

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta aplikovaných věd

Katedra kybernetiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

PLZEŇ, 2012

Lukáš Pittr

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta aplikovaných věd

Katedra kybernetiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Analýza přesnosti polohování a kalibrace dvojramenného
SCARA robotu

Vypracoval: Lukáš Pittr

Vedoucí diplomové práce: prof. ing. Miloš Schlegel, CSc.

PLZEŇ, 2012

P R O H L Á Š E N Í

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím odborné literatury a pramenů, jejichž úplný seznam je její součástí.

V Plzni dne 25.8.2012

P O D Ě K O V Á N Í

Děkuji prof. ing. Miloši Schlegelovi, CSc a Ing. Martinu Švejdovi. za jejich cenné rady, připomínky a podněty při tvorbě a finalizaci mé diplomové práce.

Lukáš Pittř

V Plzni, srpen 2012

Abstrakt

Práce obsahuje postup pro jednoduchou kalibraci dual SCARA robota při použití přímého a nepřímého kinematického popisu pomocí DH transformace a geometrického jakobiánu. Dále se zabývá shrnutím možných postupů měření pozice efektoru. Nakonec je ukázán odhad neznámých parametrů délky ramen pomocí iterační metody lineárních nejmenších čtverců.

Klíčová slova: SCARA, dual SCARA robot, kalibrace, kinematický popis, lineární nejmenší čtverce

The work includes a simple procedure for calibrating the dual SCARA robot using direct and indirect kinematic description using the DH transform. It also deals with a summary of possible effector position measurement procedures. Finally, the estimation of unknown parameters indicated by the length of the shoulder using the linear least squares.

Key words: SCARA, dual SCARA robot, calibration, error model, kinematic description, linear least squares

Obsah

Seznam obrázků	2
1 Úvod	3
1.1 Kalibrace manipulátorů	4
2 Prostředky měření polohy koncového efektoru	6
2.1 Měřící technologie	7
2.1.1 Theodolit	7
2.1.2 Laserová interferometrie	8
2.1.3 Zařízení pro měření koordinát	9
2.1.4 Zařízení využívající Time of Flight	10
2.1.5 Měření využívající kamerové zachycení světla	10
2.1.6 Předem zkalibrované pozice v pracovním prostoru	10
3 Matematický model	11
3.1 Stupně volnosti	11
3.1.1 Kurzbachovo kritérium	11
3.1.2 Grüblerův vzorec	12
3.2 Přímá kinematická úloha	12
3.3 Inverzní kinematická úloha	14
3.4 Popis robota pomocí D-H úmluvy	16
3.5 Kalibrační model	17
3.6 Postup kalibrace	21
4 Kalibrace	24
5 Závěr	26
Bibliografie	28

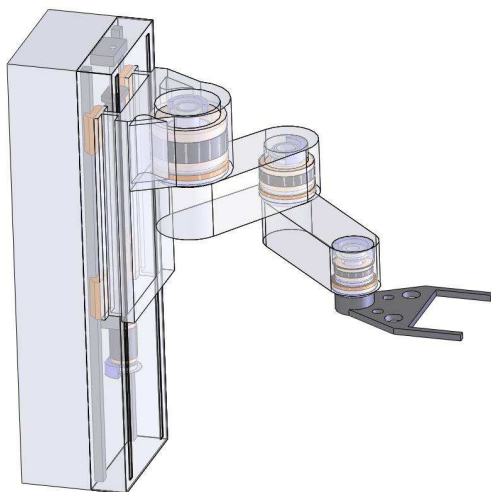
Seznam obrázků

1.1	Scara robot	3
1.2	Gantry robot	3
1.3	Dual SCARA robot	4
2.1	Optický theodolit	7
2.2	Theodolite	7
2.3	Schéma interferometrie	8
2.4	Ukázka interferometru	8
2.5	Zařízení pro měření koordinát	9
3.1	PKU	13
3.2	IKU	14
3.3	DH Umluva	17
3.4	retezec	18
4.1	Vývoj parametru l1 v čase	24
4.2	Vývoj parametru l2 v čase	25
4.3	Vývoj parametru l3 v čase	25
4.4	Vývoj parametru l4 v čase	25

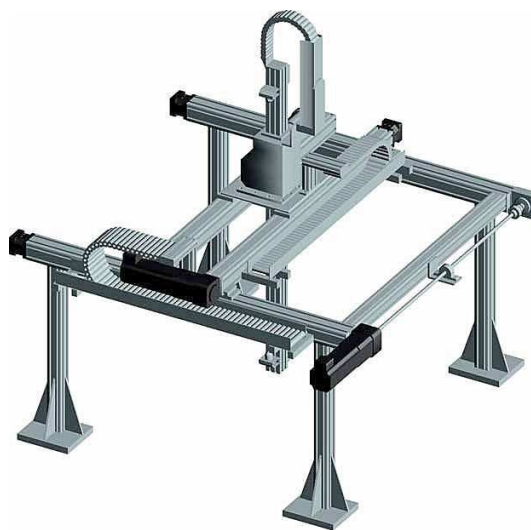
Kapitola 1

Úvod

SCARA je zkratka pro Selective Compliant Assembly (alternativně Articulated) Robot Arm. Tento typ robota byl poprvé produkčně představen v roce 1981 firmami Sankyo Seiki, Pentel a NEC. Selective Compliant, čili výběrově pohyblivý, vychází z konstrukce ramena robota, kde osa X a Y jsou ohebné. Osa Z je pevně fixována. Pojem Articulated označuje výraznou podobu s lidskou rukou a je volně zaměnitelný s Assembly, které ukazuje na primární uplatnění této konstrukce v konstrukčních linkách mikročipů, hodinek a různé elektroniky, a to nahrazením kartesiánských (gantry) robotů. Zde tyto roboti provádějí převážně operace “vezmi a polož” (pick and drop), “sestav” (assemble) a “zabal” (packaging).



Obrázek 1.1: Scara robot

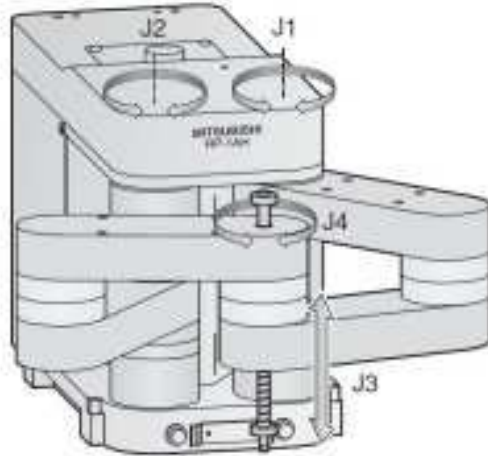


Obrázek 1.2: Gantry robot

První prototyp SCARA robota byl vyvinut v roce 1978 v laboratoři profesora Hiroshi Makino při Yamashi Universitě v Japonsku. Tento 4-dof robot byl speciální svou jednoduchou konstrukcí zaměřenou na přesnost a rychlost operací. Ve srovnání s gantry robotem

využívá SCARA kruhovou pracovní obálku oproti obdélníkové.

Větší pevnost robota a celkové zvýšení tuhosti konstrukce lze dosáhnout zdvojením ramen, jako je na obrázku 1.3.



