VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

FTC ŘÍZENÍ PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ A JEHO APLIKACE V OBLASTI BROUŠENÍ

FTC CONTROL IN CONNECTION WITH INDUSTRIAL ROBOTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. MARTIN MIMOCHODEK

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. TOMÁŠ KUBELA

SUPERVISOR

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Martin Mimochodek

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Výrobní stroje, systémy a roboty (2301T041)**

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 diplomové práce:

FTC řízení průmyslových robotů a jeho aplikace v oblasti broušení

v anglickém jazyce:

FTC Control in connection with industrial robots

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem je seznámit se s možnostmi silomomentového řízení (FTC) průmyslových robotů Kuka a vytvořit prakticky orientovanou demonstrační aplikaci.

Cíle diplomové práce:

(1) Seznamte se s využitím silomomentového řízení (FTC), jeho výhodami a nevýhodami. Vyhotovte také rešerši možných druhů FTC, které jsou v současné době dostupné na trhu.
(2) Seznamte se s FTC senzorem Schunk FTC 50. Jeho vlastnostmi a možnostmi komunikace s průmyslovými roboty Kuka.
(3) Vytvořte demonstrační aplikaci na průmyslovém robotu Kuka KR 15-2. Zaměřte se především na možnosti broušení malých zakřivených ploch pomocí stacionárně umístěné brusky a průmyslového robotu.

Seznam odborné literatury:

[1] L. Sciavicco, B. Siciliano: Robotics Modelling, Planning and Control. Springer London, 2008
[2] PIRES, J. N. Industrial Robots Programming: Building Applications for the Factories of the Future. Springer, 2007. 282 s. ISBN 978-0-387-23325-3
[3] WOLF, A., STEINMANN, R. SCHUNK, H. Grippers in Motion: The Fascination of Automated Handling Tasks. Springer, 2005. 242 s. ISBN 978-3-540-27718-7

Vedoucí diplomové práce: Ing. Tomáš Kubela

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 26.11.2009

L.S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D. Ředitel ústavu	doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc. Děkan fakulty

Anotace

Diplomová práce pojednává obecně o silomomentovém řízení a dokončovací technologii broušení s využitím průmyslového robota.
Práce obsahuje rozdělení silomomentových senzorů dostupných na trhu. Praktická část se zabývá komunikací a propojením silomomentového senzoru SCHUNK FTC 050-80 s PLC Beckhoff CX 1100 a průmyslovým robotem KUKA KR3. V praktické části je dále řešen jednoduchý model broušení, konkrétně řízení brusné síly v závislosti na pohybu robota.

Klíčová slova:

Silomomentové řízení, robotické broušení, SCHUNK FTC 050-80,RS-232

Annotation

This diploma thesis deals with a conception of force-torque control of industrial robot applied on a finishing technology of grinding. This work includes a classification of various force-torque sensors currently available on the market.
The practical part of this thesis deals with a setting-up of communication and connection among the force-torque sensor SCHUNK FTC 050-80, PLC Beckhoff CX and industrial robot KUKA KR3. Practical part is further focused on a simple model of grinding, especially the grinding force control in relation to the robot movement.

Key words:

Force/torque control, robotic grinding, SCHUNK FTC 050-80, RS-232

Bibliografická citace mé práce:

MIMOCHODEK, M. FTC řízení průmyslových robotů a jeho aplikace v oblasti broušení. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Kubela.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně pod vedením ing. Tomáše Kubely s užitím uvedených literárních a internetových zdrojů.

……

V Brně dne 28.5.20 Bc.Martin Mimochodek

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Tomáši Kubelovi za podporu, konzultace a věnovaný čas.

OBSAH

1. Úvod 8
2. Robotizované dokončovací technologie broušení 9
2.1 Vývoj robotizovaných dokončovacích technologií 9
2.2 Praktické příklady použití dokončovacích operací 11
3. FTC snímání 13
3.1 Tenzometry 13
3.1.1 Fóliové a drátkové tenzometry 13
3.1.2 Polovodičové tenzometry 14
3.2 FTC senzory 16
3.2.1 Tenzometrické FTC senzory 17
3.2.2 Optoelektronický snímač – Schunk FTC 050-80-V 18
3.3 Sandia FTC senzor 20
3.4 Zdokonalení konstrukce FTC senzoru 20
3.5 Volba vhodného FTC senzoru 22
4. FTC řízení 23
4.1 Způsoby FTC řízení 23
4.2 Struktury FTC řízení 23
4.3 Obecné výhody FTC řízení : 25
4.4 Příklady použití FTC řízení 26
5. Praktická část 28
5.1 Navrhovaná koncepce řešení FTC řízení 28
5.2 Volba robotu 28
5.3 Praktický experiment 30
5.3.1 Varianta 1 31
5.3.2 Varianta 2 32
5.4 Regulace FTC řízení 33
5.5 Komunikace mezi bloky FTC řízení 34
5.6 PLC – Programovatelný logický automat 36
5.7 Software TwinCAT 37
5.8 KRL – Kuka Robot Language 37
5.9 Princip funkce praktické úlohy 38
5.10 Vývojový diagram broušení 41
6. Závěr 43
7. Literatura a zdroje 44
8. Příloha 46
8.1 Program 46
8.2 Přehled FTC senzorů 50
8.3 Fotografie praktické úlohy 57

1. Úvod

Dnešní produkce v oblastech strojírenství, elektrotechniky, ale i jiných odvětvích průmyslu je provázena stále zvyšujícími se nároky na pružnost, konkurenceschopnost, rychlost, přesnost výroby, apod. Ve výrobních programech se proto začíná prosazovat tzv. výroba flexibilního výrobního systému (Flexible Manufacturing System). Typickým příkladem vybavení flexibilního výrobního systému jsou průmyslové roboty a manipulátory. Vlastně flexibilita je hlavním důvodem pro zavedení robotů do výrobních procesů. Vedle rozsáhlých pružných výrobních systémů lze v budoucnu očekávat přechod k menším multitechnologickým automatizovaným celkům.
Důležitý vliv na rozsah uplatnění jednotlivých technologií má spotřeba energie a využití materiálu. Průmyslové roboty se tak postupně stávají rovnocennými partnery výrobních strojů, přičemž ve velkém rozsahu přebírají i množství jejich funkcí. Konstrukce a řízení průmyslových robotů se stále zdokonaluje, čímž se zvyšují možnosti využití. Nejrozšířenější aplikací v automatizované výrobě tak zůstává robotické svařování. V poslední době se však do popředí zájmu dostávají taky dokončovací technologie s využitím průmyslových robotů.
V tomto rámci úloha průmyslového robota většinou vyžaduje interakci s okolním prostředím. Nástroj robotu vzájemně fyzicky působí silou na obrobek nebo jeho povrch. Vzniklé působící síly závisí na tuhosti této soustavy nástroje/obrobek a měly by být vhodným způsobem řízeny.
FTC (silomomentové) snímání je dnes důležité v mnoha aplikacích průmyslové robotiky a automatizace.

Tato práce je zaměřena na FTC řízení v aplikacích broušení, možnosti aktivního řízení průmyslového robotu. V praktické aplikaci je použit průmyslový robot s připojeným FTC senzorem a řídící jednotkou.

2. Robotizované dokončovací technologie broušení

Všechny způsoby výroby vyžadují jednu či více dokončovacích operací výroby, tedy úkony, které jsou často prováděny manuálně. Tento trend může přitom výrazně zvyšovat výrobní náklady a snižovat výkonnost. Je obzvláště kritické, pokud ostatní operace výroby jsou automatizovány. Proto se v poslední době stále častěji používají průmyslové roboty jako prostředky automatizovaných dokončovacích operací. Většina takových robotizovaných systémů je vybavena standardním šestiosým ramenem s koncovým efektorem na odstraňování materiálu např. lapovací/brousící nástroje, brousící kotouče, pásy, atd., nebo robot přímo manipuluje s obrobkem vůči pevně ustavenému obráběcímu stroji.

Dokončovací robotizované technologie se dají rozdělit na :

- těžké operace (např. odstraňování otřepů, návarů)
- lehké operace (např. lapování, leštění,…)

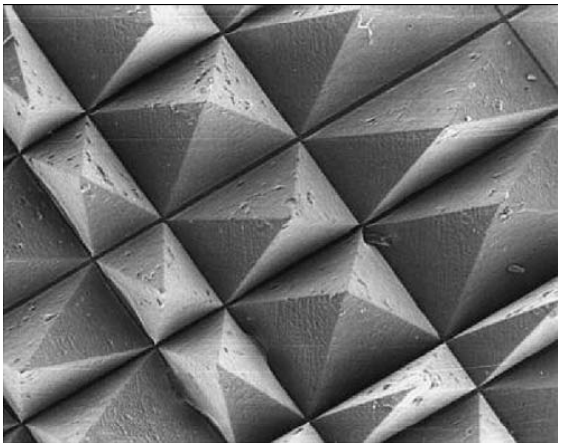
Průmyslové roboty se používají ve středně a vysoko objemové produkci, kde hraje zásadní roli stav povrchu produktu např. v automobilovém průmyslu, ve výrobě např. turbínových lopatek, lékařských implantátů, výkovků a odlitků. Dokončovací technologie lze využít u všech druhů materiálů (železné a neželezné kovy, keramika, ale třeba i beton).

2.1 Vývoj robotizovaných dokončovacích technologií

Použití robotů představuje poslední fázi v procesu automatizace dokončovacích operací :

1. fáze (1950 – 1970) Jednoduché systémy strojů typu dopravník + větší počet dokončovacích hlav
2. fáze (1970 – současnost) Použití CNC
3. fáze (současnost) Použití průmyslových robotů

Robotické dokončovací metody se v dnešní době dostávají do popředí hlavně díky vhodnosti tohoto druhu automatizace, cenové výhodnosti a technologickému vývoji.
Mezi hlavní výhody taky patří polohování pohybu v 6 osách, manipulace tvarově složitých obrobků vážících až 450 kg a stálé zdokonalování abrazivních dokončovacích technologií.
V poslední době se stále častěji používají abrazivní materiály brousících pásů, které využívají přesné uspořádaných jehlanovitých mikroskopických částic (obrázek 1). Mezi výhody používání těchto materiálů patří zejména zvýšení životnosti brusného pásu, čímž se snižuje cenová náročnost dokončovací metody.



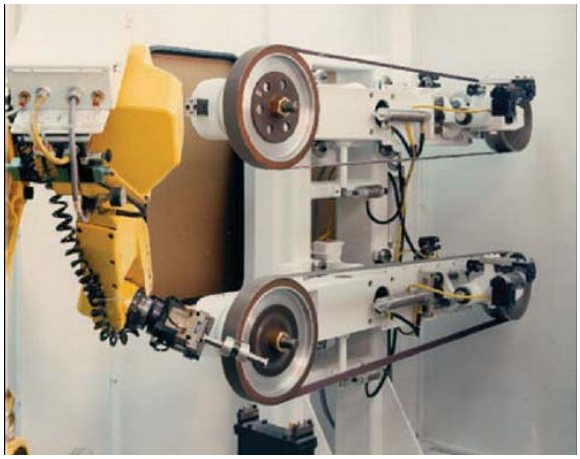
Obrázek 1 – mikroskopická struktura moderních brusných pásů[2]

Robotizované dokončovací buňky mohou běžně používat a sekvenčně kombinovat až 8 samostatných dokončovacích nástrojů typu např.:

- brusné pásy
- lamelové kotouče
- drátěné kotouče
- syntetické a leštící kotouče, atd.

Robot může taky zaujímat funkci paletizace, manipulace s materiálem nebo ukládání komponent, apod. v rámci procesu dokončovací operace.

Robotické buňky svými vlastnostmi tvoří přechod mezi flexibilitou člověka a středně objemovou výrobu CNC buněk. Z tohoto důvodu není vhodné využít roboty pro všechny případy dokončovacích technologií – robotické systémy obvykle nedosahují takové produkce jako vícevřetenové CNC stroje nebo dokončovací linky.
Obrázek 2 zachycuje multi-head provedení robotické buňky, která sdružuje větší počet dokončovacích technologií. Broušení tak může být v kombinaci s následující povrchovou úpravou – leštěním, čímž se produktivita částečně zvyšuje.



Obrázek 2 – multi-head provedení robotické buňky[2]

2.2 Praktické příklady použití dokončovacích operací

Výrobci kloubních náhrad a implantátů v poslední době stále častěji využívají šestiosé průmyslové roboty k brousícím a leštícím operacím. Tyto ortopedické implantáty jako např. umělé kolena nebo kyčelní klouby jsou vyráběny z vysokopevnostních biokompatibilních materiálů (chrom-kobalt, titan, zirkonium, atd.) vyžadujících precizní opracování povrchů. Veškeré nerovnosti totiž mohou způsobit nadměrné opotřebení nebo dokonce poškození.
Technologie broušení a leštění s využitím robotů je v dnešní době na úrovni, kdy kombinuje úběr materiálu kontury a přesné broušení s výsledným vysoce lesklým povrchem implantátů (obrázek 3). Mezi další výhody patří:

- zvýšení produktivity
- zvýšení životnosti nástroje použitím strukturovaných abrazivních materiálů, čímž se sníží počet dokončovacích operací.
- Jeden průmyslový robot může v této aplikaci nahradit až 15 pracovníků

Obrázek 3 – kloubní implantát[2]

Dalším příkladem precizního dokončování s využitím robotů jsou turbínové lopatky (obrázek 4) používající se v leteckém, kosmickém nebo energetickém průmyslu. Výroba vyžaduje jemné obroušení profilu, na němž se vyskytuje řada nerovností po předešlém kování nebo CNC obrábění. Úběr materiálu pomocí robotizovaného řízení eliminuje tyto nedokonalosti povrchu, který po opracování dosahuje drsnosti Ra1,6-2 µm.

Obrázek 4 – turbínová lopatka[2]

Turbínové lopatky složitého tvaru s malými rádiusy a zápornými úhly bývá při opracování často obtížným úkolem, vyžadující přesné dodržení komplexní trajektorie a použití malých nástrojů s častou výměnou. Dalším důležitým požadavkem je rychlost provedení procesu broušení z důvodu tepelné dilatace součásti, která může negativně působit na požadované tolerance obrobku. Z těchto důvodů je vhodnější využívat robotizovaný úběr materiálu, který eliminuje problémy (vysoká zmetkovost) vyskytující se při manuálním opracování.
Dokončování technologie s využitím průmyslových robotů dnes nacházejí uplatnění nejen ve speciálních aplikacích, jak již bylo uvedeno, ale taky ve výrobě levných spotřebních produktů. Příkladem může být britská firma Franke Sissons Ltd, která využívá šestiosé průmyslové roboty k broušení a leštění sanitárních nádob (obrázek 5) Zavedením robotů do výroby se tak výrazně snížily dokončovací časy.

