VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

ŘÍZENÍ TŘÍOSÉHO KARTÉZSKÉHO MANIPULÁTORU

CONTROL OF THREE-AXIS CARTESIAN MANIPULATOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE ŠTĚPÁN DRHA
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. PAVEL HOUŠKA, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Štěpán Drha

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902R001)**

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

Řízení tříosého kartézského manipulátoru

v anglickém jazyce:

Control of three-axis Cartesian manipulator

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá realizací řízení jednoduchého kartézského manipulátoru. Manipulátor je navržen jako univerzální platforma pro řešení úloh z oblasti manipulace, montáže, obrábění, tisku a rapid-prototyping. Cílem této práce je realizovat software pro řízení tří os manipulátoru, tak aby bylo možno programově zadávat jednotlivé body trajektorie.

Cíle bakalářské práce:

1. Seznamte se s problematikou řízení robotických manipulátorů;
2. S využitím existujících hardwarových a softwarových modulů realizujte řízení pohonů jednotlivých os;
3. Řešte problematiku přesnosti polohování jednotlivých os i přesnosti manipulátoru jako celku;
4. Navrhněte zadávání více bodů trajektorie, zabývejte se možností řízení pohybu po kružnici;
5. Realizujte a ověřte software pro řízení manipulátoru.

Seznam odborné literatury:

[1] Siciliano B.: Robotics: Modelling, Planning and Control, Springer-Verlag, London 2009, e-ISBN 978-1-84628-642-1
[2] Ďaďo S., Kreidl M.: Senzory a měřící obvody, Skriptum ČVUT, 1999
[3] Fraden, J.: Handbook of Modern Sensors, 2004, Springer-Verlag, ISBN 0-378-00750-4
[4] Noskievič, P.: Modelování a identifikace systémů, Montanex a.s., Ostrava 1999, ISBN 80-7225-030-2
[5] National Instruments: LabVIEW Control Design User Manual[online], June 2009, 371057G-01, dostupné z URL:<http://www.ni.com>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Houška, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 21.11.2011

L.S.

Ing. Jan Roupec, Ph.D. Ředitel ústavu	prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c. Děkan fakulty

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací řídicího systému univerzálního kartézského manipulátoru. Cílem práce je vytvořit funkční řídicí systém manipulátoru s využitím dostupných hardwarových a softwarových modulů.

Úvod práce shrnuje obecnou problematiku řízení kartézských manipulátorů. Následující kapitola se zabývá výběrem jednotlivých softwarových a hardwarových modulů řídicího systému. Na základě těchto modulů je navrhnut a realizován řídicí systém manipulátoru. Závěr práce hodnotí dosažené výsledky a navrhuje možná zlepšení pro danou aplikaci.

Abstract

The bachelor thesis deals with the proposal and realisation of the control system of the universal Cartesian manipulator. The aim of the thesis is to create a functional control system of the manipulator with the usage of available hardware and software modules.

The introduction of the work summarizes general issues of the Cartesian manipulators controlling. The following chapter occupies with the selection of the individual software and hardware modules of the control system. Based on these modules, the control system of the manipulator is designed and realised. The conclusion of the work evaluates the results and it proposes possible improvements for this application.

Klíčová slova

Kartézský manipulátor, CAN, G-kód, LabVIEW, CompactRIO

Keywords

Cartesian manipulator, CAN, G-code, LabVIEW, CompactRIO

Prohlášení o originalitě

Tímto prohlašuji, že předkládaná bakalářská práce je mojí původní autorskou prací, kterou jsem vypracoval pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím uvedené odborné literatury.

Štěpán Drha, Brno, 2012

Bibliografická citace

DRHA, Š. *Řízení tříosého kartézského manipulátoru.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Houška, Ph.D.

Poděkování

Děkuji tímto svému vedoucímu Ing. Pavlu Houškovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a veškerou pomoc, kterou mi v průběhu tvorby práce ochotně poskytoval.

Obsah

Abstrakt 5
Klíčová slova 5
Prohlášení o originalitě 7
Bibliografická citace 7
Poděkování 9
Obsah 11
1 Úvod 13
2 Robotický systém 15
2.1 Kartézský manipulátor 16
2.2 Aplikace kartézských manipulátorů 16
3 Řešený manipulátor 19
3.1 Řídicí jednotka Maxon EPOS2 20
4 Návrh řídicího systému 21
4.1 Schéma řídicího systému 21
4.2 Definice požadovaných stavů 24
4.3 Volba programovacích prostředků 26
5 Struktura řídicího software 29
6 Realizace 33
7 Závěr 37
8 Seznam použité literatury 39

1 Úvod

Kartézský manipulátor je univerzální platforma průmyslového robotického systému, která je schopna pracovat ve 3D prostoru. Mezi aplikace kartézského manipulátoru patří např. CNC obráběcí stroje, osazovací automaty nebo 3D tiskárny.

Cílem práce je navrhnout a realizovat univerzální řídicí systém pro kartézský manipulátor. Řídicí systém má být realizován pomocí dostupných hardwarových a softwarových modulů. Tento požadavek umožňuje případné použití řídicího systému v průmyslu.

Řešený univerzální manipulátor je tvořen třemi pohony, které se skládají ze stejnosměrných motorů a lineárních vedení s kuličkovými šrouby. Lineární vedení tvoří vazby, které odebírají každá po jednom stupni volnosti.

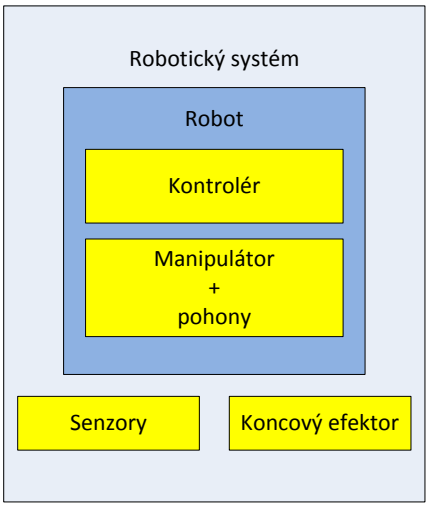
Řídicí systém řešící přímou kinematickou úlohu je sestaven po softwarové a hardwarové stránce modulárně. Modulární řešení přispívá ke zvýšení univerzálnosti celého robotického systému.

V robotickém systému pro řízení kartézského manipulátoru je použita sběrnice CAN, řídicí jednotky Maxon EPOS2 a embedded systém cRIO. Řídicí systém je postavený na modulu NI SoftMotion Axis Interface for EPOS2 Positioning Controller-Maxon Motor, který je určený pro generování trajektorií víceosých systémů.

Řídicí modul je rozšířen o rozhraní pro zadávání trajektorií v G-kódu. G-kód je standardizovaný programovací jazyk určený pro CNC obráběcí stroje.

2 Robotický systém

Průmyslový robot je ve slovníku normy ČSN EN ISO 8373 [1] definován jako automaticky řízený víceúčelový reprogramovatelný manipulátor se třemi a více osami určený pro průmyslovou automatizaci. Na základě normy ČSN EN ISO 10218-1 [2] je tvořen kontrolérem a manipulátorem včetně pohonů. Kontrolérem se rozumí řídicí, programovací a komunikační rozhraní (včetně hardwaru nutného pro realizaci). Rozšířením průmyslového robotu o senzory a koncový efektor vznikne robotický systém. Koncový efektor je zařízení umožňující robotu vykonávat naplánovanou úlohu (úchopová hlavice, sklíčidlo).



Obrázek 1 Schéma robotického systému.

Robotický systém se svým konceptem podobá lidskému tělu. Je vybaven polohovacím (pohybovým) aparátem, senzorickým a řídicím systémem.

Pohybový systém je realizován manipulátorem s pohony. Z kinematického hlediska jde o sériový nebo paralelní řetězec s n stupni volnosti. Hlavní úlohou pohybového systému je dosažení koncové polohy koncovým efektorem. Z pohledu modelu je robot tvořen prutovými tělesy a vazbami. Jednotlivé vazby nazýváme osami, které se realizují rotačními nebo lineárními pohony.

