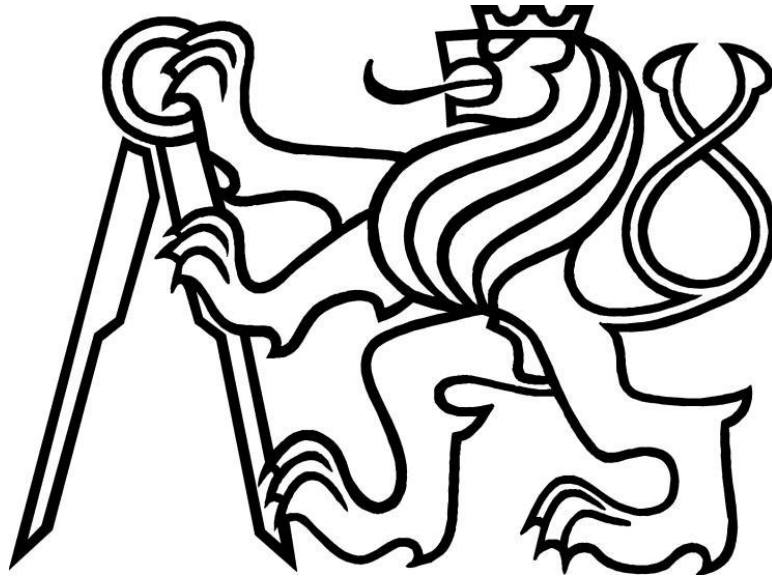


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vyhodnocování opotřebení převodovek robota měřením vůle

Evaluation of the robot gearbox wear by a backlash  
measurement

Adam Zíka

Praha 2014

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

Katedra kybernetiky

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**Student:** Adam Z í k a  
**Studijní program:** Kybernetika a robotika (bakalářský)  
**Obor:** Robotika  
**Název tématu:** Vyhodnocování opotřebení převodovek robotu měřením vůle

### Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s kinematikou průmyslových manipulátorů a jejich mechanickou realizací.
2. Prostudujte metody pro hodnocení opotřebení převodovek a typickým průběhem a hodnocením opotřebení převodovek lakovacích a svařovacích robotů v průmyslu.
3. Navrhněte metodu měření mechanické vůle robotu instalovaného v lince a systém zrealizujte.
4. Naměřte reálná data několika robotů a navrhněte metodu určení doporučeného okamžiku opravy robotu.
5. Naměřená data a získané zkušenosti vyhodnoťte.
6. Práci realizujte ve spolupráci s lakovnou automobilky TPCA v Kolíně.

### Seznam odborné literatury:

- [1] Asada, Haruhiko and Slotine, Jean-Jacques E.: Robot Analysis and Control. John Wiley and Sons, New York, USA, 1986.  
[2] firma Sick, firemní literatura

**Vedoucí bakalářské 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

# Abstrakt

Cílem bakalářské práce je prostudovat metody pro hodnocení opotřebení převodovek měřením vůle a nalezení vhodné metody pro lakovnu Toyota Peugeot Citroën Automobile v Ovčárech. Vybraná metoda je zrealizována. Dalším úkolem je naměřit data a z nich spočítat opotřebení jednotlivých převodovek. Výsledná data se poté vyhodnotí.

Bylo zvažováno více metod, ale jako nejlepší se nakonec ukázala metoda měření výchylky koncového bodu. Její největší výhodou je poměr cena/výkon a také jednoduchá instalace. Naměřená data byla porovnána s limitními hodnotami. Zjistilo se, že všechny měřené převodovky jsou zatím v normě. Do budoucna lze metodu rozšířit o sledování průběhu opotřebení.

# Abstract

The objective of this bachelor thesis is to study methods of evaluation of the robot gearboxes wear by a backlash measurement and to find out the appropriate method for paint shop in Toyota Peugeot Citroën Automobile in Ovčáry. The chosen method is realized. Another objective is to measure data and to count the wear of the robot gearboxes. The resultant data are then evaluated.

From several methods the best one has been chosen. The method is called *measurement of the deflection of the endpoint*. The biggest advantage is the best price/performance ratio. The measured data have been compared with the maximum acceptable values. In the future this method could be extended with the observation of the process of the wear.

# Prohlášení autora práce

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 .....

.....

Podpis autora práce

# Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Vladimíru Smutnému za trpělivost a výborné vedení při jejím zpracování. Děkuji vedoucímu mého projektu v Toyota Peugeot Citroën Automobile Ing. Lukáši Hudouskovi za odborné rady a nápady.

# Obsah

|   |    |
|---|----|
| Úvod                                      | 1  |
| Kapitola 1: Opotřebení a vůle převodovek  |    |
| 1.1 Mechanické opotřebení převodovek      | 2  |
| 1.2 Vůle v převodovkách                   | 2  |
| Kapitola 2: Metody měření opotřebení      |    |
| 2.1 Kovové částice                        | 3  |
| 2.2 Metoda společnosti Kawasaki           | 6  |
| 2.3 Metoda dvojic                         | 6  |
| 2.4 Metoda měření při pohybu              | 8  |
| 2.5 Metoda ruční kontroly                 | 9  |
| 2.6 Metoda měření výchylky koncového bodu | 9  |
| Kapitola 3: Popis použité metody          |    |
| 3.1 Princip                               | 10 |
| 3.2 Vychylování robota                    | 10 |
| 3.3 Měření výchylky                       | 11 |

## Kapitola 4: Přístroje a roboti

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 4.1 Senzor měření vzdálenosti | 12 |
| 4.2 Digitální zobrazovač      | 14 |
| 4.3 Robot Kawasaki KF121E     | 15 |
| 4.4 Robot Kawasaki KE610H     | 17 |

## Kapitola 5: Výpočet opotřebení

|  |    |
|--|----|
| 5.1 Denavitova-Hartenbergova notace    | 18 |
| 5.2 Transformační matice               | 19 |
| 5.3 Rovnice k výpočtu opotřebení       | 21 |
| 5.4 Postup měření                      | 22 |
| 5.5 Jakobián                           | 23 |
| 5.6 Měření ve dvou polohách            | 23 |
| 5.7 Nalezení vhodných poloh pro měření | 24 |
| 5.8 Numerický výpočet jakobiánu        | 25 |

## Kapitola 6: Experimentální výsledky

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 6.1 Naměřené hodnoty              | 26 |
| 6.2 Výpočet hraničního opotřebení | 28 |
| 6.3 Vyhodnocení                   | 28 |
| 6.4 Skutečné opotřebení           | 29 |

|       |    |
|-------|----|
| Závěr | 30 |
|-------|----|

# Úvod

Tato bakalářská práce je zaměřena na nalezení vhodné metody měření opotřebení převodovek robota. Praktická část práce byla vypracována v lakovně v automobilce Toyota Peugeot Citroën Automobile v Ovčárech. Mým úkolem bylo seznámit se s již používanými metodami měření opotřebení a navrhnout metodu, kterou by bylo možno použít na roboty umístěné na lince.

Tematicky je práce rozdělena do šesti kapitol. První kapitola se zabývá popisem problému a vysvětlením pojmů. Ve druhé kapitole jsou popsány metody zjišťování opotřebení převodovek robota. Kapitola třetí popisuje mnou navrženou metodu, která se použije na roboty v lakovně. Čtvrtá kapitola se věnuje jednotlivým strojům a přístrojům. Jedná se o zobrazovač, senzor a roboty. V kapitole páté se zabývám algoritmem výpočtu opotřebení. Poslední šestá kapitola obsahuje naměřené a spočtené hodnoty. Dále je v této kapitole uvedeno vyhodnocení naměřených hodnot a jejich porovnání se spočtenými limitními hodnotami.

V celé této bakalářské práci je mnohokrát použito slovo robot. Dle pravidel českého pravopisu lze používat jak tvar životný tak i neživotný. [6] Mně je mnohem bližší tvar životný, kterého se budu držet.



