České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Robot HERO - Řízení ruky

Praha, 2008 **Autor: Ondřej Zeman**

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne _____ _____

podpis

Poděkování

Děkuji především vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Bayerovi, CSc. za vedení této bakalářské práce a za vstřícný přístup. Také bych chtěl poděkovat panu Ladislavu Čmelíkovi za sestrojení potřebných mechanických dílů pro mojí práci a také panu Ing. Bohumilu Květenskému za četné konzultace ohledně pohonů Maxon.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je doplnit řízení mechanického manipulátoru s pěti stupni volnosti robotu HERO, který byl modernizován v rámci bakalářských prací realizovaných v roce 2007.

Ruka bude vybavena pohony firmy Maxon motor a.g. napojenými přes sběrnici CANopen na stávající řídicí počítač a ovládána instalovanou řídicí aplikací. Dálkové ovládání robotu je realizováno pomocí sítě internet.

Tato práce navazuje na bakalářské práce Jiřího Zemánka a Ondřeje Šantina realizované v roce 2007.

Abstract

The purporse of this Bachelor's thesis is to rebuild 5-DOF robotic manipulator that should be eventually mounted on robot HERO, which was modernised as a result of preceding Bachelors' thesis in 2007.

The arm will be equiped with drives made by Maxon motor a.g. Drives' control units will be connected to robot's computer via CANopen bus. The robot is remotely controlled over Internet.

This work follows Bachelors' thesis of J. Zemánek [1] a O. Šantin [2] that finished in 2007.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Ondřej Zeman**

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (bakalářský), strukturovaný
Obor: Kybernetika a měření

Název tématu: **Robot HERO - ruka**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s mechanickou a elektrickou koncepcí mobilního robota HERO.
2. Realizujte základní řízení pohybových os hlavy a ruky robota (otáčení hlavy, pohyb ruky, stisk chapadla).
3. Respektujte koncepci přenosu dat k pohybovým členům robota prostřednictvím sběrnice CAN
4. Začleňte základní řízení hlavy a ruky robota do programového vybavení nadřazeného palubního systému s PC104.
5. Vypracujte podrobnou dokumentaci dodatečných změn robota.

Seznam odborné literatury:

Dodá vedoucí práce

Vedoucí: doc. Ing. Jiří Bayer, CSc.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2008/2009

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

L.S.

r.z. M. Demlová
doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 25. 2. 2008

Obsah

Seznam obrázků **ix**

Seznam tabulek **xi**

1 Úvod **1**

1.1 Účel projektu 1

1.2 Historie projektu 1

1.3 Cíl bakalářské práce 2

2 Mechanická konstrukce ruky **3**

2.1 Původní konstrukce ruky 3

2.2 Skutečný stav ruky 6

2.2.1 Stav pohonů 6

2.2.2 Stav mechanických dílů 7

3 Kinematika **8**

3.1 Přímá kiematická úloha 8

3.1.1 Denavitova-Hartenbergova notace 8

3.1.2 Řešení přímé kinematické úlohy 11

3.2 Inverzní kinematická úloha 14

3.2.1 Rameno - bod W 15

3.2.2 Zápěstí 18

3.2.3 Možná řešení 20

4 Pohony **22**

4.1 Porovnání vlastností motorů 23

4.1.1 Krokové motory 23

4.1.2 Stejnosměrné motory 23

4.1.2.1 Motory Maxon EC flat 24
4.1.2.2 Motory Maxon RE-max 24
4.2 J1 - Otáčení hlavy 24
4.2.1 Původní pohon 24
4.2.2 Nový pohon 25
4.3 J2 - Pohyb ramene 27
4.3.1 Původní pohon 27
4.3.2 Nový pohon 27
4.4 J3 - Vysouvání ramene 29
4.4.1 Původní pohon 29
4.4.2 Nový pohon 29
4.5 J4 - Sklápění zápěstí 31
4.5.1 Původní pohon 31
4.5.2 Nový pohon 31
4.6 J5 - Otáčení chapadla 32
4.6.1 Původní pohon 32
4.6.2 Nový pohon 32
4.7 Stisk chapadla 32
4.7.1 Původní pohon 32
4.7.2 Nový pohon 33

5 Řízení **34**
5.1 Řídicí systém robotu 34
5.2 Řídicí jednotky EPOS 34
5.3 Snímače polohy hřídele 36
5.4 Nastavení regulátorů 37
5.5 Umístění jednotek 38
5.6 Řízení jednotlivých pohybových os 40
5.6.1 J1 - Otáčení horní plošiny 40
5.6.2 J2 - Zvedání ramene ruky 41
5.6.3 J3 - Prodloužení ramene 42
5.6.4 J4 - Naklápění zápěstí 42
5.6.5 J5 - Otáčení chapadla 43
5.6.6 Stisk chapadla 43
5.7 Napájení 45

5.8 Celkový pohled 46
5.9 SW řídicího systému robotu 47
5.9.1 Řídicí aplikace 47
5.9.2 Rozšíření SW vybavení 49

6 Závěr **50**
6.1 Řešení práce 50
6.2 Možná vylepšení 51

Literatura **52**

A Řešení rovnice inverzní kinematiky **I**

B Nastavení jednotek EPOS **III**

C Schéma obvodu pro řízení krokového motoru **IX**

D Blokové schéma zapojení **XI**

Seznam obrázků

2.1 Původní ruka - celkový pohled 3
2.2 Původní ruka - posuvný kloub 4
2.3 Původní ruka - uchycení k základně 5
2.4 Původní ruka - zápěstí 5
2.5 Původní ruka - detail převodovky zápěstí 6

3.1 Rozmístění jednotlivých souřadných systémů, celkový pohled 11
3.2 Rotační kloub J_1, pohled shora 12
3.3 Rotační kloub J_2, pohled v ose rotace 12
3.4 Rotační kloub J_4, pohled v ose rotace 13
3.5 Rotační kloub J_5, pohled v ose rotace 13
3.6 Kinematika prvních tří kloubů ruky - pohled shora 16
3.7 Kinematika prvních tří kloubů ruky - pohled v ose J2 16
3.8 Schematický nákres ramene a zápěstí z boku, $\theta_2 = 0$ 19
3.9 Schematický nákres ramene a zápěstí shora, $\theta_2 = 0$ 19
3.10 Schematický nákres ramene a zápěstí 20

4.1 Diskový motor EC 45 flat 30W 25
4.2 Převodovka s předlohou GS45 25
4.3 Spodní část horní stěny robotu s pohonem, řídicí jednotkou a přepěťovou ochranou 26
4.4 Harmonická převodovka řady PMG-14A-xxx-M 28
4.5 Motor EC 45 flat s přechodovým dílem a původní převodovkou 28
4.6 Stejnosměrný mechanicky komutovaný motor RE-max 24 29
4.7 Planetová převodovka GP 22 A 29
4.8 Motor výsuvného kloubu usazený v upevňovacím dílu 30
4.9 Pohon kloubu J4 (motor EC32flat s původní převodovkou) a detail chapadla s motorem kloubu J5 31

4.10 Diskový motor EC 32 flat 15W 32
4.11 Vnitřek převodové skříně chapadla 33

5.1 Řídicí jednotka EPOS 24/5 35
5.2 Řídicí jednotka EPOS 24/1 35
5.3 Detail kabelového prostupu a osy kloubu J1 38
5.4 Deska nesoucí elektroniku umístěnou na otočné hlavě robotu 39
5.5 Připojení EC motorů k jednotkám EPOS 24/1 40
5.6 Schéma připojení optických závor k jednotce kloubu J1 41
5.7 Schéma připojení optické závory k jednotce kloubu J2 41
5.8 Schéma připojení hallova snímače k jednotce kloubu J4 43
5.9 Schéma připojení optické závory k jednotce kloubu J5 43
5.10 Obvod pro řízení krokového motoru 44
5.11 Připojení krokovacího obvodu k výstupům jednotky J5 44
5.12 Schéma přepěťové ochrany 45
5.13 Schéma napájení a vedení sběrnice 46
5.14 Celkový pohled na robot 47
5.16 Vrstvy SW řídicího systému 48
5.15 UML schéma uživatelské aplikace 48

A.1 Řešení rovnice 3.9 pro θ_2 II

C.1 Schéma obvodu pro řízení krokového motoru X

D.1 Blokové schéma zapojení ruky robotu XII

Seznam tabulek

3.1 D-H parametry 14
3.2 Rozměry robotu 14
3.3 Možné konfigurace 17

B.1 Údaje pro nastavení jednotky kloubu J1 IV
B.2 Údaje pro nastavení jednotky kloubu J2 V
B.3 Údaje pro nastavení jednotky kloubu J3 VI
B.4 Údaje pro nastavení jednotky kloubu J4 VII
B.5 Údaje pro nastavení jednotky kloubu J5 VIII

C.1 Rozpiska součástek pro obvod řízení krokového motoru IX

Kapitola 1

Úvod

1.1 Účel projektu

Katedra řídicí techniky zadala k vypracování projekt modernizace robotu HERO vlastněného katedrou, tak, aby v budoucnu mohl sloužit jako výuková pomůcka a k prezentacím katedry.

Robot by měl být určen k výuce distribuovaných systémů, některých oborů umělé inteligence (např. orientace v prostředí) a k demonstraci moderních prostředků sofistikovaného řízení a autonomního rozhodování. Celé zařízení je myšleno jako pomůcka pro vzdálenou výuku a mělo by být plně řiditelné přes fakultní počítačovou síť.

1.2 Historie projektu

Mobilní robot Hero-1 (typové označení ET-18) začal být vyráběn americkou firmou Heathkit v roce 1982. Byl prodáván buď jako stavebnice nebo jako sestavený komplet. Určen byl především pro školy jako prostředek pro výuku a pro amatérské příznivce robotiky. V současné době lze na Internetu nalézt stále velice početnou komunitu fanoušků a vlastníků tohoto robotu. Samozřejmě většinou ve Spojených státech.

Tento původní model byl vybaven na svojí dobu relativně výkonným řídicím systémem s procesorem Motorola 6808 s 4kB RAM.

Robot se programoval pomocí vestavěné hexadecimální klávesnice s LED displejem nebo přes rozhraní RS-232. K orientaci robotu sloužil ultrazvukový dálkoměr a senzory přiblížení. Robot se pohyboval na tříkolové základně. Pohon zajišťoval stejnosměrný mo-

tor a zatáčení bylo řízeno krokovým motorem. Celý řídicí systém byl modulární, takže se daly dokupovat další doplňkové moduly obohacující Hero-1 o nové funkce.

Jedním z těchto doplňujících rozšíření byla i ruka s pěti stupni volnosti zakončená chapadlem pro uchopování lehčích předmětů. Jako pohony jednotlivých os byly použity krokové motory, v té době populární díky jednoduchému digitálnímu řízení. Náš robot Hero-1 byl takovouto rukou vybaven.

Robot Hero-1 vlastněný Katedrou řídicí techniky Českého vysokého učení technického v Praze byl poprvé modernizován v roce 1985. Tuto modernizaci provel Ing. F Vaněk spolu s Ing. Páchou. Ti předělali řídící systém v rámci svých diplomových prací. Výsledkem byla nová řídicí procesorová deska s čipem 80C196. Byly vyměněny výkonové budiče motorů a senzorický systém rozšířen o optické závory.

V listopadu 2006 projekt znovu odstartovaly bakalářské práce Jiřího Zemánka [1] a Ondřeje Šantina [2]. Jejich výsledkem byla obnova veškerého elektrického vybavení robotu a zprovoznění základního dálkového ovládání přes počítačovou síť pomocí protokolu TCP. Řídicí systém tedy v současnosti sestává z hlavního počítače třídy PC/104+ a řídicích jednotek EPOS, které jsou součástí zmodernizovaných pohonů. Tyto komponenty jsou spolu propojeny pomocí průmyslové sběrnice CANopen. Řídicí počítač je vybaven procesorem AMD Geode 500Mhz a je na něm provozován operační systém GNU/Linux pod kterým běží uživatelské aplikace řídící robot. Tato konfigurace je o několik řádů výkonnější než předcházející systém, takže robot má dostatek výpočetního výkonu pro autonomní rozhodování, které by se mělo řešit v některém z následujících projektů týkajících se tohoto robotu.

1.3 Cíl bakalářské práce

Cílem této práce je rekonstruovat mechanickou ruku robotu a integrovat ji do stávajícího HW a SW robotu. Rekonstrukce ruky byla jedním z nerealizovaných cílů předcházejících bakalářských prací.

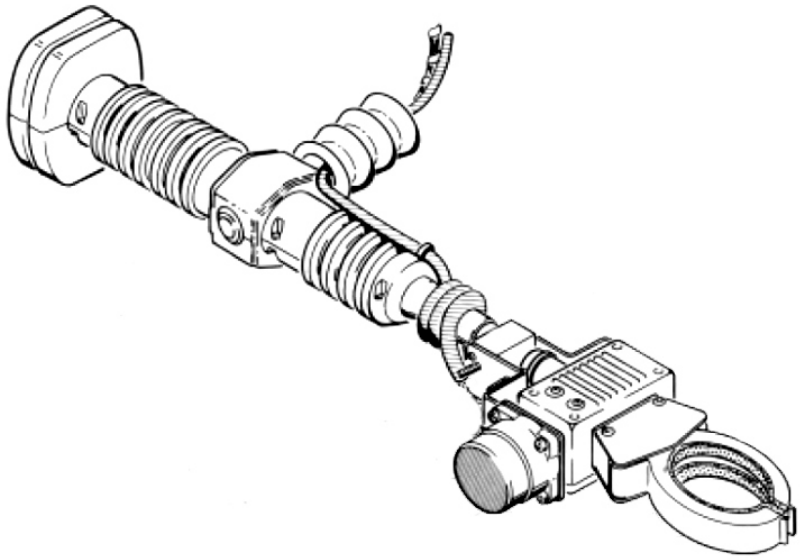
Předpokládá se osazení ruky motory a řídicími jednotkami švýcarské firmy Maxon motor a.g. a jejich připojení ke sběrnici CANopen.

V rámci rekonstrukce bude nutné vybrat vhodné pohony, zadat výrobu potřebných mechanických dílů, doplnit jednotlivé pohybové osy o senzory krajních poloh a realizovat potřebnou kabeláž.

Kapitola 2

Mechanická konstrukce ruky

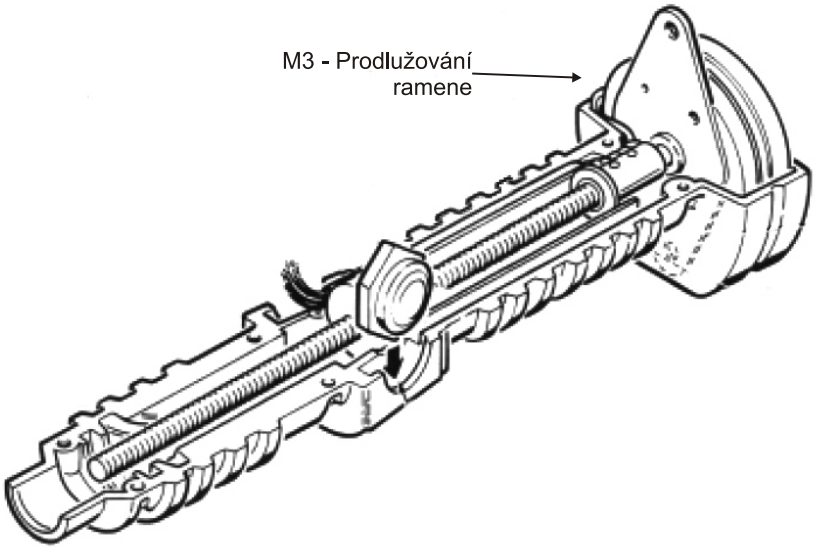
2.1 Původní konstrukce ruky



Obrázek 2.1: Původní ruka - celkový pohled

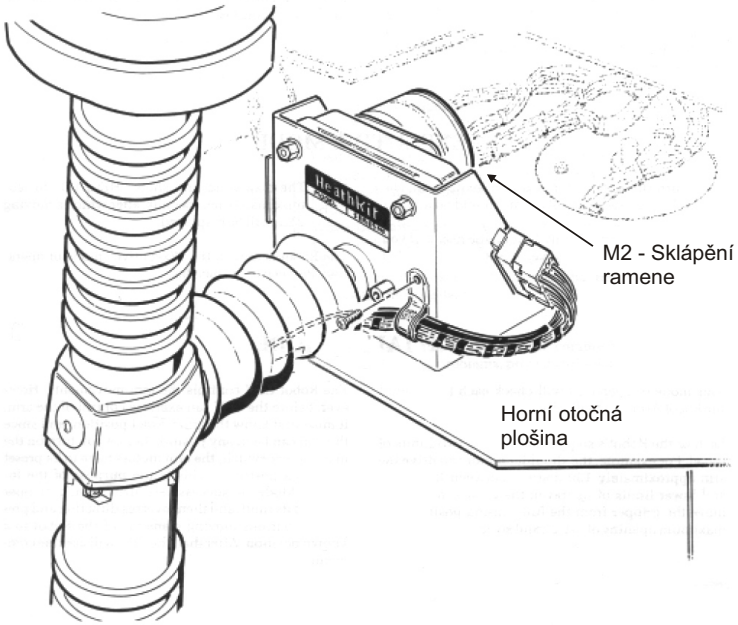
Mechanický manipulátor s pěti stupni volnosti byl jedním z volitelných doplňků dodávaných k robotu Hero-1. Jedná se přibližně o sférický manipulátor. Kinematická struktura je (od základny robotu) RRP, což znamená, že první dvě pohybové osy manipulátoru jsou rotační a poté následuje osa posuvná. Na jejím konci je připevněno zápěstí se dvěma kolmými protínajícími se osami. Pracovním nástrojem robotu je chapadlo připevněné na zápěstí. Na obrázku 2.1 vidíme celkový pohled na robotickou ruku. Všechny originální

pohony byly dvoufázové krokové elektromotory s vyvedeným středem vhodné pro unipolární řízení. Tento a všechny další obrázky v této kapitole byly přebrány z originálního návodu k ruce[4].



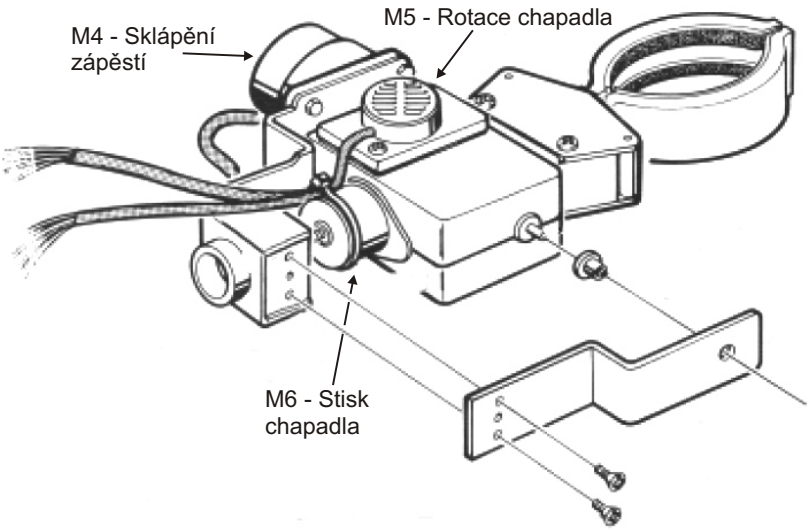
Obrázek 2.2: Původní ruka - posuvný kloub

Na obrázku 2.2 je vidět řez plastovou částí ruky. Motor M3 přímo otáčí závitovou tyčí, která vede skrz kovovou trubku na jejímž konci je nasazené zápěstí. Kovová trubka nesoucí zápěstí má uvnitř závit a z vnější strany jeden vodící trn, který zapadá do vodící kolejnice v plastovém obalu. Při otáčení motoru tedy dochází k posouvání kovové trubky v plastové vodící části a tím k prodlužování nebo ke zkracování celkové délky ruky.