Otázkou kinematiky je také definování maximálního a operačního prostoru. Maximální prostor je oblast, v níž se pohybuje manipulátor, koncový efektor i s obrobkem. Tento prostor je podstatný pro rozvržení pracoviště, protože v něm může dojít ke kolizi manipulátoru s jiným objektem. Operační prostor je prostor, ve kterém se při plnění dané úlohy manipulátor pohybuje. [2]

Senzorický systém obstarává zpětnou vazbu pro systém řídicí. Senzory sledují aktuální stav manipulátoru a okolí. Zpětnou vazbu řídicímu systému je možno realizovat pomocí snímačů natočení (enkodérů) a referenčních snímačů. Snímače okolí slouží pro zaručení bezpečnosti a přecházení kolizím. Pro tuto aplikaci lze využít infračervených a laserových snímačů (difuzní snímače, optické závory). Robotické systémy mohou být doplněny v rámci konkrétní úlohy o kameru, snímače přítomnosti atd.

Řídicí systém zpracovává výstupy ze snímačů a zasílá vstupy do pohonů. Výhodné je řešit úlohu řízení hierarchicky. Do nejnižší vrstvy umístit řídicí jednotky určené pro řízení pohonů a komunikaci se snímači. Tyto informace po sběrnici zasílat do hlavní řídicí jednotky. Hlavní řídicí jednotka bude na základě těchto vstupů a vstupů od obsluhy provádět samotné řízení. Pro kontrolu provozu, vizualizaci nebo programování je možné připojit hlavní řídicí jednotku prostřednictvím sítě ethernet k počítači.

2.1 Kartézský manipulátor

Kartézský manipulátor využívá pouze lineárních vazeb. Tato vlastnost definuje jeho konstrukci, kinematiku a možnosti využití.

Z kinematického pohledu se jedná o sériový manipulátor. [3] Sériový (otevřený) manipulátor je takový řetěz, mezi jehož vazbami existuje vždy maximálně jedna cesta. Pohyb v jednotlivé vazbě není vázán na pohyby v dalších vazbách, jako u manipulátorů paralelních.

Maximální i operační prostor tříosého kartézského manipulátoru je tvaru hranolu a je dán třemi lineárními vazbami. Každá lineární vazba odebírá po jednom stupni volnosti (rotace kolem os x, y, z), proto má kartézský manipulátor tři stupně volnosti. U některých aplikací kartézského manipulátoru jsou doplněny navíc rotace kolem os. Přidáním tří rotačních vazeb pro rotaci kolem každé z os lze dosáhnout konfigurace univerzálního manipulátoru s šesti stupni volnosti. [3] Této konfigurace využívají CNC obráběcí stroje.

Lineárních pohybů kartézského manipulátoru lze docílit elektrickými, hydraulickými nebo pneumatickými pohony. Jednotlivé pohony se mohou mezi sebou různě kombinovat a vytvářet tak hybridní systém těžící z výhod jednotlivých řešení.

Výběr pohonu definuje přesnost, plynulost a rychlost polohování manipulátoru. Z těchto důvodů na pohon vyplývají požadavky na velký výkon a minimální moment setrvačnosti. Z montážního hlediska je podstatná hmotnost a tvarové rozložení. [3]

Realizace přímočarého pohybu elektrickým motorem využívá točivých strojů nebo lineárních motorů. Pro převod točivého pohybu na lineární lze využít valivých šroubů, ozubených řemenů nebo hřebenu. Lineární elektrický motor je elektromotor, který vznikne rozložením statoru a rotoru do roviny.

2.2 Aplikace kartézských manipulátorů

Kartézské manipulátory mají široké spektrum využití. Lze se s nimi setkat u úloh s vysokými požadavky na přesnost a rychlost, nebo v úlohách pro manipulaci s těžkými břemeny. Kartézský manipulátor je možné pro speciální případy vyrobit v portálovém provedení, což zvedá jeho mechanickou pevnost a nosnost. Mezi aplikace kartézského manipulátoru patří např.:

- SMT osazovací automaty
- Manipulační úlohy
- Montážní úlohy
- CNC obráběcí stroje
- Rapid prototyping

2.2.1 SMT (Surface – mount technology)

SMT je technologie, při níž se pájí vývody elektrosoučástek přímo na povrch tištěného spoje. Na SMT osazovací automaty jsou díky miniaturizaci a integraci co nejvíce součástek na malou plochu kladené vysoké nároky na přesnost a rychlost montáže. Nejrychlejší SMT automaty osadí přes 100 000 součástek za hodinu. Dosahované přesnosti jsou v řádech mikrometrů. Přesnost natočení součástky se pohybuje v řádech desetin až setin stupně. [4]

2.2.2 CNC obrábění

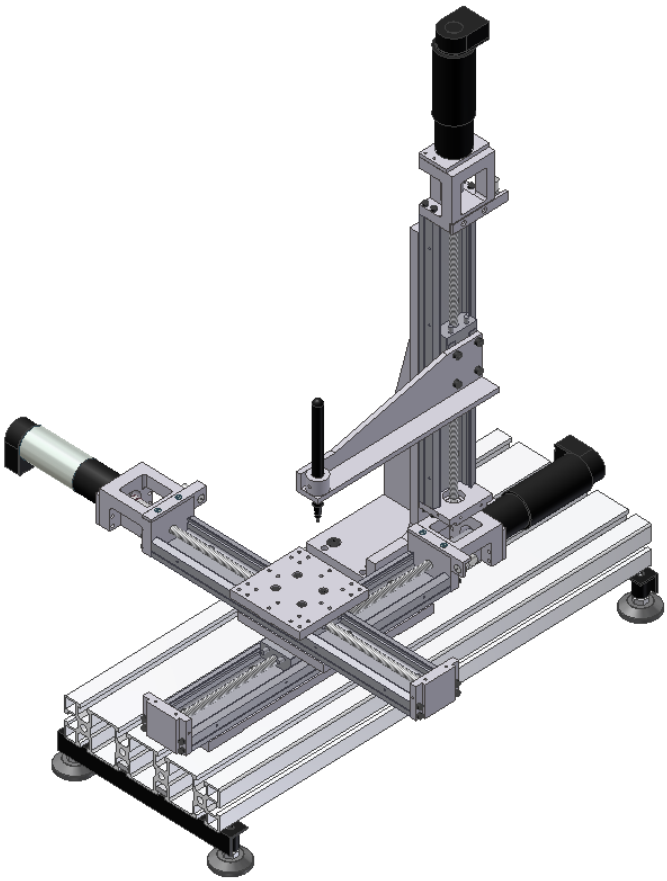
CNC (Computer numerical control) obráběcí stroje se využívají pro frézování, vrtání, soustružení a řezání. CNC stroje bývají doplněny o rotace kolem jednotlivých os, které usnadňují manipulaci s obrobkem. Řízení CNC strojů se realizuje programovacími jazyky, které jsou navrhnuty přímo pro řízení pohybů a koncových efektorů pro obrábění.

2.2.3 Rapid prototyping

Rapid prototyping (3D tisk) je aplikace kartézského manipulátoru, která se využívá pro rychlý návrh součástí. Koncovým efektorem je tryska, která nanáší pojivo po jednotlivých vrstvách na sebe a tím tvoří 3D model (tato metoda se označuje inject). Předlohou pro tisk je model vytvořený v 3D návrháři nebo 3D scan objektu, který má být modelován.

3 Řešený manipulátor

Každá řízená osa manipulátoru se skládá z lineárního vedení, pohonu a referenčního snímače. Pohon je tvořen stejnosměrným motorem, planetovou převodovkou a enkodérem. Lineární vedení jsou na všech osách totožná, jedná se o typ Hiwin KK50-300A1-F0 s jedním vozíkem a kuličkovým šroubem se stoupáním 2 mm. Parametry pohonů jednotlivých os jsou v tab. 1. Jednotlivé pohony jsou řízeny řídicími jednotkami Maxon EPOS2 24/5.



Obrázek 2 Model řešeného manipulátoru.