Obrázek 1.3: Dual SCARA robot

Tato změna zmenší pracovní prostor a zkomplikuje kinematické řešení zavedením uzavřených smyček paralelního manipulátoru, které je třeba rozložit a popsat.

1.1 Kalibrace manipulátorů

Schopnost průmyslových robotů dosáhnout cílové pozice efektoru lze měřit dvěma způsoby - opakovatelností a přesností. Opakovatelností označujeme schopnost dosáhnout předem naučené pozice a je obecně na velice dobré úrovni. Měří se nejprve navedením efektoru operátorem do cílové pozice a uložením nastavení všech aktuátorů. Dále se provede jeho oddálení. Následně dojde k povelu k navrácení do cílové pozice. Co se týče přesnosti, je zcela jasné, že nikdy nedojde k zcela přesnému pohybu a opakovaný výsledný pohyb způsobí určitou odchylku. Jak bylo ukázáno v [MR91], opakovatelnost průmyslových robotů je na velice dobré úrovni oproti přesnosti. Většinou lze dosáhnout dokonce o několik řádů lepší opakovatelnost ve srovnání s přesností.

Problémem tohoto poměrně jednoduchého popisu je reálná interpretace daného měření. První překážkou je nejasnost specifikování přesného bodu měření v pracovním prostoru. Dále je známo, že vzdálenější pozice efektoru od osy otáčení ramen má horší opakovatelnost. Také většinou není určen postoj robota, při kterém byla měření uskutečněna.

Mezi další vlastnosti často zmiňované spolu s opakovatelností patří rozlišení. Rozlišení má několik definic. Lze ho označit jako nejmenší možný krok manipulátoru, což je někdy

matematicky nepostihnutelné. Jinak lze určit rozlišení ve vztahu s digitalizací signálu při vstupu a výstupu manipulátoru.

Další součástí popisu manipulátoru je přesnost. Přesnost je třeba si představit jako schopnost robota přesunout efektor na určené místo v pracovním prostoru. Základní rozdíl mezi opakovatelností a přesností je u opakovatelnosti schopnost manipulátoru vrátit se do předem již dosažené pozice a u přesnosti zaujmout novou pozici, která byla doposud robotovi neznámá.

Kalibrace robota je žádaná vlastnost vhodná pro jeho zavedení do průmyslové praxe. Existuje několik možných postupů pro kalibraci manipulátorů. První nejrozšířenější využívá operátora, který postupně s robotem prochází jednotlivé pozice efektoru tvořící úlohu. Další se nazývá off-line programování. Probíhá programováním a simulováním manipulátoru v laboratorním prostředí. Tento způsob ovšem není často využíván z důvodu nároků na přesnost modelu a velkých variancí mechanických chyb robotů. Pro překonání nevýhod předchozích metod se používá metoda zpětné vazby z pracovního prostoru ve formě čidel kontrolujících proces. Nevýhoda této metody je ztráta univerzálnosti programového vybavení a navýšení nákladů na výrobu robota.

Cílem kalibrace je přizpůsobení matematického modelu skutečnému manipulátoru. Chyby robota lze rozdělit na geometrické chyby (mají vliv na vztah mezi osami otáčení) - například odchylky v umístění os a délky ramen, a na negeometrické chyby - ohýbání ramen, vůle převodovky, chyby řídicí jednotky. Geometrické chyby jsou dobře prostudované a lze je zahrnout do simulace. Druhý typ je více problematický a závisí především na konstrukci robota a jeho používaného zatížení.

Proces kalibrace bude postupovat následujícím způsobem. Nejprve provedeme matematické modelování dual SCARA robota pomocí inverzní a přímé kinematické úlohy. Pro další kroky budeme dále používat inverzní kinematický model. Pro úplnost provedeme též vyšetření stupňů volnosti. V dalším postupu vysvětlíme možné způsoby externího měření aktuální polohy efektoru manipulátoru v pracovním prostoru a možné vnější vlivy na dané měření. Následujícím krokem je identifikace reálných parametrů robota pomocí metody nejmenších čtverců.

Kapitola 2

Prostředky měření polohy koncového efektoru

Cílem kalibrace je získat nejlepší počet a hodnotu parametrů popisujících konstrukci a vztahy systému robota. To se neobejde bez nutnosti získat určité množství měření pro různé postavení nebo orientaci robota spojených se znalostí příslušných nastavení aktuátorů.

Nyní se tedy budeme zabývat základy měření pro kalibraci a prostředky. Při posunu robota do specifikované pozice v pracovním prostoru jsou měřena přesná nastavení aktuátorů. V dalším kroku se provede exaktní zaznamenání pozice a orientace efektoru. Model manipulátoru lze popsat takto:

$$T = \prod_{i=1}^N A_i \quad (2.0.1)$$

kde T je homogenní transformace pozice efektoru k základní soustavě souřadnic podle výpočtu matematického modelu. A_i je matice rotace a posunu i tého kloubu. Odměřená pozice kalibračním systémem označíme jako T_m . Tato matice se obecně liší od matice T matematického modelu. Mimo to T_m je často nekompletní a jeho části jsou neznámé z důvodu nedokonalosti měřicího systému popsat skutečný stav efektoru. Pro každou pozici porovnáme změřené T_m a simulované T parametry. To nám umožní vytvořit až šest nezávislých rovnic popisujících vztah odlišností v parametrech modelu a rozdílů mezi reálnými a předpovězenými parametry pozice efektoru.

V další části se budeme zabývat jednotlivými možnými přístupy k měření pozice a orientace. Jednotlivé přístupy se liší schopností popsat pozici efektoru jedním měřením a celkovou přesností měření. Obecně lze zmínit, že neexistuje jeden univerzální nejlepší

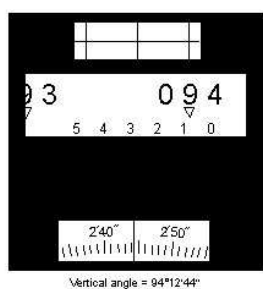
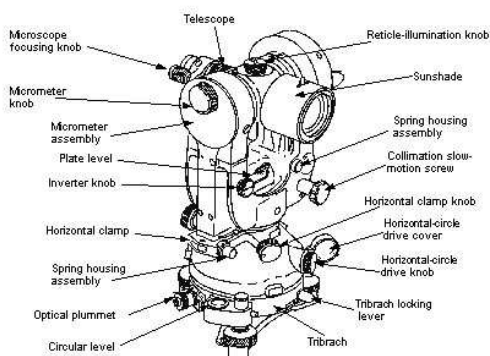
způsob měření. Vše je nutno odvíjet od daného provedení a požadavků. Jako další část této kapitoly by bylo možno uvažovat i o výkladu různých způsobů měření nastavení aktuátorů. Vzhledem k rozsahu této práce je toto téma přenecháno kvalifikovanějším publikacím zaměřených na tuto oblast. Ukázka práce a výpočtů s některými měřicími technologiemi je obsažena v knize [MR91] v kapitole 3.3.