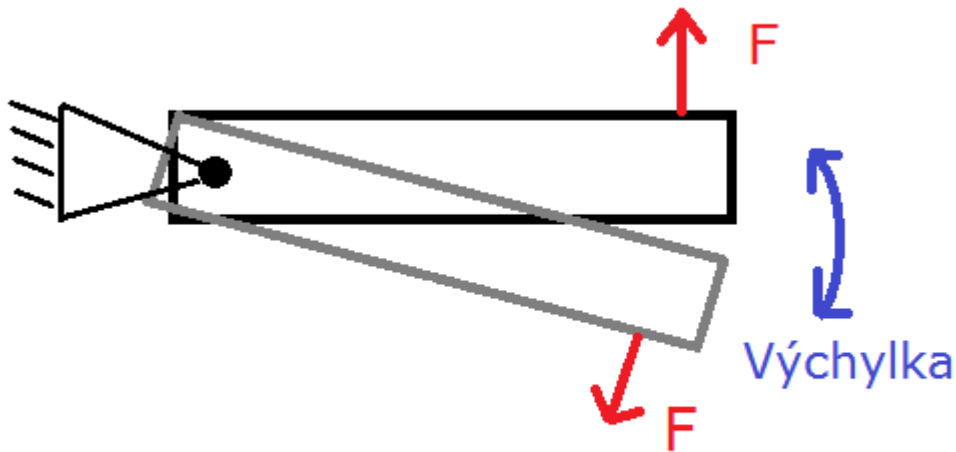
# 1) Opotřebení a vůle převodovek

## 1.1 Mechanické opotřebení převodovek

Převodovka se během svého životního cyklu postupně opotřebovává. Opotřebení vzniká kvůli mechanické únavě materiálu, ze kterého je převodovka vyrobena. Uvnitř převodovky dochází při každém pohybu k vnitřnímu tření, které způsobuje uvolňování kovových částic. Tření lze snížit použitím vhodného maziva. Kovové částice se vyskytují v tomto mazivu a jejich výskytem se zabýváme v bodě 2.1.

## 1.2 Vůle v převodovkách

Kvůli opotřebení jednotlivých převodovek dochází postupně ke zvětšování vůlí. Převodovky mají malou vůli již z výroby, která se ale časem nemění. Je dána mechanickými dorazy mezi krajními polohami mechanických částí. Druhá část vůle se již týká mechanického opotřebení. V počátku životnosti robota je nulová, ale postupně se zvětšuje kvůli mechanickému opotřebení a také materiálové únavě jednotlivých dílů. Vůle v převodovce lze pozorovat pomocí výchylky jednotlivých ramen. Výchylka je úhel mezi koncovými polohami ramene. Je způsobena silou, která působí na rameno robota. Při této výchylce se pozice kloubu nemění a nedochází ani k mechanickému ohýbání ramene. Výchylka je způsobena pouze vůlí v převodovce. Je zobrazena na obrázku 1.



*Obrázek 1: Výchylka robota je úhel daný rozdílem mezi jeho krajními polohami. Kloubová souřadnice se nemění. Nedochozí ani k mechanickému ohybu ramene. Výchylka je dána pouze vůlí v převodovce*

Tuto výchylku lze také při znalosti délky ramen převést na měření vzdálenosti.

## 2) Metody měření opotřebení

Nejprve bych se rád zmínil o metodách, které se používají ke zjišťování opotřebení. Metody sloužily jako základ návrhů nových postupů.

### 2.1 Kovové částice

Metoda je založena na měření výskytu kovových částí v převodovkovém oleji. Vzorek je odebírán při výměně oleje v převodovce při pravidelné roční kontrole robotů v průběhu odstávky. Po vypuštění oleje je vzorek umístěn do plastového sáčku a uložen. Odtud je možno si libovolný vzorek vzít za účelem měření, které je prováděno měřičem kovových částic *New Cosmos SDM-72 Steel Dust Meter*. [1] Přístroj je vidět na obrázku 2. Technické údaje jsou umístěné v tabulce 1.



Obrázek 2: Přístroj k měření množství kovových částic [1] pomocí kterého se zjišťuje opotřebení převodovek

|                  |                  |
|------------------|------------------|
| Měřicí rozsah    | 0-5,000 %        |
| Rozlišení        | 0,001 %          |
| Pracovní teplota | 0-40 °C          |
| Rozměry          | 84 x 190 x 40 mm |

Tabulka 1: Technické údaje přístroje SDM-72 [1]

Nejprve důkladně očistíme nádobku přístroje a pomocí kontrolního měření zkontrolujeme, zda na ni nezůstaly žádné nečistoty z předchozích měření. Poté nabereme vzorek měřeného oleje, nádobku následně zvenku otřeme uzavřeme ji víčkem a celou zasuneme do otvoru k tomu uzpůsobenému na vrchní straně přístroje. Na displeji se poté zobrazí hledaná hodnota. Po naměření vrátíme vzorek zpět a nádobku i s víčkem důkladně vyčistíme. Při tloušťce nádobky i víčka okolo tří čtvrtin centimetru je čištění jemná a zdlouhavá práce, což mohu potvrdit z vlastní zkušenosti.

Měření jednoho vzorku zabere asi deset až patnáct minut. Při počtu několika stovek vzorků je v praxi měření časově velmi náročné. Metoda nám bohužel neříká nic o tvaru kovových částic, pouze zjišťuje jejich

objem v oleji. Zkoumat tvar a velikost částic by bylo možné pomocí mikroskopu, ale to se dostáváme z oblasti průmyslové do oblasti laboratorní. Nelze tedy přesně říci, jak kovové částice vznikly a jaké množství částic je již nepřijatelné. Použití této metody tkví v tom, že pouze určí převodovky podezřelé z vyššího opotřebení. Naměřené hodnoty u vybraných robotů jsou v tabulce 2.

| Robot/převodovka | Množství částic | Robot/převodovka | Množství částic |
|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| 1/1              | 0,000 %         | 3/1              | 0,000 %         |
| 1/2              | 0,003 %         | 3/2              | 0,000 %         |
| 1/3              | 0,000 %         | 3/3              | 0,000 %         |
| 1/4              | 0,012 %         | 3/4              | 0,002 %         |
| 1/5              | 0,003 %         | 3/5              | 0,000 %         |
| 1/6              | 0,001 %         | 3/6              | 0,001 %         |
| 2/1              | 0,000 %         | 4/1              | 0,000 %         |
| 2/2              | 0,000 %         | 4/2              | 0,005 %         |
| 2/3              | 0,002 %         | 4/3              | 0,004 %         |
| 2/4              | 0,035 %         | 4/4              | 0,005 %         |
| 2/5              | 0,005 %         | 4/5              | 0,000 %         |
| 2/6              | 0,000 %         | 4/6              | 0,000 %         |

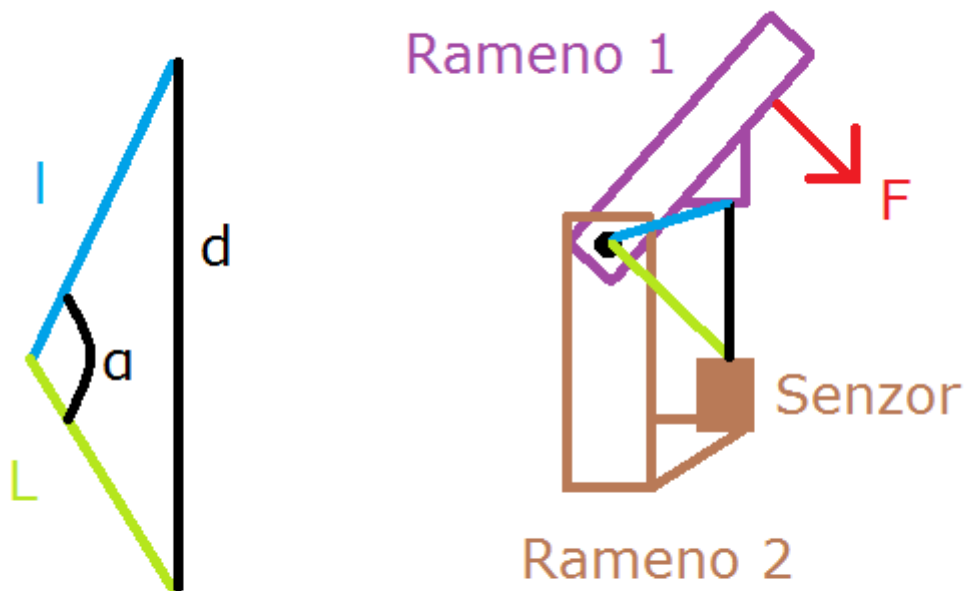
*Tabulka 2: Množství kovových částic v oleji u vybraných převodovek*

## 2.2 Metoda společnosti Kawasaki

Všichni roboti v lakovně TPCA jsou od společnosti Kawasaki. Proto jsem se obrátil na zástupce společnosti pana ing. Miroslava Rathouze. Rozhovor ohledně robotů byl velmi poučný, avšak o konkrétních metodách měření opotřebení mně bohužel nesměl nic říci, protože metoda je vlastnictvím Kawasaki Robotics.

