrukce byla co nejpevnější a vyrobená pokud možno z jednoho kusu.

| materiál       | Hustota<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | teplota<br>tání<br>(°C) | měrný<br>elektrický<br>odpor při<br>20 °C<br>(μΩ·m) | Tvrdost<br>(Mohsova<br>stupnice) | Mez<br>pevnosti<br>(MPa) |
|----------------|---------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| Titan<br>(Ti)  | 4,506                           | 1668                    | 0,032                                               | 6                                | 900                      |
| Hliník<br>(Al) | 2,70                            | 660                     | 0,02874                                             | 2,9                              | 50                       |
| Železo<br>(Fe) | 7,86                            | 1538                    | 9,71                                                | 4,0                              | 350                      |

obr. 2.2 nejpoužívanější konstrukční materiály a jejich vlastnosti

Jak ukazuje obrázek 2.2, jako nejvhodnější materiál pro konstrukci nosníků se jeví titan.

Jeho konečná volba byla pak ovlivněna především nabídkou spolupráce od strojírenské společnosti Triangl s.r.o., která se zpracováním titanu pro průmyslové aplikace zabývá jako svou hlavní činností. Tato společnost se zabývá strojírenskou výrobou již od roku 1885 a mezi její zákazníky patří české i zahraniční průmyslové podniky. Může se pyšnit takovými referencemi jako je například výroba titanového pláště pro sovětskou kosmickou družici Sojuz nebo olověného radiačního stínění pro jaderné reaktory.

## Servo

Servo mechanismus je systém, který využívá negativní zpětnou vazbu k řízení výstupu.

Nejčastěji se toto označení používá pro elektrické pohony. Systém řízení polohy výstupního hřídele přijímá zpětnovazební signál v podobě chyby, kterou se regulátor snaží kompenzovat.

Z historie lze za první technické zařízení tohoto typu považovat větrné mlýny, které se natáčí po směru větru. Kromě hlavního rotoru je mlýn vybaven korouhví nebo dalším menším rotorem pootočeným o 90 stupňů, který natáčí hlavní rotor v závislosti na směru větru, aby využil maximum dostupné energie.

Jedním za těchto historických a u nás technicky unikátních zařízení je i mlýn v obci Ruprechtov, který používá Halladayovu turbínu.



obr. 2.3 Halladayova turbína v obci Ruprechtov

V dnešní době má téměř každé nové auto „servo“. Spousta řidičů ale nerozlišuje co vlastně servo je a co není.

Posilovač řízení je servomechanismus. Intenzitu s jakou nám pomáhá otáčet volantem, řídí dle momentové síly potřebné k natočení kol. Nejjednodušší způsob získávání zpětné vazby je z rychlosti pohybu vozidla, neboť jak každý řidič staršího auta bez posilovače jistě poznal, se zvyšující se rychlostí se síla potřebná k zatáčení snižuje. Kromě snížení síly potřebné k natočení kol může mít posilovač řízení ještě další funkce. Například automobily

BMW snižují účinek posilovače řízení s vzrůstající rychlostí, dokonce ve vyšších rychlostech zvětšují sílu potřebnou k natočení kol.

Tato vlastnost přispívá k bezpečnosti, neboť ve vyšších rychlostech není bezpečné provádět ostré zatáčky. Nejnovější generace posilovačů řízení s proměnlivým účinkem naopak umožňují v nejnižších rychlostech menším pohybem volantů zatočit více, což usnadňuje parkování.

Tempomat je dalším příkladem servomechanismu. Přidáváním plynu zvyšuje rychlost až do přednastavené hodnoty a z aktuální rychlosti vypočítává chybu.

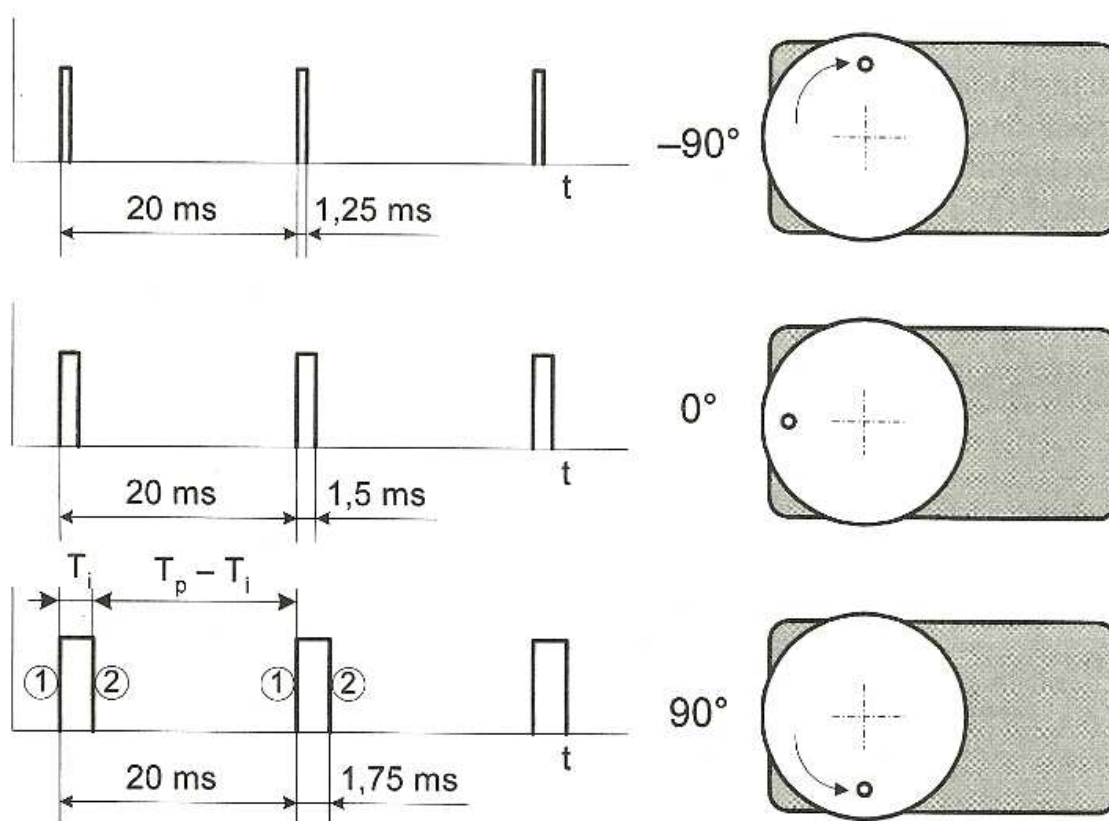
Jako servo se ale chybně označuje i elektrické ovládání oken. Elektromotor v tomto případě ovládá pohyb skla, ale systém nemá žádnou zpětnou vazbu pro sledování jeho polohy a korekci chyby. Zpětnou vazbu v tomto případě tvoří uživatel, který ovládá pouze posun nahoru a dolů a manuálně provádí požadované korekce.

## **Modelářská RC serva**

Hlavní základní myšlenkou celé konstrukce bylo vycházet z použití analogových modelářských servopohonů. K volbě těchto pohonů jsem se rozhodl z důvodu jejich jednoduchosti a snadné dostupnosti. Samozřejmě existuje spousta již hotových konstrukcí, které ale trpí stejným neduhem jako všechny moje první prototypy - uchycení nosníků za hřídel a tím způsobené zvýšení mechanických vůlí, které se směrem ke koncovému členu manipulátoru stále zvětšují. Existuje rovněž spousta jiných pro robotiku vhodnějších pohonů. Jejich nevýhodou je ale vyšší hmotnost, složitější řízení a především vyšší pořizovací cena.

Modelářské RC servo motory jsou v robotice oblíbené pro svou snadnou dostupnost, relativně nízkou cenu a snadné připojení k aplikaci. V této práci používám k pohybu manipulátoru nejrozšířenější typ – analogová serva se stejnosměrnými (DC) motory.

Analogová modelářská serva pracují s řídicím signálem o frekvenci 50Hz. Digitální varianta pracuje se signálem o frekvenci 300Hz. Digitální serva mívají větší kroutící moment a programovatelný řídicí obvod. Ten rozšiřuje pohon o další funkce užitečné především pro letecké modely. Umožňují tak nastavení citlivosti, pracovního rozsahu, smyslu otáčení, střední polohy, rozlišení, ochrany proti přetížení a reakce na ztrátu řídicího signálu.



obr. 2.4 PWM signál ovládání analogového serva

Nejcitlivější částí servopohonů jsou jejich převody. U levnějších typů jsou zhotoveny z plastu, dražší modely mají převody kovové. Většina zkušených uživatelů modelářských serv radí z úsporných důvodů používat serva s kovovými převody. Jak je to možné, když serva s plastovými převody jsou někdy i o více než polovinu levnější? Kovové převody mají mnohonásobně vyšší životnost a při nepřekračování maximálního povoleného zatížení vydrží velmi dlouho. Plastové převody oproti tomu občas dlouho neustojí ani normální používání. Naštěstí většina výrobců prodává tyto převody i samostatně a jejich výměna je otázkou pár minut. U některých serv se dokonce vyplatí koupit motor s plastovými převody a po jejich poškození je vyměnit za kovové.

Přesto se mi během testování a vývoje podařilo spotřebovat i mnoho serv s kovovými převody, takže jsem byl nucen přejít na nejlevnější možnou alternativu, levnou kopii nejpoužívanějšího serva HS-422. Servo Vigor VS-2 má plastové převody, téměř identické rozměry a montážní otvory za třetinovou cenu.

Jediným podstatným rozdílem je o 2mm větší průměr výstupní hřídele. Tato nekompatibilita se projevila pouze u posledních 2 pohonů, které jsou spojeny s chapadlem

a vyrobeny - přizpůsobeny na standardní rozměr. Problém byl vyřešen použitím menších serv HS-82MG, která zde plně postačují a navíc jsou lehčí, čímž minimalizují nežádoucí hmotnost na konci ramene.

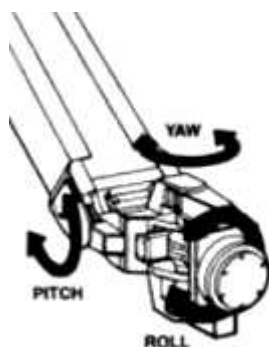
Chapadlo je po infračerveném dálkoměru druhou hotovou věcí zakoupenou k vlastnímu manipulátoru. Je navrženo pro dvě standardní serva HS-422, která jsou pro něj ale zbytečně moc silná a těžká. Servo pro rotaci zápěstí lze snadno zaměnit za jiné a jako jediné používá vnitřní převod serva jako část nosné konstrukce. V tomto případě se jedná o poslední díl konstrukce a tak požadavek na mechanickou přesnost musel ustoupit minimální hmotnosti. Pro poslední servo, ovládající sevření čelistí musel být plastový výlisek mírně obroušen, neboť menší serva mají ze svého obalu vystouplý sekundární převod a menší servo do chapadla mechanicky nepasovalo. Menší poslední servo svými menšími rozměry a nižší hmotností umožnilo v jeho těsné blízkosti osadit infračervený dálkoměr směřovaný mezi rozevřené čelisti.



obr. 2.5 použitý koncový člen manipulátoru



obr. 2.6 koncový člen s dalším stupněm volnosti

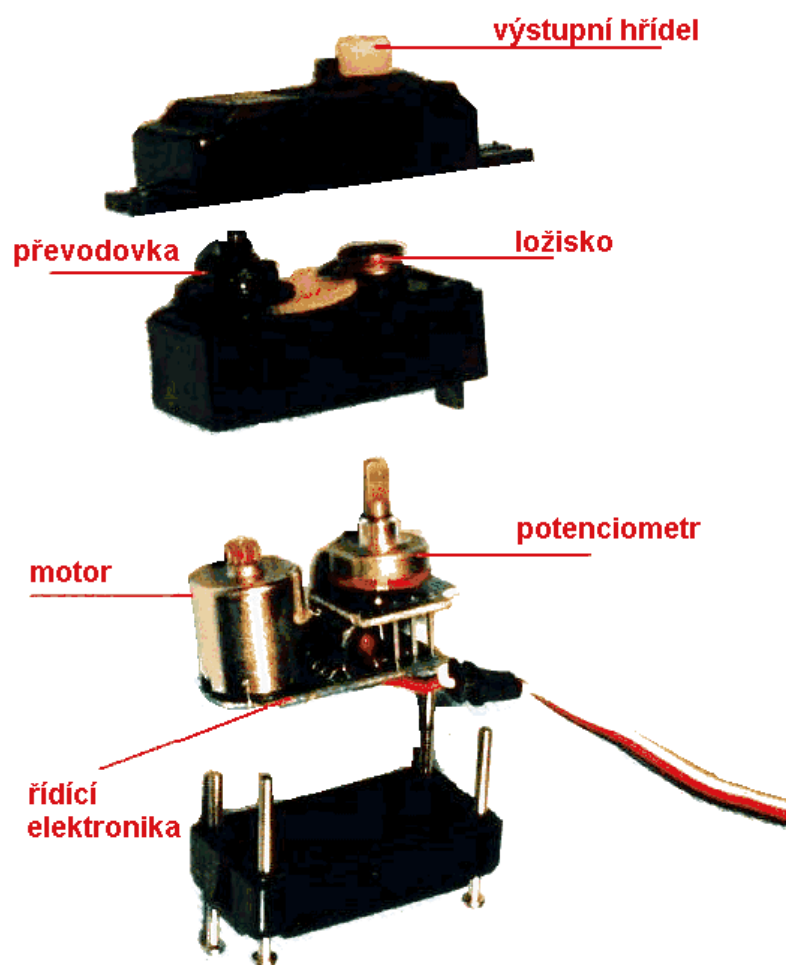


obr. 2.7 3 stupně volnosti polohování zápěstí

Druhou nejcitlivější součástí serva je potenciometr, který snímá polohu výstupní hřídele. Jeho uhlíkový povrch je soustavně mechanicky namáhán. Životnost těchto potenciometrů je i přesto překvapivě vysoká. Její snížení může být způsobeno přítomností drobných nečistot uvnitř pohonu nebo i úpravou serva pro kontinuální otáčení.

Tato úprava spočívá v nahrazení potenciometru odporovým děličem. Regulátor serva se pak snaží kompenzovat chybu, kterou nikdy nemůže ani částečně eliminovat. Po této úpravě se hřídel řídicím signálem nastavená do střední polohy zastaví. Minimální výchylka od středu na jednu stranu se projeví nejnižší možnou rychlostí otáčení. Zvyšováním odchylky požadované polohy od středu se většinou lineárně (bez zátěže) zvyšuje rychlost otáčení. Výchylka střední polohy na opačnou stranu způsobí opačný směr otáčení.

Většina elektrických pohonů manipulátorů je pro dosažení maximální síly ještě spojena s šnekovou převodovkou. Pro mou konstrukci jsem použití převodovky zavrhl hned v počátku. Jednak by se zvýšila složitost a cena konstrukce a při respektování prvního zvoleného parametru – servopohonů, které nejsou primárně uzpůsobeny ke kontinuálnímu otáčení, byla tato možnost technicky vyloučena. Stejně tak jsem hned zpočátku zavrhl přenos síly pomocí soustavy kladek, táhel nebo kardanových hřídelí.



obr. 2.8 vnitřní konstrukce servopohonu



Gear Set - Part# 55314

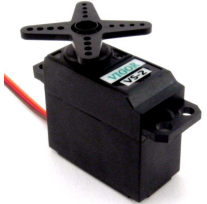
obr. 2.9 zvlášť prodávané náhradní díly – převody



obr. 2.10 převodovka pro servopohon 8,6:1

Další možnou úpravou je rozšíření servopohonu o zpětnou vazbu. Tuto úpravu jsem rovněž osobně testoval, avšak její úspěšná realizace předpokládá nekonečnou trpělivost a chirurgicky přesné osazení enkodéru.

Nejdostupnějším enkodérem se v tomto případě jeví součástka z jakékoliv počítačové myši – enkodér scrollovacího kolečka. Tato úprava má ještě další úskalí a tím je prostorové omezení. Náš nový enkodér se musí vejít do prostoru uvnitř serva, kde původně sídlil potenciometr. Pro 7 motorů použitých v mé konstrukci jsem proto tuto možnost zavrhl i když by přinesla další technické možnosti. Enkodér uvnitř serva by umožňoval řídicímu systému ověřit, zda se servu podařilo nastavit se do požadované polohy.

| model                           | rozměry<br>[mm]         | krouťící moment<br>[Kg.cm] (při<br>4,8V / 6V) | rychlost<br>[s/60°] (při<br>4,8V / 6V) | hmotnost<br>[g] | foto                                                                                  |
|---------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Vigor VS-2<br>(analogové)       | 40,6<br>20,0<br>38,9    | 3,1 / 3,4                                     | 0,19 / 0,17                            | 39,2            |    |
| Hitec HS-81<br>(analogové)      | 29,72<br>11,94<br>29,46 | 2,6 / 3,0                                     | 0,11 / 0,09                            | 16,44           |    |
| Hitec HS-82MG<br>(analogové)    | 29,72<br>11,94<br>29,46 | 2,8 / 3,4                                     | 0,12 / 0,10                            | 18,71           |   |
| Hitec HS-422<br>(analogové)     | 40,39<br>19,56<br>36,58 | 3,3 / 4,1                                     | 0,21 / 0,16                            | 45,36           |  |
| Hitec HS-985MG<br>(analogové)   | 39,88<br>19,81<br>36,83 | 10,4 / 12,4                                   | 0,16 / 0,13                            | 61,80           |  |
| Hitec HS-7985MG<br>(digitální)  | 39,88<br>19,81<br>36,83 | 10,4 / 12,4                                   | 0,16 / 0,13                            | 61,80           |  |
| Hitec HSR-5498SG<br>(digitální) | 39,88<br>19,81<br>36,83 | 11,0 / 13,5                                   | 0,22 / 0,19                            | 59,53           |  |

obr. 2.11 přehled některých modelářských servopohonů

## Proudový odběr

O tuto možnost zpětné vazby jsem se nechtěl připravit, ale představa dlouhých hodin strávených nad úpravou všech pohonů mě donutila vymyslet jiný způsob.

Řešení jsem objevil v podobě senzoru měřícího množství odebíraného proudu. Jedná se o bočník měřící úbytek napětí na paralelním odporu, převádějící naměřenou veličinu na analogový výstup.



obr. 2.12 bočník k měření odebíraného proudu

Každý pohon má v závislosti na svém zatížení, které je dáno hmotností konstrukce nad ním, svůj charakteristický odběr proudu. V případě, že narazí na překážku, snaží se jí silou překonat, čímž zvýší svůj proudový odběr nad povolenou hranici a řídicí systém tak rozpozná přítomnost překážky.