Obrázek 5 – broušení sanitárních nádob[2]

Obrázek 6 – broušení kuchyňských nožů[2]

Vývoj dokončovacích technologií s využitím robotů se v poslední době zaměřuje na robotické vidění, laserové technologie, automatickou kompenzaci opotřebení nástroje a FTC (silomomentové) řízení. Zejména FTC řízení nachází uplatnění ve všech dosud uvedených brousících operacích, kdy kontaktní síla mezi nástrojem a obrobkem představuje jeden z hlavních parametrů tohoto způsobu obrábění.[2]

3. FTC snímání

Existuje více způsobů měření kontaktních sil. Z praktického hlediska s užitím FTC senzorů se však užívají pouze dva základní:

a) Podmínka rovnováhy dvou sil, z níž jedna je známá (referenční) a druhá se získá z podmínky rovnováhy
b) Stanovení pohybových parametrů na základě známé hmotnosti od neznámé síly.

Způsob B není jednoduchý a je náročné vyrobit senzory, které jsou založeny na takovém principu. Metoda se používá např. v astronomii nebo nukleárních aplikacích.

Způsob A je nejpoužívanější, i když přímá přeměna síly na elektrický signál není možná. Existuje několik fyzikálních principů, které jsou schopny získat elektrický signál z neznámé síly:

- tenzometrický
- magneto-elastický
- piezoelektrický
- piezo-odporový
- elektromagnetický, atd.

V aplikacích průmyslové robotiky se FTC senzory umísťují blízko pracovního nástroje, obvykle v zápěstí manipulátoru. To znamená, že senzor musí mít požadované rozměry, kapacitu a různé výrobní velikosti pro snadnější instalaci na různé druhy průmyslových robotů. Z těchto důvodů jsou nejrozšířenější tenzometrické senzory.[3, 4]

3.1 Tenzometry

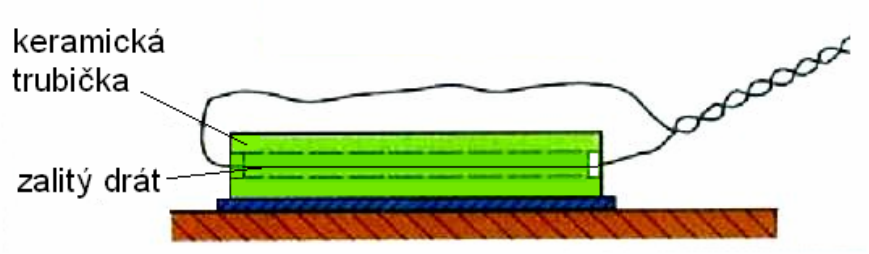
Obecně se tenzometry rozdělují podle typu snímacího elementu :

- drátkové tenzometry
- fóliové tenzometry
- vrstvové – polovodičové tenzometry

Tenzometrická čidla patří do skupiny odporových snímačů. Používají se k měření deformací u staticky nebo dynamicky namáhaných součástí, konstrukcí, atd.

3.1.1 Fóliové a drátkové tenzometry

Fóliové a drátkové tenzometry pracují na principu změny délky v závislosti na působícím napětí. Při změně délky tenzometru se mění taky elektrický odpor snímacích elementů. Materiálem elementů bývá obvykle konstantan (55 % mědi a 45 % niklu.), který se používá z důvodu malé závislosti odporu na teplotních změnách.[5]



Obrázek 7 – drátkový tenzometr[6]

Obrázek 8 – fóliový tenzometr[6]

3.1.2 Polovodičové tenzometry

Polovodičové tenzometry jsou tvořeny páskem monokrystalu polovodiče (křemíku, germania, aj.) znečistěného difuzí cizího materiálu. Mechanické namáhání krystalické mřížky ovlivňuje výrazně pohyblivost nosičů náboje, čímž se mění i měrný odpor materiálu tenzometru. Podle typu znečištění odpor materiálu s deformací roste nebo klesá.[7]

Obrázek 9 – polovodičový tenzometr [6]

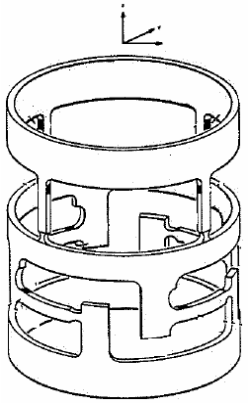
Tenzometry se obvykle přilepují k deformačnímu elementu v senzoru (nosník, membrána, kroužek, atd.) pomocí speciálních tmelů nebo lepidel, které nezpůsobují chybu měření vlastní teplotní roztažností.[6]

V průběhu mnohaletého vývoje v oblasti siloměrů a senzorů je snahou vyvinout co nejefektivnější způsob přesného snímání a navrhnout optimální konstrukci deformačních elementů, které by umožnily získat požadované měřené veličiny. Následující obrázky uvádí různé typy těchto konstrukcí:

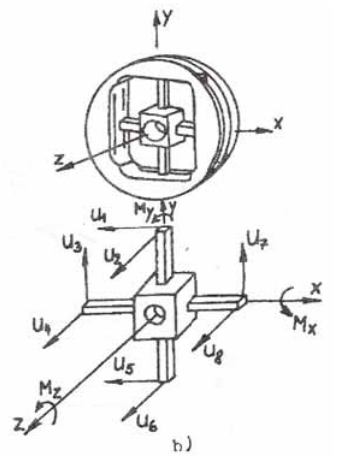
Obrázek 10 – typy deformačních elementů senzorů [8]

3.2 FTC senzory

V oblastech průmyslové robotiky se stále častěji začínají používat víceosé FTC (silo-momentové) senzory využívající tenzometrů. Mezi nejznámější původní multiaxiální senzory patří typy např. C.A.Rosena a K.Y.Bejzcyho, jimiž byly vybaveny zápěstí adaptivních robotů.
Rosenova konstrukce snímače (obrázek 11) byla vyvinuta ve Stanfordském výzkumném ústavu pro mechanický manipulátor – tzv. Stanfordské rameno již v roce 1969. Konstrukce má tvar dutého válce z hliníku s vyfrézovanými drážkami. Na osmi deformačních elementech (sloupcích) mezi drážkami jsou nalepeny vždy dva tenzometry do Wheatstoneova můstku, čímž je zajištěna teplotní kompenzace.
Bejczyho snímač (obrázek 12) se skládá ze dvou disků, mezi nimiž je umístěn deformační element křížového tvaru. V tomto případě jsou tenzometry opět zapojeny do můstku a připevněny k deformačním elementům – tyčkám kříže.[9]

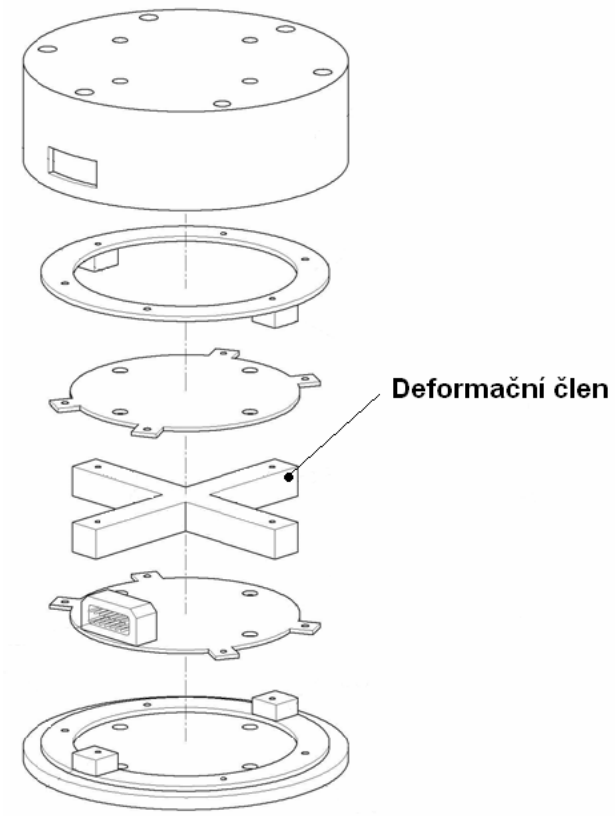


Obrázek 11 – Rosenův snímač[9]



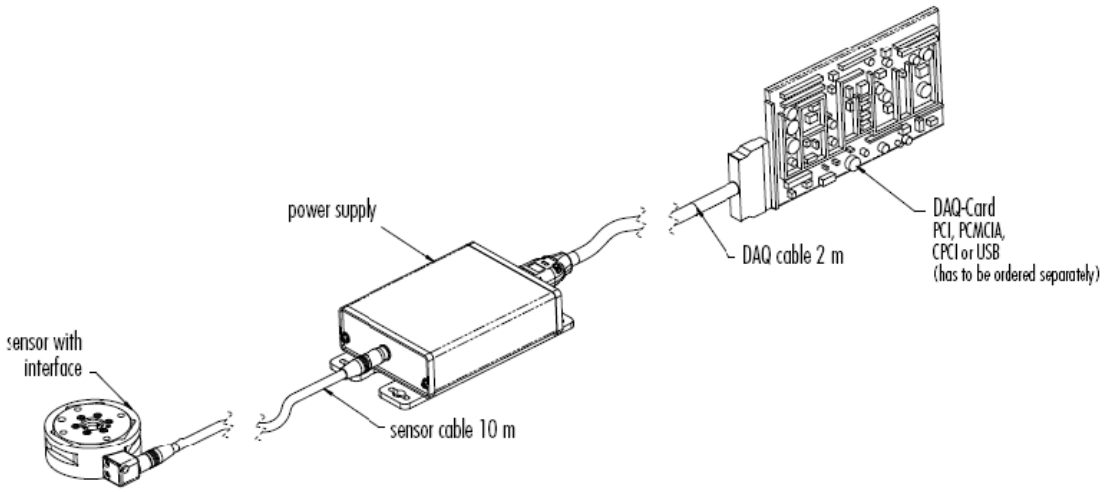
Obrázek 12 – Bejczyho snímač[9]

3.2.1 Tenzometrické FTC senzory



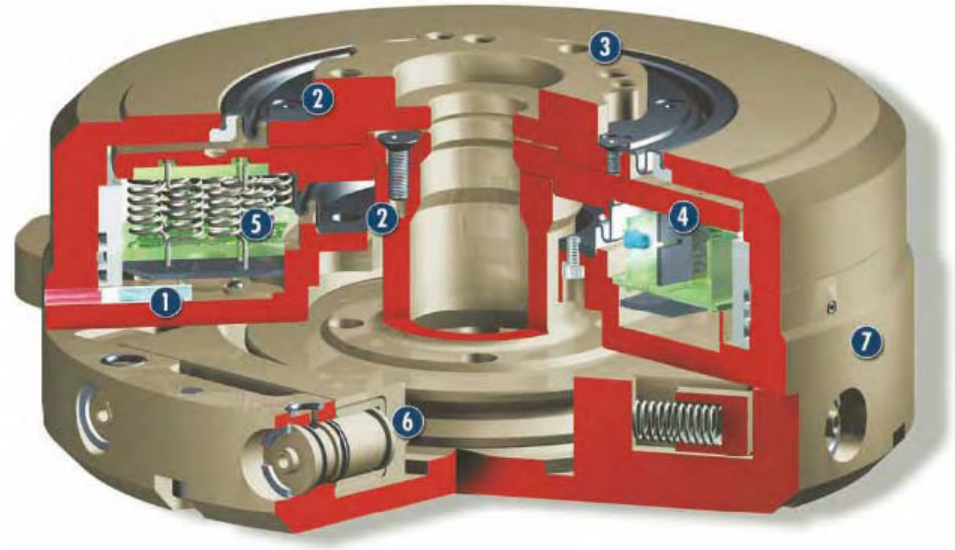
Obrázek 12 – Tenzometrický FTC senzor [11]

Tyto druhy senzorů využívají křemíkových tenzometrů, které se zapojují do Wheatstoneova můstku. V senzoru jsou na deformačním členu pravidelně rozmístěny měřící elementy, které jsou osazeny můstky. Můstkové zapojení tenzometrů má hlavní výhodu v teplotní kompenzaci, kdy změna teploty nezpůsobuje změnu výstupního elektrického signálu.
Některé typy senzorů mají vyhodnocovací elektronický systém ve svém těle, nebo v připojeném power boxu. Ten transformuje elektrické napětí z PC na požadované napětí senzoru.
Elektronický vyhodnocovací systém zpracovává data a posílá digitální signál do sběrné karty různého typu rozhraní např. USB, PCI, cPC, PCMCIA. Obrázek 13 ukazuje připojení soustavy FTC senzoru, zdroje a sběrné karty k PC. Software je dodáván výrobcem senzoru.
K senzorům lze připojit kontroléry komunikující po sériové lince RS-232 a integrovat je do ovládacího systému například obráběcího stroje nebo robotu.[10]



Obrázek 13 – Připojení FTC senzoru k PC [12]

3.2.2 Optoelektronický snímač – Schunk FTC 050-80-V



Obrázek 14 – Schunk FTC 050-80-V [12]

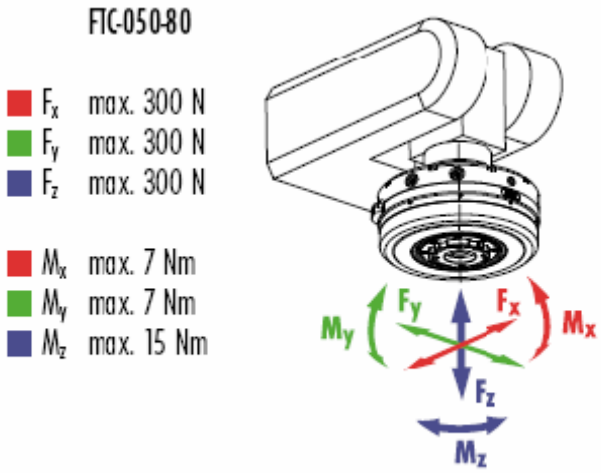
Společnost SCHUNK nabízí dva typy FTC senzorů: 050-80 a 050-40, lišící se maximálním dovoleným zatížením.
V praktickém experimentu je použitý senzor FTC050-80 V. Obrázek ukazuje řez tímto senzorem:

1 – optické vlákno signalizující určitý stav senzoru
2 – těsnění chránící vnitřní část senzoru (IP65)
3 – příruba (pohyblivá část) senzoru. Normována ISO 9409-1-A50
4 – optoelektrické snímací zařízení (clonící pásek se štěrbinami, který je umístěn mezi detektorem dopadajícího světla a šesti diodami). Clonící pásek s diodami je připojen k přírubě 3
5 – pružiny (slouží k pružnému spojení příruby 3 a těla senzoru 7)

6 – pneumatické písty (umožňují zamčení senzoru proti vychýlení např. při pohybech robota nevyžadujících měření)
7 – tělo senzoru. Tvoří pevnou část (Vyrobeno z vysokopevnostní hliníkové slitiny)

V těle senzoru jsou pevně umístěny detektory dopadajícího světla. Vychýlením příruby 3 vůči pevné části senzoru 7 se mění místo dopadu světla diody na detektor, čímž senzor určuje velikost působících sil a momentů.