2.1 Měřicí technologie

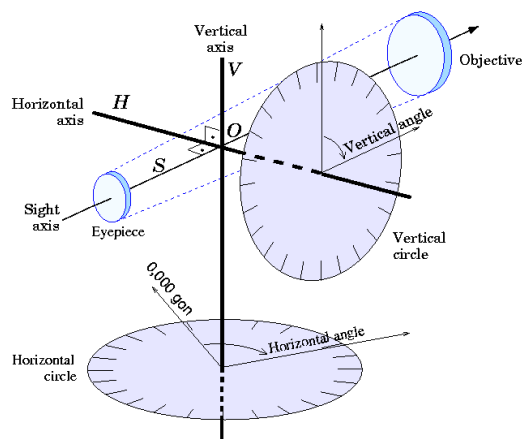
Pro měření pozice se používá spousta různých technik. Zde je vybrán pouze omezený vzorek používaných technologií.

2.1.1 Theodolit

Theodolit je teleskop používaný původně v zeměměřičství. Je upraven tak, aby byly přesně známy jeho optické vlastnosti. Osa směru pohledu je definována dvěma úhly. První úhel měříme vůči horizontální ploše (vertikální ose). Druhý vůči vertikální ploše kolem horizontální osy. Názorně na obrázcích 2.1 a 2.2.



Obrázek 2.1: Optický theodolit



Obrázek 2.2: Theodolite

Když je osa pohledu přesně zaměřena na objekt zájmu, provede se odečtení jednotlivých úhlů. Objekt je v tomto případě např. krychle umístěná v efektoru, případně pro usnadnění zaměření je osvětlen. Dnešní moderní theodolity jsou vybaveny CCD prvky a přídavnými

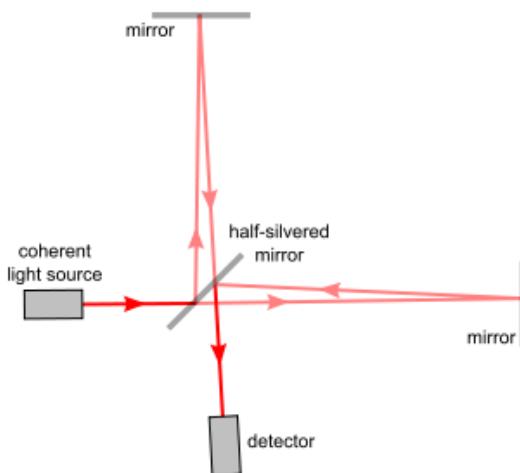
výpočetními prostředky pro odečtení a zpracování údajů, což umožňuje zkrátit čas měření automatickým zaostřením a zaměřením cíle.

Přesnost theodolitů je dnes v úrovni desetin arcsekund. Některé pokročilé theodolity obsahují jako přídatný prvek elektrooptické zařízení určené k měření vzdáleností. Chyby jsou přesně popsány, např. [whistleralley], a proto je zde nebudeme zmiňovat. Možný problém při jejich použití při kalibraci manipulátorů je velká minimální zaostřovací vzdálenost – zhruba od 1,5 m z čehož se odvíjí velké nároky na prostor.

2.1.2 Laserová interferometrie

Laserová interferometrie používá k měření vzdálenosti nebo rychlosti světelný paprsek vzniklý na laseru. Na obrázku 2.4 je názorně ukázán měřící postup. Laserový paprsek je vypuštěn na polopropustný filtr (zrcadlo), kde se rozdělí na dvě složky. První se odrazí na referenční zrcadlo a vrací se na detektor. Druhý paprsek dopadá na měřený objekt.

Vzhledem k jiné vzdálenosti od polopropustného zrcadla získá paprsek jinou frekvenci. Takže při dopadu na detektor vznikne mezi paprsky rozdíl fáze, která vzhledem ke znalosti délky vlny příslušného světla ze zdroje umožní vypočítat vzdálenost objektu.



Obrázek 2.3: Schéma interferometrie



Obrázek 2.4: Ukázka interferometru

Mezi nevýhody interferometru patří nutnost ustavení přesné referenční pozice pro měření. Z tohoto bodu interferometr sleduje všechny změny vzniklé na cílovém objektu. Pokud dojde k přerušení paprsku, je třeba začít měření znova. Z toho plyne efektor manipulátoru musí být na začátku ve známé poloze nebo je třeba zavést způsob kalibrace laseru tak, aby zářící paprsek na efektor nebyl ovlivněn změnou pozice. Druhý problém je cena komerčních laserů, která většinou nezahrnuje systém navádění laseru a proces kalibrace interferometru.

2.1.3 Zařízení pro měření koordinát

Zařízení pro měření koordinát (CMM - Coordinate Measuring Machine) je zjednodušeně 3DoF mechanismus s třemi ortogonálními osami. Tito roboti jsou vyrobeni se zaměřením na přesnost pohybů podél patřičných os a vybaveni přístroji pro přesné odečtení hodnot nastavení jednotlivých aktuátorů pro přesné určení pozice v prostoru. Ukázka klasické konstrukce je na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5: Zařízení pro měření koordinát

Nevýhodou tohoto řešení pro kalibraci je cena zařízení při nutnosti větších rozměrů CCM.

2.1.4 Zařízení využívající Time of Flight

Tato populární metoda využívaná pro měření vzdálenosti mezi dvěma objekty. Senzor na objektu přijme z vysílače signál v určitém zpoždění. Tato doba šíření vln společně se znalostí rychlosti signálu umožní výpočet vzdálenosti. Mezi nejpoužívanější principy patří využití mikrovlnných vysílačů a přijímačů. Jejich nevýhoda spočívá v závislosti rychlosti na okolním prostředí, aktuálních parametrech vzduchu.

2.1.5 Měření využívající kamerové zachycení světla

S výskytem cenově dostupných ccd prvků se na trhu značně rozšiřuje možnost sledování pozice manipulátoru. Pozorovací systém se skládá z objektivu a světlocitlivých prvků. Objektiv zaostří světlo objektu na plochu senzoru, který je tvořen z množství buněk uspořádaných do mřížky. Celkové rozlišení je dáno hustotou senzoru. Pozice efektoru je dána přepočtem rozměrů a rozlišení mřížky do pracovního prostoru.

Další možností je využití senzoru v infračerveném pásmu optického záření. Tato zařízení operují v analogovém režimu, což jim teoreticky umožňuje dosahovat nezměrné přesnosti. Většina procesů při měření se též blíží k lineárnímu průběhu. Kontrolní jednotka postupně rozsvěcuje infra diody, jejichž světlo se promítá na fotodetektor, který zaznamená aktuální pozici. Průmyslově používaný systém Selspot je uváděn s rychlostí snímání jednotlivé diody kolem $50 \mu\text{sec}$, s opakovatelností 0.005% z a nelineárností 0.1% měřicího rozsahu.

2.1.6 Předem zkalibrované pozice v pracovním prostoru

Tento postup se používá v případech, kdy je např. pracovní prostor příliš komplikovaný nebo obsahuje překážky, které by mohly bránit při měření. Většinou se postupuje tak, že se provede výběr dostatečného počtu bodů tak, aby úloha kalibrace byla dostatečně definována. Přesné umístění pozic měření je netriviální úloha, při které je nutné definovat orientaci vůči základní soustavě souřadnic, např. pomocí laserového interferometru. Tím se určí lokální soustavy souřadnic pro další postup, kde již lze využít poměrně nenáročné prostředky. Například mikrometr, LVDT (linear-variable differential transformer) atp.