Osa	X	Y, Z
Motor	Maxon A-max 32	Maxon RE 36
Nominální napětí [V]	24	24
Nominální proud [A]	1.3	2.25
Nominální výkon [W]	31.2	54
Rozběhový proud [A]	5.81	21.5
Nominální otáčky [min^{-1}]	5020	5880
Nominální moment [mNm]	44.4	78.2
Rozběhový moment [mNm]	205	783
Moment setrvačnosti [gcm^2]	45	69.9
Rozměry (d x l) [mm]	ø32 x 61.5	ø36 x 71.2
Hmotnost [g]	240	350

Převodovka	GP 32C
Převodový poměr	18 : 1(624/35)
Maximální moment [Nm]	3
Moment setrvačnosti [gcm^2]	0.8
Rozměry (d x l) [mm]	ø32 x 36.4
Hmotnost [g]	162

Enkodér	Avago technologies HEDM-5500 B11	Avago technologies HEDS-5540 A11
Počet kanálů	2	2
Počet impulsů [ot^{-1}]	1000	500
Maximální rychlost [min^{-1}]	30000	30000
Napájecí napětí [V]	5	5
Fázový posun [°e]	90±45	90±45

Referenční snímač	My-Com B30/80
Aktivační síla [N]	0.3
Opakovatelná přesnost [mm]	< 0.001
Přejezd [mm]	1.5
Napájecí napětí [V]	15
Spínaný proud [mA]	2

Tabulka 1 Seznam komponent. [5] [6]

3.1 Řídicí jednotka Maxon EPOS2

Řídicí jednotka Maxon Epos2 (Easy to use Positioning System) je navrhnuta pro řízení stejnosměrných nebo elektricky komutovaných motorů. Výkony řízených motorů mohou být v rozmezích od 5 do 120 W. Jednotky jsou vybaveny komunikačními rozhraními RS323, USB a CAN. V této aplikaci jsou nastaveny z PC přes rozhraní USB, sběrnice CAN s protokolem CANopen je použita pro jejich ovládání. Využito je nejvyšší přenosové rychlosti 1Mbit/s. Jednotky umožňují řízení pohonu na polohu a rychlost včetně regulace pomocí proudové smyčky. Pro řízení víceosých systémů lze využít interpolační režim, v němž lze pohybovat více pohony zároveň. Ladění PID regulátoru a nastavení komunikace lze provést pomocí dodávaného software EPOS Studio. Hlavním hardwarovým prvkem jednotky je 32bitový procesor obstarávající práci s I/O signály. Díky němu je k jednotce možné připojit enkodéry s rozlišením až 2 500 000 dílků $^{-1}$o maximální frekvenci 5 MHz. [5]

4 Návrh řídicího systému

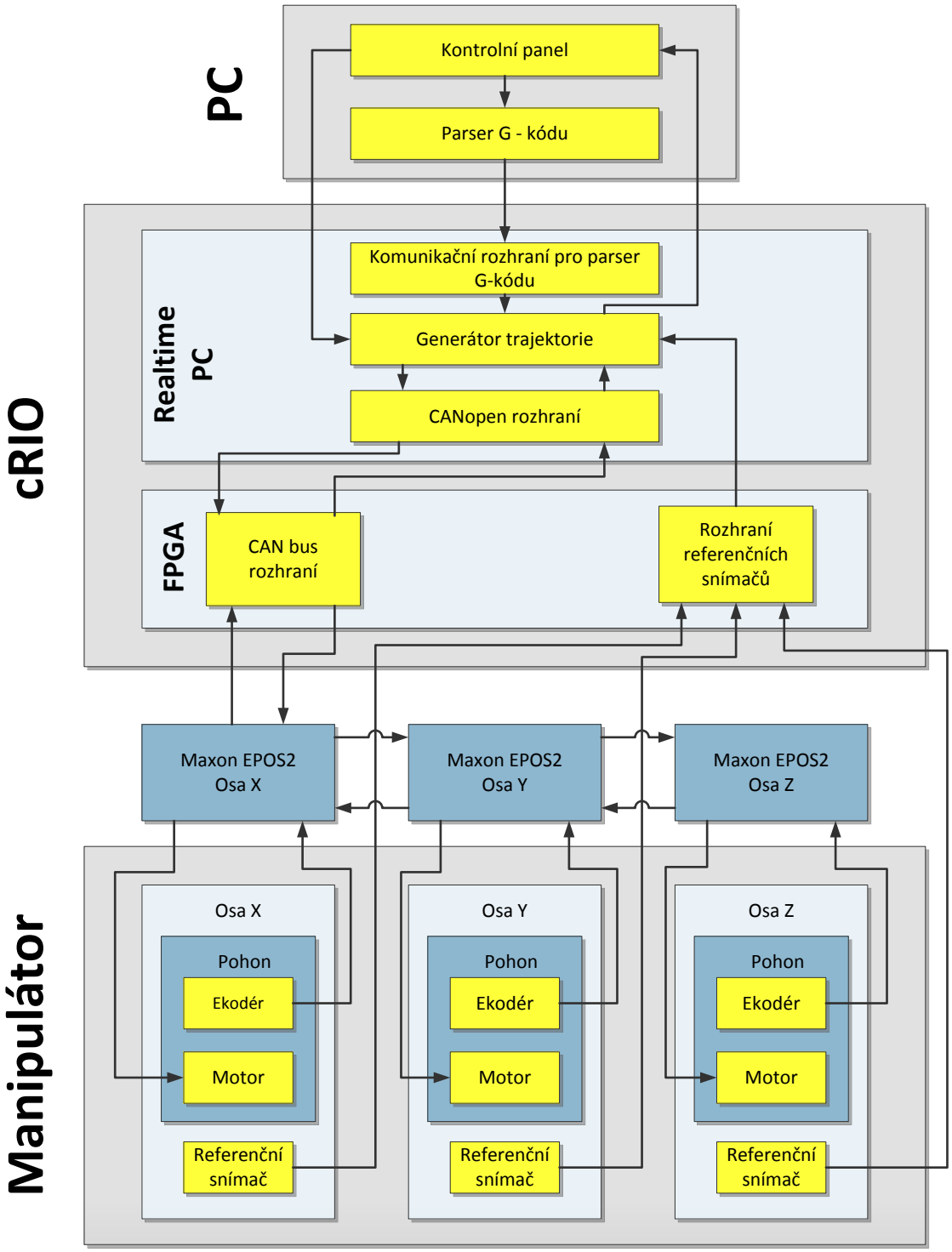
Na řídicí systém byl kladen požadavek, aby byl realizován pomocí dostupných hardwarových a softwarových modulů. Absence hardwarových modulů vlastní výroby umožňuje rychlejší nasazení řídicího systému do reálného provozu, neboť odpadá nejen samotný vývoj modulů, ale i jejich atestace.

4.1 Schéma řídicího systému

Návrh modulárního řídicího systému je na obr. 3. Hardware řešeného robotického systému byl doplněn o embedded systém NI CompactRIO (cRIO). Na schématu jsou vyznačeny i jednotlivé softwarové moduly a jejich funkce.

Systém cRIO je v kombinaci s grafickým programovacím rozhraním LabVIEW, které je určeno pro rychlý vývoj řídicích aplikací a DAQ systémů. Použité cRIO se skládá z realtimového systému s 32bitovým procesorem, programovatelného hradlového pole (FPGA) a šasi. Šasi slouží pro rozšiřování embedded systému o další hardwarové moduly.

Obrázek 3 Embedded systém cRIO. [6]



Obrázek 4 Schéma řídicího systému.

