

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Hardwarové a softwarové řešení řízení robotického
systému se zpětnou vazbou**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří OTRUBA**
Osobní číslo: **E10B0093P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Hardwarové a softwarové řešení řízení robotického systému se zpětnou vazbou**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Navrhněte a realizujte hardware řídicí jednotky robotického systému.
2. Navrhněte vhodné řídicí algoritmy s ohledem na využití kinematických úloh a implementujte je do řídicí jednotky.
3. Oživte zařízení a kalibrujte robotický systém.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Beneš**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací řídicího systému pro robotický systém se zpětnou vazbou. Řídicí systém je tvořený mikrokontrolérem ATmega32 ve vývojovém kitu EvB 4.3, sériovým servo kontrolérem Lynxmotion SSC-32 a magnetickými rotačními enkodéry AS5040 připevněnými na konstrukci robota Lynxmotion AL5A. Program mikrokontroléru získává informaci o skutečném úhlu natočení serv robota ze zpětné vazby, s využitím algoritmů inverzní kinematiky a pomocí PID regulátoru reguluje jejich řídicí pulzy. Robot je tak schopen vykonávat pohyby s větší přesností.

Klíčová slova

robotický systém, robotika, přímá kinematika, inverzní kinematika, zpětná vazba, servo, pulzní šířková modulace, mikrokontrolér, servo kontrolér, magnetický rotační enkodér, Lynxmotion AL5A, C

Abstract

This thesis deals with the design and implementation of a control system for a robotic system with feedback. The control system is constituted by microcontroller ATmega32 in the development kit EvB 4.3, serial servo controller Lynxmotion SSC-32 and magnetic rotary encoders AS5040 which are attached on the construction of the robot Lynxmotion AL5A. Program of the microcontroller receives information about the actual angular position of robot's servos from the feedback, with the use of invert kinematics algorithms and PID regulator regulates their control pulses. Due to that the robot is able to perform movements with greater accuracy.

Key words

robotic system, robotics, forward kinematics, inverse kinematics, feedback, servo, pulse width modulation, microcontroller, servo controller, magnetic rotary encoder, Lynxmotion AL5A, C

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 6.6.2013

Jiří Otruba

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu své bakalářské práce Ing. Petru Benešovi za cenné rady a vstřícný přístup při psaní této práce. Také bych chtěl poděkovat rodičům a přátelům za podporu během studia.

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	8
ÚVOD.....	9
HARDWARE.....	10
3.1 VÝVOJOVÝ KIT EVB 4.3	10
3.2 AVR ATMEGA32.....	12
3.3 ROBOTICKÝ SYSTÉM.....	12
3.4 MODELÁŘSKÉ SERVO.....	13
3.5 SERIAL SERVO CONTROLLER.....	14
3.6 MAGNETICKÝ ROTAČNÍ ENKODÉR AS5040.....	16
3.6.1 Synchronní sériové rozhraní (SSI).....	17
3.6.2 Daisy Chain Mode.....	19
ŘÍDICÍ SYSTÉM.....	20
4.1 ZAPOJENÍ.....	20
4.2 ZPĚTNÁ VAZBA.....	21
4.3 KINEMATIKA.....	22
4.3.1 Přímá úloha.....	23
4.3.2 Inverzní úloha.....	25
4.4 SOFTWARE.....	27
ZÁVĚR	30
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	31

Seznam použitých symbolů a zkratek

<i>Bd</i>	Baud, jednotka přenosové rychlosti
<i>C</i>	programovací jazyk
<i>HPS</i>	hlavní pohybový systém
<i>IK</i>	inverzní kinematika
<i>OPS</i>	vedlejší pohybový systém
<i>PWM</i>	pulzní šířková modulace
<i>SSI</i>	synchronní sériové rozhraní
<i>SPI</i>	sériové periferní rozhraní
<i>TTL</i>	tranzistorově tranzistorová logika
<i>USART</i>	synchronní / asynchronní sériové rozhraní
<i>a</i>	délka paže
<i>b</i>	délka předloktí
<i>base</i>	výška základny
<i>c</i>	délka zápěstí
<i>hyp</i>	pomocná přepona mezi počátečním bodem a polohou zápěstního kloubu
x_0	pomocná osa
α_1	úhel, který svírá pomocná přepona <i>hyp</i> s osou x_0
α_2	úhel, který svírá paže <i>a</i> s pomocnou přeponou <i>hyp</i>
β	úhel, který svírá paže <i>a</i> a předloktí <i>b</i>
γ_1	orientační úhel efektoru
γ_2	úhel pro výpočet řídicího pulzu serva zápěstí
δ	úhel, který mezi sebou svírají osou <i>x</i> a x_0

1 Úvod

Robotika je vědní obor, který se zabývá studiem, návrhem, konstrukcí a aplikací robotických systémů. Se zvyšujícím se stupněm automatizace čím dál tím více nahrazují lidskou práci průmysloví roboti a manipulátory. Technický pokrok nám dává stále novější a lepší technologie, které umožňují účinněji provázat vnější prostředí s řídicími systémy robotů pomocí zpětné vazby a tím zvýšit jejich účinnost. Současná technologie totiž poskytuje široké spektrum senzorů a čidel využívajících různých principů. Dnešní roboti proto dokáží pracovat s mnohonásobně větší přesností a spolehlivěji než člověk. Roboty lze nasadit na práci do prostředí pro člověka nebezpečných a nevhodných.

Hlavním cílem práce bylo vytvoření řídicí technologie pro robotický systém s využitím zpětné vazby a jeho aplikace na konkrétní kinematické úloze. Hardwarová část řídicího systému se skládá z hlavní řídicí jednotky a zpětné vazby v podobě magnetických rotačních enkodérů, které jsou umístěné na hlavních osách robota a snímají tak natočení jednotlivých os robota.

Softwarovou část řešení tvoří program řídicí jednotky, který pomocí algoritmů inverzní kinematiky dopočítává úhly natočení jednotlivých kloubů a generuje řídicí signály pro pohony robota k dosažení požadované polohy. Program řízení provádí v průběhu pohybu korekci řídicích signálů pohonů pomocí naprogramovaného regulátoru, který využívá informace o skutečném natočení jednotlivých kloubů robota z připojených obvodů zpětné vazby.

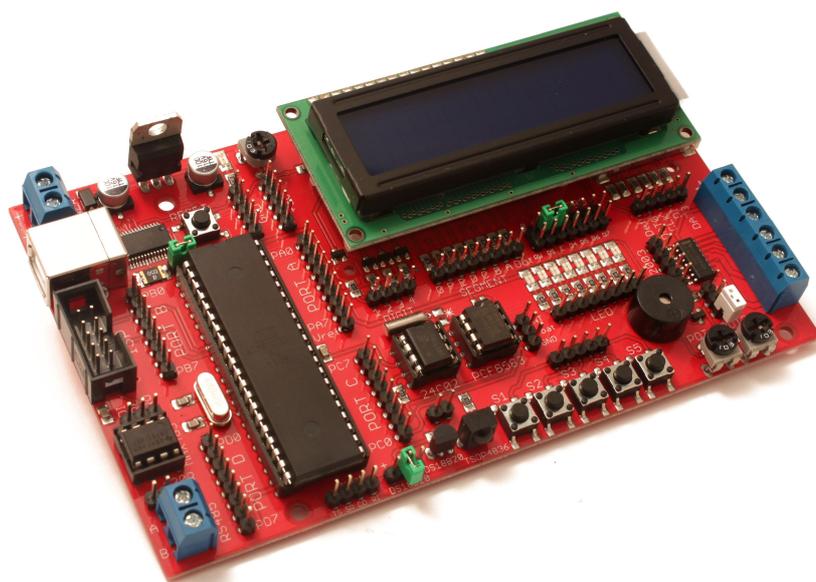
2 Hardware

Pro realizaci hlavní řídicí jednotky jsem zvolil vývojový kit EvB 4.3 s výkonným mikrokontrolérem AVR ATmega32 od společnosti Atmel®. Vývojový kit jsem zvolil po domluvě s vedoucím práce, vzhledem k dalšímu vývoji systému. Jeho výhodou je snadné zapojení a změnu konfigurace zapojení během tvorby programu. Deska plošného spoje navržená pro konkrétní řešení by budoucí vývoj značně omezovala.