Kapitola 3

Matematický model

Jak již bylo zmíněno, prvním krokem kalibrace je vytvoření správného modelu manipulátoru. Modely lze rozdělit do několika úrovní. Úroveň 1 se vztahuje na úroveň kloubů s účelem popsat vztah mezi snímačem posuvu a skutečným posuvem nebo natočením. Úroveň 2 definuje vztahy mezi úhly a nastavením ramen, zároveň je cílem popsat celkový kinematický systém. Úroveň 3 se zaměřuje na negeometrické chyby manipulátoru, které jsou přímo závislé na provedení konstrukce robota.

V této práci se budeme zabývat pouze úrovní 1 a 2 a vyšetřením stupňů volnosti tohoto systému.

3.1 Stupně volnosti

Stupně volnosti nám lépe umožní odhadnout manipulační prostor našeho dual SCARA robota.

3.1.1 Kurzbachovo kritérium

Pro výpočet stupňů volnosti Dual Scara robota bude použito Kurzbachovo kritérium (3.1.1), kde l je počet ramen konstrukce, j je množství kloubů, λ značí rozměr daného prostoru. Parametr f_i hodnotí počet volností daného kloubu.

$$F = \lambda(l - 1) - \sum_{i=1}^j (\lambda - f_i) = \lambda(l - j - 1) + \sum_{i=1}^j (f_i) \quad (3.1.1)$$

$$l = 6 \rightarrow \langle M_1, M_2 \rangle, \langle M_1, K_1 \rangle, \langle M_2, K_2 \rangle, \langle K_1, K_3 \rangle, \langle K_2, K_3 \rangle, E_1 \quad (3.1.2)$$

$\langle M_1, M_2 \rangle$ základna je zde brána jako rameno. E_1 je koncový efektor, který má sice sám dva stupně volnosti (díky K_4 a K_5 - rotačnímu a šroubovému kloubu), ale do naší mechanické soustavy dodává pouze jeden. Druhý je redundantní vůči rotaci K_3 .

$$j = 6 \rightarrow M_1, M_2, K_1, K_2, K_3, E_1 \quad (3.1.3)$$

$$f_{M_1} = 1, f_{M_2} = 1, f_{K_1} = 1, f_{K_2} = 1, f_{K_3} = 1, f_{E_1} = 2 \quad (3.1.4)$$

f_{E_1} má hodnotu 2, poněvadž jde o dvojitý kloub. Výsledný součet všech volností je 7. Rozměr prostoru využitého je $\alpha = 3$. Dosazením těchto hodnot do (3.1.1) získáme hodnotu (3.1.5) pro celý systém.

$$F = 4 \quad (3.1.5)$$

3.1.2 Grüblerův vzorec

Jako kontrolní výpočet pro potvrzení předchozího výsledku (3.1.5) provedeme se stejnými parametry (3.1.2), (3.1.3) a (3.1.2). Jako první krok zjistíme počet nezávislých smyček systému pomocí Eulerova vzorce (3.1.6).

$$L_{IND} = j - l + 1 \quad (3.1.6)$$

V našem případě (3.1.6) má hodnotu 1, což značí existenci právě jedné volné smyčky $\langle M_1, K_1, K_3, K_2, M_2 \rangle$. Tento mezivýpočet použijeme do Grüblerova vzorce (3.1.7), kterým získáme stupně volnosti systému.

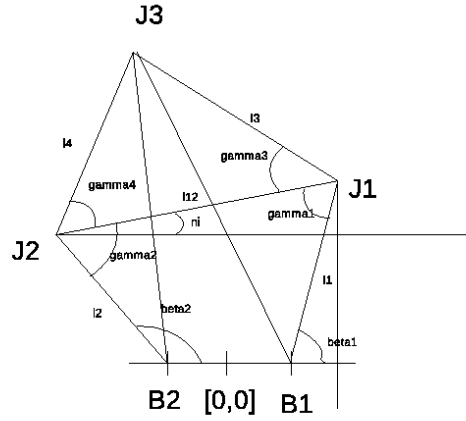
$$F = \sum_{i=1}^j (f_i - \lambda * L_{IND}) \quad (3.1.7)$$

To nám při výsledku 4 potvrdí původní výpočet (3.1.5).

3.2 Přímá kinematická úloha

Přímou úlohu odvodíme s využitím geometrických vlastností našeho dual SCARA robota. V této úloze známe pozice základů B_1 a B_2 , natočení rotorů ramen β_1 a β_2 a konstrukčními velikostmi jednotlivých ramen l_1 , l_2 , l_3 a l_4 . Obrázek pro odvození je následující.

Pozice základů B_1 a B_2 je vyjádřena těmito souřadnicemi:



Obrázek 3.1: PKU

$$B1 = \begin{bmatrix} b1_x \\ b1_y \end{bmatrix}, B2 = \begin{bmatrix} b2_x \\ b2_y \end{bmatrix}, \quad (3.2.1)$$

Pozice kloubů $J1$ a $J2$ lze vypočítat ze:

$$J1 = \begin{bmatrix} j1_x = l1 * \cos(\beta_1) + b1_x \\ j1_y = l1 * \sin(\beta_1) + b1_y \end{bmatrix}, J2 = \begin{bmatrix} j2_x = l2 * \cos(\beta_2) + b2_x \\ j2_y = l2 * \sin(\beta_2) + b2_y \end{bmatrix}, \quad (3.2.2)$$

Výpočet vzdálenosti mezi klouby $J1$ a $J2$:

$$j_{12} = \sqrt{(j1_x - j2_x)^2 + (j1_y - j2_y)^2} \quad (3.2.3)$$

V dalším kroce pomocí kosinovy věty získáme úhly γ_1 a γ_2 trojúhelníku $J1J2J3$.

$$\gamma_1 = \cos^{-1} \frac{l_3^2 + j_{12}^2 - l_4^2}{2 * l_3 * j_{12}} \quad (3.2.4)$$

$$\gamma_2 = \cos^{-1} \frac{l_4^2 + j_{12}^2 - l_3^2}{2 * l_4 * j_{12}} \quad (3.2.5)$$

Vzdálenosti $J1$ a $J2$ v ose X a Y

$$j_{12x} = \sqrt{(j1_x - j2_x)^2} \quad (3.2.6)$$

$$j_{12y} = \sqrt{(j1_y - j2_y)^2} \quad (3.2.7)$$

Dále spočítáme úhel ϑ , který je součástí trojúhelníku $J1 J2 Z$ a určuje naklonění přepony tohoto trojúhelníku.

$$\vartheta = \cos^{-1} \frac{j_{12x}^2 + j_{12}^2 - j_{12y}^2}{2 * l_{12x} * j_{12}} \quad (3.2.8)$$

Nyní provedeme výpočet úhlu θ_1 θ_2 a první použijeme pro výpočet pozice efektoru. Pokud je $j1_y < j2_y$ pak platí:

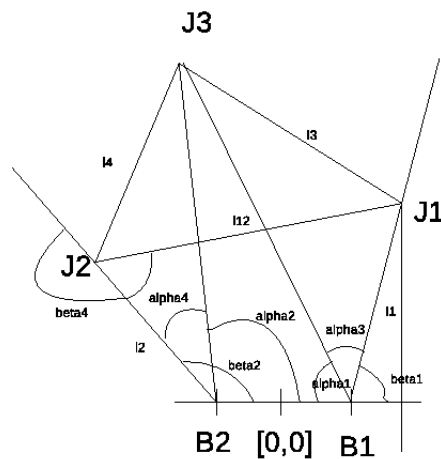
$$\beta_3 = \pi - \gamma_1 - \vartheta(1, 1); \beta_4 = \gamma_2 + \vartheta(1, 1); \quad (3.2.9)$$

v opačném případě se otačí znaménko u ϑ . Pomocí β_3 lze dopočítat pozici koncového efektoru J_3

$$J_3 = \begin{bmatrix} j3_x = l_3 * \cos(\beta_3) + j1_x \\ j3_y = l_3 * \sin(\beta_3) + j1_y \end{bmatrix} \quad (3.2.10)$$

3.3 Inverzní kinematická úloha

Kinematická inverzní úloha byla odvozena z následujícího obrázku. Na vstupu této úlohy známe pozici $J_3 = [j3_x, j3_y, j3_z]$ a pozice základen $B1$ a $B2$.