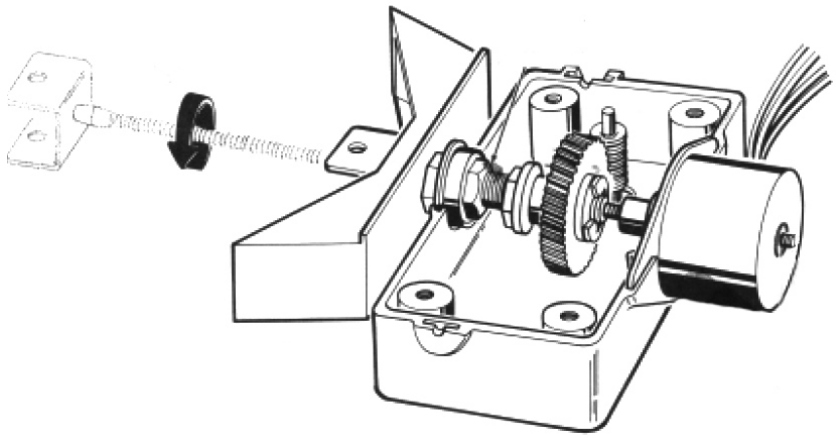


Obrázek 2.3: Původní ruka - uchycení k základně

Obrázek 2.3 popisuje mechanické připevnění ruky k otočné plošině na vrcholu robotu. Ruka je letmo uložena v převodovce motoru M2, který natáčí rameno. Celá plošina se otáčela kolem svislé osy pomocí motoru M1, který se nacházel uvnitř robotu a byl k horní otočné plošině opět připojen přes převodovku. Na nákresech není bohužel vidět.



Obrázek 2.4: Původní ruka - zápěstí



Obrázek 2.5: Původní ruka - detail převodovky zápěstí

Detail zápěstí vidíme na posledních dvou nákresech. Na obrázku 2.4 vidíme všchny zbylé motory. M4 je připojen k převodovce s převodovým poměrem 100:1 a ta přímo otáčí chapadlem kolem osy určené její výstupní hřídelí. Motor M5 slouží k otáčení chapadla kolem jeho osy. Převodu síly z hřídele motoru na otáčivý pohyb chapadla je dosaženo šnekovým převodem uvnitř převodovky zápěstí. Toto je vidět z obrázku 2.5, odkud také vidíme jak je realizováno svírání a rozevírání chapadla. Hřídel na které se otáčí chapadlo je totiž dutá a uvnitř vede závitová tyč, která svým vysouváním pomocí mechanických převodů rozevírá plastové chapadlo. Touto hřídelí otáčí motor M6. Tento motor je velice specifický, má totiž dutou hřídel s vnitřním závitem ve kterém je vedena závitová tyč ovládající chapadlo. Dlužno podotknout, že tato tyč je nestandardního průměru, stoupání i tvaru závitu.

2.2 Skutečný stav ruky

2.2.1 Stav pohonů

Stav mechanického manipulátoru na začátku mé práce bohužel již neodpovídal stavu ve kterém byl původně vyroben. Nejhůře na tom byly především motory. Jediný funkční zůstal M4. M3 byl naprosto spálený a dokonce i natavil plastový díl ve kterém byl uchycen a připekl se k němu. Motor M2 měl spálené jedno vinutí a tudíž byl také nepoužitelný. M6 měl spálenou polovinu jednoho vinutí a šel by tedy nouzově použít, pokud bychom

zajistili bipolární buzení. M5 měl také jedno vinutí spálené takže byl k ničemu. Motor M1 otáčející horní plošinou jsem neměl ani k dispozici. Pohony ruky byly pravděpodobně v minulosti dlouhodobě připojeny na vyšší než jmenovité napětí a došlo k přepálení vinutí.

2.2.2 Stav mechanických dílů

Dalším problémem byl stav plastových dílů - plastového uložení posuvného kloubu a také převodovka zápěstí nebyla v ideálním stavu. Šedivé plastové uložení mělo ulámané části kterými prochází šrouby držící obě poloviny tohoto dílu pohromadě. Také plastové krabičce převodovky zápěstí chybí jeden ze čtyř závitů. Řešením by bylo vyrobit tyto díly nové. Kvůli časové náročnosti výroby nových dílů bylo ale od tohoto postupu upuštěno. Nicméně alespoň plastové uložení posuvného kloubu by se mělo v budoucnu určitě vyrobit znova, jeho současný stav je silně neuspokojivý. Stav převodovky zápěstí není ideální, ale tato je stále použitelná a pokud nebude vystavena neúměrně brutálnímu zacházení, dá se čekat, že vydrží ještě dlouho.

Kapitola 3

Kinematika

3.1 Přímá kiematická úloha

Přímá kinematická úloha převádí souřadnice robotického manipulátoru z prostoru kloubových souřadnic (úhly natočení jednotlivých kloubů) do euklidovského prostoru (poloha a orientace). Tento přepočet bude robotu v budoucnu sloužit například k předejití kolizní situace v případě, že by nějaká část mechanické ruky zasahovala do známé překážky v okolním prostředí.

3.1.1 Denavitova-Hartenbergova notace

Pro řešení přímé kinematické úlohy sériových manipulátorů se typicky používá takzvaná Denavitova-Hartenbergova metoda, což je postup, který dává obecný návod k řešení přímé kinematiky. Výsledkem tohoto postupu je umístění lokálních souřadných systémů pevně spojených s jednotlivými kinematickými prvky robotu a návod na vzájemnou transformaci souřadnic mezi těmito jednotlivými souřadnými systémy. Prvním krokem je očíslování ramen (*links*) a kloubů (*joints*) v pořadí od základny, tak, že každé rameno i má kloub blíže základně označen číslem i a končí kloubem *i+1*. Nyní si umístíme do každého kloubu lokální souřadný systém B_i s počátkem O_i a osami x_i, y_i, z_i a to podle následujících pravidel [6, str. 199]:

- *Osa z_i je totožná s osou kloubu i+1*
  Nejdříve začínáme určením všech os z. U rotačních kloubů je tato osa jednoznačně určená (kladný směr osy je volitelný), u posuvných kloubů můžeme zvolit jakoukoliv

osu rovnoběžnou s se směrem posunu. Z praktických důvodů se ovšem většinou volí přímo osa daného posuvného kloubu.

- *Osa x_i je nejkratší spojnicí (společnou normálou) os z_{i-1} a z_i. Osa x_i směřuje od z_{i-1} do z_i.*
  Pokud jsou osy z_{i-1} a z_i rovnoběžné, dostáváme nekonečné množství možných os x_i. V tomto případě zvolíme osu x_i tak, že je totožná s osou x_{i-1}. Pokud se osy z_{i-1} a z_i protínají, neexistuje mezi nimi nejkratší spojnice (je degenerovaná do jediného bodu). Osu x_i tedy zvolíme podle vztahu $x_i = z_{i-1} \times z_i$

- *Osa y_i je určena vztahem $y_i = z_i \times x_i$*
  Osa y_i je zvolena tak, aby s osami x_i a z_i tvořila pravotočivý souřadný systém. Pro stanovení Denavitových-Hartenbergových parametrů není přímo nutná, takže se v nákresech pro větší přehlednost často vynechává.

Pokud jsme správně rozmístili lokální souřadné systémy, můžeme nyní každé rameno robotu popsat čtyřmi D-H parametry. Tyto parametry jsou:

- *Délka ramene (link length) a_i*
  Délkou ramene rozumíme vzdálenost mezi osami z_{i-1} a z_i podél osy x_i.

- *Zkrut ramene (link twist) α_i*
  Úhel α_i je úhel o který se musí otočit osa z_{i-1} okolo osy x_i tak, aby byla rovnoběžná s osou z_i

- *Délka kloubu (joint distance, link offset) d_i*
  Délka kloubu (přesazení ramen) je definovaná jako vzdálenost mezi osami x_{i-1} a x_i podél osy z_{i-1}. V případě posuvných kloubů bývá tento parametr kloubovou souřadnicí, kterou určujeme délkou vysunutí posuvného kloubu.

- *Úhel kloubu (joint angle) θ_i*
  Úhel kloubu je úhel o který se musí otočit osa x_{i-1} okolo osy z_{i-1} tak, aby byla rovnoběžná s osou x_i. V případě rotačních kloubů bývá tento parametr kloubovou souřadnicí, kterou určujeme natočením kloubu.

Po stanovení všech čtyř parametrů můžeme sestavit transformační matici převádějící souřadnice zadané v souřadném systému B_i do souřadného systému B_{i-1}, tedy blíže základně robotu. Postupným prováděním těchto transformací mezi jednotlivými souřadnými systémy dostaneme polohu bodu zadaného například v souřadném systému chapadla

(například bod $[0, 0, 0]$ - střed chapadla) vyjádřenou v souřadném systému rámu robotu. Odtud ji budeme moci dále převést do světového souřadného systému. Vzhledem k tomu, že se jedná o robota mobilního, bude pro transformaci souřadnic ze souřadného systému rámu robotu do světového souřadného systému nejdříve nutné vyřešit jeho navigaci a zjišťování polohy v okolním prostředí, například za pomoci odometrie, což ale není cílem této práce.

Pro zjišťování možné kolize ruky s předměty v okolním prostředí si můžeme obdobně v každém lokálním souřadném systému stanovit velikosti daného ramene robotu a dalších namontovaných prvků pevně spojených s tímto souřadným systémem a vytvořit bezpečnostní obálku, pro jednoduchost například tvaru válce či kvádru. Po transformaci této obálky do světového souřadného systému můžeme zjišťovat jestli nedochází ke kolizi se známou překážkou. Transformace ze souřadného systému B_i do B_{i-1} je realizována jako čtyři postupné transformace, dvě rotace a dvě translace.

$$^{i-1}T_i = D_{z_{i-1},d_i} R_{z_{i-1},\theta_i} D_{x_{i-1},a_i} R_{x_{i-1},\alpha_i} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i\cos\alpha_i & \sin\theta_i\sin\alpha_i & a_i\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & -\cos\theta_i\sin\alpha_i & a_i\sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Transformace souřadnic ze souřadného systému se provede vynásobením vektoru souřadnic transformační maticí zleva. Při těchto výpočtech používáme homogenní souřadnice, tedy souřadnice jejichž dimenze je o jeden stupeň vyšší než dimenze prostoru ve kterém máme souřadnice zadány. Transformační vztah mezi euklidovskými a homogenními souřadnicemi je následující:

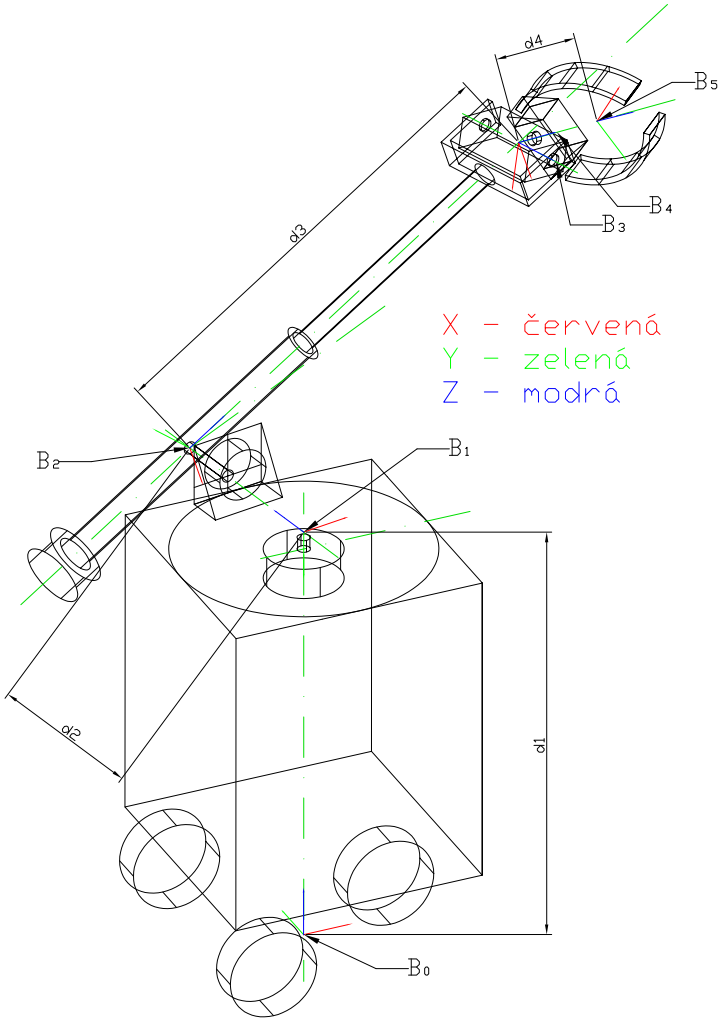
$$\begin{bmatrix} \frac{x}{\omega} \\ \frac{y}{\omega} \\ \frac{z}{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \omega \end{bmatrix}$$

Měřítko zobrazení ω se typicky volí $\omega = 1$. Transformaci souřadnic mezi sousedními souřadnými systémy tedy můžeme zapsat následovně:

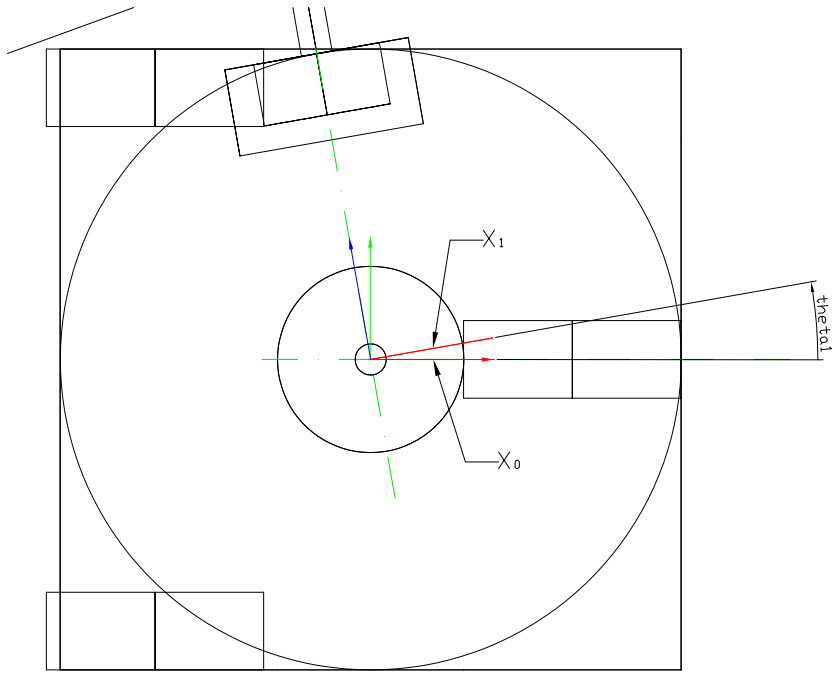
$$\begin{bmatrix} x_{i-1} \\ y_{i-1} \\ z_{i-1} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^{i-1}T_i \begin{bmatrix} x_i \\ {}_iy \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix}$$

3.1.2 Řešení přímé kinematické úlohy

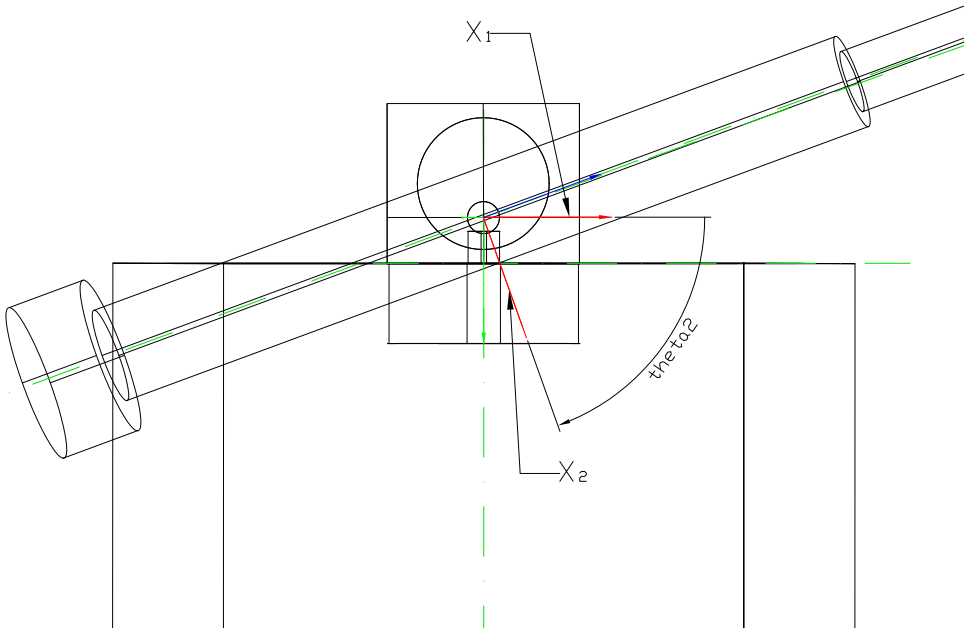
Prvním krokem je rozmístění lokálních souřadných systémů pevně spojených s kinematickými články robotu. Na obrázku 3.1 vidíme umístění souřadných systémů B_i a jejich očíslování. B_0 je souřadný systém pevně spojený se základnou robotu. Zároveň jsou na nákresu vyznačeny délky jednotlivých ramen. Na dalších nákresech jsou detaily rotačních kloubů. Pro jednotlivé klouby jsem zvolil zkrácené označení J_i (z angl. *joint*). Pro zpřehlednění nákresů jsou jednotlivé osy souřadných systémů odlišeny barvami.