## 2.3 Metoda dvojic

Na tomto nápadu jsem spolupracoval s panem Ing. Holým z TPCA. Metoda pro každou dvojici po sobě následujících ramen spojených jedním kloubem měří vůli v převodovce tohoto kloubu. Ke zjišťování vůle slouží senzor vzdálenosti na optickém principu. Senzor je umístěn na jednom rameni a měří vzdálenost od odrazné plochy, která je umístěna na rameni druhém. Odrazná plocha je vyrobena z takového materiálu, aby se od něj světlo dobře odráželo (například různé druhy kovů). Plocha je umístěna na jednoduchém posuvném zařízení, abychom ji mohli umístit vždy do ideální polohy vzhledem k senzoru. Princip je nastíněn na obrázku 3.



Obrázek 3: Princip metody dvojic, kde senzor je umístěn na jednom rameni, odrazná plocha na druhém a měříme vzdálenost  $d$ . Aplikace síly probíhá nejprve ve směru šipky a poté ve směru opačném. Jelikož vzdálenosti  $l$  i  $L$  jsou konstantní, z obou naměřených vzdáleností  $d$  spočteme úhly  $\alpha$  pomocí kosinové věty:  $\alpha = \arccos(d^2 - l^2 - L^2 + 2lL)$ . Výsledná výchylka je rozdílem obou spočtených úhlů.

Celá konstrukce je z feromagnetického materiálu, abychom ji mohli pohodlně a rychle umísťovat na robota. To je díky magnetu velmi jednoduché a nevyžaduje dodatečné konstrukce na výrobní lince ani drahý nákup velkého počtu senzorů, jelikož k měření postačí senzor jediný. Senzor je umístěn do kovové konstrukce z vhodného (magnetického) materiálu. Konstrukce je pomocí magnetu přidělvána na robota stejným způsobem jako v případě odrazné plochy. Metoda se nakonec ukázala jako nepoužitelná, protože magnety, určené k jednoduchému přichycování,

bohužel na robotovi nedrží, jelikož robot není z magnetického materiálu. Musí se tedy zvažovat jiné přichycení senzoru.

Nápad, senzor na robota montovat pomocí šroubků a maticek, je nerealizovatelný z důvodu časové náročnosti a také zásahu do robota, na kterého by se výše jmenované šrouby musely přidělat. Ostatní metody přichycení nezaručovaly dostatečnou pevnost a nehybnost senzoru během měření. Tímto celá metoda ztrácí svůj hlavní klad a to rychlost, tudíž byla zavržena.

#### 2.4 Metoda měření při pohybu

U této metody provádí robot předem daný, při každém měření stejný, pohyb. Během něj postupně dosáhne všech (ideálně 6) měřených bodů. V každém z těchto bodů je umístěn senzor, měřící vzdálenost mezi ním a robotem. Při průchodu jednotlivými body je minimální hodnota vzdálenosti ukládána a později porovnávána s předchozími hodnotami. Lze tedy sledovat přesnost robota v praxi a pozorovat její vývoj v čase. Výhodou této metody je především omezení vlivu lidského faktoru a její plná automatizace.

Robot je předem naprogramován k provedení požadovaného pohybu a to v intervalu požadovaným údržbou. Sám jej poté provede a data uloží. V databázi lze jednotlivá měření sledovat i automaticky, kdy při určitých nastavených mezních hodnotách je vygenerována varovná hláška. Tím jsou pracovníci údržby upozorněni na problém. Nevýhodou této metody je umístění senzorů přímo na linku, z čehož vyplývají následující problémy:

- a) nutnost montáže přímo do výrobní linky - musí být schváleno oddělením výroby
- b) vysoký počet senzorů (6 na jednoho robota)
- c) znečištění senzorů v prostředí lakovny
- d) omezený pohyb robota na lince
- e) vysoká finanční náročnost

Největším problémem této metody jsou finanční náklady. Vysoká náročnost na instalaci a údržbu, způsobená vysokým počtem senzorů, by ji navíc ještě prodražila. Sensory, umístěné na lince, by čelily problému zanesení drobnými částicemi vznikajícími při lakování. Zakrývání senzorů, či jejich čištění by bylo značně neefektivní. Robotovi v dosažení všech průchozích bodů brání na lince jiní roboti, okraje linky a také výměník nádob s barvou. Tyto faktory způsobují, že pohyb robota je ve velké míře omezen. Kvůli výše zmíněným problémům byla nakonec metoda zavržena.

## 2.5 Metoda ruční kontroly

Tuto metodu zde zmiňuji jako jakousi alternativu k exaktnějším metodám. Její princip je velmi jednoduchý a založen na výhodném poměru „cena/výkon“. Výstup sice není sofistikovaný, ale překvapivě dobře vypovídá o kondici robota pro účely lakování. Princip se skládá z jednoduché aplikace síly vyvíjené člověkem na koncové rameno čtvrté, páté a šesté osy. Síla je aplikována ve směru opačném k síle gravitační. Posouzení velikosti výchylky je veskrze subjektivní a záleží také na zkušenostech člověka.

Metoda je velmi rychlá a kromě času pracovníka údržby nic nestojí. Na jednoho robota připadá čas v řádu jednotek sekund, což je výborná hodnota. Nevýhodou této metody je její subjektivní vyhodnocování. Používá se z toho důvodu, že pro lakování karoserie, zvláště pak velkých ploch, není potřeba vysoké přesnosti. Jedinou polohou, která požaduje vyšší přesnost, je místo při předávání nádoby s barvou.

## 2.6 Metoda měření výchylky koncového bodu

Metodě je věnována celá třetí kapitola.



## 3) Popis použité metody

Cílem této metody je zachovat co nejvíce jednoduchost a uživatelskou příjemnost jako v metodě ruční kontroly, zároveň se co nejvíce přiblížit přesnosti metody měření při pohybu a to za minimálních zásahů do výrobní linky a co nejmenších finančních nákladů.

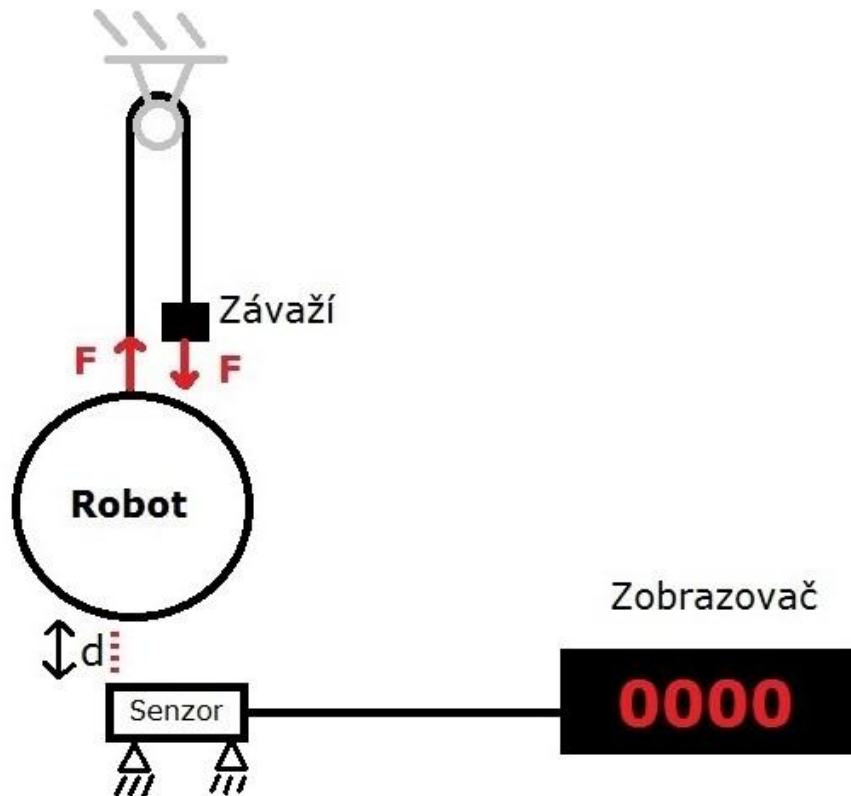
### 3.1 Princip

Jedná se o měření výchylky koncového bodu robota. Měření probíhá pomocí senzoru vzdálenosti (jeho popis viz níže). Výchylka se měří v odbrzděném stavu robota, abychom nezaznamenávali vůli brzd, ale pouze vůli převodovek.