Na obrázku 15 jsou uvedeny hodnoty maximální dovoleného zatížení v osách X,Y,Z a orientace souřadného systému FTC senzoru. Pro bezchybný chod programu je také důležité správné pochopení orientace souřadných systémů robot-senzor.

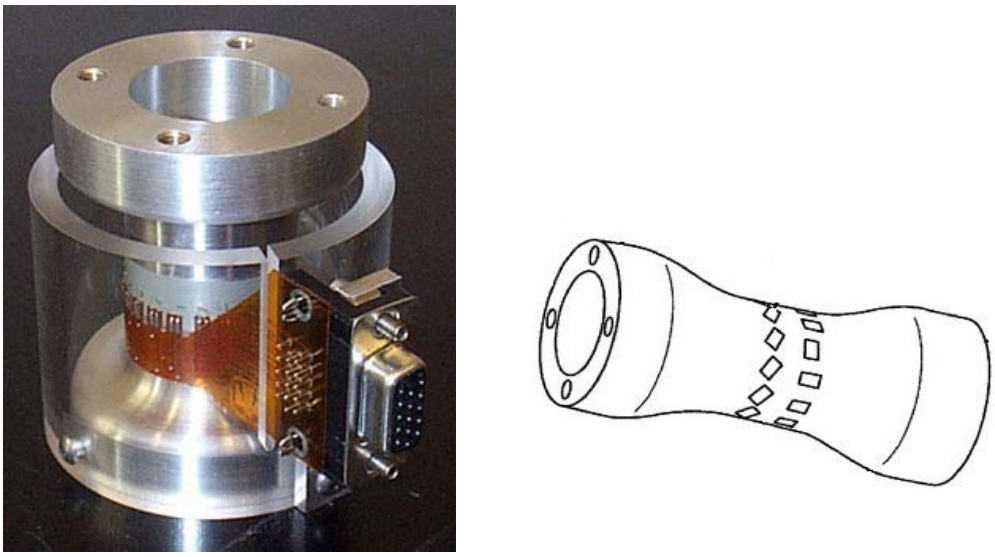


Obrázek 15 – souřadný systém senzoru SCHUNK [12]

Maximální možné přetížení senzoru (podle oficiální literatury firmy Schunk) v osách X, Y je 400 N a v ose Z 350 N. Maximální momenty k osám X, Y 14 Nm a k ose Z 25 Nm. Největší možná výchylka pohyblivé části senzoru je v translaci ±1,4 mm a v rotaci ±1,4°. Senzor měří pouze v rozmezí hodnot ±1,0 mm a ±1,0°.
Senzor lze připojit k PC pomocí sběrnice RS-232 nebo CAN. Společnost SCHUNK dodává k senzoru testovací program a sadu knihoven potřebných k vytvoření požadované aplikace.

3.3 Sandia FTC senzor

V roce 2007 si společnost Sandia's Intelligent Systems and Robotics Center (ISRC) nechala patentovat nový typ šestiosého silo-momentového snímače viz.obrázek 16.

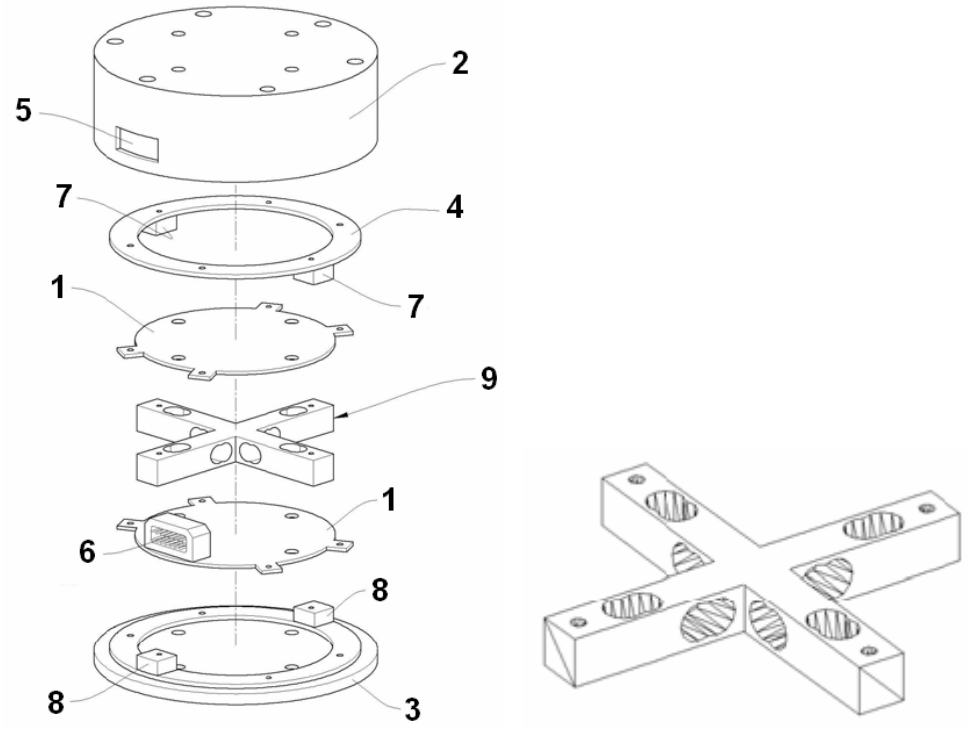


Obrázek 16 – FTC senzor Sandia [12]

- v porovnání s běžnými FTC senzory se jedná o variantu s 10x nižší cenou
- je tvořen snímačem válcovitého tvaru, na němž je po obvodu umístěno 24 polovodičových tenzometrů zapojených do šesti čtyřpólových můstků tak, že každý můstek vytváří analogový signál přímo úměrný jednotlivým složkám sil a momentů působících na tento snímač.
- kombinace jednoduché geometrie a vhodného umístění tenzometrů zaručuje mnohem levnější výrobu v porovnání s běžnými typy konstrukcí šestiosých senzorů.
- senzor může být vyroben jako vestavěná komponenta robotu.
- z důvodu jednoduché a robustní konstrukce nachází tento senzor uplatnění v oblastech, kde současné běžné senzory nemohou být použity.[13]

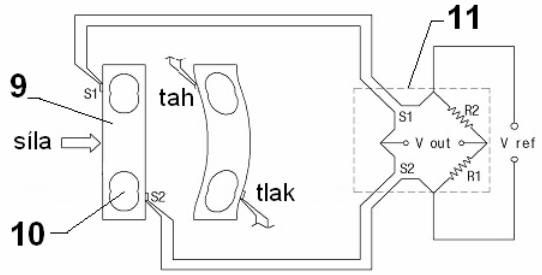
3.4 Zdokonalení konstrukce FTC senzoru

V roce 2005 byl na universitě v Soulu vyvinut nový typ šestiosého senzoru, který zdokonaluje již zmíněnou konstrukci běžných deformačních elementů křížového tvaru. Tento typ senzoru je také výjimečný vestavěnou elektronikou a převodníkem A/D signálu. Účelem studie profesora Ch. Kanga bylo zdokonalit běžně dostupný silomomentový senzor, který by byl dostatečně výkonný a cenově nenáročný.



Obrázek 17 – zdokonalená konstrukce FTC senzoru a deformační element [11]

Na obr. je uveden rozklad senzoru na jednotlivé bloky. 1 – plošný spoj elektroniky. 2,3 – krycí desky. 4 – část na sešroubování krycích desek, deformačního členu a plošného spoje. 5, 6 – konektorová část. 7, 8 – podpěrky deformačního členu 9.



Obrázek 18 – zapojení tenzometrů [11]

Obrázek 18 uvádí schéma zapojení tenzometrů. Na deformačním elementu 9 jsou tenzometry přilepeny v místech největšího tlakového a tahového napětí 10. Zajímavý je rovněž způsob zapojení tenzometrů do Wheatstoneova můstku 11 za účelem maximalizovat výchylku napětí a kompenzovat odchylky způsobené teplotními změnami.

Napěťový analogový signál z tenzometrů je převáděn do digitálních hodnot pomocí mikročipu PIC16F877 a 10 bitového A/D převodníku zabudovaného uvnitř senzoru a poté je čten v počítači přes paralelní komunikaci.

Zabudováním elektroniky do těle senzoru se tak zabrání možné kontaminaci šumem z elektrického zdroje nebo elektromagnetických vln počítače.[11]

3.5 Volba vhodného FTC senzoru

Silomomentový senzorický systém se skládá ze 2 základních částí:

- snímač (připevněn k robotu, převádí silomomentové zatížení na elektrický signál, který je poté přenášen do kontroléru)

- senzorický kontrolér (připojen kabelem k senzoru, přijímá signál ze snímače, ten pak přepočítává na výstupní FT data určena robotu)

Nejdůležitějším krokem před výběrem vhodných komponent senzorického systému by měla být analýza a identifikace naší aplikace:

- jakým způsobem bude robot v aplikaci využitý,
- v jakém rozsahu sil bude robot pracovat,
- pracovní podmínky, v nichž bude robot pracovat (montážní linka, laboratoř, atd.)

1. Výběr snímače

Výpočet předpokládaného momentu a sil: Koncový efektor připojený k snímači generuje síly, které na vzdálenosti od počátečního bodu snímače způsobují silové a momentové namáhání. Mezi specifické parametry snímače tedy patří minimální a maximální dovolené síly (Fx,Fy,Fz) a minimální / maximální momenty (Mx,My,Mz), dále jeho hmotnost, průměr, šířka, výstupní rozlišení a absolutní přesnost snímání.

2. Výběr kontroléru

Při výběru kontroléru je rozhodující, pro jaký účel budou FTC data využívána (např. sběr dat / analýza, kontrola síly v reálném čase, detekce prahové síly / momentu), dále pak jeho výstupní rozlišení, výstupní formát, a použitý software rozhraní. Mezi běžně užívané formáty výstupu patří např. RS-232(sériová linka), sběrnice (ISA, PCI, atd.)
V podstatě jsou kontroléry dvojího typu:

a) externí – samostatně napájeny, s robotem komunikují např. přes RS-232 nebo analogové výstupy.

b) interní – ve formě zásuvných karet. PC a řídící systém robotu má přímý přístup k registrům s aktuálními hodnotami sil/momentů.[14]

4. FTC řízení

Jak již bylo v úvodu řečeno, silomomentové řízení robotů nachází uplatnění v mnoha oborech průmyslu a představuje nové možnosti aplikací s využitím průmyslových robotů.

4.1 Způsoby FTC řízení

Způsoby silového řízení se dělí na :

- pasivní (působící síly by měli být řízeny k dosažení požadovaného úkolu, ale je vhodné tyto síly udržet v tolerovaných mezích)
- aktivní (působící síly by měli být řízeny, protože přímo přispívají k požadovanému výsledku)

V prvním případě jsou působící síly v dané úloze nežádoucím účinkem a zpravidla je stačí udržet v tolerovaných mezích. Ke kompenzaci sil se používá flexibilního koncového efektoru s tlumícími vlastnostmi, nebo např. detailní a pečlivé plánování trajektorie robota.
V druhém případě jsou působící síly nezbytně nutné k dosažení požadované úlohy, tedy řízení sil na konkrétní hodnotě.[1]

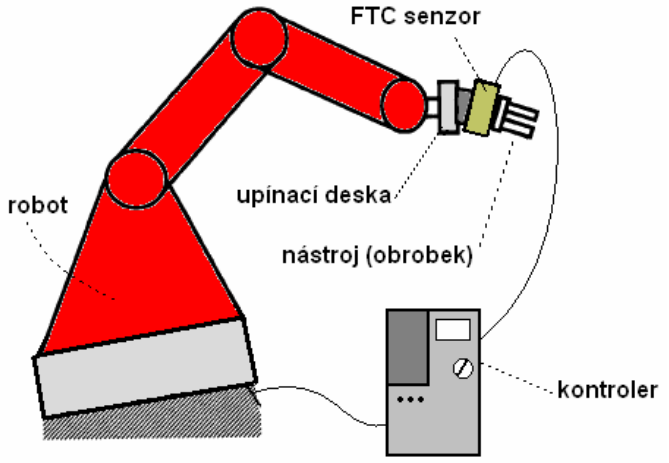
4.2 Struktury FTC řízení

Struktury FTC řízení (obrázek 19), mají v porovnání s klasickým polohově řízeným robotem řídící jednotku (kontroler) a silomomentový senzor. Senzor snímá kontaktní síly mezi mechanickou jednotkou a jejím interagujícím prostředím. Kontaktní síla je vstupní veličinou řídící jednotky a způsobuje změnu pohybu mechanické jednotky za účelem dosažení požadované kontaktní síly.[15]

Struktura FTC řízení rozděluje dva základní mechanické celky:

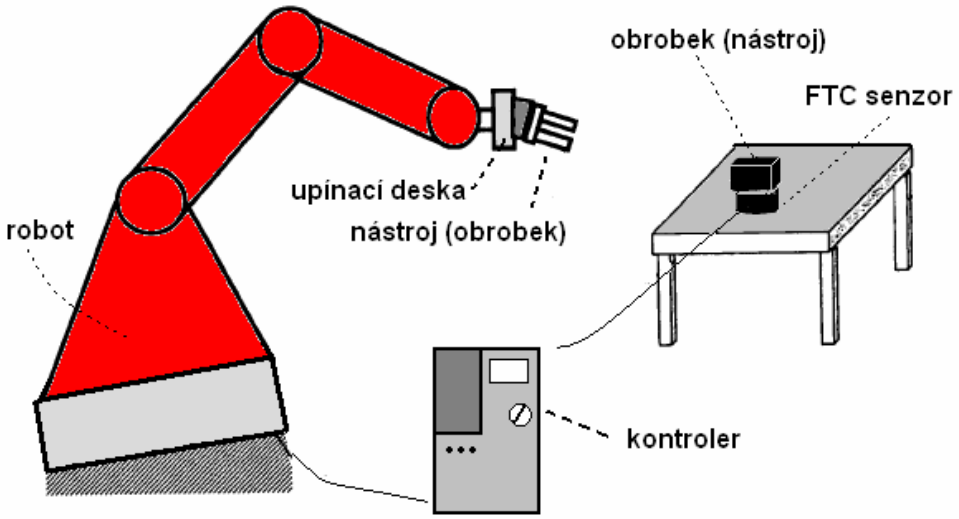
a) silomomentová jednotka (obsahuje FTC senzor). Přestavuje např. jednoosý mechanizmus, stacionárně umístěný objekt, dopravník, víceosý robot, atd.

b) silově řízená jednotka (je na ni vyvíjen požadovaný silový účinek). Představuje řízený pohyblivý mechanismus např. víceosý robot nebo externí osa.