4.1.1 Hardwarová struktura řídicího systému

Hardware řídicího systému je sestaven do hierarchické struktury. Výstupy z enkodérů jdou do řídicích jednotek Maxon EPOS2, zpracovaná data jsou po sběrnici CAN zasílána do hlavní řídicí jednotky, realizované na embedded systému cRIO. Systém cRIO je k jednotkám Maxon EPOS2 ve vztahu master–slave. Samotná komunikace mezi cRIO a kartami Maxon EPOS2 je řešena softwarovým modulem běžícím na FPGA, dalšími vstupy

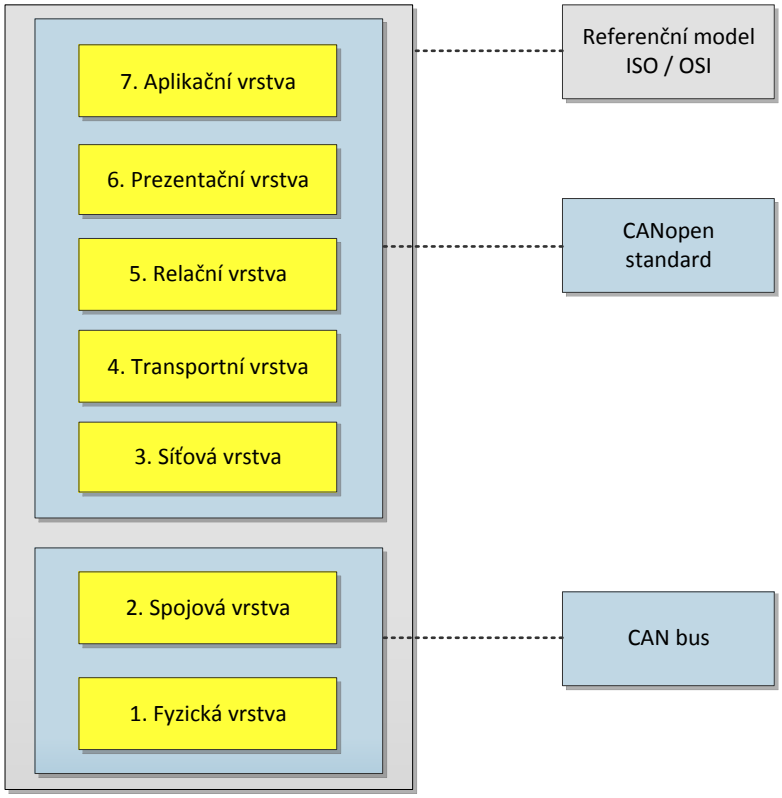
do FPGA jsou signály z referenčních snímačů. Realtimový systém zpracovává vstupy z FPGA a z PC, na jejich základě provede akční zásahy, které jdou přes FPGA a jednotky Maxon EPOS2 do motorů.

Obrázek 5 Řídicí jednotka Maxon EPOS2 24/5. [7]

4.1.2 CAN / CANopen

CAN bus (Controller Area Network) je průmyslová sběrnice vyvinutá společností Bosch určená původně pro automobilový průmysl. Dnes je tato sběrnice standardizovaná ISO standardem 11898 [8], který definuje její použití i pro průmyslové vestavné sítě.

CAN je realtimová half – duplex sériová sběrnice řešící kolize pomocí CSMA/CD (použitý u sítě Ethernet) vylepšeného o Collision Avoidance. Toto vylepšení zaručí, že při kolizi bude jako první odvysílána zpráva s nejvyšší prioritou, přičemž zprávy s nižšími prioritami jsou odvysílány následovně podle stejného pravidla. Zprávy jsou po sběrnici zasílány pomocí rámců (frame). Každý rámec může přenést 8 bytů dat. Rámce jsou určeny unikátním 11 bitovým identifikátorem, který určuje prioritu zprávy a node ID odesílatele (unikátní pro každý uzel v síti). [9]



Obrázek 6 Implementace modelu ISO /OSI pomocí CAN bus a CANopen.

CAN bus neimplementuje všech sedm vrstev referenčního modelu ISO / OSI, proto jako rozšíření implementující zbylé vrstvy vznikla nadstavba CANopen. CANopen rozšiřuje možnosti CANu v oblastech synchronizace a síťového managementu. [9]

CANopen obsahuje několik komunikačních protokolů, každý z nich si vytváří specifické navzájem nezaměnitelné komunikační objekty. Mezi definované protokoly patří NMT pro network management, SDO (Service Data Object) pro konfiguraci zařízení v síti, SYNC pro synchronizaci, EMCY pro chybové zprávy a PDO (Process Data Object) sloužící pro přenos dat po zkonfigurované síti. [10]

SDO komunikační protokol je potvrzovaný protokol. Využívá slovníku objektů (příkazů), který obsahuje každé zařízení v síti. Každý SDO objekt je tvořen identifikátorem a osmi bajty pro data, z nichž jeden slouží ke specifikaci komunikace. [10]

PDO protokol je nepotvrzovaný a využívá všech osmi bytů pro přenos informací. PDO objekty mají vyšší prioritu než SDO objekty a slouží k realtimové komunikaci mezi zařízeními v síti. PDO komunikace může probíhat synchronně, na vyžádání nebo může být spouštěna definovanými událostmi (event). PDO zpráva vzniká „namapováním“ jednoho nebo více příkazů do datové oblasti jednoho objektu. Jeden PDO objekt tak může nést různé informace pro různé uzly. To je umožněno tím, že zpráva se v CANu zasílá všem uzlům a přijmou ji pouze ti, co rozumí jejímu identifikátoru. [10]

4.2 Definice požadovaných stavů

Pro návrh aplikace je nutné stanovit požadované stavy, v nichž se může robotický systém ocitnout. Tyto požadavky jsou dány způsobem využití manipulátoru. Řešený kartézský manipulátor má být univerzální platformou, umožňující jeho použití pro co nejširší spektrum úloh, např. 3D tisk, 2D zapisovač, obrábění. Protože zmíněné úlohy jsou realizovatelné pomocí CNC obráběcích strojů, jsou požadované stavy odvozeny od provozních a pracovních stavů těchto strojů.

4.2.1 Konfigurace

Před jakýmkoliv pohybem s manipulátorem je nutné nalézt referenční bod. Nalezení tohoto bodu je důležité pro určení výchozího souřadného systému. Bez této operace by nebylo možné určit polohu manipulátoru v pracovním prostoru a mohlo by dojít ke kolizi. Nalezení referenčního bodu spočívá v manuálním najetí jednotlivých os na referenční snímače. Tato operace je povinná, bez ní nelze zadat další instrukce pro manipulátor.

Důležitým prvkem pro řízení manipulátoru je možnost výběru mezi absolutním zadáváním a přírůstkovým zadáváním polohy. Další základní volbou je výběr délkových jednotek. Ty lze volit mezi metrickými a palcovými mírami.

4.2.2 Základní operace s manipulátorem

Mezi základní operace s manipulátorem se řadí pojezdy v jednotlivých osách, nastavování rychlostí a ovládání koncového efektoru. Pokud manipulátor nepracuje, je možné využít pro pohyb režim nazývaný Rapid. Rapid umožní obsluze pohyb podél jednotlivých os maximální možnou rychlostí.

Při obrábění musí být umožněno pohybovat koncovým efektorem ve všech osách zároveň. Tato podmínka zpřístupňuje možnost pohybu po křivce. V obráběcím režimu je pohyb vhodně proložen pomocí lineárních nebo kruhových interpolací. Interpolovaný pohyb se provádí zároveň ve všech osách. Rychlost pohybu v jednotlivých osách je při obrábění možno plynule regulovat.

Ovládání koncového efektoru zahrnuje výběr obráběcího nástroje, možnost regulace rychlosti a směru otáčení.

Po najetí do referenčního bodu se také zpřístupní další základní operace nastavení nulového bodu. Tento bod je definován čistě softwarově a jedná se o ofset vůči jednotlivým osám. Nulový bod slouží pro usnadnění práce s manipulátorem.

4.2.3 Způsoby řízení manipulátoru

Stejně jako CNC stroje bude možné manipulátor řídit manuálně nebo automaticky. Manuální režim slouží hlavně pro najetí pohonů do referenčního bodu. Z bezpečnostních důvodů nelze tutooperaci provádět v automatickém režimu. Při použití automatického režimu nelze vyloučit kolizi, protože v pracovním prostoru se může nacházet obrobek nebo může dojít ke zranění osob nacházejících se v maximálním prostoru. V manuálním režimu je umožněn pojezd v jednotlivých osách, změna rychlosti pohybu a použití rychloposuvu.

Řídicí systém umožňuje využít dva automatické režimy řízení. Pro oba je společné načítání instrukcí z instrukčního souboru. Instrukční soubor obsahuje uživatelský program, který bude vykonáván zcela automaticky nebo bude vyžadovat potvrzení obsluhy před provedením každého dalšího kroku algoritmu. V automatickém režimu jsou přístupné všechny pohybové a obráběcí funkce, kromě již zmíněného najíždění do referenční polohy.

Soubor s uživatelským programem je možné vytvořit v editoru, který je zabudovaný do řídicího systému a obsahuje základní kontrolu korektnosti programu.

4.2.4 Stavy manipulátoru

Během provozu může robotický systém nabývat několika stavů. Tyto stavy jsou založeny na způsobu řízení manipulátoru, konfiguraci a průběhu požadovaných operací.