Řešení je navrženo pro výukový manipulátor Lynxmotion AL5A, který pohání malá modelářská serva. Tato serva je možné ovládat časovačem mikrokontroléru nebo externím servo kontrolérem. Při řízení většího počtu serv je vhodné pro usnadnění a odlehčení mikrokontroléru použít servo kontrolér. V tomto řešení je použitý konkrétní servo kontrolér Lynxmotion SSC-32. Při návrhu zpětné vazby jsem použil tři bezkontaktní magnetické rotační enkodéry AS5040 v podobě integrovaných obvodů umístěných na hlavních osách robota. Jednotlivé snímače lze zapojit do série a komunikovat s nimi přes SSI rozhraní. Jednotlivé části teď detailněji popíšu v následujících podkapitolách.

2.1 Vývojový kit EvB 4.3

Vývojový kit EvB 4.3 je univerzální prostředek pro snadný a rychlý vývoj aplikací a prototypů s mikrokontroléry ATmega32 nebo ATmega16. Deska je vybavená řadou periférií, které se dají snadno propojit s výstupy a vstupy mikrokontroléru. [1]



Obr. 1: Vývojový kit EvB 4.3.

Deska vývojového kitu obsahuje:

- stabilizátor napětí 7805T,
- mikrokontrolér AVR ATmega32-16PU DIP40,
- externí krystal 16MHz,
- obvod reálného času PCF8583 a EEPROM paměť AT24C02,
- infračervený přijímač TSOP4836 a teplotní čidlo DS18B20,
- převodník RS-485,
- MMC/SD slot,
- tranzistorové bipolární pole ULN2003AD,
- LED display a LCD display 2x16 HD44780,
- UART-USB převodník FT232RL.

Vývojový kit lze napájet z externího zdroje napětí o velikosti minimálně 9 V nebo v případě malého odběru přímo z USB portu propojením jumperu USB-Vcc na desce kitu, nikdy však z obou zdrojů současně. [1]

Osazený UART-USB převodník FT232RL od FTDI Chip má implementovaný tzv. Bit-bang mód a lze ho tak využít jako alternativa externího programátoru. Bit-bang mód je speciální mód, který mění signálové vstupy a výstupy na 8-bit obousměrnou datovou sběrnici. Uvedením obvodu do Bit-bang módu lze přímo zapisovat na výstupy a číst vstupy obvodu, které se chovají jako GPIO (General Purpose Input/Output). Skrz GPIO lze programově emulovat SPI rozhraní, které slouží především pro komunikaci a programování mikrokontroléru. Tento způsob programování je pomalejší a neumožňuje ladění programu, ale zároveň odpadá potřeba externího programátoru [6]. Pro použití převodníku FT232RL jako programátoru je třeba propojit jeho vývody s SPI rozhraním mikrokontroléru viz Tabulka 1.

Tabulka 1: Zapojení pinů SPI. [9]

signál FT232	pin SPI
CTS	MISO
DSR	SCK
DCD	MOSI
RI	RESET

2.2 AVR ATmega32

Použitý mikrokontrolér AVR ATmega32 je výkonný 8-bitový CMOS mikrokontrolér s nízkou spotřebou. Je založen na Atmel AVR RISC (Reduced Instruction Set Computing) architektuře. Vykonáváním instrukcí v jednom hodinovém cyklu dosahuje ATmega32 propustnosti blížící se 1 MIPS (Million Instruction Per Second) na jednotku MHz, to umožňuje optimalizovat spotřebu energie oproti procesní rychlosti. Jádro Atmel AVR kombinuje bohatou instrukční sadu s 32 účelovými registry. Všechny 32 registrů je přímo připojeno k ALU (Arithmetic Logic Unit), to umožňuje přístup do dvou nezávislých registrů v jedné instrukci vykonané za jeden hodinový cyklus. Výsledná architektura je tak více efektivnější v propustnosti a desetkrát rychlejší než konvenční CISC (Complex Instruction Set Computer) mikrokontroléry. Mikrokontrolér má k dispozici 32 kB flash paměť pro program, 2 kB SRAM, 1 kB EEPROM a řadu periférií. Vyrábí se v klasickém pouzdře DIP40 a SMD provedení TQFP44/MLF44. [2]

2.3 Robotický systém

Robotický systém, pro který byl řídicí systém vyvíjen je malý robot Lynxmotion AL5A s pěti stupni volnosti a sériovou kinematickou strukturou.



Obr. 2: Lynxmotion AL5A.

Robot byl vyvinut pro výukové a testovací účely, umožňuje proto relativně rychlý, přesný a opakovatelný pohyb v prostoru. Jeho přesnost klesá s délkou jednotlivých ramen. Konstrukce robota se skládá především z anodizovaných hliníkových profilů, vstřikovaného plastu a laserem řezaného lexanu. Pohon robota je řešený šesti modelářskými servy. [3]

- Standardní servo HS-422 pro rotaci základny,
- maxi servo HS-755B a zesílené standardní servo HS-485HB pro pohyb ramene,
- standardní servo HS-422 pro pohyb zápěstí,
- dvě standardní serva HS-422 pro natočení a ovládnání efektoru.

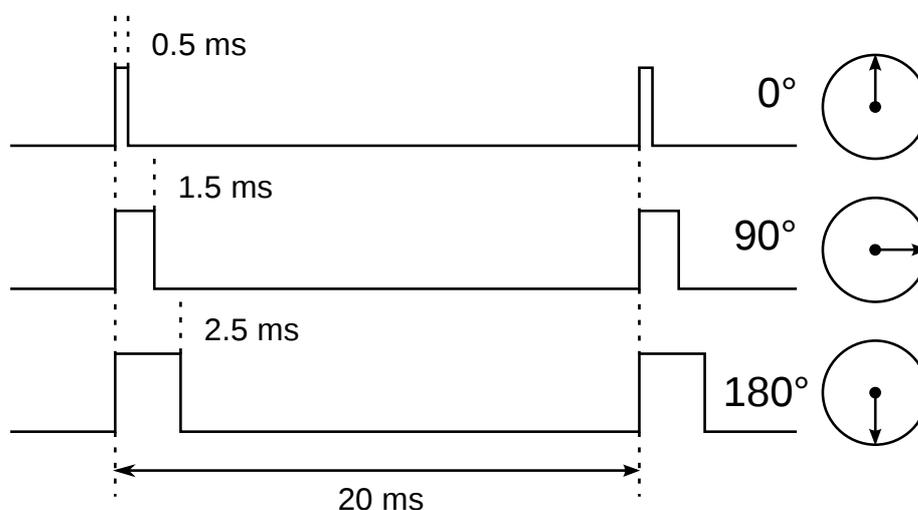
2.4 Modelářské servo

Modelářská serva, které pohání robota, jsou spolehlivá, levná a dostupná polohovací jednotky, které se hojně využívají jak v modelech, tak i jako pohony malých robotů. Servo tvoří stejnosměrný motor, převodovka, řídicí elektronika a zpětnovazební potenciometr spřažený s hlavní hřídelí serva. Potenciometr odměřuje úhel natočení hřídele pro řídicí elektroniku, která porovnává skutečné natočení hřídele s vstupním řídicím pulzem serva. Podle získaného rozdílu signálů pak budí vinutí motoru. Aby se servo dokázalo ustálit v rovnovážné poloze, má jisté pásmo necitlivosti, které udává minimální potřebnou změnu řídicího pulzu k tomu, aby se vyvolala změna natočení, to zabraňuje tomu, aby se servo rozkmitalo. Poměrem ozubených kol v převodovce se mění síla serva na úkor jeho rychlosti, proto serva, která budou mít stejný motor i elektroniku, mohou mít rozdílné parametry rychlosti a síly. Standardní typy serv poskytují kroutící moment kolem 0,3 – 0,4 N·m při napětí 4,8 V, při zvýšeném napájení 6 V se kroutící moment zvýší zhruba o 20%. [10]



Obr. 3: Modelářské servo Hitec.

Modernější digitální serva používají stejný řídicí signál i zapojení, a proto jsou kompatibilní s klasickými analogovými servy. Na rozdíl od klasických analogových serv pracuje jejich vnitřní elektronika s větším rozlišením, jsou proto silnější a přesnější za cenu vyšší spotřeby. Digitální serva jsou na rozdíl od analogových vybavená mikrokontrolérem, který umožňuje jejich programování. Lze jim naprogramovat různá nastavení jako například neutrální polohu, koncové body, pásmo necitlivosti, rychlost pohybu, smysl otáčení nebo polohu při poruše. V klidovém stavu se odběr serva pohybuje kolem 20 mA, při větším zatížení serva se odběr může vyšplhat na 0,5 A a u větších a digitálních až serv 1 A. [10]



Obr. 4: Pulzní šířková modulace.