Obrázek 19 – konvenční struktura FTC řízení[15]

Na obrázku19 je zobrazena konvenční strukturu silomomentově řízeného robota. K upínací desce robota je připevněn FTC senzor a koncový efektor (nástroj nebo obrobek).
V případě, že koncový efektor představuje obráběcí nástroj, pak obrobek bývá umístěn mimo tuto struktura a naopak. Další částí je řídící jednotka (kontroler), která se skládá z fyzického vybavení-hardwaru a softwaru k řízení pohybu robota. Programový kód softwaru bývá obvykle napsán ve vyšším programovém jazyce[15]
Výhody: tuhost, relativní přesnost
Nevýhody: nízká flexibilita, výkonnostní omezení



Obrázek 20 – konvenční struktura FTC řízení[15]

Další varianta struktury FTC řízení je uvedena na obrázku 20. V porovnání s předešlou variantou (obrázek 19) se silomomentový senzor ustavuje na pevný základ - stůl. V případě, že koncový efektor robota představuje nástroj, pak obrobek je pevně spojen se senzorem umístěném na pevném základu.
Řídící jednotka (kontroler) přijímá signál ze senzoru a současně ovládá pohyb robota.

Výhody: jednoduchá a přesná gravitační a setrvačná kompenzace. Tíha komponent působící na senzor je konstantní v porovnání s variantou na obrázku 19, kde se mění s konfigurací robota.[15]

4.3 Obecné výhody FTC řízení :

- Způsob řízení, který umožňuje kombinovat programování polohy a sílového řízení. Předpokladem je, že každý stupeň volnosti robota je podmíněn buď silomomentovým řízením nebo řízením polohy.

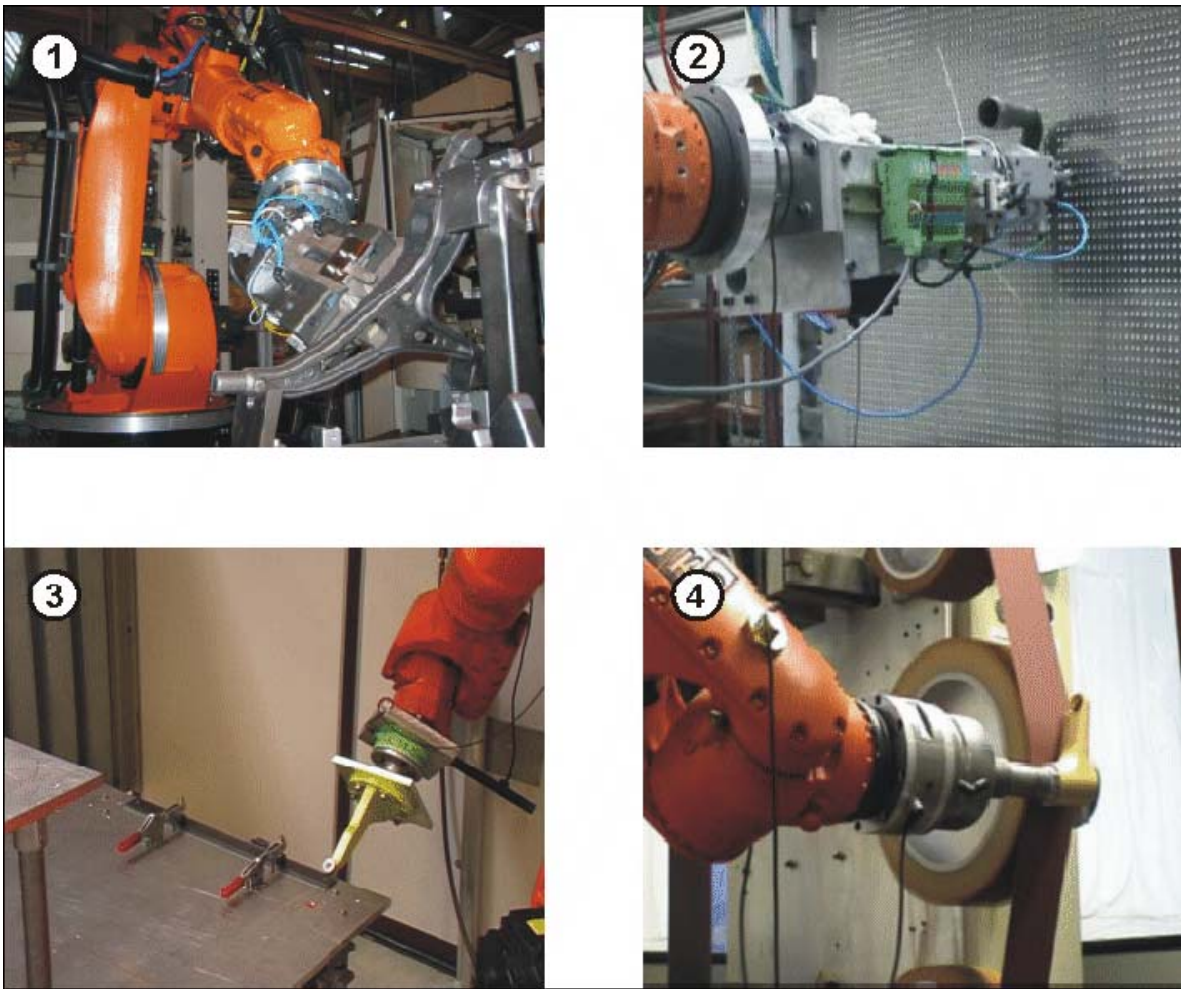
- Snadná adaptace silomomentového řízení na nároky dané aplikace
- Numerický (případně taky grafický)výstup procesu síl a momentů
- Všechny silomomentově řízené pohyby robota se vztahují buď na souřadný systém nástroje (TCP), bázový koordinační systém robota (Base). Tak lze programovat aplikace rychle a intuitivně s ohledem na nejvhodnější souřadnicový systém.

Bezpečnostní mechanismsy na ochranu senzoru a obrobku:

- Kontrola síly / momentu: nastavitelné mezní hodnoty, hlášení chyby při překročení
- časový spínač: proces sil může být omezen časově programovatelný spínačem
- kontrola trajektorie: pohyby silo-momentového řízení mohou být omezeny [16]

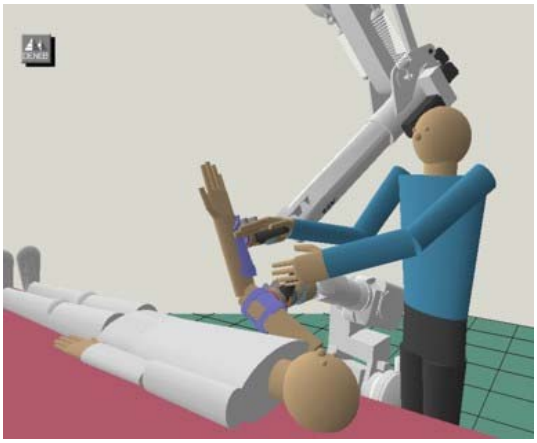
4.4 Příklady použití FTC řízení

V praktických aplikacích využívající průmyslové roboty je silomomentové řízení řešeno např. zavedením takzvaných technologických paketů typu FTCtrl (Force Torque Control). Tento druh FTC řízení vyvíjený společností KUKA Robots se využívá v průmyslové výrobě pro sledování velikostí řezných sil při soustružení nebo frézování, přítlačné síly při broušení, působící síly při nýtování, síly ve formách při tlakovém lití plastů, montážní aplikace, manipulaci s obrobky(1), lepení, nýtování(2), montáž, tváření, ohraňování(3), broušení(4), odhrotování, leštění, atd.[16]



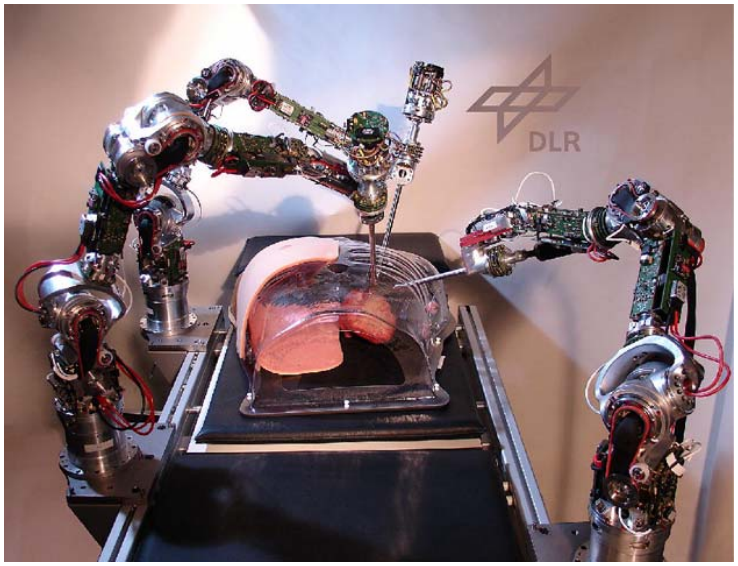
Obrázek 21 – použití FTCtrl řízení KUKA Robots [16]

FTC řízení nachází využití také v jiných než průmyslových aplikacích. Příkladem může být třeba rehabilitace poraněných horních a dolních končetin. S využitím robotů lze docílit přesně provedených terapeutických pohybů. Tento druh rehabilitace zrychlí průběh uzdravení pacientů až dvakrát a dokáže snížit vedlejší nežádoucí účinky jako bolesti kloubů. Terapie se stává méně náročnou i pro zdravotní personál, využívá taky interaktivních her.[10]



Obrázek 22 – rehabilitace končetin [17]

V medicíně se s úspěchem využívají silomomentové senzory pro chirurgii s využitím robotů.
Na obrázku jsou roboty ovládané speciální řídící jednotkou, které se využívají pro endoskopické operace. Řídící jednotka ovládá pohyb robotů a současně zprostředkovává svými akčními členy síly působící na endoskopické nástroje, které drží robot. [10]



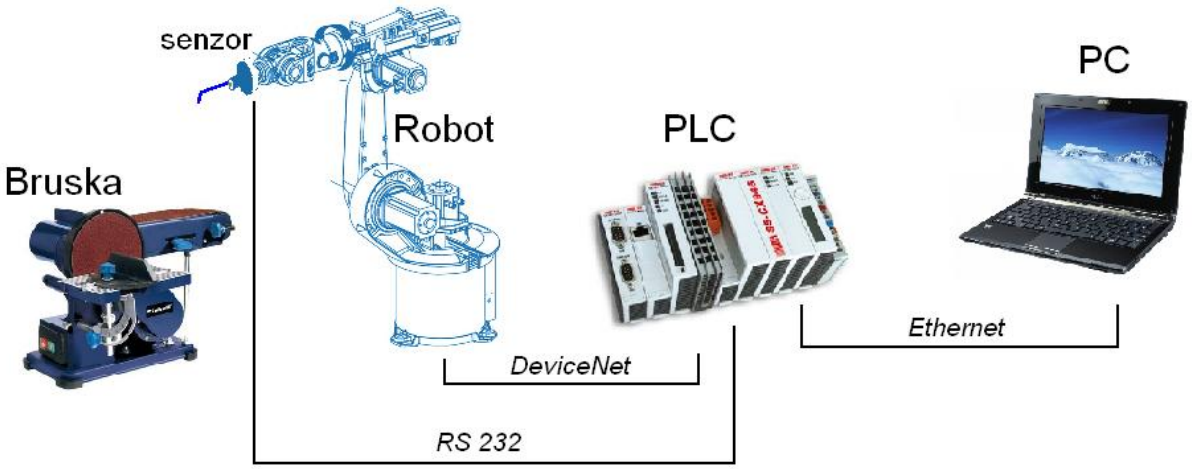
Obrázek 23 – rehabilitace končetin [18]

5. Praktická část

Praktická část diplomové práce zahrnuje:

1. propojení jednotlivých prvků FTC řízení
2. zprovoznění komunikace mezi nimi
3. naprogramování ukázkové úlohy – jedná se o model broušení.

5.1 Navrhovaná koncepce řešení FTC řízení



Obrázek 24 – propojení prvků FTC řízení

Navrhovaná koncepce řešení se skládá ze stacionárně umístěné brusky, průmyslového robotu KUKA KR 15-2, průmyslového automatu - PLC a PC. Koncepce řešení je založena na použití PLC (Programmable Logic Controller). PLC slouží k zprostředkování a zpracování informací mezi senzorem a řídící jednotkou průmyslového robotu. PLC komunikuje se senzorem po sériové lince RS-232 a s robotem je propojeno průmyslovou sběrnicí DeviceNet. Konfigurace DeviceNetu je jednoduchá, při vyčtení dat ze senzoru nedochází k omezení pohybu robotu, jako v případě použití rozhraní RS-232 mezi robotem a senzorem. Mezi další výhody PLC řízení průmyslových robotů patří větší rozšiřitelnost řízení např. připojení senzorů.

5.2 Volba robotu

Původním plánem a požadavkem zadání praktické části diplomové práce bylo použití průmyslového robotu KUKA 15/2. Tento robot, který je umístěn v dílnách fakulty strojního inženýrství však nelze z důvodu rekonstrukce dílen využít. Praktická úloha je proto demonstrována na náhradním robotu KUKA KR3.