Po každém zapnutí robotického systému proběhne inicializační proces. Při tomto procesu se zinicializují všechny řídicí jednotky a ověří se jejich konfigurace Zároveň se vygeneruje požadavek pro definování referenčního bodu, přičemž se zablokuje režim automatického řízení manipulátoru.

Reakce na úspěšné provedení inicializace je stav ready. Do tohoto stavu se robotický systém dostává po úspěšném provedení jakékoliv operace. Stav ready znamená, že předchozí operace proběhla úspěšně a je možné zadat další příkaz. Z tohoto stavu je možné přecházet do jednotlivých způsobů řízení, definovaných výše.

Řízení je možné kdykoliv přerušit nebo ukončit pomocí definovaných způsobů přerušení. Mezi definované způsoby patří režim pauzy, který zastaví pohony v aktuální pozici. Po zrušení pauzy je možné pokračovat v započaté operaci. Další možností je režim reset, který ukončí aktuální operaci a vyvolá stav inicializace. Stav pro kompletní vypnutí stroje je nazýván stop stroje.

V jakémkoliv okamžiku může nastat stav error, který bude zobrazen na řídicím panelu a řídicí systém na něj dle jeho závažnosti adekvátně zareaguje.

4.3 Volba programovacích prostředků

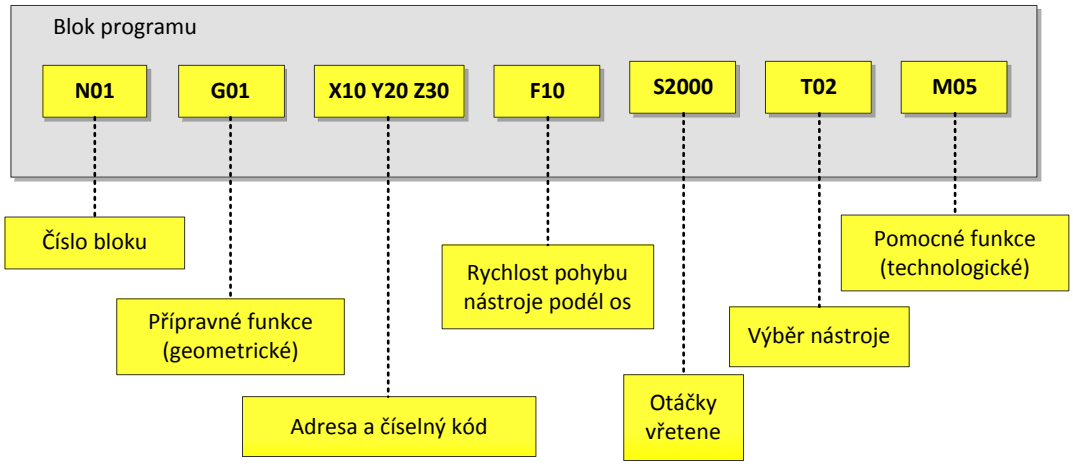
Průmyslový robotický systém lze programovat mnoha způsoby. Každý výrobce v dnešní době využívá vlastního programovacího jazyka a rozhraní. Tato rozhraní jsou vybavena simulačními nástroji, které umožňují offline programování manipulátoru z počítače. Manipulátory bývají vybaveny panely (pendanty), které jsou spojeny kabelem nebo bezdrátově s řídicí jednotkou a je možné je přepínat mezi režimem pro řízení a programováním manipulátoru. Pří programování pomocí panelu je koncový efektor uváděn do žádaných poloh pomocí joysticku a ty jsou následně ukládány. Pro velmi přesné aplikace se také využívá učení manipulátoru, kdy koncový efektor programátor drží v rukou a vede ho po požadované trajektorii.

Hlavními požadavky na programovací jazyk průmyslového manipulátoru je existence instrukcí pro jednoduché zadávání trajektorie. Dalším požadavkem je možnost pomocí instrukcí stejného jazyka ovládat různé koncové efektory manipulátoru.

Protože řešený manipulátor je inspirován CNC obráběcím strojem, byl vybrán jako vhodný univerzální programovací jazyk G-kód

4.3.1 G–kód

Programovací jazyk G-kód je dán ISO standardem 6983 [11], který definuje způsoby programování počítačem řízených číslicových obráběcích strojů. Program v G – kódu se skládá z bloků (vět). Jednotlivé bloky mohou obsahovat číslo bloku pro jeho jednoznačnou identifikaci, příkazy pro pohyb nástroje, jeho volbu a nastavení rychlosti. Jednotlivé implementace jednotlivých výrobců se mohou drobně lišit v podporovaných funkcích, základní schéma bloku je ale stejné.



Obrázek 7 Ukázka bloku programu v G–kódu.

Přípravné funkce (Preparatory function) určují způsob pohybu, vždy začínají písmenem G a jsou bezrozměrné. Přípravných funkcí je definována necelá stovka. Pomocí nich lze vybírat například mezi rychloposuvem bez obrábění (na CNC známým pod názvem Rapid), lineárním nebo interpolovaným pohybem po kružnici. Přípravné funkce jsou rozděleny do několika skupin. Funkce v těchto skupinách spolu souvisí a v jednom bloku je lze použít pouze jednou.

Dalším slovem v bloku kódu je adresa a číselný kód. Adresa určuje v jaké ose se bude pohyb provádět a číselný kód udává velikost posunu. Posun může být zadáván přírůstkově nebo absolutně (volí se přípravnou funkcí).

Pro nastavování rychlosti pohybů slouží funkce F (feed rate), jednotkou jsou metry za minutu. Podobný význam má i funkce S (spindle fiction), nastavuje otáčky za minutu obráběcího nástroje

Je-li manipulátor vybaven více nástroji, lze mezi nimi vybírat pomocí T funkce (Tool function). Poslední kategorií funkcí jsou pomocné funkce, které jsou značeny písmenem M (Miscle function) a slouží pro řízení chodu programu a ovládání příslušenství obráběcího stroje.

5 Struktura řídicího software

Strukturu řídicího softwaru definují požadavky na řízení, použitý hardware a zvolený způsob zadávání pohybových instrukcí (G–kód).

Navrhovaná struktura stejně jako hardwarová struktura je modulární. Modulární řešení řídicího programu umožňuje využití dostupných softwarových řešení. Další výhodou modulárního systému je snadná úprava aplikace. Výměnou jednoho modulu je možné změnit např. způsob zadávání instrukcí manipulátoru nebo reagovat na změnu použité sběrnice.

Řídicí systém je rozdělen do tří modulů: komunikační modul, modul obstarávající řízení a modul pro uživatelské vstupy. Komunikační modul a modul pro řízení je dodáván společností Maxon motor ve formě hotového řešení pro embedded systém cRIO s názvem NI SoftMotion Axis Interface for EPOS2 Positioning Controller-maxon motor (EPOS2 SoftMotion. Univerzální modul pro zpracování G-kódu, není v současnosti k dispozici, proto je realizován jako projekt pro více bakalářských prací. Na projektu se podílí autoři jednotlivých prací a Ing. Pavel Houška, Ph.D.

Přestože Maxon dodává modul pro komunikaci a řízení jako jedno řešení, je k nim přistupováno jako ke dvěma modulům, protože obstarávají odlišné činnosti a běží na jiné části embedded systému.

5.1.1 Komunikační modul

Komunikační modul je součástí řešení EPOS2 SoftMotion. Je naprogramovaný v grafickém prostředí LabVIEW a je určený pro FPGA systému cRIO. Funkcí modulu je zprostředkování komunikace mezi jednotkami EPOS2 a samotným řídicím modulem. Komunikace je postavená na sběrnici CAN a využívá nadstavby CANopen.

Modul zastává pouze transportní úlohu, data generovaná řídicími jednotkami EPOS2 nebo realtimovým systémem nijak neupravuje, pouze vysílá a přijímá. Data jsou ukládána do dvou oddělených front v paměti FPGA, kde čekají na odvysílání nebo vyčtení řídicí aplikací. ID cílového uzlu každé zprávy je před odesláním kontrolováno, zda leží v definovaném adresním prostoru, pokud ne, modul vygeneruje chybu. Další chyby, které předává řídicímu modulu, jsou chyby při selhání procesu odesílání a selhání sběrnice.