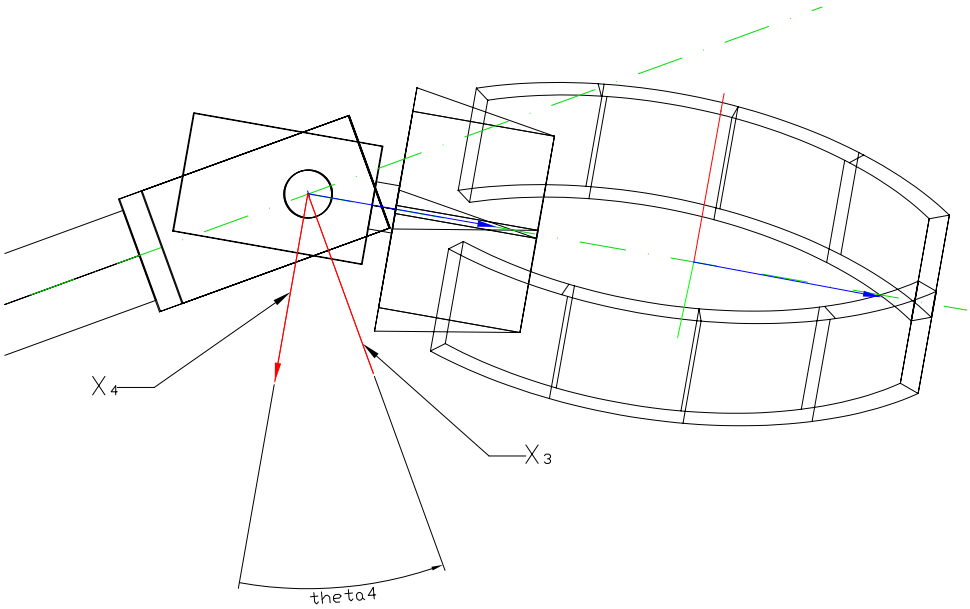
Obrázek 3.1: Rozmístění jednotlivých souřadných systémů, celkový pohled



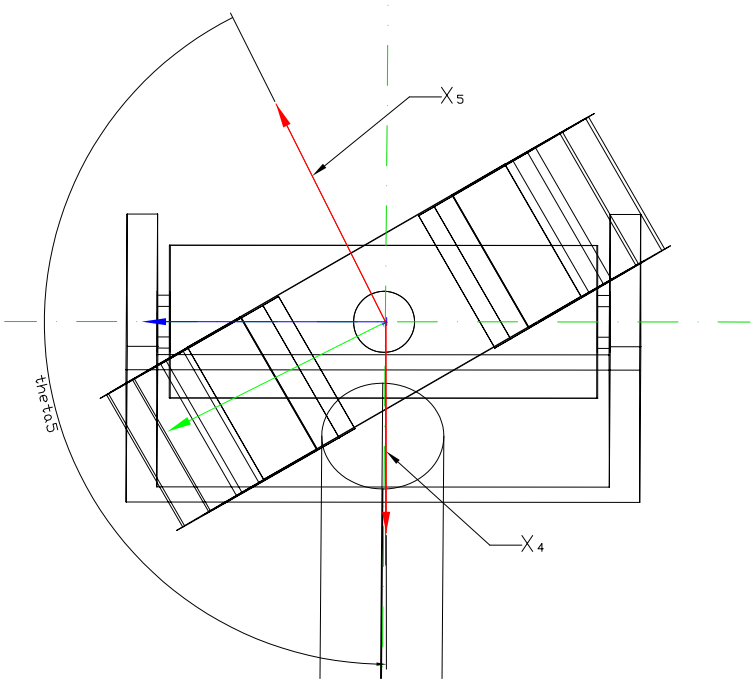
Obrázek 3.2: Rotační kloub J_1, pohled shora



Obrázek 3.3: Rotační kloub J_2, pohled v ose rotace



Obrázek 3.4: Rotační kloub J_4, pohled v ose rotace



Obrázek 3.5: Rotační kloub J_5, pohled v ose rotace

i	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	$-90°$	d_1	θ_1
2	0	$90°-\beta_2$	d_2	θ_2
3	0	$90°$	d_3	0
4	0	$-90°$	0	θ_4
5	0	$0°$	d_4	θ_5

Tabulka 3.1: D-H parametry

Rozměr	Velikost
d_1	38 cm
d_2	26 cm
d_4	9 cm
β_2	11,5 °

Tabulka 3.2: Rozměry robotu

Podle výše popsaného postupu určíme všechny Denavitovy-Hartenbergovy parametry (tab. 3.1). Skutečné rozměry jsou uvedeny v tab. 3.2. θ_i a d_3 jsou kloubové souřadnice, tedy vstupní parametry výpočtu. Tímto jsme získali všechny potřebné údaje pro řešení přímé kinematické úlohy potřebné např. k softwarové implementaci pokročilého řízení robotu. Transformační matice popisující homogenní transformaci souřadnic z posledního souřadného systému do souřadného systému rámu robotu je na přiloženém CD z důvodu velikosti, která ji činí nevhodnou pro tisk.

3.2 Inverzní kinematická úloha

Inverzní kinematická úloha je postup, který převádí požadovanou koncovou polohu a orientaci chapadla, zadanou v kartézském souřadném systému, do prostoru kloubových souřadnic. Na rozdíl od přímé kinematické úlohy neexistuje obecný návod pro její řešení. Pro většinu běžných robotů se šesti stupni volnosti a se zápěstím se třemi protínajícími se osami existuje ovšem doporučený postup, který většinou vede k výsledku. Je jím dekompozice kinematiky robotu na rameno (první tři stupně volnosti) a na zápěstí (poslední tři stupně volnosti). Vzhledem k tomu, že zápěstí se třemi protínajícími se navzájem kolmými osami dovoluje nastavit jakoukoliv orientaci, řešíme pro první tři klouby pouze dosažení správné polohy a orientaci koncového nástroje jsme schopni plně řídit pomocí zápěstí.

Bohužel, robot Hero je vybaven rukou pouze s pěti stupni volnosti, která neumožňuje ani v omezeném pracovním prostoru dosáhnout libovolné orientace zápěstí. Vzhledem k tomu, že robot byl původně vyvinut především jako výukový nástroj bez jakýchkoliv ambicí na autonomní řízení, nemuseli návrháři robotu příliš přemýšlet nad kinematickou strukturou ruky. Robot byl ve své době většinou řízen direktivně nahraným programem

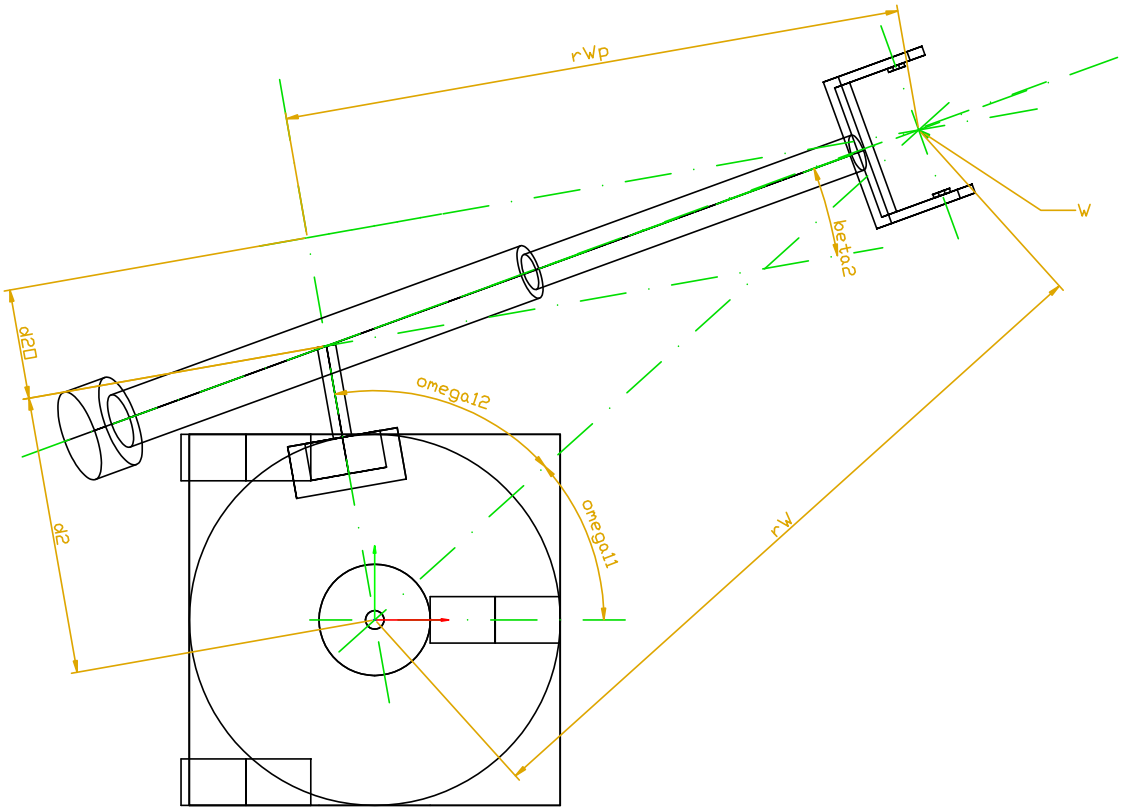
napsaným v jednoduchém programovacím jazyku. V tomto programu byly silně omezené možnosti jednoduchého rozhodování a podpora matematiky prakticky neexistovala. Pohyb ruky byl tedy řízen tak, že si jej uživatel nacvičil v manuálním režimu, zjistil do jaké polohy je třeba nastavit jednotlivé motory a robot pak pouze nastavil předdefinované polohy.

Největší problémy v tomto ohledu tvoří napojení třetího ramene manipulátoru na osu druhého kloubu. Rameno totiž neleží v rovině určené osou kloubu J2 (coby normálou), ačkoliv by to bylo z hlediska kinematické analýzy nanejvýš vhodné (poté by se jednalo o kinematickou strukturu *„Stanford arm“*). Třetí rameno manipulátoru je od požadované roviny záměrně odkloněno o úhel β_2. Za současného stavu při řešení kinematiky dostáváme příliš mnoho navzájem závislých veličin a analytické řešení kompletní inverzní kinematiky je prakticky nemožné.

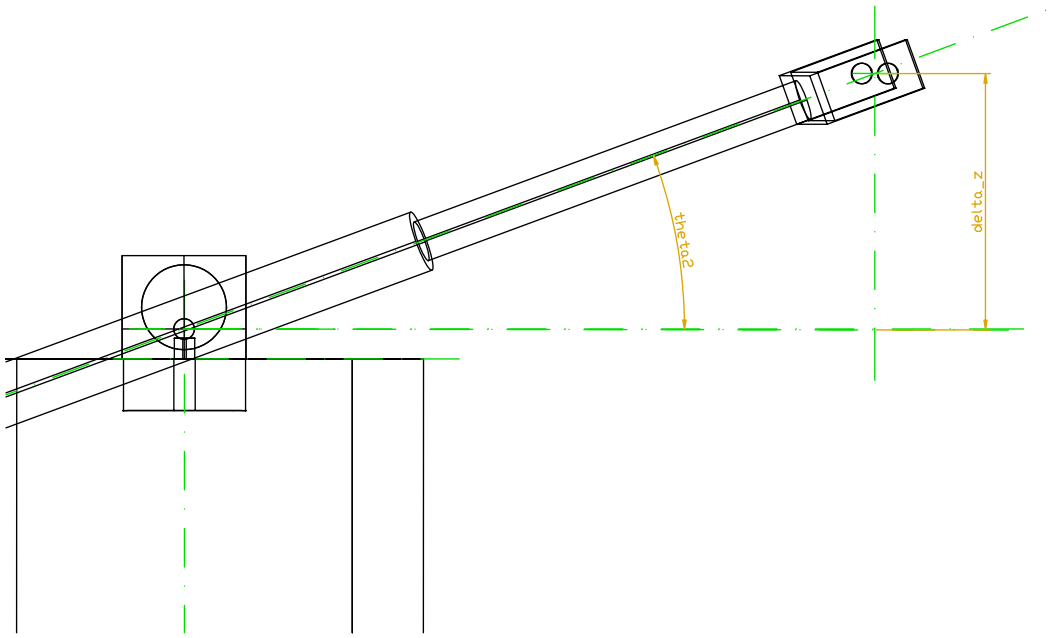
3.2.1 Rameno - bod W

Při řešení kinematických úloh pro roboty se šesti stupni volnosti je doporučeno nejdříve rozdělit strukturu robot na první tři klouby určující polohu a druhé tři klouby, tvořící zápěstí, zajišťující správnou orientaci. Kinematická struktura robotů se šesti stupni volnosti se většinou navrhuje tak, aby tento postup vedl bez problémů k výsledku inverzní kinematiky. Kinematika prvních tří kloubů se většinou řeší pouze pro polohu bodu W[1] . V této části se neřeší orientace, protože tu můžeme libovolně upravit zápěstím. Vstupem této části kinematiky je bod $W = [W_x, W_y, W_z]$ a výstupem budou kloubové souřadnice θ_1, θ_2 a θ_3. Souřadný systém robotu je zvolen stejně jako ne obr. 3.1. Na obr. 3.6 a 3.7 vidíme označení úhlů a vzdáleností potřebných pro výpočet kloubových souřadnic. Za použití základních geometrických vzorců můžeme určit vztahy mezi některými okótovanými rozměry.

[1] bod, ve kterém se protínají všechny osy zápěstí, z angl. *wrist*



Obrázek 3.6: Kinematika prvních tří kloubů ruky - pohled shora



Obrázek 3.7: Kinematika prvních tří kloubů ruky - pohled v ose J2

$$\Delta_z = |W_z - d_1| \tag{3.1}$$
$$r_W = \sqrt{(W_x)^2 + (W_y)^2} \tag{3.2}$$
$$r_{Wp} = d_3 \cdot \cos\beta_2 \cdot \cos\theta_2 \tag{3.3}$$
$$d_{2O} = d_3 \cdot \sin\beta_2 \tag{3.4}$$
$$\Delta_z = d_3 \cdot \cos\beta_2 \cdot \sin\theta_2 \tag{3.5}$$
$$\omega_{11} = \arctan(W_y, W_x) \tag{3.6}$$
$$\omega_{12} = \arcsin\frac{r_{Wp}}{r_W} \tag{3.7}$$
$$r_W^2 = r_{Wp}^2 + (d_2 + d_{2O})^2 \tag{3.8}$$

Do rovnice 3.8 dosadíme za člen r_{Wp}^2 kombinaci rovnic 3.3 3.5, ze které vyeliminujeme d_3. Do závorky místo členu d_{2O} dosadíme z rovnice 3.4 a dostaneme výsledný výraz:

$$r_W^2 = \left(d_2 + \frac{\Delta_z \sin(\beta_2)}{\cos(\beta_2)\sin(\theta_2)}\right)^2 + \frac{{\Delta_z}^2 (\cos(\theta_2))^2}{(\sin(\theta_2))^2} \tag{3.9}$$

Jedinou neznámou zde zůstává θ_2, pro kterou rovnici vyřešíme. Řešení se nám rozpadne na čtyři případy. Dva z nich uvažují zápornou délku třetího ramene robotu, tato řešení můžeme zanedbat. Dvě zbývající řešení jsou platná, protože robot může do většiny dostupných bodů dosáhnout ve dvou konfiguracích. Pro jednoduchost uvažuji pouze jedno řešení, odvodit druhou konfiguraci lze jednoduše geometricky a není třeba opakovaných výpočtů. Řešení rovnice 3.9 je kvůli velkému rozsahu vzorce uloženo v příloze.

Tímto získáme hodnotu θ_2 platnou pro první možnou konfiguraci manipulátoru. Požadovanou délku třetího kloubu d_3 vypočteme z rovnice 3.5, tato je pro obě konfigurace stejná. Jako poslední vypočítáme dosazením rovnic 3.2 a 3.3 do rovnice 3.7 úhel ω_{12}.

Souřadnice	Konfigurace 1	Konfigurace 2
θ_1	$\omega_{11} + \omega_{12}$	$\omega_{11} - \omega_{12}$
θ_2	θ_2	$\pi - \theta_2$
d_3	d_3	d_3

Tabulka 3.3: Možné konfigurace

Tento algoritmus jsem testoval ověřováním konečného počtu bodů pomocí systému Matlab a výpočet dával správné výsledky pro všechny kvadranty. K ověření správného výsledku sloužila přímá kinematický úloha.

3.2.2 Zápěstí

Zápěstí robotu Hero 1 bohužel není schopné dosáhnout libovolné polohy, takže nemůžeme použít obvyklou metodu dekompozice k řešení inverzní kinematiky. Vzhledem k tomu, že je pohyb zápěstí omezen na dosažení pouze nějakých poloh, je nutné zvolit které orientace jsou pro provoz robotu důležité. Pravděpodobně nejvýhodnější by bylo kloubem J4 (naklápění zápěstí) řídit náklon chapadla vůči vodorovné rovině a kloub J5 (otáčení chapadla) bude řídit natočení chapadla vzhledem ke kolmici vedoucí z koncového bodu chapadla k zemi. Natáčení kloubu J5 není problémem, po vypočítání hodnot všech kloubových souřadnic kloubů J1... J4 můžeme řešit přímou kinematickou úlohu a zjistit pootočení chapadla vůči požadované poloze. Toto pootočení lze poté snadno zkorigovat přímo natočením klubu J5.

Pracovní bod chapadla robotu leží ve středu koule S o poloměru ramene d_4. Osa kloubu J4 je tečnou této koule a zároveň je normálou roviny tvořené rameny robotu d_3 a d_4. Při dosahování požadované polohy zápěstí jsem postupoval následovně:

1. Položil jsem si $\theta_2 = 0$ a na kouli S obklopující rameno d_4 našel bod W_0, ve kterém by se osa J4 dotýkala povrchu koule při požadovaném sklonu zápěstí (definován zadaným úhlem γ). Tento bod si vyjádřím v pomocném souřadném systému B_w, jež má počátek shodný se středem koule S a jehož orientace je shodná se souřadným systémem rámu robotu. Tento bod má souřadnice (vyjádřené v souřadném systému B_w):

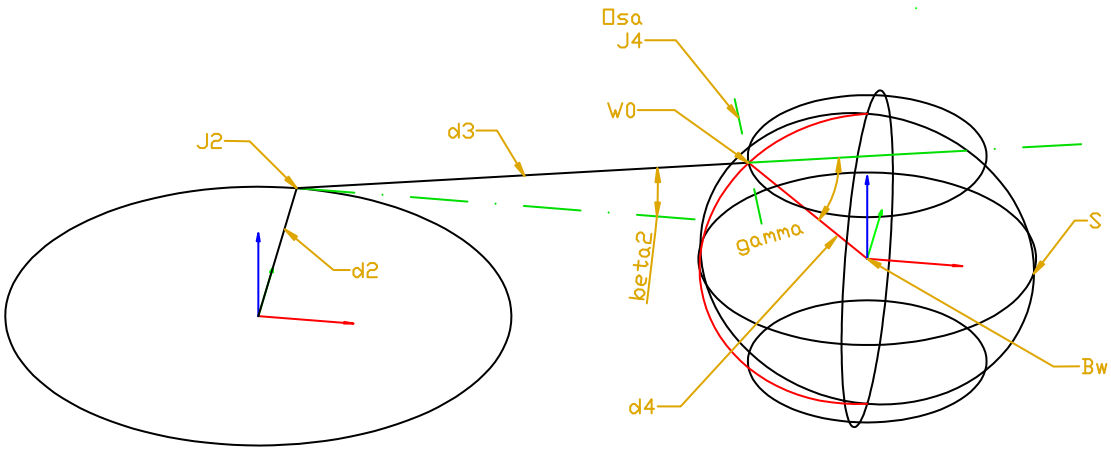
$$\begin{aligned} x_{W_0} &= -d_4 \cdot \cos\gamma \cdot \cos\beta_2 \\ y_{W_0} &= -d_4 \cdot \cos\gamma \cdot \sin\beta_2 \\ z_{W_0} &= d_4 \cdot \sin\gamma \end{aligned}$$

2. Nyní sestavíme předpis pro polohu tohoto bodu na kružnici pokud θ_2 nebude nulová. Tento bod na povrchu stačí rotovat kolem dvou os lokálního souřadného systému a poté odečíst od zadaného koncového bodu chapadla (ozn. E, vstupní parametr inverzní kinematiky) a tím získáme bod W do kterého potřebujeme dosáhnout.

