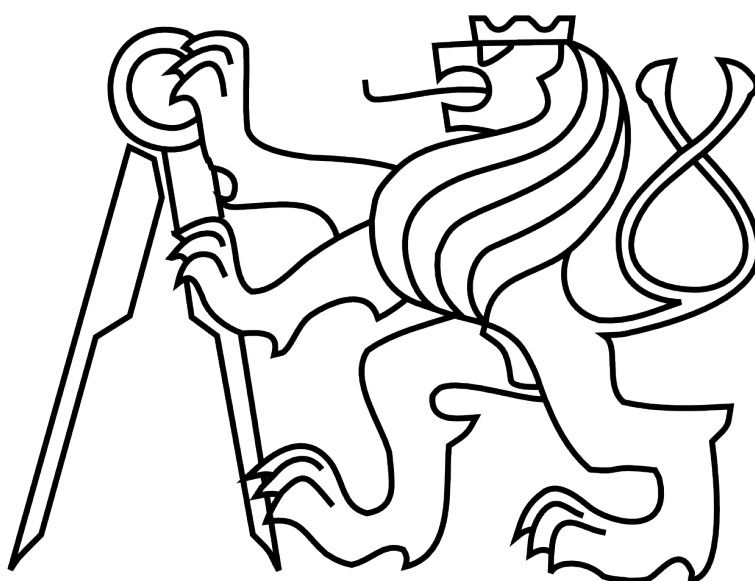


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

# Diplomová práce



Jan Kubeš

**Využití 6 osého silového senzoru pro řízení průmyslového  
manipulátoru**

Katedra kybernetiky

Vedoucí projektu: **Ing. Vladimír Smutný**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

**Student:** Bc. Jan K u b e š

**Studijní program:** Kybernetika a robotika (magisterský)

**Obor:** Robotika

**Název tématu:** Využití šestiosého silového senzoru pro řízení průmyslového manipulátoru

### Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s šestiosým snímačem síly firmy ATI Industrial Automation typu Mini 45 a s robotem Clopema.
2. Identifikujte parametry snímače, začleňte ho do celého systému tak, aby bylo možno měřit externí síly působící na chapadlo robota.
3. V rámci možností daných vlastnostmi senzoru a robota implementujte následující funkčnosti:
  - a. detekce kontaktu chapadla robota s okolím, např. pracovním stolem,
  - b. detekce zdvižení oděvu z podložky,
  - c. napnutí oděvu drženého oběma chapadly robota Clopema.
4. S implementovanými algoritmy proveďte experimenty a výsledky vyhodnoťte.

### Seznam odborné literatury:

- [1] Whitney, D. E., "Historical perspective and state of the art in robot force control," Robotics and Automation. Proceedings. 1985 IEEE International Conference on , vol.2, pp.262-68, Mar 1985.
- [2] Hoyt, H.; Marchese, A.: Force Sensing and Haptic Feedback for Robotic Telesurgery. WPI, April 29th, 2010.
- [3] Mack, I.; Ferguson, S.; McMenemy, K.; Potts, S.; Dick, A., "Interactive force sensing feedback system for remote robotic laparoscopic surgery," Haptic Audio visual Environments and Games, 2009. HAVE 2009. IEEE International Workshop on , pp.58-63, 7-8 Nov. 2009.

**Vedoucí diplomové práce:** Ing. Vladimír Smutný

**Platnost zadání:** do konce letního semestru 2014/2015

L.S.

doc. Dr. Ing. Jan Kybic  
**vedoucí katedry**

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
**děkan**

V Praze dne 10. 1. 2014

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne.....

.....

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Vladimíru Smutnému za odborné vedení projektu a za pomoc při řešení problémů. Dále bych chtěl poděkovat celému týmu projektu Clopema a to hlavně Vladimírovi Petrikovi a Liborovi Wágnerovi, za příležitost participovat na projektu. Především však děkuji svým rodičům, kteří mne neustále podporovali ve studiu.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá využitím silového senzoru pro práci průmyslového manipulátoru. Dále pojednává o nalezení a odstranění zdrojů chyb, případně jejich filtraci. Výsledky byly ověřeny aplikacemi s manipulací s oděvy. Na základě zjištěných údajů je možné silový senzor využít i při manipulaci s oblečením a používá se v projektu Clopema.

## **Abstract**

This thesis is dealt with usage of force sensor for industrial manipulator work. It's also dealt with finding and eliminating sources of errors, or their filtration. The results were validated by applications with the handling of garments. Based on the results it is possible to use force sensors for handling clothes and is used in the project Clopema.

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Technické prostředky</b>	<b>2</b>
2.1 Robot Clopema . . . . .	2
2.2 Robot Operating System . . . . .	2
2.3 Silový senzor . . . . .	3
<b>3 Zdroje rušivých signálů, jejich odstranění a filtrace</b>	<b>8</b>
3.1 Elektrické rušení . . . . .	8
3.2 Mechanické kmity . . . . .	8
3.3 Účinky světla na silový senzor . . . . .	18
3.4 Teplota . . . . .	21
3.5 Eliminace vlivu tíhy chapadla . . . . .	24
3.5.1 Výpočet parametrů chapadla . . . . .	24
3.5.2 Experimenty s reálným senzorem . . . . .	28
<b>4 Aplikace senzoru</b>	<b>34</b>
4.1 Náraz . . . . .	34
4.2 Natažení . . . . .	35
4.3 Zdvih . . . . .	36
4.4 Vedení . . . . .	38
<b>5 Závěr</b>	<b>40</b>
<b>6 Literatura</b>	<b>41</b>

# 1 Úvod

Průmyslová robotika používala donedávna pouze málo senzorů, které by robotu poskytovaly informaci o jeho působení. Většina montážních linek ke své činnosti využívá jen svoji paměť, kde cyklicky vykonávají pouze jednu úlohu. Ke své práci potřebují hlavně senzory, které udávají, kdy mohou začít s prací, například když přijede další výrobek a je připraven na opracování.

Poměrně novinkou v robotice je využití silového senzoru. Tyto senzory se používají v robotice tehdy, je-li třeba informace o manipulaci robota s prostředím. Například se často používá v některých odvětvích průmyslu u obráběcích strojů či kompletovacích strojů, ale i v lékařství, kde jsou používány pro dálkové řízení robotů, využívajících haptické zpětné vazby [2].

Clopema, aneb Clothes Perception and Manipulation (CloPeMa), je tříletý EU-FP7 projekt zabývající se vnímáním a manipulací se všemi druhy oblečení. V projektu je použit robotický manipulátor, který využívá šestiosého silového senzoru ATI Mini45 od firmy ATI Industrial Automation, jenž vyvíjí především doplňky pro robotická chapadla.

Pro použití senzoru je nejprve třeba proměřit jeho vlastnosti, aby se dal co nejlépe použít pro zlepšení efektivity robotu. Cílem práce je zjištění a odstranění rušivých signálů, aby mohl být senzor použit pro práci v projektu Clopema.

## 2 Technické prostředky

V této kapitole se blíže seznámíme s robotickým manipulátorem projektu Clopema a s jeho cíli. Další část se zabývá robotickým operačním systémem, jímž je robot ovládán. Především je zde popsán silový senzor ATI Mini 45 a jeho vnitřní struktury.

### 2.1 Robot Clopema

K manipulaci s oblečením je použito dvou manipulátorů MA1400 od firmy YASKAWA Motoman, které jsou zakončeny dvojicí chapadel, jež mohou uchopit látku a skládat ji podobně, jako člověk. Jeho součástí je robotická hlava, která je tvořena dvojicí digitálních kamer (Nikon D5100). Robotická hlava umožňuje tvořit 3D point cloud<sup>1</sup> o velkém rozlišení. Dále je robot vybaven trojicí RGB-D kamer, které zajišťují vidění a slouží k určení důležitých bodů pro uchopení.

V původním projektu Clopema se neuvažovalo o použití silového senzoru k manipulaci s oděvy. Při natahování oblečení je obtížné určit, kdy je již dostatečně naplé a to pouze s pomocí kamer. Tuto činnost teď obstarává silový senzor, který je upevněn na přírubě manipulátoru a je na něj namontováno chapadlo. Jeho zečleněním do systému získáváme nová data, která usnadňují úlohy typu zdvihnutí oblečení, jeho natažení, detekování nepředpokládanému nárazu robota nebo manuálnímu navádění robota.

### 2.2 Robot Operating System

Jedná se o Open Source Framework (middleware), který slouží pro práci s různými druhy robotů. Jeho součástí je řada nástrojů, knihoven a pravidel, které jsou potřeba pro různé aplikace v odvětvích robotiky [10].

ROS pracuje s mnoha programovacími jazyky, avšak celé jeho jádro se rozděluje na následující komponenty.

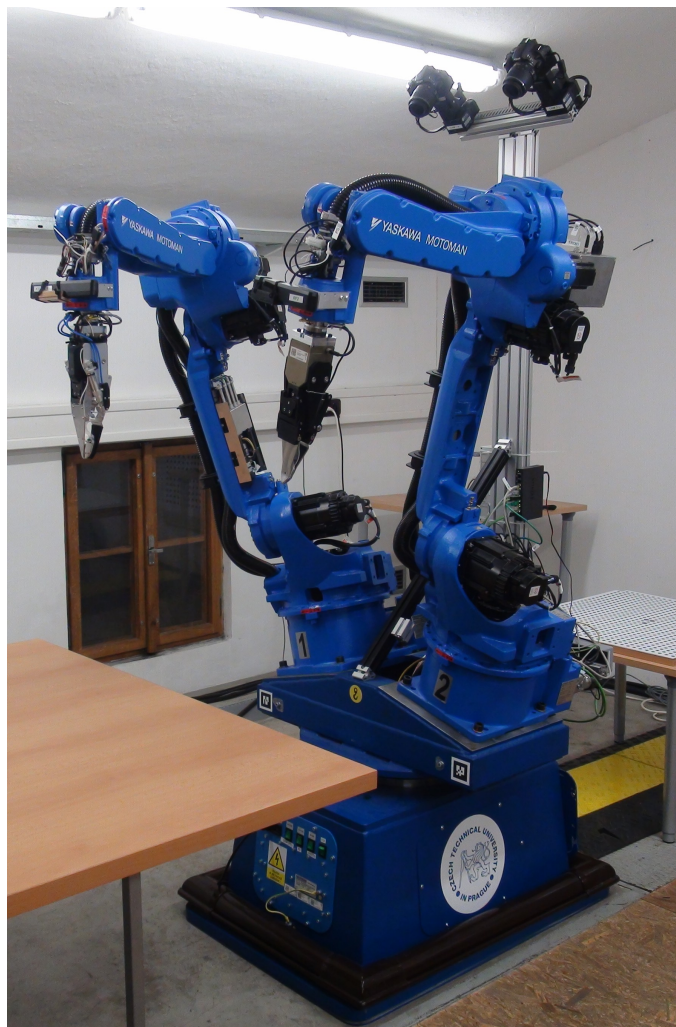
- **Uzely (nodes)**- jednotka, která obhospodařuje výpočty. Každý uzel má na starost jednu věc, například jeden uzel řídí laserový paprsek a jiný ovládá motory kol robota [10].
- **Zprávy (messages)** - datová struktura pro komunikaci uzlů [10].
- **Topiky (topics)**- pojmenované kanály, přes které si uzly vyměňují zprávy, například silový senzor neustále vysílá změřená data, ke kterým má robot přístup a může se jimi řídit při plánování nové akce [10].

---

<sup>1</sup>Point cloud je množina datových bodů v určitém souřadnicovém systému. 3D point cloud přiřadí každému bodu souřadnice v prostoru a celek tvoří povrch předmětu



- **Služby (Services)** - pojmenovaná synchronizovaná komunikace, může být pouze jediná komunikace s určitým jménem [10].



Obrázek 1: Robot CloPeMa ve výchozí pozici [4]

### 2.3 Silový senzor

Hlavním tématem této práce je právě silový senzor, který poskytuje robotu další informaci o objektech držených chapadlem. Tato podkapitola se věnuje podrobně právě silovému senzoru ATI Miny 45 (obrázek 2) od firmy ATI Industrial Automation. Jedná se o víceosý silový a momentový snímač, který současně měří síly  $F_X$ ,  $F_Y$ ,  $F_Z$  a momenty  $T_X$ ,  $T_Y$ ,  $T_Z$ .

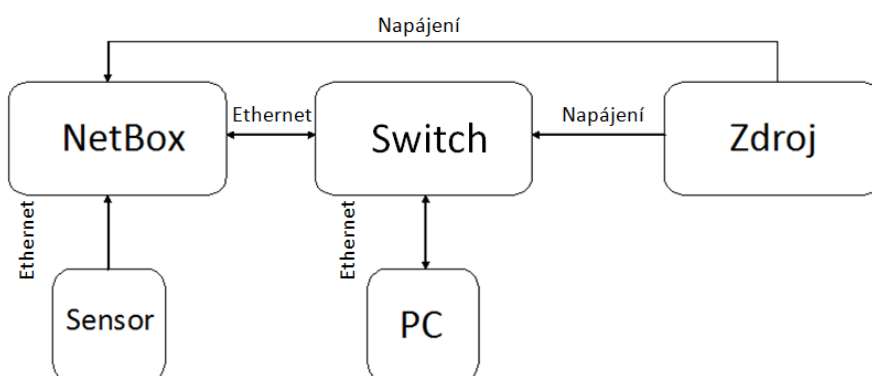
Ze senzoru samotného vede převodníkový kabel, který je u typu Mini 45 pevně připojen k senzorovým převodníkům. Zajišťuje napájení senzoru a přenášení signálu, který převádí sílu a moment do elektrického signálu. Převodníkovým kabelem je senzor spojen s NetBoxem. Jedná se o hliníkovou krabičku, ve které je zařízení zajišťující napájení, ovládání a komunikaci senzoru s

počítačem. V projektu Clopema se využívá komunikace počítače s NetBoxem po Ethernetu. Samotný senzor může být napájen dvěma způsoby. První je napájení PoE (Power over Ethernet), ale v našem případě je využit externí stejnosměrný zdroj, konkrétně zdroj BKE (JS-150-120/DIN2), který napájí i switch propojující komunikaci mezi počítačem, robotem a senzorem. Celkové zapojení je zobrazeno na obrázku 3. Zdroj dodává 12V-10A a je upevněn v podstavci robotu.

Parametry senzoru lze nastavit ve webovém prostředí, jde určit například IP adresa, pod kterou bude senzor s počítačem komunikovat, frekvence posílání signálu, ale i jednotky, v kterých bude senzor měřit.