Pokud se zvýší předpokládaný proudový odběr při současném spojitém pohybu všech pohonů, řídicí systém může zkusit pohnout každým pohonem jednotlivě a tím i přesněji lokalizovat překážku. Je samozřejmě třeba počítat se zvýšeným odběrem proudu při rozběhu motorů.

## Taktilní senzor

Dalším možným způsobem rozpoznání překážky ve dráze pohybu manipulátoru jsou taktilní a proximní senzory.

Jako taktilní senzory jsem zvolil mikrospínače bez aretace, které se často vyskytují v PC skříních jako reset tlačítko.



obr. 2.13 mikropsínač bez aretace

## Senzor tlaku

K rozpoznání přítomnosti předmětu manipulace jsem použil odporově závislý rezistor FSR-01. Jakýkoliv způsob optického rozpoznávání by byl v tomto případě méně spolehlivý. Navíc tato součástka umožňuje v jisté míře regulovat sílu stisku. Detekce předmětu tak probíhá nejdříve infračerveným dálkoměrem a při svírání kleští se sleduje, zda se změnil tlak vyvíjený na čelisti uchopovaným předmětem.



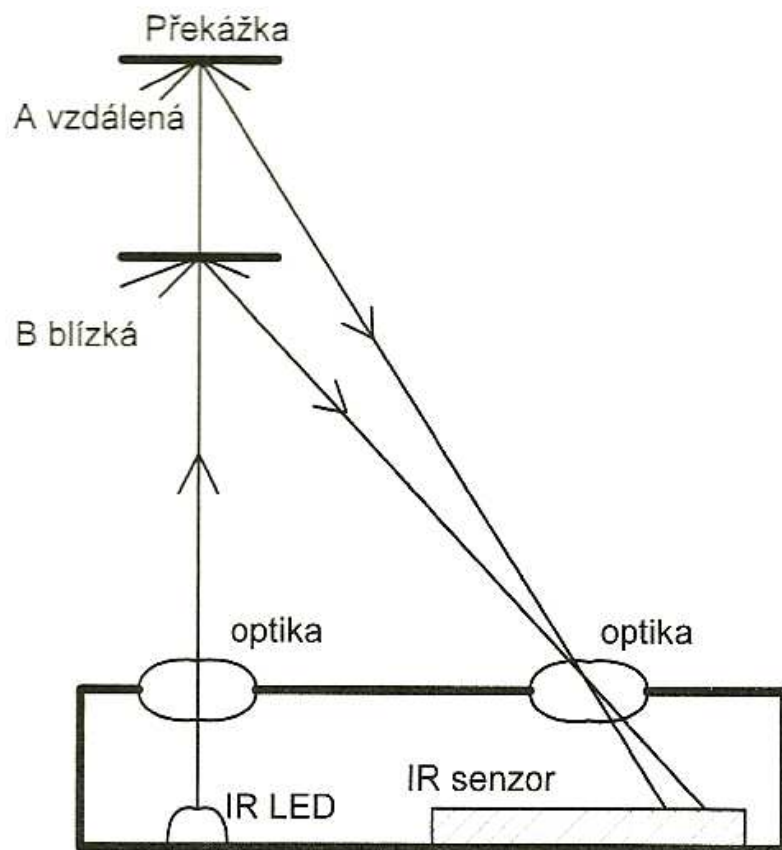
obr. 2.14 odporově závislý senzor tlaku

## Dálkoměr

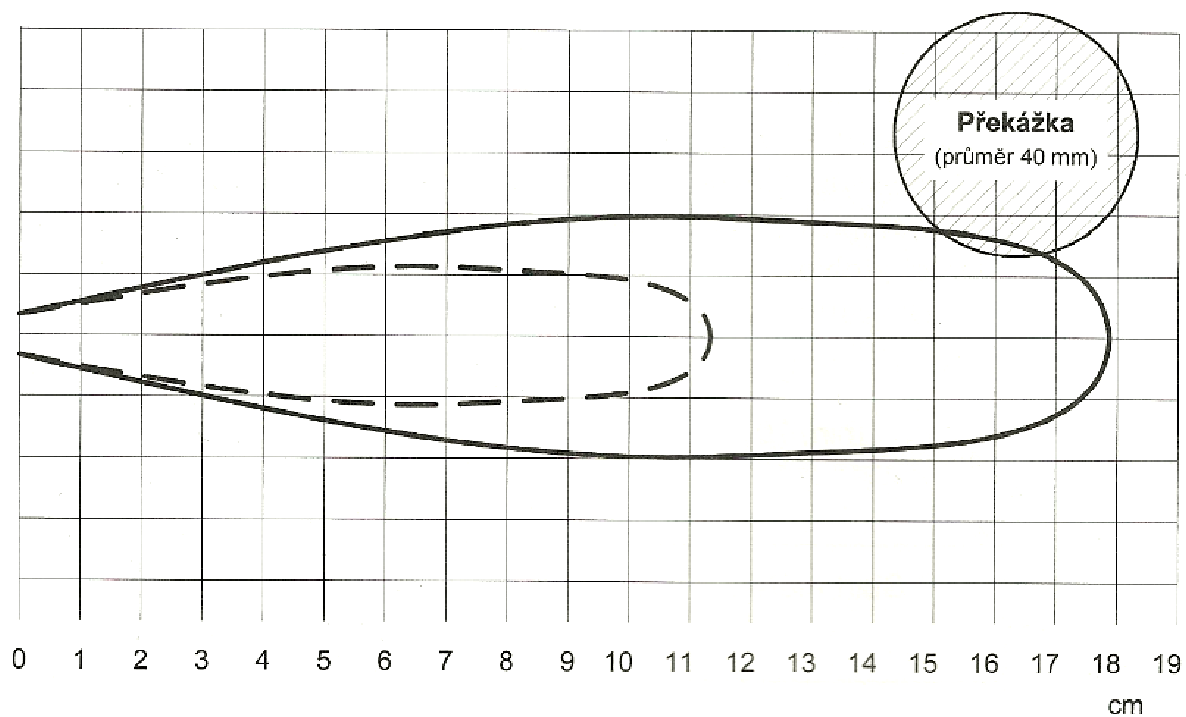
Jako proximity sensor jsem použil hotový modul infračerveného dálkoměru GP2Y0A41 s měřícím rozsahem 4-30cm, který se již osvědčil v předchozích konstrukcích. Většina levnějších ultrazvukových dálkoměrů se hodí spíše na měření delších vzdáleností zhruba od 20cm.



obr. 2.15 infračervený dálkoměr GP2Y0A41

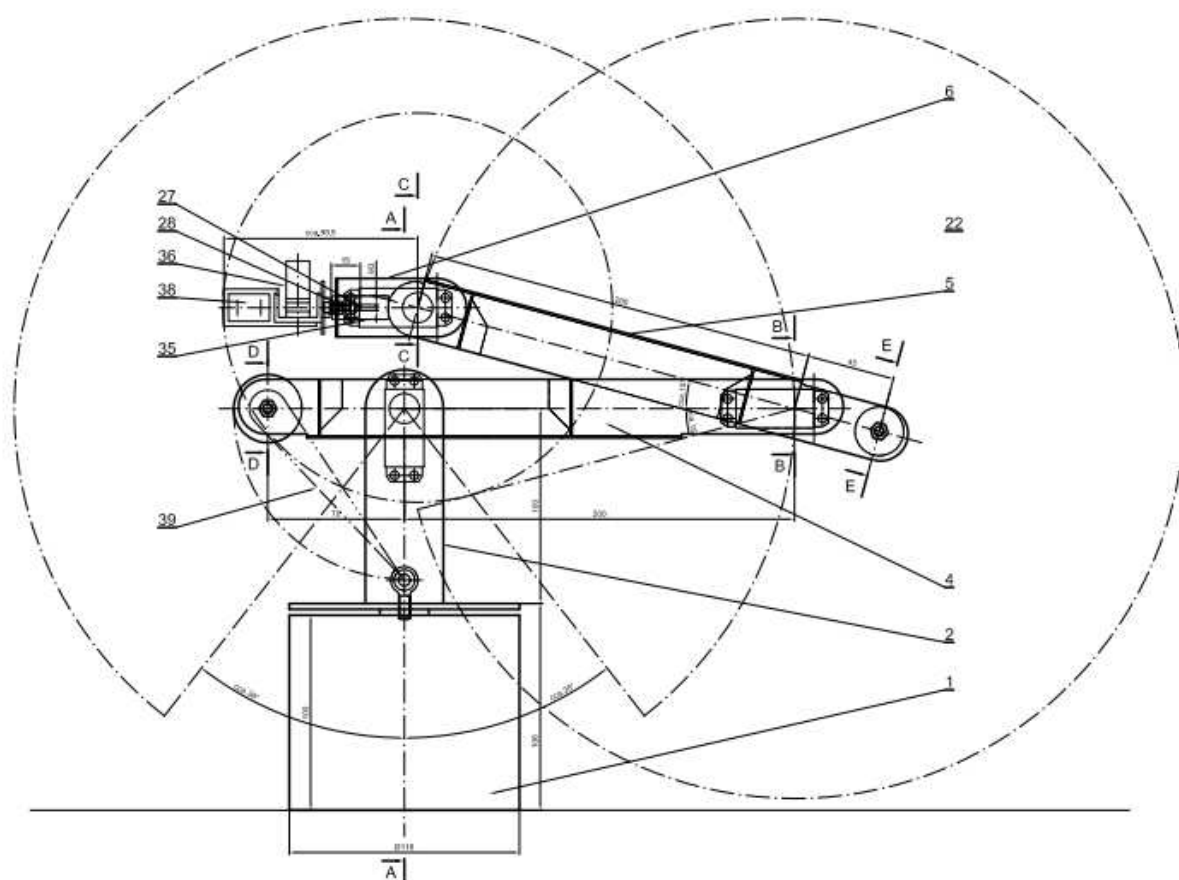


obr. 2.16 princip měření vzdálenosti infračerveným dálkoměrem



obr. 2.17 vyzařovací charakteristika infračerveného dálkoměru GP2Y0A41

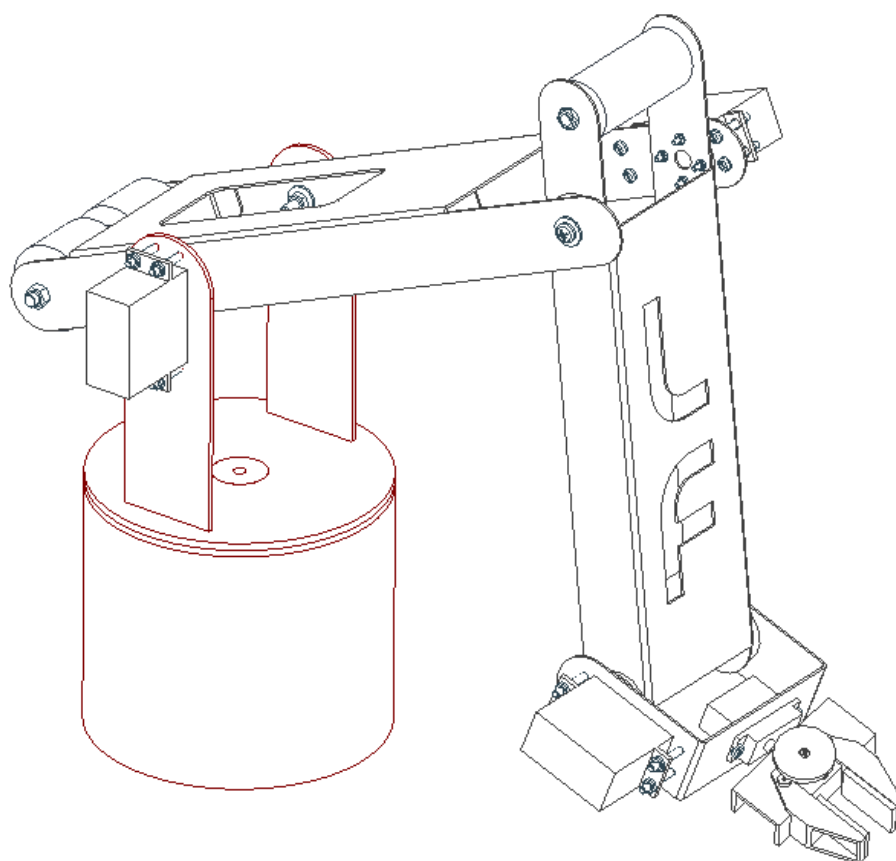
## Konstrukce jako celek



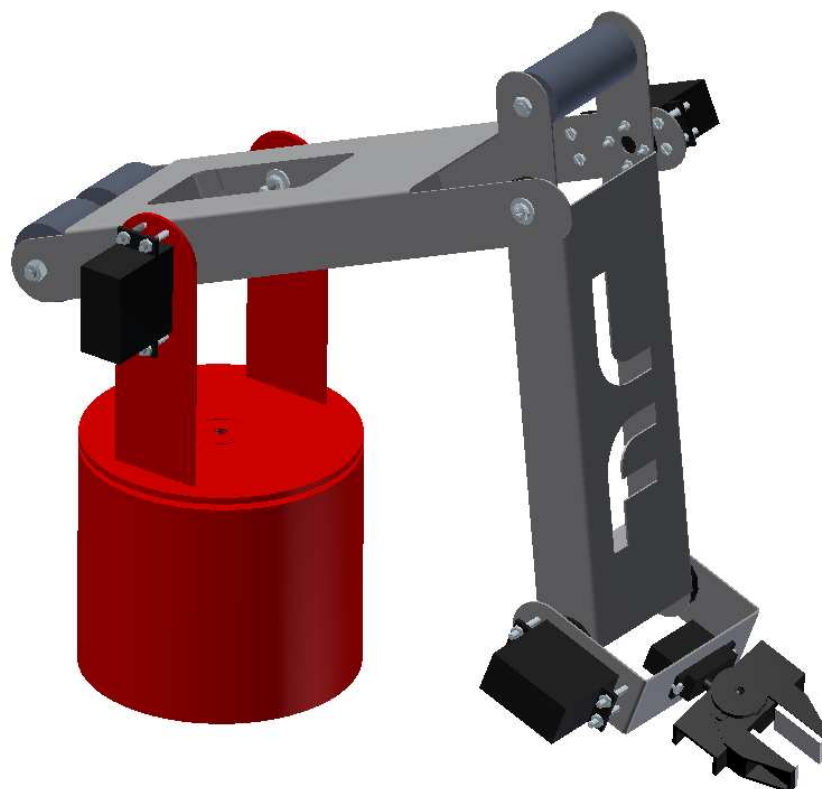
obr. 2.18 výkres konstrukce

Obrázek 2.18 naznačuje první náčrtek konstrukce. Rozměry jednotlivých dílů jsou po provedení výpočtů voleny jako maximální možné vzhledem k možnostem předpokládaných pohonů, jelikož tato práce si bere za jeden z hlavních cílů stanovení maximálních možností uplatnění modelářských RC servopohonů.

Ve srovnání s hotovým řešením manipulátoru z obrázku 2.1 by tak ve finální podobě měla mít navržená konstrukce se zachováním stejné nosnosti, přesnosti a ceny dvojnásobně větší pracovní prostor.



obr. 2.19 3D model konstrukce (drátový model s viditelnými hranami)



obr. 2.20 3D model konstrukce (modelový pohled)

## Ložiska



obr. 2.21 ložiska různých typů

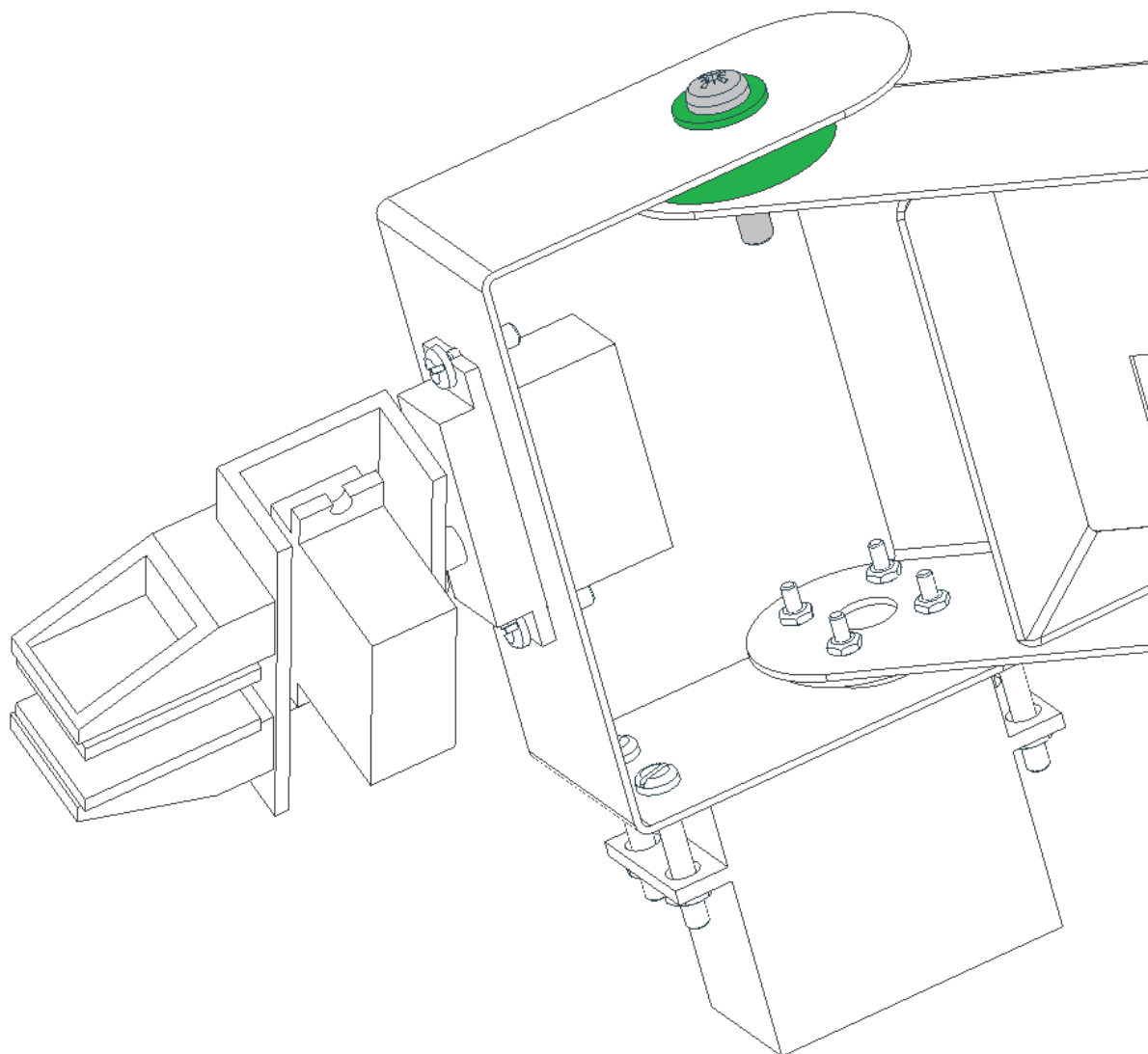
Ložiska snižují tření při vzájemném pohybu dvou komponent. Podle druhu pohybu se dělí na lineární a rotační. Nejpoužívanější jsou ložiska kluzná a valivá. Valivá ložiska se vyrábějí ve standardizovaných rozměrech a dále se dělí dle profilu odvalovací plochy na kuličková, jehlová, válečková a další. Jedním z nejdůležitějších parametrů ložiska je jeho určení. Existují v zásadě ložiska axiální, kde většina sil působí ve směru osy otáčení a ložiska radiální, kde většina sil působí kolmo na osu a jejich kombinace.