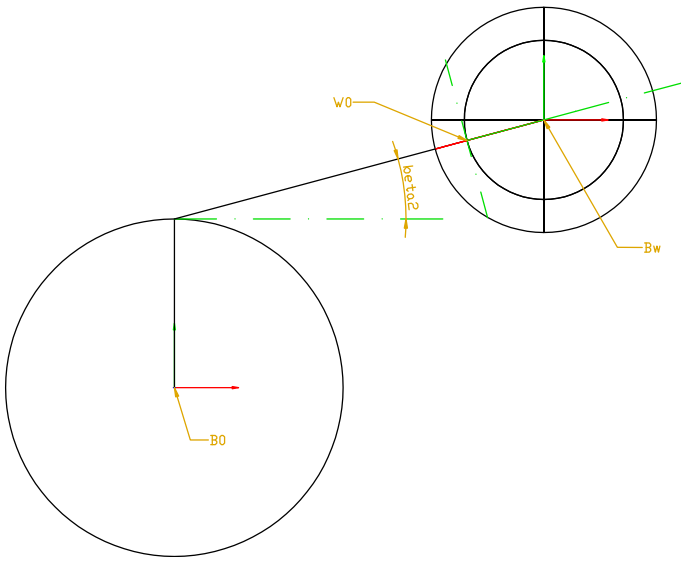
$$\mathbf{W} = \mathbf{E} - Rot\left(z_{B_w}, \theta_1\right) \cdot Rot\left(y_{B_w}, \theta_2\right) \cdot \mathbf{W_0}$$

Tento zápis můžeme přepsat maticově:

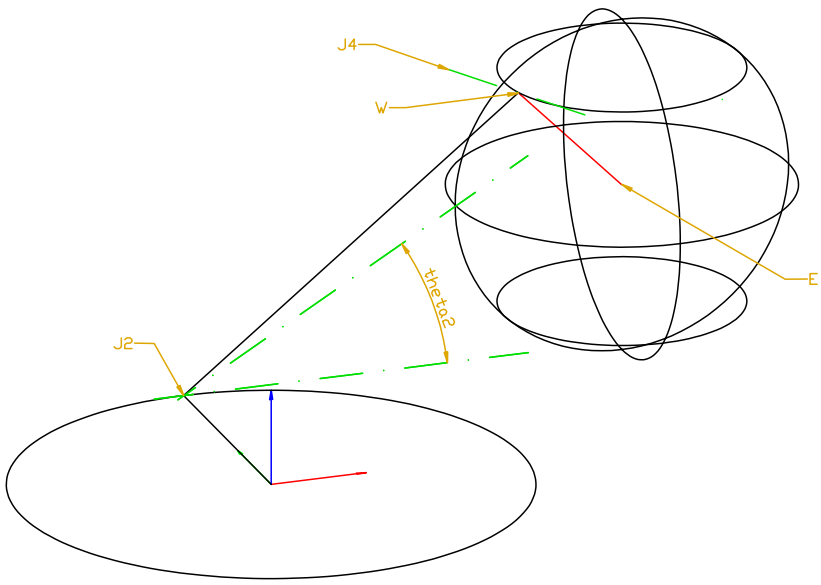
$$\mathbf{W} = \mathbf{E} - \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 \\ 0 & \sin\theta_2 & \cos\theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -d_4 \cdot \cos\gamma \cdot \cos\beta_2 \\ -d_4 \cdot \cos\gamma \cdot \sin\beta_2 \\ d_4 \cdot \sin\gamma \end{bmatrix}$$



Obrázek 3.8: Schematický nákres ramene a zápěstí z boku, $\theta_2 = 0$



Obrázek 3.9: Schematický nákres ramene a zápěstí shora, $\theta_2 = 0$



Obrázek 3.10: Schematický nákres ramene a zápěstí

Takto jsme tedy dostali bod W, jehož inverzní kinematiku máme již zpracovanou v minulém odstavci. Nyní máme ovšem problém v tom, že ve vyjádření bodu W figurují neznámé θ_1 a θ_2. To je dáno právě tím, že v našem případě nelze separovat mechanický manipulátor na dvě části řešené zvlášť a musíme ho řešit jako celek. Pokud bod W získaný v tomto odstavci dosadíme do rovnic z odstavce 3.2.1, získáme následující rovnici:

$$\begin{aligned}(10.0 - 10.0\,\sin(\theta_1)\sin(\theta_2))^2 + (10.0 + 10.0\,\cos(\theta_1)\sin(\theta_2))^2 = \\ \left(15 + 0.1768086171\,\frac{|20.0 + 10.0\,\cos(\theta_2)|}{\sin(\theta_2)}\right)^2 + \\ + \frac{(|20.0 + 10.0\,\cos(\theta_2)|)^2\,(\cos(\theta_2))^2}{(\sin(\theta_2))^2}\end{aligned}$$

I pokud bychom odstranili dvě neznámé z této rovnice vhodným dosazením z dalších vztahů, je vidět, že tato rovnice nebude pravděpodobně analyticky řešitelná, díky velikým nelinearitám a množstvím řešení na které by se rozpadla díky absolutním hodnotám a goniometrickým funkcím.

3.2.3 Možná řešení

Vzhledem k tomu, že pravděpodobně není možné vyřešit inverzní kinematickou úlohu s rozumnou složitostí analyticky, budeme muset problém obejít nějak jinak. Jednou z

možností je použití nějaké numerické iterativní metody, které se v robotice používají pro řešení inverzních kinematik. Asi nejčastěji používanou je *Newton-Raphsonova metoda*, popis algoritmu najdeme např. v [6], další zmiňuje [5]. Jedná se většinou o jednoduché iterativní algoritmy, které pracují s Jakobiánem. Nicméně problémem těchto postupů je nejistý výsledek, protože algoritmus nemusí nutně konvergovat ke správnému řešení. Další nevýhodou je časová náročnost výpočtu a nejistá doba dokončení.

Dalším možným řešením je upravit kinematickou strukturu manipulátoru buď zavedením ještě jednoho kloubu do zápěstí, což by bylo asi velice náročné, nebo odstraněním úhlu β_2 a připojením ramene d_3 kolmo na křídel převodovky J2. Vzhledem k tomu, že se tato část ruky bude pravděpodobně ještě rekonstruovat, zdá se mi toto řešení jako snazší. Tato změna by umožnila kinematiku robota vypočítat velice snadno analyticky.

Kapitola 4

Pohony

Úkolem této práce je především nahradit stávající pohony na robotu. Současné pohony jsou naprosto nepoužitelné, většina motorů je nefunkčních, viz. odstavec 2.2.1. Při výběru nových pohonů a jejich řídicích jednotek by bylo vhodné respektovat stávající koncepci robotu kterou navrhl J. Zemánek v [1]. Ve své práci dospěl k použití pohonů od firmy Maxon motor a.g.[1]

Tato firma vyrábí ucelený sortiment pohonů pro oblast malých výkonů (typ. do 200W). Nabízí jak motory (kartáčové i bezkartáčové), tak i vhodné převodovky k těmto motorům. Pro řízení motorů dodávají řídicí jednotky rozdělené do několika modelových řad od nejjednodušších analogových až po polohovací jednotky s 32-bitovým procesorem a bohatými možnostmi pro začlenění do automatizovaných systémů. Dále je v nabídce také příslušenství jako například inkrementální rotační enkodéry, motorové brzdy a další součásti pro realizaci pohonů. Celý sortiment má stavebnicový charakter, takže specifikace pohonu většinou začíná výběrem motoru, poté můžeme zvolit z dostupných převodovek pro daný motor, vhodný senzor polohy pro zpětnou vazbu a nakonec řídicí jednotku. Seznam veškerých dostupných součástí a informace o nich jsem čerpal z [7], na *www.maxonmotor.com* je k dispozici dokonce i počítačový program pro usnadnění výběru pohonů, který nabízí uživateli vhodné součásti na základě zadaných požadavků.

Vzhledem k množství nabízených součástí pro pohony a k množství jejich kombinací se každý objednaný pohon vyrábí na zakázku. Výroba probíhá ve výrobním závodě ve Švýcarsku, objednávky a dovoz pro Českou republiku zajišťuje firma UZIMEX PRAHA, spol. s r.o., která pohony dodává typicky do šesti týdnů. V našem případě se dodání ještě protáhlo přibližně o týden. Tato dodací lhůta a také čas potřebný pro adaptaci stávajících

[1] dále jen „Maxon“

mechanických součástí na nové pohony představoval při vypracovávání bakalářské práce nepříjemné zdržení, protože bez kompletní mechaniky nebylo prakticky možné dělat na robotu žádné práce.

4.1 Porovnání vlastností motorů

4.1.1 Krokové motory

Všechny původní motory (kromě pojezdu) byly dvoufázové krokové motory s vyvedeným středem vinutí. Tento typ motoru se snadno číslicově řídí pomocí unipolárního budiče (stačí v podstatě 4 spínače). Krokové motory obecně dosahují nízkých otáček (typ. stovky ot./min) a relativně vysokých momentů, jsou také velice levné a mají dlouhou životnost. Další vlastností je jednoduché direktivní řízení polohy s minimálními výpočetními nároky. Ve své době je kombinace těchto vlastností předurčovala pro použití na robotu Hero.

4.1.2 Stejnosměrné motory

Hlavní výhodou stejnosměrných motorů je vysoký měrný výkon (W/kg), daleko vyšší než u krokových motorů. Zároveň vynikají velmi vysokou účinností (např. RE-max 24 použitý jako pohon kloubu J3 dosahuje účinnosti až 84%), což je výhoda při bateriovém provozu. Stejnosměrné motory charakteristicky dosahují daleko vyšších otáček (typ. tisíce až desetitisíce ot./min) a úměrně tomu i nižších momentů než krokové motory. Proto je často nutné tyto motory vybavit vhodnou převodovkou, málokdy potřebujeme tisíce otáček za minutu, zvláště při konstrukci mechanických manipulátorů.

Řízení je také daleko komplikovanější než u krokových motorů, protože potřebujeme zpětnovazební řídicí systém. Tento obvod většinou sestává ze senzoru polohy hřídele motoru (většinou optický či magnetorezistivní enkodér nebo méně používaný resolver) a řídicí jednotky, která je na základě informací ze senzoru schopna plynule regulovat proud dodávaný do motoru. Vzhledem k rozvoji mikroelektroniky, zlevnění součástek a ohromnému nárůstu výpočetního výkonu během posledních dvou desetiletí se tato nevýhoda stejnosměrných motorů stává čím dál tím menší překážkou při jejich nasazení v automatizaci. Naopak začínají převažovat jejich mechanické výhody. Životnost kartáčových stejnosměrných motorů je díky pokroku v materiálovém inženýrství také daleko delší než

v době kdy vznikal robot Hero. Životnost bezkartáčových stejnosměrných motorů je prakticky daná jenom jejich mechanickou konstrukcí (životností ložisek), stejně jako je tomu v případě krokových motorů.

4.1.2.1 Motory Maxon EC flat

Tyto motory jsou elektronicky komutovanými (bezkartáčovými) stejnosměrnými motory. Mají tři statorová vinutí a rotor z vícepólového permanentního magnetu. Elektricky tedy připomínají trojfázový synchronní motor. Řídicí elektronika musí budit jednotlivá vinutí v závislosti na poloze hřídele a ve správném pořadí podle požadovaného směru otáčení. K informaci o poloze hřídele jí slouží tři Hallovy sondy zabudované do motoru, tyto lze také použít pro regulaci polohy pomocí jednotek EPOS. Motory řady EC flat jsou relativně novým přírůstkem do nabídky firmy Maxon, od standardních motorů řady EC se liší diskovitým tvarem a vnějším rotorem. Dalším rozdílem jsou nižší jmenovité otáčky a vyšší výstupní moment, čímž se přibližují původně použitým krokovým motorům. Vyrábí se v rozpětí výkonů od 0,03 do 90 W. Všechny EC flat motory, o výkonu nižším než 50 W mají vývody realizovány formou ohebného tištěného spoje (tzv. *flex printed circuit*). Proto je nutné použít adaptér, který má na jedné konektor kompatibilní s tímto vývodem a na druhé straně běžnou šroubovací svorkovnici.

4.1.2.2 Motory Maxon RE-max

Motory řady RE-max jsou vlajkovou lodí mezi komutátorovými motory vyráběnými firmou Maxon. Používají speciální konstrukci rotoru bez železných částí, což zaručuje příznivé dynamické vlastnosti. Dodávají se s komutátory ve dvou provedeních, buď s běžnými uhlíkovými nebo s komutátory ze vzácných kovů pro delší životnost. Magnety použité při výrobě statoru jsou neodymiové pro dosažení většího měrného výkonu a pro další zlepšení životnosti.

4.2 J1 - Otáčení hlavy

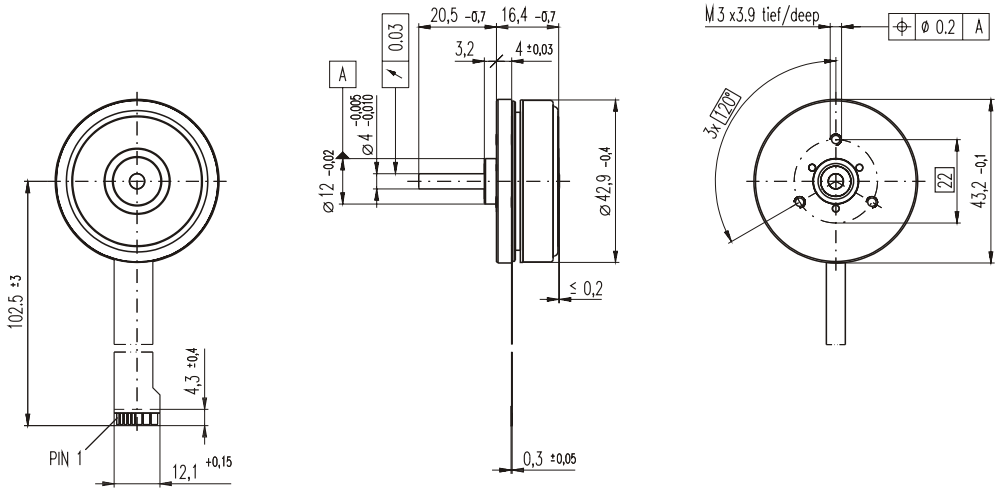
4.2.1 Původní pohon

Původní převodovku jsem neměl k dispozici, z motoru zůstalo jenom torzo se statorovým vinutím. V [1] se ovšem uvádí, že originální pohony na otáčení hnacího kola a na otáčení

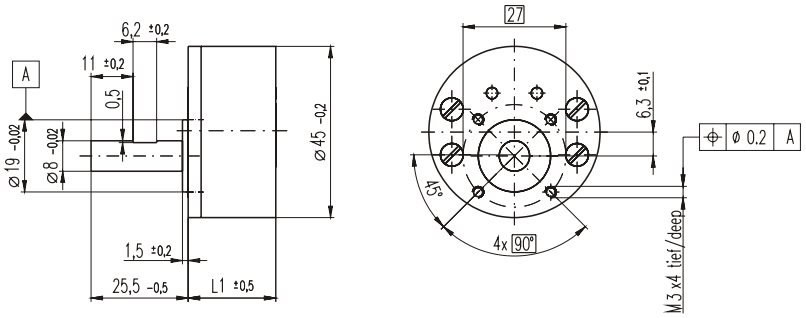
hlavy robotu byly totožné. Odhadovaný maximální výstupní moment je 1,6 Nm.

4.2.2 Nový pohon

Rozhodl jsem se použít plochý motor EC 45 flat 30W (obj. č. 200142) v kombinaci s převodovkou 310:1 (obj. č. 3001187). Tato kombinace je vhodná protože tento pohon bude namontován zevnitř na horní stěnu základny robotu a klasický pohon s válcovým motorem by se tam kvůli své větší délce nevešel. Je použita pětistupňová převodovka s předlohou, typové označení GS 45. Délka L1 vyznačená v nákresu činí pro pětistupňovou převodovku 30,4 mm. Maximální výstupní moment převodovky činí 2 Nm, což je pro otáčení hlavy robotu dostatečné.



Obrázek 4.1: Diskový motor EC 45 flat 30W

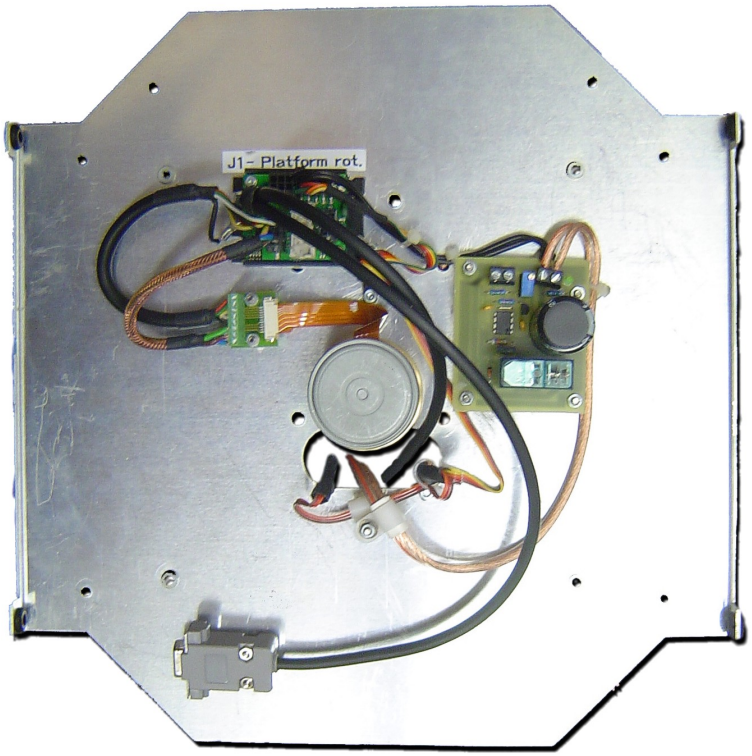


Obrázek 4.2: Převodovka s předlohou GS45

Pro maximální výstupní moment M_o můžeme při znalosti účinnosti převodovky a převodového poměru vypočítat maximální vstupní moment M_i. V katalogovém listu[7] je uvedena účinnost pětistupňové varianty GS 45 $\eta = 0,59$. Převodový poměr jsem zvolil $n = 310$. Maximální vstupní moment vypočteme podle vztahu

$$M_i = \frac{M_o}{\eta \cdot n}$$

Pro zvolenou převodovku vychází $M_i \doteq 0,01Nm$. Z výkonové charakteristiky zvoleného motoru [7] vidíme, že tohoto momentu motor dosahuje již při proudu 0,4 A. Pro řízení tohoto pohonu tedy stačí použít slabší a menší verzi jednotky EPOS označenou EPOS 24/1 se jmenovitým výstupním proudem 1 A. Motor má velikou výkonovou rezervu, ale je to nejslabší diskový motor od firmy Maxon, který jde kombinovat s převodovkou.



Obrázek 4.3: Spodní část horní stěny robotu s pohonem, řídicí jednotkou a přepěťovou ochranou

4.3 J2 - Pohyb ramene

4.3.1 Původní pohon

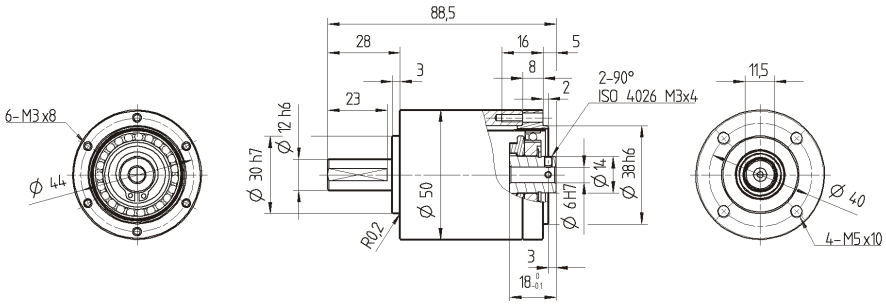
Původní pohon byl opět složen z krokového motoru a převodovky s převodovým poměrem 200:1. Motor měl spálené jedno vinutí a byl tudíž nepoužitelný. Celý zbytek ruky robotu je letmo uložen přímo v převodovce tohoto pohonu bez jakýchkoliv dalších pomocných ložisek, toto řešení klade větší nároky na radiální zatížitelnost výstupní hřídele převodovky.