Obrázek 3.2: IKU

$$l_{b_1j_3} = \| B1J3 \| = \sqrt{(j3_x - b1_x)^2 + (j3_y - b1_y)^2} \quad (3.3.1)$$

$$l_{b_2j_3} = \| B2J3 \| = \sqrt{(j3_x - b2_x)^2 + (j3_y - b2_y)^2} \quad (3.3.2)$$

$$j_{b_1b_2} = \| B1B2 \| = \sqrt{(b1_x - b2_x)^2 + (b1_y - b2_y)^2} \quad (3.3.3)$$

kteře dosadíme do výpočtů potřebných úhlů z kosinových vět:

$$\alpha_1 = \cos^{-1} \frac{l_1^2 + l_{b_1j_3}^2 - l_2^2}{2 \cdot l_1 \cdot l_{b_1j_3}} \quad (3.3.4)$$

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \frac{l_2^2 + l_{b_2j_3}^2 - l_4^2}{2 \cdot l_2 \cdot l_{b_2j_3}} \quad (3.3.5)$$

$$\alpha_3 = \cos^{-1} \frac{l_{b_1b_2}^2 + l_{b_1j_3}^2 - l_{b_2j_3}^2}{2 \cdot l_{b_1b_2} \cdot l_{b_1j_3}} \quad (3.3.6)$$

$$\alpha_4 = \cos^{-1} \frac{l_{b_1b_2}^2 + l_{b_2j_3}^2 - l_{b_1j_3}^2}{2 \cdot l_{b_1b_2} \cdot l_{b_2j_3}}$$

$$\gamma_1 = \cos^{-1} \frac{l_1^2 + l_3^2 - l_{b_1j_3}^2}{2 * l_1 * l_3} \quad (3.3.7)$$

$$\gamma_2 = \cos^{-1} \frac{l_2^2 + l_4^2 - l_{b_2j_3}^2}{2 * l_2 * l_4} \quad (3.3.8)$$

Řešení pro hledané β_1 a β_2 lze nalézt ve čtyřech formách jak je ukázáno v následující tabulce:

$$\begin{aligned} \text{a) } b2_x > j2_x \ \& \ b1_x < j1_x \\ \beta_1 &= \pi - (\alpha_1 + \alpha_3) \end{aligned} \quad (3.3.9)$$

$$\beta_2 = \alpha_2 + \alpha_4 \quad (3.3.10)$$

$$\beta_3 = (\pi - \gamma_1) + \beta_1 \quad (3.3.11)$$

$$\beta_4 = (\beta_2 - (\pi - \gamma_2)) \quad (3.3.12)$$

$$\begin{aligned} \text{a) } b2_x < j2_x \ \& \ b1_x > j1_x \\ \beta_1 &= \pi - (-\alpha_1 + \alpha_3) \end{aligned} \quad (3.3.13)$$

$$\beta_2 = -\alpha_2 + \alpha_4 \quad (3.3.14)$$

$$\begin{aligned} \text{a) } b2_x < j2_x \ \& \ b1_x < j1_x \\ \beta_1 &= \pi - (\alpha_1 + \alpha_3) \end{aligned} \quad (3.3.15)$$

$$\beta_2 = -\alpha_2 + \alpha_4 \quad (3.3.16)$$

$$\begin{aligned} \text{a) } b2_x > j2_x \ \& \ b1_x > j1_x \\ \beta_1 &= \pi - (-\alpha_1 + \alpha_3) \end{aligned} \quad (3.3.17)$$

$$\beta_2 = \alpha_2 + \alpha_4 \quad (3.3.18)$$

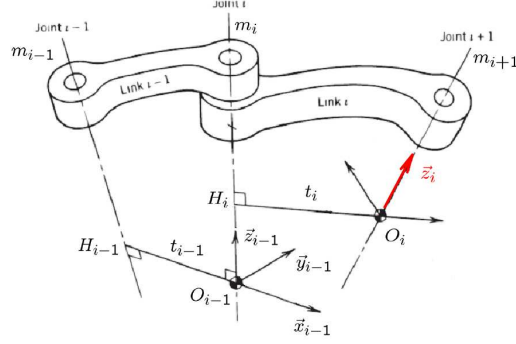
3.4 Popis robota pomocí D-H úmluvy

Denavitova - Hartenbergova metoda se používá pro jasné popsání zkoumaného robota. Základní předpoklad pro popis je umístění osy z do os rotace nebo translace jednotlivých kloubů ramen manipulátoru. Pro každé rameno je zvolen souřadný systém odpovídající natočení a posuvu daného ramene.

Vzájemná poloha dvou ramen manipulátoru se souř. systémy F_{i-1} a F_i lze popsat pomocí čtyř nezávislých parametrů θ_i , α_i , d_i a a_i a existencí normály mezi O_i a osou x . Transformační matice mezi F_{i-1} a F_i se skládá z elementárních transformací Translace a Rotace.

$$\begin{aligned} T_i^{i-1} &= Trans(z, d_i) * Rot(z, \theta_i) * Trans(x, a_i) * Rot(x, \alpha_i) = \\ &\begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i * c\alpha_i & s\theta_i * s\alpha_i & a_i * c\theta_i \\ s\theta_i & -c\theta_i * c\alpha_i & -c\theta_i * s\alpha_i & a_i * s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.4.1)$$

V této matici označíme parametry θ_i a d_i jako kloubové, tzn. matice je jejich funkcí. α_i



Obrázek 3.3: DH Umluva

a a_i lze brát jako návrhové parametry. U rotačních kloubů je pro jejich orientaci nutné znát všechny čtyři geometrické parametry θ_i , α_i , d_i a a_i , pro translační klouby stačí parametry dva - θ_i , α_i .

Manipulátor lze rozložit na posloupnost souřadných systému translační a rotačních kloubů do transformačního vztahu typu:

$$T_n^0 = \prod_{i=1}^n T_i^{i-1} \quad (3.4.2)$$

3.5 Kalibrační model

Kalibrační model pro paralelní část dual scara robota bude tvořit vztah mezi $\Delta\xi$ v závislosti na chybě polohy kloubových souřadnic ΔQ - využijeme vlastnost existence geometrického řešení Inverzní kinematické úlohy tohoto paralelního robota.

$$Q_M = F^{-1}(X_M, \xi^*) \quad (3.5.1)$$

kde Q_M jsou měřené hodnoty kloubových souřadnic, X_M skutečná poloha efektoru a ξ^* značí skutečné geometrické parametry kalibrovaného robota.