V konstrukci je často mnohem složitější navrhnout vhodné uložení ložiska, než vybrat konkrétní vhodný typ.

V tomto případě jsem v katalogu hledal nejmenší možná ložiska, která ale budou běžně dostupná. V konstrukci stacionární základny lze vysoustružením snadno vytvořit prostor pro uložení ložisek.

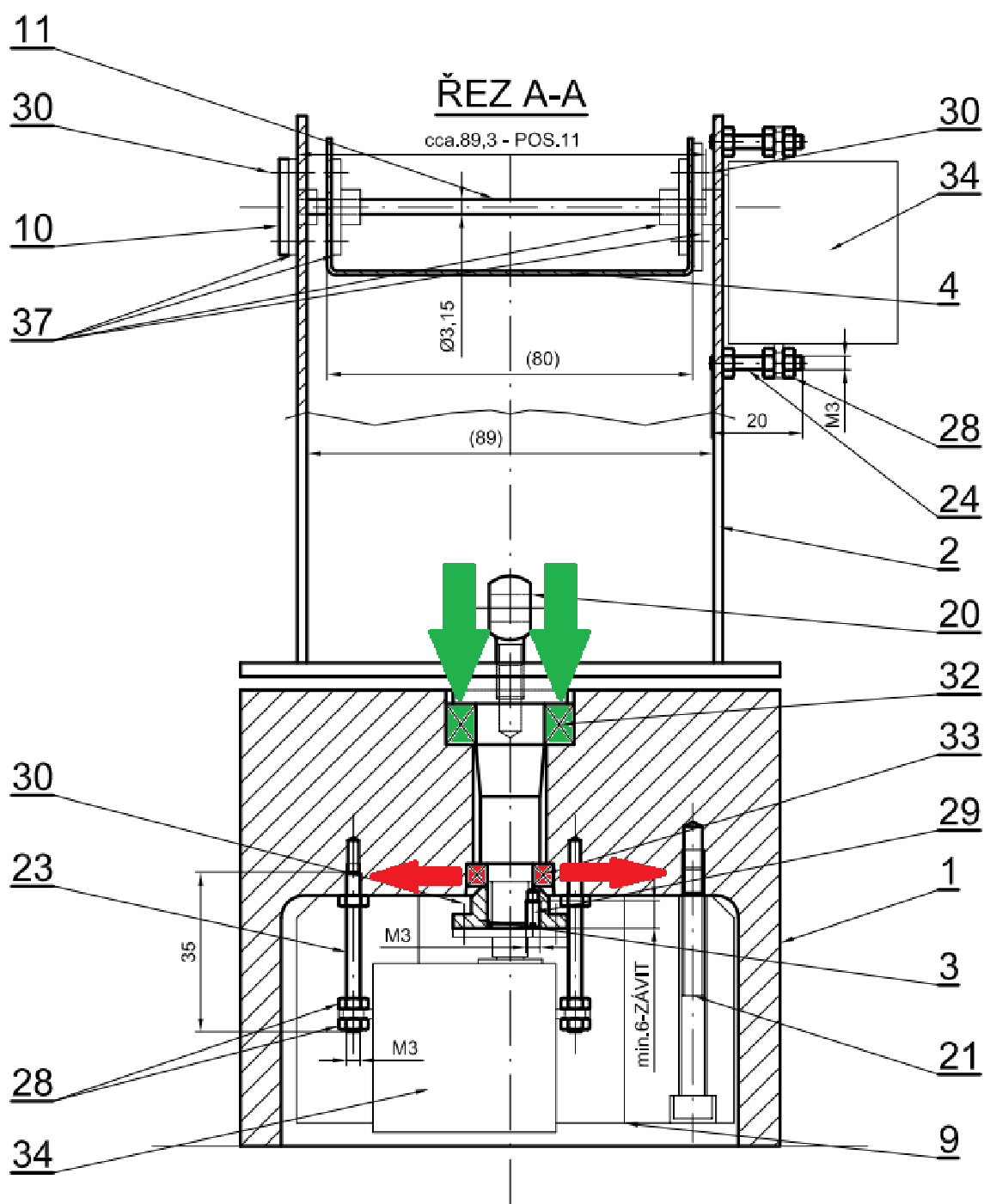
Pro další části – pohony nosníků je situace podstatně složitější. Ložiska zde by měla být co nejlehčí a vymezovat jak radiální tak i axiální vůle. Po dlouhém zkoumání možností jsem se rozhodl použít kluzná ložiska vlastní výroby, neboť klasická valivá ložiska nebyla v požadovaných rozměrech běžně k dostání a především pak nebylo už vůbec možno navrhnout pro ně na mé konstrukci vhodné uložení.

V ose sklápění nosníku je tedy plastové kluzné ložisko vyrobené z unašeče servopohonu a na druhé straně osy sklápění byly použity pohony s dvojitým vnitřním kuličkovým ložiskem.



obr. 2.22 kluzné ložisko osy nosníku tvořené plastovým unašečem servopohonu

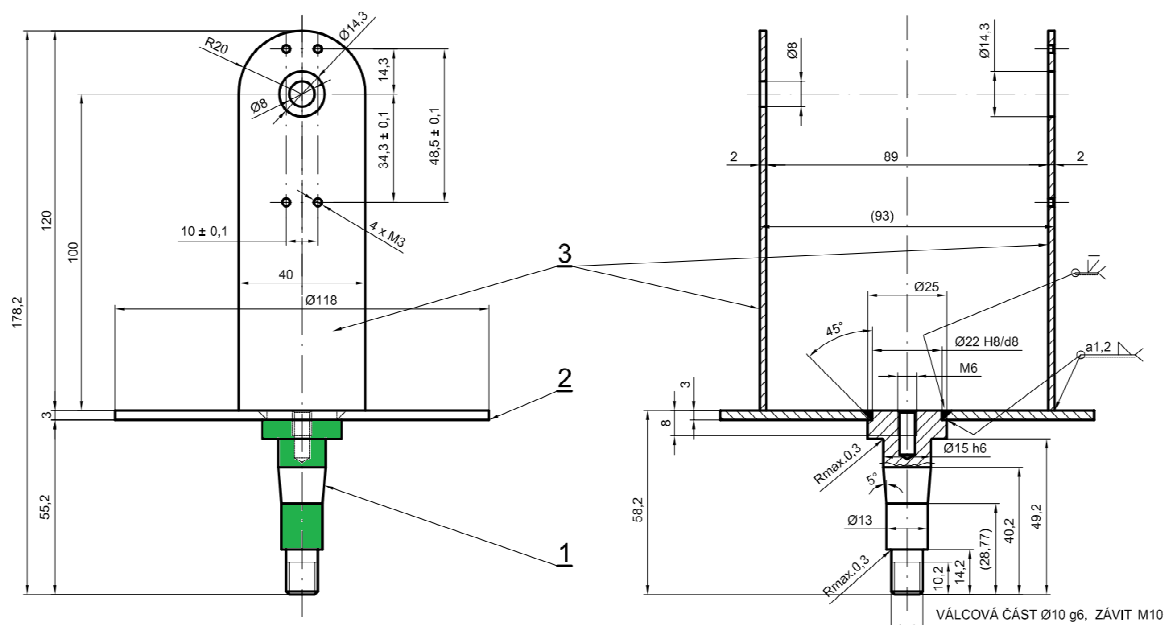
Původní představa byla použít v ose sklápění nosníku hřídel. Použité servopohony ale kvůli svému vnitřnímu uspořádání převodů neumožňují použít průběžnou hřídel, která by procházela skrz pohon. Tato skutečnost představuje konstrukční problém. Jeho řešením se jeví hřídel z konstrukce vypustit, čímž se zároveň sníží hmotnost a hrozící vůli v ose otáčení lze minimalizovat použitím kluzného ložiska s přesným uložením kolmo na osu protějšího pohonu.



obr. 2.23 konstrukce základny manipulátoru

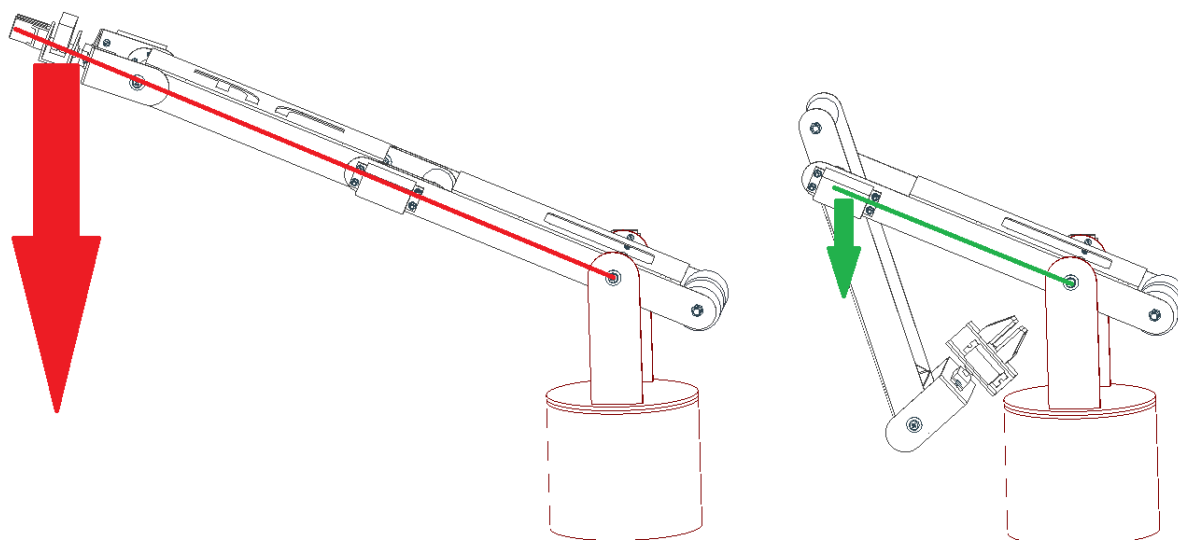
Základna manipulátoru je navržena jako stacionární. Proto je z důvodů úspory nákladů zhotovena ze železa a váží 2,65kg. Pro demonstrační účely toto řešení přináší jednu velkou výhodu – není potřeba upevňovat základnu k podkladu.

Pro budoucí montáž na podvozek mobilního robota bude nutné vyměnit tuto základnu za lehčí a jednodušší model. Obrázek 2.23 znázorňuje pozice umístění ložisek a jejich funkci. Horní zeleně označené ložisko (typ 61 800) snižuje tření a omezuje radiální vůle. Spodní kuličkové ložisko (typ 51 102) pak slouží k vymezení axiálních vůlí.



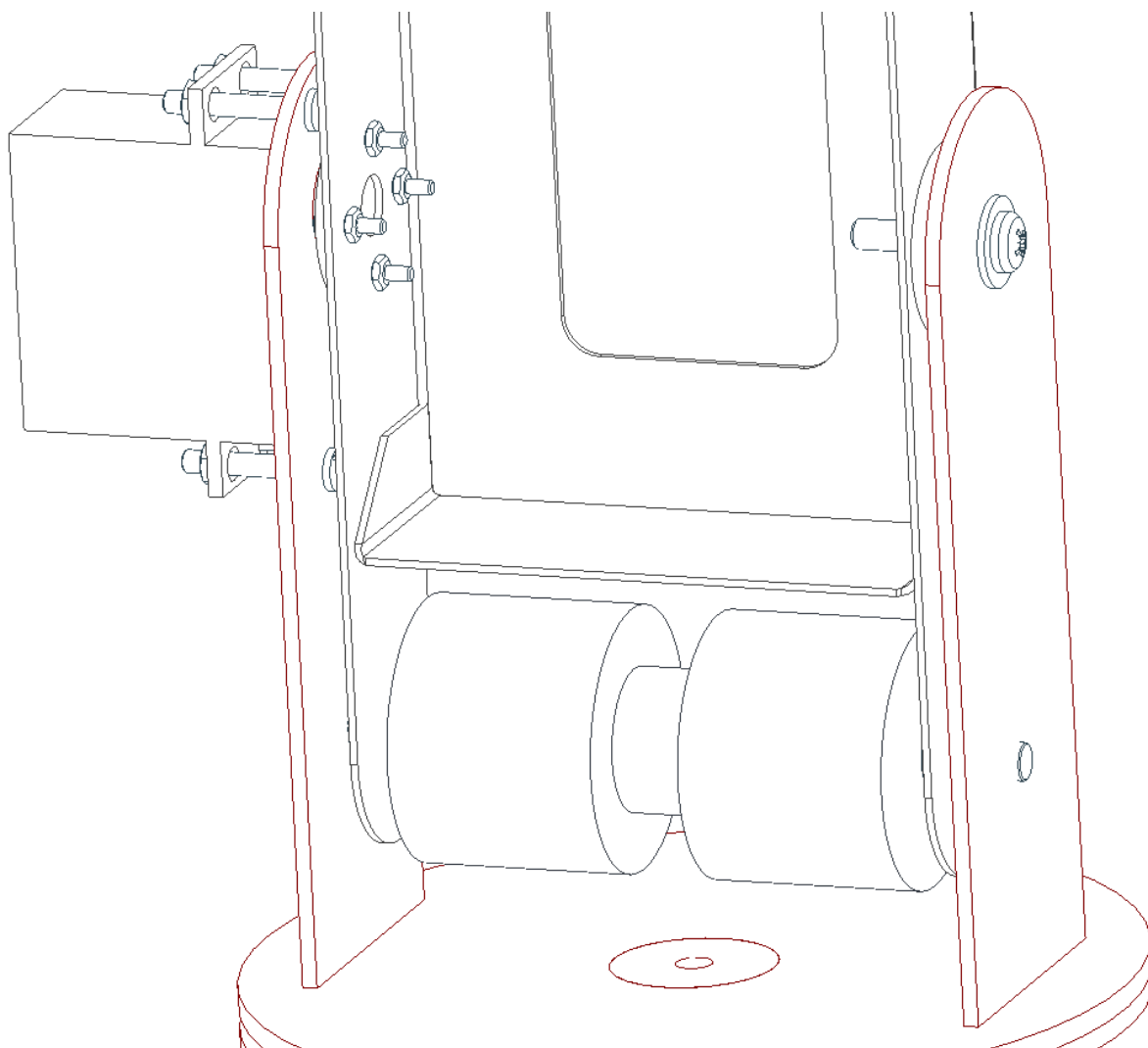
obr. 2.24 otočná část základny

Konstrukce otočné části základny vyžaduje vysokou přesnost výroby. Důležitá je zde zejména sousost všech zeleně označených průměrů hřídele, která propojuje pohon s otočnou částí základny.



obr. 2.25 rozdíl v zatížení pohonů v různých polohách

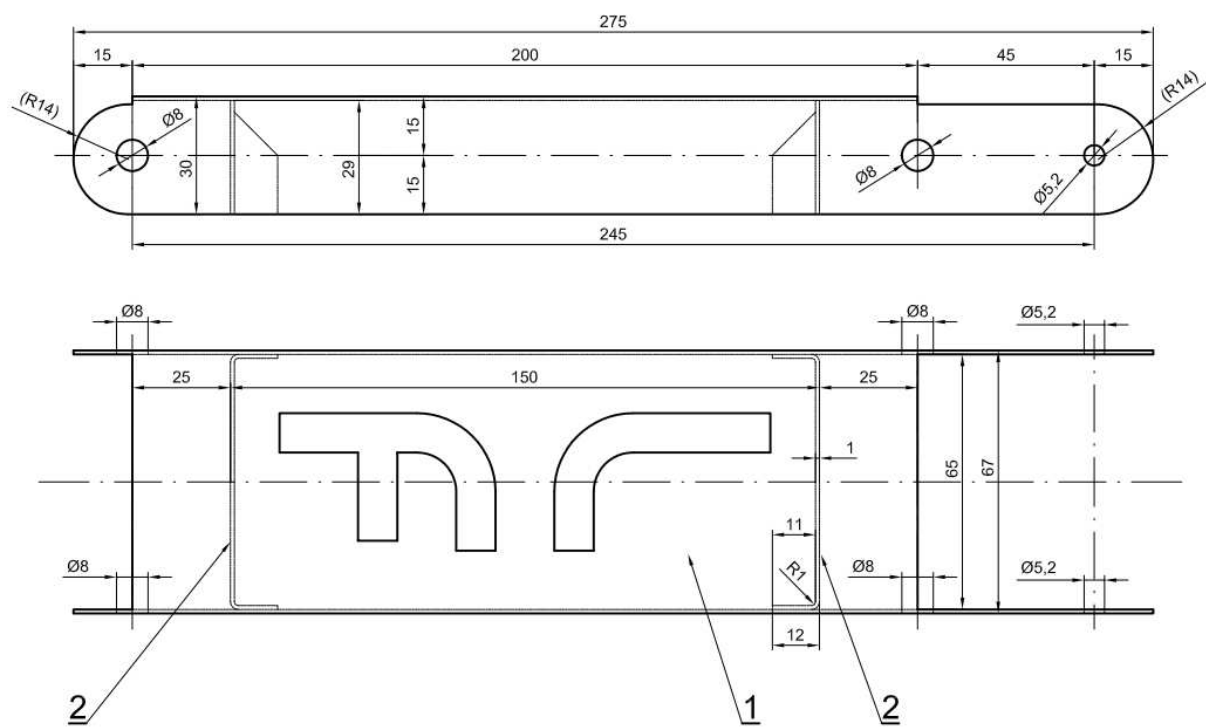
## Uložení pohonů



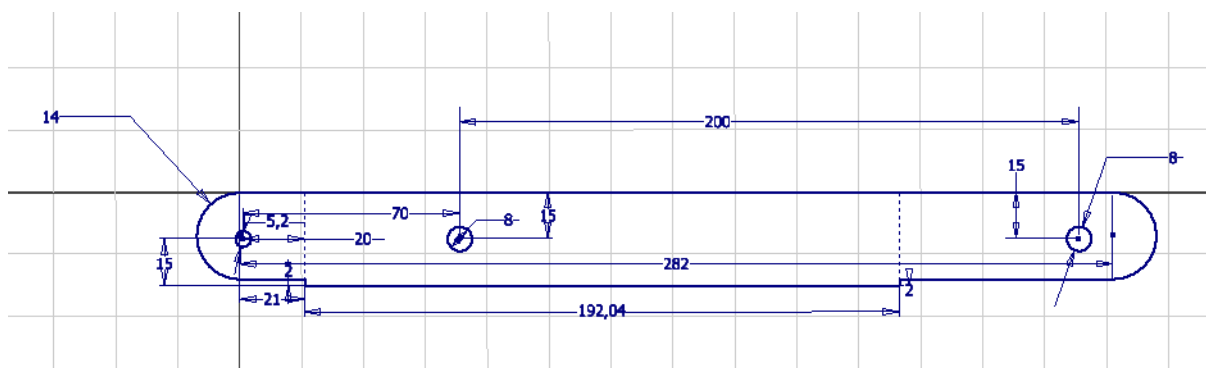
obr. 2.26 excentrické uložení pohonu druhého kloubu pro sklápění nosníku  
uložení ostatních pohonů je navrženo obdobně

Prvotní návrh konstrukce jsem vytvořil v programu Autocad od firmy Autodesk. Tato 2D CAD aplikace mi umožnila vytvořit si celkovou představu o podobě konstrukce a postupu její realizace. Poté jsem z 2D podkladů celou konstrukci vymodeloval v aplikaci Autodesk Inventor 2011.