KUKA KR3

- Stabilnější operační systém WinXP
- Řídící software KRC3
- Nosnost 3 kg
- Opakovatelnost ± 0,05mm
- převody Harmonic Drive
- brzdy na osách 1,2,3,5 [23]

Osa	Rozsah pohybu	Max.rychlost
1	± 180°	240 °/s
2	-135° to +45°	210 °/s
3	± 135°	240 °/s
4	± 180°	375 °/s
5	± 135°	300 °/s
6	neomezeno	375 °/s

Obrázek 34 – Průmyslový robot KUKA KR3 a jeho vlastnosti [23]

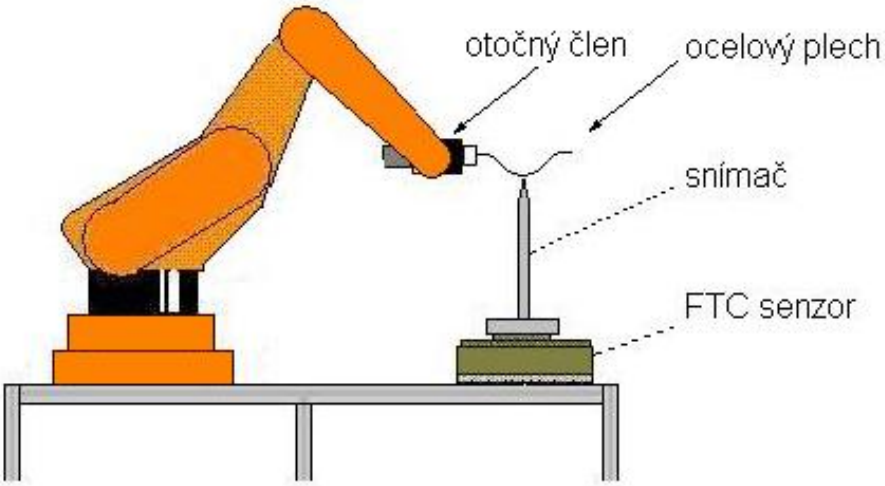
KUKA KR15/2

- šestiosý průmyslový robot s kloubovou kinematikou
- operační systém Win98
- nosnost 15 kg
- řídící software KRC1
- všechny osy s pohony AC servomotory
- opakovatelnost ± 0,1mm [24]

Osa	Rozsah pohybu	Rychlost
1	±185°	152 °/s
2	+115° to -55°	152 °/s
3	+70° to -210°	152 °/s
4	±350°	284 °/s
5	±135°	293 °/s
6	±350°	604 °/s

Obrázek 35 – Průmyslový robot KUKA KR 15- 2 a jeho vlastnosti [24]

5.3 Praktický experiment



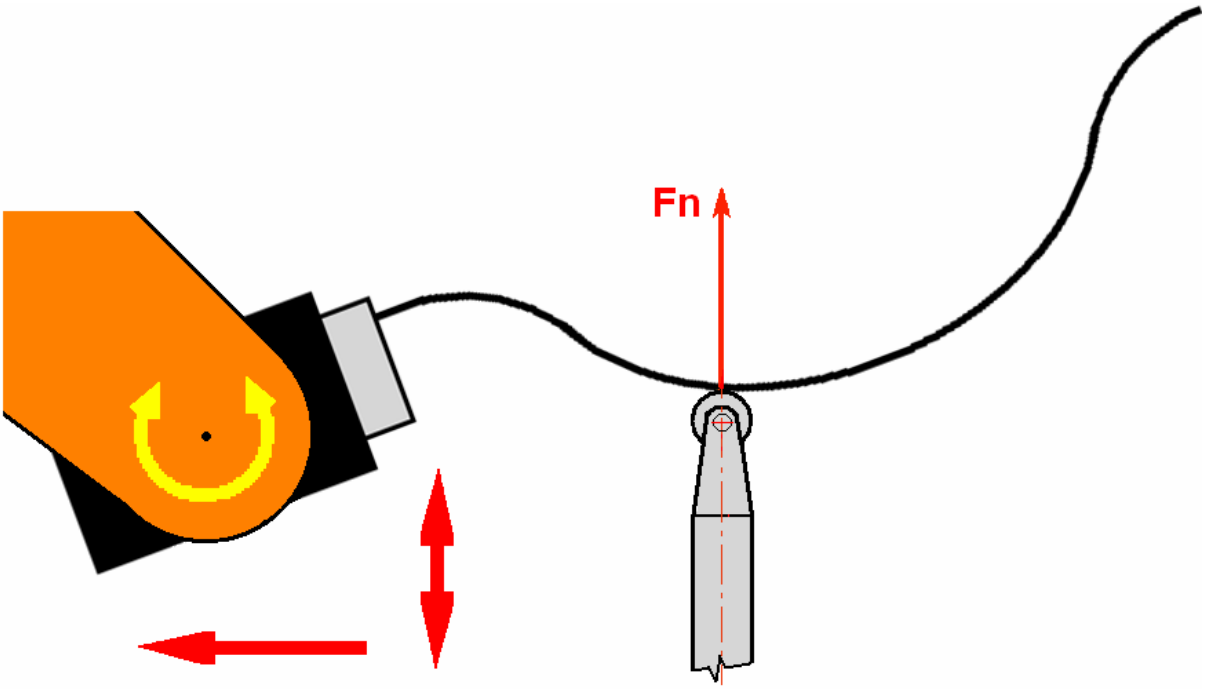
Obrázek 26 – praktický experiment

Praktická část diplomové práce je v podstatě řešena pouze jako jednoduchý model broušení. V reálné úloze by snímání sil muselo být programově ošetřeno např. proti vlivům způsobených rotací brusného nástroje, atd.
Reálný případ broušení není z důvodu složitosti, časové náročnosti a technického vybavení možný.
Model praktického experimentu spočívá v:

- nahrazení obrobku se zakřivenými plochami pásem ocelového plechu s profilem tvaru U.
- nahrazení stacionární brusky snímačem šípovitého tvaru připevněného k senzoru SCHUNK FTC 050-80-V.

Na hrotu snímače je otočně uchycen ocelový váleček, který přenáší kontaktní sílu mezi pásem plechu a snímačem.

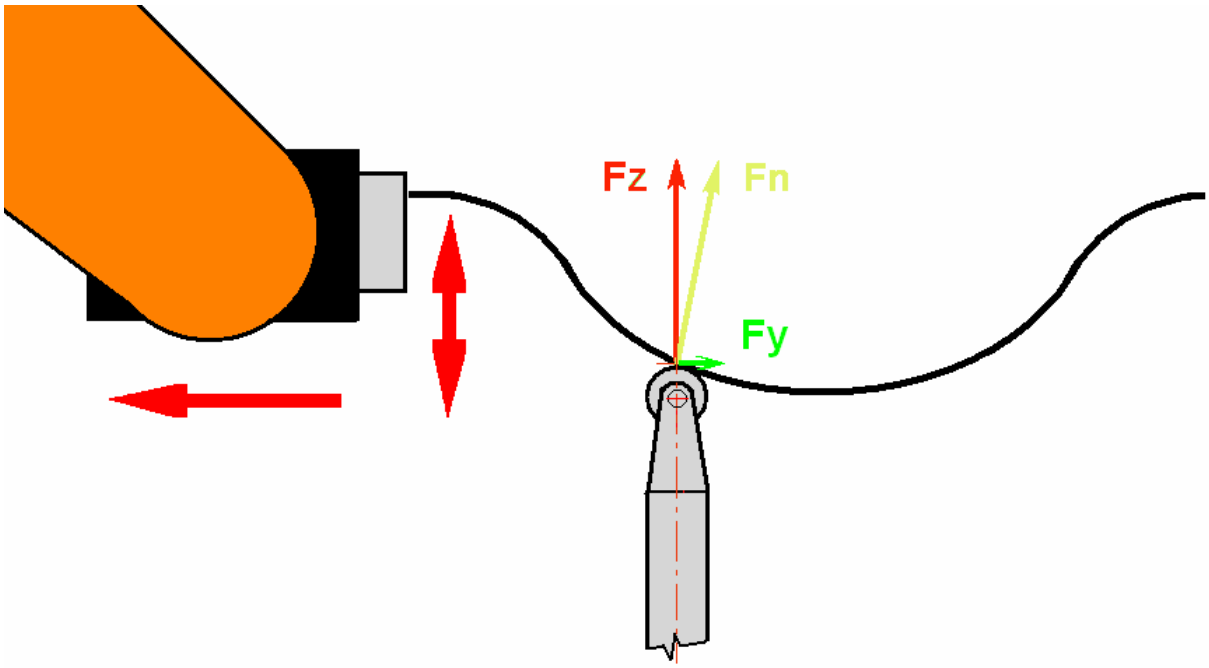
5.3.1 Varianta 1



Obrázek 27 – varianta 2

Ve této variantě se obrobek otáčí a současně pohybuje v horizontálním a vertikálním směru. Hrot snímače imituje stacionárně umístěnou brusku a působí na obrobek pouze normálovou silou Fn (nepůsobí zde tečná síla), což je v případě reálné situace broušení vhodné. Způsob řízení brusné síly ve více osách má příznivý vliv na přesnost opracování a jakost povrchu obrobku.
Nevýhodou metody je však složité řízení síly Fn, které vyžaduje regulaci pohybu otočného členu ve více osách a trajektorii robota závislou na tvaru obrobku. Program PLC se tak podstatně komplikuje.

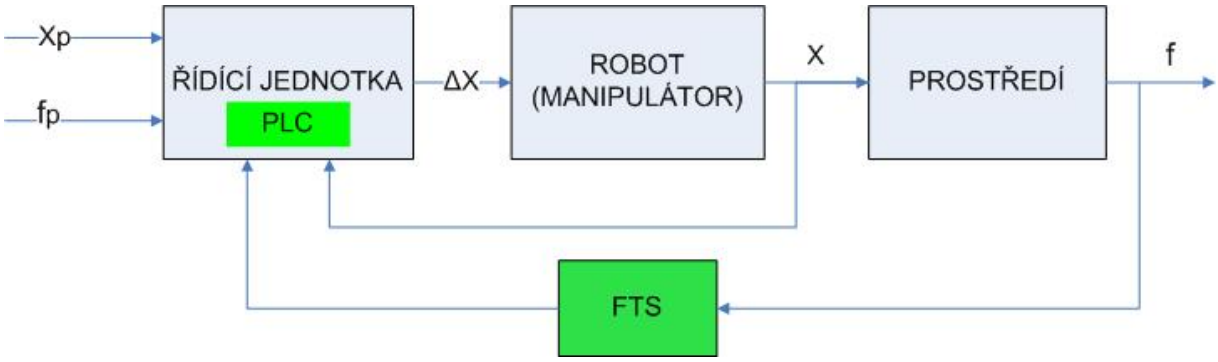
5.3.2 Varianta 2



Obrázek 28 – varianta 2

V této variantě působí na obrobek normálová sílá Fn, jejíž velikost a směr se v průběhu posuvu otočného členu s obrobkem mění. Otočný člen robota se neotáčí kolem osy A5, ale pohybuje se pouze v horizontálním a vertikálním směru zobrazeném na obrázku šipkami.
Síla normálová Fn je rozložena na síly Fz a Fy v souřadném systému senzoru. Sílu Fy zanedbáváme z důvodu zjednodušení regulace – při regulování obou sil by v programu PLC musel být zahrnut druhý regulátor a posun otočného členu by se musel řešit regulací ve dvou osách souřadného systému senzoru.

5.4 Regulace FTC řízení



Obrázek 25 – regulace FTC řízení

Xp…..požadovaná poloha koncového efektoru v ose Z
fp……požadovaná síla
f……..normálová síla v ose Z
ΔX…..přírustek hodnoty polohy
X…….aktuální poloha v ose Z

Obrázek č. uvádí princip regulace brusné síly v jedné ose. Do regulační zpětné vazby vstupuje hodnota Xp (požadovaná poloha) a fp (požadovaná síla). Řídící jednotka, která představuje kontrolér robota je propojena s PLC. V našem praktickém experimentu se PLC využívá k řízení této regulace, tzn. regulace je softwarově řešena zavedeným PI regulátorem v programu Twincat PLC Control. Řídící jednotka komunikuje s PLC (přijímá informace o požadované změně polohy robota v ose Z) a řídí pohyb robota v prostředí. Výstup robota X (aktuální poloha v ose Z) je zpětně propojen s řídící jednotkou. Kontaktní brusná síla mezi koncovým efektorem robota a prostředím s FTC senzorem představuje výstup celé regulace. Propojení senzoru a PLC funguje jako uzavřená regulační smyčka.

V praxi se k regulaci kontaktních sil v procesech broušení průmyslových robotů využívá tzv. přídavných technologických balíčků - aplikací typu RSI nebo FTctrl od společnosti KUKA Roboter GmbH, které dokážou řešit řízení sil a momentů ve více osách najednou. Regulace se skládá z více smyček zpětných vazeb, např. proudová smyčka, atd.

5.5 Komunikace mezi bloky FTC řízení

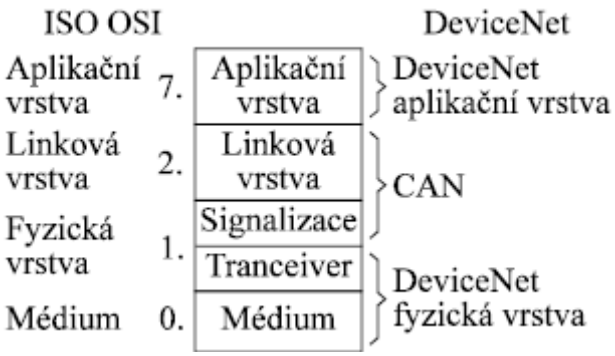
V následující podkapitole jsou uvedeny komunikační protokoly mezi jednotlivými bloky FTC řízení, které jsou dále uvedeny v praktické části - Princip funkce praktické úlohy.