Obrázek 2: Silový senzor ATI Mini45 [5]



Obrázek 3: Zapojení silového senzoru

Snímání sil a momentů je zajištěno tenzometry. Princip měření sil funguje v závislosti třetího Newtonova zákona (zákon akce a reakce) a Hookova zákona

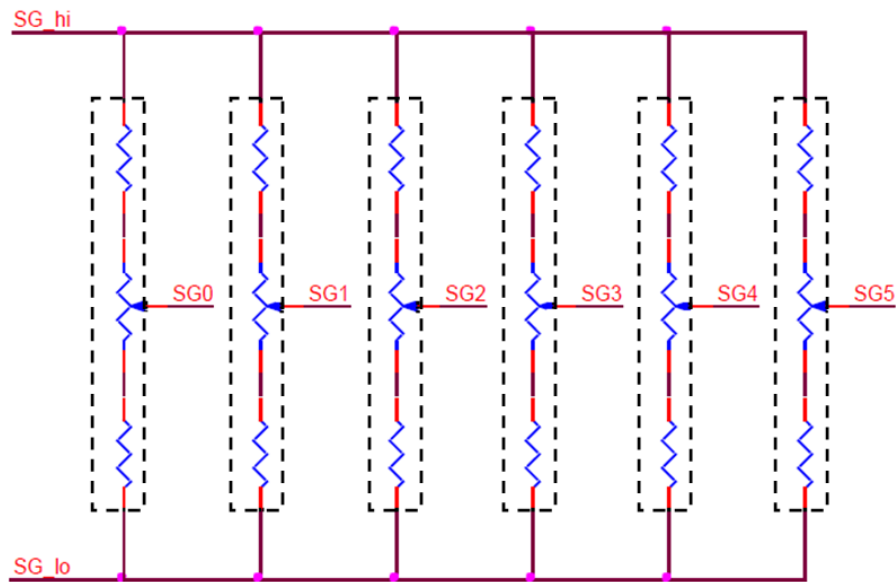
$$\sigma = \varepsilon E, \quad (1)$$

kde  $\varepsilon$  je poměrné délkové prodloužení,  $E$  je Youngův modul pružnosti v tahu a  $\sigma$  je mechanické napětí. Polovodičové tenzometry jsou připevněny k nosníkům a jsou považovány za odpory citlivé na mechanické napětí. Odpor tenzometru se mění v následující závislosti

$$\Delta R = S_a R_0 \varepsilon, \quad (2)$$

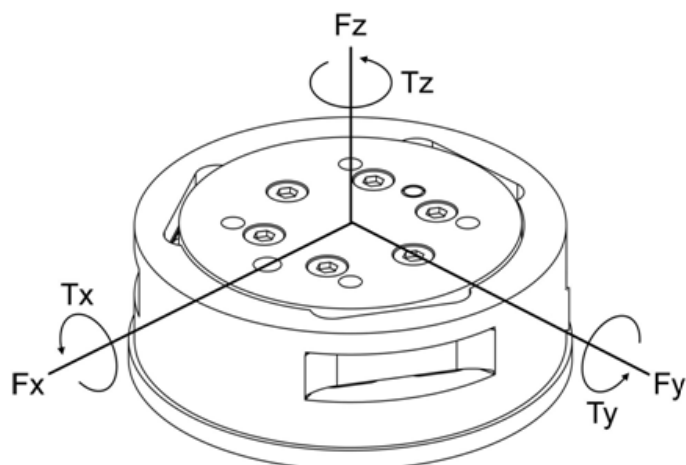
kde  $\Delta R$  je změna odporu polovodičového tenzometru,  $S_a$  je měřící činitel tenzometru,  $R_0$  je odpor nezátíženého tenzometru a  $\varepsilon$  je poměrné délkové prodloužení [5].

Celý senzor je tvořen šesti polomůstkami, kde každý polomůstek obsahuje dvojici tranzistorů, které měří zátěž [6]. Páry tenzometrů fungují jako napěťový dělič produkující elektrický signál odpovídající zatížení páru. Schématické zapojení je zobrazeno na obrázku 4.



Obrázek 4: Vnitřní zapojení tenzometrických polomůstek [6]

Důležitou součástí NetBoxu je i řada kalibrací a filtrů dolní propusti, které jdou pomocí webového prostředí nastavovat a tím ovlivňují citlivost senzoru. Možné kalibrace senzoru jsou zobrazeny v tabulce 1, kde je vidět, jak kalibrace ovlivňuje rozsah měřené síly i citlivost [5].

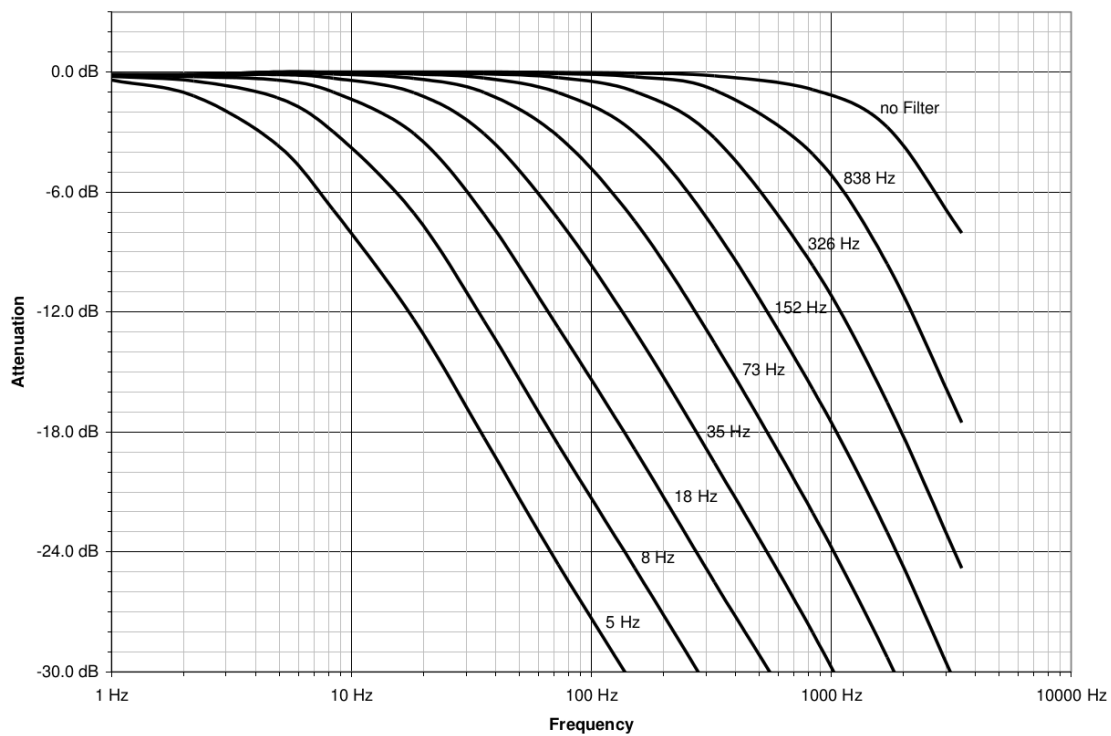


Obrázek 5: Znázornění měřících os senzoru [6]

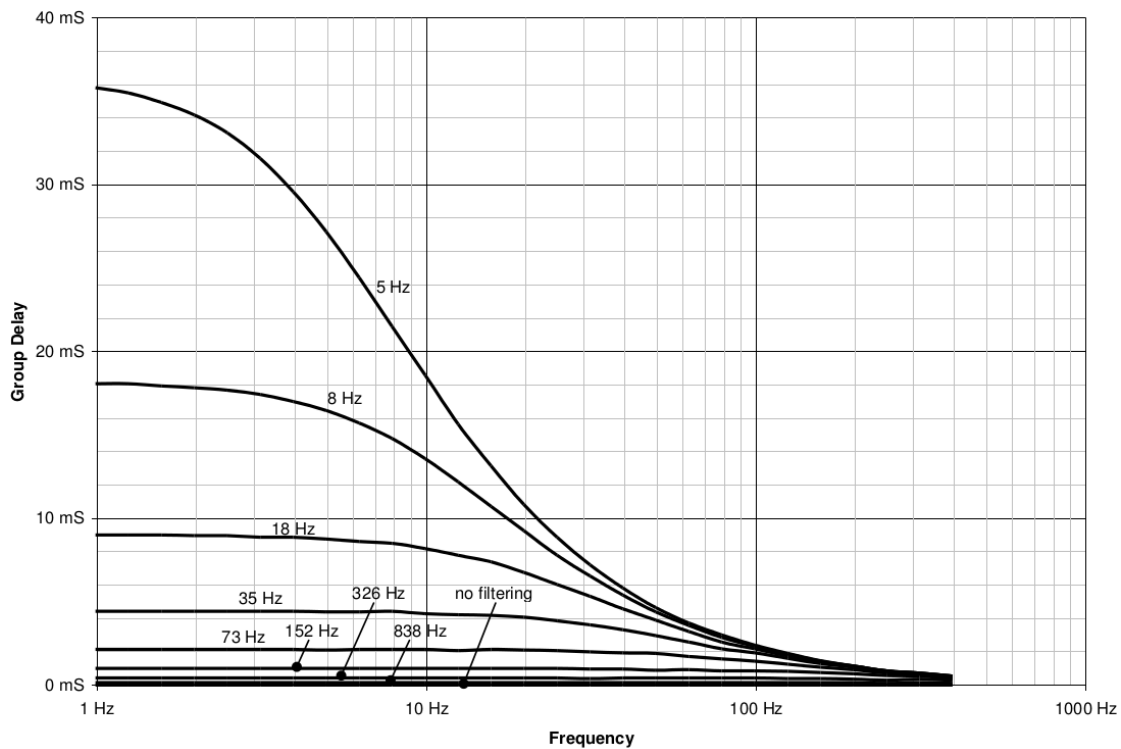
	Snímací rozsah				Rozlišení			
	Fx,Fy	Fz	Tx,Ty	Tz	Fx,Fy	Fz	Tx,Ty	Tz
Kalibrace	[N]	[N]	[Nm]	[Nm]	[N]	[N]	[Nm]	[Nm]
SI-145-5	145	290	5	5	1/16	1/16	1/752	1/1504
SI-290-10	290	580	10	10	1/8	1/8	1/376	1/752
SI-580-20	580	1160	20	20	1/4	1/4	1/188	1/376

Tabulka 1: Kalibrace silového senzoru [5]

Výrobce udává hodnoty útlumů a zpoždění dat ze senzoru, pokud jsou použity filtry dolní propusti, které lze nastavit ve webovém prostředí. Závislost útlumů na použitých filtrech je znázorněna v obrázku 6 a závislost zpožděných dat, v závislosti na použitých filtrech, je zobrazena v obrázku 7.



Obrázek 6: Závislost útlumu dat na frekvenci s použitím dolnoproputstního filtru [5]



Obrázek 7: Závislost zpoždení dat na frekvenci s použitím dolnoproputstního filtru [5]

### 3 Zdroje rušivých signálů, jejich odstranění a filtrace

V této kapitole jsou popsány pokusy a práce se samotným silovým senzorem. Jsou zde uvedeny problémy, které se při práci se senzorem objevily a jejich řešení. Všechny pokusy byly uskutečněny za účelem zlepšení stability dat senzoru, omezení vlivů prostředí, zvyšujících jeho chybovost. Hlavním cílem však byla eliminace vlivu tíhy chapadla, neboť nechceme silovým senzorem měřit síly a momenty působící v senzoru (v zápěstí robotu), ale v prstech chapadla.

#### 3.1 Elektrické rušení

Prvními pokusy se silovým senzorem byly pokusy s vlivem různých zdrojů a zapojení senzoru a provázání komunikace s počítačem. Tyto pokusy byly prováděny se senzorem položeným na stole. Testoval se vliv společného uzemění NetBoxu, switche a zdroje. Testy provedl student Matej Murgaš [8]. Z různých použitých zdrojů pro napájení senzoru vyšel nejlépe laboratorní zdroj Mesit 40V-10A. Pro napájení senzoru se však používá zdroj BKE (JS-150-120/DIN2), který se nachází v podstavci robotu a napájí senzor napětím 12V.

Dalším výstupem této práce byl vliv motorů na senzor. Murgaš ve své zprávě uvádí, že vnitřní obvody robotu mají zanedbatelný vliv na silový senzor.

Dále byl vyzkoušen vliv použití síťového odrušovacího filtru X31-1 na výstup napájecího zdroje.

Při experimentech byl zjištěn i vliv teploty na silový senzor. Více o této problematice je popsáno v jiné kapitole.

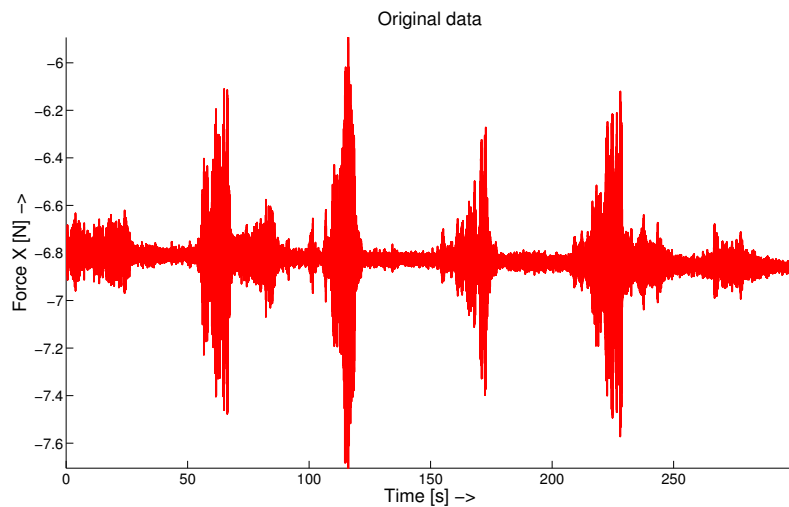
Senzor je tedy chráněn proti elektrickému rušení použitím odrušovacího filtru X31-1, který je zapojen u vstupu do NetBoxu. Tím se odstranil vliv případných elektrických rušení a mohlo se pátrat po dalších zdrojích rušivých signálů.

#### 3.2 Mechanické kmity

Silový senzor dokáže měřit data s maximální vzorkovací frekvencí 7000 vzorků za vteřinu. Při takto velkém kmitočtu dokáže senzor zaznamenávat i mechanické kmity vyskytující se v okolí robotu.

První experiment byl již prováděn se senzorem přidělaným k robotu. Do souboru se ukládala silová data ze senzoru a k nim odpovídající časové značky, data se ukládala po dobu pěti minut. Data byla dále zpracována v programu Matlab [11].

Z měření bylo zjištěno, že senzor je rušen mechanickými vzruchy. Na obázku 8 jsou data, která byla změřena při frekvenci 7 kHz a robot se nacházel ve výchozí pozici, která odpovídá natočením všech motorů na nulovou hodnotu. Jedná se pouze o sílu  $F_X$ . Senzor je součástí robotu, musí se tedy jednat o mechanické kmity působící na samotný robot z okolí.

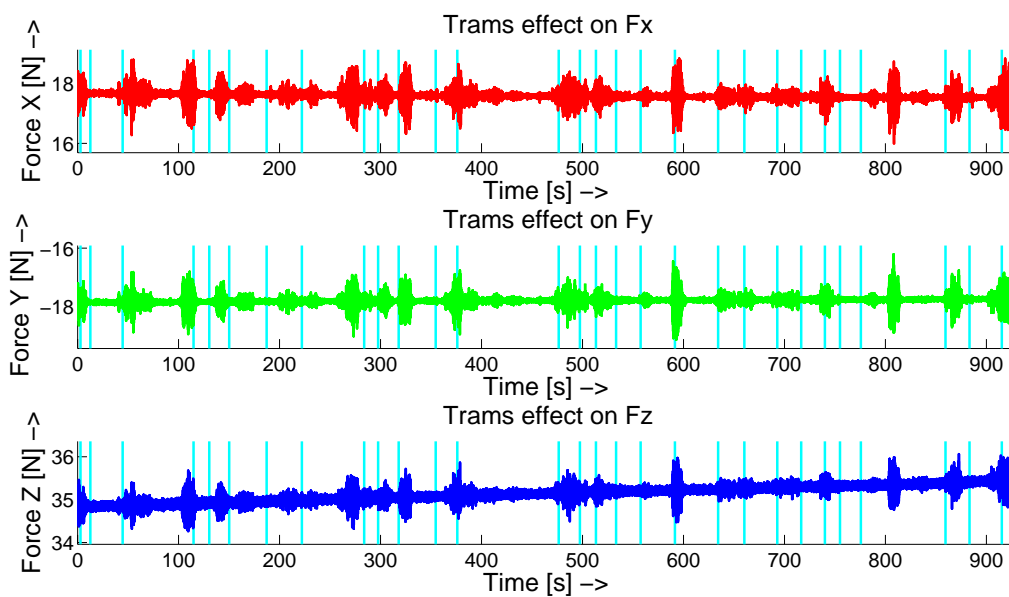


Obrázek 8: Data ze senzoru při frekvenci 7 kHz, osa X. Robot se nacházel ve výchozí pozici.