Linearizovanou podobu kalibračního modelu dostaneme pokud provedeme Taylorův rozvoj pravé strany předchozího vzorce v bodě $\xi^* = \xi + \Delta\xi$.

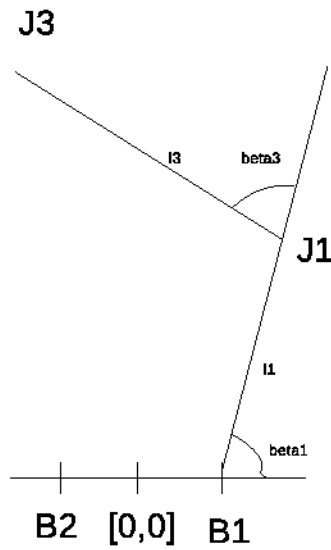
$$\Delta Q = \left. \frac{\partial F^{-1}(X_M, \xi^*)}{\partial \xi^*} \right|_{\xi^* = \xi} * \Delta\xi \quad (3.5.2)$$

kde zadefinujeme:

$$\begin{aligned}\Delta Q &= Q_M - Q \\ \Delta \xi &= \xi^* - \xi\end{aligned}\tag{3.5.3}$$

$$\Psi^{IKU}(X_M, \xi) = \left. \frac{\partial F^{-1}(X_M, \xi^*)}{\partial \xi^*} \right|_{\xi^*=\xi}\tag{3.5.4}$$

Matici $\Psi^{IKU}(X_M, \xi)$ nazveme zobecněným jakobiánem. ΔQ je vektor chyby měření. Zobecněný jakobián substitujeme pomocí geometrického jakobiánu. U paralelních manipulátorů je nejprve třeba jednotlivé paralelní řetězce rozdělit. Pro každý z nich provést DH kinematický popis. Pro jednotlivý řetězec lze použít následující schéma.



Obrázek 3.4: reťezec

DH popisem jsme zvolili tyto parametry

j	θ_j	d_j	α_j	a_j
1	β_1	0	0	l_1
1	β_1	0	0	l_1

Dále sestavíme homogenní transformační matice $T1_{B1}^{J1}$, $T1_{J1}^{J3}$ a $T1_{B1}^{J3}$. Kde $T1_{B1}^{J1}$ značí transformaci mezi bodem $B1$ a $J1$ apod.

$$T1_{B1}^{J1} = \begin{bmatrix} c\beta_1 & -s\beta_1 & 0 & l_1 * c\beta_1 \\ s\beta_1 & -c\beta_1 & 0 & l_1 * s\beta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\tag{3.5.5}$$

$$T1_{J1}^{J3} = \begin{bmatrix} c\beta_3 & -s\beta_3 & 0 & l_3 * c\beta_3 \\ s\beta_3 & -c\beta_3 & 0 & l_3 * s\beta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5.6)$$

$$T1_{B1}^{B1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5.7)$$

$$T1_{B1}^{J3} = \begin{bmatrix} c\beta_1 * c\beta_3 - s\beta_1 * s\beta_3 & -c\beta_1 * s\beta_3 - s\beta_1 * c\beta_3 & 0 & c\beta_1 * l_3 * c\beta_3 - s\beta_1 * l_3 * s\beta_3 + l_1 * c\beta_1 \\ s\beta_1 * c\beta_3 + c\beta_1 * s\beta_3 & -s\beta_1 * s\beta_3 + c\beta_1 * c\beta_3 & 0 & s\beta_1 * l_3 * c\beta_3 + c\beta_1 * l_3 * s\beta_3 + l_1 * s\beta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5.8)$$

Z vlastností geometrického jakobiánu víme [Sv12], že jeho jednotlivé sloupce odpovídají těmto vlastnostem:

$$\Delta X_{d_i} = \begin{bmatrix} z_{i-1} \\ 0_{3 \times 1} \end{bmatrix} \quad (3.5.9)$$

$$\Delta X_{\theta_i} = \begin{bmatrix} z_{i-1} \times r_{i-1,n} \\ z_{i-1} \end{bmatrix} \quad (3.5.10)$$

$$\Delta X_{a_i} = \begin{bmatrix} x_i \\ 0_{3 \times 1} \end{bmatrix} \quad (3.5.11)$$

$$\Delta X_{\theta_i} = \begin{bmatrix} x_i \times r_{i,n} \\ x_i \end{bmatrix} \quad (3.5.12)$$

Do předešlých matic patří tyto části transformačních matic.

$$x_i = T_i[1 : 3, 1] \quad (3.5.13)$$

$$r_{i,j} = T_j[1 : 3, 4] - T_i[1 : 3, 4] \quad (3.5.14)$$

$$z_i = T_i[1 : 3, 3] \quad (3.5.15)$$

Vztah chyby geometrického parametru na pozici koncového efektoru Z předešlých matic lze předpokládat, že matice pro parametry l_1, l_2, l_3, l_4 respektive pro jejich změny bude platit:

$$\Delta X_{a_i} = \begin{bmatrix} x_i \\ 0_{3 \times 1} \end{bmatrix} \quad (3.5.16)$$

a tedy:

$$\Delta X_{l_1} = \begin{bmatrix} T_{J_1}^{B_1}[1 : 3, 1] & T_{J_3}^{B_1}[1 : 3, 1] \\ 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} \end{bmatrix} \quad (3.5.17)$$

$$\Delta X_{l_2} = \begin{bmatrix} T_{J_1}^{B_2}[1 : 3, 1] & T_{J_3}^{B_2}[1 : 3, 1] \\ 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} \end{bmatrix} \quad (3.5.18)$$

Vztah chyby kloubových souřadnic na pozici koncového efektoru Z předešlých matic lze předpokládat, že matice pro parametry $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ respektive pro jejich změny bude platit:

$$\Delta X_{\theta_i} = \begin{bmatrix} z_{i-1} \times r_{i-1,n} \\ z_{i-1} \end{bmatrix} \quad (3.5.19)$$

z toho plyne:

$$J_{J_3}^{B_1} = \begin{bmatrix} z_{B_1} \times (T_{J_3}^{B_1}[1 : 3, 4] - T_{B_1}^{B_1}[1 : 3, 4]) & z_{J_1} \times (T_{J_3}^{J_1}[1 : 3, 4] - T_{J_1}^{B_1}[1 : 3, 4]) \\ z_{B_1} & z_{J_1} \end{bmatrix} \quad (3.5.20)$$

$$J_{J_3}^{B_2} = \begin{bmatrix} z_{B_2} \times (T_{J_3}^{B_2}[1 : 3, 4] - T_{B_2}^{B_2}[1 : 3, 4]) & z_{J_2} \times (T_{J_3}^{J_2}[1 : 3, 4] - T_{J_2}^{B_2}[1 : 3, 4]) \\ z_{B_2} & z_{J_2} \end{bmatrix} \quad (3.5.21)$$