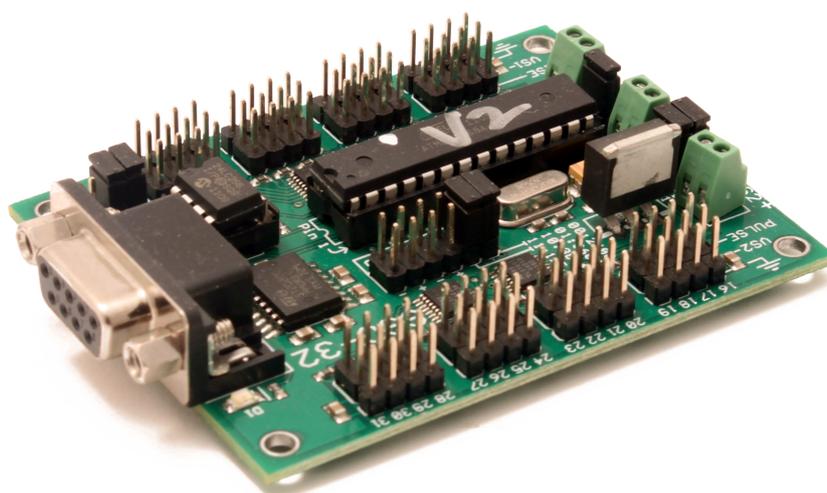
Modelářské servo se řídí signálem s pulzní šířkovou modulací, kdy úhel natočení osy serva je závislý na střídě signálu, jednotlivé pulzy mají šířku 0,5 - 2,5 ms a periodu opakování 20 ms viz Obr. 4 (obvykle servo zvládá 12 až 25 ms). Šířka signálu 0,5 ms a 2,5 ms odpovídá výchylka zhruba $\pm 90^\circ$. Tyto pulzy lze snadno generovat mikrokontrolérem, proto si serva získala takovou popularitu. [7]

2.5 Serial Servo Controller

SSC-32 je malý servo kontrolér pro 32 modelářských serv s obousměrnou komunikací osazený mikrokontrolérem Atmel AVR ATmega168-20PU. Kontrolér lze propojit s PC nebo mikrokontrolérem přes obousměrnou sériovou linku RS-232 popřípadě na TTL úrovni. Šířku výstupních pulzů je možné regulovat v intervalu od 0,5 ms do 2,5 ms s minimálním krokem 1 μ s pro přesné a plynulé nastavení serv v celkovém rozsahu 180° . Kontrolér umožňuje řízení

skupiny serv a lze tak ovládat všech 32 výstupů současně. Pro tvorbu komplexnějších pohybů je vhodné použít implementovaný sekvencer, například pro pohyby chodících robotů a hexapodů. Řízení pohybu může být okamžité, s konstantní rychlostí, s konstantním časem nebo kombinované. [8]

Obvod je napájen z několika míst, každou stranu výstupů 0 - 15 a 16 - 31 lze volbou propojek napájet zvlášť nebo dohromady. Napájení výstupů pro standardní serva by mělo mít napětí v rozsahu 4,8 - 6 V, maximální možný odběr serv na jednu stranu je 15 A, celkem tedy 30 A. Logika obvodu je napájena přes nízkospádový stabilizátor LM2937, pro správnou funkci stabilizátoru musí být jeho vstupní napětí minimálně 5,5 V. [8]



Obr. 5: Lynxmotion SSC-32.

Komunikace přes sériovou linku může probíhat s předdefinovanou rychlostí 2400 Bd, 9600 Bd, 38400 Bd nebo 115200 Bd. Baudová rychlost komunikace se nastavuje kombinací propojek na desce kontroléru. Konfigurace asynchronního přenosu je 8N1, to znamená 8 datových bitů, bez parity s jedním stopbitem. Samotné řízení jednotlivých serv se provádí pomocí předdefinovaných instrukcí, které se ve správném tvaru zapisují na sériovou linku, jednotlivé příkazy jsou zakončené znakem návratu vozíku (CR, ASCII 13). Mezi základní příkazy kontroléru patří pohyb jednoho nebo celé skupiny serv. Je totiž možné přenést skupinu příkazů stejného typu zároveň. [8]

Tabulka 2: Struktura příkazu pohybu serva. [8]

	# <ch> P <pw> S <spd> T <time> <cr>
<ch>	výstupní kanál kontroléru, 0 - 31
<pw>	šířka pulzu v μs , 500 - 2500
<spd>	rychlost změny pulzu, μs za sekundu (volitelný)
<time>	čas celé změny v ms (volitelný)
<cr>	Carriage Return (návrat vozíku), ASCII 13

Příklad samostatného příkazu pro nastavení serva na kanálu 0 na šířku pulzu 1500 μs konstantní rychlostí 1000 $\mu\text{s/s}$:

```
"#0 P1500 S1000 <cr>"
```

Příklad skupiny příkazů pro nastavení serv na kanálech 0 a 1 na šířku pulzu 500 μs a 2500 μs , celková změna polohy obou serv bude trvat 2 sekundy:

```
"#0 P500 #1 P2500 T2000 <cr>"
```

Další typy příkazů kontroléru:

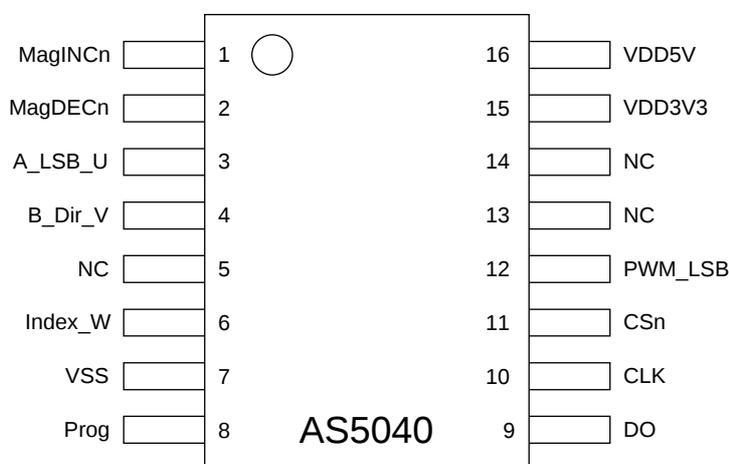
- diskretní výstup – nastavuje jednotlivé výstupní kanály do logické 0 nebo 1;
- bajtový výstup – výstupní kanály mění na 8-bit sběrnici a umožňuje na ni zapsat 8-bitová slova;
- dotaz na stav pohybu – vrací znak "." pokud je pohyb dokončený a "+" pokud je stále se stále vykonává;
- dotaz na šířku pulzu – vrací šířku pulzu vybraného kanálu;
- čtení digitálních vstupů – vrací binární hodnotu ABCD vstupu;
- čtení analogových vstupů – vrací bajt s analogovou hodnotou ABCD vstupu;
- hexapod sekvencí – předdefinované pohyby skupin.