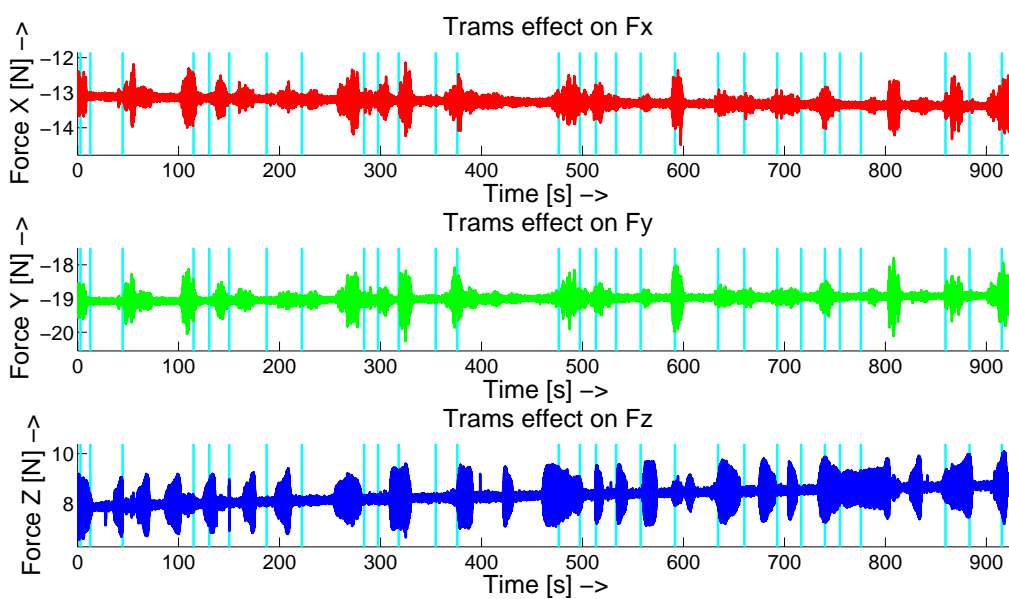
Jelikož se celý robot nachází ve sklepě, nacházejícím se v blízkosti velké křižovatky na Karlově náměstí v Praze, byla vznesena hypotéza, že otřesy z projíždějících tramvají přes křižovatku ovlivňují silový senzor, který je detekuje jako impulzy z obrázku 8.

Bylo tedy třeba zjistit, kdy přes křižovatku projíždí tramvaj a tuto informaci ukládat spolu s měřenými daty. Do měřicího programu byla přidána funkce, která označuje projíždějící tramvaj (stlačením jakékoliv klávesy se do souboru tento parametr zapíše). Následně si operátor u počítače zaznamenal číslo a směr hlášené tramvaje.

Tento experiment se prováděl při frekvenci 100 Hz, robot byl opět ve výchozí pozici. Průjezd tramvají byl hlášen pozorovatelem, který stál u křižovatky, pomocí vysílačky. Data ze senzorů jsou znázorněna na obrázcích 9, 10. Svislé světle modré čáry indikují okamžik, kdy byl hlášen průjezd tramvaje. Pořadí, směr a číslo projíždějících tramvají je v tabulce 2.



Obrázek 9: Experiment s vlivem tramvají na síly ramena 1. Data snímána na frekvenci 100 Hz. Světle modré čáry indikují doby hlašených tramvají.



Obrázek 10: Experiment s vlivem tramvají na síly ramena 2. Data snímána na frekvenci 100 Hz. Světle modré čáry indikují doby hlašených tramvají.

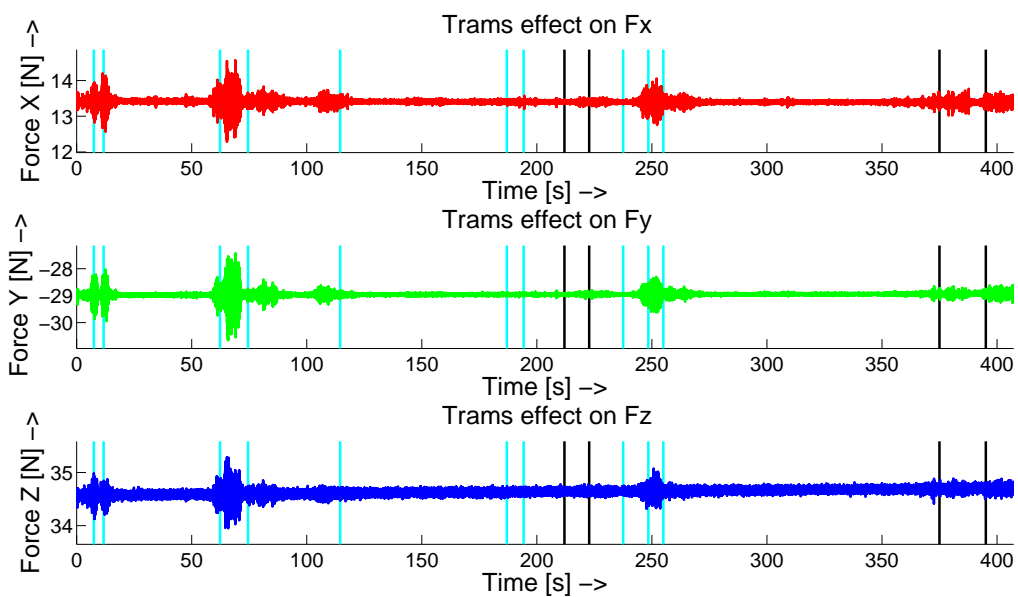


ID	No. - Směr	ID	No. - Směr
1	3 - Moráň	16	22 - I.P.Pavlova, 22 - Muzeum
2	4 - I.P.Pavlova, 7 - Moráň	17	10 - Moráň
3	6, 10 - Moráň	18	22 - I.P.Pavlova
4	3 - Moráň	19	3 - Moráň
5	22 - Muzeum	20	3 - Muzeum, 3 Moráň
6	3 - Muzeum	21	4 - I.P.Pavlova
7	10 - I.P.Pavlova, 18 - Muzeum	22	18 - Muzeum
8	24 - Moráň, 24 - Muzeum	23	6 - Muzeum
9	4 - I.P.Pavlova	24	22 - Muzeum
10	22 - Muzeum	25	18 - Moráň
11	3 - Moráň, 16 - I.P.Pavlova	26	22 - I.P.Pavlova
12	3 - Muzeum	27	24 - Moráň
13	6, 16 - Moráň	28	3 - Muzeum
14	6,22 - Muzeum, 18 - Moráň	29	18 - Moráň
15	10 - I.P.Pavlova		

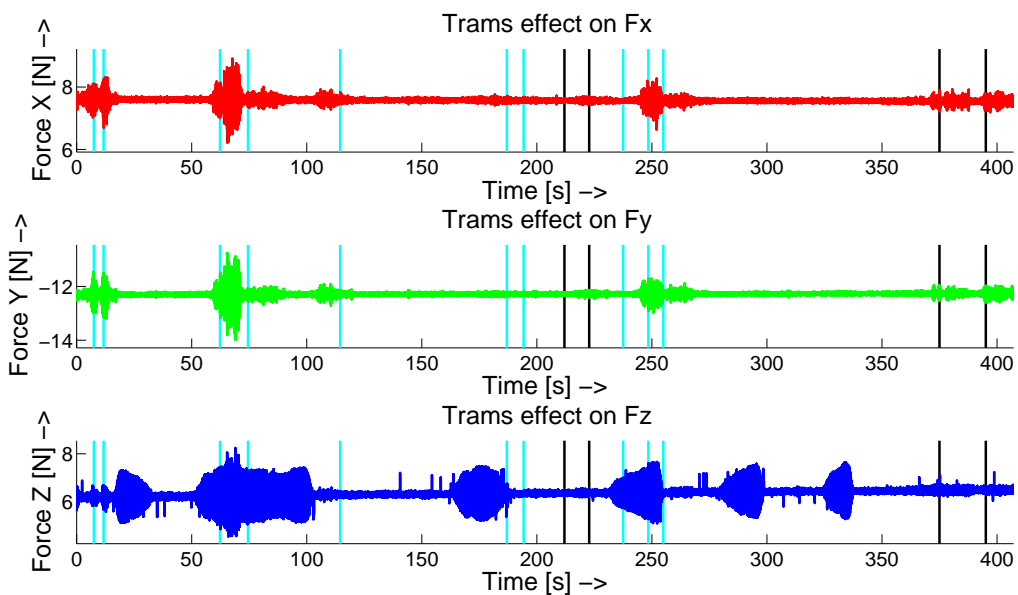
Tabulka 2: Tabulka provozu tramvaji

Z porovnání čar indikující průjezd tramvají a oscilací silového senzoru lze usoudit, že průjezd tramvají přes křižovatku má vliv na práci senzoru. Některé z čar neodpovídají přesně oscilacím, neboť čas ohlášení průjezdu tramvaje operátorem neodpovídal místu, ve kterém ji senzor zaznamenává. Možný vliv mohou mít i nákladní automobily, která přes křižovatku projíždějí. Například oscilace z 800 vteřiny neodpovídá žádné z hlášených tramvají, dle pozorovatele se jednalo o projíždějící nákladní vůz.

Další z hypotéz byla, zda na silový senzor má vliv provoz metra na Karlově náměstí. Bylo potřeba hlásit jak průjezdy tramvají, tak i provoz metra. Senzor opět snímal data při frekvenci 100 Hz a robot byl nastaven do výchozí pozice. První pozorovatel hlásil vysílačkou provoz tramvají, druhý pozorovatel hlásil provoz metra mobilním telefonem. Na obrázcích 11, 12 jsou zobrazena data ze silového senzoru s indikací průjezdu tramvají (světle modré vertikální čáry) a metra (černé vertikální čáry). Pořadí průjezdů tramvají a vlaků je zobrazeno v tabulce 3.



Obrázek 11: Experiment s vlivem tramvají a metra na síly ramena 1. Data snímána na frekvenci 100 Hz. Světle modré čáry indikují doby hlášených tramvají. Černé čáry indikují doby hlášených vlaků.



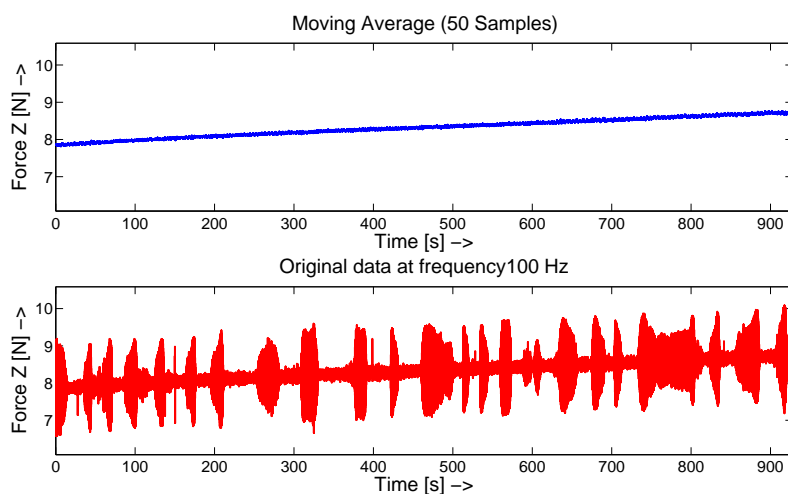
Obrázek 12: Experiment s vlivem tramvají a metra na síly ramena 1. Data snímána na frekvenci 100 Hz. Světle modré čáry indikují doby hlášených tramvají. Černé čáry indikují doby hlášených vlaků.

ID	No. - Směr	ID	No. - Směr
1	10 - I.P.Pavlova	8	Příjezd metra
2	7 - Moráň	9	Odjezd metra
3	22,3 - Muzeum	10	4 - Moráň
4	3 - Moráň, 22 Muzeum	11	3 - Moráň
5	22 - I.P.Pavlova	12	3 - Muzeum
6	4 - I.P.Pavlova	13	Příjezd Metra
7	18 - Muzeum	14	Odjezd metra

Tabulka 3: Tabulka provozu tramvaji a metra

Z podobné úvahy jako u samotných tramvají je vidět, že vliv metra nemá na senzor takový vliv, jako vliv samotné tramvaje. Vliv je názorný především na silách v ose X a Y, avšak oproti vlivům tramvají jsou zanedbatelné. Možné vysvětlení je v příliš velké vzdálenosti a hloubce (střed stanice se nachází v hloubce 40 metrů [12]) vlakových kolejí od pozice robotu.

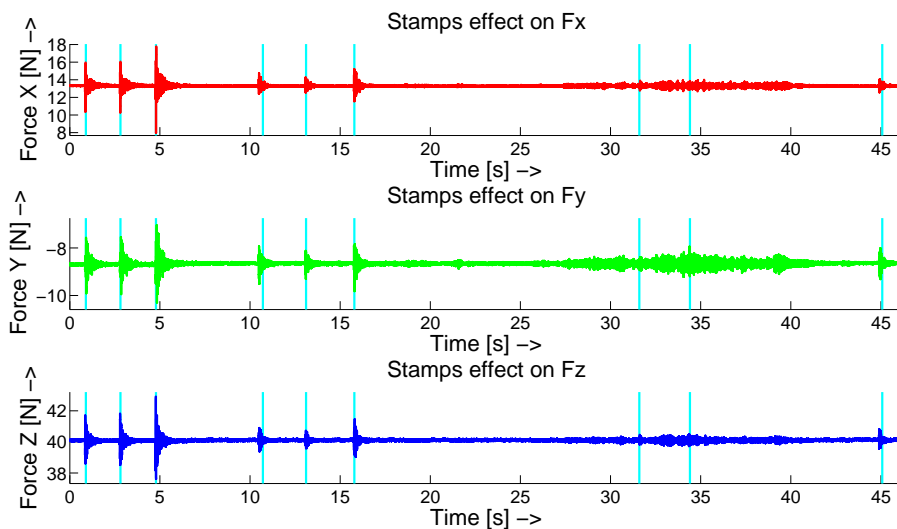
Při těchto měřeních byla pozorována změna průměrných dat za určitý čas. To je dobře viditelné z pohybujícího se průměru. Data s pohybujícím se průměrem jsou zobrazena v obrázku 13, jedná se o rameno robotu 2, konkrétně o sílu  $F_Z$ . Z dat je vidět, že se průměrná data změnila o 1 N za patnáct minut.



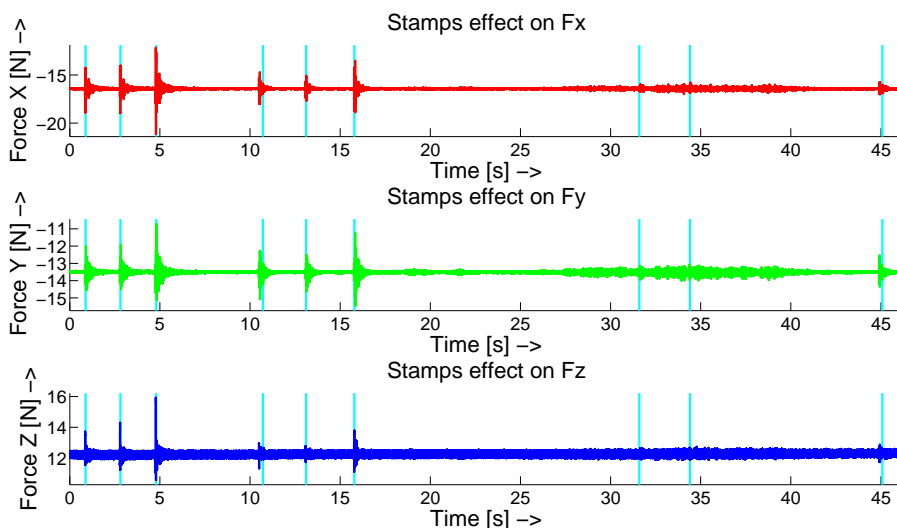
Obrázek 13: Změna pohybujícího se průměru ze silového senzoru. Síla v ose Z z obrázku 10. Nahoře je pohybující se průměr. Dole jsou původní data ze senzoru.