### 3.2 Vychylování robota

Samotné vychylování robota zajišťuje konstantní síla. Aby toto platilo, museli jsme najít zdroj této síly. Zavrhnout jsme museli sílu čistě generovanou člověkem. V úvahu přicházela varianta, aby síla byla redukována pomocí momentového klíče. Nakonec jsme se však přiklonili k variantě použít takovou sílu, která je všude dobře dostupná a v rámci lokálních podmínek konstantní: sílu tíhovou.

Síla působí na závaží o hmotnosti 10 kg. Hmotnost 10 kg byla přiměřeně zvolena vzhledem k užitečné hmotnosti robota. Závaží zavěsíme na provázek, který přivážeme na robota a závaží, přitahováno k Zemi tíhovou silou, přenáší účinek síly přes provázek na robota. Takto popsany postup ovšem funguje pouze při působení síly ve směru gravitace. Pokud chceme směr působení změnit, lze těleso na provázku zavěsit na jednoduchou kladku. Na obrázku 4 je ukázka principu měření.



Obrázek 4: Princip měření: Závaží tahá silou  $F$ , která je přes kladku přenášena na robota. Jeho pohyb o vzdálenost  $d$  sleduje pevně umístěný senzor a hodnoty jsou vidět na digitálním zobrazovači.

Kladka, přes kterou je závaží zavěšeno musí být dosti pevná, aby zátěž unesla, a zároveň mít tak nízké tření, abychom ho mohli zanedbat.

### 3.3 Měření výchylky

Výše zmíněné vychylování robota použijeme ve všech šesti směrech. To znamená, že aplikujeme sílu v každém z těchto směrů. Účinek síly nám robota vychýlí a právě tuto výchylku měříme naším senzorem. Bližším technickým informacím ohledně přístrojů a robotů se věnuji v kapitole 4. Senzor je připojen k zobrazovači, ze kterého je odečítána hodnota hledané výchylky. Princip výchylky je vidět na obrázku 1 v kapitole 1.

Samotný odečet ze zobrazovače je zajištěn uživatelem. Uvažovalo se o automatickém ukládání hodnot, ale po konzultaci se zákazníkem se nakonec jako přijatelnější ukázalo přímé čtení. Dotyčný člověk je totiž

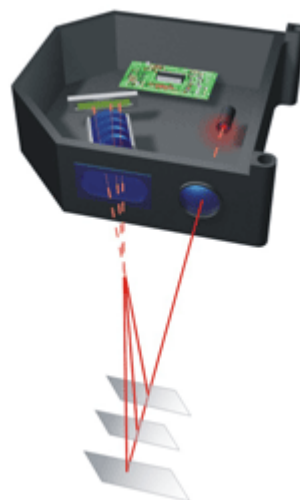
nucen se na robota vždy podívat a při zápisu hodnot je bude vždy konfrontovat s předchozími. Také je tato varianta jednodušší i co se týče propojení, jelikož připojovat do databáze dodatečné zařízení, které se nachází přímo na lince, se vyznačuje výrazně vyšší složitostí.

## 4) Přístroje a roboti

V této části se nachází popis použitých přístrojů a robotů. V lakovně jsou tři typy robotů. Prvním typem jsou roboti, kteří aplikují ochranný nástřík podvozku. Ti jsou umístěni v těžko přístupné šachtě pod úrovní podlahy. Z důvodu stísněného prostoru se provádí pouze ruční kontrola vůlí. Proto se jimi již dále zabývat nebudu. Ostatní typy robotů jsou popsány v bodech 4.3 a 4.4.

### 4.1 Senzor měření vzdálenosti

Po konzultaci s TPCA byl použit výrobek od firmy *Sick*, jelikož zákazník má s výrobky firmy *Sick* velké zkušenosti. Konkrétně se jedná o model OD2-P50W10I0. Výhodou senzoru je laserové bezkontaktní měření. Senzor pracuje na principu triangulačního měření vzdálenosti, které je zobrazeno na obrázku 5.



Obrázek 5: Triangulační měření vzdálenosti [9]

Vlastnosti senzoru jsou uvedeny v tabulce 3.

|                  |                      |
|------------------|----------------------|
| Měřicí rozsah    | 40-60 mm             |
| Rozlišení        | 5 $\mu\text{m}$      |
| Opakovatelnost   | 15 $\mu\text{m}$     |
| Linearita        | $\pm 20 \mu\text{m}$ |
| Měřicí frekvence | 2 kHz                |
| Třída laseru     | 2                    |
| Výstup           | 12-24 V              |

*Tabulka 3: Vlastnosti senzoru měření vzdálenosti [2]*

Na výstupu senzoru je proudová smyčka. Dále je připojen zobrazovač s A-D převodníkem (viz 4.2), který dokáže výslednou výchylku zobrazit. Senzor je umístěn naotočném a zároveň posuvném kloubu, abychom mohli měřit výchylku robota ze všech tří stran. Kloub je odnímatelný z důvodu snadné manipulace a přenositelnosti k ostatním robotům. Přimontován k lince je pomocí čtyř šroubů. Bohužel nelze pořídit obrazový záznam umístění z důvodu přísného zákazu fotografování v celém objektu TPCA. Senzor je vidět na obrázku 6.



*Obrázek 6: Senzor měření vzdálenosti [4]*

## 4.2 Digitální zobrazovač

Digitální zobrazovač slouží k převedení hodnoty ze senzoru do čitelné číselné podoby. Konkrétně je použit model Omron K3MA-J. Výhodou modelu je, že si dokáže zapamatovat jak minimum, tak i maximum naměřených hodnot. To je důležité pro vypočítávání výchyly. Ta je rovna rozdílu maxima a minima naměřených hodnot. Nezávisí tudíž na absolutní hodnotě. Při opětovném přimontování tedy nevádí, pokud se senzor nachází o trochu blíže či dále. Důležitá je pouze diference obou naměřených hodnot. Jediným limitujícím faktorem je rozsah senzoru, který je společně s ostatními technickými údaji uveden v tabulce 4.

|                  |              |
|------------------|--------------|
| Napájení         | 24 V (AC)    |
| Pracovní teplota | -10 až 55 °C |
| Počet číslic     | 5            |
| Počet barev      | 2            |
| Vstupní signál   | 4 – 20 V     |
| Hmotnost         | 200 g        |

*Tabulka 4: Technické údaje zobrazovače [3]*

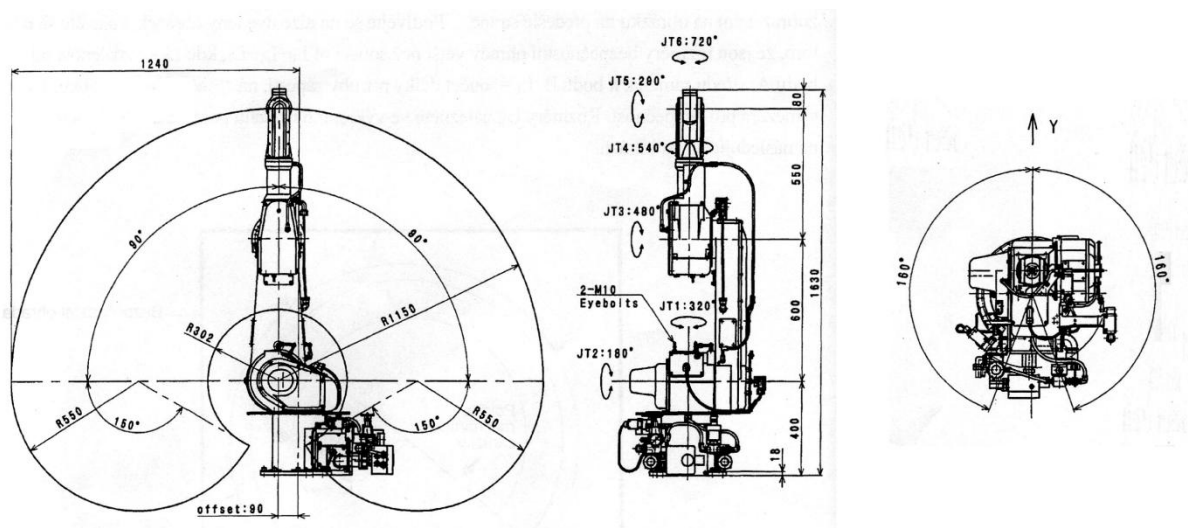
Senzor je napájen ze zdroje na 24 V. Dále je k samotnému zobrazovači pomocí kabelu připojen senzor. Hodnoty čtené z displeje odpovídají vzdálenosti v milimetrech a jsou velmi dobře čitelné. Při umístování senzoru zjednodušuje práci fakt, že při umístění odrazné plochy v rámci měřicího rozsahu senzoru svítí zobrazovač zeleně a v opačném případě červeně. Jak zobrazovač vypadá je vidět na obrázku 7.