2.6 Magnetický rotační enkodér AS5040

Integrovaný obvod AS5040 je programovatelný bezdotykový magnetický rotační enkodér pro měření úhlu natočení v rozsahu 360°. Integrovaný obvod snímá natočení dvojpólového magnetu nad nebo pod obvodem pomocí do kruhu rozmístěných Hallových

sond kolem středu čipu. Měření absolutního úhlu natočení probíhá s rozlišením $0,35^\circ$ tedy 1024 kroků na jednu otáčku. Obvod má široké uplatnění v průmyslových aplikacích, automobilovém průmyslu, kopírkách a tiskárnách nebo jako náhrada optických enkodérů a potenciometrů. [4]

Vnitřní napěťový regulátor umožňuje napájení obvodu ze zdroje 5 V nebo 3,3 V. Integrovaný obvod nese jeden inkrementální výstup a dva 10-bitové digitální výstupy SSI (Synchronous Serial Interface) a PWM (Pulse Width Modulation). Programováním obvodu lze nastavit mód a rozlišení inkrementálního výstupu a také pozici nulového úhlu natočení magnetického pole. [4]



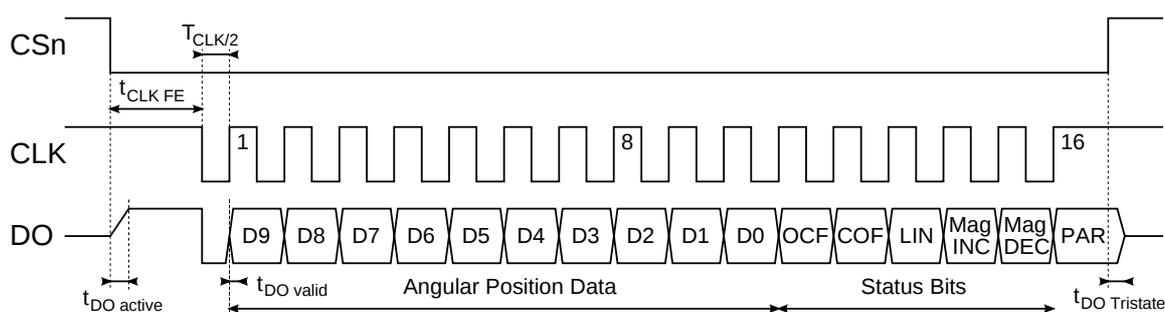
Obr. 6: Rozmístění pinů pro SSOP16. [4]

Volba vhodného magnetu je velice důležitá, magnet by měl mít 6 mm v průměru a výšku větší jak 2,5 mm. Doporučené magnetické materiály jsou AlNiCo, SmCo₅ nebo NdFeB. Magnet musí být pro správnou funkci obvodu umístěný ve středu pouzdra, kde jsou umístěné snímací senzory s přesností 0,25 mm. Síla magnetického pole magnetu pro správnou funkci obvodu by se měla na povrchu pouzdra pohybovat v rozsahu ± 45 mT až ± 75 mT. Typická vzdálenost magnetu od pouzdra obvodu s doporučeným magnetem je 0,5 mm až 1,8 mm. Větší vzdálenost od pouzdra je možná, pouze pokud bude dodržena správná síla magnetického pole. [4]

2.6.1 Synchronní sériové rozhraní (SSI)

Synchronní sériové rozhraní SSI je založené na standardu RS-422, má široké uplatnění v průmyslové a měřicí technice pro komunikaci master-slave. Rozhraní je velice spolehlivé,

robustní a umožňuje komunikaci na vysokých frekvencích. Obecně probíhá komunikace pomocí signálů DATA a CLK (hodinový signál), kdy master (mikrokontrolér) generuje hodinový signál a slave (senzor) využívá přijatý hodinový signál a posílá nazpět aktuální data přes posuvný registr. Při synchronním přenosu se data přenáší v blocích (slovec), kdy jednotlivé znaky na sebe navazují bez časových prodlev. [5]



Obr. 7: Synchronní sériové rozhraní. [4]

Po nastavení CSn (Chip Select) do stavu logické 0 přejde DO (Digital Output) ze stavu vysoké impedance do logické 1 a inicializuje se tak čtení. Po uplynutí doby $t_{\text{CLK FE}}$ minimálně 500 ns jsou data s první sestupnou hranou hodinového signálu odeslána do výstupního posuvného registru. Každá následující náběžná hrana hodinového signálu vysouvá jeden bit dat z posuvného registru. Blok dat je dlouhý 16 bitů z toho prvních 10 bitů D0:D9 obsahuje informaci o úhlu natočení a následujících 6 bitů jsou stavové bity a jeden paritní bit. [4]

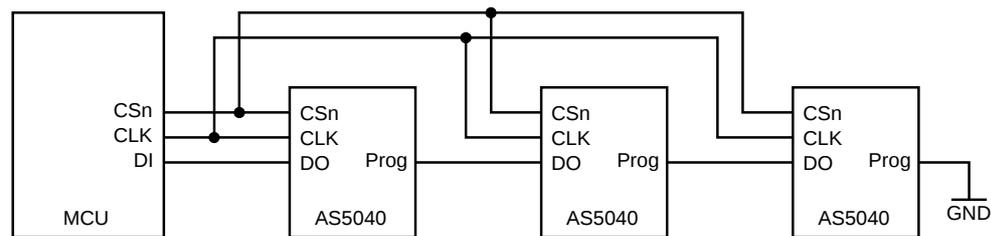
Tabulka 3: Obsah bloku dat. [4]

bit	význam	
D0:D9	data absolutního úhlu natočení	
OCF	indikuje dokončení kompenzačního algoritmu, data jsou validní	
COF	indikuje chybu rozsahu vnitřního počítače, data nejsou validní	
LIN	chyba linearit, výstupní data mohou být nevalidní	
MagINC	magnetické pole se zvětšuje	magnetické pole je mimo rozsah
MagDEC	magnetické pole zeslabuje	
PAR	sudá parita	

Stavové bity vypovídají o tom, jestli jsou přečtená data aktuální, validní a zda je snímané magnetické pole v pořádku. Stavový bit OCF (Offset Compensation Finished) je

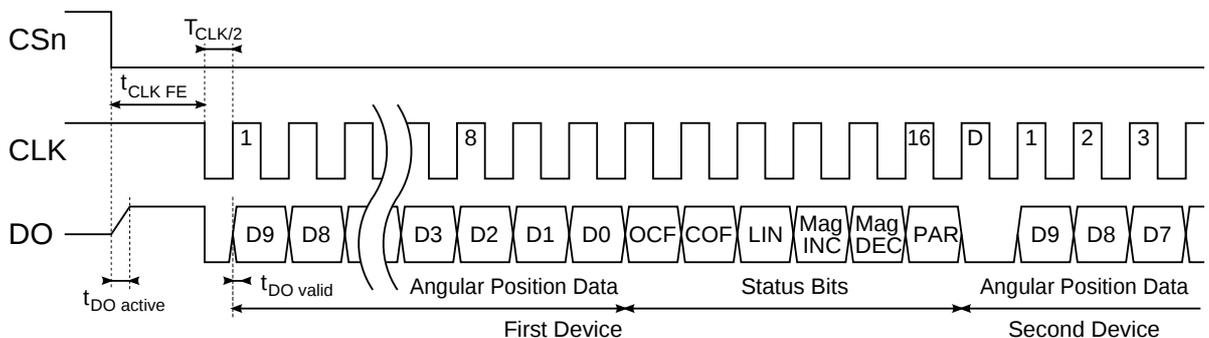
nastaven do logické 1 po dokončení kompenzačního algoritmu. Po jeho dokončení lze data považovat za validní a je možné s nimi dále pracovat. MagINC a MagDEC informují o změnách snímaného magnetického pole, pokud jsou v logické 1 oba dva bity MagINC i MagDEC, znamená to, že magnetické pole je mimo rozsah snímačů a data proto nejsou validní. [4]

2.6.2 Daisy Chain Mode



Obr. 8: Princip zapojení Daisy Chain módu. [4]

Daisy Chain mód umožňuje zapojení několika snímačů do série, zatímco přenos dat ze všech obvodů v řetězu probíhá stále přes jeden digitální vstup řídicího obvodu. Digitální výstup (DO) prvního snímače je připojen k mikrokontroléru. Digitální výstup každého dalšího snímače je připojený do digitálního vstupu (Prog) předchozího snímače, na konci řetězu je poslední digitální vstup spojený se zemí viz Obr. 8. [4]