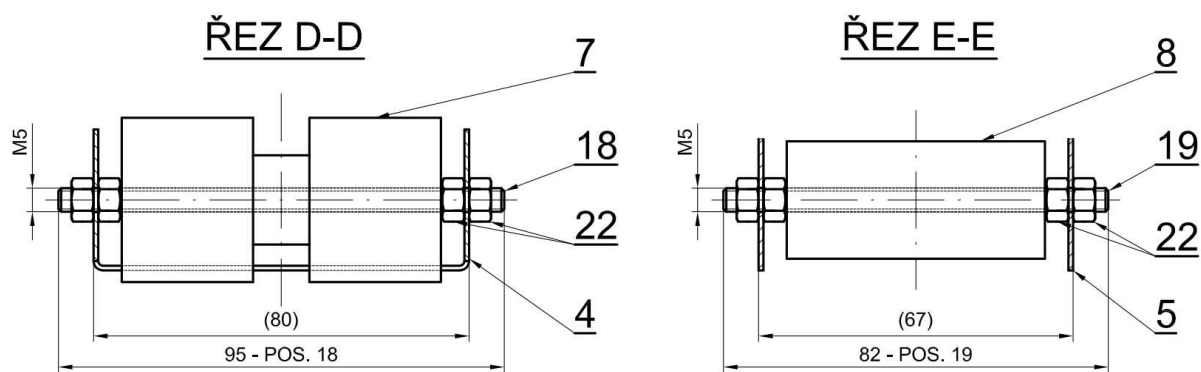
Na tomto místě bych se rád krátce zmínil o možnostech aplikace Inventor. Tato aplikace slouží k 3D CAD návrhu strojních komponent. Obsahuje rozsáhlou databázi normalizovaných materiálů a součástí a na základě znalosti technických norem umožňuje optimalizovat výslednou konstrukci, provádět funkční simulace, případně automaticky navrhovat vhodné úpravy ve vyvíjené konstrukci.



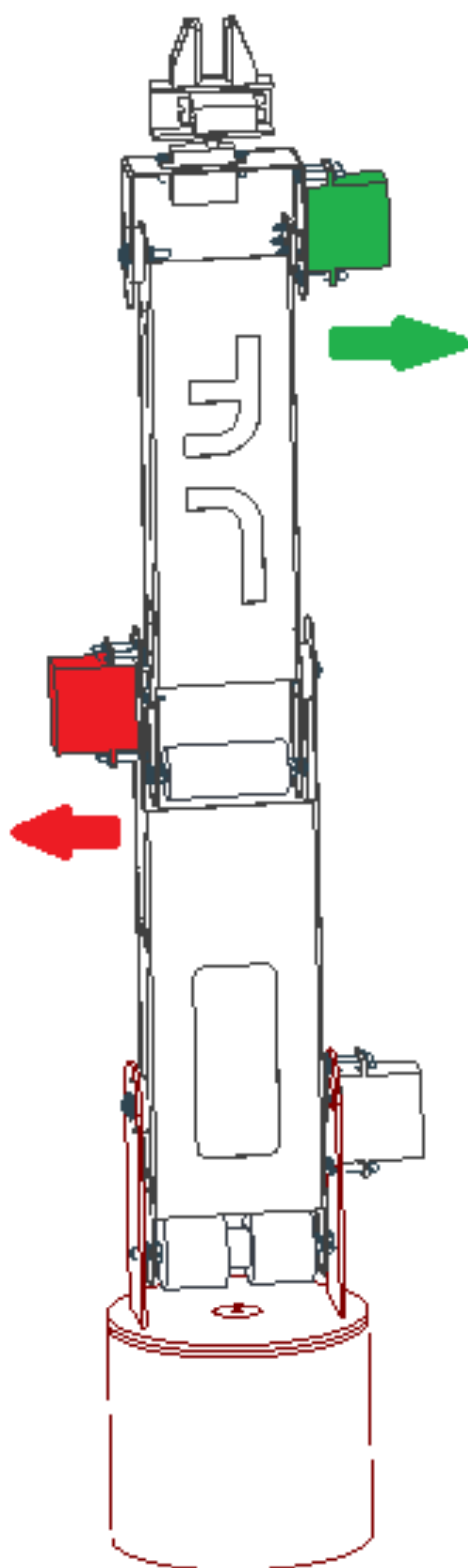
obr. 2.27 druhý nosník - Autocad výkres



obr. 2.28 3D modelování z 2D výkresu v aplikaci Inventor



obr. 2.29 olověná vyvažovací závaží pro první a druhý nosník



obr. 2.30 vyvážení konstrukce

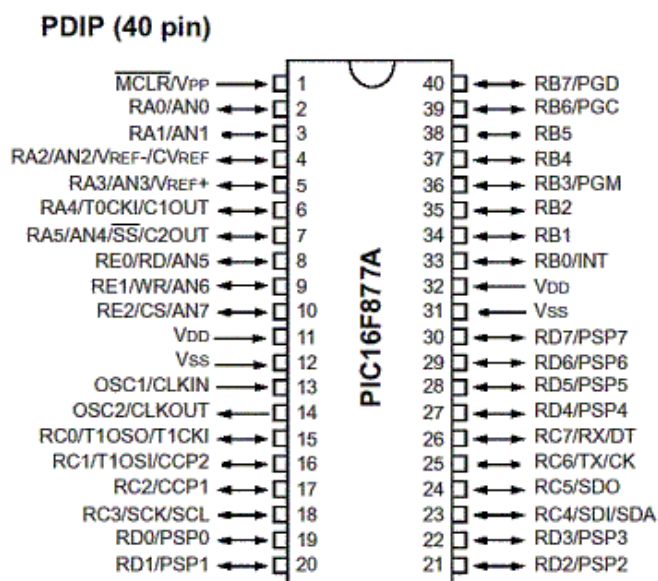
Umístění pohonů pro druhý a třetí nosník je voleno tak, aby byla konstrukce ve všech osách maximálně vyvážená.

## Mikrořadiče



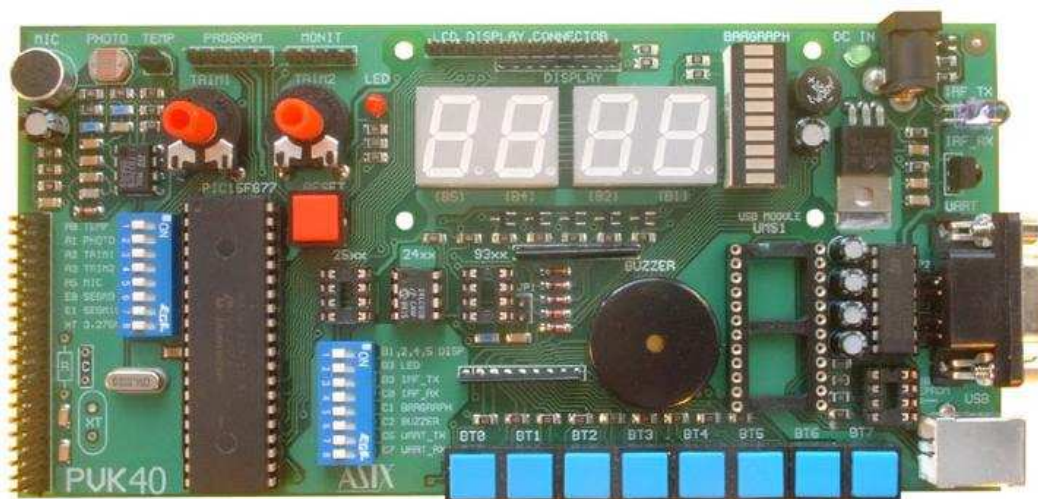
obr. 2.31 mikrořadič PIC16F877a od firmy Microchip

Nejnižší hardwarová úroveň je řízena osmibitovým mikrořadičem PIC16F877a od firmy Microchip. Tento integrovaný obvod pracuje s hodinovým signálem až 20MHz, má 14kB programové paměti a programovatelné vstupy/výstupy. Obsahuje hardwarový časovač, watchdog, RS232 a I2C rozhraní a osmikanálový desetibitový ADC převodník.



obr. 2.32 schéma programovatelných vývodů mikrořadiče

Odladování elektronické části konstrukce probíhalo na vývojové desce PVK40 od firmy ASIX, osazené tímto MCU.



obr. 2.33 vývojová deska PVK40 pro mikroprocesory od firmy ASIX

Z předchozích konstrukcí mi byl znám problém s časováním smyčky ovládající pohony. Jelikož jsem se rozhodl použít analogová serva, která nemají paměť polohy, je nutno je neustále zásobovat informací o požadované poloze. Odesílání signálu v hlavní smyčce programu je nejméně vhodným řešením, jelikož při každé změně programu je pak nutno znovu spočítat čas potřebný k vykonání instrukcí a kód odpovídajícím způsobem upravit. Tento přístup je vhodný jen, pokud mikrokontroler zastává pouze úlohu řízení serva (například servotester).

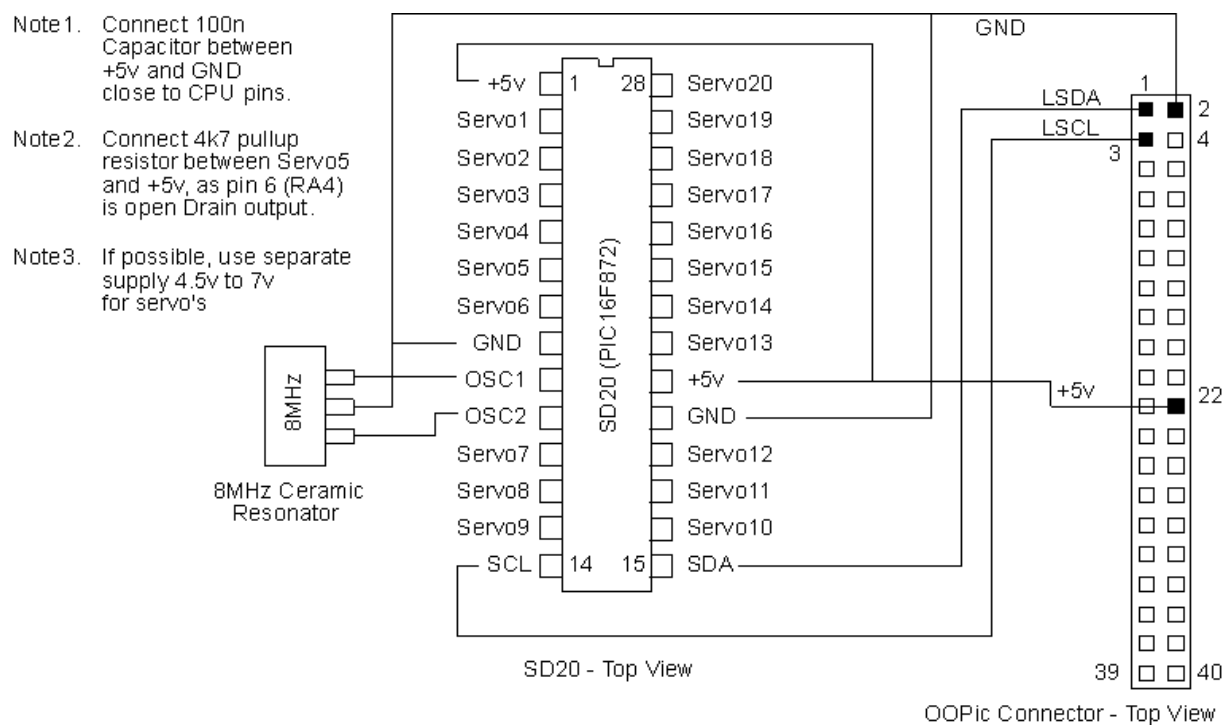
Elegantnější řešení je použití hardwarového časovače s přerušením. V okamžik kdy je potřeba vykonat obsluhu přerušení, odskočí program z hlavní smyčky do obsluhy přerušení a poté opět přepne kontext zpět a vrátí se k původní činnosti na místo, kde ji přerušil. Pokud je ale kód v přerušení příliš dlouhý, nestihne se vykonat, než se přerušení zavolá znovu a máme opět náš problém zpátky.

Proto ve své konstrukci používám mikrokontrolery dva. Hlavní mikrokontroler komunikuje s PC a předává mu stav senzorů. Zároveň po sběrnici I2C komunikuje s obvodem SD20, který zajišťuje přesné časování řídicích signálů pro jednotlivé servopohony. Hlavním přínosem je, že když změním kód v hlavním mikrořadiči, nemusím se starat o kontrolu řídicích signálů pro serva. Další výhodou je, že obvod SD20 obsahuje registry, které uchovávají nastavenou polohu a tak není potřeba odesílat požadovanou polohu pohonu stále dokola, pokud se nezměnila. Zároveň se tak ušetří pár bajtů v paměti hlavního mikrořadiče. Obvodem SD20 jsem tak vlastně udělal z analogových serv digitální za zlomek ceny.



obr. 2.34 obvod SD20

mikrokontroler PIC16F872 naprogramovaný k řízení modelářských servopohonů



obr. 2.35 schéma zapojení obvodu SD20

## REALIZACE KONSTRUKCE

Mé první praktické konstruktérské pokusy samozřejmě vycházely z vlastní práce v dílně a garáži. Především nedostatečná technická vybavenost se bohužel výrazně promítla do kvality výsledné konstrukce.

Zpočátku jsem nezavrhoval žádnou z možností, která mě napadla. Vzniklo tak postupně několik testovacích konstrukcí jednoho kloubu s nosníky vyrobenými z Merkuru, novodurových instalatérských odpadních trubek, tvrzeného plastu, hliníku a duralových plechů.

Hlavní problémy těchto konstrukcí byly dva. Nosníky vzdálenější od základny byly upevněny k předchozí konstrukci pouze hřídelí servopohonu. Jelikož použítá serva nemají průběžnou hřídel, vznikala na jejich převodech nežádoucí vůle, která se na konci konstrukce velmi znatelně projevovala. První funkční prototyp dosahoval při celkové délce 20 cm s použitím pouze 3 kloubů až 1cm nepřesnosti, která se nejvíce projevovala při zvýšeném zatížení (uchopení předmětu). Druhý problém rovněž souvisel s použitým typem konstrukce, neboť pro dostatečnou tuhost nosníků bylo třeba použít více materiálu čímž se zvyšovala hmotnost.

Na výrobě finální části mechanické konstrukce jsem spolupracoval se společností Triangl s.r.o. , která se zabývá konstrukcí strojírenských zařízení a jako jedna z mála u nás je schopna pracovat s titanovými materiály. K realizaci konstrukce se mi tak zpřístupnil soustruh, ohýbačka plechů, přesné vyřezávání jednotlivých nosníků vodním paprskem a především pak dlouho hledaný ideální materiál – titan. V konečné fázi je použití titanu výhradně pozitivním přínosem. Během návrhu a výroby však tento materiál působí spíše komplikace. Titan je hořlavý a špatně snáší vysoké teploty. Proto se nemůže řezat laserem a při jeho svařování se nepřipouští chyby. Další nevýhodou kromě vysoké ceny cca 2500Kč/kg je, že titan nelze svařovat s jinými materiály. To přináší další mírné zvýšení hmotnosti konstrukce v podobě šroubových spojů.

První základní díl konstrukce je zhotoven ze železa. Na tomto místě je vyšší hmotnost výhodou, neboť poskytuje celé konstrukci pevnou základnu. Rovněž se zde nabídl prostor pro robustní uložení prvního pohonu, jehož mechanické vůle jsou omezeny dvěma ložisky.

Všechny následující části naopak šetří hmotnost doslova na každém milimetru. Pořád ale se zřetelem na nutnost zachování maximální tuhosti konstrukce.