4.3.2 Nový pohon

Při volbě pohonu jsem se opět rozhodl pro diskový motor EC 45 flat 30 W (obr. 4.1), především kvůli velikosti a příznivému poměru otáček a točivého momentu. Problém ovšem byl s volbou převodovky. Převodovky Maxon GS 45 mají maximální povolenou radiální zátěž hřídele 180 N ve vzdálenosti 10 mm od výstupního ložiska. Rameno robotu je uloženo asi 10 cm od výstupního ložiska a jeho výsledná hmotnost se bude pohybovat okolo 1,5 kg. Pro hmotnost předmětu, který by měl robot unést v chapadle, necháme rezervu 200 g. Celková hmotnost zbytku manipulátoru vzroste na 1,7 kg. Po aplikaci fyzikálního zákona rovnováhy na páce (a za předpokladu, že budeme provozovat robot na povrchu Země) nám vyjde radiální zátěž přepočítaná do vzdálenosti 10 mm od výstupního ložiska převodovky 166,7 N. Tato hodnota se již velice blíží maximální povolené zátěži převodovky GS 45. Navíc udaná katalogová hodnota je maximální hraniční hodnotou povoleného zatížení a trvalé vystavování převodovky takovýmto provozním podmínkám by razantně zkrátilo její životnost.

Z těchto důvodů jsem se rozhodl zachovat stávající převodovku a přidat k ní pouze nový motor. Bude nutné vyrobit potřebný mechanický přechodový díl, ale jinak je původní převodovka v uspokojivém stavu, vůle výstupní hřídele je malá.

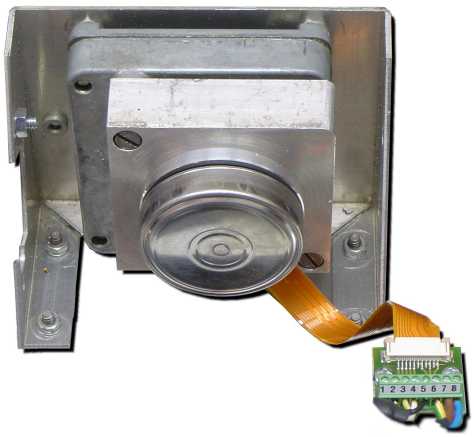
Elegantním řešením by bylo tuto převodovku vyměnit za harmonickou převodovku. Harmonické převodovky jsou známé velkými převodovými poměry, vysokým dosažitelným momentem, vysokou účinností a minimální vůlí výstupní hřídele (většinou je nulová). Vhodnou převodovku jsem nalezl v nabídce německé společnosti Harmonic Drive AG (*www.harmonicdrive.de*), typ PMG-14A-100-M. Jedná se o převodovku s převodovým poměrem 100:1 a vnitřní vstupní hřídelí určenou k připojení vlastního motoru.



Obrázek 4.4: Harmonická převodovka řady PMG-14A-xxx-M

Tato převodovka by se tedy dala snadno použít s pořízeným motorem. Maximální radiální zatížení výstupní hřídele je 392 N (měřeno ve středu výstupní osy, tedy zhruba 11,5 mm od výstupního ložiska), což je více než dvojnásobek dovoleného radiálního zatížení převodovky Maxon GS 45. Výstupní moment pohonu sestávajícího z motoru EC 45 flat a vybrané harmonické převodovky by činil 5 Nm, tato hodnota nám taktéž poskytuje bohatou rezervu. Vzhledem k nedostatku času jsem nezjišťoval u výrobce dostupnost ani cenu, ale vzhledem k tomu, že se jedná o harmonickou převodovku tak se dá předpokládat, že cena bude docela vysoká. Nicméně výměna této převodovky je jedním z možných vylepšení robotu v budoucnu.

Motor pohánějící kloub J2 je nejvíce namáhaným motorem celé rekonstruované části robotu. Po případné výměně původní převodovky za novou harmonickou by ještě vzrostly nároky na točivý moment vyvíjený motorem. Proto jsem k jeho řízení zvolil jednotku EPOS 24/5 se jmenovitým výstupním proudem 5 A.



Obrázek 4.5: Motor EC 45 flat s přechodovým dílem a původní převodovkou

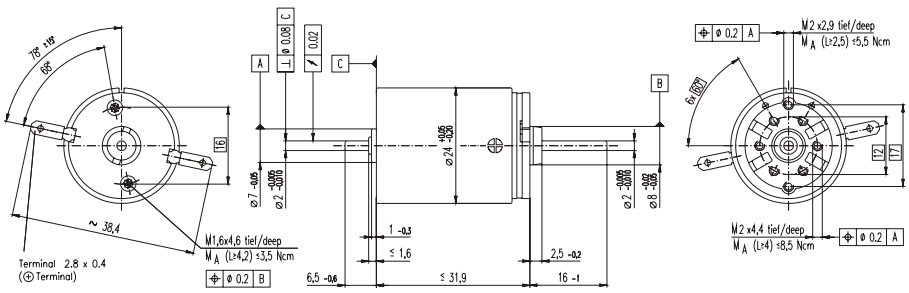
4.4 J3 - Vysouvání ramene

4.4.1 Původní pohon

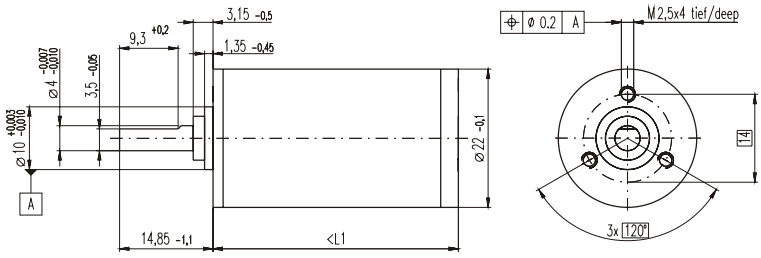
Vysouvání ramene bylo realizováno opět krokovým motorem, který přímo otáčel plastovou závitovou tyčí, která svým vysouváním měnila celkovou délku ramene robotu (viz. 2.2). Tento motor byl úplně zničený, dokonce se připekl do plastového uložení ke kterému byl původně připevněn. Evidentně ho někdo v minulosti nechal běžet na vyšší napětí než na které byl stavěný, motor natavil plastové díly a pak se přepálila vinutí.

4.4.2 Nový pohon

Při volbě tohoto pohonu jsem zvažoval dvě varianty. První možností bylo použít stejný diskový motor EC 45 flat jako u předchozích dvou kloubů a napojit ho přímo na závitovou tyč zajišťující vysouvání ramene. Tato varianta by měla výhodu v tom, že motor by se pohodlně vešel do prostoru v plastovém uložení ramene v němž byl předtím původní krokový motor. Nevýhodou by bylo, že bychom pravděpodobně museli použít k buzení silnější jednotku EPOS 24/5 abychom dosáhli potřebného točivého momentu u motoru bez převodovky.



Obrázek 4.6: Stejnosměrný mechanicky komutovaný motor RE-max 24



Obrázek 4.7: Planetová převodovka GP 22 A

Druhou možností, která nakonec zvítězila, bylo použití válcového motoru s převodovkou. Nabídka převodovek k válcovým motorům je daleko bohatší než k motorům diskovým, takže výběr možných kombinací pohonů byl větší. Nakonec jsem zvolil kombinaci mechanicky komutovaného motoru RE-max 24 11 W (obj. č. 222049) s planetovou převodovkou GP22A s převodovým poměrem 14:1 (obj. č. 134158). Tento motor byl vybrán pro své malé rozměry a relativně vysoký točivý moment (12,3 mNm), který je sice nižší než má diskový motor použitý v předchozích případech (59 mNm), ale v kombinaci s danou převodovkou dokáže motor RE-max vyvinout výstupní moment 120 mNm při buzení proudem 0,3 A. Pro srovnání - EC 45 flat potřebuje pro vyvinutí svého maximálního momentu 59 mNm proud přes 2 A.

Maximální otáčky pohonu sestávajícího z kombinace RE-max 24 + GP22A jsou 430 ot./min, což při započtení stoupání závitové tyče odpovídá rychlosti vysouvání asi 2 mm/s. Kvůli volbě tohoto pohonu bylo sice nutné v plastové části ruky vyříznout díru a upravit uchycení, ale dle mého názoru je výroba náhrady tohoto dílu stejně nevyhnutelná. Při návrhu nového dílu se již vezme v úvahu rozměr nového pohonu. Tento motor je řízen jednotkou EPOS 24/1.

Obrázek 4.8: Motor výsuvného kloubu usazený v upevňovacím dílu

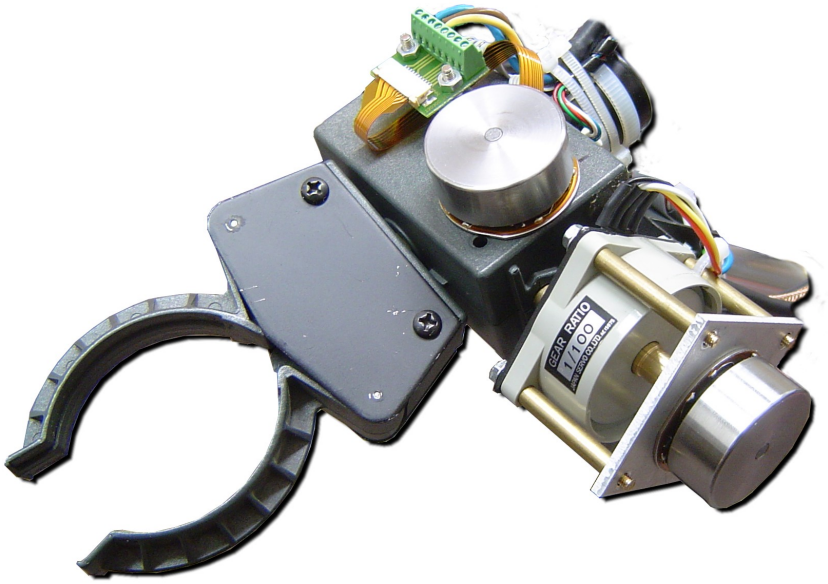
4.5 J4 - Sklápění zápěstí

4.5.1 Původní pohon

Původní pohon sestával z krokového motoru spojeného s převodovkou jejíž výstupní hřídel přímo pohybuje převodovou skříní zápěstí. Tento krokový motor jediný přežil funkční až do současnosti. Ovšem pro zachování koncepce bylo rozhodnuto jej také vyměnit. Převodovka má na štítku uveden převodový poměr 100:1 a je jedinou smysluplně označenou součástí původních pohonů.

4.5.2 Nový pohon

Jako nový pohon jsem zvolil opět diskový motor, tentokrát však model EC32 flat 15 W (obj. č. 267121) o průměru 32 mm a výkonu 15W. K těmto motorům se nedodává převodovka a tak jsem se rozhodl nahradit původní krokový motor a ponechat stávající převodovku. Další možností bylo koupit nějaký válcový motor s převodovkou, ale délka této sestavy by činila minimálně 6,5 cm a pohon by tedy dost přesahoval půdorys robotu. Bohužel se nakonec nepodařilo optimálně vyřešit napojení nového motoru na starou převodovku a tak není úspora místa získaného použitím plochého motoru tak výrazná. K řízení motoru je použita jednotka EPOS 24/1.



Obrázek 4.9: Pohon kloubu J4 (motor EC32flat s původní převodovkou) a detail chapadla s motorem kloubu J5

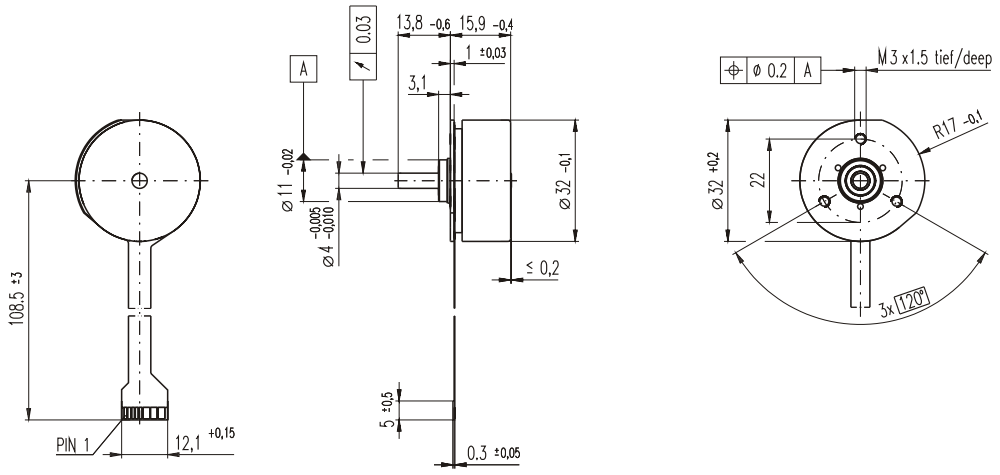
4.6 J5 - Otáčení chapadla

4.6.1 Původní pohon

Původní pohon sestával z krokového motoru který přes šnekový převod otáčel hřídelí na níž je upevněno chapadlo robotu (viz obr. 4.11).

4.6.2 Nový pohon

Při návrhu nového pohonu jsem se rozhodl nahradit krokový motor opět motorem EC 32 flat 15 W. Vzhledem k otáčení převodové skříně zápěstí, na které je tento motor uchycen, kolem osy kloubu J4 byla požadavkem malá výška nového motoru. Tento požadavek dokázal splnit, při zachování dostatečného momentu, pouze motor EC 32 flat. Motor je řízen jednotkou EPOS 24/1.



Obrázek 4.10: Diskový motor EC 32 flat 15W

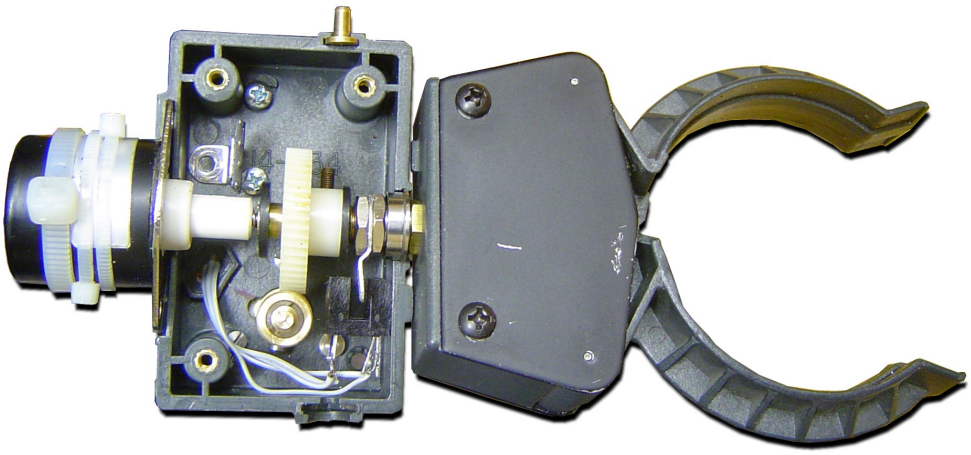
4.7 Stisk chapadla

4.7.1 Původní pohon

Původní pohon byl realizován pomocí speciálního krokového motoru. Motor má dutou hřídel s vnitřním závitem, kterou prochází závitová tyč. Otáčením motoru dochází k vysouvání a zasouvání tyče, která vede do chapadla a způsobuje jeho rozevírání a zavírání.

4.7.2 Nový pohon

Maxon žádný motor s dutou hřídelí nevyrábí. Na katedře byly sice k dispozici nějaké motory s dutou hřídelí se závitem, ale velikostně nevyhovovaly. Navíc má závitová tyč použitá v robotu Hero nestandardní stoupání a tvar závitu, takže by bylo nutné vyměnit i tuto tyč a uzpůsobit mechanické převody v chapadle i přichycení motoru. Původní motor měl ovšem spálené jedno vinutí, takže nebyl použitelný. Naštěstí jsem na aukčním serveru *eBay.com* náhodou nalezl zcela nový originální motor. V zahraničí, především však ve Spojených státech má robot Hero 1 stále mnoho příznivců a lze tedy, s trochou štěstí, sehnat potřebné nahradní díly. Zakoupený kus byl nepoužitý náhradní díl stále zabalený v originální krabičce i se zárukou (která ovšem vypršela již někdy v průběhu 80.-tých let). Na štítku tohoto motoru je uvedeno jmenovité napětí 5 V a odpor vinutí činí 28 Ω. K řízení tohoto motoru bylo nutné sestrojit vlastní řídicí obvod.



Obrázek 4.11: Vnitřek převodové skříně chapadla

Kapitola 5

Řízení

5.1 Řídicí systém robotu

Jádrem řídicího systému robotu je průmyslový počítač standardu PC/104+. Kromě standardních součástí nezbytných pro základní funkčnost je vybaven kartou s rozhraním na sběrnici CAN (Controller Area Network) a framegrabberem schopným současně snímat signál až z pěti analogových videokamer (schéma a detailní popis nabízí [1]). Na počítači je nainstalován operační systém GNU/Linux, pod kterým běží řídicí aplikace (pro bližší info viz [2]) Celý řídicí systém je koncipován jako distribuovaný, přičemž jednotlivé prvky by spolu měly komunikovat pomocí sběrnice CAN za použití komunikačního protokolu CANopen.

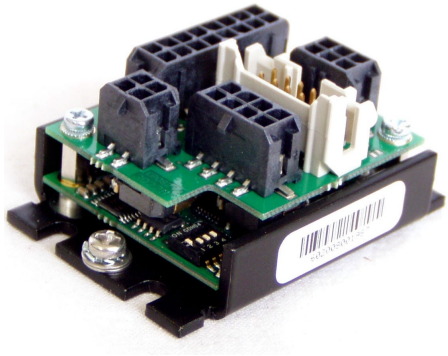
Na začátku mé práce byl robot vybaven dvěma polohovacími jednotkami EPOS pro řízení pojezdu a zatáčení. Tyto jednotky jsou připojeny k řídicímu PC pomocí sběrnice CAN. Pro řízení nových pohybových os bylo potřeba robot vybavit dalšími pěti jednotkami a připojit je ke stávající sběrnici a k palubní napájecí síti. Zároveň bylo nutné jednotlivé klouby vybavit snímači krajních poloh pro úvodní kalibraci polohy po zapnutí napájení (tzv. *homing*).

5.2 Řídicí jednotky EPOS

Společnost Maxon dodává ke svým motorům rovněž řídicí jednotky. Vyrábí několik typových řad od nejjednodušších jednokvadrantových analogových až po jednotky pro automatické polohování se zabudovaným PLC automatem. Řada EPOS (zkr. *Easy POsi-*

tioning System) je nejvyšší vyráběnou řadou. K dispozici jsou typy EPOS 24/1, EPOS 24/5 a EPOS 70/10. První číslo v označení udává maximální napájecí napětí jednotky a druhé jmenovitý proud dodávaný do motoru. Špičkový proud je roven dvojnásobku jmenovitého.

Obrázek 5.1: Řídicí jednotka EPOS 24/5



Obrázek 5.2: Řídicí jednotka EPOS 24/1

Jednotlivé typy se liší především ve výkonu koncových budičů, jinak řídicí část jednotek je totožná, kromě vyššího počtu digitálních vstupů a výstupu u dvou silnějších typů. S nadřízeným systémem mohou být jednotky propojeny pomocí sběrnice CAN nebo přes linku RS232. Na robotu jsou použity jednotky EPOS 24/1 a EPOS 24/5. Pro obsluhu a konfiguraci jednotek pomocí počítače PC slouží výrobcem dodaný program *EPOS User Interface* určený pro operační systém Windows. Tento program jsem používal po celou dobu práce na robotu k nastavování a testování funkcí jednotlivých pohonů.