Jelikož jsme zjistili ovlivnění senzoru otřesy tramvají, bylo nutné zjistit vliv pohybu v samotné místnosti, kde se robot nachází. Při tomto experimentu bylo dupáno v různých částech místnosti s robotem. První pozice byla přímo vedle základny robotu na betonové podlaze, kde se předpokládá

největší vliv na silový senzor. Druhá pozice byla před robotem, kde se nachází dřevěná podlaha. Třetí pozice byla opět na betonové podlaze, ale tentokrát u bezpečnostních dveří, zabezpečujících operační prostor robotu. Na každé pozici byli provedeny tři po sobě jdoucí dupy a do dat se pomocí vstupu z klávesnice opět zapsaly značky indikující otřesy. Senzor byl nastaven na snímání při frekvenci 7 kHz a robot byl nastaven do výchozí polohy. Data z experimentu jsou zobrazena v obrázcích 14, 15.



Obrázek 14: Experiment s vlivem dupání v blízkosti robotu na rameno 1. Snímání na frekvenci 7 kHz. Svislé světle modré čáry indikují časy vyvolaných otřesů.



Obrázek 15: Experiment s vlivem dupání v blízkosti robotu na rameno 2. Snímání na frekvenci 7 kHz. Svislé světle modré čáry indikují časy vyvolaných otřesů.

Z experimentu vyplývá, že dupání v blízkosti robotu má značný vliv na měřená data ze silového senzoru. Podle očekávání se chyba zmenšuje se vzdáleností. Nepředpokládá se, že by při práci robotu byl v jeho operačním prostoru přítomen člověk. Mimo operační prostor již nemají vzruchy vyvolané dupnutím takový účinek a proto se s tímto případem chyb dále přestalo zabývat.

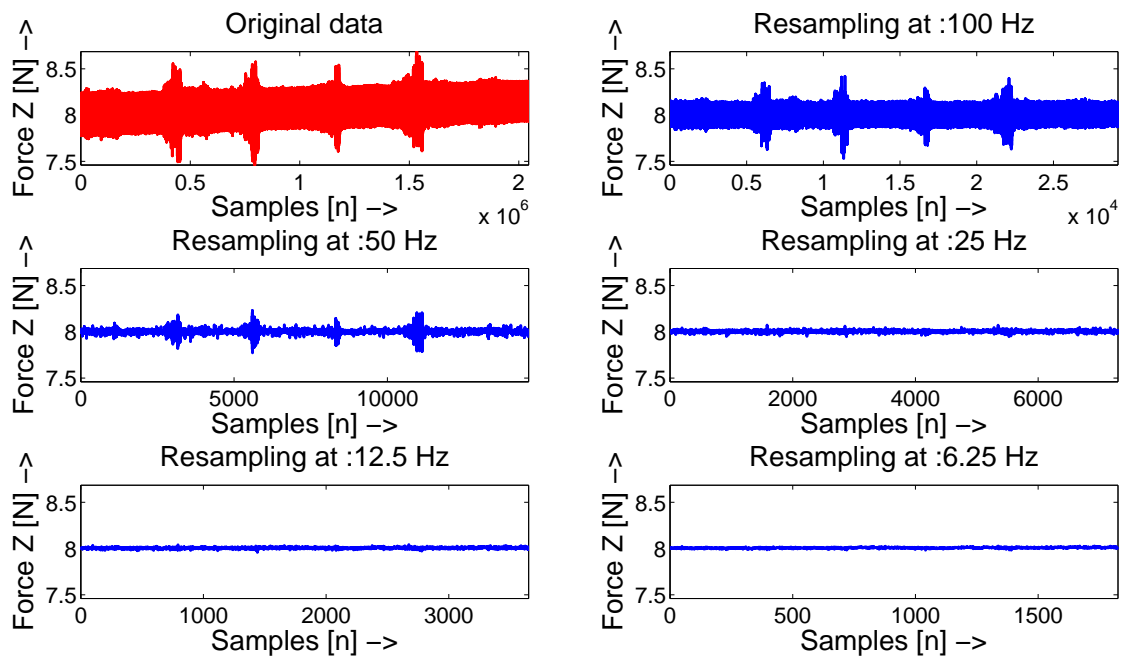
Chybu vnesenou vlivem průjezdu tramvají bylo potřeba odstranit. Proto byly vyzkoušeny různé kombinace vlastních kalibrací a filtrů silového senzoru, které lze nastavit ve webovém prostředí. Senzor měřil na frekvenci 7 kHz a robot byl nastaven do výchozí polohy. Kalibrace a použité filtry jsou zobrazeny v tabulce 4.

ID	Filtr [Hz]	Kalibrace	Změřená data
1	18	SI-145-5	exp1r1, exp1r2
2	35	SI-145-5	exp2r1, exp2r2
3	35	SI-580-20	exp3r1, exp3r2
4	18	SI-580-20	exp4r1, exp4r2

Tabulka 4: Použité filtry a kalibrace pro práci se silovým senzorem

Při předcházejících experimentech, kde se data odečítala ze senzoru při frekvencích 100 Hz až 7 kHz, bylo podezření, že senzor měří vždy na maximální možné frekvenci (7 kHz) a podle nastavené frekvence ve webovém prostředí posílá vždy pouze aktuální měření požadované v určitý čas. Například, pokud nastavíme senzor na frekvenci 1 kHz, bude nám senzor posílat každý sedmý vzorek a zbylá měření nebere v úvahu. Tím však přicházíme o ostatní měřená data, která bychom mohli zprůměrovat a posílat v požadovaném čase.

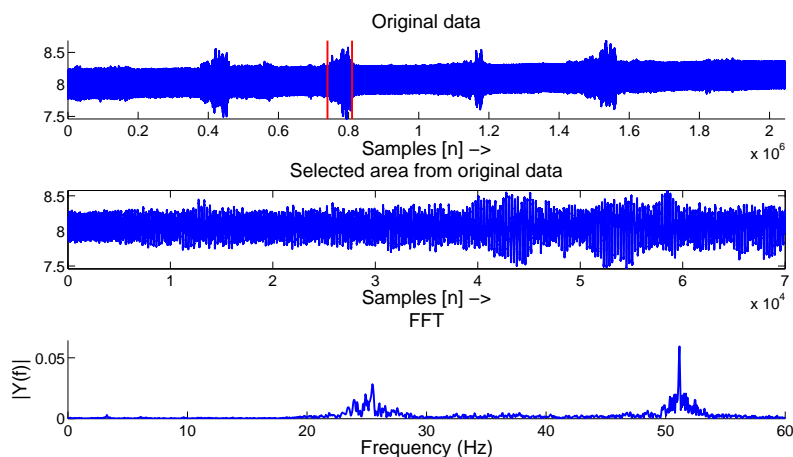
Proto jsme změřili výstup ze senzoru na maximální frekvenci a různými průměrováními sledovali filtrovaná data. Například průměrováním každých sedmdesáti vzorků získáme data na frekvenci odpovídající 100 Hz. Jednoduchým průměrováním dvou po sobě jdoucích převzorkovaných dat získáme frekvenci poloviční. Tato konstrukce připomínající pyramidu nám umožňuje zjistit, při jaké frekvenci vymizí vliv tramvají, případně i jiné chyby. Jedny z výsledků filtrování a průměrování jsou zobrazeny v obrázku 16.



Obrázek 16: Převzorkovaná data z explr2, osa Z

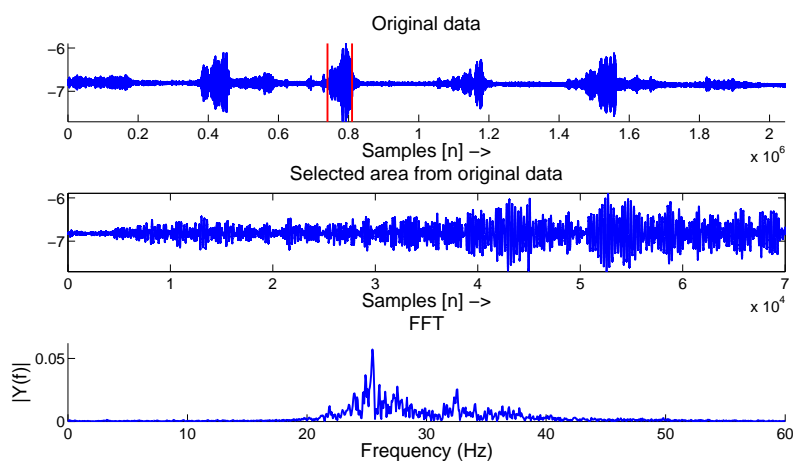
Jelikož byla tato data zpracovávána offline, bylo možné odstranit pohybující se průměr pomocí spojení trendů průměrných hodnot. Byla identifikovaná přímka průměrných hodnot, která se odčítala od dat skutečných a tím se získala data bez měnícího se průměru. Na obrázku 16 je zobrazen extrémní příklad dat, ze senzoru v rameni 2 osy Z, která je extrémně zašumělá. Je však vidět, že při průměrování na frekvenci 50 Hz šum vymizí. Vliv samotných tramvajů odeznívá při frekvenci 25 Hz a při frekvenci 12,5 Hz jsou data již bez jakýchkoliv znatelných chyb. Pro data byla z vybrané oblasti zhotovena i FFT<sup>2</sup> (obrázek 17), kde je vidět, že se na frekvenci 50 Hz a na frekvenci 25 Hz uplatňuje jistý šum a mechanická rušení.

<sup>2</sup>FFT - Fast Fourier Transformation, je efektivní algoritmus pro spočítání diskrétní Fourierovy transformace.



Obrázek 17: Rychlá Fourierova transformace pro data z exp1r2, osa Z

To, že se na frekvenci 25 Hz nachází právě mechanické kmity, vyvolané průjezdy tramvají je vidět z nezašumělých dat, například data z téhož experimentu, ale z osy X (obrázek 18).



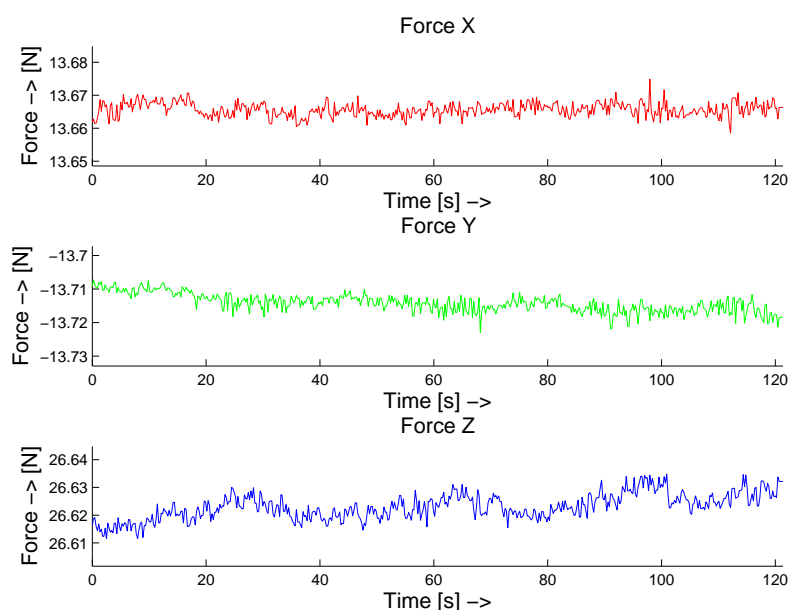
Obrázek 18: Rychlá Fourierova transformace pro data z exp1r2 pro vyznačenou oblast, osa X

V závislosti na těchto experimentech byl vytvořen program *filter\_force.cpp*, který filtruje data, aby rušení tramvají nemělo vliv na silový senzor. Senzor se spouští z prostředí Ros pomocí launch příkazu *force\_sensor.launch*, který posílá na jednom topiku nezpracovaná data ze senzoru na frekvenci 7 kHz (*/r1\_force\_data*, */r2\_force\_data*). Současně s tím se spustí i program , který odebírá data na frekvenci 7 kHz a průměruje je na frekvenci 12,5 Hz, takto filtrovaná data publikuje novém topiku (*/r1\_force\_data\_downsample*, */r2\_force\_data\_downsample*). S takto vyfiltrovanými daty senzor pracuje při plnění úloh.

### 3.3 Účinky světla na silový senzor

Při práci se senzorem se ukázalo, že v některých konfiguracích manipulátoru a chapadla se data ze senzoru chovají špatně. Pátráním po příčinách se ukázalo, že jistý vliv na silový senzor má i osvětlení místnosti. Výrobce senzoru nezamezil přístupu světla do těla senzoru a je možné, že při některých konfiguracích robotu bude senzor ovlivněn světlem.

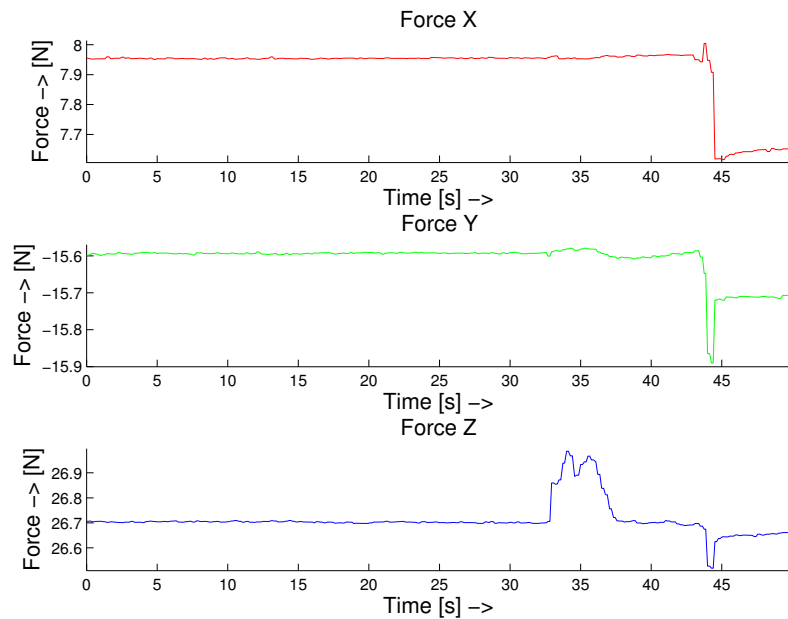
První z pokusů byl proveden již s vyfiltrovanými daty na frekvenci 12,5 Hz. Robot se nacházel ve výchozí poloze. Experiment spočíval v zapínání a vypínání světel v místnosti každých 10 vteřin. Výsledky z experimentu jsou zobrazeny v obrázku 19.



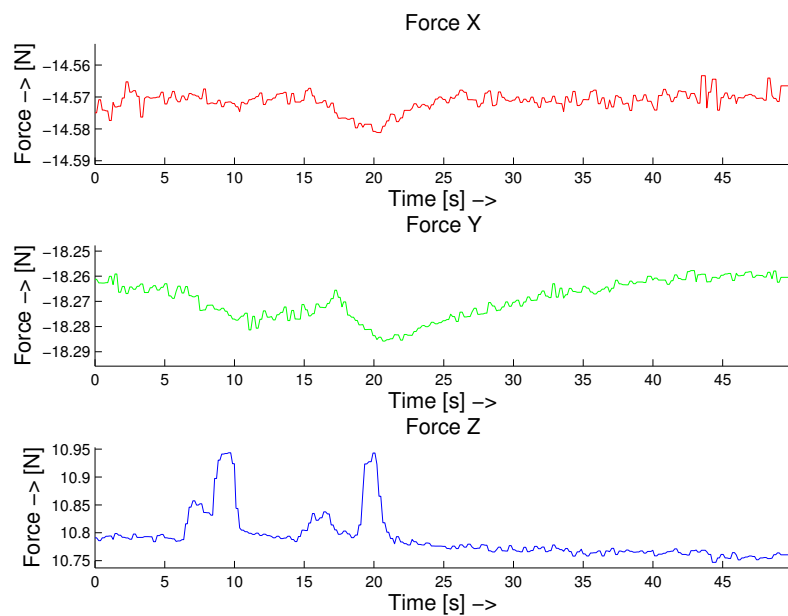
Obrázek 19: Experiment s vlivem světla na rameno 1. Filtrovaná data ze senzoru na frekvenci 12,5 Hz. Změna stavu světla každých 10 vteřin. Robot se nacházel ve výchozí pozici.