Obrázek 7: Zobrazovač [3]

#### 4.3 Robot Kawasaki KF121E

Materiálový robot je umístěn ve stanici se zásobníky a má za úkol měnit nádoby s barvou (tzv. *cartridge*). Jeho vzhled, v podobě technického nákresu, je vidět na obrázku 8.



Obrázek 8: Materiálový robot [5]

U jeho základny jsou umístěny jednotlivé nádoby, z nichž každá je naplněna jinou barvou. Materiálový robot vyjme nádobu s barvou ze stříkacího robota (KE610H viz 4.4) a poté ji umístí na její místo u své

základny. Podle informace o následující karoserii vybere nádobu s určenou barvou a tu zasune do koncového ramene stříkacího robota. Technické údaje materiálového robota jsou v tabulce 5.

|                       |                               |
|-----------------------|-------------------------------|
| Počet stupňů volnosti | 6                             |
| Hmotnost              | 140 kg                        |
| Nosnost               | 5 kg                          |
| Opakovatelnost        | 0,2 mm (čelo příruby zápěstí) |

*Tabulka 5: Technické údaje materiálového robota [5]*

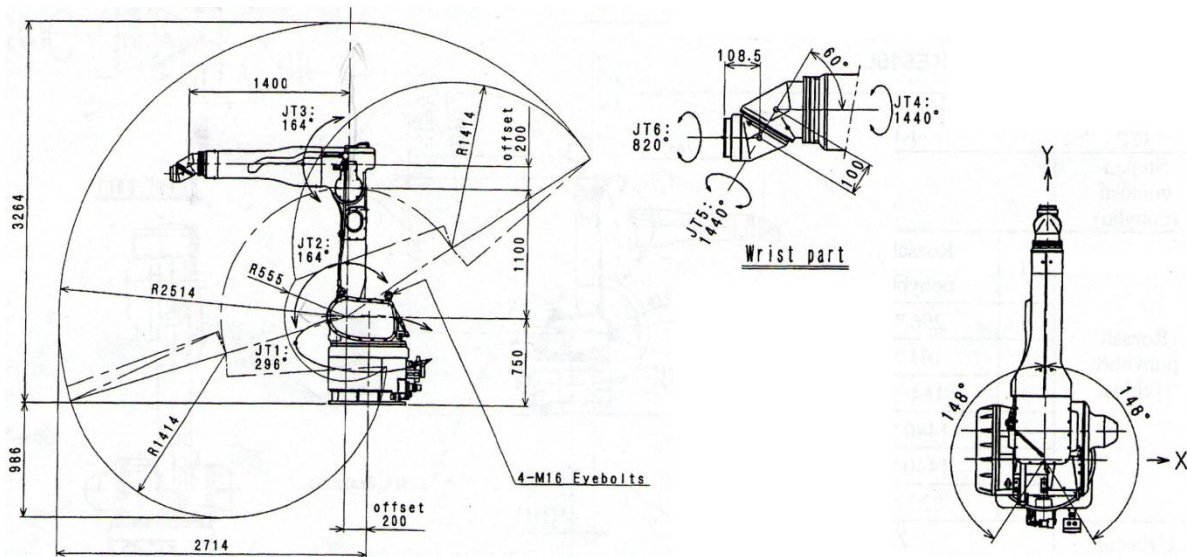
Dle zkušeností továrny se u materiálového robota opotřebení vůbec neprojevuje. Také proto jsme se rozhodli měření opotřebení vynechat. Pokud by se v budoucnu ukázalo, že měření je třeba, nebylo by jeho zavedení žádný problém, protože senzor je umístěn ve styčném bodě obou robotů. Pouze hmotnost závaží by v tomto případě musela být menší. Povrch konce ramene materiálového robota je totiž velmi členitý a ověšen spoustou vodičů. Podoba bez nástavce je vidět na obrázku 9.



*Obrázek 9: Materiálový robot [7]*

#### 4.4 Robot Kawasaki KE610H

Stříkací robot má za úkol aplikovat barvu a lak na vnější stranu karoserie. Při samotné aplikaci není vysoká přesnost nejdůležitějším atributem. Výjimkou je moment předávání nádoby s barvou materiálovému robotovi (viz 4.3). Materiálový robot musí přesně nádobu uchopit, vyměnit a novou opět přesně vrátit. Technický náčrt stříkacího robota je na obrázku 10.



Obrázek 10: Stříkací robot [5]

Na každého materiálového robota připadají dva stříkací, přičemž každý z nich je namontován v jiné pozici. Oba stříkací roboti mají společnou plnicí pozici. Tento fakt je důležitý pro výměny nádoby s barvou, protože materiálový robot provádí naprosto stejný sled pohybů pro oba dva stříkací roboty. Z toho vyplývá, že každý stříkací robot má v plnicí poloze jiné kloubové souřadnice. Technické údaje stříkacího robota jsou v tabulce 6 a jeho fotografie je vidět na obrázku 11.



|                       |                                   |
|-----------------------|-----------------------------------|
| Počet stupňů volnosti | 6                                 |
| Hmotnost              | 800 kg                            |
| Nosnost               | zápěstí 15 kg, horní rameno 25 kg |
| Opakovatelnost        | 1,0 mm (čelo příruby zápěstí)     |

*Tabulka 6: Technické údaje stříkacího robota [5]*



*Obrázek 11: Stříkací robot [8]*

## 5) Výpočet opotřebení

### 5.1 Denavitova-Hartenbergova notace

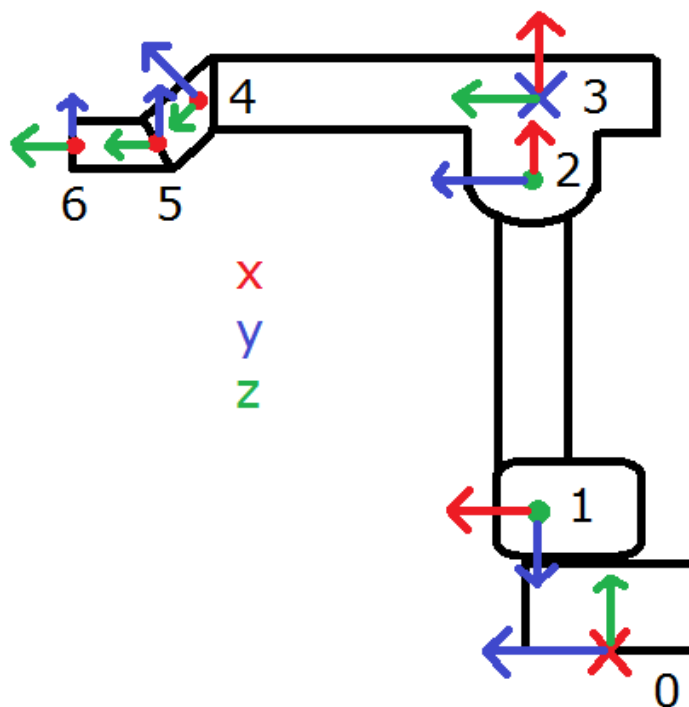
Denavitova-Hartenbergova notace je postup, jehož výsledkem jsou zvolené souřadnicové systémy a transformační matice, popisující vztahy mezi nimi. Matice jsou popsány čtyřmi parametry:  $d$ ,  $\theta$ ,  $r$ ,  $a$ . [10]

## 5.2 Transformační matice

V tomto bodě se snažíme o vyjádření koncového bodu v souřadnicích bodu počátečního. K tomu nám slouží transformační matice  $G$ . Ta vznikne jako součin jednotlivých transformačních matic pro každou jednotlivou osu robota. Označme si tyto matice  $A$  s indexy vyjadřujícími spojení počátků jednotlivých souřadných systémů. Tudiž např. matice  $A_{23}$  nám udává matici přechodu mezi souřadnicovými systémy dva a tři. Jinými slovy řečeno, je to příspěvek třetí osy. Každá transformační matice se vytváří podle Denavitovy-Hartenbergovy notace. Pomocí algoritmu vytvoříme pro každou jednotlivou dvojici kloubů matici  $A$ , která má tvar:

$$A = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \cos \alpha & \sin \theta \sin \alpha & r \cos \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \cos \alpha & -\cos \theta \sin \alpha & r \sin \theta \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Pro zjišťování jednotlivých parametrů je vhodné nakreslit si náčrt se všemi osami jednotlivých kloubů, který je vidět na obrázku 12.