Jednotky EPOS jsou schopny pracovat v několika režimech, mezi nejdůležitější patří:

- **Current Mode.** V tomto režimu udržuje jednotka motorem zadaný proud. Pro udržení konstantního proudu je v jednotce implementován PI regulátor.
- **Velocity Mode.** Režim udržující zadanou rychlost, opět pomocí PI regulace. V tomto případě je regulace dvojsmyčková, vnější smyčku tvoří PI regulátor rychlosti a vnitřní PI regulátor proudu.
- **Profile Velocity Mode.** Jedná se opět o režim pro řízení rychlosti, pouze s tím rozdílem, že uživatel může zadat velikost zrychlení při rozběhu a velikost zpomalení při doběhu motoru.
- **Position Mode.** Tento mód slouží k regulaci polohy. Informaci o poloze jednotka získává buď z připojeného inkrementálního čidla nebo v případě použitých vícepólových EC motorů z interních Hallových čidel. Regulace je opět dvojsmyčková, vnější smyčkou je PID regulátor polohy a vnitřní tvoří PI regulátor proudu.
- **Profile Position Mode.** Rozšířený režim pro řízení polohy, uživatel může navíc nastavit maximální rychlost posuvu a zrychlení a zpomalení při rozběhu, resp. doběhu motoru.
- **Homing mode.** Speciální mód sloužící pro najetí do základní pozice, na výběr je několik způsobů nalezení referenční pozice. Uživatel vybírá vhodný mód podle použitých senzorů polohy

Jednotka může pracovat ještě v několika dalších režimech jako je krokování nebo sledování polohy externího enkodéru. Pro řízení polohy jednotlivých kloubů budeme používat **Profile Position Mode**. Důležitý samozřejmě také **Homing Mode** pro nalezení referenční pozice.

5.3 Snímače polohy hřídele

Jednotky EPOS mohou využívat pro informaci o poloze hřídele dva druhy čidel - externí enkodéry (optické či magnetorezistivní) nebo Hallova čidla, která jsou integrovaná ve všech EC motorech a používají se pro řízení komutace. Hallova čidla ovšem mají daleko menší hustotu výstupních signálů než enkodéry. Enkodér má typicky rozlišení ve stovkách impulzů na otáčku motoru, zatímco integrovaná Hallova čidla typicky desítky. Počet

pulzů na otáčku které poskytují Hallovy sondy integrované v motorech se vypočítá podle vztahu $2 \cdot$ *počet čidel* $\cdot$ *počet pólových dvojic*. Pro použité motory tedy činí 48 pulzů/ot. pro motory typu EC 45 flat a 24 pulzů/ot pro motory EC 32 flat. Výrobce uvádí, že pro spolehlivou regulaci polohy pomocí Hallových čidel je nutné použít vícepólové motory. Tento požadavek je splněn.

5.4 Nastavení regulátorů

Každá řídicí jednotka EPOS implementuje tři zpětnovazební regulátory.

- **Regulátor proudu.** Jednotka disponuje proporcionálně-integračním regulátorem proudu, který protéká vinutím(i) motoru. Tento regulátor je pro správnou funkci pohonu nezbytný, protože je vždy vnitřní (či jedinou) regulační smyčkou při řízení jakéhokoliv pohybu motoru. Jednotka tento regulátor vypočítává s frekvencí 10 kHz.

- **Regulátor rychlosti.** Tento regulátor je opět proporcionálně-integračního typu. V pracovních režimech jednotky, ve kterých je požadavkem udržet konstantní rychlost tvoří vnější smyčku dvousmyčkového regulačního obvodu. Vnitřní smyčkou je regulátor proudu. Tento regulátor se vypočítává s frekvencí 1 kHz.

- **Regulátor polohy.** Regulátor polohy je jako jediný proporcionálně-integračně-derivační. V režimech řízení polohy a v režimech sledujících zadaný profil (profil rychlosti, profil polohy) je vnější smyčkou regulačního obvodu, vnitřní smyčku tvoří opět regulátor proudu. Jednotka počítá výstup regulátoru polohy opět s frekvencí 1 kHz.

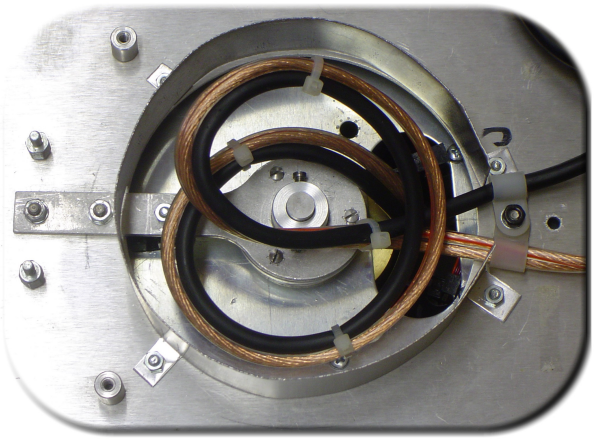
Pro správný běh je nutné v každé jednotce naladit všechny tři regulátory. Jednotky umožňují manuální či automatické nastavení konstant regulátorů. Bohužel automatické ladění regulátorů rychlosti a polohy funguje pouze pro motory vybavené enkodérem s vyšším rozlišením. Pro většinu použitých motorů je kvůli použití Hallových čidel neúspěšné. Automatické naladění regulátoru jsem tedy použil pouze při nastavování konstant regulátorů proudu. Regulátory rychlosti a polohy jsem nastavoval ručně za použití empirické metody. Nízká hustota signálů z Hallových senzorů u EC motorů způsobila, že zavedení integrační složky do regulátoru okamžitě způsobilo nestabilitu řízení. Proto jsou všechny regulátory EC motorů nastaveny jako proporcionálně-derivační.

Vzhledem k tomu, že dynamický systém tvořený elektromotorem, jehož vstupem je velikost proudu a výstupem poloha hřídele, je astatický, lze dosáhnout nulové odchylky výstupu od požadované hodnoty pouze za použití P regulace. Toto tvrzení platí ovšem pouze pro ideální případ, kdy se motor otáčí při jakékoliv velikosti proudu. V praxi tomu tak není díky existenci tření a dalších sil kladoucích odpor otáčení hřídele. Příliš malé proudy tekoucí vinutím již nedokáží překonat kladený odpor a motor se zastaví.

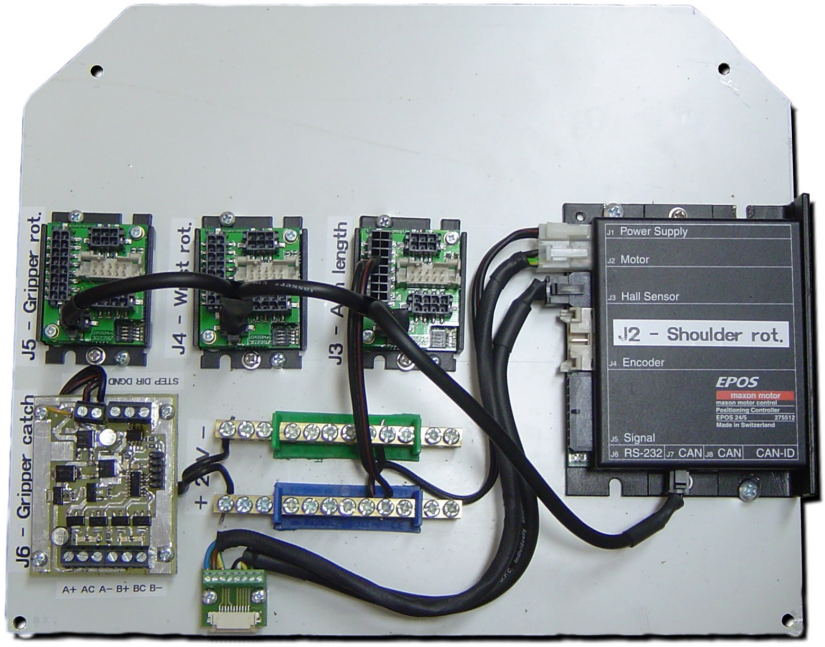
Při nastavování jednotek se potvrdil můj osobní předpoklad, že při dostatečně vysoké P-konstantě regulátoru dosáhneme nulové odchylky od požadované hodnoty (v rámci možností rozlišení senzorů motoru). Tento postup se osvědčil u všech EC motorů s relativně nízkým rozlišením snímačů polohy. U motoru třetího kloubu by již, díky vysokému rozlišení snímače polohy, k nulové ustálené odchylce jistě nevedl, proto má tento regulátor nenulovou I-konstantu a je plnohodnotným PID regulátorem.

5.5 Umístění jednotek

Jednotka řídící pohybovou osu J1 je umístěna na spodní straně horní stěny základny robotu, jak je vidět na obrázku 4.3. Všechny ostatní jednotky jsem se rozhodl umístit na horní otočnou plošinu. Toto řešení má jasnou výhodu v tom, že skrz kabelový prostup u osy otáčející horní plošinou můžeme vést jenom dva kabely - napájení a sběrnici CAN. Jednotky jsou připevněny na sendvičovou desku (hliník-plast-hliník, obr. 5.4) na níž je rovněž vyvedeno napájení ze základny robotu. Tato deska je k horní otočné plošině přišroubována pomocí čtyř distančních sloupků M4x20.



Obrázek 5.3: Detail kabelového prostupu a osy kloubu J1



Obrázek 5.4: Deska nesoucí elektroniku umístěnou na otočné hlavě robotu

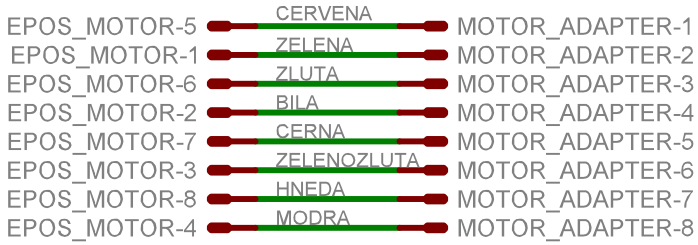
Vše tedy tvoří dohromady kompaktní celek, který lze jednoduše od základny robotu oddělit po odejmutí čtyř matek a odpojení dvou kabelů. Pokud by se v budoucnu ruka rekonstruovala, bylo by vhodné uvažovat o umístění jednotek na ruce, co nejblíže řízeným motorům, tak, aby se minimalizovala celková délka kabeláže a abychom více využili výhod distribuovaných řídicích systémů. Jednotky EPOS 24/1 jsou pro toto řešení velice vhodné díky svým malým rozměrům.

Pro vedení napájení jsem použil standardní reproduktorovou dvoulinku a pro přenos signálů sběrnice CAN audiokabely značky Tasker (GES Electronics), které jsou určené pro použití v pódiové technice a mají zvýšenou odolnost proti mechanickému poškození. Stejný typ kabelů jsem využil pro přenos signálů z Hallových snímačů EC motorů a polohových senzorů.

5.6 Řízení jednotlivých pohybových os

5.6.1 J1 - Otáčení horní plošiny

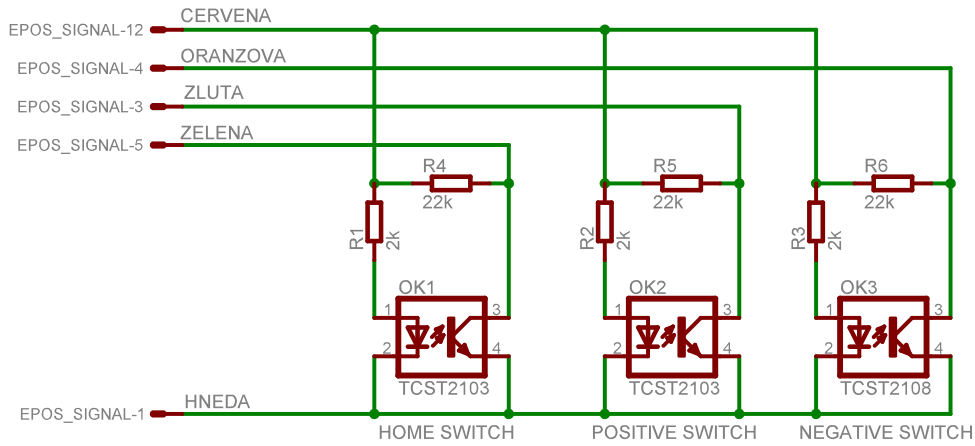
Motor prvního kloubu je řízen (díky omezením popsaným v odstavci 4.2) jednotkou EPOS 24/1. K nalezení referenční polohy jsou použity tři optické závory. Schéma jejich připojení je na obr. 5.6, odpory jsou připájeny přímo na vývody optických závor a izolovány smršťovací bužírkou. Dvě z nich slouží jako spínače krajních poloh a poslední jako snímač referenční pozice. Použil jsem zapojení doporučené výrobcem v [8].



Obrázek 5.5: Připojení EC motorů k jednotkám EPOS 24/1

Jednotka EPOS je nastavena tak, že používá pro homing metodu výrobcem nazvanou **Home Switch Positive Speed**. Při tomto způsobu nalezení referenční pozice se motor roztočí v kladném směru a poté jednotka čeká na jednu z následujících událostí:

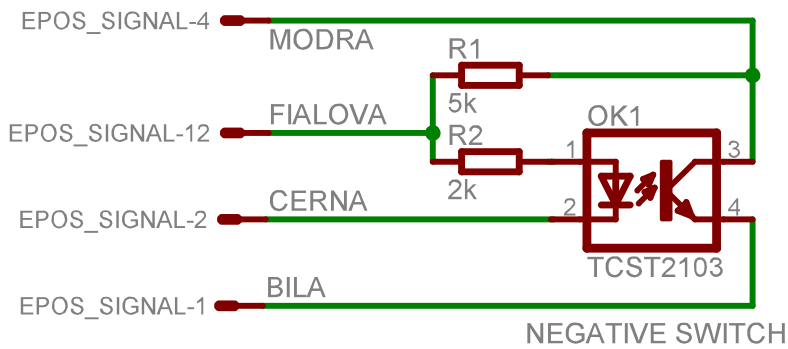
- Pokud sepne snímač referenční polohy (**Home Switch**), motor se zastaví a nyní se pohon nachází ve výchozí poloze.
- Pokud sepne kladný krajní snímač (**Positive Limit Switch**), motor narazil na doraz a začne se otáčet na druhou stranu, v záporném směru, a čeká na signál ze snímače polohy. Po detekci náběžné a následně spádové hrany signálu ze snímače se motor roztočí opět na druhou stranu (v kladném směru) a běží dokud opět nepřijde náběžná hrana signálu. Tímto je homing ukončen.



Obrázek 5.6: Schéma připojení optických závor k jednotce kloubu J1

5.6.2 J2 - Zvedání ramene ruky

Motor pohánějící druhý kloub je řízen jednotkou EPOS 24/5. Tato jednotka je schopna dodávat maximální trvalý proud 5 A. Jmenovitý proud motoru je 2140 mA. Vzhledem k tomu, že u tohoto motoru je požadován maximální možný výstupní moment, je použita jednotka, která dokáže motor naplno vybudit. Pro nalezení referenční pozice je použita metoda **Negative Limit Switch**. Tato metoda vyžaduje jediný snímač polohy, a to na záporném konci rozsahu pohonu. Tento je opět realizován pomocí transmisivní optické závory. O přerušení světelného paprsku se stará plíšek přišroubovaný na výstupní ose převodovky pohonu.



Obrázek 5.7: Schéma připojení optické závory k jednotce kloubu J2

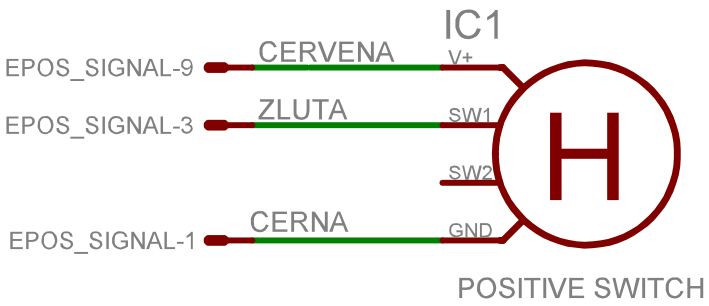
5.6.3 J3 - Prodloužení ramene

V tomto pohonu je použit stejnosměrný mechanicky komutovaný motor RE-max 24 řízený jednotkou EPOS 24/1. Vzhledem k tomu, že motor není v základním provedení vybaven žádnými prostředky pro snímání otáčení hřídele, musel být zakoupen spolu s externím enkodérem. Enkodér je magnetorezistivního typu a má rozlišení 256 impulsů na otáčku. Tento motor je k jednotce připojen plochým desetižilovým kabelem ve kterém je integrované jak napájení motoru, tak i všechny potřebné signály pro enkodér.

Původní řízení robotu používalo pro nalezení referenční pozice velice jednoduchý postup, který spočíval v roztočení motoru v jednom směru a zastavení pohonu o mechanický doraz na konci rozsahu. Motor se otáčel tak dlouho, aby k dorazu dojel i pokud bylo rameno plně vysunuté. Vzhledem k existenci mechanického dorazu a vzhledem k tomu, že instalace koncového spínače dovnitř plastového uložení kloubu by byla pravděpodobně docela náročná, jsem se rozhodl zvolit podobnou metodu homingu. Zvolená metoda se nazývá **Current Threshold Positive Speed** a spočívá v roztočení pohonu v kladném směru danou rychlostí a sledování protékajícího proudu. Jakmile proud překročí nastavenou hodnotu (pohon se zastavil o mechanický doraz) je referenční pozice nalezena.

5.6.4 J4 - Naklápění zápěstí

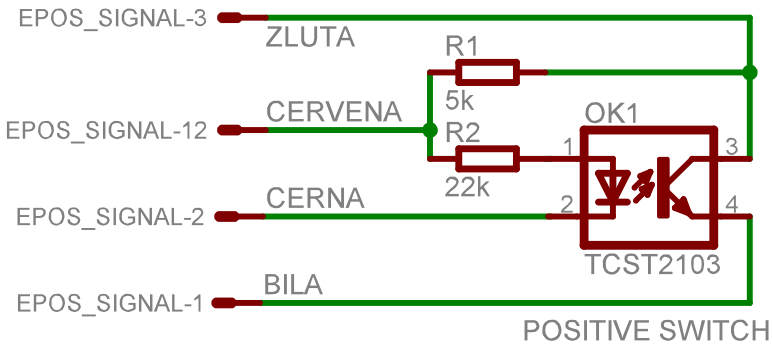
Naklápění zápěstí je poháněno motorem typu EC flat, takže není potřeba přidávat externí enkodér. Řídicí jednotkou je EPOS 24/1. Metoda homingu je **Positive Limit Switch**, která roztočí pohon danou rychlostí a čeká na signál ze spínače kladného dorazu. V tomto pohonu je, jako v jediném, použit jako spínač Hallův senzor. Tyto senzoru nesou označení MH3SS2 a robot jimi byl vybaven v rámci modernizace provedené na katedře v roce 1985. Byly jimi osazeny všechny pohybové osy, ovšem žádný ze zbylých senzorů nefungoval. Vzhledem k tomu, že senzor i spínací magnet byly nalepeny na vhodných místech a vše spolehlivě fungovalo, rozhodl jsem se toho využít. Napojení Hallova senzoru na jednotku EPOS 24/1 je naprosto bezproblémové vzhledem k tomu, že disponuje vývodem 5 V/10 mA použitelným pro napájení čidla.



Obrázek 5.8: Schéma připojení hallova snímače k jednotce kloubu J4

5.6.5 J5 - Otáčení chapadla

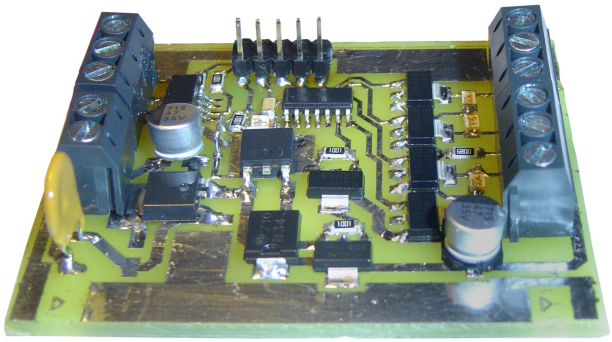
Tato pohybová osa využívá stejnou kombinaci prvků pohonu jako osa J4, tzn. motor EC 32 flat a jednotku EPOS 24/1. Nalezení referenční pozice je opět dosaženo za použití metody **Positive Limit Switch**. I tento kloub byl vybaven Hallovým čidlem, vlepeným do převodovky zápěstí, ovšem toto čidlo se ukázalo jako značně nespolehlivé. Citlivost na magnetické pole byla silně snížená a spolehlivé spínání by nebylo zaručeno. Nakonec jsem tento kloub osadil taktéž transmisivní optickou závorou, jak je vidět na obr. 4.11.