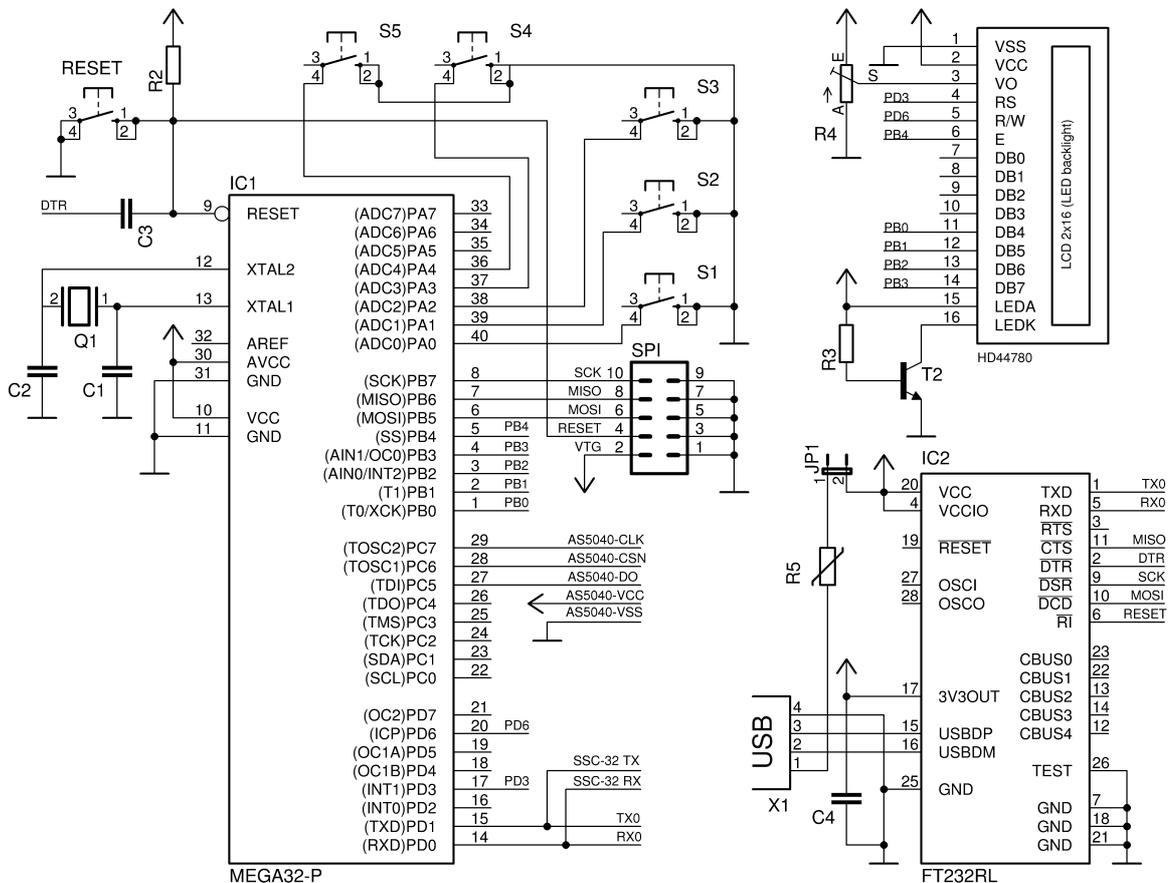
Obr. 9: Přenos dat v Daisy Chain módu. [4]

Aktuální data ze všech snímačů zapojených v sérii jsou postupně náběžnou hranou hodinového signálu vysouvána posuvnými registry směrem k mikrokontroléru. Jako první jsou tedy čteny rámce dat ze snímače, který je připojený přímo k mikrokontroléru.

3 Řídicí systém

3.1 Zapojení

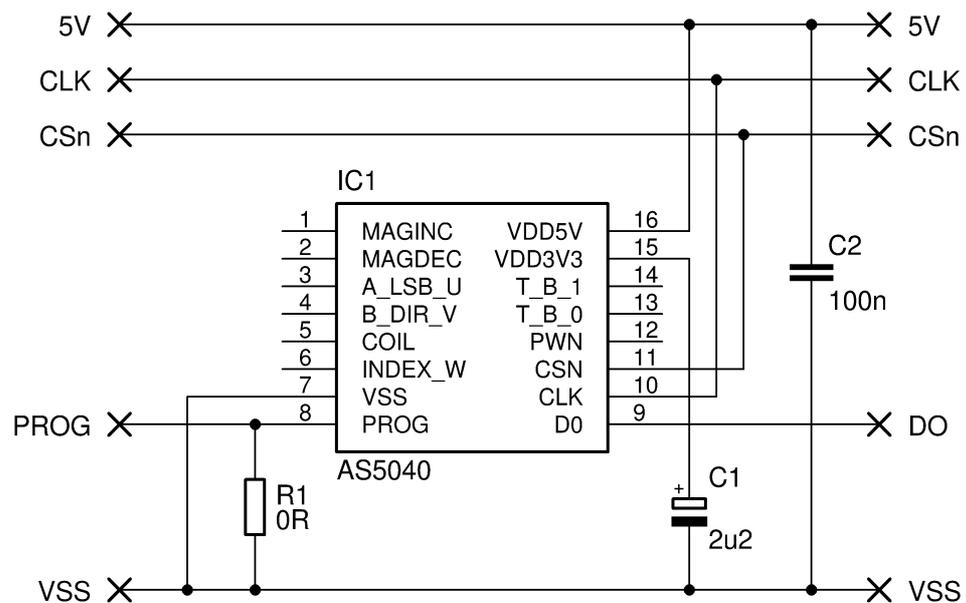
Zapojení řídicího systému je realizováno na vývojovém kitu napájeným přímo z USB portu. Celkový proudový odběr z USB portu tvoří pouze logika včetně zpětné vazby a LCD display. S maximální proudovou kapacitou USB portu 500 mA má napájení dostatečnou rezervu. Mikrokontrolér běží na frekvenci 8 MHz s využitím vnitřního laděného oscilátoru. K mikrokontroléru je připojený LCD display s řadičem HD44780 pro výpis proměnných a případný debug řídicího programu. Pět mikrospínačů připojených k portu A umožňuje základní ovládání systému, nastavování proměnných a podobně. Magnetické snímače zpětné vazby jsou přímo připojeny na port C, nevyužívají žádný speciální modul mikrokontroléru a komunikace s nimi je řešená softwarově. Sériový servo kontrolér SSC-32 využívá USART modulu mikrokontroléru v asynchronním módu. Komunikace se servo kontrolérem probíhá na TTL úrovni s přenosovou rychlostí 38400 Bd.



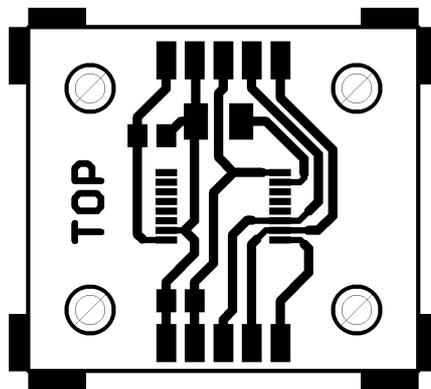
Obr. 10: Schéma zapojení řídicí jednotky.

3.2 Zpětná vazba

Zpětná vazba je realizovaná magnetickým rotačním enkodérem, který snímá natočení magnetu připevněného na konstrukci robota. Jednotlivé magnetické snímače jsou osazeny každý na vlastním tištěném spoji. Protože je obvod napájený ze zdroje napětí 5 V, musí být vstup VDD3V3 připojený přes vyrovnávací kondenzátor k zemi [4, str.21].

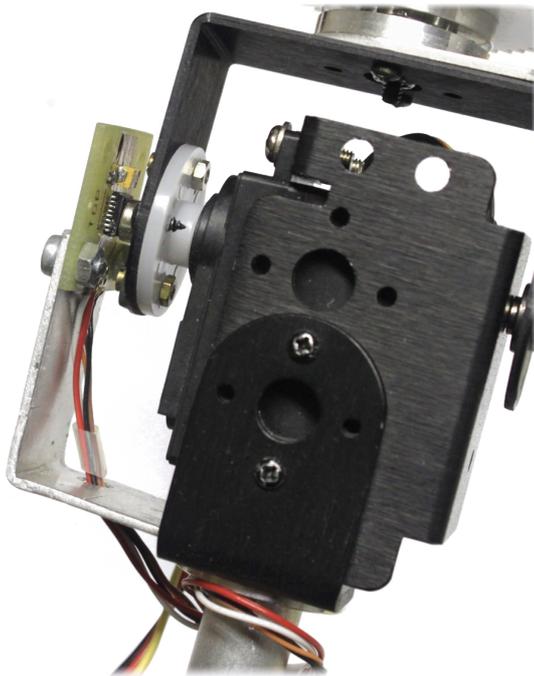


Obr. 11: Schéma zapojení AS5040.



Obr. 12: Deska plošného spoje.