DeviceNet

Jedná se o digitální, vícesběrnicovou síť. Protokol DeviceNet definuje sériový přenos mezi prvky průmyslové automatizace. V modelu OSI/ISO představuje jednu z variant 7. vrstvy. Je definována nad protokolem CAN, tedy 1. a 2. vrstvou modelu.[19]

Základní vlastnosti DeviceNetu:
- podporuje až 64 účastníků sítě
- připojení a odpojení ze sítě bez jejího přerušení
- jde o objektový model přenosu (zařízení připojené k síti je popsáno množinou objektů)
- Volitelná velikost sítě v rozsahu 100 až 500 m
- přenos dat s rychlostí 125/250/500 kBd
- Datové pakety s délkou 0 až 8 bitů
- jednotky lze napájet po sběrnici
- řízení komunikace Multi-Master a Master-Slave nebo peer-to-peer
- softwarové prostředky komunikace žádost/odpověď
- možnost zaměňovat zařízení různých výrobců
- vysoká průchodnost sítí
- efektivní přenos dat

Na obrázku je uvedeno srovnání specifikace CAN a modelu ISO/OSI. CAN definuje pouze fyzickou a linkovou vrstvu. Specifikace DeviceNet definuje aplikační vrstvu a obsahuje i specifikaci fyzického interfejsu.[19]



Obrázek 29 – DeviceNet model [19]

RS - 232

RS232 je rozhraní pro přenos informací vytvořené původně pro komunikaci dvou zařízení (max. 20m). Proti rušení je informace přenášena větším napětím, než je standard (5 V). Přenos informací probíhá asynchronně předem nastavenou přenosové rychlosti. Synchronizace je řešena sestupnou hranou startovacího impulzu.[20]

Parita – nejjednodušší způsob jak zabezpečit přenos dat (bez nároků na výpočetní výkon). Ve vysílacím zařízení se sečte počet jedničkových bitů + paritní bit (1/0). Parita může být lichá nebo sudá podle výsledného sečteného čísla. V některých případech nemusí být paritní bit vůbec nastaven.

Handshaking – představuje řízení datového toku (potvrzení příjmu, či připravenost k přenosu dat a jeho zahájení). Handshaking může být na hardwarové nebo softwarové úrovni.

Hardwarový handshaking – Přenos dat od vysílače k přijímači (vysílač má připravena platná data k odeslání). Přenos dat od přijímače k vysílači (přijímač je schopen data zpracovávat).

Softwarový handshaking – Posílají se speciální řídící znaky. Soft. handshaking probíhá na úrovni komunikačních protokolů (ZMODEM,atd.), pomocí běžného datového kanálu přijímač sdělí vysílači, zda je schopen data přijímat.

Baudrate - je vyjádřen počet změn stavu linky za sekundu. U sériové linky RS-232 je shodný počet změn s počtem bitů za sekundu (obecně neplatí)

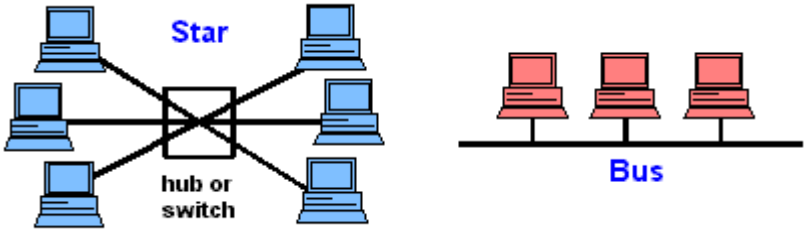
Počet bitů – počet bitů v datovém rámci. Počet bitů = Start bit+data+stop bit+parity bit
Stop bit – bity pro ukončení datového rámce (jeden nebo dva bity)[10]

Ethernet

Jedná se o nejpoužívanější technologii k vytváření lokálních sítí (LAN). V modelu ISO/OSI představuje fyzickou a spojovou vrstvu a v TCP/IP síťové rozhraní. Jednotlivé stanice (síťové karty) jsou mezi sebou nejčastěji propojeny kroucenou dvojlinkou, která patří mezi nejrozšířenější druh ethernetové kabeláže. Mezi výhody technologie ethrnet patří jednoduchost protokolu, snadná implementace a instalace.

Obrázek 29 – standardní konektor sítě Ethernet[21]

Ethernet dříve používal sběrnicovou topologii sítě – sdílené médium, která bývá v dnešní době nahrazována výhodnější hvězdicovou topologií, v jejímž středu je rozbočovač (hub) nebo taky přepínač (switch).[21]



Obrázek 30 – síť Ethernet [22]

5.6 PLC – Programovatelný logický automat

PLC (Programmable Logic Controller) lze definovat jako malý průmyslový počítač umožňující řízení a automatizaci průmyslových procesů v reálném čase. V praktickém experimentu slouží PLC pro přenos informací a řízení naprogramované regulační smyčky mezi průmyslovým robotem a FTC senzorem.

PLC systém od společnosti Beckhoff se skládá z :
CX 1010 – 0112 – CPU (hlavní část PLC - procesor)
C1100-0002 - zdroj

funkční moduly PLC: CX 1500- B520 – DeviceNet (slouží ke komunikace s robotem)
CX 1010 – N030 RS-232 (komunikace se senzorem)
PLC dále obsahuje digitální vstupy / výstupy, které však k praktické úloze nejsou potřebné.

Obrázek 31 – PLC Beckhoff CX

5.7 Software TwinCAT

Software TwinCAT od stejné společnosti jak uvedené PLC umožňuje vykonávat funkce těchto programovatelných automatů a řídicích systémů na počítači. Nahrazuje konvenční hardware PLC. Programy lze vytvářet v jazycích podle normy IEC 61131-3. TwinCAT je možné provozovat pod operačními systémy Windows NT, 2000 nebo XP, Windows NT Embedded nebo XP Embedded a Windows CE. Programování a vykonávání programu (run-time) lze realizovat na jediném PC nebo i odděleně. K dispozici je připojení na všechny běžné komunikační protokoly. TwinCAT je schopen pracovat v reálném čase.

System manager – hlavní nástroj pro konfiguraci TwinCat systému. Zajišťuje propojení softwarových a fyzických vstupů / výstupů.

PLC control – kompletní vývojové prostředí PLC. Podpora programovacích jazyků: strukturovaný text, funkční bloky, ladder diagram, atd.

5.8 KRL – Kuka Robot Language

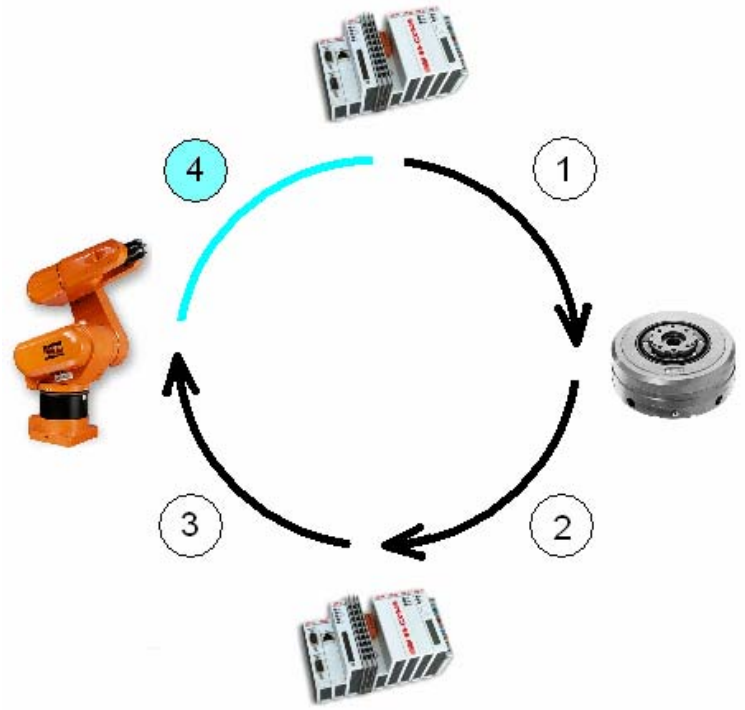
Neboli Kuka Robot Language je programovací jazyk řídícího systému KR C průmyslových robotů KUKA. Má rysy vyššího programovacího jazyka. Umožňuje použití běžných funkcí jako jsou např. větvení, cykly, rozčlenění hlavního programu do submodulů apod. Důležitou vlastností KRL jsou speciální instrukce pro pohyb robota, čímž se liší od běžných programovacích jazyků.

Ke KRL programům lze přistupovat z pozice:

1. uživatele – možnost programovat základní funkce robotu a zapisovat jeho trajektorii pomocí tzv. in-line formulářů. Většina důležitých systémových souborů v systému je pro uživatele skryta.

2. experta – soubory v programovém okně je možné upravovat. Všechny systémové soubory jsou zobrazeny. Vedle názvů těchto souborů se zobrazuje taky jejich rozsah, extenze a atributy. Větší možnost strukturování souborů. Není omezen jen na programování in-line formulářů.

5.9 Princip funkce praktické úlohy



Obrázek 32 – princip funkce praktické úlohy

1. **PLC pošle dotaz po sériové lince RS-232 do senzoru**. Pomocí příkazu SendString (pošli řetězec) se do senzoru pošle dotaz - znak ‚H‘ z ASCII tabulky velikosti 1 bajt. Tímto příkazem je senzor vyzván k vyčtení aktuálních dat (‚H‘ – dotaz “Síly”).

   Druhy příkazů:
   - Data ze senzoru
   - Informace o senzoru
   - Nastavení senzoru
   - Ostatní příkazy

2. **Senzor odešle odpověď (aktuální hodnoty sil) do PLC**

   Odeslaná data ze senzoru jsou datového typu integer

   I, 3x16 bitová hodnota (INT16) Fx, Fy, Fz , 1x 16 bitový statusword

3. **PLC zpracuje data** a pošle po lince DeviceNet do řídícího systému robota.

   Odeslaná data ze senzoru se pomocí příkazu ReceiveData uloží do vytvořené datové struktury typu mydata:

PREFIX : BYTE;
Fx : INT;
Fy : INT;
Fz : INT;
Status:INT;

V dalších částech programu je pracováno pouze s proměnnou Fz - síla v ose Z. Ostatní proměnné nejsou pro praktický experiment potřebné.
Hodnoty proměnné Fz lze z důvodu kompenzace rozptylu zpracovat pomocí digitálního filtru (funkční blok fbDigitalFilter) nebo pouze vhodně zaokrouhlovat. Hodnoty Fz jsou poté přiřazeny do nové proměnné „C"a matematicky upraveny:

C = Fz / 32 [N]

Další hlavní částí programu je PI (proporcionálně-integrační) regulátor vytvořený funkčním blokem fbCTRL_PI).
Proměnná „C" je přiřazena PI regulátoru jako vstupní veličina. Výstupní veličina představuje posunutí koncového členu robotu v ose Z. Regulátor má nastavenu požadovanou hodnotu regulované veličiny na 5*N*.

Příkaz COMportControl umožňuje komunikaci mezi sériovým rozhraním a PLC.

Program s příkazy SendString, ReceiveData, fbDigitalFilter, fbCTRL_PI, COMportControl se opakovaně spouští každou milisekundu pomocí časovače (příkaz Timer). Před spuštěním programu je potřeba PLC resetovat, čímž se resetují také buffery a nastavit FTC senzor na nulu.

V programu TwinCat System Manager je výstupní proměnná regulátoru přiřazena výstupu I/O zařízení DeviceNet.

V řídícím systému robota (systémový soubor *iosys.ini)* se obsadí paměťový prostor velikosti 1 byte jako vstup a výstup sítě DeviceNet:

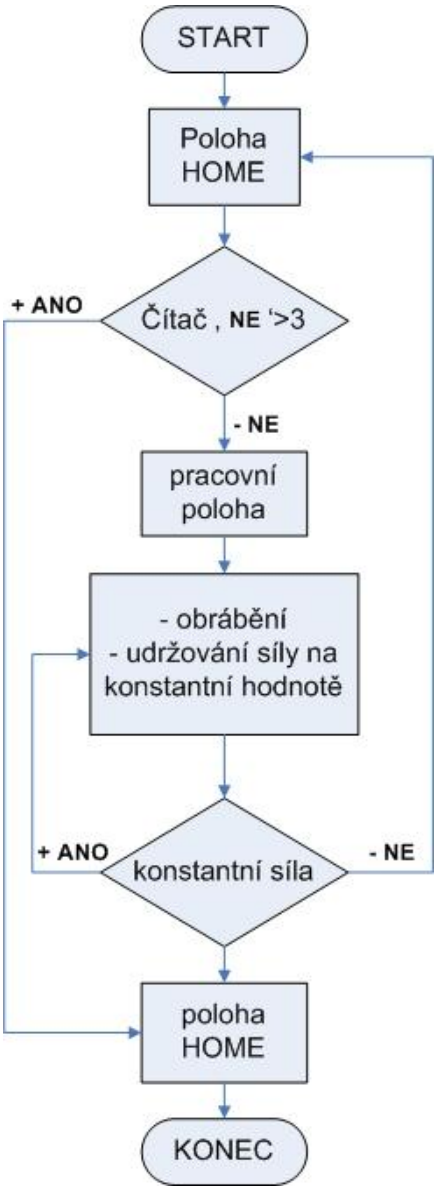
InW1=12,0,x1
OutW1=12,0x1

Vstup / Výstup, data od prvního wordu (v robotu) = 12 (MAC adresa modulu), x1-paměťový prostor se obsadí 1x od nulté adresy.