Data pro ovládání manipulátoru jsou přenášena pomocí PDO objektů. Použitá PDO komunikace je realtimová, nepotvrzovaná a probíhá synchronně. Synchronizace je řešena pomocí SYNC objektů zasílaných hlavní řídicí jednotkou generovaných na realtimovém systému. Jednotlivé PDO objekty vzniknou „namapováním“ SDO objektů do slovníku objektů uloženém v každé jednotce EPOS2. SDO objekty jsou jednoznačně určeny pomocí indexu a subindexu. Priority SDO a PDO objektů nejsou stejné. SDO objekty mají nižší prioritu a slouží pro konfiguraci zařízení, kde je s výhodné využít potvrzovanou komunikaci.

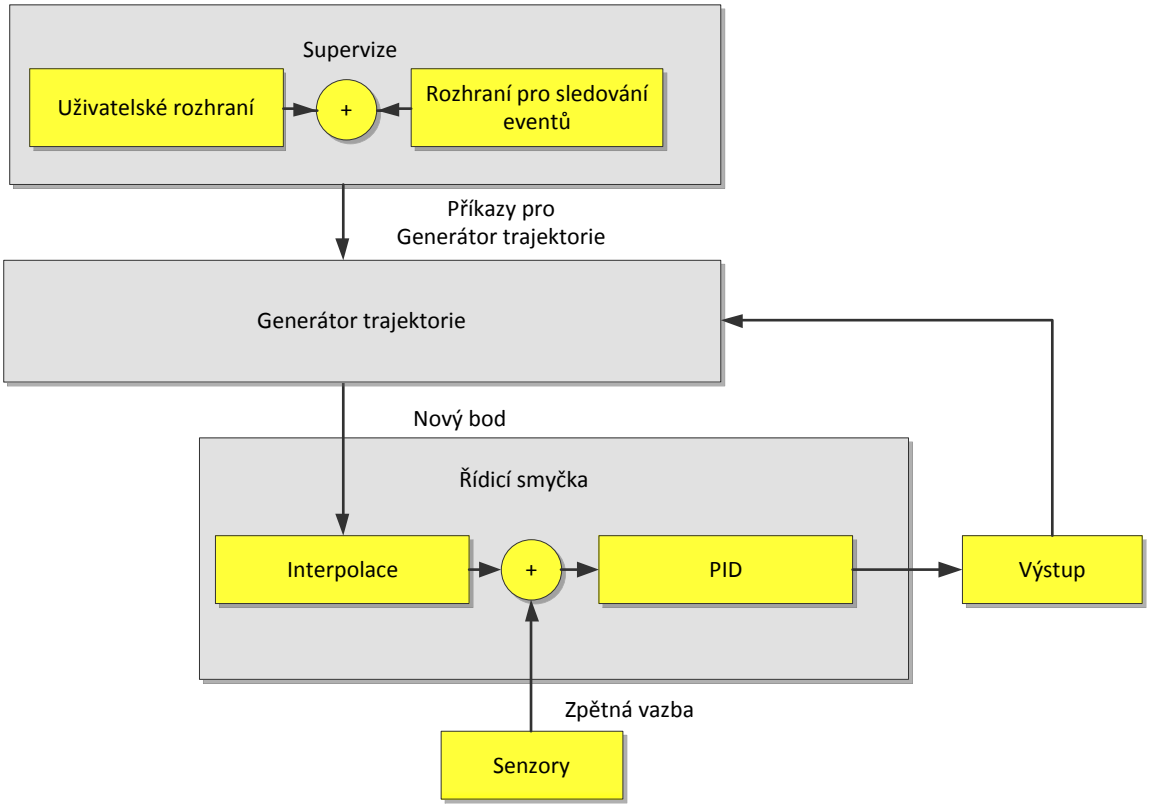
COD-ID	0x600 + node ID	0x601	0x580 + node ID	0x581
Datový byte 0	Datový byte 0	40	Datový byte 0	4b
Datový byte 1	Index nejnižší byte	fb	Index nejnižší byte	fb
Datový byte 2	Index nejvyšší byte	60	Index nejvyšší byte	60
Datový byte 3	Subindex	01	Subindex	01
Datový byte 4	Rezervovaný byte	0	Hodnota nejnižší byte	99
Datový byte 5	Rezervovaný byte	0	Hodnota nejvyšší byte	01
Datový byte 6	Rezervovaný byte	0	Rezervovaný byte	0
Datový byte 7	Rezervovaný byte	0	Rezervovaný byte	0

Tabulka 2 SDO komunikace zachycená osciloskopem. Server zjišťuje P složku PID regulátoru a klient odpovídá.

V tabulce 7 je znázorněna SDO komunikace zachycená osciloskopem při kontrole funkčnosti komunikace mezi řídicím modulem a jednotkou EPOS2. Zda jde o komunikaci ve směru server-klient nebo klient-server určuje COD–ID. COD-ID se skládá z předpony a node ID. Předpona určuje směr komunikace. Pro směr server-klient je předpona 0x600, pro opačný směr je to 0x580. Node ID určuje klienta, který zprávu vysílá nebo přijímá. Další důležitý byte je datový byte 0, z něhož lze určit mimo jiné, zda se jedná o čtení nebo zápis. Dalšími informacemi v datovém bytu 0 jsou délka zprávy a údaj o tom, zda jde o dotaz nebo odpověď. Další tři byty definují objekt pomocí indexu a subindexu, za nimi pak následují požadované hodnoty nebo prázdné (rezervované) byty. Všechny hodnoty jsou po CANu přenášeny v hexadecimální podobě ve formátu little-endian.

5.1.2 Řídicí modul

Řídicí modul je druhou částí řešení dodávaného firmou Maxon. Tento modul je určený pro realtimový systém a je založený na modulu LabVIEW NI SoftMotion Module (SoftMotion). SoftMotion je určený pro řízení polohy, rychlosti a krouticího momentu točivých a lineárních pohonů víceosých systémů. [12] Funkcí modulu je řídit celý robotický systém. Modul zpracovává uživatelské vstupy, výstupy z enkodérů a referenčních snímačů polohy. Na základě těchto dat generuje trajektorii koncového efektoru manipulátoru, kterou předává jednotkám EPOS2.



Obrázek 8 Schéma modulu LabVIEW NI SoftMotion.

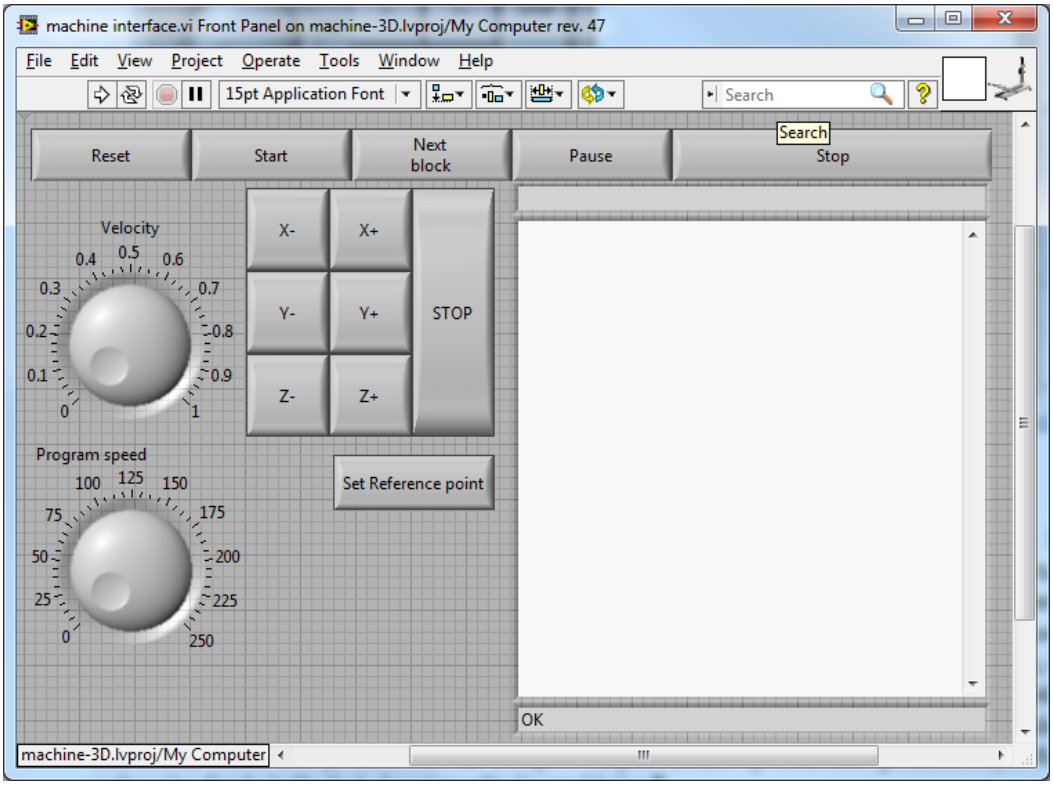
Víceosé systémy se v SoftMotionu definují pomocí os (pohonů), které se sdružují do souřadných systémů. Pro jednotlivé osy je k dispozici konfigurační rozhraní, v němž lze specifikovat parametry pohonu, enkodéru, digitálních I/O a interpolací. Modul od Maxonu pro generování trajektorie je oproti modulu od NI rozšířený o knihovnu pro práci s CANopen. Maxon vytvořil vlastní knihovnu pro komunikaci po sběrnici CAN, která je určená pro řídicí jednotky EPOS2. Knihovna obsahuje nástroje pro network management, synchronizaci, servisní a procesní komunikaci. Po zadání příkazu je vytvořen patřičný komunikační rámec a je předán do fronty v paměti FPGA.