Obrázek 12: Náčrt os jednotlivých kloubů

Pro jednotlivé dvojice kloubů si teď můžeme vyjádřit všechny potřebné parametry. Jsou zapsány do tabulky 7.

| Dvojice kloubů | d [m]  | $\theta$ | r [m] | $\alpha$ |
|----------------|--------|----------|-------|----------|
| 0-1            | 0,750  | 90°      | 0,200 | -90°     |
| 1-2            | 0      | -90°     | 1,100 | 0°       |
| 2-3            | 0      | 0°       | 0,200 | -90°     |
| 3-4            | 1,400  | -90°     | 0     | 60°      |
| 4-5            | 0,100  | 0°       | 0     | -60°     |
| 5-6            | 0,1085 | 0°       | 0     | 0°       |

Tabulka 7: Parametry Denavitovy-Hartenbergovy notace

Nyní můžeme parametry dosadit a dostáváme jednotlivé matice A:

$$A_{01} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1\right) & 0 & -\sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1\right) & 0,2 \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1\right) \\ \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1\right) & 0 & \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1\right) & 0,2 \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1\right) \\ 0 & -1 & 0 & 0,75 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} \cos\left(\theta_2 - \frac{\pi}{2}\right) & -\sin\left(\theta_2 - \frac{\pi}{2}\right) & 0 & 1,1 \cos\left(\theta_2 - \frac{\pi}{2}\right) \\ \sin\left(\theta_2 - \frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\theta_2 - \frac{\pi}{2}\right) & 0 & 1,1 \sin\left(\theta_2 - \frac{\pi}{2}\right) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{23} = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & -\sin \theta_3 & 0,2 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & 0 & \cos \theta_3 & 0,2 \sin \theta_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{34} = \begin{bmatrix} \cos\left(\theta_4 - \frac{\pi}{2}\right) & -0,5 \sin\left(\theta_4 - \frac{\pi}{2}\right) & \frac{\sqrt{3}}{2} \sin\left(\theta_4 - \frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ \sin\left(\theta_4 - \frac{\pi}{2}\right) & 0,5 \cos\left(\theta_4 - \frac{\pi}{2}\right) & -\frac{\sqrt{3}}{2} \cos\left(\theta_4 - \frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0,5 & 1,4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{45} = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -0,5 \sin \theta_5 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta_5 & 0 \\ \sin \theta_5 & 0,5 \cos \theta_5 & \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta_5 & 0 \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0,5 & 0,1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{56} = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & 0 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0,1085 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ted' spočteme výslednou matici  $G = A_{01}A_{12}A_{23}A_{34}A_{45}A_{56}$

Číselně ji zde neuvádím, protože je příliš dlouhá a na papíře je bohužel absolutně nečitelná.

### 5.3 Rovnice k výpočtu opotřebení

V případě našeho robota a jeho umístění nás zajímá poloha koncového bodu. Obecně je poloha tělesa v prostoru dána šesti parametry. Tři z nich označují polohu referenčního bodu a tři další rotaci (natočení). Proto bude mít tato úloha šest rovnic o šesti neznámých.

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta \varphi \\ \Delta \xi \\ \Delta \zeta \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta q_1 \\ \Delta q_2 \\ \Delta q_3 \\ \Delta q_4 \\ \Delta q_5 \\ \Delta q_6 \end{bmatrix}$$

Kde hledané opotřebení převodovek (viz kapitola 1) si označme jako  $\Delta q$  a jakobián jako matici  $J$  (viz 5.4) velikosti šest krát šest. Označme si dále naměřené hodnoty výchylky jako  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  a to ve směru daných os.  $\Delta \varphi$ ,  $\Delta \xi$ ,  $\Delta \zeta$  jsou změny natočení v prostoru. Bohužel tyto změny nejsme schopni měřit, tudíž se nám rovnice změní na:

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta q_1 \\ \Delta q_2 \\ \Delta q_3 \\ \Delta q_4 \\ \Delta q_5 \\ \Delta q_6 \end{bmatrix}$$

Tentokrát má  $J$  velikost tři řádky a šest sloupců.

Síla ve směru jednotlivých os nám v rámci vůlí vymezení krajní polohy, takové, které vybudí největší posun souřadnice v daném směru. Tyto hodnoty vůlí označme jako  $q_{max}$  a  $q_{min}$

Označme si výchylku jako změnu parametrů  $\Delta p$ . Poté platí:

$$\Delta p = p_{max} - p_{min} = J \begin{bmatrix} \pm(q_{1max} - q_{1min}) \\ \pm(q_{2max} - q_{2min}) \\ \pm(q_{3max} - q_{3min}) \\ \pm(q_{4max} - q_{4min}) \\ \pm(q_{5max} - q_{5min}) \\ \pm(q_{6max} - q_{6min}) \end{bmatrix}$$

Kde  $\pm$  jsou neznámá znaménka. Hodnoty max a min jsou jednotlivé dorazy v převodovkách. Když je hodnota koeficientu v řádku matice  $J$  kladná, chceme získat  $q_{max}$ . Z toho vyplývá, že neznámé znaménko bude plus. Pokud je hodnota koeficientu záporná, získáváme  $q_{min}$ . Z toho plyne, že neznámé znaménko bude minus. Tudíž lze rovnici přepsat jako

$$\Delta p = |J| \begin{bmatrix} |q_{1max} - q_{1min}| \\ |q_{2max} - q_{2min}| \\ |q_{3max} - q_{3min}| \\ |q_{4max} - q_{4min}| \\ |q_{5max} - q_{5min}| \\ |q_{6max} - q_{6min}| \end{bmatrix}$$

#### 5.4 Postup měření

Máme 12 v čase oddělených měření. Pro všechny polohy robota (dvě) a pro všechny osy (tři) provedeme následující: Namíříme senzor ve směru osy, použijeme sílu v záporném směru osy a ze senzoru odečteme minimum. Použijeme sílu v kladném směru osy a ze senzoru odečteme maximum. Nakonec odečteme od maxima minimum a výsledek uschováme.

## 5.5 Jakobián

Co se týče výpočtu jakobiánu [10], nejprve si vyjádříme počátek v homogenních souřadnicích. Označme si tento vektor  $P_6$ . Číselně se rovná:

$$\vec{P}_6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Teď potřebujeme zjistit koncový bod a uvedeme si ho opět v homogenních souřadnicích. Bod zjistíme tak, že počáteční bod vynásobíme všemi transformačními maticemi. Lze též použít rovnou výslednou matici  $G$ . Označme si počátek souřadného systému chapadla  $P_0$ .

$$\vec{P}_0 = G\vec{P}_6$$

Po vynásobení dostaneme vektor o čtyřech řádcích. V prvních třech řádcích jsou souřadnice  $x, y, z$  v tomto pořadí, které jsou vyjádřené pomocí úhlů  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ . Ve čtvrtém řádku je hodnota rovna jedné. Jelikož máme tři rovnice (pro  $x, y, z$ ) a šest kloubových souřadnic (úhly), bude mít jakobián tři řádky a šest sloupců. Jeho výpočet provedeme pomocí *symbolického toolboxu* v *Matlabu* a to konkrétně použitím funkce *jacobian*.