Z grafů vychází závěr, že pro robot ve výchozí pozici nemá světlo v místnosti na senzor vliv. Je však možné, že v jiných konfiguracích robotu bude mít světlo nezanedbatelný vliv. Pro tento účel jsme použili světla z ruční baterky k přímému osvětlení spár senzoru. Experiment probíhal v zhasnuté místnosti a jeho výsledky jsou zobrazeny na obrázcích 20, 21.





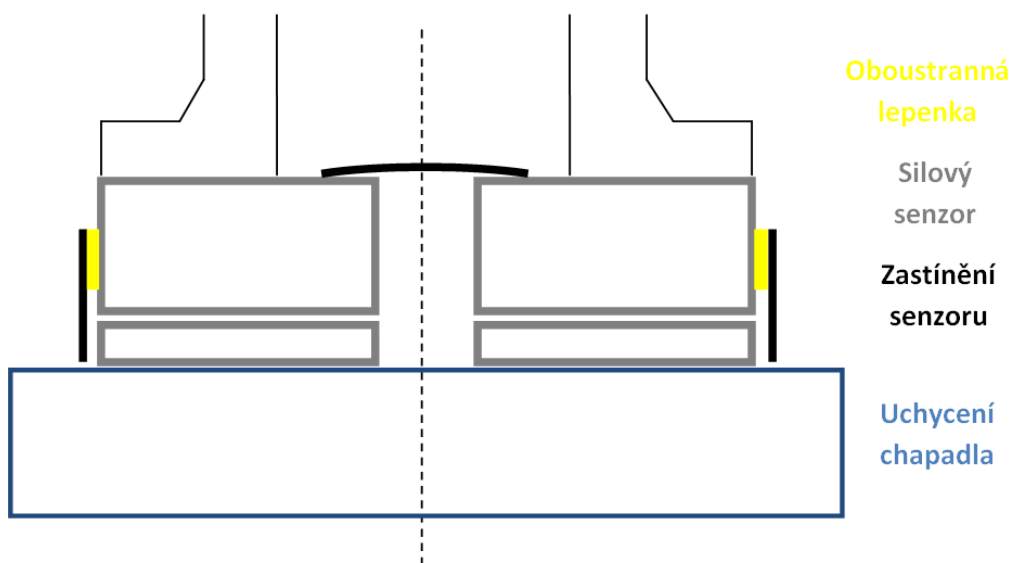
Obrázek 20: Experiment s vlivem světla z baterky na rameno 1. Filtrovaná data ze senzoru na frekvenci 12,5 Hz.



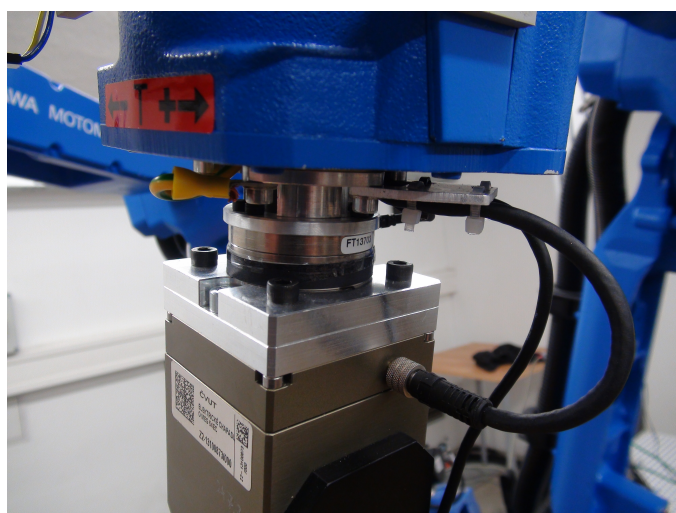
Obrázek 21: Experiment s vlivem světla z baterky na rameno 2. Filtrovaná data ze senzoru na frekvenci 12,5 Hz.

Vliv přímého světla má tedy vliv na práci silového senzoru. Je nutné senzor chránit před přístupem světla do těla senzoru. Ochrana byla vytvořena pomocí černé čtvrtky přichycené oboustrannou lepenkou kolem senzoru.

V úchytu, kterým je senzor připevněn k přírubě robotu se nachází otvory pro vedení kabelů. Těmito otvory má světlo přístup k horní části senzoru, kde se v jeho ose nachází otvor do těla senzoru. Bylo tedy třeba zastínit i tento otvor. Průřez celého senzoru a zaslepení otvorů je zobrazeno na obrázku 22. Bylo důležité, aby se pruh čtvrtky nedotýkal uchycení chapadla, nebo spodní části senzoru. Proto se pomocí oboustranné lepenky vytvořila mezera, která dotyku zabraňuje. Finální ochrana senzoru je zobrazena na obrázku 23. Tím bylo zabráněno přístupu světla do senzoru a mohlo se přejít k identifikaci dalších parametrů senzoru.



Obrázek 22: Průřez silového senzoru a zaslepení otvorů



Obrázek 23: Detail ochrany senzoru před přístupem světla do těla senzoru

### 3.4 Teplota

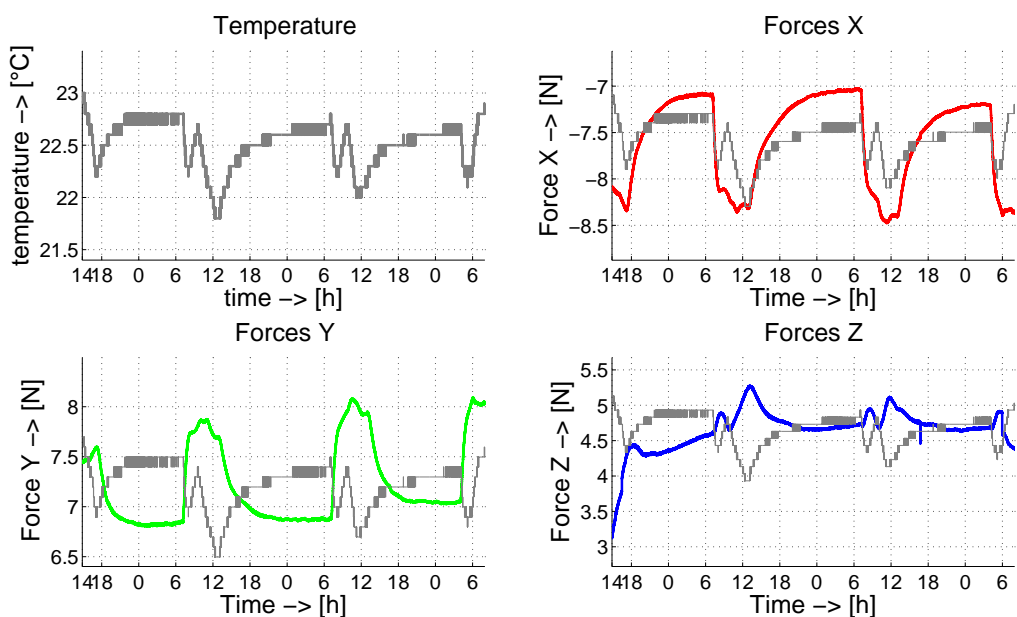
Již při experimentech s elektrickým rušením, tak i u mechanických kmitů, se hledala příčina kolísání průměrné hodnoty signálu. Tenzometr, který měří účinky síly a momentů, pracuje na principu změny vnitřního odporu, vyvolaného změnou síly působící. Další parametr, který ovlivňuje změnu odporu je teplota. Sice se předpokládá, že sensor bude měřit sílu v krátkém časovém horizontu a tedy i změna teploty bude malá, i přesto je však nutné tento problém proměřit.

Ke snímání teploty se použil TME ethernetový teploměr (Obrázek 24) od firmy Papouch [13]. Výhodou využití ethernetového teploměru je možnost snímání dat ze silového senzoru a z teploměru naráz. Tím máme data odpovídající silám přiřazena k příslušné teplotě.

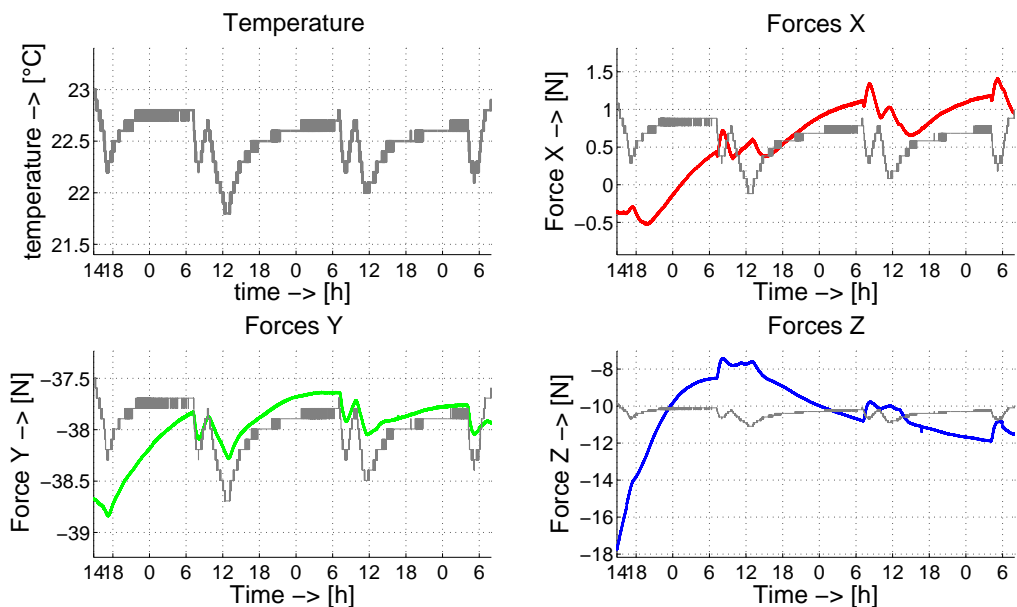


Obrázek 24: Ethernetový teploměr TME od firmy Papouch [13]

Pro zjištění vlivu teploty na silový sensor byl uskutečněn experiment, kdy se každých 10 vteřin odečetla data ze silového senzoru a zároveň se odebrala data z teploměru. Snímáním dat z delšího intervalu se dostane představa o vlivu teploty na nasnímaná data ze silového senzoru. Snímání probíhalo přes celý víkend. Program byl spuštěn v pátek večer a ukončen v pondělí ráno. Na obrázcích 25, 26 jsou zobrazena naměřená data. Z dat vyplývá zřejmá korelace mezi teplotou a silami senzoru.



Obrázek 25: Teplotní závislost sil pro rameno 1



Obrázek 26: Teplotní závislost sil pro rameno 2

Výrobce senzoru pouze uvádí, při kterých teplotách se může senzor bezpečně použít bez možných škod. Operační rozsah senzoru je od  $-20^{\circ}\text{C}$  do  $70^{\circ}\text{C}$  [5]. V dalším dokumentu výrobce uvádí, že změny měřených dat v závislosti na teplotě nejsou kompenzované a mění se pro každý převodník zvlášť [7].

Teplotní změny všech šesti párů tenzometrů v polomůstcích by měla odpovídat stejné teplotní

závislosti. Na obrázku 27 jsou zobrazeny informace z webového prostředí senzoru o tenzometrech. V červeném obdelníku jsou vyznačeny data, která NetBox dostává ze senzoru. Tyto hodnoty by měla teplota ovlivňovat stejně. Průchodem přes modře vyznačenou matici se dostávají hodnoty pro síly a momenty. Tato matice ovlivňuje důsledek teplotních změn na výchozí data, a proto má různý vliv na jednotlivé převodníky.

**ATI INDUSTRIAL AUTOMATION**  
ISO 9001 Registered  
Engineered Products for Robotic Productivity

**Net FIT**  
Force/Torque Sensor

Welcome System Status: **Healthy**

Snapshot

Demo System Information

Settings This is a summary of the system's current state. This information may be helpful during troubleshooting.

Thresholding

Configurations

Communications

System Info

ATI Web Site

Transducer		G0	G1	G2	G3	G4	G5
Strain Gage Values:		882	-2153	4759	1506	6840	8165
Bias Values:		0	0	0	0	0	0
Force/Torque Counts:		Fx	Fy	Fz	Tx	Ty	Tz
		2010472	-2355043	6632259	61709	-4286213	-2592612
Minimum Peak Counts:		2010472	-2355043	6632259	61709	-4286213	-2592612
Maximum Peak Counts:		2010472	-2355043	6632259	61709	-4286213	-2592612
Force/Torque Units:		Fx	Fy	Fz	Tx	Ty	Tz
		2.0105	-2.354	6.6311	0.05929	-4.289	-2.593
Minimum Peak Units:		2.0105	-2.354	6.6311	0.05929	-4.289	-2.593
Maximum Peak Units:		2.0105	-2.354	6.6311	0.05929	-4.289	-2.593
Run-time Matrix:		G0	G1	G2	G3	G4	G5
Fx		-13864	6376	136517	-2324427	-81214	2438095
Fy		-110449	2824321	49384	-1343380	37399	-1418669
Fz		4341863	-143310	4443388	-122553	4433283	-130541
Tx		-21458	1341675	-4986600	-489650	5054121	-820134
Ty		5744180	-196299	-2948626	1189226	-2866309	-1072814
Tz		136725	-2976705	146181	-2843296	73858	-3023826

Obrázek 27: Systémové informace o tenzometrech ve webovém prostředí senzoru [5]

Abychom vliv teploty mohli odstranit, museli bychom to řešit již v principu vnitřního zapojení senzoru. Například jiný výrobce tenzometrických senzorů Kulite [15] se touto záležitostí zabývá a popisuje možná řešení eliminace vlivu teploty. Tato firma ve svých tenzometrech používá span kompenzaci. Span kompenzace je technika pro použití buď předřadníku pro udržení konstantního budícího napětí tenzometru, nebo bočnicku pro udržení konstantního budícího proudu tenzometru. Firma Kulite používá tenzometry zapojené do Wheatstoneůva můstku a předřadníky, popřípadě s bočnicku, udržují konstantní napětí, popřípadě proudu. Více o této problematice je popsáno v příručce od firmy Kulite [15].

V našem případě se do útrob senzoru nemáme šanci dostat k upravení jeho vnitřního zapojení. Musíme se tedy omezit na dočasné používání senzoru po krátkou dobu, kde vliv teploty je pro naši činnost stejný. Případně blíže zjistit teplotní závislost výstupu senzoru na jeho vnitřních

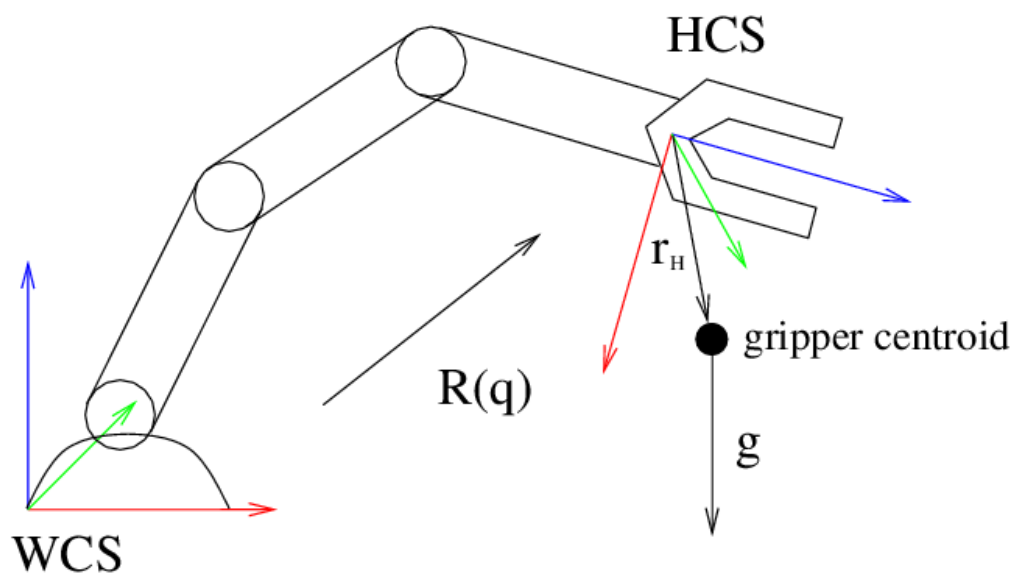
parametrech (zvyrazněná data v obrázku 27).