Zadávání trajektorie umožnují Express VI pro pohyby po přímce, kružnici nebo křivce. Expres VI vytvoří ze vstupů novou PVT (Position, Vellocity, Time) trojici. Tato trojice je zaslána do řídicí jednotky pro danou osu, jednotka EPOS2 může v paměti uchovat až 64 PVT trojic, přičemž regulace je na kartě vzorkována na frekvenci 1kHz.

5.1.3 Rozhraní řídicího systému

Interface řídicího systému se skládá ze dvou hlavních částí ovládacího panelu a parseru G-kódu. Obě části běží na PC. Ovládací panel je inspirován panely používanými na CNC strojích. Panel umožňuje manuální řízení manipulátoru, spouštění a tvorbu uživatelského programu.

Parser G-kódu slouží pro zpracování uživatelského programu. Panel funkci parseru integruje pomocí editoru kódu, který disponuje základními funkcemi pro práci se soubory (otevírání, ukládání, vytváření nového souboru).



Obrázek 9 Ovládací panel robotického systému.

Parser postupně načítá z instrukčního souboru jednotlivé řádky a hledá implementované funkce z G-kódu. Narazí-li na prázdný řádek nebo komentář, je takový řádek ignorován a parsování pokračuje na dalším řádku. Při parsování se vyhledávají znaky uvozující funkce G-kódu. Daný znak je rozpoznán a funkci je přiřazena hodnota následující za znakem. Nalezené funkce i s hodnotami jsou ukládány do bloku kódu, který je předán řídicímu systému. Ten následně z bloků generuje trajektorii koncového efektoru. Jeli na řádku znak nebo číselná hodnota mimo definované rozsahy, parsování kódu je ukončeno a uživatel je informován o chybě. Chybu může vyvolat také použití stejné funkce nebo více funkcí z jedné skupiny v jednom bloku.

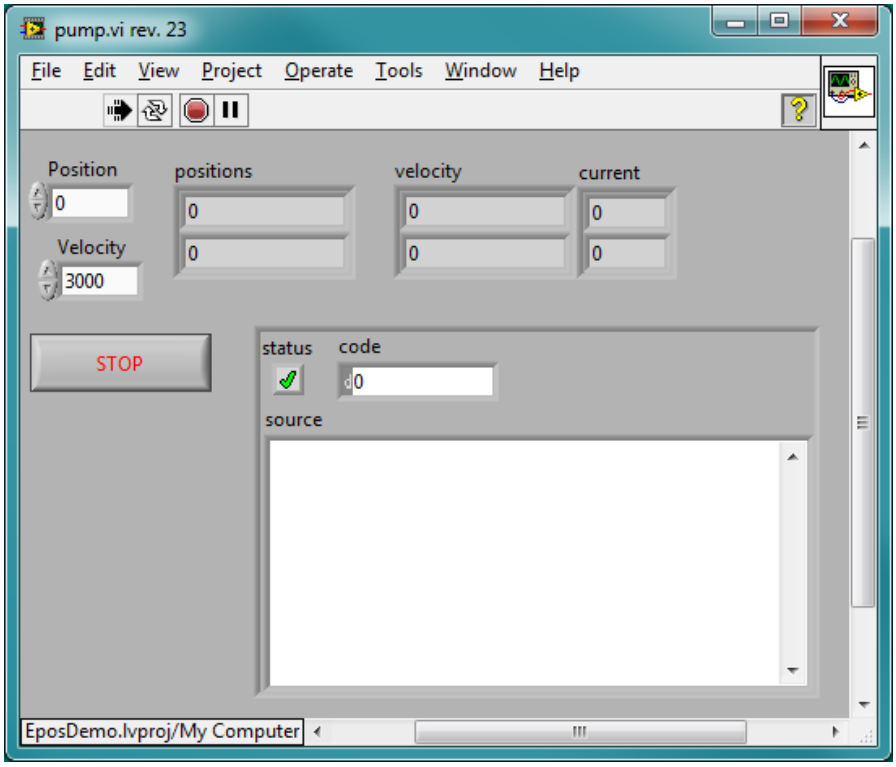
Pro kontrolování rozsahů a parametrů disponuje rozhraní řídicího systému několika clustery pro definování daných parametrů. Tyto parametry jsou pak srovnány s uživatelskými výstupy během řízení manipulátoru. Pro zvýšení univerzálnosti by bylo výhodné napojit tyto clustery do konfiguračního rozhraní jednotlivých os v EPOS2 SoftMotionu.

6 Realizace

Realizace řídicího systému byla rozdělena do několika etap: testování hardwarových a softwarových modulů, programování parseru G-kódu a rozhraní pro spolupráci mezi jednotlivými moduly.

Testování jednotek Maxon EPOS2 probíhalo pro každý z pohonů jednotlivě. K pohonu byl vždy připojen setrvačník. Na jednotkách byl laděn PID regulátor a kontrolována komunikace. Pro tyto účely byla využívána CAN karta pro PC a dodávaný software EPOS Studio. Během testování nebylo z dodávaného softwaru transparentní, jak komunikace funguje, a jaké objekty jsou po sběrnici kartě zasílány. Za tímto účelem byla komunikace kontrolována pomocí osciloskopu a následně analyzována. Ukázka zaznamenaných dat viz Tab. 2. Na základě získaných dat byly ověřeny informace uváděné v dokumentaci.

V rámci testování jednotek Maxon EPOS2 byla realizována aplikace pro řízení experimentálního sinusového čerpadla využívající elektronického hřídele. Aplikace byla řešena pomocí dvou jednotek EPOS2 komunikujících po sběrnici CAN s PC. V aplikaci bylo nutné synchronizovat natočení a úhlovou rychlost obou motorů.



Obrázek 10 Rozhraní aplikace pro řízení sinusového čerpadla.