## 5.6 Měření ve dvou polohách

Abychom mohli jednoznačně počítat neznámé z našich rovnic, budeme potřebovat nejméně šest rovnic. Z toho důvodu budeme měření provádět alespoň ve dvou polohách chapadla. Rovnice bude poté mít pro dvě polohy následující podobu:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \Delta z_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta y_2 \\ \Delta z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta q_1 \\ \Delta q_2 \\ \Delta q_3 \\ \Delta q_4 \\ \Delta q_5 \\ \Delta q_6 \end{bmatrix}$$

$\Delta x_1$  až  $\Delta z_2$  jsou naměřené hodnoty výchylky,  $J_1$  a  $J_2$  jsou jakobiány pro oba měřené body.

### 5.7 Nalezení vhodných bodů pro měření

Hledání těchto bodů má jeden zásadní požadavek. Výsledná matice musí mít dobrou podmíněnost. Tu spočteme v *Matlabu* příkazem  $norm(A)*norm(inv(A))$ . [11] Bylo vybráno několik poloh a zkoušeny různé dvojice pro co nejlepší podmíněnost výsledné matice. Výběr těchto poloh se ovšem musí řídit různými praktickými omezeními. Robot má na pracovišti omezenou pohyblivost, jsou místa, do kterých nemůže nebo nesmí dosáhnout. Kvůli jednoduchému umístění senzoru by bylo záhodno polohy hledat co nejbližší místu předávání nádoby s barvou. Kvůli uživatelské jednoduchosti zadávání souřadnic do robota jsem se snažil zakomponovat do dvojice právě polohu, ve které si roboti předávají nádobu. Kloubové souřadnice této polohy pro obě dvě umístění stříkacího robota jsou uvedeny v tabulce 8. Všechny hodnoty jsou v radiánech.

| Úhel             | Robot 1      | Robot 2      |
|------------------|--------------|--------------|
| $\theta_1$ [rad] | 0.126885437  | 1,129070950  |
| $\theta_2$ [rad] | 0.432841654  | 1,119593810  |
| $\theta_3$ [rad] | -0.124668868 | -0,659786817 |
| $\theta_4$ [rad] | -0.705741336 | -2,696079910 |
| $\theta_5$ [rad] | 1.217035540  | -0,841999191 |
| $\theta_6$ [rad] | -0,696473638 | 1,685220110  |

*Tabulka 8: Kloubové souřadnice bodu pro předávání nádoby s barvou*

Pro obě umístění robotů se mi podařilo předávací bod do měření zakomponovat. Jako druhý bod jsem zvolil takový, jehož jakobián společně s předávacím bodem dával nejlepší hodnotu podmíněnosti. Kloubové souřadnice tohoto bodu pro obě dvě umístění stříkacího robota jsou společně s hodnotou podmíněnosti výsledné matice uvedené v tabulce 9.

|                  | Robot 1      | Robot 2      |
|------------------|--------------|--------------|
| $\theta_1$ [rad] | 0,061627576  | 1,093294552  |
| $\theta_2$ [rad] | 0,383431383  | 1,100149085  |
| $\theta_3$ [rad] | -0,180955737 | -0,887503334 |
| $\theta_4$ [rad] | -0,558836973 | -2,445816082 |
| $\theta_5$ [rad] | 1,314581990  | -0,774985739 |
| $\theta_6$ [rad] | -0,728954215 | 1,559746549  |
| Podmíněnost      | 581          | 744          |

Tabulka 9: Kloubové souřadnice pro druhý bod

Polohy měly nejlepší hodnotu podmíněnosti. U ostatních se pohybovala, někdy i výrazně, nad 1500.

### 5.8 Numerický výpočet jakobiánu

Do dříve spočítaného jakobiánu (viz 5.3) dosadíme hodnoty jednotlivých úhlů  $\theta$ . Matice  $J_1$  a  $J_2$  pro robota 1 vypadají následovně:

$$J_1 = \begin{bmatrix} -2,1476 & -0,0888 & 0,0375 & -0,0264 & 0,0626 & 0,0268 \\ -0,1296 & 0,6963 & -0,2942 & -0,0471 & -0,0691 & -0,1029 \\ 0 & -1,9467 & -1,4853 & -0,1364 & 0,0113 & 0,0311 \end{bmatrix}$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} -2,1125 & -0,0530 & 0,0098 & -0,0531 & 0,0493 & 0,0079 \\ 0,0115 & 0,8594 & -0,1588 & -0,0318 & -0,0794 & -0,0301 \\ 0 & -1,9078 & -1,4963 & -0,1387 & -0,0095 & -0,0259 \end{bmatrix}$$

Pro robota 2 jsou číselně vyjádřeny takto:

$$J_1 = \begin{bmatrix} -1,2421 & -0,0316 & 0,4020 & 0,0696 & -0,0779 & 0,0294 \\ -2,3755 & 0,0150 & -0,1901 & 0,0358 & -0,0423 & -0,0146 \\ 0 & -2,4785 & -1,4886 & -0,0962 & -0,0311 & -0,0905 \end{bmatrix}$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} -1,3566 & -0,3589 & 0,0841 & 0,0374 & -0,0861 & -0,0357 \\ -2,3725 & 0,1857 & -0,0435 & 0,0196 & -0,0372 & -0,0092 \\ 0 & -2,5306 & -1,5502 & -0,1120 & 0,0054 & -0,0557 \end{bmatrix}$$

Označme si matici  $J_{12} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \end{bmatrix}$ . Pro zjištění všech  $\Delta q$  si je vyjádříme jako:



$$\begin{bmatrix} \Delta q_1 \\ \Delta q_2 \\ \Delta q_3 \\ \Delta q_4 \\ \Delta q_5 \\ \Delta q_6 \end{bmatrix} = J_{12}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \Delta z_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta y_2 \\ \Delta z_2 \end{bmatrix}$$

Maticice  $J_{12}^{-1}$  je maticí inverzní k matici  $J_{12}$ . Matici  $J_{12}^{-1}$  jsme spočetli pomocí funkce *inv* v *Matlabu*. Pro robota 1 vypadá takto:

$$J_{12}^{-1} = \begin{bmatrix} -1,3938 & 7,7392 & -2,2398 & 0,4247 & -8,0739 & 1,5263 \\ -0,1717 & 22,1103 & -7,2153 & -1,3010 & -21,8298 & 5,1189 \\ -3,7640 & -25,6780 & 9,1933 & 5,5883 & 25,0241 & -7,4591 \\ 43,1846 & -31,2660 & -1,9105 & -41,7948 & 34,4327 & 5,1993 \\ -13,2413 & 343,7745 & -116,2554 & -9,5657 & -354,9623 & 85,0848 \\ 3,7425 & -104,5179 & 53,4641 & 3,2010 & 108,8036 & -43,9532 \end{bmatrix}$$

A pro robota 2 takto:

$$J_{12}^{-1} = \begin{bmatrix} 0,6229 & -0,1653 & 1,4175 & -1,0892 & 0,0408 & -1,2395 \\ 1,9545 & -1,1959 & 5,2534 & -4,5775 & 2,7917 & -4,7178 \\ -3,5706 & -0,7242 & -7,9335 & 7,6262 & -1,7662 & 6,5992 \\ -13,5310 & 47,8331 & -29,9532 & 24,6353 & -54,8966 & 22,2651 \\ -41,3226 & 35,2246 & -79,3438 & 62,5612 & -49,4088 & 65,9349 \\ 33,7932 & -18,2844 & 34,6853 & -47,7689 & 27,9306 & -25,6762 \end{bmatrix}$$

## 6) Experimentální výsledky

### 6.1 Naměřené hodnoty

Naměřené hodnoty pro robota 1 jsou uvedeny v tabulce 10.

| Robot 1      | Výchylka [m] |
|--------------|--------------|
| $\Delta x_1$ | 0,003452     |
| $\Delta y_1$ | 0,004656     |
| $\Delta z_1$ | 0,009117     |
| $\Delta x_2$ | 0,003750     |
| $\Delta y_2$ | 0,005121     |
| $\Delta z_2$ | 0,009662     |

*Tabulka 10: Naměřené hodnoty výchylky koncového ramene robota 1 odečtené ze zobrazovače*