### 3.5 Eliminace vlivu tíhy chapadla

Senzor se nachází v podstatě v zápěstí robotu. Měří síly a momenty všeho, co je na senzor zavěšeno a tedy se měří i vliv tíhy chapadla. Jelikož potřebujeme měřit síly a momenty v prstech chapadla, potřebujeme zjistit váhu a polohu těžiště chapadla.

#### 3.5.1 Výpočet parametrů chapadla

Na obrázku 28 je znázorněn způsob přepočtu světových souřadnic WCS (World Coordinating System) do souřadnic odpovídajícím chapadlu HCS (Hand Coordinating System). Vektor  $\mathbf{g}$  značí vliv gravitační síly, vektor  $r_g$  je vektor vycházející z HCS a směřujícím do těžiště chapadla.  $R(q)$  je transformace z WCS do HCS a  $q$  značí natočení motorů robotu.



Obrázek 28: Princip měření sil senzoru v chapadlu [9]

Síla působící na chapadlo odpovídá:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{g} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix}, \quad (3)$$

kde  $\mathbf{F}$  značí sílu působící na chapadlo,  $m$  odpovídá neznámé hmotnosti a  $\mathbf{g}$  je vektor gravitace. Podobně moment setrvačnosti odpovídá:

$$\mathbf{M} = m\mathbf{r} \times \mathbf{g} = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$\mathbf{M}$  je hledaný moment,  $\mathbf{r}$  je neznámý vektor z HCS do těžiště chapadla.

Rovnice 3 a 4 v maticovém tvaru odpovídá:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{M} \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -r_z & r_y \\ r_z & 0 & -r_x \\ -r_y & r_x & 0 \end{bmatrix} \mathbf{g} = m\mathbf{Q}\mathbf{g}. \quad (5)$$

Orientace chapadla v prostoru WCS je tvořena pomocí rotační matice:

$$\mathbf{R}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Pronásobením vektoru ve WCS a transponované rotační maticí  $\mathbf{R}(\mathbf{q})$  získáme vektor v HCS a tedy například gravitační vektor se převede následovně:

$$\mathbf{g}_G = \mathbf{R}'(\mathbf{q})\mathbf{g}_W = \mathbf{R}'(\mathbf{q}) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Vektor  $\mathbf{r}_G$ , který směřuje ze silového senzoru do těžiště chapadla má tvar:

$$\mathbf{r}_G = \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix}, \quad (8)$$

tento vektor je konstantí v HCS. Z předchozích experimentů vyplývá, že na senzor působí různé efekty, které ovlivňují jeho měření. Jedná se o chyby, které jdou v krátkodobém užití senzoru zredukovat pomocí offsetů:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_m - \mathbf{F}_o, \quad (9)$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_m - \mathbf{M}_o, \quad (10)$$

kde  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{F}$  jsou skutečné hodnoty působící na chapadlo,  $\mathbf{M}_m$ ,  $\mathbf{F}_m$  jsou hodnoty změřené silovým senzorem a  $\mathbf{M}_o$ ,  $\mathbf{F}_o$  jsou pomalu se měnící offsety.

Kombinací rovnic (5), (7), (9) a (10) získáme:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_m \\ \mathbf{M}_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{F}_o \\ \mathbf{M}_o \end{bmatrix} = m\mathbf{Q}\mathbf{R}'(\mathbf{q}) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Tato rovnice obsahuje celkem 10 neznámých, tři od silových i momentových offsetů, polohy těžiště chapadla  $r_x, r_y, r_z$  v matici  $\mathbf{Q}$  a váhu chapadla  $m$ . Osamocením sil a momentů získáváme:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_m - \mathbf{F}_o = m\mathbf{R}'(\mathbf{q}) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_m - \mathbf{M}_o = m \begin{bmatrix} 0 & -r_z & r_y \\ r_z & 0 & -r_x \\ -r_y & r_x & 0 \end{bmatrix} \mathbf{R}'(\mathbf{q}) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Přepsáním rovnice (12) dostáváme výsledek:

$$\mathbf{A}_F \mathbf{x}_F = \mathbf{b}_F, \quad (14)$$

kde neznámá  $\mathbf{x}_F$  reprezentuje následující matici obsahující silové offsety a váhu chapadla:

$$\mathbf{x}_F = \begin{bmatrix} F_{x_o} \\ F_{y_o} \\ F_{z_o} \\ m \end{bmatrix}. \quad (15)$$

$\mathbf{A}_F$  reprezentuje:

$$\mathbf{A}_F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -r_{13}g \\ 0 & 1 & 0 & -r_{23}g \\ 0 & 0 & 1 & -r_{33}g \end{bmatrix} \quad (16)$$

a měřená matice  $\mathbf{b}_F$  reprezentuje:

$$\mathbf{b}_F = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Obdobně pro rovnici (13) získáme:

$$\mathbf{A}_M \mathbf{x}_M = \mathbf{b}_M, \quad (18)$$



kde neznámá  $\mathbf{x}_M$  reprezentuje následující matici obsahující offsety momentů a polohu těžiště chapadla:

$$\mathbf{x}_M = \begin{bmatrix} M_{x_o} \\ M_{y_o} \\ M_{z_o} \\ r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix}. \quad (19)$$

$\mathbf{A}_M$  reprezentuje:

$$\mathbf{A}_M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -mr_{33}g & mr_{23}g \\ 0 & 1 & 0 & mr_{33}g & 0 & -mr_{13}g \\ 0 & 0 & 1 & -mr_{23}g & mr_{13}g & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

a měřená matice  $\mathbf{b}_M$  reprezentuje:

$$\mathbf{b}_M = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Jelikož matice  $\mathbf{A}_M$  obsahuje kromě momentů i hmotnost  $m$ , musí se nejprve vypočítat rovnice síly  $\mathbf{A}_F \mathbf{x}_F = \mathbf{b}_F$ . Řešení se dá získat využitím SVD rozkladu (Singular Value Decomposition). Užitím SVD na matici  $\mathbf{A}_F$  získáme tři matice  $\mathbf{U}_F$ ,  $\mathbf{S}_F$ ,  $\mathbf{V}_F$ . Řešení předcházející rovnice má tvar:

$$\mathbf{x}_F = \mathbf{V}_F \mathbf{S}_F^+ \mathbf{U}_F^T \mathbf{b}_F = \begin{bmatrix} F_{x_o} \\ F_{y_o} \\ F_{z_o} \\ m \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Ze znalosti hodnoty hmotnosti  $m$  můžeme spočítat i rovnici pro momenty  $\mathbf{A}_M \mathbf{x}_M = \mathbf{b}_M$ . Obdobně jako u sil je využito SVD rozkladu a řešení má tvar:

$$\mathbf{x}_M = \mathbf{V}_M \mathbf{S}_M^+ \mathbf{U}_M^T \mathbf{b}_M = \begin{bmatrix} M_{x_o} \\ M_{y_o} \\ M_{z_o} \\ r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Po nalezení offsetů sil, momentů, polohy těžiště chapadla a jeho váhy lze vypočítat skutečné síly a momenty měřené silovým senzorem. Z rotační matice robotu známe polohu senzoru v prostoru a tedy i vektory odpovídající měřícím osám [9].

### 3.5.2 Experimenty s reálným senzorem

První pokusy s výpočtem offsetů senzoru byly provedeny ještě v době, kdy nebyl senzor chráněn před světlem a nebyl eliminován vliv tramvají. Právě díky potřebě získávat přesná data a tedy odstranit příspěvek chapadla, bylo pátráno po zdrojích nepřesností.

Algoritmus pro výpočet offsetů potřebuje znát rotační matice a data ze senzoru v různých pozicích. Rotační matice lze získat z ros. První pokus byl proveden z 20 pozic robotu, popsanych v tabulce 5, která udává natočení posledních 3 kloubů robotu (R,B,T). V každé pozici robot setrval 8 vteřin, z toho v posledních 5-ti vteřinách snímal síly a momenty, které zprůměroval. Tím se vyřešil vliv tramvají a možné přechodové jevy z pohybu robotu z jedné pozice do druhé.

ID	Pozice	R	B	T
1:3	Dole	-58:45:32	48	0
4:15	Uprostřed	-13	93	-180:30:180
16:18	Nahoře	-58:45:32	138	0
19	Čistě dolů	-13	0	0
20	Čistě nahoru	-13	180	0

Tabulka 5: Pozice pro první pokus s offsety

Po použití algoritmu pro výpočet offsetů jsme dostaly výsledky pro použité pozice:

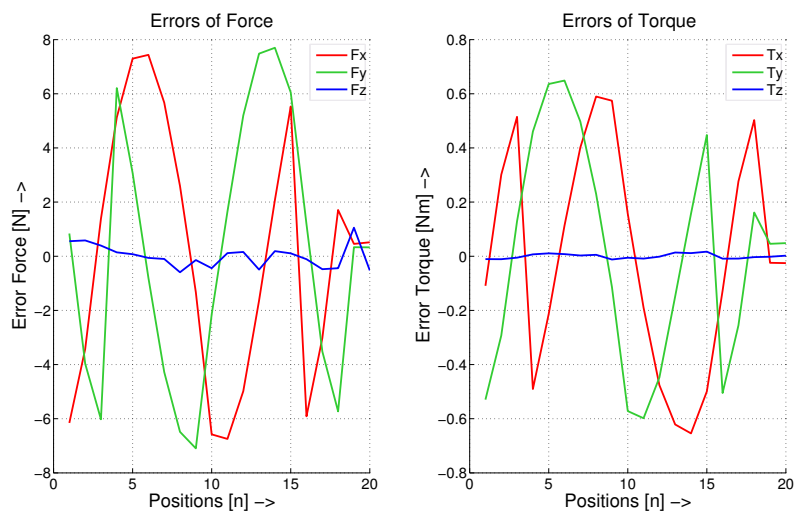
$$F_O = \begin{bmatrix} -6.13 \\ -13.39 \\ -6.24 \end{bmatrix} N, M_O = \begin{bmatrix} -0.66 \\ 0.28 \\ 0.14 \end{bmatrix} Nm, r = \begin{bmatrix} 0.17 \\ -0.3 \\ 8.7 \end{bmatrix} cm, m = 2.86kg.$$

Přesnost výsledků v jednotlivých pozicích se zjistí z rovnic 14, 18, ze kterých plyne vztah:

$$\mathbf{A}_F \mathbf{x}_F - \mathbf{b}_F = 0, \quad (24)$$

$$\mathbf{A}_M \mathbf{x}_M - \mathbf{b}_M = 0. \quad (25)$$

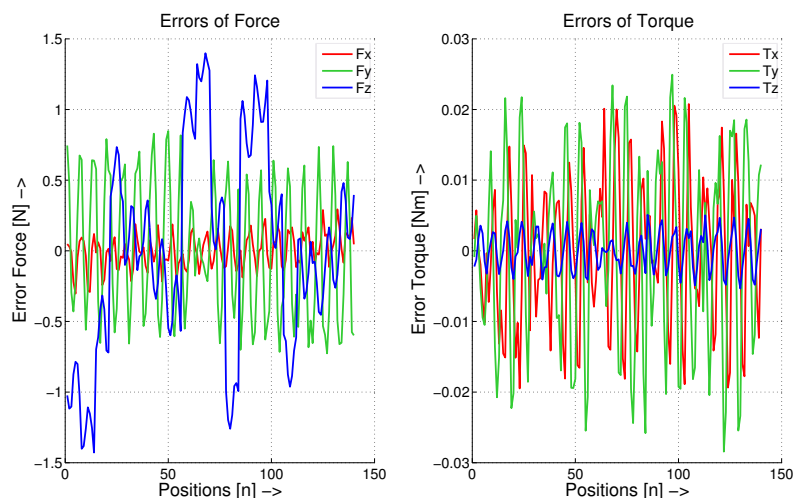
Pokud si ovšem vyneseme jednotlivé rozdíly získaných offsetů a k nim odpovídajícím maticím  $A_F, b_f, A_M, b_M$ , tak nezískáme nulovou matici, ale jisté chybné síly, jež budu v následujícím textu nazývat residua. Zbývají residua, která značí chybu měření silových a momentových vektorů pro jednotlivé pozice. Tato residua jsou zobrazena na obrázku 29. Chyba v silách se pohybuje v rozmezí  $\pm 7,5N$  a chyba momentů se pohybuje v rozmezí  $\pm 0,65Nm$ , což je pro naše účely příliš mnoho. Proto se pátralo po možných vysvětleních těchto chyb. Senzor byl ochráněn před světlem a byla kontrolována teplota v místnosti, zda se při práci s robotem příliš nezměnila.



Obrázek 29: Residua sil a momentů z 20 pozic pro rameno 2

Abychom dostali přesnější výsledky pro celý konfigurační prostor robotu, musíme vybudit více odlišných pozic pro silový senzor, proto v dalším pokusu bylo generováno 140 pozic. Pozice byly odlišné v posledních třech motorech. Vždy se vzal maximální a minimální rozsah motoru, který se rozdělil na stejně velké díly. Rozsah motoru R se rozdělil na 7 dílů, jeho vliv na koncový bod je největší. Rozsah motoru B se rozdělil na 5 dílů a rozsah motoru T se rozdělil na 4 díly. Tím se pro každou pozici vygenerovanou motory R a B odečtou výsledky ze senzoru, který se otáčí kolem své osy Z. Výsledné síly, momenty, poloha těžiště a váha chapadla z tohoto experimentu jsou:

$$F_O = \begin{bmatrix} -6.11 \\ -11,28 \\ -15.01 \end{bmatrix} N, M_O = \begin{bmatrix} -0.63 \\ 0.14 \\ 0.15 \end{bmatrix} Nm, r = \begin{bmatrix} 0.03 \\ -0.03 \\ 9.34 \end{bmatrix} cm, m = 2.71kg.$$



Obrázek 30: Residua sil a momentů ze 140 pozic pro rameno 2

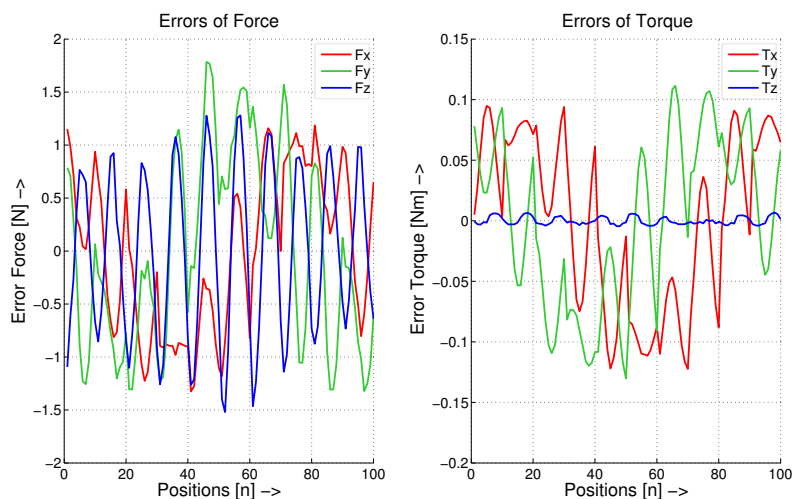
Z obrázku 30 je vidět zlepšení oproti pokusu s 20 pozicemi. Největší chyba v silové složce je v ose Z a jedná se přibližně o 1,4 N. V ose Y sensor vykazuje maximální chybu 0,85 N a v ose X pouze 0,3 N. Přesnost momentů se zlepšila o řád. Více podrobností je zobrazeno v tabulce 6.