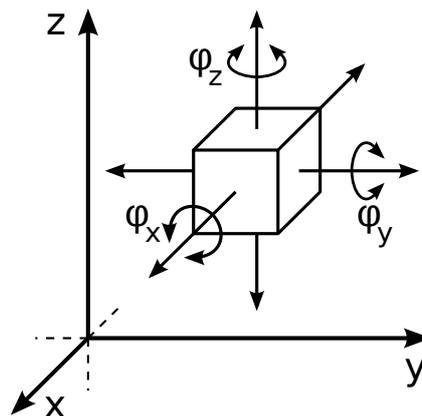
Všechny snímače jsou zapojeny v Daisy Chain módu, to znamená, že výstup DO obvodu je přiveden vstup Prog následujícího obvodu a na konci řetězu je vstup Prog spojený se zemí. Rezistor R1 je proto osazený pouze na poslední desce v řetězu. Tento řetěz snímačů je pak připojený přímo k mikrokontroléru a čtení dat probíhá najednou, kdy jednotlivé rámce dat se vysouvají po sobě skrz řetěz. [4]



Obr. 13: Umístění obvodu zpětné vazby.

3.3 Kinematika

Abychom mohli vytvořit řídicí algoritmy pro řízení robota, je třeba ho popsat pomocí kinematiky a sestavit tak potřebné rovnice. Společně se statikou a dynamikou je kinematika součástí většího vědního oboru mechaniky. Kinematika je vědní obor, který se zabývá pohybem fyzikálních objektů v prostoru bez ohledu na působící síly, klíčová je poloha. [11]



Obr. 14: Tuhé těleso v prostoru.

Pohybový systém se skládá z hlavního pohybového systému (HPS), který zajišťuje dosažení polohy koncového bodu a vedlejšího pohybového systému (OPS), který určuje orientaci v prostoru a doplňuje tak hlavní pohybový systém. Tuhé těleso v prostoru tedy má tři

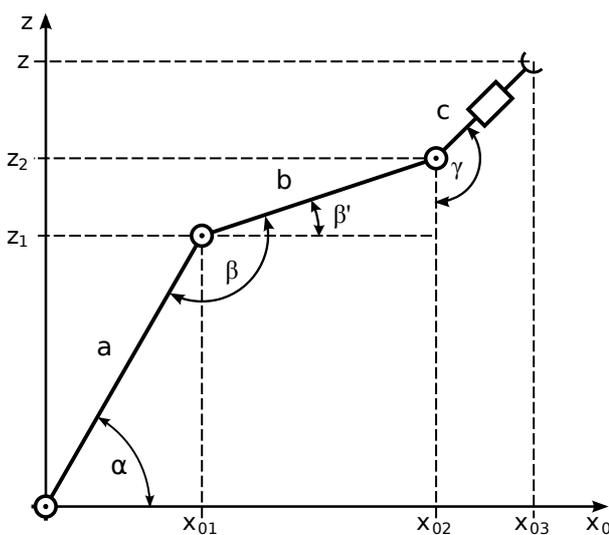
parametry HPS (x, y, z), které určují jeho polohu a tři parametry OPS ($\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$), které určují jeho orientaci kolem jeho os. Celkem má tedy tuhé těleso v prostoru šest stupňů volnosti viz Obr. 14. [13]

Struktura hlavního pohybového systému použitého robota Lynxmotion AL5A se skládá ze tří rotačních kinematických dvojic a má tak tři stupně volnosti. Vedlejší pohybový systém tvoří dvě rotační kinematické dvojice a má tak pouze dva stupně volnosti. Celkem má robot pět stupňů volnosti.

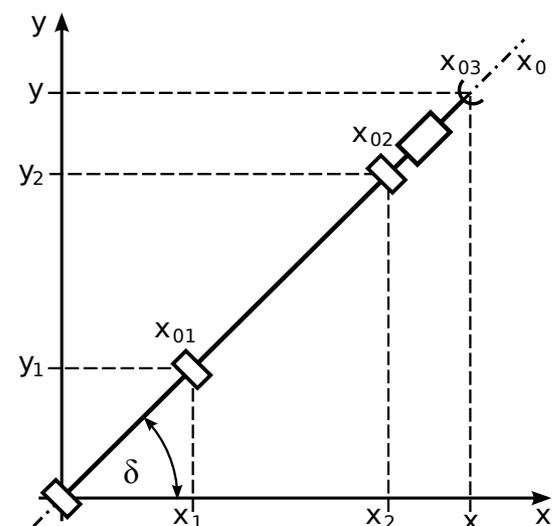
Dalšími charakteristickými vlastnostmi kinematické struktury, které vychází z konstrukce robota, jsou operační a pracovní prostor. Operační prostor je prostor, ve kterém, se robot pohybuje, a ve kterém se vykonávají jeho pohyby. Pracovní prostor je podmnožina operačního prostoru. Je to množina bodů, ve kterých se pohybuje referenční bod. Operační prostor robota Lynxmotion AL5A má kulový tvar, pracovní prostor má tvar prstence (torusu). [13, 11]

3.3.1 Přímá úloha

Přímá kinematická úloha hledá polohu koncového bodu (efektoru) v prostoru pomocí známých úhlů natočení všech kloubů robotického systému. Tato metoda se používá například u prostorových měřících přístrojů. Sestavení rovnic pro přímou kinematickou úlohu provedeme s použitím goniometrických funkcí podle schématických nákrešů robotického systému (Obr. 15 a Obr. 16) a známých úhlů natočení jednotlivých kloubů. [11]



Obr. 15: Přímá kinematika (osa x_0).



Obr. 16: Přímá kinematika (shora).

Z úhlu α , který svírá při ramenním kloubu paže se základnou, vypočteme souřadnice prvního pomocného bodu x_{01} v rovině osy x_0 :

$$x_{01} = a \cdot \cos(\alpha) \quad (3.3.1.1)$$

Pozici druhého pomocného bodu x_{02} v rovině osy x_0 vypočteme z úhlu β , který svírá paže společně s předloktím při loketním kloubu:

$$x_{02} = x_{01} + b \cdot \cos(\beta') = x_{01} + b \cdot \cos(\beta - 180 + \alpha) \quad (3.3.1.2)$$

Pozici posledního pomocného bodu x_{03} v rovině osy x_0 vypočteme z úhlu γ , který svírá zápěstí společně s osou z při zápěstním kloubu:

$$x_{03} = x_{02} + c \cdot \sin(\gamma) \quad (3.3.1.3)$$

Výslednou pozici jednotlivých kloubů v prostoru pak vypočítáme z pomocných bodů a úhlu natočení základny δ , který svírá osa x_0 s osou x .

Poloha loketního kloubu:

$$x_1 = x_{01} \cdot \cos(\delta) \quad (3.3.1.4)$$

$$y_1 = x_{01} \cdot \sin(\delta) \quad (3.3.1.5)$$

$$z_1 = a \cdot \sin(\alpha) \quad (3.3.1.6)$$

Poloha zápěstního kloubu:

$$x_2 = x_{02} \cdot \cos(\delta) \quad (3.3.1.7)$$

$$y_2 = x_{02} \cdot \sin(\delta) \quad (3.3.1.8)$$

$$z_2 = z_1 + b \cdot \sin(\beta') = z_1 + b \cdot \sin(\beta - 180 + \alpha) \quad (3.3.1.9)$$

Poloha koncového bodu efektoru:

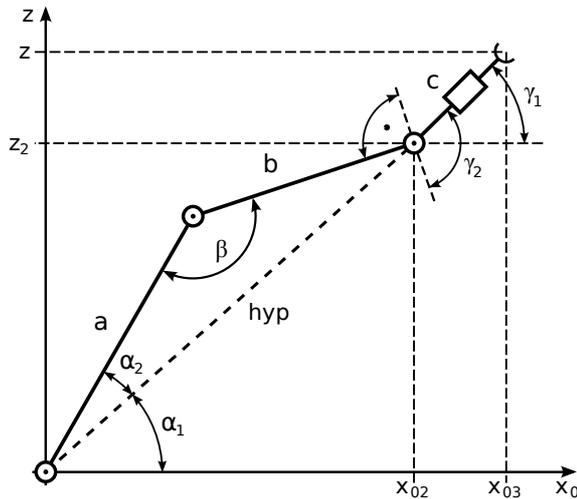
$$x = x_{03} \cdot \cos(\delta) \quad (3.3.1.10)$$

$$y = x_{03} \cdot \sin(\delta) \quad (3.3.1.11)$$

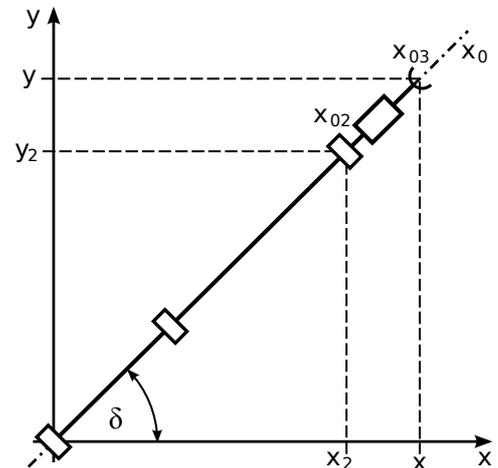
$$z = z_{02} - c \cdot \sin(\gamma) \quad (3.3.1.12)$$

3.3.2 Inverzní úloha

Inverzní kinematická úloha, jak napovídá název, postupuje zcela opačně než přímá kinematika a to tak, že ze známé polohy a orientace bodu v prostoru hledá úhly natočení jednotlivých kloubů robotického systému. [11]



Obr. 17: Inverzní kinematika (osa x_0).