4. **Průmyslový robot posílá zpět do PLC informace** o aktuální poloze X koncového efektoru (viz. regulace FTC řízení) a vykonává pohyb v ose Z v závislosti na velikosti snímané síly Fz podle následujícího programu:

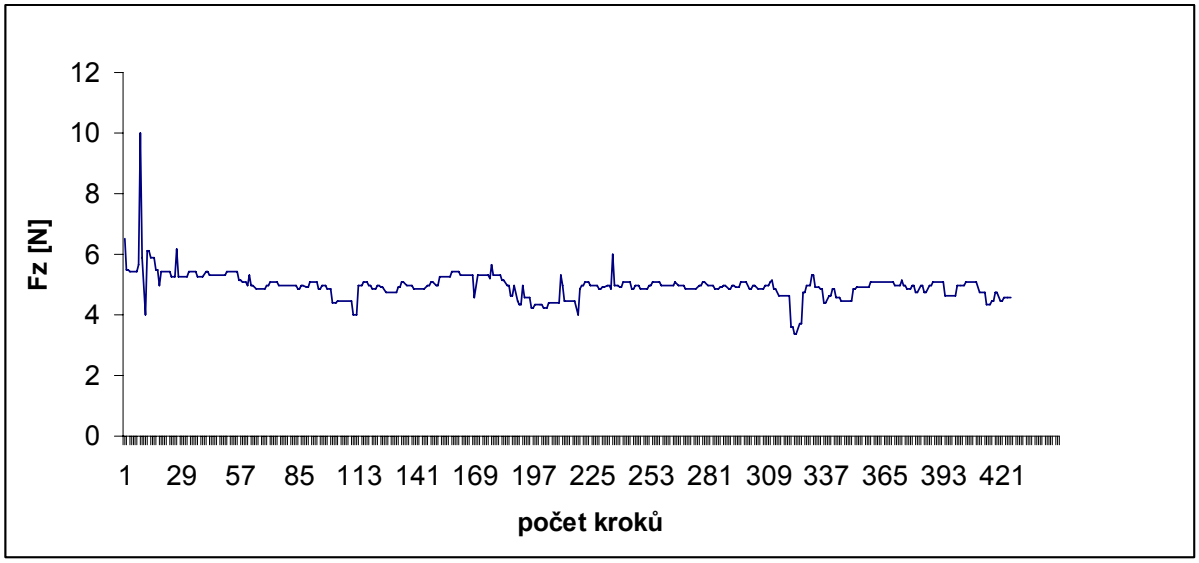
```
   $ADVANCE = 1      (…nastavení předstihu…)
 while $PosInt.y < 200   (…mezní hodnota posuvu robota v ose y )
        distance = 2 ;[mm]    (…interpoluje do vzdálenosti 2mm)
 magnitude =
      sqrt(reals[1]*reals[1] + reals[2]*reals[2] + reals[3]*reals[3])
      (…výpočet vektoru posunutí…)

setPos()
        LIN_REL relPos c_vel    (lineární relativní posuv)
 endwhile

 setPos()              (…posuv v jednotlivých osách…)
     relPos.x = 0
     relPos.y = 2
     relPos.z = distance * reals[3] / magnitude
```

5.10 Vývojový diagram broušení

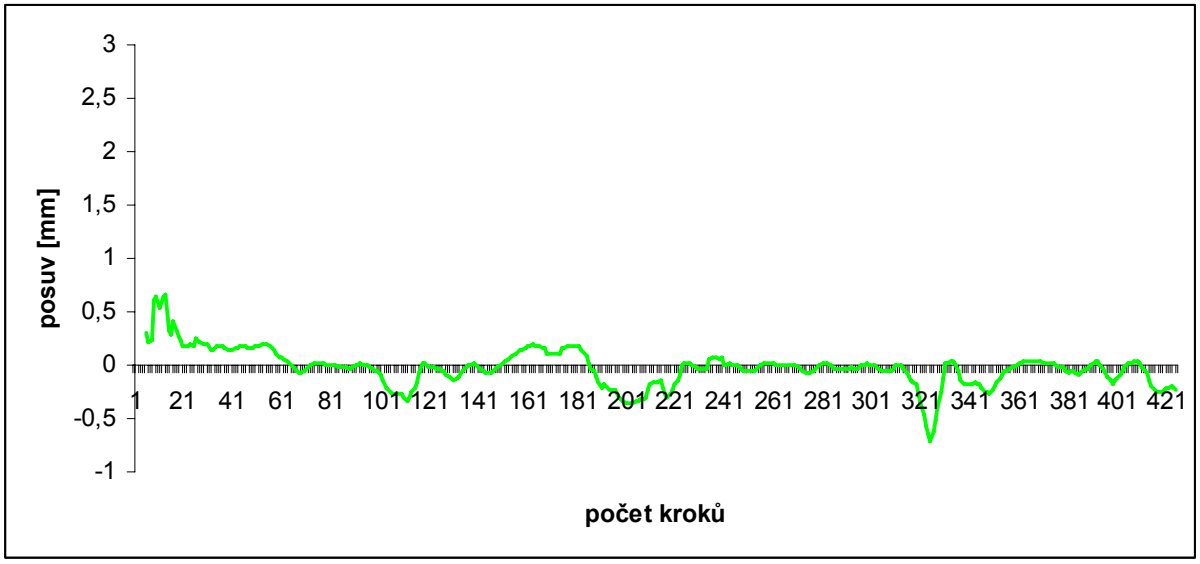


Obrázek 33 – vývojový diagram broušení

Na obrázku 33 je uveden vývojový diagram broušení s využití průmyslového robotu a FTC řízení. Pracovní cyklus robotu začíná v počáteční poloze HOME. Z polohy HOME najede rychloposuvem s obrobkem do pracovní polohy. (pracovní poloha se nachází v těsné blízkosti brousícího nástroje). Poté obrobek plynule najede pracovním posuvem na brusný nástroj (fáze broušení). Kontaktní síla mezi nástrojem a obrobkem je v průběhu broušení udržovaná na konstantní hodnotě. Pokud tato síla přesáhne dovolenou hodnotu z důvodu kolize mezi nástrojem a obrobkem, robot najede zpět do polohy HOME. Pracovní cyklus se opakuje. Konec pracovního cyklu končí v poloze HOME.



Obrázek 34 - Graf vyčtené síly ze senzoru



Obrázek 35 - Graf hodnot posuvu ve směru osy Z po filtraci a regulaci

6. Závěr

Cílem diplomové práce bylo seznámit se s využitím FTC řízení průmyslových robotů v oblasti dokončovacích technologií broušení a leštění, jeho výhodami a nevýhodami.

Dnešní využití této metody v průmyslové výrobě není stále doceněno, přestože jde o vhodný a ekonomický způsob dosažení stálé kvality a flexibility ve výrobním procese. Předpokládá se, že v následující dekádě budou hlavními důvody k zavádění této technologie právě ekonomické aspekty a stále zvyšující se požadavky na kvalitu. Technologie dokončování s využitím průmyslových robotů se tak stane jednou z nejpoužívanějších robotických aplikací.

Teoretická část dále pojednává o FTC senzoru Schunk 050-80-V, jeho vlastnostech a možnostech komunikace s robotem KUKA KR3.

Původním požadavkem zadání diplomové práce bylo použití robotu KUKA KR 15/2, který však není k dispozici z důvodu rekonstrukce dílen.
Praktická úloha byla proto řešena na náhradním robotu KUKA KR3 jako zjednodušený model broušení. Navržená koncepce řešení FTC řízení je založena na použití PLC pro komunikaci mezi senzorem a průmyslovým robotem. Ideálním řešením této komunikace by mohlo být přímé propojení např. sběrnicí DeviceNet.
Jedním z problémů z počátku bylo obtížné zajištění komunikace při vyčítání dat ze senzoru a jejího nastavení v řídícím systému PLC. Praktická část diplomové práce dále obsahuje dvě varianty možného řešení kompenzace sil na požadovanou hodnotu, z nichž byla vybrána varianta 2. s jednodušší regulací pohybu robota v ose Z.
Příloha obsahuje programové řešení praktické úlohy a rešerši možných druhů FTC senzorů, které jsou v současné době dostupné na trhu. Informace o těchto senzorech byly čerpány z katalogových listů různých výrobců.

7. Literatura a zdroje

1. PIRES, Norberto, et al. *Force/torque sensing applied to industrial robotic deburring*. Bradford : MCB UP Ltd, 2002. 22 s.

2. BOGUE, Robert. *Emeraldinsight* [online]. 2009 [cit. 2010-05-24]. Dostupné z WWW: <www.emeraldinsight.com/0143-991X.htm>.

3. NASRI, H. *Modeling and Requirements of the Automated Deburring Process*. Sweden, 1999. 168 s. Dizertační práce. Lund University.

4. FRADEN, Jacob. *Handbook of Modern Sensors*. USA : Springer, 2004. 589 s. ISBN 0387007504.

5. *Automatizace.hw* [online]. 2005 [cit. 2010-05-24]. Fóliové tenzometry - princip, provedení, použití, historie. Dostupné z WWW: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2005111201>.

6. A*term* [online]. 21. 12. 2009 [cit. 2010-05-24]. TENZOMETRICKÉ SNÍMAČE. Dostupné z WWW: <http://www.aterm.cz/Silerm.htm>.

7.*Wikipedia* [online]. 13. 2. 2008 [cit. 2010-05-24]. Tenzometr. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Tenzometr>.

8. PIERSON, James. *www.sensorland.com* [online]. 20. 3. 2010 [cit. 2010-05-24]. LOAD/FORCE CELLS. Dostupné z WWW: <http://www.sensorland.com/HowPage005.html>.

9. KOLÍBAL, Zdeněk ; KNOFLÍČEK, Radek. *Robotické systémy vyšších generací*. ÚVSSR, 2005. 207 s. Studijní opora. VUT Brno.

10. STANĚK, Václav. *Silomomentové řízení průmyslových robotů KUKA*. ÚVSSR, 2009. 46 s. Diplomová práce. VUT Brno.

11. KANG, Chul-Goo Performance Improvement of a 6-Axis Force-torque Sensor via Novel Electronics and Cross-shaped Double-hole Structure. In *INTERNATIONAL JOURNAL OF CONTROL AUTOMATION AND SYSTEMS*. South Korea : Korean Institute of Electrical Engineers, 2005. s. 469-476 .

12..*Schunk* [online]. 2008 [cit. 2010-05-24]. Dostupné z WWW: http://www.schunk.com/schunk_files/attachments/FTC_050_EN.pdf

13.*Robotics* [online]. 2007 [cit. 2010-05-24]. Sandia's six-axis force-torque sensor. Dostupné z WWW: <http://www.robotics.org/search results.cgm?searchField=sandia>.

14. DWAYNE, Perry. *Industrial Robot: An International Journal*. Bradford : MCB UP Ltd, 2002. Optimize your robot's performance by selecting the right force/torque sensor system , s. 395 - 398.

15. *Force Controlled Robots : W0 2009/020600 A1*. Rijswijk,NL : European Patent Office, 12.2.2009. 35 s.

16. *KUKA.ForceTorqueControl*. Augsburg : KUKA Roboter GmbH, 2009. 73 s.

17. *Ati* [online]. 2009 [cit. 2010-05-25]. Dostupné z WWW: <http://www.ati-ia.com/products/ft/sensors.aspx>.

18. *The DLR MIRO: a versatile lightweight robot for surgical applications* [online]. 2008 [cit. 2010-05-25]. www.emeraldinsight.com. Dostupné z WWW: <http://www.emeraldinsight.com/Insight/ViewContentServlet?Filename=Published/EmeraldFullTextArticle/Articles/0490350407.html>.

19. ZEZULKA, František. *Prostředky průmyslové automatizace*. Brno: VUTIM, 2004. 176 s. ISBN 80-214-2610-1.

20. *Hw* [online]. 2009 [cit. 2010-05-25]. RS-232. Dostupné z WWW: <http://hw.cz/rs-232>.

21. Ethernet. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 1. 7. 2005, last modified on 21. 5. 2010 [cit. 2010-05-25]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Ethernet>.

22. *Yourdictionary* [online]. 2010 [cit. 2010-05-25]. Bus network computer definition. Dostupné z WWW: <http://www.yourdictionary.com/computer/bus-network>.

23. *KUKA robotics* [online]. 2002 [cit. 2010-05-29]. KR 3 specification. Dostupné z WWW: << http://www.kuka-robotics.com/NR/rdonlyres/926CEC2C-A2C5-4537-A5C5- 05A76F6CC09C/0/kr3_de_en_fr.pdf >.>.

24. *KUKA robotics* [online]. 1996 [cit. 2010-05-29]. KR 15-2 specification. Dostupné z WWW: <http://www.kuka-robotics.com/NR/rdonlyres/B6067DF9-EA5D-4037-9080-77E7C4F59D0D/0/spez_kr6_de_en_fr.pdf>.

8. Příloha

8.1 Program

TwinCat PLC Control

```
TYPE mydata :
STRUCT
        PREFIX : BYTE;

                A : INT;
                B : INT;
                C : INT;
        Status:INT;
END_STRUCT
END_TYPE


PROGRAM Sample_PC_COM_Port
VAR
        Timer: TON;
        Send: SendString;
        SendBusy: BOOL;
        SendErrorID: ComError_t;

       MyReceiveData:ReceiveData;
        pMyPrefix:BYTE;
        LenPrefix:BYTE;
        Fc:REAL;
        Fz:REAL;
        FTC:MYDATA;


        Timeout       : TIME:=T#1s;
        Reset :BOOL;

        DataReceived        : BOOL;
        busy            : BOOL;
        Error           : ComError_t;
        RxTimeout       : BOOL;
        LenReceiveData : UDINT;
        RXbuffer        : ComBuffer;


        COMportControl: SerialLineControl;
        COMportControlError: BOOL;
        COMportControlErrorID: ComError_t;
END_VAR
```

```
Timer(IN:=TRUE, PT:=T#1ms);
IF Timer.Q OR Send.Busy THEN
        Send( SendString:= 'H',
                        TXbuffer:= TxBuffer1,
                        Busy=> SendBusy,
                        Error=> SendErrorID);
        Timer(IN:=FALSE);
END_IF


myReceiveData(
        pPrefix:=ADR( pMyPrefix),
        LenPrefix:=,
        pSuffix:= ,
        LenSuffix:= ,
        pReceiveData:=ADR(FTC) ,
        SizeReceiveData:=9,
        Timeout:= T#1s ,
        Reset:= FALSE,
        RXbuffer:=RxBuffer1 ,
        DataReceived=>DataReceived ,
        busy=>busy ,
        Error=> Error,
        RxTimeout=>RxTimeout ,
        LenReceiveData=> LenReceiveData);
Fc := INT_TO_REAL (C);
Fz:= Fc /32;

COMportControl(  Mode:= SERIALLINEMODE_PC_COM_PORT,
                        pComIn:= ADR(COMin_COMport),
                        pComOut:= ADR(COMout_COMport),
                        SizeComIn:= SIZEOF(COMin_COMport),
                        TxBuffer:= TxBuffer1,
                        RxBuffer:= RxBuffer1,
                        Error=> COMportControlError,
                        ErrorID=> COMportControlErrorID );
```

Program Regulátor

```
PROGRAM PIREGULATOR
VAR
        fSetpointValue: REAL := 5;
        Fz: REAL;
        fManSyncValue: REAL;
        bSync : BOOL;

        FzOut : REAL;
        bHold : BOOL;
```

```
        eMode: E_CTRL_MODE;
        stCTRL_PI_PARAMS: ST_CTRL_PI_PARAMS;

        eErrorId: E_CTRL_ERRORCODES;
        bError : BOOL;
        bARWactive: BOOL;


        fbCTRL_PI: FB_CTRL_PI;
        bInit: BOOL:= TRUE;

END_VAR

IF bInit
THEN
        stCTRL_PI_PARAMS.tCtrlCycleTime:= T#2ms;
        stCTRL_PI_PARAMS.tTaskCycleTime:= T#2ms;
        stCTRL_PI_PARAMS.tTn:= T#1ms;
        stCTRL_PI_PARAMS.fKp:= 2;
        stCTRL_PI_PARAMS.fOutMaxLimit:=   400;
        stCTRL_PI_PARAMS.fOutMinLimit:= - 400;

eMode   := eCTRL_MODE_ACTIVE;
bInit      := FALSE;
END_IF



fbCTRL_PI(  fSetpointValue := fSetpointValue,
            fActualValue  := Fz,
            fManSyncValue := fManSyncValue,
            bSync := bSync,
            eMode:= eMode,
            bHold  := bHold,
            stParams:= stCTRL_PI_PARAMS,
            fOut=> FzOut,
            bARWactive=> bARWactive,
            eErrorId=> eErrorId,
            bError => bError);
```

Program robota (KRL)

```
DEF FTC_02()

    --- Initialization ---
BAS (#INITMOV,0)
BAS (#BASE,2 )
BAS (#TOOL,2 )

$ADVANCE = 1

while $PosInt.y < 200
                distance = 2 ;[mm]
                magnitude = sqrt(reals[1]*reals[1] + reals[2]*reals[2] + reals[3]*reals[3])
                setPos()
                LIN_REL relPos c_vel
          endwhile
END

DEF setPos()
            relPos.x = 0
            relPos.y = 2
            relPos.z = distance * reals[3] / magnitude
END
```

8.2 Přehled FTC senzorů

FTC senzory můžeme dělit podle maximálního dovoleného zatížení (souvisí s velikostí senzoru) nebo podle typu snímání působící síly. Nejčastěji se používá křemíkových tenzometrů (firmy např. FUTEK, ATI, DACELL, AMTI, JR3, atd.) Uvedené informace včetně obrázků jsou čerpány z internetových stránek výrobců FTC senzorů.