Síly	Maximální absolutní chyba [N]	Směrodatná odchylka [N]
F_X	0.3035	0.1203
F_Y	0.8477	0.4753
F_Z	1.4277	0.7155
Momenty	Maximální absolutní chyba [Nm]	Směrodatná odchylka [Nm]
M_X	0.0208	0.0103
M_Y	0.0284	0.0133
M_Z	0.0053	0.0027

Tabulka 6: Chyby a směrodatné odchylky senzoru pro pokus se 140 pozicemi

Nevýhodou těchto pozic je přílišná komplikovanost. Chyby sil a momentů se sice snížily, ale další identifikace příčin chyb je obtížná. U chyb sil a momentů se zdá být jistá symetrie, proto byla měřena data v dalším experimentu. Zde bylo robotem vygenerováno 100 pozic a to pouze s přispěním čtvrtého a šestého kloubu (odpovídající motorům R a T). Každý z rozsahů se rozdělil na desetiny. Pro algoritmus počítající offsety se nyní použila optimalizační funkce *lsqcurvefit*, která optimalizuje neznámé (váha chapadla a pozice jeho těžiště, offsety sil a momentů) pomocí nejmenších čtverců tak, aby nelineární funkce odpovídala změřeným datům (změřené síly, momenty a rotační matice). Výsledky residuů jsou v obrázku 31 a hodnoty sil, momentů, váhy a polohy těžiště vychází:

$$F_O = \begin{bmatrix} -8.44 \\ -11,87 \\ -5.63 \end{bmatrix} N, M_O = \begin{bmatrix} -0.827 \\ 0.14 \\ 0.16 \end{bmatrix} Nm, r = \begin{bmatrix} -0.04 \\ -0.07 \\ 9.59 \end{bmatrix} cm, m = 2.46kg$$

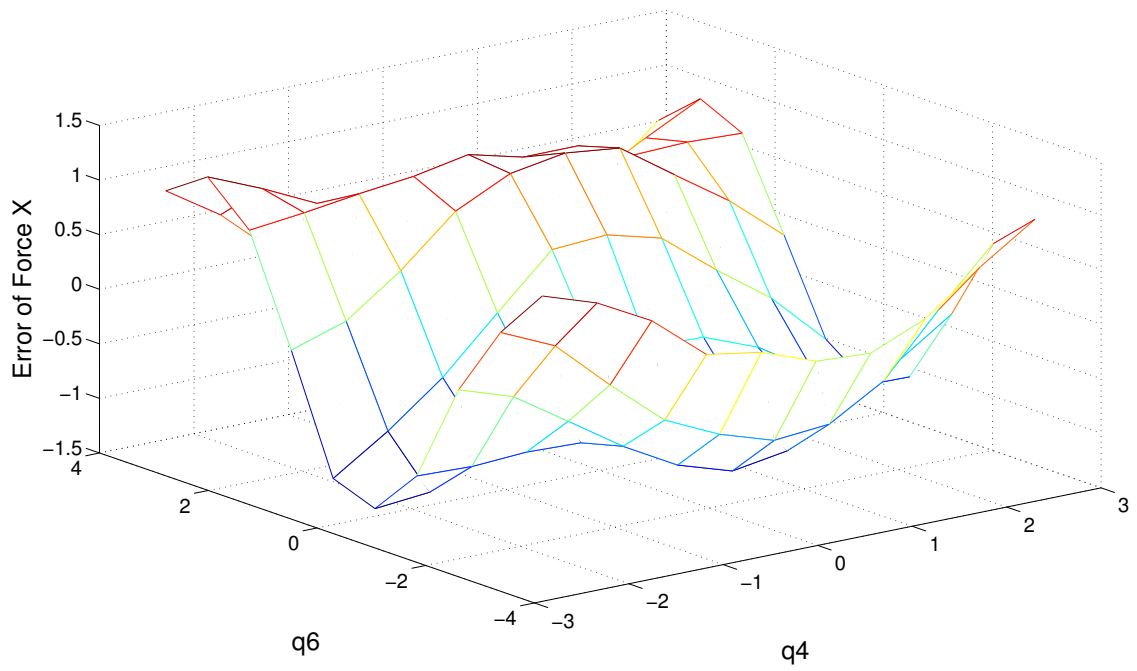


Obrázek 31: Residua sil a momentů ze 100 pozic pro rameno 2

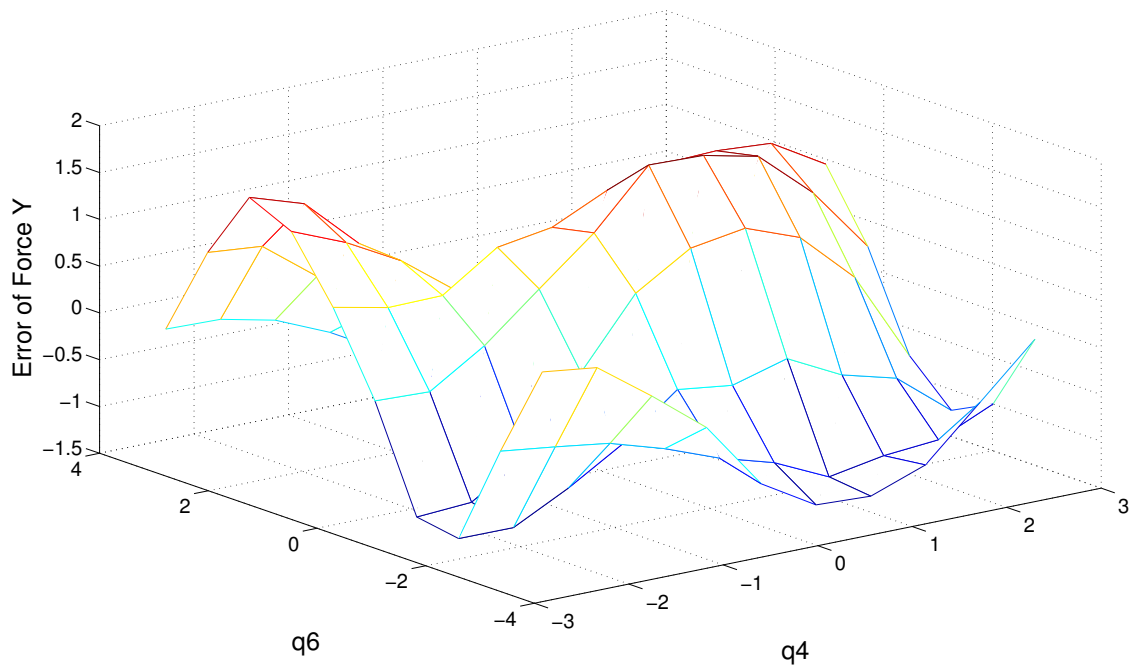
Síly	Maximální absolutní chyba [N]	Směrodatná odchylka [N]
F_X	1.3251	0.7419
F_Y	1.7849	0.9097
F_Z	1.519	0.7718
Momenty	Maximální absolutní chyba [Nm]	Směrodatná odchylka [Nm]
M_X	0.1223	0.0708
M_Y	0.1301	0.0685
M_Z	0.0067	0.0033

Tabulka 7: Chyby a směrodatné odchylky senzoru pro pokus se 100 pozicemi

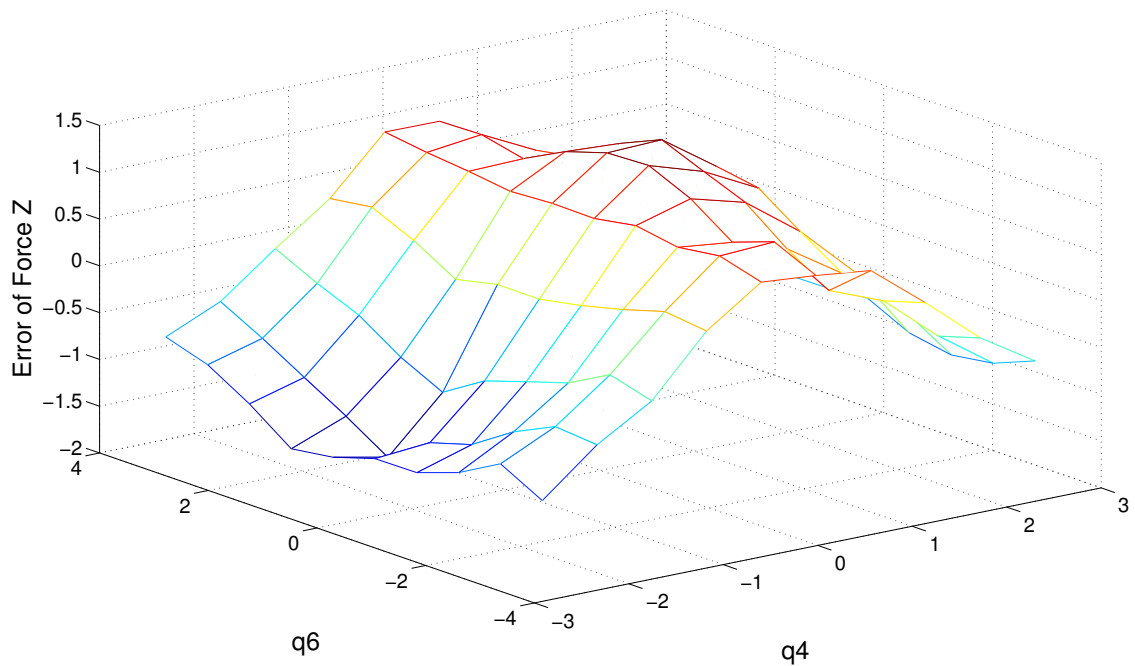
Hlavní myšlenka tohoto pokusu byla ve vynesení residuů v závislosti na polohách motorů R a T. Tím získáme 3D graf, kde v závislosti na motorech (mřížka) vynášíme velikost residua. Výsledky pro jednotlivé osy jsou v obrázcích 32, 33, 34.



Obrázek 32: Vynesení residuí pro osu X pro rameno 2



Obrázek 33: Vynesení residuí pro osu Y pro rameno 2



Obrázek 34: Vynesení residuí pro osu Z pro rameno 2

Mřížky připomínají prostorovou sinusoidu a tedy je vidět, že residua odpovídajícím jednotlivým polohám mají jistou závislost. Pro interpretaci těchto chyb nám může pomoci Fourierova transformace, ze které by se dal zjistit model těchto chyb a po nalezení modelu pátrat po příčině. Nalezením a odstraněním příčiny by jsme mohli získat menší residuální síly a tím ještě více zpřesnit měření sil a momentů. Bohužel se nám již nepodařilo více zpřesnit data měřená senzorem a přikročili jsme k aplikacím senzoru.

Při spuštění silového senzoru z prostředí Ros se kromě topiků s originálními a filtrovanými daty ze senzoru spustí i program, který od filtrovaného signálu odčítá vliv chapadla a publikuje ho na novém topiku (*/r1\_force\_data\_filtered*, */r2\_force\_data\_filtered*).

## 4 Aplikace senzoru

V minulé kapitole se probíral vliv okolí na samotná data silového senzoru. Cílem bylo zefektivnit jeho činnost, aby se dal co nejlépe použít pro aplikace potřebné pro práci robotu. V této kapitole jsou popsány čtyři možná využití senzoru v práci s oděvy.

Z experimentů vlivu tíhy chapadla na silový senzor se zjistilo, že v různých konfiguracích senzor nedokáže odstranit vliv orientace chapadla ve světových souřadnicích. To způsobuje residua, neboli silové chyby pro určitou konfiguraci. V tomto obecném smyslu je těžké využít senzor pro manipulaci s textilem. Jsou však případy, kdy nám zbytkové síly nevadí a to například tehdy, budeme-li udržovat jedno natočení chapadla při vykonávání různých úkolů.

Pro efektivní funkčnost robotu je velmi důležitá rychlost řídicí smyčky, která je ovlivněna hardwarem a komunikací robotu s počítačem. Podrobnější popis jednotlivých úloh je popsán v následujících podkapitolách.

S vyvíjením programů jsem spolupracoval s kolegy z projektu Clopema Vladimírem Petrikem a Liborem Wágnerem. Jejich zkušenost a orientace v řízení robotu mi byla oporou.

### 4.1 Náraz

Data ze senzoru nám umožňují detekovat například nepředpokládaný náraz robotu do překážky. Tohoto principu se využívá při uchycení oblečení ze stolu, kde robot s otevřeným chapadlem klesá do doby, než se dotkne stolu. Změna síly detekovaná robotem způsobí zastavení pohybu směrem dolů a robot začne pohyb vodorovně k oblečení, tím se dostane pod něj a může ho uchopit.

Program pro samotnou detekci je jednoduchou smyčkou, kde robot vykonává určitý pohyb, při němž asynchronně kontroluje sílu ze senzoru. Pokud je síla vyvolaná nárazem robotu na překážku větší než stanovený práh, pohyb robotu se zastaví. Zjednodušená funkce programu *stop\_on\_edge.cpp* je popsána v algoritmu 1.



**Data:** Síla

**Result:** Zastavení robotu nárazem

změření aktuální síly  $F_m$ ;

resetování offsetů  $F_o = F_m$  ;

spuštění pohybu;

**while** *robot se pohybuje* **do**

    změř sílu  $F_m$ ;

**if**  $F_m - F_o > \text{práh}$  **then**

        | zastav pohyb robotu

**else**

        | pokračuj v pohybu

**end**

**end**

#### **Algoritmus 1:** Detekce nárazu robotu

Pro odzkoušení programu byl použit stůl, ke kterému klesal robot po úsečce. Po nárazu do stolu se robot zastavil. Na počátku programu dochází k inicializaci robotu, kde robot provádí přesun do počáteční polohy a nastaví komunikaci se silovým senzorem. V dalším kroku se generuje trajektorie zadaná robotu, v našem případě směrem dolů proti stolu. Důležitá část pro práci robotu je resetování offsetu silového senzoru. Tím odstraníme residuální síly senzoru pro aktuální konfiguraci. Asynchronně se každých 50 milisekund kontroluje, zda-li nedošlo ke kolizi, pokud ne, robot pokračuje v pohybu. Prahová hodnota pro detekci nárazu byla stanovena na 2.5 N.

## 4.2 Natažení

Myšlenka tohoto úkolu je docílit dostatečného natažení oděvu. Natažení je nutné ke správnému složení oblečení, aby nevznikaly záhyby na látce. I když robot pracuje s obrazem z RGB-D kamer a robotické hlavy, je složité rozeznat, zdali je oděv dostatečně napnut. Tuto aplikaci může vyřešit právě použití silového senzoru.

K problému se přistupovalo obdobně, jako u předcházejícího programu. Stručný popis programu *stop-on\_force.cpp* v algoritmu 2.

**Data:** Síla

**Result:** Natažení textilního materiálu

uchopení oděvu;

změření aktuální síly  $F_m$ ;

resetování offsetů  $F_o = F_m$  ;

spuštění roztahování oděvu;

**while** *robot se pohybuje* **do**

    změř sílu  $F_m$ ;

**if**  $F_m - F_o > \text{práh pro natažení}$  **then**

        | zastav pohyb robotu

**else**

        | pokračuj v pohybu

**end**

**end**

#### **Algoritmus 2:** Natažení materiálu

Oproti kontrole nárazu se zde pracuje již s oblečením. Hlavní rozdíl mezi oběma programy je v použití obou ramen robotu, která se od sebe vzdalují po přímce. Důležitou částí programu je nutnost vložit do chapadel látku, kterou chceme napnout. Po vložení oděvu do chapadel se resetují offsety vyvolané jak vahou oděvu, tak i residui pro příslušnou konfiguraci a začne se s napínáním. Opět se asynchronně kontroluje, zdali síla nepřekročila mez, která byla nastavena na 1 N. Prahová hodnota musí odpovídat použité látce.

### **4.3 Zdvih**

Myšlenka použití projektu Clopema v praxi je taková, že přijde hromada vypraného oblečení z pračky a sušičky, robot následně dokáže prádlo roztrídít a složit. Pro splnění tohoto účelu je nutné, aby robot věděl, kdy nějaké oblečení již drží celé ve vzduchu. Poté již může zkoušet oblečení pomocí přechytávání a urovnávání identifikovat a následně složit.

Po vyřešení předcházejících úloh se k tomuto úkolu přistupuje obdobně. Problém s residuálními silami se řeší resetováním. Funkčnost programu *rise\_up.cpp* je popsána v algoritmu 3.