Obr. 18: Inverzní kinematika (shora).

Metoda inverzní kinematiky má mnohem širší uplatnění, používá se nejenom k řízení robotických systémů, ale i animaci 3D modelů postav a podobně. Rovnice pro inverzní kinematickou úlohu odvodíme z nákrešů robotického systému (Obr. 17 a Obr. 18) a známé polohy a orientace efektoru v prostoru.

Z koncových bodů x a y vypočteme pomocí Pythagorovy věty polohu pomocného bodu x_{03} v ose roviny x_0 :

$$x_{03} = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.3.2.1)$$

Ze zadaného úhlu γ_1 , který určuje orientaci efektoru, vypočteme polohu zápěstního kloubu v ose roviny x_0 :

$$x_{02} = x_{03} - c \cdot \cos(\gamma_1) \quad (3.3.2.2)$$

$$z_2 = z - \text{base} - c \cdot \sin(\gamma_1) \quad (3.3.2.3)$$

Pomocí Pythagorovy věty vypočteme délku pomocné přepony hyp k poloze zápěstního kloubu v ose roviny x_0 :

$$hyp = \sqrt{z_2^2 + y_{02}^2} \quad (3.3.2.4)$$

Vypočteme úhel α_1 , který svírá pomocná přepona *hyp* s osou x_0 :

$$\alpha_1 = \arctan\left(\frac{z_2}{x_{02}}\right) \quad (3.3.2.5)$$

Z kosinové věty vypočteme úhly α_2 a β , z obecného trojúhelníku který tvoří ramenní, loketní a zápěstní klouby::

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{a^2 - b^2 + \text{hyp}^2}{2 \cdot a \cdot \text{hyp}}\right) \quad (3.3.2.6)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{a^2 + b^2 - \text{hyp}^2}{2 \cdot a \cdot b}\right) \quad (3.3.2.7)$$

Celkový úhel paže vůči ose x je roven součtu úhlů α_1 a α_2 :

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (3.3.2.8)$$

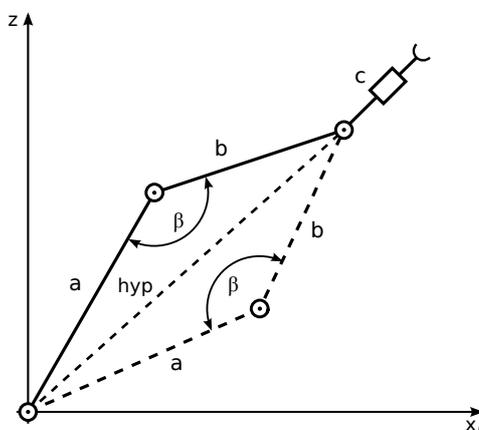
Úhel natočení základny δ vypočteme z polohy koncového bodu efektoru:

$$\delta = \arctan\left(\frac{x}{y}\right) \quad (3.3.2.9)$$

Vypočteme úhel γ_2 pro natočení zápěstního kloubu vůči normále předloktí *b*:

$$\gamma_2 = \gamma_1 + 270 - \alpha - \beta \quad (3.3.2.10)$$

Výpočet inverzní kinematiky může mít více řešení, jejich počet vychází z konstrukčního provedení robota viz Obr. 19. V takovém případě je třeba tento stav ošetřit a jedno z řešení vyloučit, neboť má konstrukce robota omezení z hlediska rozsahů jeho jednotlivých kloubů.

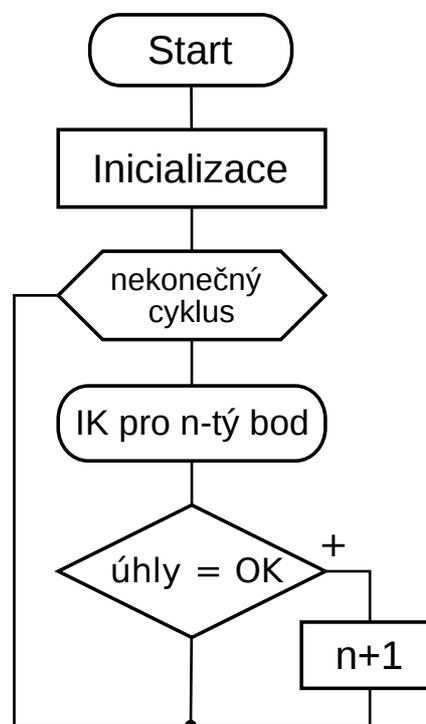


Obr. 19: Vizualizace dvou řešení IK.

3.4 Software

Program pro obsluhu řídicí jednotky je napsaný v jazyce C, který je v oblasti programování mikrokontrolérů široce využíván. Po jeho spuštění se postupně inicializují jednotlivé periferie, zpětná vazba, sériový kanál a LCD display. Po prvním přečtení dat ze zpětné vazby se vypočtou řídicí pulzy pro aktuální polohu robota a následně se odešlou přes sériovou linku do servo kontroléru. Tento krok eliminuje rychlé pohyby robota po spuštění.

Pro regulaci úhlů jednotlivých kloubů je v programu použitý spojitý PID regulátor, který k řízení používá zpětnou vazbu a upravuje tak šířku pulzů potřebnou k dosažení požadovaného úhlu natočení. Plný PID regulátor je realizován součtem proporcionální, integrační a derivační složky, přičemž míru jejich vlivu je třeba správně nastavit pomocí konstant. Proporcionální regulátor je lineární zesilovač, jeho výstup je přímo úměrný regulační odchylce. Výstup integračního regulátoru je úměrný integrálu regulační odchylky v čase, je tedy rovný velikosti plochy pod křivkou. Derivační regulátor reaguje na velikost změny regulační odchylky v čase. Pro optimální nastavení konstant PID regulátoru existuje řada metod. Pravděpodobně neznámější je Ziegler-Nicholsovo metoda, která popisuje nastavení konstant regulátoru pomocí empirických vztahů. [14, 15]

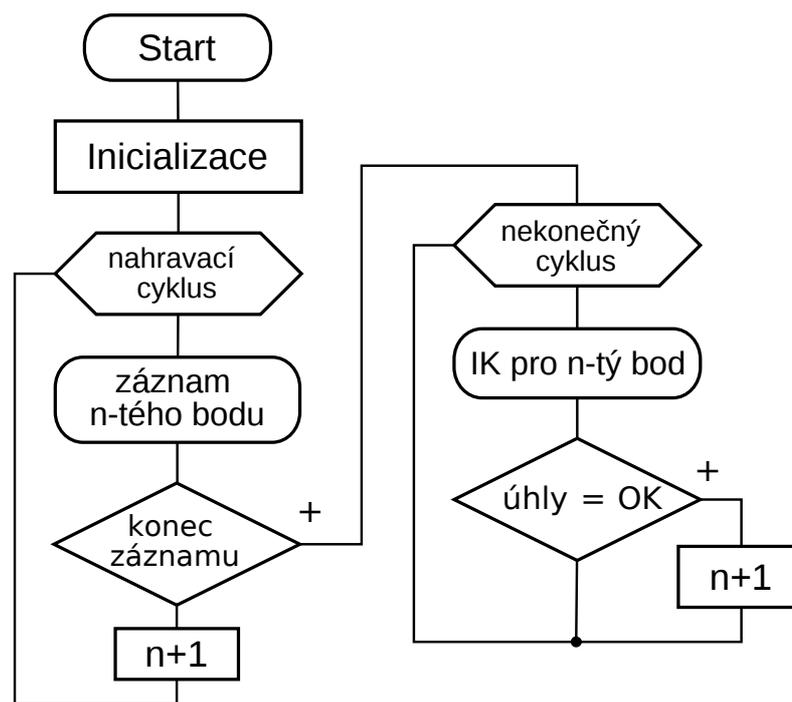


Obr. 20: Předdefinovaný pohyb.