Pro každého jednotlivého robota hodnoty vynásobíme zleva maticí  $J_{12}^{-1}$  a výsledný vektor nám určuje míru opotřebení. Hodnoty udávané v  $\frac{m}{rad}$  u sedmi robotů jsou vidět v tabulce 11.

| Robot        | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | min   | max   |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\Delta q_1$ | 0,004 | 0,002 | 0,001 | 0,010 | 0,001 | 0,001 | 0,006 | 0,001 | 0,010 |
| $\Delta q_2$ | 0,005 | 0,005 | 0,001 | 0,011 | 0,001 | 0,001 | 0,008 | 0,001 | 0,011 |
| $\Delta q_3$ | 0,008 | 0,011 | 0,004 | 0,010 | 0,004 | 0,005 | 0,009 | 0,004 | 0,011 |
| $\Delta q_4$ | 0,005 | 0,016 | 0,007 | 0,020 | 0,006 | 0,007 | 0,012 | 0,005 | 0,020 |
| $\Delta q_5$ | 0,009 | 0,013 | 0,008 | 0,014 | 0,007 | 0,009 | 0,015 | 0,007 | 0,015 |
| $\Delta q_6$ | 0,009 | 0,012 | 0,003 | 0,015 | 0,007 | 0,010 | 0,009 | 0,003 | 0,015 |

*Tabulka 11: Míra opotřebení jednotlivých převodovek u sedmi robotů.*

## 6.2 Výpočet hraničního opotřebení

Pro porovnání hodnot potřebujeme znát hraniční hodnotu opotřebení. Vezměme si maximální hodnoty výchylek, při kterých je ještě možné zajistit spolupráci robotů. Hodnoty 5,10,20 mm dosadíme do výše zmíněné rovnice podobně, jako bychom je naměřili. Výsledné výchylky, zobrazené v tabulce 12, nám říkají, jaké jsou hodnoty v  $\frac{m}{rad}$  maximálního dovoleného opotřebení.

| Převodovka | Maximální dovolené opotřebení |
|------------|-------------------------------|
| 1          | 0,014                         |
| 2          | 0,014                         |
| 3          | 0,015                         |
| 4          | 0,018                         |
| 5          | 0,028                         |
| 6          | 0,020                         |

*Tabulka 12: Maximálně přípustné hodnoty opotřebení jednotlivých převodovek*

## 6.3 Vyhodnocení

Z naměřených hodnot je vidět, že největším opotřebením obecně trpí koncové převodovky čtyři, pět a šest zatímco převodovky jedna dvě a tři mají opotřebení nižší. Lze také pozorovat, že převodovky závisí také jedna na druhé. Pokud převodovka vykazuje vyšší opotřebení, nebývá v robotovi osamocena, ale vyšší čísla vykazují i ostatní převodovky. Totéž platí pro nízké hodnoty. Každý robot je ale specifický. Proto v jediném měření vysoké hodnoty nemusejí nic znamenat. Některý robot může provádět složitější pohyby s vyšším zrychlením a tudíž větším opotřebením.

#### 6.4 Skutečné opotřebení

Hodnoty nám říkají informace o aktuálním stavu převodovek. Důležitější než hodnoty je ale jejich vývoj napříč časem. Vývoj je třeba pečlivě sledovat a zaznamenávat. Životnost takové převodovky je řádově několik let. Je tedy důležité zaznamenat průběh opotřebení ideálně od počátku až do konce. Aby měla výsledná data nějakou věrohodnost, je nutné průběh sledovat a měřit u více převodovek. Pokud se hodnoty opotřebení některé z převodovek začnou blížit zmíněné hranici, je třeba zpozornět. Při jejím překročení je již nutno na tuto skutečnost nějakým způsobem reagovat. Z porovnání dat v tabulce 11 a tabulce 12 nám vychází, že všechny měřené převodovky jsou zatím pod kritickou hranicí opotřebení. Je vidět, že některé jsou téměř netknuté. Na druhou stranu se najdou i takové, u kterých je opotřebení již vyšší. U některých robotů s vysokou hodnotou je třeba zpozornět a do budoucna bedlivě sledovat vývoj hodnoty opotřebení.

# Závěr

Cílem bakalářské práce bylo nalezení vhodné metody měření opotřebení převodovek pro roboty umístěné v lakovně v TPCA. Nejprve jsem se seznámil s fungováním lakovny jako celku a poté se zaměřil na roboty, především na opotřebení jejich převodovek. Dále jsem prozkoumal možné metody měření opotřebení. Některé z nich se ukázaly jako v praxi nepoužitelné z finančních, jiné z časových důvodů. U metody kovových částic jsem měřil jejich počet uvnitř maziva. Nakonec se jako ideální ukázala metoda měření výchylky koncového bodu, která kombinovala uživatelskou přívětivost s jednoduchou zástavbou a minimální finanční náklady.

Při použití metody jsem pracoval s jednotlivými roboty, které jsem tímto blíže poznával a zlepšoval tak výsledný návrh. Z dalších přístrojů se ukázal jako velmi důležitý senzor vzdálenosti, který se stal spolu s digitálním zobrazovačem základním kamenem metody měření výchylky koncového bodu.

Pomocí algoritmu, využívajícího Denavitovu-Hartenbergovu notaci, jsem spočítal jakobián. Nakonec jsem pomocí naměřených hodnot zjistil výsledné opotřebení jednotlivých převodovek. Potvrdil se odhad, že větší opotřebení mají převodovky čtyři, pět a šest. Také se ukázalo, že pokud vykazuje nějaká převodovka vyšší opotřebení, nebývá v robotovi sama. Po porovnání hodnot naměřených s maximální tolerovanou hodnotou opotřebení se ukázalo, že všechny měřené převodovky jsou zatím v normě. Do budoucna bude zajímavé sledovat vývoj opotřebení. Zda-li bude jeho hodnota růst v čase lineárně nebo exponenciálně. Tento trend bude možné odpozorovat po naměření více životních cyklů převodovek.

## Použitá literatura a zdroje:

- [1] DOD Technologies [online] *Brochure sdm72* [citováno 12.4.2014].  
Dostupný z WWW:  
<http://www.dodtec.com/site/files/843/144405/478834/662918/sdm72.pdf>
- [2] Sick [online] *Datasheet OD2-P50W10I0* [citováno 27.4.2014].  
Dostupný z WWW:  
<https://www.mysick.com/PDF/Create.aspx?ProductID=40665&Culture=en-US>
- [3] Omron [online] *Datasheet K3MA-J* [citováno 6.5.2014].  
Dostupný z WWW:  
[http://www.ia.omron.com/data\\_pdf/data\\_sheet/k3ma-j\\_dsheet\\_csm255.pdf](http://www.ia.omron.com/data_pdf/data_sheet/k3ma-j_dsheet_csm255.pdf)
- [4] Sick [online] *Datasheet OD2-P50W10I0* [citováno 29.4.2014].  
Dostupný z WWW:  
<https://www.mysick.com/sagqara/wrapper.aspx?id=im0028164>
- [5] *Kawasaki Robot KF121E/KE610 návod na montáž a zapojení*, 1. vydání, KAWASAKI HEAVY INDUSTRIES s.r.o. DIVIZE ROBOTŮ, 2004, 38 stran, 90202-1077DZA
- [6] Kolektiv autorů, *Pravidla českého pravopisu*, 5. doplněné vydání, Praha: Fin Publishing, 2009, 464 stran, ISBN 80-86002-89-7
- [7] Kawasaki [online] *Product KF121E* [citováno 10.5.2014].  
Dostupný z WWW:  
<http://www.kawasakirobot.de/en/products/produkt.html?uid=4>
- [8] Fam-Robotics [online] *Kawasaki KE610H* [citováno 10.5.2014].

Dostupný z WWW:

<http://fam-robotics.ru/product/ke610h>

- [9] Automatizace hw cz [online] *Přesné laserové snímače optoNCDT 1402* [citováno 10.5.2014].

Dostupný z WWW:

<http://automatizace.hw.cz/komponenty/presne-laserove-snimace-optoncdt-1402.html>

- [10] Haruhiko Asada & Jean-Jacques E. Slotine, *Robot Analysis and Control*, John Wiley and Son, New York, Spojené státy, 1986, 286 stran, ISBN 9780471830290

- [11] Gene H. Golub & Charles F. Van Loan, *Matrix Computatioans*, JHU Press, Baltimore, Spojené Státy, 2013, 756 stran, ISBN 9781421409744