**Data:** Síla

**Result:** Natažení textilního materiálu

uchopení textilu;

změření aktuální síly  $F_m$ ;

resetování offsetů  $F_o = F_m$  ;

spuštění zdvihnutí;

**while** robot se pohybuje **do**

    odečti sílu  $F_m$ ;

**if**  $F_m - F_o < \text{práh pro zdvih}$  **then**

        | zastav pohyb robotu

**else**

        | resetování offsetů  $F_o = F_m$  ;

        | pokračuj v pohybu

**end**

**end**

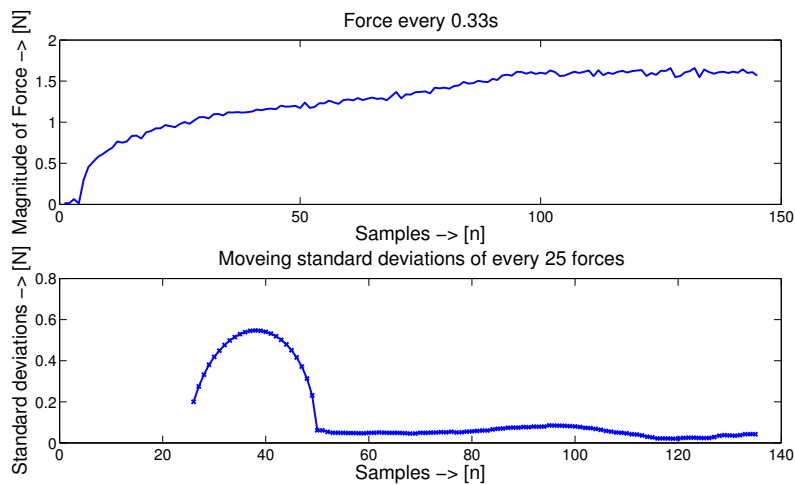
### Algoritmus 3: Zdvih textilu

Výsledný kód je v podstatě totožný jako u předchozích programů. V programu je nastaven zdvih o 40 centimetrů, aby robot nenarazil do stropu místnosti, ve které se nachází. Výrazný rozdíl mezi předchozími programy je v práci s daty silového senzoru. U předchozích aplikací se hlídalo, kdy síla překročí jistou mez, v této aplikaci se musí kontrolovat příspěvky sil mezi jednotlivými fázemi při zdvihání. Myšlenka je ta, že při zvedání roste účinek váhy oblečení, které již neleží na podložce. Pokud tento rozdíl bude menší než hranice, považuje se oblečení za plně zdvihnuté a zastaví se pohyb robotu, následně program končí. Tato podmínka se asynchronně kontroluje každých 0.33 vteřiny.

Bohužel tento program nefunguje tak, jak by měl. Je to způsobeno změnami sil, vyvolané pohybem robotu. K problému nelze přistupovat pouze tím, že kontrolujeme rozdíl sil mezi dvěma po sobě jdoucími kontrolami, protože tyto změny jsou velmi ovlivněny kolísáním měřených sil. V obrázku 35 nahoře je zobrazen průběh měřené absolutní změny síly v průběhu zdvihnutí. Z počátku je změna síly velmi výrazná, ale po velké změně je její nárůst již menší z pohých změn mezi měřeními je špatně viditelné, kdy je již oděv úplně zvednut. Posledních 30 vzorků odpovídá již okamžiku, kde je oděv již celý ve vzduchu. V obrázku 35 dole je průběh směrodatné odchylky pro 25 po sobě jdoucích naměřených sil.

Jedna z možností detekce zvednutého oděvu by mohla být právě v měření směrodatné odchylky určitého množství po sobě jdoucích měření. Další možnost je v předělání programu tak, aby se podmínka nekontrolovala asynchronně. Vždy po určitém pohybu by se robot zastavil a změřila by se síla. Takto získaná data by neměla být zatížená chybou vyvolanou pohybem robotu.

Z důvodu nedostatku času je proto tento program zatím nefunkční.



Obrázek 35: Průběh měřené síly při zvedání oblečení (nahore) a průběh směrodatné odchytky pro 25 pohybujících se měření (dole)

#### 4.4 Vedení

Mnoho průmyslových robotů v praxi vykonává stále stejný pohyb. K naučení pohybu se používají například dálkové ovladače, které dokážou ovládat natočení jednotlivých kloubů. S využitím silového senzoru lze naprogramovat i úlohu, v níž je koncové chapadlo robotu řízeno přímo člověkem. Tím se může robot naučit trajektorie potřebné k různým úlohám.

Jedná se o zopakování experimentu firmy Weis Robotics [14], kde se svým výrobkem demonstrovali jedno z možných použití. V jejich případě však nebylo na silovém senzoru připevněno chapadlo a pravděpodobně nemuseli ani filtrovat vliv tramvají. Tím získali ovládání na frekvenci 500 Hz.

Hlavní rozdíl v této úloze je v použití dat ze senzoru bez resetování offsetů. Jelikož můžeme robotem natáčet podle všech tří os, musíme brát data ze senzoru taková, jaká jsme je získali z kapitoly *Eliminace vlivu tíhy chapadla*. Musíme tedy brát v úvahu velikost maximálních offsetů a v tomto pásmu necitlivosti nehýbat s robotem.

**Data:** Síla

**Result:** Vedení chapadla robotu rukou

inicializace robotu;

**while** *ros je v pořádku* **do**

    získej směr silového a momentového vektoru;

**if** *síla je větší než práh pro vedení* **then**

        | spočítej vektor směru silového vektoru;

**end**

**if** *moment je větší než práh pro vedení* **then**

        | spočítej orientaci natočení silového senzoru;

**end**

**if** *síla ani moment nejsou větší než práh pro vedení* **then**

        | čekej 0.01s, continue;

**end**

    Zjistí současnou polohu a naplánuj trajektorii podle vektoru síly a orientaci natočení;

    Proved' pohyb;

**end**

#### **Algoritmus 4:** Vedení chapadla robotu

Algoritmus 4 popisuje princip programu *compliant\_motion.cpp*. V inicializaci se robot nastaví do výchozí pozice, naváže se spojení s filtrovaným silovým senzorem. V nekonečné smyčce se neustále odebírají data ze senzoru a kontroluje se, zda-li jsou větší než nastavené prahy. Práh pro sílu je kvůli nenulovým offsetům nastaven na velikost 5N, práh pro moment je nastaven na 1Nm. Pokud je síla nebo moment větší než práh, spočte se velikost a směr posuvu, případně i změna natočení. Velikost a směr posuvu a natočení se získají ze změn sil nebo momentů naměřené senzorem a přenásobené konstantou, jež byla experimentálně stanovena. V případě, že ani jeden z parametrů nepřekročil práh, se pokračuje ve snímání. Ze současné polohy a spočteného směru s natočením se naplánuje potřebná trajektorie. Rychlost pohybu spočívá ve vnitřní řídicí struktuře robotu, kde se počítají přímé i inverzní kinematické úlohy, kontroluje se kolize obou ramen a zprostředkovávají se datové přenosy s počítačem a robotem. Zjistilo se, že původní řešení pohyb zpomalovalo a tím i zhoršovalo funkčnost programu. Způsoboval to zásobník s body trajektorie. Po vykonání jakékoliv trajektorie se celý program uspal na 0.3 vteřiny a tím se robot pohyboval trhaně. Došlo ke změně v systému a robot se díky tomu pohybuje více plynule.

## 5 Závěr

Tato práce se zabývá použitím senzoru ATI Mini 45 v projektu Clopema. Pro jeho efektivní využití byla provedena řada experimentů, při kterých se zjistilo, že je senzor ovlivňován různými rušivými vlivy. Některé z těchto vlivů byly odstraněny, jiné se podařilo zredukovat a s některými je třeba počítat.

Bylo zjištěno, že na senzor namontovaný na robotu mají vliv otřesy způsobené projíždějícími tramvajemi, který se řeší převzorkováním. Další překvapivý vliv na senzor mělo světlo, které vnikalo do těla senzoru. Zastíněním otevřených částí se tento vliv vyřešil. Z experimentů provedených se silovým senzorem vyplývá, že značný vliv má i teplota, která ovlivňuje vnitřní odpor měřících tenzometrů. Vliv teploty se nepodařilo odstranit a je to možný další krok potřebný pro zlepšení efektivnosti.

Hlavní cíl je měřit skutečnou sílu v prstech chapadla, k tomu potřebujeme eliminovat vliv tíhy chapadla, které je na senzor přimontováno. Algoritmus použitý k tomuto účelu stále vykazuje nepřesnosti, se kterými se musí při použití počítat.

Aplikace senzoru byla ukázána na některých úlohách. Ze zadání se povedly implementovat dvě ze tří úloh, napnutí oděvu drženého oběma chapadly a detekce kontaktu chapadla s okolím. Úloha detekce zdvižení se z časového nedostatku nepodařila dokončit. Navíc však byla implementována manuální navigace chapadla.

Pro případné budoucí zlepšení funkčnosti senzoru je tedy nutné vyřešit vliv teploty a identifikace dalších rušivých vlivů, které ovlivňují odečítání vlivu tíhy chapadla.

## 6 Literatura

### Reference

- [1] Daniel E. Whitney: *"Historical perspective and state of the art in robot force control"*Proceedings. 1985 IEEE International Conference on , vol.2, no., pp.262,268, Mar 1985.
- [2] Hubbard Hoyt, Andrew Marchese: *FORCE SENSING AND HAPTIC FEEDBACK FOR ROBOTIC TELESURGERY*. TELESURGERY, : April 29th 2010
- [3] Mack, I.; Ferguson, S.; McMenemy, K.; Potts, S.; Dick, A., *Interactive force sensing feedback system for remote robotic laparoscopic surgery*. Haptic Audio visual Environments and Games, 2009. HAVE 2009. IEEE International Workshop on , vol., no., pp.58,63, 7-8 Nov. 2009
- [4] CloPeMa: *Clothes Perception and Manipulation*. (2012).  
<http://clopemaweb.felk.cvut.cz/clothes-perception-and-manipulation-clopema-home/>
- [5] ATI Industrial Automation: *Network ForceTorque Sensor System*.Installation and Operation Manual,Document #: 9620-05-Net FT, February 2013
- [6] ATI Industrial Automation: *Network ForceTorque Sensor System*.Installation and Operation Manual,Document #: 9620-05-TWE, February 2013
- [7] ATI Industrial Automation: *Network ForceTorque Sensor System*.Installation and Operation Manual,Document # 9620-05-Transducer Section, February 2013
- [8] M. Murgaš, *Vplyv rôznych napájaní a rôznych zapojení silového senzoru ATI Mini45 na jeho chovanie* . ČVUT Praha, 18.7.2013
- [9] J. Mrňa, M. Murgaš, V. Smutný *Calculation of Robot Gripper Centroid, Mass, and Force Sensor Offsets*. ČVUT Praha, 30.9.2013
- [10] Robotic Operating System. (8.5.2014).  
<http://wiki.ros.org>
- [11] MathWorks: *Matlab*. (8.5.2014).  
<http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- [12] Metroweb: *Linka B: Zličín - Černý Most*. (26.5.2005).  
[http://www.metroweb.cz/metro/stanice/linka\\_b.htm](http://www.metroweb.cz/metro/stanice/linka_b.htm)

- [13] Papouch: *Teploměry s přenosem dat po Ethernetu*. (26.5.2005).  
<http://www.papouch.com/cz/shop/product/tme-ethernetovy-teplomer/#productDownload>
- [14] Weiss Robotics: *Force-Torque Sensor KMS 40*.  
<http://www.weiss-robotics.de/en/force-capture/6-axes-force/torque-sensors/force-torque-sen>
- [15] Kulite Semiconductor Products, Inc.: *Strain Gage Manual*.  
[http://www.kulite.com/docs/products\\_overview/StrainGageManualDigital.pdf](http://www.kulite.com/docs/products_overview/StrainGageManualDigital.pdf)



## Příloha A: Obsah CD

Zde je seznam souborů a složek nacházejících se na přiloženém CD.

<b>Zápis</b>	<b>Popis</b>
Data/	Složka s daty z jednotlivých experimentů
Data/Centroid/	Složka s daty z experimentů eliminace vlivu tíhy chapadla
Data/Lights/	Složka s daty z experimentu s vlivem světla
Data/Temperature/	Složka s daty z experimentu s vlivem tepla
Data/Vibrations/	Složka s daty z experimentu s mechanickými kmity
Programy/	Složka s programy, skripty a launch soubory
Programy/launch/	Složka se spouštěcím programem pro silový senzor
Programy/scripts/	Složka s programy pro měření sil a momentu v jazyku Python
Programy/src/	Složka s programy aplikací senzoru v jazyku C++
DP_Jan_Kubeš.pdf	Dokument diplomové práce ve formátu PDF

Tabulka 8: Obsah přiloženého CD

## Příloha B: Popis naměřených dat

Tato příloha slouží k orientaci, která data odpovídají vykonaným experimentům a jakou mají formu.

### Data k experimentům s mechanickými kmity

Ve složce *Data/Vibrations/* se nachází naměřená data pro experimenty s mechanickými kmity. V jednotlivých složkách jsou soubory dat exportovatelných do programu Matlab odpovídajícím určitým experimentům.

V souboru *Experiments\_filters.mat* se nachází data z experimentů uvedených v tabulce 4. Jednotlivá měření odpovídají řádkům matice odpovídající jednotlivým experimentům. V prvním sloupci se nachází unixový čas, sloupce 2 až 4 odpovídají silám  $F_X$ ,  $F_Y$ ,  $F_Z$ . Data byla měřena na frekvenci 7000 Hz.

V souboru *Experiment\_stamp.mat* se nachází data z experimentu s vlivem dupání v okolí robotu. Forma uspořádání dat je stejná jako u pokusu s filtry, ale v pátém sloupci je indikace dupnutí. Parametr "1" značí okamžik dupnutí, parametr "0" značí klidový stav. Data byla měřena na frekvenci 7000 Hz.

V souboru *Experiment\_trams\_metro.mat* se nachází data z experimentů vlivu tramvají a provozu metra. Data z experimentu mají stejný formát jako data z experimentu s vlivem dupání v okolí robotu.

### Data k experimentům s vlivem světla

Ve složce *Data/Lights/* se nachází naměřená data pro experimenty s účinky světla na silový senzor. V jednotlivých složkách jsou soubory dat odpovídajícím určitým experimentům (Flashlight a Light).

Oba experimenty mají stejnou formu uložení.

Ve složce *.../forces/* jsou v souborech typu .csv data ze silového senzoru oddělených čárkou. V prvním sloupci je identifikační číslo jednotlivých měření. Sloupce 2 až 4 odpovídají silám  $F_X$ ,  $F_Y$ ,  $F_Z$  a sloupce 5 až 7 odpovídají momentům  $T_X$ ,  $T_Y$ ,  $T_Z$ .

Ve složce *.../links/* jsou v souborech typu .csv data reprezentující rotační matice odpovídající silovým sensorům. V prvním sloupci je identifikační číslo odpovídající jednotlivým měřením. Ve sloupcích 2 až 17 je řádkové vyjádření rotační matice  $4 \times 4$ .

V souboru *joints.csv* jsou uloženy informace o natočení jednotlivých kloubů manipulátoru odpovídající jednotlivým měřením. V souborech *temp.csv* a *time.csv* jsou uloženy teploty měřené v místnosti s robotem a odpovídající unixový čas.

## Data k experimentu s teplotou

Ve složce *Data/Temperature/* se nachází naměřená data pro experiment s vlivem teploty na silový senzor. Mají stejnou formu jako data k experimentům s vlivem světla.

## Data k experimentům vlivu tíhy chapadla

Ve složce *Data/Centroid/* se nachází naměřená data pro experimenty eliminací vlivu tíhy chapadla. Čtveřice experimentů mají stejnou formu jako data k experimentům s vlivem světla a teploty. Pátý experiment obsahuje pouze soubor *Experiment1\_offsets.mat*, který obsahuje matice sil a momentů odpovídajícím jednotlivým polohám.