Řídicí program má tři rozdílné funkce, požadovanou funkci programu lze navolit pomocí tlačítek a LCD displaye, na výběr jsou:

- cyklické opakování předdefinovaného pohybu „playback“,
- ruční zadání bodů pomocí parametrů x , y , z a γ_1 ,
- zadání poloh pomocí manuálního nastavení metodou „teach-in“.

Při předdefinovaném pohybu je v hlavní nekonečné smyčce programu umístěné dvourozměrné pole, ve kterém jsou uloženy jednotlivé pozice pohybu. Tyto pozice jsou následně proloženy pomocí lineární interpolace. Dále se volá funkce, která vypočte úhly natočení kloubů pomocí algoritmů inverzní kinematiky a zároveň ošetří vstupy. PID regulátor pak za pomoci vypočteného úhlu a zpětné vazby upravuje šířku řídicího pulzu pro dosažení požadované polohy. Pokud všechny úhly souhlasí, znamená to, že robot dojel do požadované polohy a program přejde k řešení další předdefinované polohy viz Obr. 20.



Obr. 21: Vývojový diagram metody „teach-in“.

Druhá funkce programu umožňuje nastavení libovolného počtu pozic (maximálně 40) ve tvaru x , y , z a γ_1 . Pozice se uloží do datového pole, v hlavním cyklu programu se pak tyto nastavené polohy interpolují a převedou na pohyb. Při nastavování pozic lze i zvolit, zda se bude pohyb cyklicky opakovat nebo nikoliv.

Poslední funkcí programu je metoda „teach-in“, při této metodě se provádí manuální nastavení robota do jednotlivých pozic, které si program uloží při stisku tlačítka. Tyto uložené pozice jsou pak zpětně převáděny na pohyb. Program postupuje tak, že po spuštění přejde do nahrávacího cyklu, po stisku tlačítka vypočte pomocí přímé kinematiky pozici a orientaci efektoru a zapíše jí do paměti (pouze osy se zpětnou vazbou). Po ukončení nahrávání jsou jednotlivé polohy proloženy pomocí přímkou a zpětně se pomocí inverzní kinematiky vykonává pohyb robota viz Obr. 21. Podobná metoda se používá například při programování robotů pro bodové sváření nebo transportní operace.

4 Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout, realizovat a naprogramovat řízení robotického systému se zpětnou vazbou. Jejím smyslem je demonstrovat využití postupů se zpětnovazební řízením, které se v praxi pro velké průmyslové roboty používá běžně.

Jako výchozí robotický systém byl použit již existující robot Lynxmotion AL5A, jehož konstrukci bylo třeba doplnit o obvody zpětné vazby. Pro hlavní řídicí jednotku jsem použil mikrokontrolér AVR ATmega32 na vývojovém kitu EvB 4.3. Pro vývojový kit jsem se rozhodl v důsledku konzultace s vedoucím práce, vzhledem k dalšímu vývoji řešení. Serva robota jsou řízená pulzní šířkovou modulací přes sériový servo kontroléru Lynxmotion SSC-32, který umožňuje řídit až 32 serv najednou. Servo kontrolér je s řídicí jednotkou spojen sériovou linkou na TTL úrovni, přes kterou přijímá řídicí instrukce. Zpětnou vazbu jsem realizoval pomocí magnetických rotačních enkodérů AS5040 zapojených v sérii. Čtení dat ze zpětné vazby probíhá přes robustní SSI rozhraní v Daisy Chain módu.

Řídicí program je napsán v jazyce C a má tři možnosti funkce. Nejzákladnější z nich je zadáním pozic přímo do těla programu, program pak cyklicky vyková sadu předdefinovaných pozic. Dalšími možnostmi jsou zadávání libovolných pozic pomocí tlačítek a metoda „teach-in“, kdy manuálně vykonáváme pohyb robota. Tento pohyb si robot uloží do paměti a je schopný ho opětovně vykonat.

Pro řízení serv robota bylo třeba vytvořit algoritmus, který by ovládal informaci ze zpětné vazby. Původním záměrem bylo použít pouze proporcionální regulátor, po několika pokusech se však ukázal jako nepoužitelný vzhledem k velkým kmitům. Protože pracujeme s reálnými pohony, které nereagují okamžitě a mají omezenou rychlost pohybu, byly kmity důsledkem přeregulování řídicí veličiny. Dalším krokem bylo přidání derivační složky pro utlumení kmitů, to ale mělo za následek velké zpomalení regulačního procesu. Ve výsledku je tedy pro řízení použitý plný PID regulátor, přičemž největší podíl na regulaci mají složky proporcionální a integrační.

Zavedení zpětné vazby proces řízení zpřesnilo, hlavně při přemísťování břemene, ale za cenu delších vykonávacích časů. Celý proces by se dal zrychlit optimálnějším nastavením konstant regulátoru. Samotná problematika PID regulátorů je ale značně obsáhlá, proto jsem pro zjednodušení provedl jen základní nastavení pomocí Ziegler-Nicholsovo metody.

5 Seznam literatury a informačních zdrojů

[1] AND-TECH. *EvB 4.3 User's Manual: datasheet* [online]. [cit. 2013-04-19]. Dostupné z: <http://and-tech.pl/wp-content/plugins/download-monitor/download.php?id=evb4.3+v4+manual.pdf>

[2] ATMEL. *ATmega32: datasheet* [online]. 2011 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/Images/doc2503.pdf>

[3] Lynxmotion Robot Kits. [online]. [cit. 2013-04-19]. Dostupné z: <http://www.lynxmotion.com/c-27-robotic-arms.aspx>

[4] AUSTRIAMICROSYSTEMS. *AS5040: datasheet* [online]. 2.10. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: http://www.ams.com/eng/content/download/1285/7214/AS5040_Datasheet_v2_01.pdf

[5] Synchronous Serial Interface. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Synchronous_Serial_Interface

[6] *Bit Bang Modes For The FT232R and FT245R* [online]. [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: http://www.ftdichip.com/Support/Documents/AppNotes/AN_232R-01_Bit_Bang_Mode_Available_For_FT232R_and_Ft245R.pdf

[7] Řízení serva. *Robotika.cz* [online]. [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: <http://robotika.cz/guide/servo/cs>

[8] SSC-32 Manual. [online]. [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.lynxmotion.com/images/html/build136.htm>

[9] EVB-SPI. [online]. [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: http://shop.onpa.cz/download/EvB-ISP_cz.pdf

[10] Serva. *PELIKÁN DANIEL* [online]. [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://www.pelikandaniel.com/?sec=page&id=22>

[11] SMUTNÝ, Vladimír. *Kinematika Robotů* [online]. [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://cw.felk.cvut.cz/lib/exe/fetch.php/courses/a3b99ro/robotismutnycz.pdf>

[12] Lynxmotion Arms and Inverse Kinematics. KEESLING, Mike. [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.lynxmotion.com/images/html/proj057.htm>

[13] *Roboty a Manipulátory* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: http://www.edumat.cz/texty/Roboty_manipulatory.pdf

[14] KLÁN, Petr. Ziegler-Nicholsovo nastavení PID regulátoru – retrospektiva. [online]. [cit. 2013-05-25]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=27697

[15] PID Controller. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller

[16] Using LCD Module with AVR. *Extremeelectronics* [online]. [cit. 2013-06-03]. Dostupné z: <http://extremeelectronics.co.in/avr-tutorials/using-lcd-module-with-avrs/>

[17] AS5043 - knihovny pro AVR. *Pandatron.cz* [online]. [cit. 2013-06-03]. Dostupné z: http://m.pandatron.cz/?628as5043_-_knihovny_pro_avr