Vztah mezi chybami kloubových a geometrických parametrů Vztah těchto parametrů spočívá v provázanosti - pokud se geometrické parametry změní, musí dojít ke kompenzaci pomocí změny kloubových parametrů a opačně. Zde je jejich obecná definice:

geometrické parametry:

$$\Delta X_{B_1} = \Psi_{B_1} \begin{bmatrix} \Delta l_1 \\ \Delta l_3 \end{bmatrix} \quad (3.5.22)$$

$$\Delta X_{B_2} = \Psi_{B_2} \begin{bmatrix} \Delta l_2 \\ \Delta l_4 \end{bmatrix} \quad (3.5.23)$$

kloubové parametry:

$$\Delta X_{B1} = J_{J3}^{B1} \begin{bmatrix} \Delta\beta_1 \\ \Delta\beta_3 \end{bmatrix} \quad (3.5.24)$$

$$\Delta X_{B2} = J_{J3}^{B2} \begin{bmatrix} \Delta\beta_2 \\ \Delta\beta_4 \end{bmatrix} \quad (3.5.25)$$

Protože změny se mají kompenzovat, aby došlo k zachování naměřené pozice koncového efektoru lze napsat:

$$\Delta X_{B1}^J + \Delta X_{B1}^\Psi = 0 \quad (3.5.26)$$

a

$$\Delta X_{B2}^J + \Delta X_{B2}^\Psi = 0 \quad (3.5.27)$$

můžeme provést součet obou rovnic (3.5.26) a (3.5.27) a pak provést inverzi:

$$\begin{bmatrix} \Delta\beta_1 \\ \Delta\beta_3 \end{bmatrix} = - (J_{J3}^{B1})^{-1} \Psi_{B1} \begin{bmatrix} \Delta l1 \\ \Delta l3 \end{bmatrix} \quad (3.5.28)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\beta_2 \\ \Delta\beta_4 \end{bmatrix} = - (J_{J3}^{B2})^{-1} \Psi_{B2} \begin{bmatrix} \Delta l2 \\ \Delta l4 \end{bmatrix} \quad (3.5.29)$$

V dalším kroku je třeba vzít v úvahu β_3 a β_4 , kterou jsou závislé kloubové souřadnice a nelze je přímo ovlivnit. Proto je při výpočtu vynecháme. Výsledný geometrický jakobián má tento tvar:

$$\begin{bmatrix} \Delta\beta_1 \\ \Delta\beta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} - (J_{J3}^{B1})^{-1} [1, :] * \Psi_{B1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & - (J_{J3}^{B2})^{-1} [1, :] * \Psi_{B2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta l2 \\ \Delta l4 \end{bmatrix} \quad (3.5.30)$$

3.6 Postup kalibrace

Z předchozí kapitoly víme, že zobecněný linearizovaný jakobián $\Psi^{IKU}(X_m, \psi)$ bude mít tvar 2×4 a bude ve formě:

$$\Psi^{IKU}(X_m, \psi) = \begin{bmatrix} - (J_{J3}^{B1})^{-1} [1, :] * \Psi_{B1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & - (J_{J3}^{B2})^{-1} [1, :] * \Psi_{B2} \end{bmatrix} \quad (3.6.1)$$

Pro další práci můžeme označit sledované parametry následovně:

$$\Delta Q = \begin{bmatrix} \Delta\beta_1 \\ \Delta\beta_2 \end{bmatrix} \quad (3.6.2)$$

$$\Delta\xi = \begin{bmatrix} \Delta l_1 \\ \Delta l_2 \\ \Delta l_3 \\ \Delta l_4 \end{bmatrix} \quad (3.6.3)$$

Pro odhad chyb ΔQ a $\Delta\xi$ bude výsledný linearizovaný kalibrační model tento tvar pro m různých měření:

$$\Delta Q_{ag} = W * \Delta\xi + V \quad (3.6.4)$$

kde platí:

$$\Delta Q_{ag} = \begin{bmatrix} \Delta Q^1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta Q^m \end{bmatrix}, \quad (3.6.5)$$

$$W = \begin{bmatrix} \Phi(X_M^1\xi) \\ \cdot \\ \cdot \\ \Phi(X_M^m\xi) \end{bmatrix} \quad (3.6.6)$$

oba s rozměry $p * m \times 1$. ΔQ_{ag} je chyba kloubových souřadnic. V je vektor chyby rovnice. Kalibrační jakobián je přímo roven zobecněnému jakobiánu.

$$\Phi^{IKU}(X_M\xi) = \Psi^{IKU}(X_m, \psi) \quad (3.6.7)$$

Iterační metoda nejmenších čtverců Postup této metody lze popsat takto, podrobněji v [Sv12], [MR91]:

- 1 Na začátek se hodnota kalibrovaných parametrů ξ^0 rovná nominální hodnotě ξ^N .
- 2 Polohy aktuátoru Q_m^i a polohy efektoru X_M^i získám m měřeními a vytvořím z nich matice ΔQ_{ag}^k a matici pozorování W pro aktuální parametry ξ^k .

3 Metodou lineárních nejmenších čtverců dojdou k řešení rovnice (3.6.4), tzn. minimalizují kritérium

$$J^k = (V^k)^T * V^k \quad (3.6.8)$$

Vezmeme-li v úvahu nutnou podmínku existence extrému $\frac{\partial J^k}{\partial \Delta \xi^k} = 0$ lze tvrdit:

$$\Delta \xi^k = \left((W^k)^T \cdot W^k \right)^{-1} \cdot (W^k)^T \cdot \Delta X_{ag}^k \quad (3.6.9)$$

4 Oprava hodnoty kalibrovaných parametrů:

$$\xi^{k+1} = \xi^k + \Delta \xi^k \quad (3.6.10)$$

5 Ověření podmínky zastavení.

Kapitola 4

Kalibrace

Použitý kalibrační algoritmus vychází z iterační metody nejmenších čtverců. Výsledky jsou znázorněny na následujících obrázcích. Polohy X_D algoritmu byly generovány náhodně pomocí přímé kinematické úlohy s úhly v rozmezí $\beta_1 \in (0, \pi/2)$ a $\beta_2 \in (\pi/2, \pi)$.

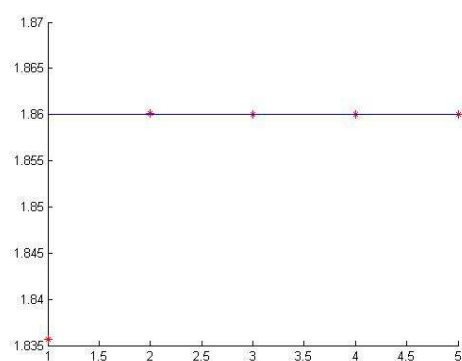
Skutečné hodnoty geometrických parametrů manipulátoru:

$$\xi^* = [1.86, 2.2, 2.8, 3.3] \quad (4.0.1)$$

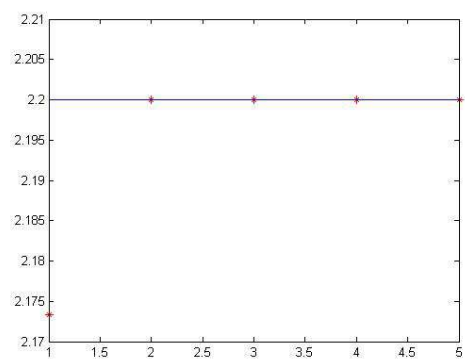
Nominální hodnoty geometrických parametrů manipulátoru:

$$\xi^N = [2, 2, 3, 3] \quad (4.0.2)$$

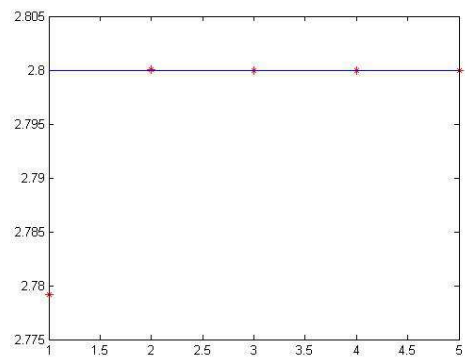
Podmínka zastavení bylo zvolena jako $\vartheta = 1 * 10^{-10}$