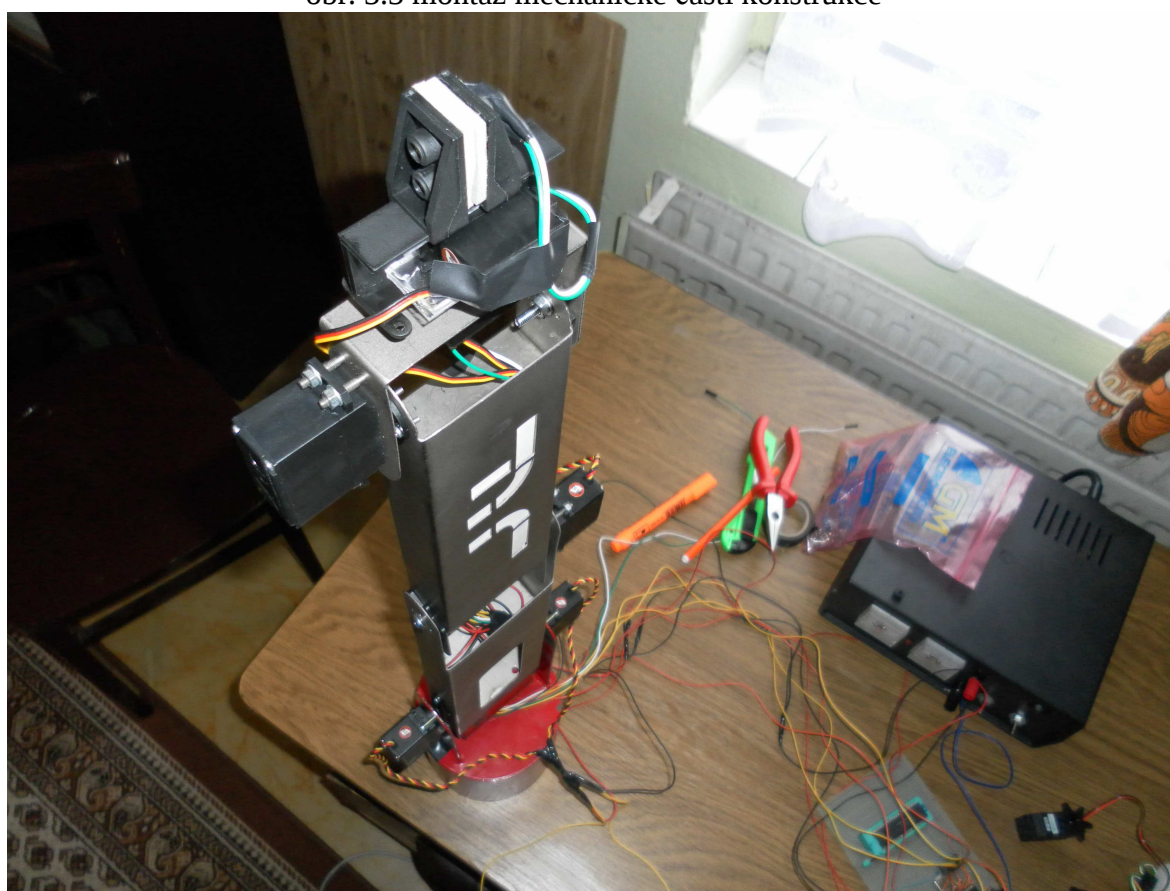
obr. 3.1 základna manipulátoru



obr. 3.2 montáž unašečů k nosníkům



obr. 3.3 montáž mechanické části konstrukce



obr. 3.4 sestavený manipulátor v kalibrační poloze

## Přímá kinematická úloha

Slouží k určení pozice koncového členu (chapadla). Dosazením známých úhlů natočení jednotlivých motorů pohonů do transformační matice  $A_5^0$  získáme aktuální pozici koncového členu a jeho orientaci.

## Inverzní kinematická úloha

Řeší problém nastavení pozice jednotlivých pohonů, abychom dosáhli koncovým členem požadovaných souřadnic (x,y,z).

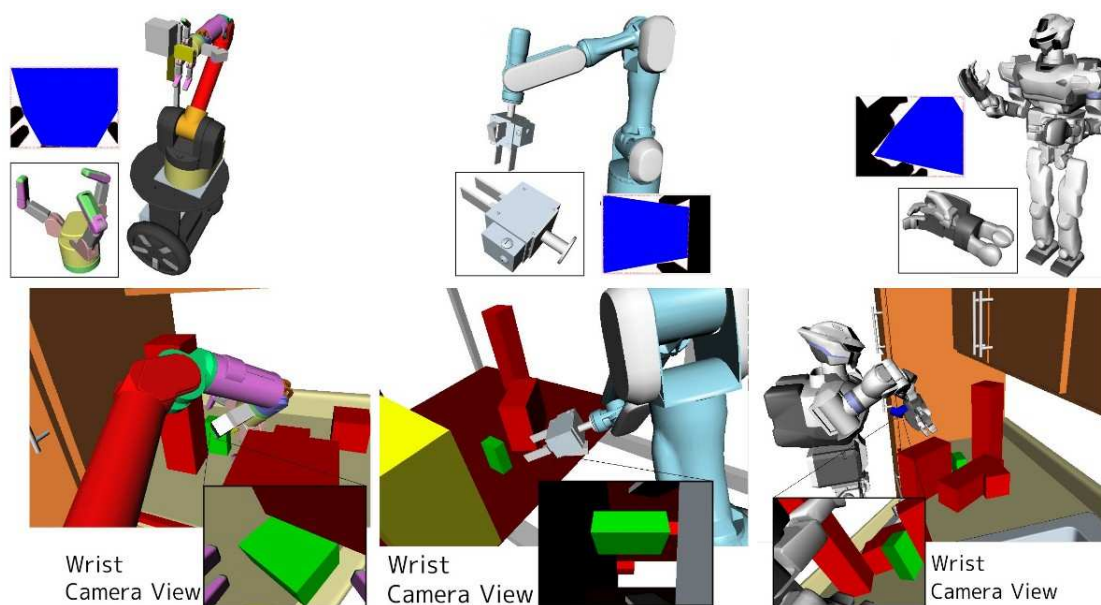
Řešení tohoto problému není zcela triviální, jak by se mohlo na první pohled zdát. Přestože člověk nezná přesné fyzické rozměry svých končetin a nepozná ani jaký přesně úhel zrovna svírá každý jeho kloub, je s pomocí ostatních smyslů schopen přesně uchopit předmět. O co se ale náš lidský úkol zkomplikuje, když si vybereme předmět, který chceme uchopit a pokusíme se o to bez použití zraku.

Kromě zraku si můžeme pomoci ještě hmatem, který v případě robota mohou relativně snadno nahradit elektronické senzory.

Naučit robota vidět je podstatně složitější. Snad všichni živí tvorové, kteří k orientaci využívají alespoň částečně svůj zrak mají nejméně dvě oči. To jim pak umožňuje prostorové vnímání. V robotice každý další pohled na zkoumanou scénu zvyšuje složitost algoritmu a výpočetní složitost rozpoznávání obrazu.

Obraz snímáný kamerou se obvykle předzpracuje – vyrovná se jas, upraví se kontrast a poté nastupují nejrůznější algoritmy, které v obraze vyhledávají hrany a z nich sestavují model pozorovaného objektu.

Ve známém prostředí si můžeme pomoci vymodelováním pracovního prostoru robota. Pokud pak dokážeme, aby se robot v prostoru orientoval, tj. věděl v každém okamžiku, kde se přesně nachází, můžeme si řešení tohoto problému pro některé konkrétní situace podstatně usnadnit.



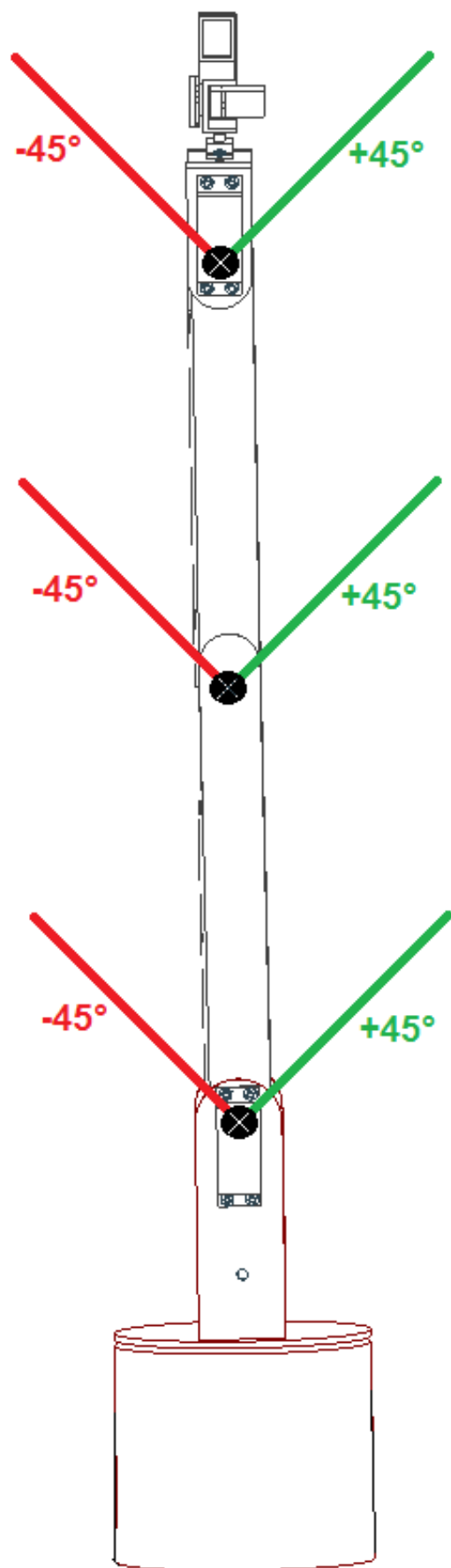
obr. 3.5 robot pracující ve zmapovaném prostoru



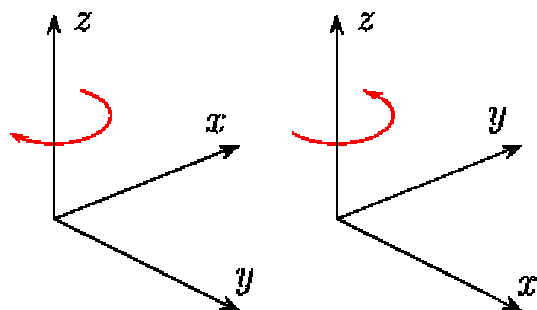
obr. 3.6 kvalifikační problém – kolik je na obrázku skutečných židlí?

Tento přístup je podstatně jednodušší a je proto v praxi nejčastěji používán. Nevýhodou je, že pokud se vnější prostředí nepředpokládaným způsobem změní, robot to nemusí zaznamenat a problém je na světě.

Ve složitější manufakturní výrobě je tento problém o to horší, že na práci jednoho stroje může záviset práce mnoha dalších a tak se může stát, že banální závada způsobená změnou prostředí vyřadí z chodu celou továrnu.

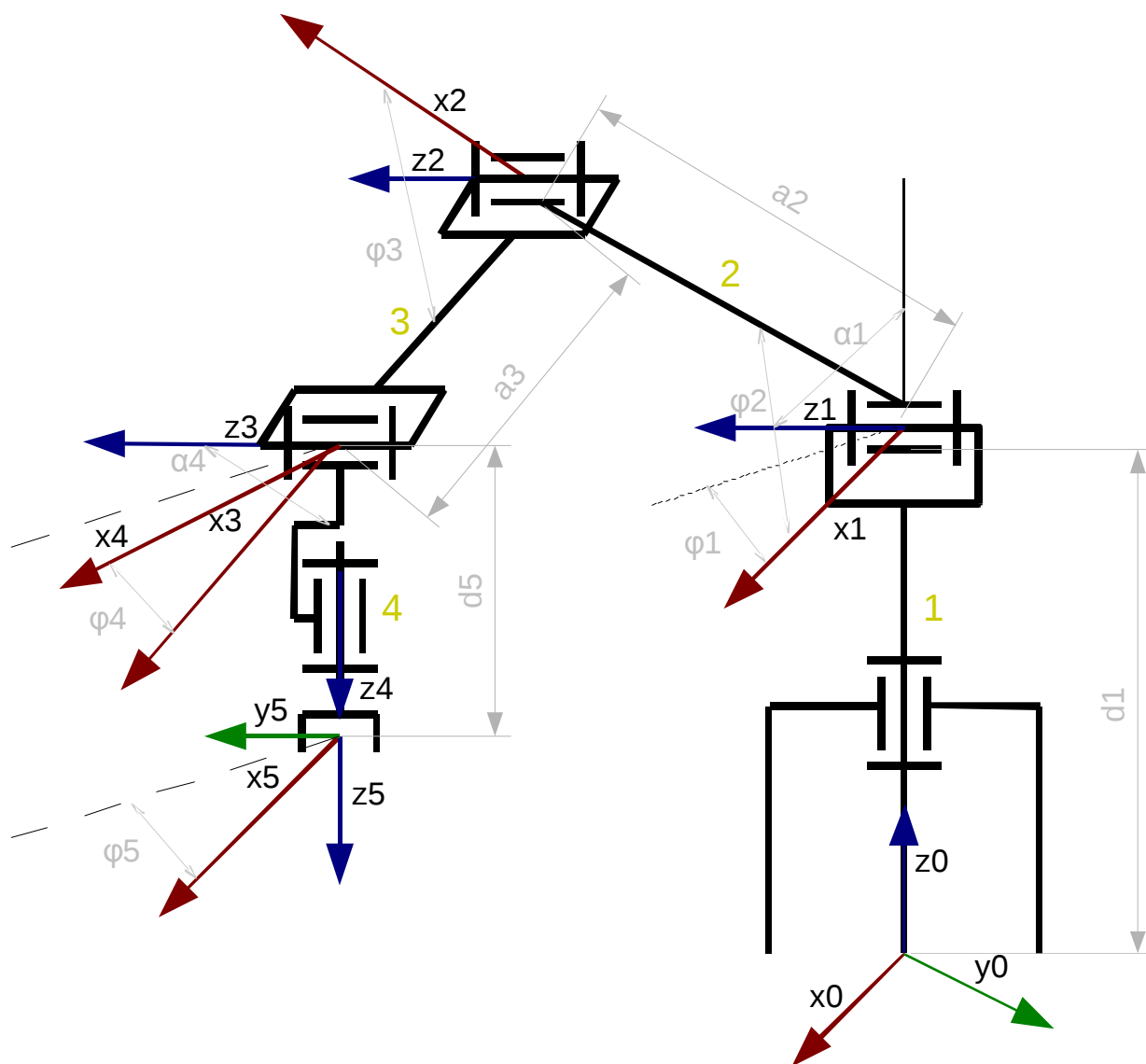


V celém systému budeme uvažovat pravotočivou kartézskou soustavu souřadnic.



Obr. 3.7 vlevo levotočivá a vpravo pravotočivá soustava souřadnic

Obr. 3.8 smysl otáčení pohonů



obr. 3.9 schéma navrženého manipulátoru s 5 stupni volnosti

Hodnoty proměnných pro schéma (závislé na definici souřadných systémů):

$$a_1 = 0; \alpha_1 = 90^\circ; d_2 = 0; \alpha_2 = 0^\circ; d_3 = 0; \alpha_3 = 0^\circ; \\ d_4 = 0; a_4 = 0; \alpha_4 = 90^\circ; a_5 = 0; \alpha_5 = 0^\circ; \varphi_3 < 0; \varphi_5 < 0$$

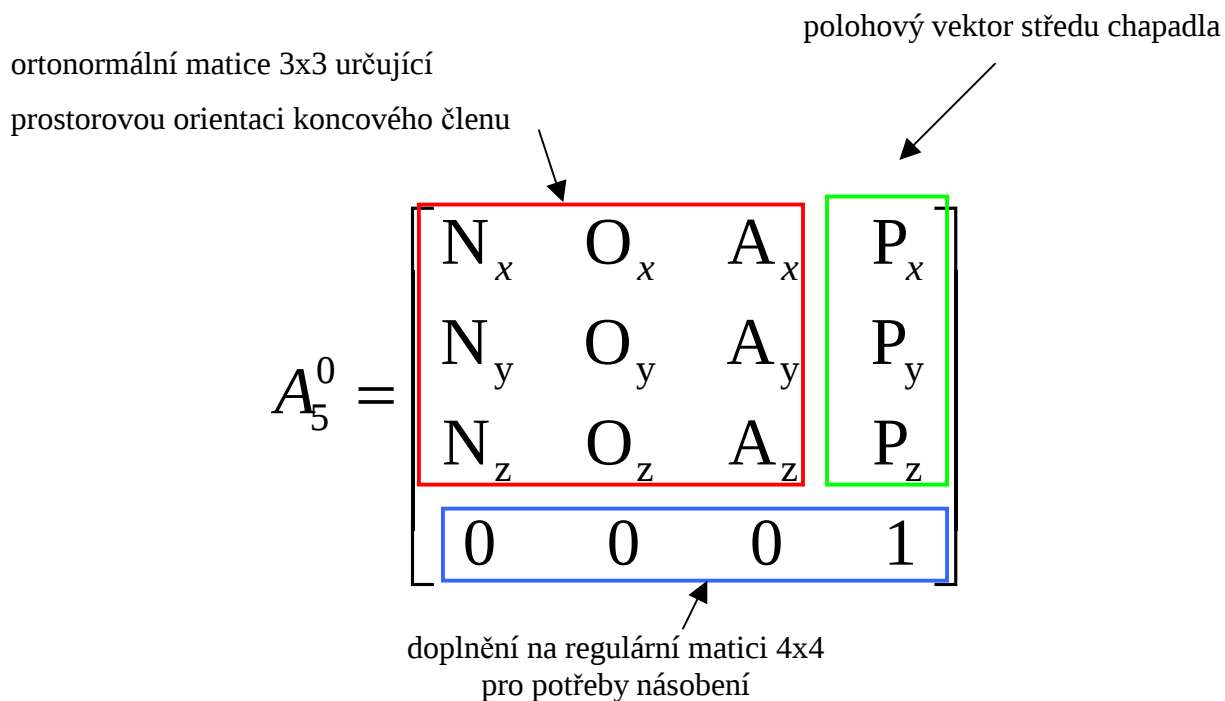
Znamé konstanty dané fyzickými rozměry jednotlivých ramen manipulátoru:

$$d_1 = 210; a_2 = 200; a_3 = 200; d_5 = 100$$

Transformační matice z 5. souřadného systému (střed chapadla) do 0. (základna manipulátoru) vzniklá postupným násobením transformačních matic.

$$A_5^0 = \begin{bmatrix} c_1 \cdot c_{234} \cdot c_5 + s_1 \cdot s_5 & -c_1 \cdot c_{234} \cdot s_5 + s_1 \cdot c_5 & c_1 \cdot s_{234} & c_1 \cdot (s_{234} \cdot d_5 + c_{23} \cdot a_3 + c_2 \cdot a_2) \\ s_1 \cdot c_{234} \cdot c_5 - c_1 \cdot s_5 & -s_1 \cdot c_{234} \cdot s_5 - c_1 \cdot c_5 & s_1 \cdot s_{234} & s_1 \cdot (s_{234} \cdot d_5 + c_{23} \cdot a_3 + c_2 \cdot a_2) \\ s_{234} \cdot c_5 & -s_{234} \cdot s_5 & -c_{234} & -c_{234} \cdot d_5 + s_{23} \cdot a_3 + s_2 \cdot a_2 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Význam jednotlivých prvků matice:



Použité značení – zkrácený zápis:

$$c_i = \cos(\varphi_i); i \in \{1,2,3,4,5\}$$

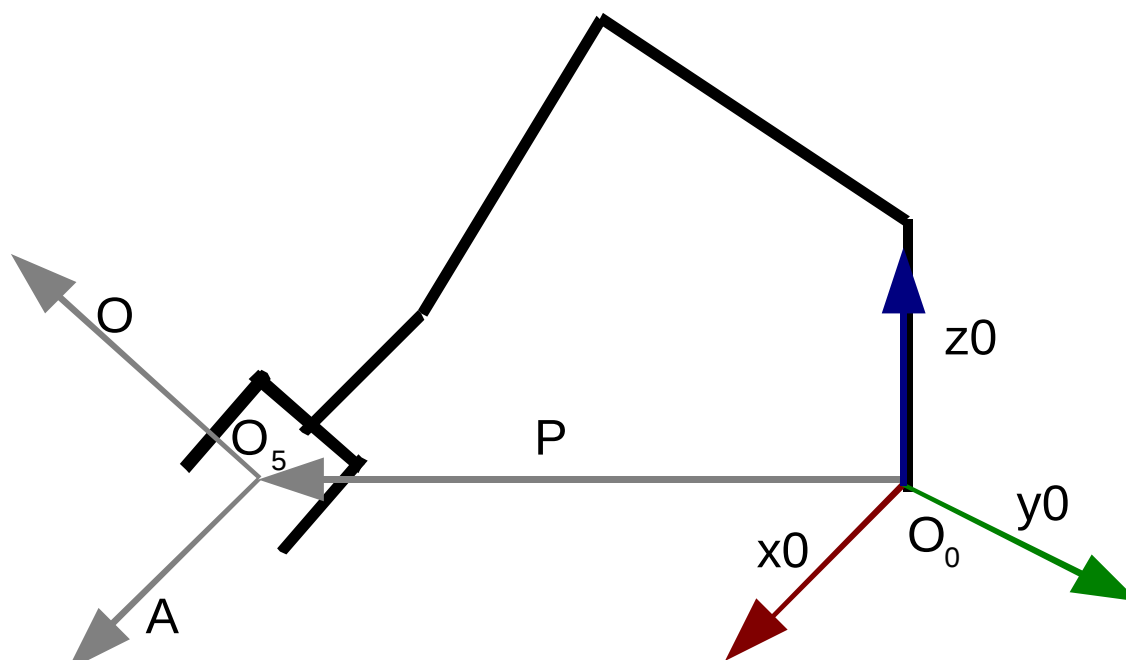
$$s_i = \sin(\varphi_i); i \in \{1,2,3,4,5\}$$

$$c_{234} = \cos(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4)$$

$$s_{234} = \sin(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4)$$

$$c_{15} = \cos(\varphi_1 + \varphi_5)$$

$$s_{15} = \sin(\varphi_1 + \varphi_5)$$



obr. 3.10 význam jednotlivých vektorů transformační matice  $A_5^0$

A - přístupový vektor

O - vektor orientace

P - polohový vektor středu chapadla

Matice  $3 \times 3$  určuje prostorovou polohu koncového členu chapadla. Suma každého řádku jakožto i suma každého sloupce této matice je vždy rovna 1. Rozsah možných hodnot této matice orientace je navíc ještě omezen konstrukčními možnostmi manipulátoru.

#### Volba souřadných systémů

Je-li definovaný systém  $(O_{i-1}, X_{i-1}, Y_{i-1}, Z_{i-1})$  spojený s  $(i-1)$  členem, volíme na  $i$ -tem členu  $(O_i, X_i, Y_i, Z_i)$  osy souřadných systémů následovně:

$Z_i$  - osa rotace či posuvu členu  $(i+1)$  vzhledem k  $i$ -tému členu

$X_i$  - osa společné kolmice os  $Z_{i-1}$  a  $Z_i$

$Y_i$  - kolmice k  $X_i, Z_i$ , tak aby  $Z_i$  byl pravotočivý systém

## Definice úhlů a posunutí

úhel  $\varphi_i$  – natočení osy  $X_i$  vůči  $X_{i-1}$  okolo osy  $Z_{i-1}$

$d_i$  – vzdálenost os  $X_{i-1}$  a  $X_i$  podél společné normály  $Z_{i-1}$

úhel  $\alpha_i$  – úhel sevřený osami  $Z_{i-1}$  a  $Z_i$ , orientovaný kladně ve směru otočení okolo osy  $X_i$

$a_i$  – vzdálenost os  $Z_{i-1}$  a  $Z_i$  podél společné normály  $X_i$

## Soustava rovnic:

$$A_{11} = c_1 \cdot c_{234} \cdot c_5 + s_1 \cdot s_5$$

$$A_{12} = -c_1 \cdot c_{234} \cdot s_5 + s_1 \cdot c_5$$

$$A_{13} = c_1 \cdot s_{234}$$

$$A_{21} = s_1 \cdot c_{234} \cdot c_5 - c_1 \cdot s_5$$

$$A_{22} = -s_1 \cdot c_{234} \cdot s_5 - c_1 \cdot c_5$$

$$A_{23} = s_1 \cdot s_{234}$$

$$A_{31} = s_{234} \cdot c_5$$

$$A_{32} = -s_{234} \cdot s_5$$

$$A_{33} = -c_{234}$$

$$A_{14} = c_1 \cdot (s_{234} \cdot d_5 + c_{23} \cdot a_3 + c_2 \cdot a_2)$$

$$A_{24} = s_1 \cdot (s_{234} \cdot d_5 + c_{23} \cdot a_3 + c_2 \cdot a_2)$$

$$A_{34} = -c_{234} \cdot d_5 + s_{23} \cdot a_3 + s_2 \cdot a_2 + d_1$$

Úprava rovnic:

$$A_{11} = -A_{33} \cdot c_1 \cdot c_5 + s_1 \cdot s_5$$

$$A_{12} = A_{33} \cdot c_1 \cdot c_5 + s_1 \cdot c_5$$

$$A_{21} = -A_{33} \cdot s_1 \cdot c_5 - c_1 \cdot s_5$$

$$A_{22} = A_{33} \cdot s_1 \cdot s_5 - c_1 \cdot c_5$$

$$A_{13} = c_1 \cdot s_{234}$$

$$A_{23} = s_1 \cdot s_{234}$$

$$A_{31} = s_{234} \cdot c_5$$

$$A_{32} = -s_{234} \cdot s_5$$

$$A_{33} = -c_{234}$$

$$A_{14} = A_{13} \cdot d_5 + c_1 \cdot (c_{23} \cdot a_3 + c_2 \cdot a_2)$$

$$A_{24} = A_{23} \cdot d_5 + s_1 \cdot (c_{23} \cdot a_3 + c_2 \cdot a_2)$$

$$A_{34} = A_{33} \cdot d_5 + s_{23} \cdot a_3 + s_2 \cdot a_2 + d_1)$$

$$A_{11} + A_{22} = A_{33} \cdot (s_1 \cdot s_5 - c_1 \cdot c_5) + s_1 \cdot s_5 - c_1 \cdot c_5 = (1 + A_{33}) \cdot (s_1 \cdot s_5 - c_1 \cdot c_5) = -(1 + A_{33}) \cdot (c_1 \cdot c_5 - s_1 \cdot s_5), \text{ ale}$$

$$c_{15} = c_1 \cdot c_5 - s_1 \cdot s_5 \Rightarrow$$

$$A_{11} + A_{22} = -(1 + A_{33}) \cdot (c_{15})$$

//krok (1a)

$$A_{12} - A_{21} = A_{33} \cdot (c_1 \cdot s_5 + s_1 \cdot c_5) + s_1 \cdot c_5 + c_1 \cdot s_5 = (1 + A_{33}) \cdot (s_1 \cdot c_5 + c_1 \cdot s_5), \text{ ale}$$

$$s_{15} = s_1 \cdot c_5 + c_1 \cdot s_5 \Rightarrow$$

$$A_{12} - A_{21} = (1 + A_{33}) \cdot (s_{15})$$

//krok (1b)

$$A_{11} - A_{22} = -A_{33} \cdot c_1 \cdot c_5 - A_{33} \cdot s_1 \cdot s_5 + s_1 \cdot s_5 + c_1 \cdot c_5 = (1 - A_{33}) \cdot (s_1 \cdot s_5 + c_1 \cdot c_5)$$

$$A_{11} - A_{22} = (1 - A_{33}) \cdot (c_1 \cdot c_5 + s_1 \cdot s_5)$$

//krok (2a)

$$A_{12} + A_{21} = A_{33} \cdot (c_1 \cdot s_5 - s_1 \cdot c_5) + s_1 \cdot c_5 - c_1 \cdot s_5 = (1 - A_{33}) \cdot (s_1 \cdot c_5 - c_1 \cdot s_5)$$

$$A_{12} + A_{21} = (1 - A_{33}) \cdot (s_1 \cdot c_5 - c_1 \cdot s_5)$$

//krok (2b)

a) necht'  $A_{33} \neq -1$ :

//krok (3)

pak z 1a,b vypočteme

$$\begin{aligned}\cos(\varphi_1 + \varphi_5) &= -\frac{A_{11} + A_{22}}{1 + A_{33}} \\ \sin(\varphi_1 + \varphi_5) &= \frac{A_{12} - A_{21}}{1 + A_{33}}\end{aligned}$$

existuje právě jedno řešení  $(\varphi_1 + \varphi_5)$

b) necht'  $A_{33} \neq 1$ :

//krok (4)

pak z 2a,b vypočteme

$$\begin{aligned}\cos(\varphi_1 - \varphi_5) &= \frac{A_{11} - A_{22}}{1 - A_{33}} \\ \sin(\varphi_1 - \varphi_5) &= \frac{A_{12} + A_{21}}{1 - A_{33}}\end{aligned}$$

pro tyto rovnice existuje právě jedno řešení  $(\varphi_1 - \varphi_5)$

c) necht' je  $|A_{33}| < 1$  pak a) a b) je splněno.

Tedy z a) a b) jednoznačně určíme úhly:

$$\varepsilon_1 = \varphi_1 + \varphi_5$$

$$\varepsilon_2 = \varphi_1 - \varphi_5$$

odtud

$$\varphi_1 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}; \varphi_5 = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2}$$

//krok (5)

Úhly  $\varphi_1, \varphi_5$  jsou určeny jednoznačně. Je ale nutno provést korekci přičtením  $2k\pi$

$$0 \leq \varphi_1 \leq 2\pi ; 0 \leq \varphi_5 \leq 2\pi$$

$$\text{resp. } -\pi \leq \varphi_1 \leq \pi ; -\pi \leq \varphi_5 \leq \pi$$

neboť úhly  $\varepsilon_1, \varepsilon_5$  jsou určeny s přesností až na násobek  $2\pi$

d) jestliže  $|A_{33}| = 1$  pak nelze určit  $\varphi_1, \varphi_5$  jednoznačně, existuje nekonečně mnoho řešení

e) jestliže  $|A_{33}| < 1$  máme

$$A_{13} \cdot c_1 + A_{23} \cdot s_1 = c_1^2 \cdot s_{234} + s_1^2 \cdot s_{234} = s_{234} = \sin(\varphi_1 + \varphi_3 + \varphi_4)$$

a užitím  $A_{33}$  dostáváme dvě rovnice

//krok (6)

$$\begin{aligned} \sin(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4) &= A_{13} \cdot c_1 + A_{23} \cdot s_1 \\ \cos(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4) &= -A_{33} \end{aligned}$$

pro které existuje právě jedno řešení  $(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4)$

tedy  $\varepsilon_3 = (\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4) \Rightarrow$  existuje právě jeden

f) Nyní již známe úhel  $\varphi_1$  a z rovnic pro  $A_{14}, A_{24}, A_{34}$ , dostáváme:

$$k_1 = (A_{14} - A_{13} \cdot d_5) \cdot c_1 + (A_{24} - A_{23} \cdot d_5) \cdot s_1 = c_{23} \cdot a_3 + c_2 \cdot a_2$$

$$k_2 = A_{34} - A_{33} \cdot d_5 - d_1 = s_{23} \cdot a_3 + s_2 \cdot a_2$$

nebo-li

//krok (7)

$$\begin{aligned} c_{23} \cdot a_3 + c_2 \cdot a_2 &= k_1 \\ s_{23} \cdot a_3 + s_2 \cdot a_2 &= k_2 \end{aligned}$$

g)

$$k_1^2 + k_2^2 = a_3^2 \cdot c_{23}^2 + 2a_2 \cdot a_3 \cdot c_2 \cdot c_{23} + a_2^2 \cdot c_2^2 + a_3^2 \cdot s_{23}^2 + 2a_2 \cdot a_3 \cdot s_2 \cdot s_{23} + a_2^2 \cdot s_2^2 =$$

$$= a_3^2 + a_2^2 + 2a_2 \cdot a_3 \cdot (c_{23} \cdot c_2 + s_{23} \cdot s_2) = a_3^2 + a_2^2 + 2a_2 \cdot a_3 \cdot c_3$$

neboť  $\cos(\varphi_3) = \cos(\varphi_2 + \varphi_3 - \varphi_2) = \cos(\varphi_2 + \varphi_3) \cdot \cos(\varphi_2) + \sin(\varphi_2 + \varphi_3) \cdot \sin(\varphi_2)$

//krok (8)

$$\cos(\varphi_3) = \frac{k_1^2 + k_2^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2 \cdot a_3} \Rightarrow \varphi_3$$

existují obecně 2 řešení v úhlu

$$0 \leq \varphi_3 \leq 2\pi$$

$$\text{resp. } -\pi \leq \varphi_3 \leq \pi$$

h)

$$(k_1 - c_2 \cdot a_2)^2 + (k_2 - s_2 \cdot a_2)^2 = c_{23}^2 \cdot a_3^2 + s_{23}^2 \cdot a_3^2 = a_3^2$$

a tedy

$$k_1^2 - 2k_1 \cdot a_2 \cdot c_2 + c_2^2 \cdot a_2^2 + k_2^2 - 2k_2 \cdot a_2 \cdot s_2 + s_2^2 \cdot a_2^2 = a_3^2$$

$$k_1^2 + k_2^2 + a_2^2 - a_3^2 = 2k_1 \cdot a_2 \cdot c_2 + 2k_2 \cdot a_2 \cdot s_2$$

$$\frac{k_1^2 + k_2^2 + a_2^2 - a_3^2}{2a_2} = k_1 \cdot c_2 + k_2 \cdot s_2$$

//krok (9)

položme  $k_1 = A \cdot \sin(\alpha)$  a  $k_2 = A \cdot \cos(\alpha)$ , kde  $A = \sqrt{k_1^2 + k_2^2}$  pak existuje právě jeden úhel  $\alpha$

$$\text{pak } \frac{k_1^2 + k_2^2 + a_2^2 - a_3^2}{2a_2} = A \cdot (\sin(\alpha) \cdot \cos(\varphi_2) + \cos(\alpha) \cdot \sin(\varphi_2))$$

$$A \cdot \sin(\varphi_2 + \alpha) = \frac{k_1^2 + k_2^2 + a_2^2 - a_3^2}{2a_2}$$

//krok (10)

pro  $A \neq 0$ , tj.  $k_1 \neq 0$  nebo  $k_2 \neq 0 \Rightarrow$  existují dvě řešení úhel  $\varepsilon_4 = \varphi_2 + \alpha \Rightarrow \varphi_2 = \varepsilon_4 - \alpha$   
dává obecně 2 řešení

Komplikace:

pokud  $A=0$  ve vztazích kroku 10, pak  $K_1 = 0 = K_2 \Rightarrow$

$$c_{23} \cdot a_3 + c_2 \cdot a_2 = 0$$

a

$$s_{23} \cdot a_3 + s_2 \cdot a_2 = 0$$

pak

$$a_3^2 = a_3^2 \cdot (c_{23}^2 + s_{23}^2) = a_2^2 \cdot (c_2^2 + s_2^2) = a_2^2; 0 < a_{2,3} \Rightarrow$$

$$a_2 = a_3$$

Pokud by konstrukce měla  $a_2 \neq a_3$  tento problém by nevznikal.

i) určení úhlu  $\varphi_4$

úhly  $\varphi_3, \varphi_2$  jsou určeny pomocí kroků 8 a 10 a proto lze dle kroku 6 určit

$$\varphi_4 = (\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4) - \varphi_2 - \varphi_3; \text{ kde } (\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4) = \varepsilon_3$$

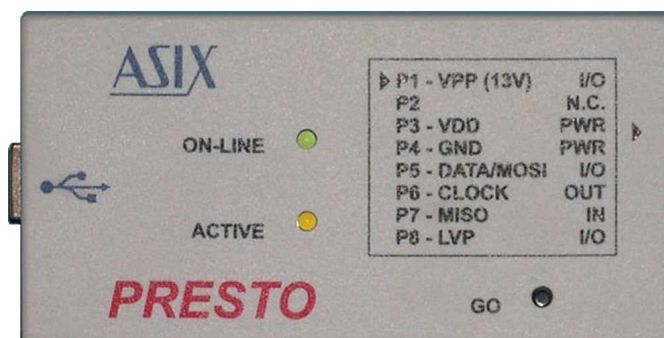
//krok (11)