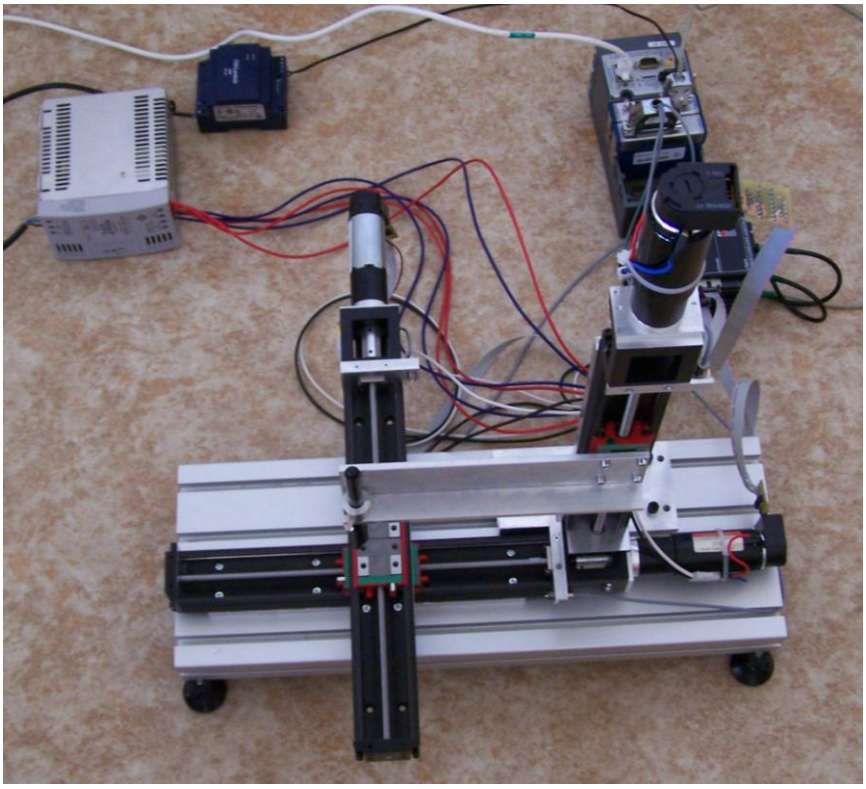
Paralelně s testováním jednotek EPOS2 probíhala tvorba parseru G-kódu. Na parseru jsem se podílel na implementaci jednotlivých funkcí G-kódu a chybových stavů parsování. Implementovány jsou funkce zmíněné v kapitole 4.3.1 G-kód. Chybové stavy parseru vznikají při odhalení nedefinované funkce v uživatelském programu nebo zadáním hodnoty mimo povolený rozsah pro daný robotický systém.

G-kód	Skupina	Funkce
G00	01	Rychloposuv
G01	01	Lineární interpolace
G02	01	Kruhová interpolace ve směru hodinových ručiček
G03	01	Kruhová interpolace proti směru hodinových ručiček
G04	00	Klidová doba nástroje (zastavený pohyb v osách X, Y, Z)
G17	02	Rotační pohyb v rovině XY
G18	02	Rotační pohyb v rovině YZ
G19	02	Rotační pohyb v rovině ZX
G20	06	Zadávání rozměrů v metrických údajích
G21	06	Zadávaní rozměrů v palcích
G28	00	Nastavení nulového bodu
G40	07	Zrušení kompenzace rádiusu nástroje
G41	07	Kompenzace rádiusu nástroje-levá
G42	07	Kompenzace rádiusu nástroje-pravá
G43	08	Kompenzace šířky nástroje-kladná
G44	08	Kompenzace šířky nástroje-záporná
G49	08	Zrušení kompenzace šířky nástroje
G90	03	Absolutní zadávání polohy
G91	03	Přírůstkové zadávání polohy

Tabulka 3 Přehled implementovaných přípravných funkcí v parseru.

Dalším krokem byla kontrola použitelnosti generátoru trajektorie, postaveném na modulu EPOS2 SoftMotion, určeného pro cRIO. Daný modul musel být upraven, protože v dodávaném stavu měl nesprávně navržené knihovny a nebylo možné docílit spuštění programu bez chyb vzniklých na základě poškozených závislostí. Po opravě bylo možno modul používat.

Aktuální řešení řídicího systému je realizováno pomocí CAN karty pro PC s využitím knihovny firmy Maxon, protože je tato metoda jednodušší pro vyzkoušení provozu plně sestaveného manipulátoru. Manipulátor je v aktuální konfiguraci osazen popisovačem. Tato konfigurace simuluje CNC frézku.



Obrázek 11 Sestavený řešený manipulátor.

7 Závěr

V rámci práce byly řešeny problémy související s řídicím systémem kartézského manipulátoru. Práci je možno rozdělit na několik provázaných částí, které se zabývají obecnou problematikou, výběrem softwarových a hardwarových modulů, návrhem a realizací řídicího systému.

Obecná část práce definuje kartézský manipulátor z pohledu norem, mechaniky a možností jeho využití.

V následujících kapitolách je stanoven návrh struktury řídicího systému s využitím dostupných modulů. Hardware v konfiguraci master-slave je tvořen embedded systémem cRIO (master) a řídicími jednotkami Maxon EPOS2. Komunikace mezi jednotkami EPOS2 řídicími jednotlivé pohony a systémem cRIO je úspěšně realizována sběrnicí CAN s nadstavbou CANopen. Ověření funkčnosti proběhlo pomocí aplikace pro řízení sinusového čerpadla s využitím elektronického hřídele.

Software řídicího systému jsem rozdělil do tří modulů: komunikační modul, řídicí modul a modul uživatelského rozhraní. Návrh softwaru byl ovlivněn požadavky na CNC obráběcí stroj. Z toho důvodu byl do řídicího panelu integrován modul pro parsování G-kódu. Zadávání trajektorie v G-kódu umožňuje automatické řízení manipulátoru pomocí instrukcí uložených v souboru s uživatelským programem. Parser jakožto univerzální platforma pro řízení manipulátorů vyvíjen jako společný projekt více řešitelů VŠKP a Ing. Pavla Houšky, Ph.D byl dotažen do plně funkčního stavu.

Stávající realizace řízení nevyužívá navrhovaný modul NI SoftMotion Axis Interface for EPOS2 Positioning Controller-maxon motor, ani systém cRIO, ale CAN kartu pro PC, na kterém běží kompletní řídicí systém postavený na knihovnách od společnosti Maxon. Odklon od původního návrhu byl způsoben časovým zpožděním, které vzniklo při upravování knihovny u dodávaného modulu do funkčního stavu. Tím pádem nebylo realizováno ani řešení přesnosti polohování, protože tento problém měl být řešen pomocí daného modulu. Ten ve spojení s G-kódem poskytuje značné možnosti v interpolaci trajektorie a kompenzacích koncových efektorů.

Do budoucna je v plánu dokončit řízení manipulátoru pomocí zmíněného modulu pro generování trajektorie. Pomocí takto řízeného manipulátoru by šlo vytvořit jednoduchou 3D tiskárnu nebo osazovací automat pro SMD součástky.

8 Seznam použité literatury

[1] ČSN EN ISO 8373. Manipulační průmyslové roboty: Slovník. Praha: ÚNMZ, 1998.

[2] ČSN EN ISO 10218-1. Roboty a robotická zařízení: Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů -Část 1: Roboty. Praha: ÚNMZ, 2011.

[3] SKAŘUPA, Jiří. Průmyslové roboty a manipulátory. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2007. ISBN 978-80-248-1522-0.

[4] Siplace DX-Series: Facts. Siplace[online]. [cit. 2012-04-04]. Dostupné z:http://www.siplace.com/14502/Products/Placement-Systems/SIPLACE-DX-Series/Facts/aud_tabstrip.aspx

[5] MAXON MOTOR. Program 2008/09[Katalog]. 2008 [cit. 2012-05-21].

[6] MAXON MOTOR. Program 2010/11[Katalog]. 2010 [cit. 2012-05-21].

[7] EPOS2 24/5. Maxon motor USA[online]. 2009 [cit. 2012-05-08]. Dostupné z:http://www.maxonmotorusa.com/media_releases_EPOS2-24-5.html

[8] National Instruments[online]. [cit. 2012-05-20]. Dostupné z:http://sine.ni.com/cms/images/casestudies/pqaenancc.jpg?size

[9] EPOS2 24/5, Digital positioning controller, 5 A, 11-24 VDC: Article number 367676. Maxon motor[online]. [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://www.maxonmotor.com/maxon/view/catalog/

[10] CAN history. CAN in Automation[online]. [cit. 2012-05-06]. Dostupné z:http://www.can-cia.de/index.php?id=systemdesign-can-history

[11] PFEIFFER, Olaf, Andrew AYRE a Christian KEYDEL. Embedded networking with CAN and CANopen.San Clemente: RTC Books, 2003, 537 s. ISBN 09-293-9278-7.

[12] MAXON MOTOR. EPOS2 Application Notes Collection. 2011, 218 s.

[13] ISO 6983-1:1982. Numerical control of machines: Program format and definition of address words -Part 1 : Data format for positioning, line motion and contouring control systems. Washington: ANSI,2007.

[14] NI SoftMotion: Create Your Custom Motion Controller on Any Platform with LabVIEW. NationalInstrumets[online]. 2009 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://www.ni.com/white-paper/3723/en