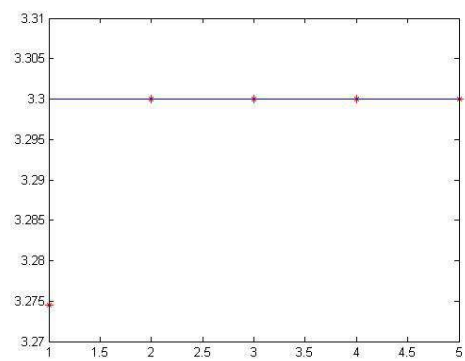
Obrázek 4.1: Vývoj parametru l_1 v čase



Obrázek 4.2: Vývoj parametru l2 v čase



Obrázek 4.3: Vývoj parametru l3 v čase



Obrázek 4.4: Vývoj parametru l4 v čase

Kapitola 5

Závěr

Cílem této práce bylo seznámit studenta s problematikou kalibrace paralelních průmyslových robotů. Celá práce je zaměřena na paralelní část dual SCARA robota. První úkol spočíval ve vytvoření kinematického modelu, který věrně popisuje pohyb manipulátoru. Dalším krokem bylo vytvoření kalibračního modelu a otestování jeho věrnosti.

V části s názvem matematický model jsem vytvořil model dual SCARA robota pomocí kinematických úloh - přímé a inverzní. Přímá úloha využívá znalost nastavení úhlů na motorech a pozici základny. Pomocí cosinovy věty je dopočtena pozice koncového efektoru manipulátoru. Inverzní úloha je v případě paralelního robota řešitelná skoro vždy geometricky. Největší problém vzhledem ke zbytku řešení byl zde určit směr otáčení úhlů β_3 a β_4 . V případě nedodržení pravotočivého otáčení podle osy z následná kalibrace nefungovala správně.

Dále byla provedena analýza manipulátoru pomocí DH úmluvy. Zde bylo důležité dodržet správné rozdělení parametrů mezi geometrické a kloubové. Další rozhodnutí patřilo k rozlišení parametrů na závislé a nezávislé. Homogenní transformační matice byly úspěšně použity.

V oddíle s názvem Kalibrační model jsem se zabýval postupem jak linearizovat kalibrační model pomocí geometrického jakobiánu, který byl nakonec použit jako kalibrační jakobian. Základem pro tento postup je popis dle DH úmluvy. Z transformačních matic pro další výpočty používají specifické sloupce s patřičnými vlastnostmi. V dalším kroce se vytvoří vztahy mezi změnami geometrických nebo kloubových parametrů a koncovým efektozem. Po uvědomění, že změny parametrů musí být vzájemně kompenzovány umožní spojení těchto rovnic. Další zhuštění parametrů je způsobeno existencí závislých kloubových parametrů, které mohou být vynechány. Výsledný obecný jakobián je tvořen sloučením těchto rovnic za podmínky jejich provázanosti parametry.

V kapitole Postup kalibrace jsem načrtl postup pro iterační metodu nejmenších čtverců. Dále jsem řešil veškeré možné způsoby měření koncového efektoru pomocí různých metod a prostředků.

V sekci Kalibrace jsem se pokusil demonstrovat realizaci kalibrace na jednoduchém scara robotu s minimem komplikací, což je jasně vidět na výsledcích. Všechny parametry jsou zkalibrovány již při druhé kroku algoritmu. Dochází k minimálnímu překmitu.

Do budoucna bych se zaměřil na zesložnění robota a jeho návrhu. Např. přidáním nutnosti kompenzovat základnu a efektor, nebo ztížit odečet nastavení na hnacích motorech. Pro tyto případy by již přicházelo v úvahu ošetřit hodnoty iterační metody nejmenších čtverců např. normováním či tlumením kroku.

Literatura

- [LH05] LAST, Philipp, HESSELBACH, Jürgen a PLITEA, Nicolae. An Extended Inverse Kinematic Model of the HEXA-Parallel-Robot for Calibration Purposes. In: International Conference on Mechatronics & Automation Niagara Falls. Canada: IEEE, July 2009. S. 1294-1299
- [MR91] MOORING, Benjamin, ROTH, Zvi S. a DRIELS, Morris R. Fundamentals of manipulator calibration. 1. vyd. New York: A Wiley-Interscience Pub., 1991. ISBN 0-471-50864-0.
- [Me06] MERLET, J.-P. Parallel Robots. 2. vyd. Sophia-Antipolis: Springer, 2006. ISBN 1-4020-4133-2
- [Cr86] CRAIG, J.J. Introduction to Robotics Mechanics and Control. 3. vyd. Pearson Education International, 2004. ISBN 0-13-123629-6
- [Hu04] HUGHES, Peter C. Spacecraft attitude dynamics. Mineola, New York: Dover Pub., 2004. ISBN 0-486-43925-9
- [HZ04] HOGLIANG, CUI, Zhenqi, ZHU, ZHONGXUE, Gan, BROGARDH, Torgny. Kinematic analysis and error modeling of TAU parallel robot. In: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 21. 2005. S. 497-505
- [SS09] SZEP, Cristian, STAN, Sergiu-Dan, CSIBI, Vencel, MANIC, Milos, BALAN, Radu. New approach for accuracy and kinematics analysis of 2DOF medical parallel robot. In: 3rd IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies. IEEE, 2009. S. 524-529
- [Wu83] WU, Chi-Haur. The kinematic error model for the design of robot manipulators. In: Proceedings of the American Control Conference. San Francisco, June 1983. S. 497 - 502
- [whistleralley] <http://whistleralley.com/surveying/theoerror/>

- [Sv10] ŠVEJDA, Martin. 2DoF planar parallel robot In: Sborník prací 2009-2010, KKY ZČU.
- [AN09] AGHELI, M.M., NATEGH, M.J. Observability of Kinematics Parameter Errors for Calibration of Parallel Robots as Steward Platform. In: Iranian Conference on Manufacturing Engineering (ICME2009), March 3-5, 2009, Birjand, Iran
- [AN09-2] AGHELI, M.M., NATEGH, M.J. Identifying the Kinematic Parameters of Hexapod Maschine Tool. In: World Academy of Science, Engineering and Technology 52. 2009. S. 380-385
- [DA08] DA-YONG, Yu. Kinematic Calibration of Parallel Robots Based on Least Squares Algorithm. In: Proceedings of Seventh International Conference on Maschine Learning and Cybernetics, Kunming, 12-15 July 2008. S. 2020 - 2025
- [Sv12] ŠVEJDA, Martin. Kinematická kalibrace sériových a paralelních manipulátorů, Aplikace kalibračních metod na sério-paralelní manipulátor AGEBOT. IN: Technická zpráva 3.4.2012, KKY ZČU.