Opět je nutno provést korekci přičtením  $2k\pi$

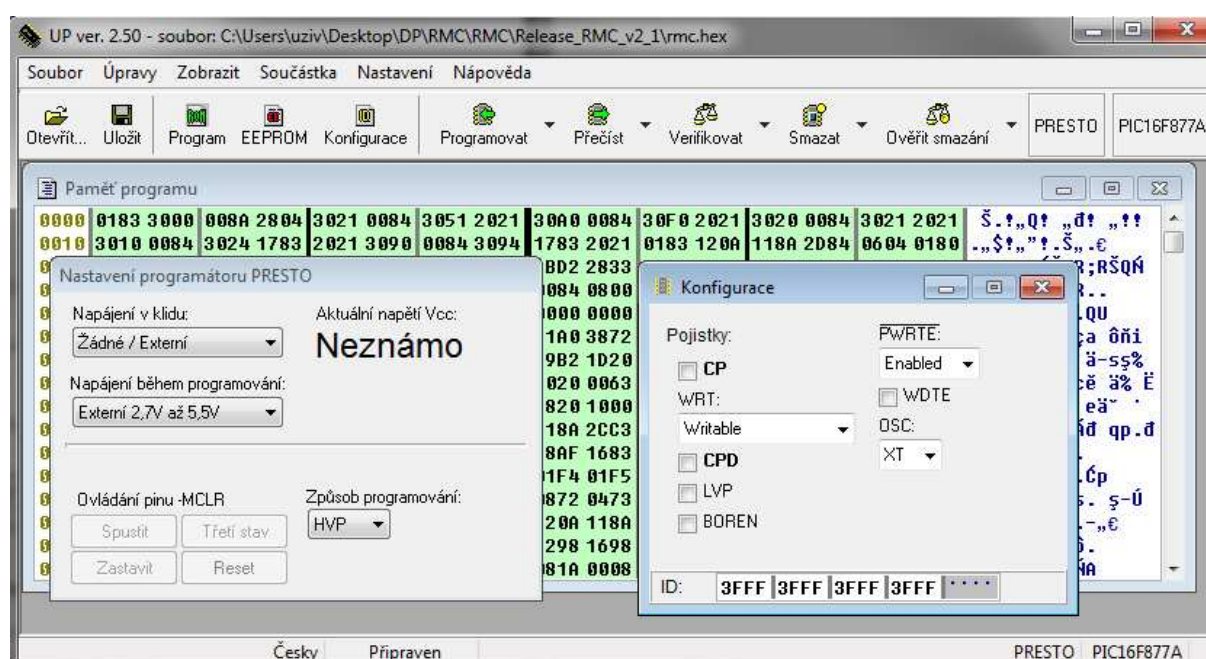
$$0 \leq \varphi_4 \leq 2\pi$$

$$\text{resp. } -\pi \leq \varphi_4 \leq \pi$$

## Řídící aplikace



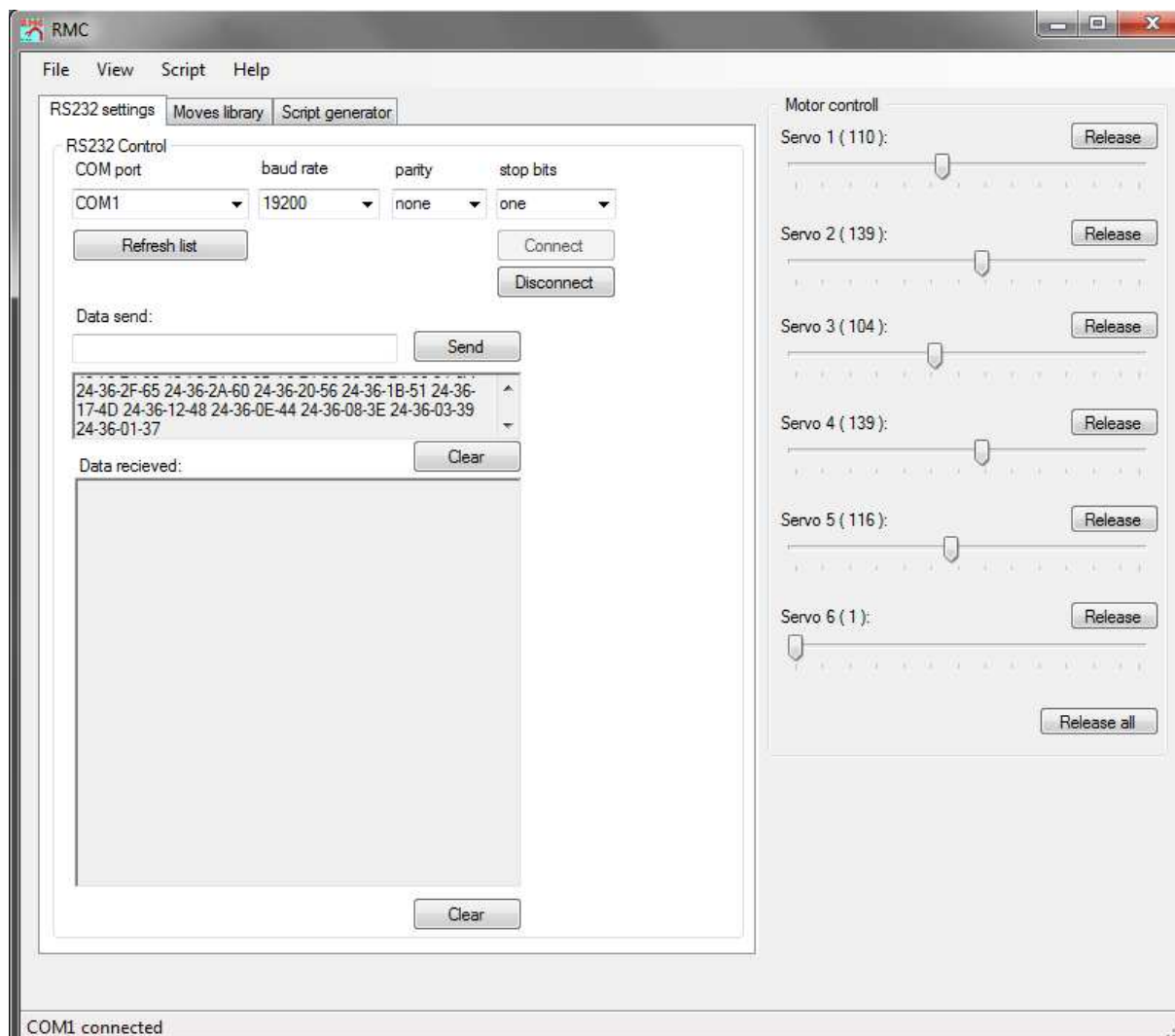
obr. 3.11 univerzální USB programátor mikrořadičů od firmy ASIX



obr. 3.12 Aplikace ASIX Up pro nahrání programu do mikrořadiče

Produkty pražské firmy ASIX s.r.o. mi byly při každém robotickém projektu skvělou základnou pro další vývoj.

Jejich USB programátor Presto umožňuje programovat snad všechny myslitelné mikrořadiče a zároveň umožňuje ovládat běh mikrořadiče ve vývojové desce a hlídat případné přetížení a zkrat.



obr. 3.13 nastavení sériové komunikace programu RMC

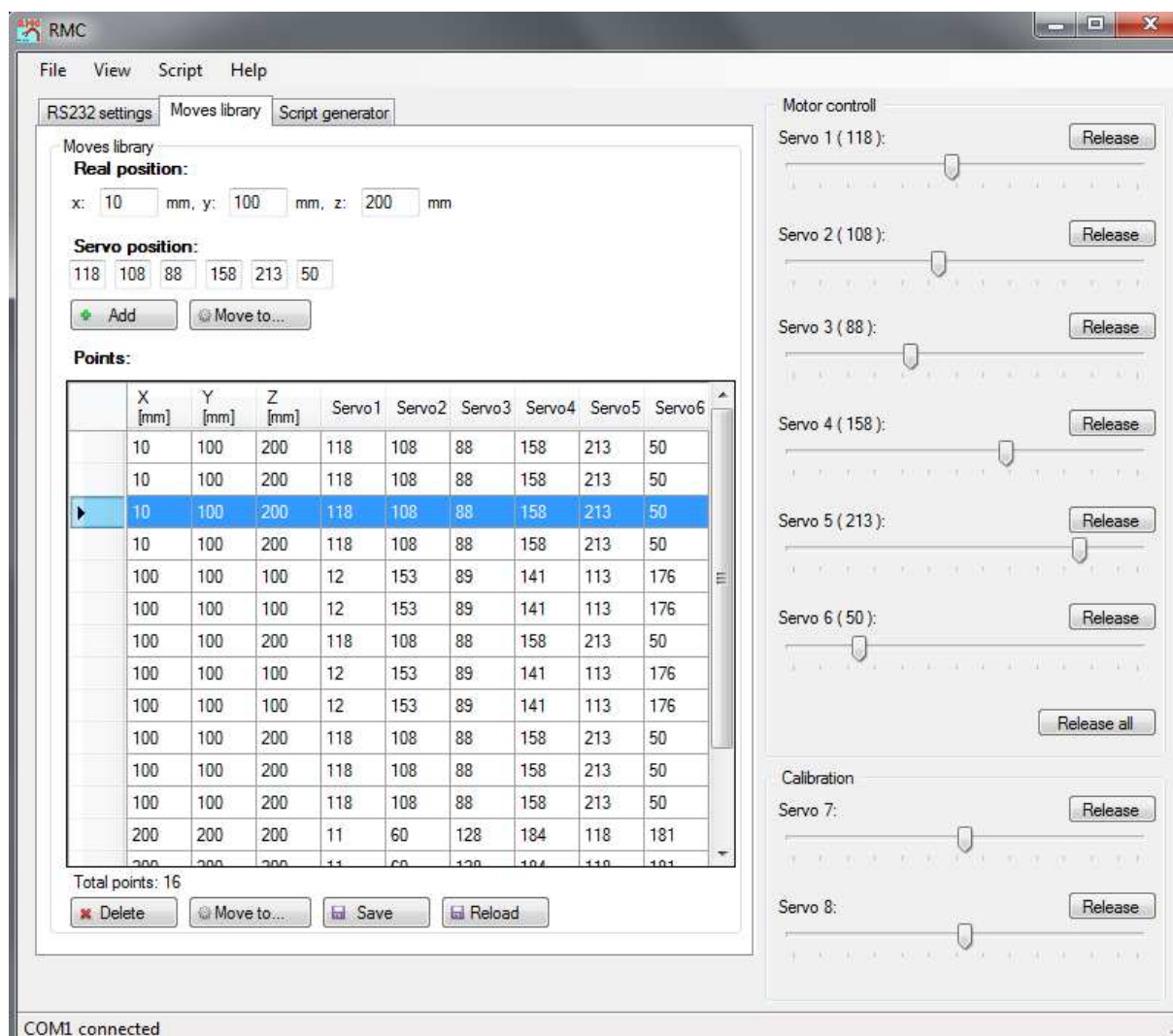
Řídící aplikace RMC (robot motor control) pro PC je napsána v jazyce C# v opensourcovém prostředí SharpDevelop verze 3.2 (dostupné z <http://www.icsharpcode.net/>) a ke svému běhu vyžaduje prostředí .NET framework verze 2.0, které je standardní součástí všech operačních systému MS Windows od verze XP SP2. (pro starší verze Win95+ je toto prostředí ke stažení na stránkách MS). Díky projektu MONO je možné tuto aplikaci používat i na libovolném linuxovém PC.

V první záložce je nastavení parametrů RS232 spojení a jednoduchý terminál zobrazující vstup a výstup komunikace. Použitý mikrořadič je standardně naprogramován s parametry komunikace 19200 baud rate bez parity s jedním stop bitem.

Pro snadné spojení manipulátoru s notebookem bez sériového portu používám převodník rozhraní z RS232 na USB, takže aplikace komunikuje pomocí virtuálního COM portu převodníku. Stejně tak lze samozřejmě propojit manipulátor s PC pomocí sériového kabelu.



obr. 3.14 USB <=> RS 232 převodník



obr. 3.15 seznam uživatelsky předdefinovaných pohybů manipulátoru

Plánování pohybu manipulátoru je realizováno na straně PC pomocí skriptů. Během prvního sestavení manipulátoru je potřeba vytvořit kalibrační skript. Použité pohony mají na

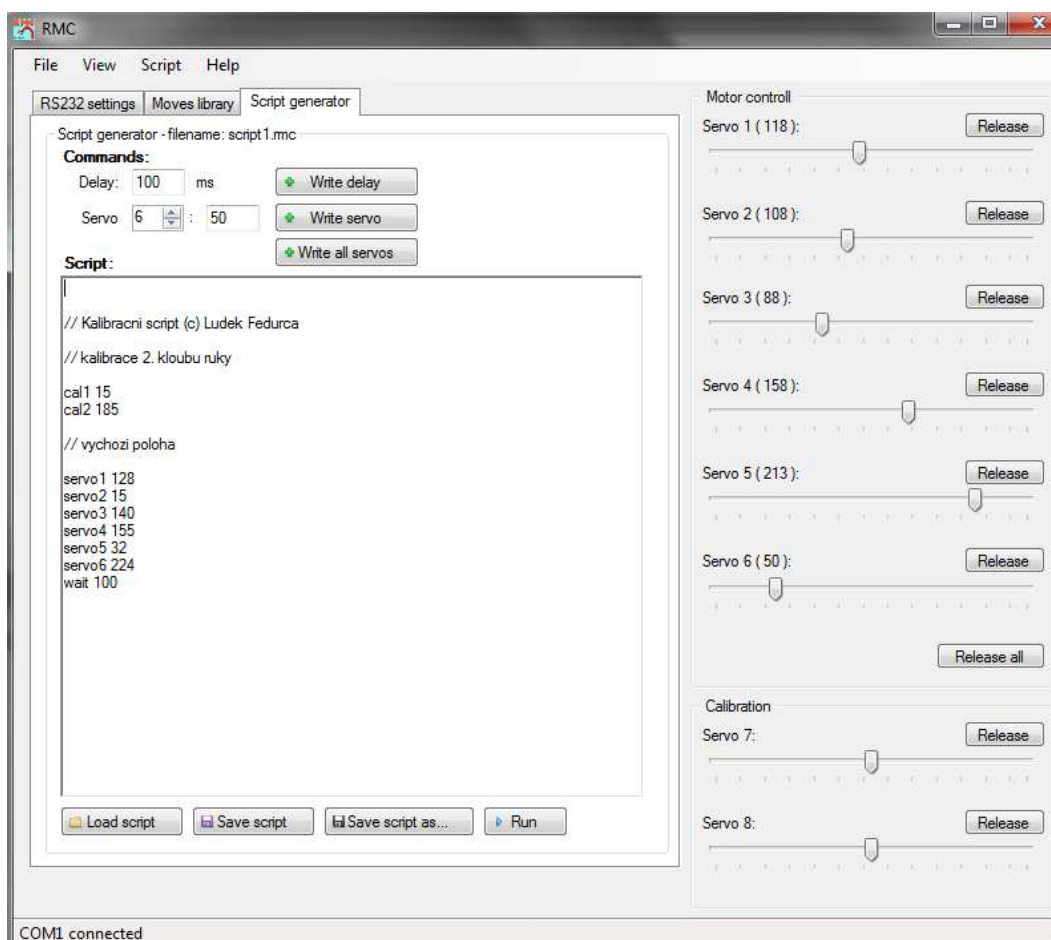
výstupní hřídeli tisícíhran. Kalibrační skript je sada 6 příkazů, které nastaví manipulátor do vzpřímené polohy. Poté se všechny pohony postupně otočí o  $+90^\circ$ . Tím získám všechny potřebné informace pro přepočet délky řídicích pulzů na úhlové stupně.

Poté je možno vytvářet uživatelské skripty pro pohyb manipulátoru. Hotové skripty je možno spouštět použitím klávesové zkratky  $\text{Ctrl} + "1"$ , kde "1" je číslo předdefinovaného skriptu. Interpreter skriptu bere jednotlivé příkazy řádek po řádku a odesílá je řídicímu mikrokontroleru. Zároveň hlídá odchylky od maximální povolené rychlosti pohybu. Překlopení celého ramene manipulátoru o  $180^\circ$  totiž trvá méně než 0,5 vteřiny. Pokud by řídicí obvod obdržel bezprostředně za sebou povel k tomuto pohybu, nedokázal by zabrzdit setrvačnou sílu a došlo by k poškození převodů pohonu v krajní poloze. Podporované příkazy jsou:

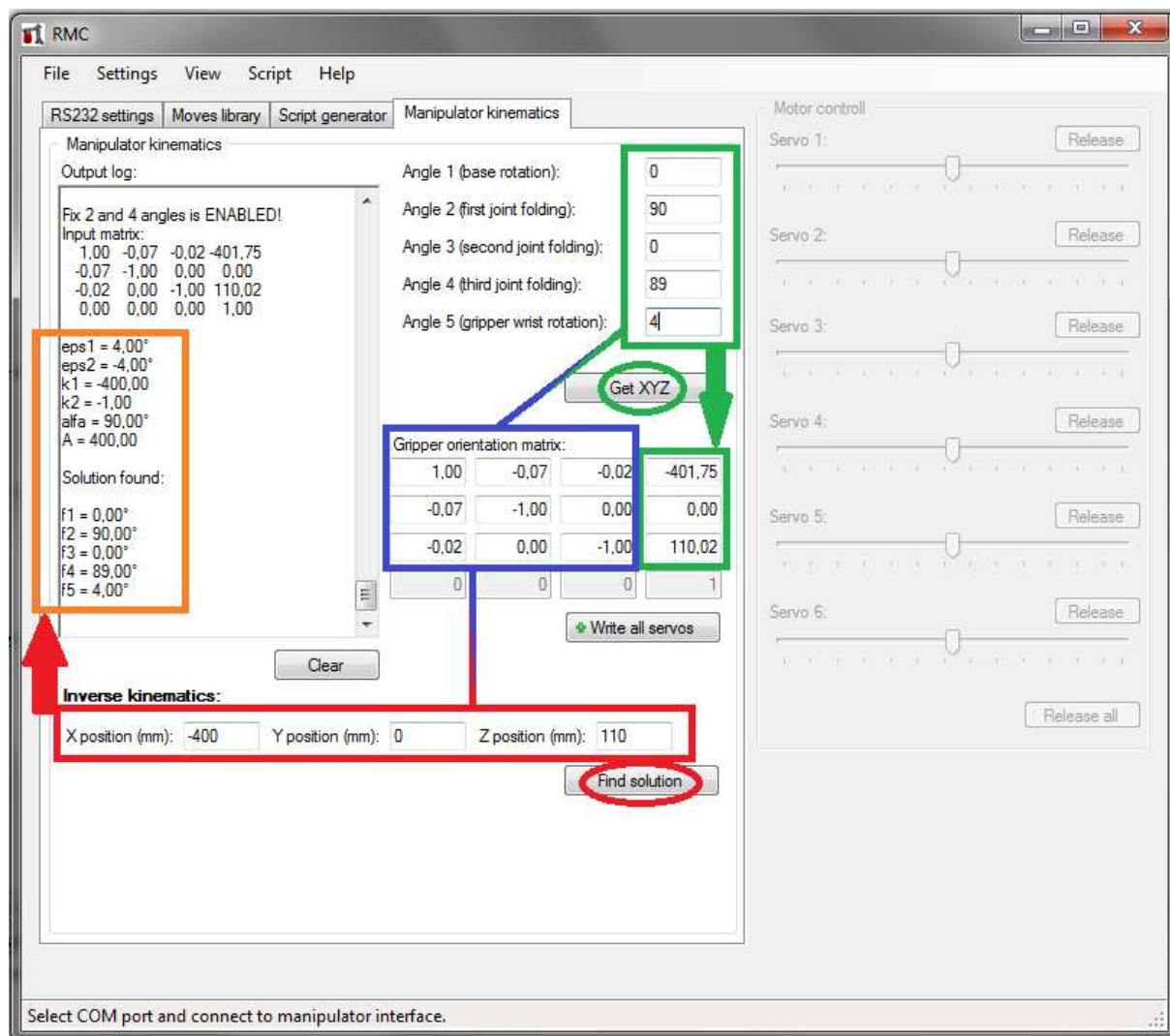
**servoX YYY** – nastaví pohon X do polohy YYY (1-255)

**angleX YYY** – nastaví pohon X do požadovaného úhlu YYY ve stupních ( $-90 - +90$ )

**wait YYY** – počká YYY milisekund



obr. 3.16 scriptování pohybů - kalibrační skript



obr. 3.17 řešení přímé a inverzní kinematické úlohy

V poslední kartě programu se nachází algoritmus pro praktické řešení přímé a inverzní kinematické úlohy.