Obrázek 5.9: Schéma připojení optické závory k jednotce kloubu J5

5.6.6 Stisk chapadla

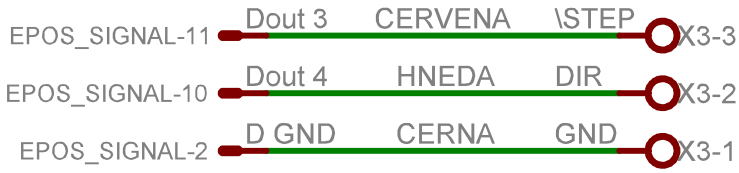
Pro ovládání stisku chapadla je použit jediný krokový motor na robotu. Původně jsem se snažil nalézt vhodnou jednotku pro ovládání krokového motoru pomocí sběrnice CAN, ale nebyl jsem příliš úspěšný. Většina nabízených jednotek je totiž stavěna na motory s řádově vyššími výkony než má použitý motorek. Tento má jmenovitý proud vinutím 100 mA, přičemž většina komerčně dostupných jednotek je schopna nastavit výstupní proud



Obrázek 5.10: Obvod pro řízení krokového motoru

přibližně od 0,5 A výše. Rozhodl jsem se tedy vyrobit vlastní obvod pro řízení tohoto pohonu. Schéma zapojení je na obr. C.1.

Řídicí obvod má dva vstupy. Úrovní na svorce X3-2 se řídí směr otáčení motoru. Vstup na svorce X3-3 je citlivý na náběžnou hranu a je určený pro krokování. Vstupy obvodu jsou odděleny optočlenem OK1 , aby nedošlo ke zničení vstupů mikrořadiče IC1. Tento integrovaný obvod je vyroben technologií CMOS a je tudíž citlivý na elektrostatický výboj a nebo přepětí, které by se mohlo naindukovat v kabeláži. Vstupy jsou přímo připojeny na univerzální digitální výstupy řídicí jednotky kloubu J5. Digitální výstupy jednotek EPOS jsou uzpůsobeny pro přímé spínání LED diod, takže není potřeba žádných dodatečných odporů. Konektor JP1 je určen pro připojení programátoru pro programování IC1 pomocí metody ICSP (*in-circuit serial programming*).



Obrázek 5.11: Připojení krokovacího obvodu k výstupům jednotky J5

Výstupy procesoru ovládají 4 tranzistory typu N-MOSFET, které spínají jednotlivá vinutí motoru. Polem ovládané tranzistory jsem zvolil protože je možné je řídit přímo výstupy procesoru bez nutnosti použití odporů. Jednotlivá vinutí motoru jsou běžně napájena napětím 5 V, ale tranzistory T5 a T7 umožňují připojit napájení vinutí na napětí 12 V. Pokud bychom při provozování robotu v praxi zjistili, že síla stisku chapadla je nedostatečná, je možné na začátku každého kroku připojit vinutí krátkodobě na 12 V a poté snížit napětí na 5 V. Tento postup by zvýšil proud tekoucí vinutím, a tím pádem

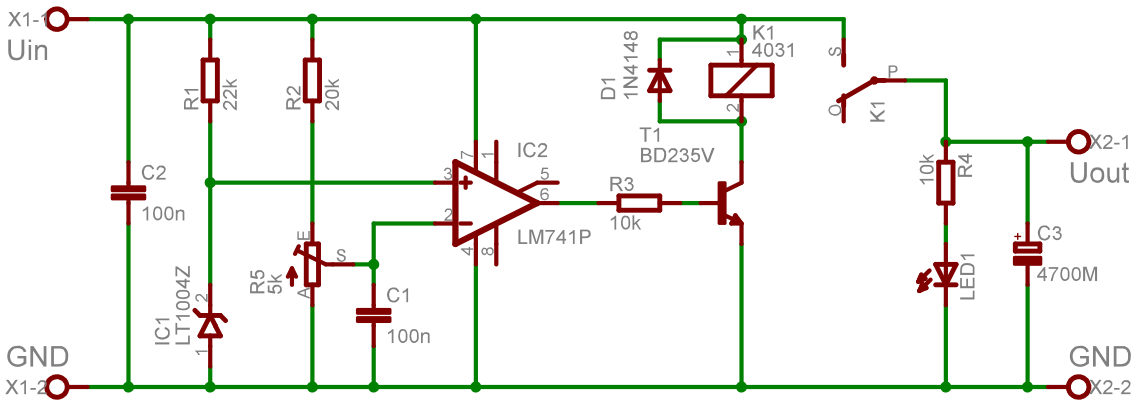
i magnetickou indukci na začátku každého kroku (tedy v momentě, kdy je permanentní magnet statoru nejdále od příslušného vinutí a potřebujeme největší magnetickou přitažlivou sílu). Tato funkčnost není zatím v řídicím programu procesoru zprovozněna.

Vinutí motoru se připínají k napájení v pořadí $A+ \rightarrow B+ \rightarrow A- \rightarrow B- \rightarrow A+ \rightarrow \ldots$ (pro druhý smysl otáčení je pořadí opačné). Pořadí přepínání vinutí je implementováno v programu řídicího procesoru PIC16F505. Program je velice jednoduchý, podobné funkce by jistě bylo možné dosáhnout použitím univerzálních logických obvodů. Toto řešení by ovšem zabralo daleko více prostoru na plošném spoji a při dnešních cenách mikrořadičů (použitý typ 29,- Kč) není výhodné ani cenově. Další výhodou je snadná změna funkce programu bez jakýchkoliv zásahů do elektrického zapojení. Celý obvod je realizován ze součástek osazovaných technologií SMD pro zmenšení výsledné velikosti tištěného spoje.

Vzhledem k tomu, že se předpokládá vybavení chapadla taktilními senzory, neosadil jsem tento pohon žádnými spínači pro získání informace o poloze a nebo homing. V budoucnu bude zpětná vazba zavedena přes taktilní senzory připojené přímo do řídicího počítače PC/104.

5.7 Napájení

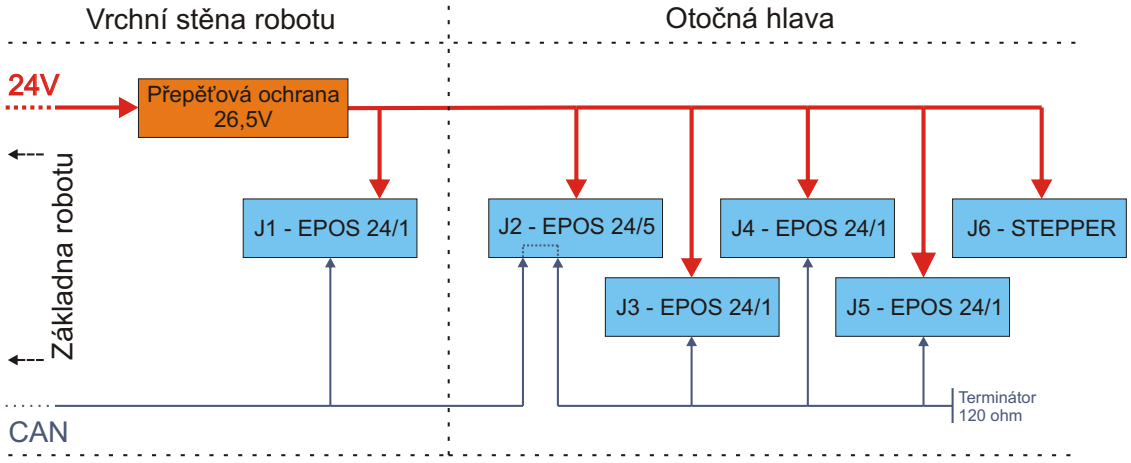
Výrobce uvádí, že maximální možné napájecí napětí jednotek EPOS je 27 V. Při připojení na vyšší napětí by mohlo dojít k jejich zničení. Těsně po nabití akumulátorů by napětí v palubní síti ovšem mohlo tuto hodnotu přesáhnou, proto jsem zkonstruoval přepěťovou ochranu. Obvod ochrany je umístěn na spodní straně horní stěny robotu (obr. 4.3) a je přes něj vedeno napájení do všech nově přidaných řídicích jednotek.



Obrázek 5.12: Schéma přepěťové ochrany

Vstupní napájení je připojeno na svorkovnici X1. Napěťová reference IC1 poskytuje stabilní napětí 2,5 V, které je vedeno na neinvertující vstup operačního zesilovače IC2. Napěťový dělič sestavený z odporu R2 a trimru R5 nastavuje úroveň při které ochrana vypíná výstup. Trimr R5 je víceotáčkový a pro další zlepšení přesnosti nastavení je předřazen odpor R2. Výstup děliče je veden na invertující vstup OZ, takže pokud toto napětí překročí 2,5 V, na výstupu operačního zesilovače se objeví napětí blízké 0 V a dojde k uzavření tranzistoru T1 a tím pádem k odpadnutí kotvy výstupního relé K1 a odpojení výstupní svorkovnice X2. Úroveň napětí, při které dojde k aktivaci ochrany jsem nastavil na 26,5 V.

Zkoušel jsem nabít akumulátory na maximum a poté měřit napětí v palubní síti robotu. Z počátku skutečně dosahovalo cca 27,5 V. Ovšem připojená zátěž (řídicí počítač, pohony pojezdu a další elektrická zařízení na robotu) způsobí, že napětí akumulátorů spadne pod kritickou úroveň 27 V velice rychle. Pod úroveň 26,5 V, při které připojuje instalovaná přepěťová ochrana jednotky pohonu ruky, napětí poklesne během několika vteřin.

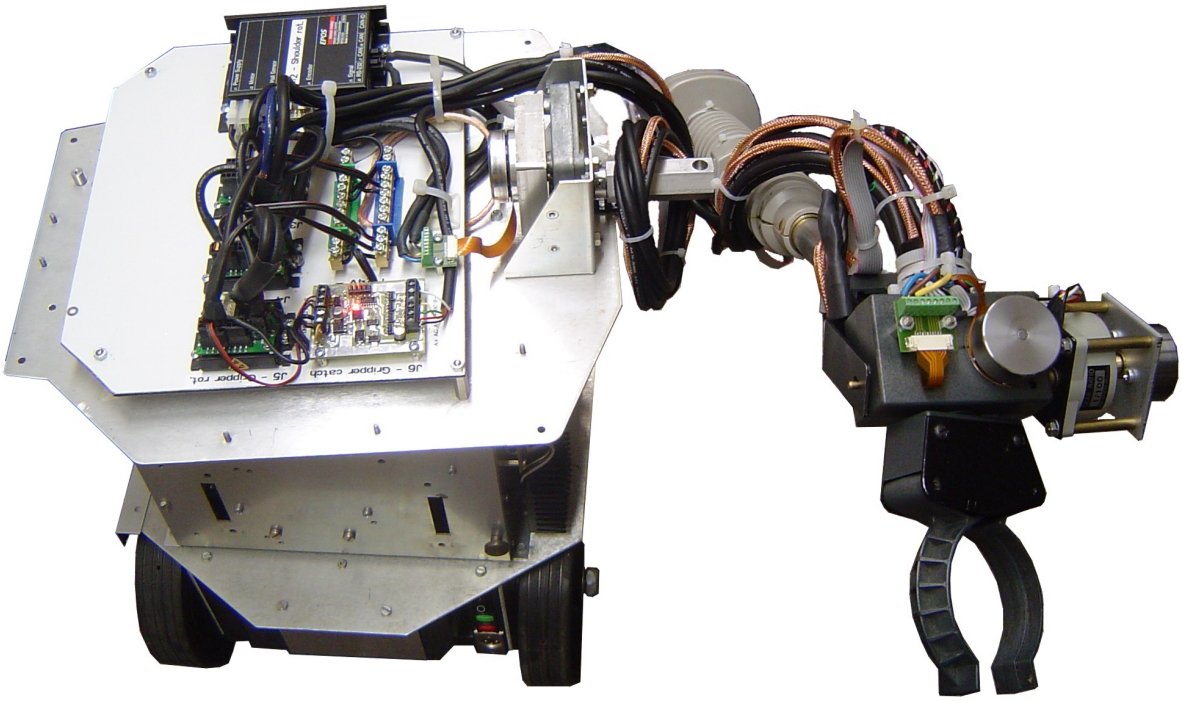


Obrázek 5.13: Schéma napájení a vedení sběrnice

5.8 Celkový pohled

Na obr. 5.14 je zachycen celkový pohled na robot a sestavenou ruku. Můžeme zde vidět přidanou desku nesoucí řídicí jednotky a také kabeláž vedoucí k motorům umístěným na ruce. Svazek kabelů je relativně tlustý kvůli použití motorů vyžadujících dva kabely -

jeden pro napájení vinutí a druhý pro Hallova čidla. Další kabeláž je nutná pro senzory dorazů. Ovšem díky použití ohebných kabelů a volnému vedení kabelového svazku naštěstí jeho tloušťka nepůsobí závažnější problémy.



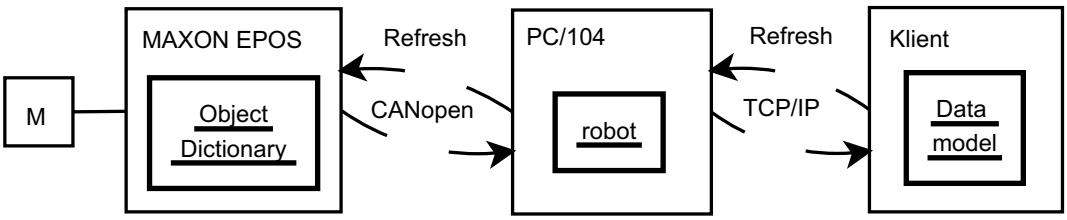
Obrázek 5.14: Celkový pohled na robot

5.9 SW řídicího systému robotu

5.9.1 Řídicí aplikace

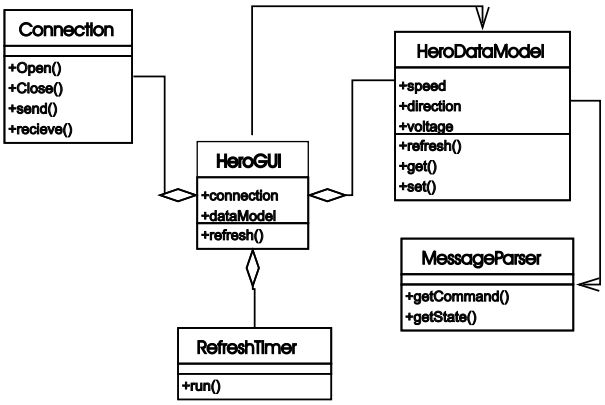
Robot je vybaven výše popsaným řídicím systémem, na kterém běží obslužná aplikace *Control*, jejímž autorem je Ondřej Šantin. Tato aplikace je v součastnosti odpovědná za základní řízení robotu a za komunikaci s nadřazeným systémem. Jednotlivé vrstvy řídicího systému jsou vidět na obr. 5.16.

Nejnižší vrstvou použitého distribuovaného řídicího systému jsou jednotky EPOS, které se starají o pojezd robotu, o natáčení hnacího kola a o nastavování polohy kloubů robotické ruky. S těmito jednotkami komunikuje aplikace *Control* běžící na řídicím počítači PC/104. Komunikace je uskutečňována přes sběrnici CANopen a probíhá v dotazovacím



Obrázek 5.16: Vrstvy SW řídicího systému

režimu. Řídicí aplikace se periodicky dotazuje na všechny potřebné údaje jednotlivých jednotek (uložené v jednotce v tzv. *„Object Dictionary“*) a tyto údaje si ukládá ve vnitřních strukturách modelujících jednotky.



Obrázek 5.15: UML schéma uživatelské aplikace

S aplikací *Control* na robotu komunikuje uživatelská aplikace (na nákresu označena *„klient“*) běžící na PC. Tato komunikace taktéž probíhá v dotazovacím režimu, kdy klient posílá periodicky dotazy a zjišťuje stav robotu. Spojení je realizováno přes síťové rozhraní řídicího počítače PC/104. Komunikační protokol je navržen jako textový v ASCII režimu pro lepší srozumitelnost a univerzálnost. Komunikace je realizována standardním socketovým spojením pomocí protokolu TCP, kde řídicí aplikace vystupuje jako server a uživatelská aplikace jako klient. Detailní popis fungování stávajícího SW vybavení robotu a komunikačního protokolu lze nalézt v [2].

[1]Obr. 5.16 přejatý z [2]

5.9.2 Rozšíření SW vybavení

Nutné rozšíření řídicí aplikace spočívá především v definici nových struktur modelujících přidané jednotky a v rozšíření komunikačního protokolu a obslužné grafické aplikace tak, aby zohledňovaly novou funkčnost robotu. Velkou výhodou je použití stejných jednotek, které jsou na robotu již instalované, takže není třeba implementovat nový komunikační protokol pro sběrnici CANopen.

Je potřebné také napsat funkce počítající přímou a inverzní kinematiku manipulátoru a implementovat je v řídicí aplikaci *Control*. Tyto funkce budou potřebné pro obsluhu ruky budoucím autonomním řízením robotu a pro předcházení srážky s okolím. Po dohodě s vedoucím práce bylo rozhodnuto, že řešení kinematiky a její implementace bude předmětem některé z budoucích řešených prací.

Rozšíření a úpravám řídicí aplikace se věnuje [3].

Kapitola 6

Závěr

6.1 Řešení práce

Tato práce navazuje na bakalářské práce řešené Jiřím Zemánkem a Ondřejem Šantinem z roku 2007 a zabývá se rekonstrukcí mechanického manipulátoru mobilního robotu Hero umístěného na Katedře řídicí techniky FEL ČVUT. Manipulátor nebyl v předcházejících pracech rekonstruován z časových důvodů. Úkolem bylo navrhnout nové řízení ruky a toto poté realizovat. Kvůli zachování stávající koncepce jsem zvolil pohony a řídicí jednotky od firmy Maxon. Čtyři pohony byly realizovány plochými diskovými motory, které již byly na robotu použity a jeden pohon klasickým válcovým motorem. Použité pohony se v praxi ukázaly jako výkonově dostačující a vhodně zvolené.

Vzhledem k použití stejných řídicích jednotek, které již byly na robotu instalovány roku 2007 nebyla adaptace stávajícího softwarového vybavení příliš náročná. Touto adaptací se zabývá Ondřej Šantin v souběžně řešeném semestrálním projektu[3]. Výsledkem by mělo být rozšíření řídicí a ovládací aplikace (které jsou popsány v [2]) tak, aby zohledňovaly přítomnost dalších pohybových os na robotu.

Výsledkem mé práce je plně funkční základní řízení pohybu ruky. Tato práce byla časové relativně náročná, zejména především díky množství kabelů potřebných pro řízení motorů a pro senzory dorazů a také díky času strávenému s řešením kinematiky robotu. V průběhu řešení se vyskytlo několik menších problémů, ale žádný zásadní, který by znemožnil úspěšné vyřešení.

6.2 Možná vylepšení

Jak již bylo zmíněno, bylo by vhodné rekonstruovat (alespoň nějaké) konstrukční díly ruky. V nejhorším stavu je plastové uložení spojující výsuvný kloub J3 s osou ramene J2. Také stav převodovky zápěstí, zejména uchycení na osu kloubu J4 není ideální a má velikou mechanickou vůli. V tomto případě by stačilo pravděpodobně pouze renovovat uchycení na osu kloubu. Dále je potřeba zbrousit výstupní hřídele kloubů J1 a J4 tak, aby se zamezilo jejich protáčení v uchycení k ovládaným dílům.