FUTEK

Společnost FUTEK Advanced Sensor Technology, Inc. se sídlem v Kalifornii je předním americkým výrobcem a dodavatelem moderních siloměrů, silových a momentových snímačů, tlakových snímačů, digitálních displejů a senzorických systémů pro tenzometry využívající technologií tenkých vrstev.
Firma působí v mnoha oblastech průmyslu a vývoje, mezi něž patří např. :

- robotika (automatizace)
- automobilový průmysl
- letecký průmysl
- zdravotnictví
- kosmický průmysl, atd.

Futek MTA500

Na obrázku je uveden tříosý FTC snímač Futek řady MTA500 nabízející řešení pro měření momentu v ose X, Y a síly Fz. Snímače řady MTA se vyrábějí taky ve variantách - eloxovaný hliník nebo nerezová ocel.

Parametry snímačů MT500:

- kapacita (max. Mx,My = 10N-m, max. Fz = 1kN) až (max. Mx, My = 100N-m, max. Fz = 20kN)
- jmenovitý výkon: 0,5-1,5 mV
- bezpečné přetížení: 150% jmenovitého výkonu
- nulové vyvážení: ± 0,2% jmenovitého výkonu
- pracovní teplota: - 50 až 93°
- konektory: 3x PT02A-10-6P
- nelinearita Mx,y: ± 0,5% jmenovitého výkonu
- nelinearita Fz: 0,2% jmenovitého výkonu

ATI

ATI Industrial Automation je přední světový výrobce a vývojářská společnost soustředící se na robotické koncové efektory, dále automatické výměníky nástrojů, silomomentové snímací systémy, robotické odjehlovcí nástroje, robotické kolizní senzory, atd.

V současné době tato firma nabízí přes 20 druhů šestiosých FTC senzorů měřící složky sil a momentů ve všech osách.
Mezi hlavní části ATI senzorických zařízení patří: snímač, odstíněný high-flex kabel a systém pro sběr dat, Ethernet/DeviceNet rozhraní nebo FTC controller.

Typy FTC senzorů:

Nano 17 – Nejmenší na trhu dostupný šestiosý snímač na světě (s velmi jemným rozlišením 0,319 gramů) s využitím zejména ve oblastech výzkumu např: stomatologie, robotická chirurgie, robotické protézy, atd.

ATI Nano17

Nano 25 IP65 / IP68 – Jeden z nejmenších šestiosých snímačů na trhu. Oproti předchozímu senzoru Nano17 má nepatrně větší rozměry a dovolené zatížení v ose Z. IP65 – ochrana proti vlhkosti, IP68 (4m) – odolnost proti vodě do hloubky 4m. Nano 25 nachází uplatnění např. v robotické chirurgii, vlhkém prostředí, strojní montáži, atd.

Nano25 IP65 / IP68

Nano 43 – Jeden z nejmenších plochých FTC snímačů na trhu. Konstrukce snímače je výjimečná průchozí dírou uprostřed snímače, která umožňuje např. vedení kabelu od koncového efektoru skrz tuto středovou díru.
Oblast použití: telerobotika, robotická chirurgie, výzkum v oblasti robotických končetin

ATI Nano43

Delta IP60 – Senzor s IP60 ochranou proti prachu, případně IP65 a IP68(10m) proti vodě. Další vlastností je ochrana zařízení proti přetížení. Oblast použití: testování produktů, strojní montáž, aplikace broušení, leštění, atd.

ATI Delta IP60

Omega 331 – Je největší šestiosý senzor od firmy ATI Industrial Automation vyroben z vysoce pevnostní nerezové oceli využívaný v aplikacích např.: telerobotika, silová zpětná vazba, testování produktů, atd.

ATI Omega 331

AMTI

Advanced Mechanical Technology, Inc je americká společnost působící přes 25 let ve výzkumu a vývoji speciálního vybavení strojů a měřícího zařízení pro lékařské a průmyslové aplikace. Mezi hlavní oblasti vývoje a výzkumu této firmy patří šestiosé FTC senzory, které nacházejí využití např. v kosmické průmyslu (NASA, orbitální experimenty), letectví (testování podvozků,atd.), robotice (silomomentové řízení), lodním průmyslu (vyšetřování výkonu lodního šroubu, atd.), výrobě (broušení, optimalizace řezného procesu, atd.), automobilový průmysl (vývoj pneumatik, crash testy, testování aerodinamiky), další aplikace (tribologie, výzkum při simulaci zemětřesení, výzkum v ortopedii, atd.)

Druhy senzorů:

MC2.5A – kompaktní šestiosý FTC vodotěsný senzor, který je vyroben z nerezové oceli. Použití: lodní průmysl, robotika, atd.
Parametry:

- rozměry: 7x Ø6,4cm
- váha: 0,9Kg
- teplotní rozsah: -18 to 52 ° C
- snímací prvky: tenzometrický můstek
- šesti kanálový výstup

AMTI - MC2.5A

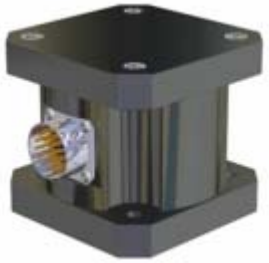
	Fx	Fy	Fz	Jednotka	Mx	My	Mz	Jednotky
Kapacita	2225	2225	4450	N	56	56	56	N-m
Citlivost	0.7191	0.7191	0.18202	mv/v-N	25.6764	25.6764	25.6764	mv/v-N-m
Vlastní frekvence	-	-	-	Hz	-	-	-	Hz
Tuhost $\times 10^5$	175.33	175.33	3155.94	N/m	-	-	0.23	N-m/rad
Rozlišení	0.17	0.17	0.671	N	0.005	0.005	0.005	N-m

Tabulka 1 - AMTI - MC2.5A

MC 3A – Kompaktní šestiosý hliníkový snímač s obdélníkovou pracovní plochou. Použití: biomechanika, ergonomika, robotika, atd.

Parametry:

- rozměry: 7,6x7,6x7,6cm
- váha: 0,9Kg
- teplotní rozsah: -18 až 52 ° C
- snímací prvky: tenzometrický můstek
- šesti kanálový výstup



AMTI - MC 3A

	Fx	Fy	Fz	Jednotka	Mx	My	Mz	Jednotka
Kapacita	223	223	445	N	11	11	6	N-m
Citlivost	5.39326	5.39326	1.34831	mv/v-N	265.61789	265.61789	212.49431	mv/v-N-m
Vlastní frekvence	-	-	-	Hz	-	-	-	Hz
Tuhost x 10^5	19.29	19.29	409.92	N/m	-	-	0.03	N-m/rad
Rozlišení	0.023	0.023	0.091	N	-	-	0.001	N-m

Tabulka 2- AMTI – MC 3A

MC818 – Speciální typ šestiosého FTC senzoru, obdélníkového tvaru pracovní plochy, která je vyrobena z hliníku. Základna snímače má šest T-drážek sloužící k upnutí např. na pracovním stole. Důležitou vlastností je chlazení kapalinou. Používá se při obrábění, broušení, v robotice, atd.

Parametry:

- rozměry: 20,3x45,7x7,9 cm
- váha: 20,4kg
- teplotní rozsah: -18 až 52 ° C
- snímací prvky: tenzometrický můstek
- šesti kanálový výstup

AMTI – MC 818

	Fx	Fy	Fz	Jednotka	Mx	My	Mz	Jednotka
Kapacita	2225	2225	4450	N	452	904	508	N-m
Citlivost	0.67416	0.67416	0.17079	mv/v-N	1.23955	3.54157	4.9582	mv/v-N-m
Vlastní frekvence	400	400	400	Hz	-	-	-	Hz
Tuhost x 10^5	210.4	210.4	876.65	N/m	-	-	-	N-m/rad
Rozlišení	0.181	0.181	0.715	N	0.098	0.034	0.025	N-m

Tabulka 3- AMTI – MC 818

MC5 – Kompaktní šestiosý senzor s hliníkovým tělem, který se používá např. pro testování strojů, ve výrobních procesech, robotice, apod.

Parametry:

- rozměry: 12,7x Ø12,6 cm
- váha: 3,2kg
- teplotní rozsah: -18 až 52 ° C
- snímací prvky: tenzometrický můstek
- šesti kanálový výstup

AMTI - MC5

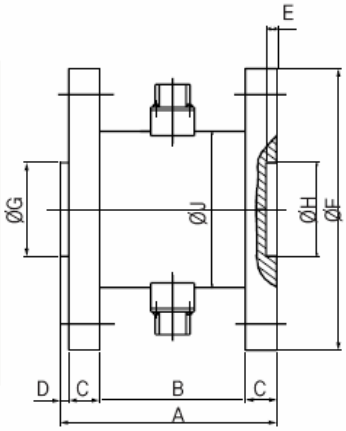
	Fx	Fy	Fz	Jednotka	Mx	My	Mz	Jednotka
Kapacita	2781	2781	5563	N	212	212	141	N-m
Citlivost	0.86292	0.86292	0.21573	mv/v-N	19.54948	19.54948	11.89968	mv/v-N-m
Vlastní frekvence	-	-	-	Hz	-	-	-	Hz
Tuhost $x\ 10^5$	219.16	219.16	1095.81	N/m	0.88	0.88	0.59	N-m/rad
Rozlišení	0.13	0.13	0.521	N	0.006	0.006	0.009	N-m

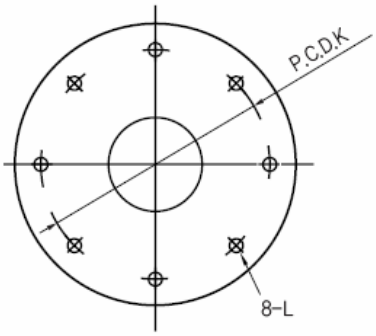
Tabulka 4- AMTI – MC5

DACELL

Méně známá korejská společnost s dvacetiletou zkušeností ve výrobě a vývoji siloměrů, snímacích senzorů a měřícího zařízení, které nacházejí uplatnění v mnoha odvětvích průmyslu.Fy Dacell vyrábí kolem 40 druhů silových a momentových senzorů.

Dacell MC 32 – Dvouosý FTC senzor určený ke snímání momentu a axiální síly. Jednoduchá konstrukce je opatřena přírubami pro snadné uchopení k zařízení. MC 32 nachází uplatnění např. u strojů pro testování vlastností různých materiálů.





Rozměry

jednotky:mm

MODEL	KAPACITA	A	B	C	D	E	F	G (g6)	H (H7)	J	K	L	VÁHA
MC32-200-20kN	200N-m / 20kN	104	70	15	4	5	135	45	45	75	110	Φ6.5	4.5kg
MC32-500-50kN	300N-m / 50kN	132	80	24	4	5	170	50	50	89	135	Φ8.5	9.5kg
MC32-1K-100kN	1kN-m / 100kN	174	110	30	4	5	185	50	50	89	140	Φ10.5	14kg
MC32-2K-200kN	2kN-m / 200kN	225	135	43	4	5	250	50	50	89	200	Φ10.5	33kg

Tabulka 5 - Dacell MC 32

JR3, Inc.

Původní název AdaptTech, je americkou firmou zabývající se od roku1980 vývojem technologií ke snímání sil a momentů. V současné době má tato společnost registrovány 3 patenty u US Patent Office.

50M31A3 – Je šestiosý snímač řady M určený pro aplikace v průmyslové robotice. Tělo je vyrobeno ze slitiny hliníku. Tento typ senzoru má v sobě zabudován zesilovač, analog / digitální převodník a paměť EEProm s daty ke kalibraci.

Parametry:

- rozměry: 31mmx Ø50 mm
- váha: 140g
- snímací prvky:
  tenzometrický Wheatstoneův můstek
- kapacita: Fx,y =100 N,
  Fz = 200 N, Mx,y,z = 5 N-m

JR3 - 50M31A3

75E20A – Je šestiosý FTC snímač výrobní řady E s vysokou přesností, určený pro náročné aplikace. Tělo je vyrobeno ze slitiny hliníku nebo nerezové oceli. Tento typ senzoru má v sobě zabudován zesilovač a paměť EEProm a analogový(+5V až -5V nebo +10V až -10V) případně analog / digitální výstup.

Parametry:

- Rozměry: 51mm x Ø190 mm
- váha: 3,4kg
- snímací prvky: tenzometrický Wheatstoneův můstek
- kapacita: Fx,y =2000 N, Fz = 4000 N, Mx,y,z = 400 N-m

JR3 - 75E20A

8.3 Fotografie praktické úlohy

Obrázek 36 - Fotografie pracoviště

Obrázek 37 - Fotografie pracoviště