Postup jeho používání je následující:

1.)

V modře označené části (3x3) transformační matice (4x4) zadáme požadovanou orientaci manipulátoru.

2.)

Pro řešení přímé úlohy (známe úhly pohonů, hledáme souřadnice chapadla) zadáme známé úhly do horního zeleně označeného obdélníku. V případě, že nevyplníme orientační matici, vybere se první nalezené řešení.

Poté kliknutím na tlačítko “Get XYZ“ získáme v dolním zeleném obdélníku výsledné souřadnice.

3.)

Pro řešení inverzní úlohy (chceme se manipulátorem dostat na souřadnice XYZ, ale neznáme potřebné úhly natočení) již orientační matici potřebujeme vyplněnou (můžeme například zkusit použít libovolnou orientaci nalezenou pomocí kroku 2).

Poté zadáme požadované prostorové souřadnice do červeného obdélníku a po kliknutí na tlačítko “Find solution“ vidíme výsledek řešení v oranžovém obdélníku (output log).

4.)

Nalezenou pozici můžeme přenést do skriptu pomocí tlačítka “Write all servos“.

## ZÁVĚR

V závěru této práce bych rád ve stručnosti shrnul získané poznatky a dosažené výsledky. V úvodu práce jsem nastínil funkční princip a dosavadní vývoj existujících manipulátorů. Vývoj vlastní konstrukce dospěl ke zdárnému konci a podařilo se mi prakticky realizovat řešení inverzní úlohy. Náklady na realizaci konstrukce samotné byly podobné jako cena hotového řešení. Samozřejmě po započtení ceny vývojových prostředků, nepoužitých dílů a času stráveného vývojem už takového porovnání ztrácí smysl.

Přínosem této práce pro mě osobně bylo získání nových praktických zkušeností, zejména z oboru strojírenství. Zároveň jsem jako výsledek práce získal použitelnou konstrukci, vhodnou pro další úpravy a vylepšení. Finální konstrukce je vybavena pouze jedním senzorem (senzor tlaku v čelistech). Další senzory popsané v této práci byly experimentálně zprovozněny, ale na výsledné konstrukci se v současné době nevyskytují. Přesto je manipulátor schopen přesouvat předměty z definovaných pozic pomocí skriptů a rozpoznat, zda se mu podařilo předmět uchopit.

Další úpravy manipulátoru budou spočívat v osazení zbývajících senzorů a poté bych na této práci rád pokračoval zejména připojením kamery a zpracováváním snímaného obrazu.



obr. 3.18 finální podoba konstrukce manipulátoru

# PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi pomohli během realizace konstrukce popsané v této práci.

## **Jednotlivci:**

### **Doc. Mgr. Ing. Václav Záda, CSc.**

- vedení práce
- pomoc s řešením kinematiky manipulátoru

### **Ing. Pavel Vágner**

- konzultace návrhu mechanické části

### **Ing. Martin Čermák**

- konzultace vývoje softwarové části

### **Jan Bázler**

- pomoc s montáží konstrukce

### **Jakub Pašek**

- pomoc s modelováním v 3D CAD aplikaci Autodesk Inventor 2011

## **Společnosti:**

### **Triangl s.r.o.**

- výroba titanových konstrukčních částí manipulátoru
- vysoustružení základny
- konzultace návrhu konstrukce

### **Hobby Robot s.r.o.**

- použité senzory a konzultace jejich použití

### **ASIX s.r.o.**

- vývojové prostředky pro mikrořadiče

# SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] NOVÁK P.: Mobilní roboty – pohon, senzory, řízení, BEN – technická literatura, Praha 2007, ISBN 8073001411
- [2] VYSOKÝ O.: Elektronické systémy II, Fakulta elektrotechnická, Praha : ČVUT, 1999, ISBN 8001019241
- [3] DUDÁČEK K.: Mikrokontroléry – doplňující text k počítačové technice, ZCU, Plzeň, 2001
- [4] MATOUŠEK D.: Udělejte si z PC v Delphi – 1. díl, BEN – technická literatura, Praha 2003, ISBN 807300111X
- [5] HRBÁČEK J.: Komunikace mikrokontroléru s okolím – 1.díl, BEN – technická literatura, Praha 2002, ISBN 8086056368
- [6] HRBÁČEK J.: Komunikace mikrokontroléru s okolím – 2.díl, BEN – technická literatura, Praha 2002, ISBN 8086056732
- [7] KÜNZEL K., Žáček J.: Mikroprocesorová technika, skripta ČVUT, Praha 1992
- [8] VACEK V., Vlček J.: Praktické použití procesoru PIC, BEN – technická literatura, Praha 2001
- [9] RŮŽIČKA P.: Řídící systémy - Mikroprocesory PIC, skripta ČVUT, Praha 2003
- [10] FRISCHHERZ A, Skop P.: Technologie zpracování kovů, SNTL, Praha 1999, ISBN 8090211070
- [11] KRAGER A., KRAGEROVÁ M., Základy robotiky a prostorové kinematiky, Vydavatelství ČVUT, Praha 2000, ISBN 8001021831
- [www1] Industrial Robots for Sale, New and Used Robots: Motoman, Fanuc, Others  
[online]  
dostupné z [www <http://www.robots.com/images/robots/robots-types.gif>](http://www.robots.com/images/robots/robots-types.gif) [cit. 30.12.2010]
- [www2] MOZYR MACHINE-BUILDING PLANT  
[online]  
dostupné z [www <http://eng.mozyrmash.by/i/photo/catalog/mpr1221/mpr2.jpg>](http://eng.mozyrmash.by/i/photo/catalog/mpr1221/mpr2.jpg) [cit. 30.12.2010]
- [www3] kompresory, piestové kompresory, skrutkové kompresory, pneumatické náradie, pneumatické valce, pneumatické ventily, potrubné systémy, pneumatické manipulátory | Awas, s.r.o. Bratislava  
[online]  
dostupné z [www <http://www.awas-ba.sk/images/f\\_avm\\_002.jpg>](http://www.awas-ba.sk/images/f_avm_002.jpg) [cit. 30.12.2010]
- [www4] e-Automatizace - Informační portál z oblasti automatizace  
[online]  
dostupné z [www <http://www.e-automatizace.cz/ebooks/ridici\\_systemy\\_akcni\\_cleny>](http://www.e-automatizace.cz/ebooks/ridici_systemy_akcni_cleny) [cit. 30.12.2010]
- [www5] Biomedical Engineering & Biotechnology News & Events [online]  
dostupné z [www <http://www.biomedicalblog.com/wp-content/uploads/2010/07/daVinci-Robot-Surgical-System.jpg>](http://www.biomedicalblog.com/wp-content/uploads/2010/07/daVinci-Robot-Surgical-System.jpg) [cit. 30.12.2010]
- [www6] Next Generation: An Introduction to Medicine and Clinical Research [online]  
dostupné z [www <http://www.nextgenmd.org/vol2-5/pictures/davinci1.jpg>](http://www.nextgenmd.org/vol2-5/pictures/davinci1.jpg) [cit. 30.12.2010]
- [www7] Thailand Cosmetic Plastic Surgery and Medical Tourism Travel Blog [online]  
dostupné z [www <http://www.thaimedicalnews.com/wp-content/uploads/panasonic-powerloader-light-exoskeleton.jpg>](http://www.thaimedicalnews.com/wp-content/uploads/panasonic-powerloader-light-exoskeleton.jpg) [cit. 30.12.2010]

[www8] Snail Instruments, Robotu nechte robotům! [online]  
dostupné z www <<http://shop.snailinstruments.com/>> [cit. 30.12.2010]

[www9] Větrný mlýn Ruprechtov [online]  
dostupné z www <<http://www.mlynruprechtov.cz>> [cit. 30.12.2010]

[www10] At the turning point [online]  
dostupné z www  
<[http://lakshmiminenon.files.wordpress.com/2009/07/clip\\_image0022.jpg?w=477&h=322&h=322](http://lakshmiminenon.files.wordpress.com/2009/07/clip_image0022.jpg?w=477&h=322&h=322)> [cit. 30.12.2010]

[www11] TEAM TWF8 - HOME [online]  
dostupné z www <<http://www.twf8.ws/new/tech/servos/servo1.gif>> [cit. 30.12.2010]

[www12] HITEC RCD USA [online]  
dostupné z www <<http://www.hitecrcd.com>> [cit. 30.12.2010]

[www13] RobotShop | Robot Store | Robots | Robot Parts | Robot Kits | Robot Toys [online]  
dostupné z www <<http://www.robotshop.ca/servocity-gdp985a-bm-power-gearbox-8-6-1.html>> [cit. 30.12.2010]

[www14] GM Electronic, internetový obchod s elektronikou. [online]  
dostupné z www <<http://www.gme.cz/>> [cit. 30.12.2010]

[www15] Asia .ru  
[online]  
dostupné z www <<http://www.asia.ru/images/target/photo/50196513/Bearings.jpg>> [cit. 30.12.2010]

[www16] Wikipedie, otevřená encyklopedie  
[online]  
dostupné z www <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Cartesian\\_coordinate\\_system\\_handedness.svg](http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Cartesian_coordinate_system_handedness.svg)>  
[cit. 30.12.2010]

[www17] :+: Online TPS Shoppe - Buy Electronics and Robotics components  
[online]  
dostupné z www <[http://www.onlinetps.com/shop/images/Items\\_Images/16F877.jpg](http://www.onlinetps.com/shop/images/Items_Images/16F877.jpg)>  
[cit. 30.12.2010]

[www18] DerbyTimer.com - Advanced PicMicro Digital Derby Timer Plans, Kits, and Ready-To-Use Electronics [online]  
dostupné z www <[http://derbytimer.com/diy/images/PIC16F877A\\_sm.gif](http://derbytimer.com/diy/images/PIC16F877A_sm.gif)>  
[cit. 30.12.2010]

[www19] ASIX: HOME PAGE [online]  
dostupné z www <<http://www.asix.cz>>  
[cit. 30.12.2010]

[www20] Little robotics and mechanical models for education and pleasure [online]  
dostupné z www <<http://www.hobbyrobot.cz>>  
[cit. 30.12.2010]

[www21] Acroname Robotics [online]  
dostupné z www <<http://www.acroname.com/robotics/parts/R193-SD20.jpg>>  
[cit. 30.12.2010]

[www22] Robot electronics [online]  
dostupné z www <<http://www.robot-electronics.co.uk/images/sd20.GIF>>  
[cit. 30.12.2010]

[www23] Rosen Diankov | Home [online]

dostupné z www <[http://www.programmingvision.com/images/visibility\\_figure.jpg](http://www.programmingvision.com/images/visibility_figure.jpg)>

[cit. 30.12.2010]

[www24] Max Planck Institute for Biological Cybernetics [online]

dostupné z www <[http://www.kyb.mpg.de/prjs/vis\\_recog/images/chairroom.jpg](http://www.kyb.mpg.de/prjs/vis_recog/images/chairroom.jpg)>

[cit. 30.12.2010]

[www25] 21stoleti.cz [online]

dostupné z www <<http://www.21stoleti.cz/view.php?cisloclanku=2006042109>>

[cit. 30.12.2010]

[www26] Automatizace.cz - odborný časopis pro automatizaci, měření a inženýrskou informatiku [online]

dostupné z www <<http://www.automatizace.cz/article.php?a=2594>>

[cit. 30.12.2010]

[www27] Science World.cz | Novinky ze světa vědy a techniky: technologie, neživá příroda, člověk, biologie [online]

dostupné z www <<http://scienceworld.cz/aktuality/Robot-DaVinci-operuje-i-v-Olomouci-5055>>

[cit. 30.12.2010]

[www28] Wikipedie, otevřená encyklopedie [online]

dostupné z www <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Lo%C5%BEisko>>

[cit. 30.12.2010]

[www29] Laboratoire de robotique [online]

dostupné z www <<http://robot.gmc.ulaval.ca/en/research/theme101.html>> [cit. 30.12.2010]

# SEZNAM OBRÁZKŮ

- obr. 1.1 sériový manipulátor firmy KUKA s 6 stupni volnosti
- obr. 1.2 Stewart platform – paralelní manipulátor
- obr. 1.3 nejběžnější konstrukce sériových manipulátorů
- obr. 1.4 hydraulický manipulátor
- obr. 1.5 komponenty systému pneumatického manipulátoru
- obr. 1.6 krokový motor – funkční schéma
- obr. 1.7 chirurgický robot Da Vinci se 4 rameny
- obr. 1.8 robot během operace
- obr. 1.9 exoskeleton – vnější kostra s pohony (na zádech baterie)
- obr. 2.1 hotové řešení – prvotní inspirace
- obr. 2.2 nejpoužívanější konstrukční materiály a jejich vlastnosti
- obr. 2.3 Halladayova turbína v obci Ruprechtov
- obr. 2.4 PWM signál ovládání analogového serva
- obr. 2.5 použitý koncový člen manipulátoru
- obr. 2.6 koncový člen s dalším stupněm volnosti
- obr. 2.7 3 stupně volnosti polohování zápěstí
- obr. 2.8 vnitřní konstrukce servopohonu
- obr. 2.9 zvlášť prodávané náhradní díly – převody
- obr. 2.10 převodovka pro servopohon 8,6:1
- obr. 2.11 přehled některých modelářských servopohonů
- obr. 2.12 bočník k měření odebíraného proudu
- obr. 2.13 mikrospínač bez aretace
- obr. 2.14 odporově závislý senzor tlaku
- obr. 2.15 infračervený dálkoměr GP2Y0A41
- obr. 2.16 princip měření vzdálenosti infračerveným dálkoměrem
- obr. 2.17 vyzařovací charakteristika infračerveného dálkoměru GP2Y0A41
- obr. 2.18 výkres konstrukce
- obr. 2.19 3D model konstrukce (drátový model s viditelnými hranami)
- obr. 2.20 3D model konstrukce (modelový pohled)
- obr. 2.21 ložiska různých typů
- obr. 2.22 kluzné ložisko osy nosníku tvořené plastovým unašečem servopohonu
- obr. 2.23 konstrukce základny manipulátoru
- obr. 2.24 otočná část základny
- obr. 2.25 rozdíl v zatížení pohonů v různých polohách
- obr. 2.26 excentrické uložení pohonu druhého kloubu pro sklápění nosníku  
uložení ostatních pohonů je navrženo obdobně
- obr. 2.27 druhý nosník - Autocad výkres
- obr. 2.28 3D modelování z 2D výkresu v aplikaci Inventor
- obr. 2.29 olovená vyvažovací závaží pro první a druhý nosník
- obr. 2.30 vyvážení konstrukce
- obr. 2.31 mikrořadič PIC16F877a od firmy Microchip
- obr. 2.32 schéma programovatelných vývodů mikrořadiče
- obr. 2.33 vývojová deska PVK40 pro mikroprocesory od firmy ASIX
- obr. 2.34 obvod SD20
- obr. 2.35 schéma zapojení obvodu SD20

obr. 3.1 základna manipulátoru  
obr. 3.2 montáž unašečů k nosníkům  
obr. 3.3 montáž mechanické části konstrukce  
obr. 3.4 sestavený manipulátor v kalibrační poloze  
obr. 3.5 robot pracující ve zmapovaném prostoru  
obr. 3.6 kvalifikační problém – kolik je na obrázku skutečných židlí?  
obr. 3.7 vlevo levotočivá a vpravo pravotočivá soustava souřadnic  
obr. 3.8 smysl otáčení pohonů  
obr. 3.9 schéma navrženého manipulátoru s 5 stupni volnosti  
obr. 3.10 význam jednotlivých vektorů transformační matice  
obr. 3.11 univerzální USB programátor mikrořadičů od firmy ASIX  
obr. 3.12 Aplikace ASIX Up pro nahrání programu do mikrořadiče  
obr. 3.13 nastavení sériové komunikace programu RMC  
obr. 3.14 USB  $\Leftrightarrow$  RS 232 převodník  
obr. 3.15 seznam uživatelsky předdefinovaných pohybů manipulátoru  
obr. 3.16 scriptování pohybů - kalibrační skript  
obr. 3.17 řešení přímé a inverzní kinematické úlohy  
obr. 3.18 finální podoba konstrukce manipulátoru

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

PVC – polyvinylchlorid – nejpoužívanější umělá hmota

RS-232 – dodnes nejpoužívanější standard pro sériovou komunikaci z roku 1962

CAD - computer-aided design - počítačem podporované projektování

DWG – DraWinG přípona souborů technických výkresů vytvořených v programu Autocad

SD20 – obvod pro řízení modelářských servopohonů

# SEZNAM PŘÍLOH

Přílohou této diplomové práce je elektronické médium CD-R., které obsahuje následující materiál:

- vlastní text práce (formát PDF)
- resumé (formát DOC)
- zdrojový kód aplikace pro mikrořadič
- zdrojový + spustitelný kód konzolové aplikace pro řešení inverzní úlohy
- zdrojový + spustitelný kód aplikace RMC
- DWG 2D výkres konstrukce manipulátoru
- Inventor 3D model konstrukce manipulátoru
- fotodokumentace z vývoje manipulátoru
- videozáznam z prvního testování

Seznam umístění jednotlivých souborů se nalézá v kořenovém adresáři CD v souboru **roadmap.txt**