Jedním z nedořešených problémů, na který jsem narazil při finálním testování ruky, zůstává brždění motoru ovládající rameno robotu (kloub J2). Pokud dojde totiž k odpojení napájení, příslušná řídicí jednotka se vypne a přesane regulovat polohu ramene. Klidový brzdný moment motoru není dostatečný k tomu, aby udržel rameno v poloze ve které došlo k odpojení napájení a rameno se začne vlivem gravitace stáčet k zemi. Pokud je v této situaci kloub J3 do určité míry vysunutý, narazí chapadlo do země a mohlo by dojít k jeho poškození. Vzhledem k tomu, že nelze vždy zaručit čisté vypnutí robotu (nastavení kloubu J3 na nejkratší délku, spuštění ramene k zemi) je nutností tento problém ošetřit, aby nedošlo k destrukci chapadla vlivem nárazu o zem.

Řešením by bylo zakoupení motorové brzdy, která by se aktivovala při odpojení napájení a zamezila protáční motoru. Maxon bohužel nenabízí brzdu připojitelnou na použitý motor. Bylo by tedy nutné vyrobit vhodný přechodový díl. Dalším možným řešením je připojení motoru k řídicí jednotce přes relé které by spínalo při připojení napájení. Při odpojení napájení by kotva relé odpadla a připojila by všechna tři vinutí motoru na společný elektrický uzel. Motor, poháněný pohybem ramena, pracuje v generátorovém režimu a pokud by byla všechna vinutí zkratována (motor by pracoval do zátěže) zvětšil by se brzdný moment a rameno by k zemi padalo rychlostí bezpečnou pro náraz chapadla do podlahy. Bohužel účinnost tohoto řešení jsem nestačil otestovat, ale pokud by byl výsledek uspokojivý, byla by tato varianta řešení problému jistě jednodušší a levnjší než nákup a adaptace motorové brzdy na použitý motor.

Literatura

[1] J. Zemánek: *Bakalářská práce: Robot HERO.*
Katedra řídící techniky, České vysoké učení technické v Praze , 2007

[2] O. Šantin: *Bakalářská práce: Robot HERO.*
Katedra řídicí techniky, České vysoké učení technické v Praze , 2007

[3] O. Šantin: *Semestrální projekt: Robot HERO - Řízení ruky.*
Katedra řídicí techniky, České vysoké učení technické v Praze , 2008

[4] Heathkit Zenith Educational Systems: *ET-18 ROBOT ARM MANUAL*
HEATH COMPANY, Benton Harbor, 1982

[5] Mark W. Spong, Seth Hutchinson, M. Vidyasagar: *Robot modeling and control*
John Wiley & sons, inc., 2006

[6] Reza N. Jazar: *Theory of applied robotics*
Springer, 2007

[7] Maxon: *Program 06/07*
maxon motor a.g., 2006

[8] Maxon: *EPOS 24/1 Hardware Reference*
maxon motor a.g. 6/2007

[9] Maxon: *EPOS 24/5 Hardware Reference*
maxon motor a.g. 6/2007

[10] Maxon: *EPOS Firmware Specification*
maxon motor a.g. 5/2007

[11] Microchip: *PIC 16F505 Datasheet*
Microchip Technology Inc., 2007

Příloha A

Řešení rovnice inverzní kinematiky

$$\theta_2 = \arctan \frac{\left(d_g \tan(\beta_2) + \sqrt{r_W^2 + r_W^2 (\tan(\beta_2))^2 - d_g^2 + \Delta_z^2 + \Delta_z^2 (\tan(\beta_2))^2}\right) \Delta_z}{r_W^2 - d_g^2 + \Delta_z^2},$$

$$\sqrt{-\left(r_W^4 - 2 r_W^2 d_g^2 + 2 \Delta_z^2 r_W^2 + d_g^4 - 2 d_g^2 \Delta_z^2 + \Delta_z^4\right)\left(\Delta_z^2 (\tan(\beta_2))^2 r_W^2 + \Delta_z^4 (\tan(\beta_2))^2 - r_W^4 + 2 c^2 d_g^2 - \Delta_z^2 r_W^2 - d_g^4 + d_g^2 \Delta_z^2 + d_g^2 \Delta_z^2 (\tan(\beta_2))^2 + 2 d_g \Delta_z^2 \tan(\beta_2) \sqrt{r_W^2 + r_W^2 (\tan(\beta_2))^2 - d_g^2 + \Delta_z^2 + \Delta_z^2 (\tan(\beta_2))^2}\right)}$$
$$r_W^4 - 2 r_W^2 d_g^2 + 2 \Delta_z^2 r_W^2 + d_g^4 - 2 d_g^2 \Delta_z^2 + \Delta_z^4$$

Obrázek A.1: Řešení rovnice 3.9 pro θ_2

Příloha B

Nastavení jednotek EPOS

Veškerá nastavení jednotek EPOS potřebná pro řízení pohonů a pro integraci do nadřízeného systému jsou uvedena následujících tabulkách.

Vlastnost		Hodnota
Typ motoru		EC 45 flat 30 W
Druh motoru		elektronicky komutovaný
Jmenovitý proud		1000 mA
Počet pólpárů		8
Teplotní konstanta vinutí		13,2 s
Maximální rychlost		6000 ot./min
Typ snímače polohy hřídele		Hallova čidla
Pulzy / ot.		48
Poměr převodovky		310:1
Maximální poloha		6637 qc
Minimální poloha		-6275 qc
CAN-ID		5
Homing	Metoda	Home Switch Positive Speed
	Offset	200 qc
	Speed Switch	1000 rpm
	Speed Index	10 rpm
	Acceleration	1000 rpm/s
	Current Limit	500 mA
	Home position	0 qc
Regulátor proudu	P_i	400
	I_i	200
Regulátor rychlosti	P_v	500
	I_v	100
Regulátor polohy	P_p	2500
	I_p	0
	D_p	1000

Tabulka B.1: Údaje pro nastavení jednotky kloubu J1

Vlastnost		Hodnota
Typ motoru		EC 45 flat 30 W
Druh motoru		elektronicky komutovaný
Jmenovitý proud		2140 mA
Počet pólpárů		8
Teplotní konstanta vinutí		13,2 s
Maximální rychlost		6000 ot./min
Typ snímače polohy hřídele		Hallova čidla
Pulzy / ot.		48
Poměr převodovky		200:1
Maximální poloha		9000 qc
Minimální poloha		0 qc
CAN-ID		6
Homing	Metoda	Negative Limit Switch
	Offset	0 qc
	Speed Switch	1000 rpm
	Speed Index	10 rpm
	Acceleration	1000 rpm/s
	Current Limit	500 mA
	Home position	0 qc
Regulátor proudu	P_i	400
	I_i	200
Regulátor rychlosti	P_v	500
	I_v	100
Regulátor polohy	P_p	2000
	I_p	0
	D_p	550

Tabulka B.2: Údaje pro nastavení jednotky kloubu J2

Vlastnost		Hodnota
Typ motoru		RE-max 24 11 W
Druh motoru		mechanicky komutovaný
Jmenovitý proud		853 mA
Počet pólpárů		1
Teplotní konstanta vinutí		8,2 s
Maximální rychlost		6000 ot./min
Typ snímače polohy hřídele		magnetorezistivní enkodér
Pulzy / ot.		256
Poměr převodovky		14:1
Maximální poloha		0 qc
Minimální poloha		-1450000 qc
CAN-ID		7
Homing	Metoda	Current Threshold Positive Speed
	Offset	-30000 qc
	Speed Switch	3000 rpm
	Speed Index	10 rpm
	Acceleration	1000 rpm/s
	Current Limit	250 mA
	Home position	0 qc
Regulátor proudu	P_i	1200
	I_i	375
Regulátor rychlosti	P_v	500
	I_v	100
Regulátor polohy	P_p	160
	I_p	8
	D_p	50

Tabulka B.3: Údaje pro nastavení jednotky kloubu J3

Vlastnost		Hodnota
Typ motoru		EC 32 flat 15 W
Druh motoru		elektronicky komutovaný
Jmenovitý proud		506 mA
Počet pólpárů		4
Teplotní konstanta vinutí		8,1 s
Maximální rychlost		3000 ot./min
Typ snímače polohy hřídele		Hallova čidla
Pulzy / ot.		24
Poměr převodovky		100:1
Maximální poloha		0 qc
Minimální poloha		-1400 qc
CAN-ID		8
Homing	Metoda	Positive Limit Switch
	Offset	0 qc
	Speed Switch	500 rpm
	Speed Index	10 rpm
	Acceleration	1000 rpm/s
	Current Limit	500 mA
	Home position	0 qc
Regulátor proudu	P_i	500
	I_i	250
Regulátor rychlosti	P_v	500
	I_v	50
Regulátor polohy	P_p	4000
	I_p	0
	D_p	0

Tabulka B.4: Údaje pro nastavení jednotky kloubu J4

Vlastnost		Hodnota
Typ motoru		EC 32 flat 15 W
Druh motoru		elektronicky komutovaný
Jmenovitý proud		506 mA
Počet pólpárů		4
Teplotní konstanta vinutí		8,1 s
Maximální rychlost		3000 ot./min
Typ snímače polohy hřídele		Hallova čidla
Pulzy / ot.		24
Poměr převodovky		48:1
Maximální poloha		590 qc
Minimální poloha		-550 qc
CAN-ID		9
Homing	Metoda	Positive Limit Switch
	Offset	590 qc
	Speed Switch	400 rpm
	Speed Index	10 rpm
	Acceleration	1000 rpm/s
	Current Limit	500 mA
	Home position	0 qc
Regulátor proudu	P_i	400
	I_i	200
Regulátor rychlosti	P_v	400
	I_v	100
Regulátor polohy	P_p	3500
	I_p	0
	D_p	1500

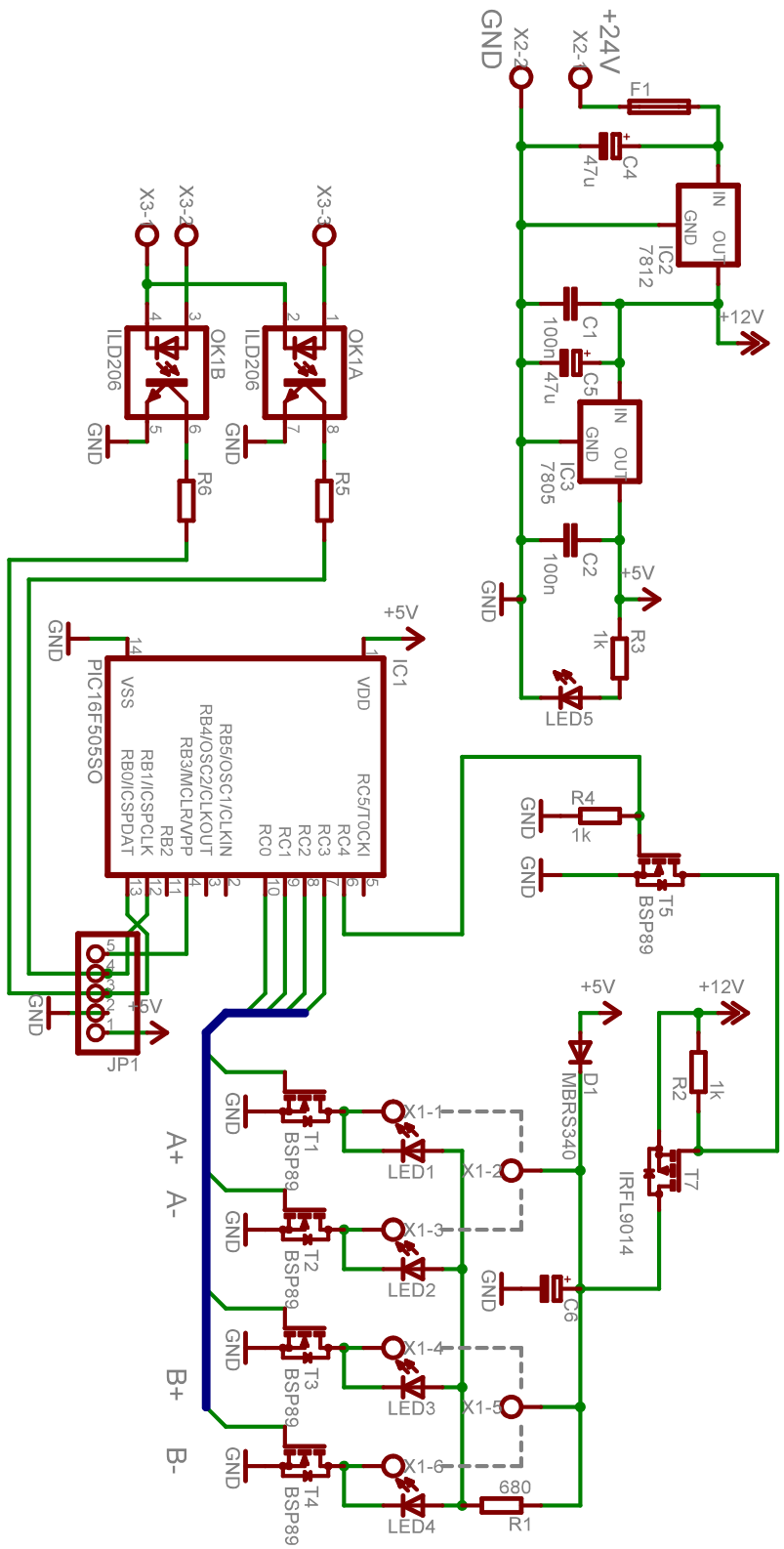
Tabulka B.5: Údaje pro nastavení jednotky kloubu J5

Příloha C

Schéma obvodu pro řízení krokového motoru

Jméno	Hodnota
R1	680 Ω
R2, R3, R4	1 $k\Omega$
R5, R6	10 $k\Omega$
C1, C2	100 nF
C3, C4, C5	47 μF
D1	MBRS 340
T1, T2, T3, T4, T5	BSP 89
T7	IRFL9014
LED1-4	SMD LED zelená, vel. 1206
LED5	SMD LED červená, vel. 1206
IC1	PIC 16F505/SO
OK1	ILD 206
F1	vratná pojistka 0,75 A
X1, X2, X3	svorkovnice ARK 500
JP1	pinová lišta, 5 pin

Tabulka C.1: Rozpiska součástek pro obvod řízení krokového motoru



Obrázek C.1: Schéma obvodu pro řízení krokového motoru

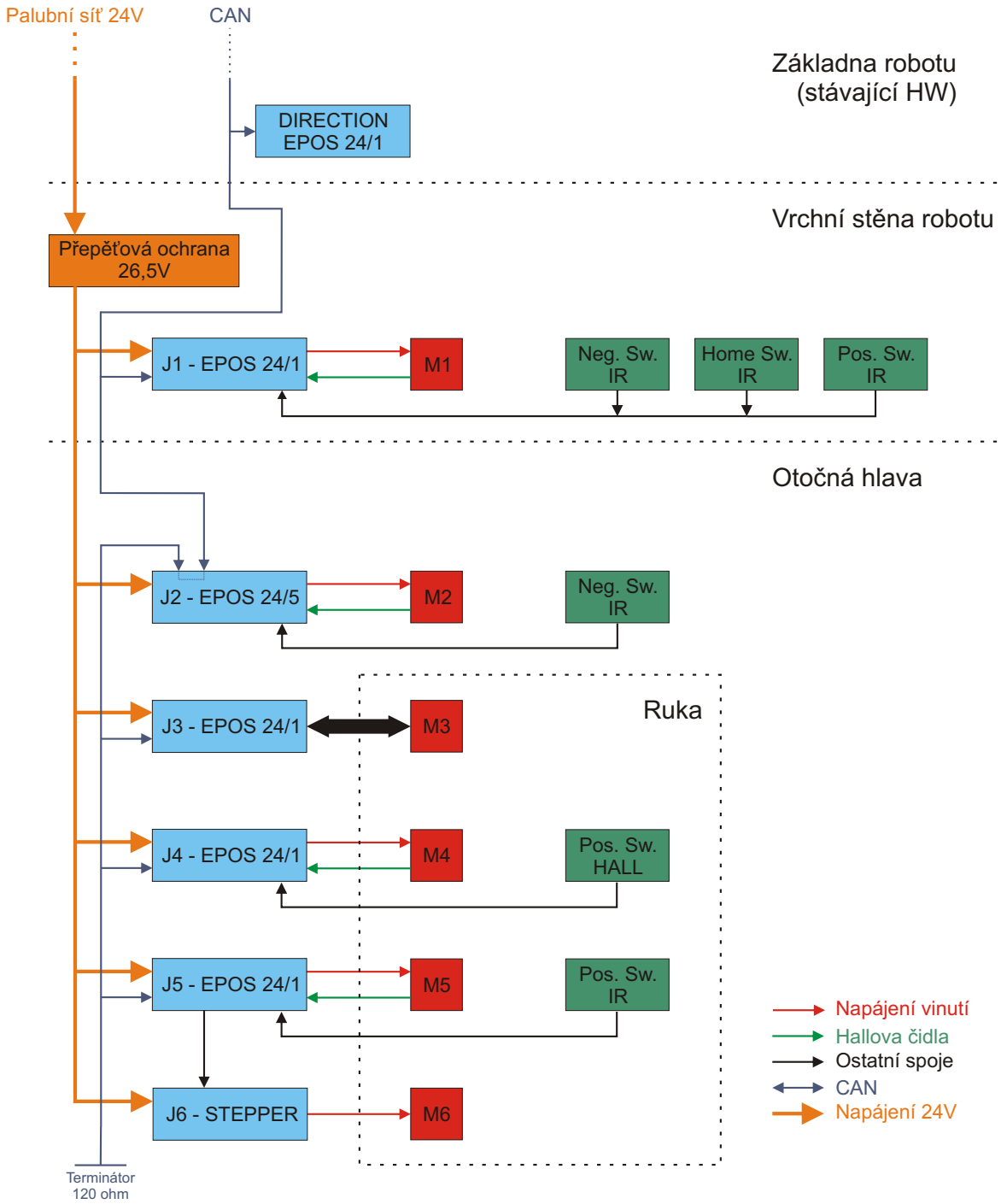
Příloha D

Blokové schéma zapojení

Na obr. D.1 je vidět celkové blokové schéma zapojení kabeláže vedoucí mezi nově přidanými součástmi robotu. Důležité detaily zapojení včetně barvy vodičů a hodnot použitých součástek lze nalézt v kap. 5.6. Na schématu jsou jednotlivé prvky rozděleny do skupin podle umístění na robotu. Do základny robotu vedou od nově namontovaných součástí pouze dva kabely a sice napájecí napětí a připojení ke sběrnici CAN. Napájecí napětí je připojeno na svorky na boční stěně poskytující napájení veškeré elektrické výbavě robotu. Více informací o napájecím systému robotu je v [1].

Signály sběrnice CAN jsem vyvedl z konektoru stávající jednotky EPOS 24/1 řídicí zatáčení hnacího kola. Tato jednotka je na schématu zanesená jako jediná součást stávajícího HW. Kvůli připojení sběrnice bylo nutno znovu nakrimpovat konektor na jednotce a odstranit z něj ukončovací odpor. Tento ukončovací odpor (tzv. *terminátor*) o jmenovité hodnotě 120 Ω má být dle specifikace sběrnice CAN umístěn na konci kabelového vedení a připojen mezi signály CAN_low a CAN_high. Terminátor jsem tedy připájel na konektor jednotky J5, která je připojena na konci řetězce.

Detaily jednotlivých částí zapojení lze nalézt v kapitole 5.



Obrázek D.1: Blokové schéma zapojení ruky robotu