

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta aplikovaných věd

**OPTIMALIZACE HAND-EYE KALIBRACE
PROFILOVÉHO SKENERU JAKO NÁSTROJE
ROBOTA**

Ing. Michal Chaluš

disertační práce
k získání akademického titulu
Doktor
v oboru Kybernetika

Školitel: Doc. Ing. Eduard Janeček, CSc.
Konzultant specialista: Ing. Jindřich Liška, Ph.D.
Katedra kybernetiky

Plzeň 2021

University of West Bohemia
Faculty of Applied Sciences

**OPTIMIZATION OF HAND-EYE CALIBRATION
OF A PROFILE SCANNER AS A ROBOT TOOL**

Ing. Michal Chaluš

A dissertation submitted in partial fulfillment
of the requirements for the degree of
Doctor of Philosophy
(Cybernetics)

Supervised by: Doc. Ing. Eduard Janeček, CSc.

Co-supervised by: Ing. Jindřich Liška, Ph.D.

Department of Cybernetics

Pilsen 2021

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů. Disertační práce byla vypracována pod vedením doc. Eduarda Janečka, CSc. a Ing. Jindřicha Lišky, Ph.D. na Západočeské univerzitě v Plzni.

Abstrakt

Vývoj automatických naváděcích systémů pro svařovací roboty probíhá již několik desetiletí, jelikož automatické navádění přináší oproti manuálnímu procesu svařování zejména vyšší přesnost, robustnost a časovou efektivitu. Navíc získané znalosti jsou dále transformovány do oblastí reverzního inženýrství či do medicíny. Požadavky na vlastnosti naváděcích systémů se v průběhu let zvyšují s postupným vývojem jednotlivých technologií. Z pohledu přesnosti navádění mají nejnáročnější požadavky laserové svařovací systémy, které v některých případech vyžadují přesnost navádění v rozsahu do jedné desetiny milimetru. Jedním z nejdůležitějších faktorů ovlivňující celkovou přesnost navádění je přesnost kalibrace jednotlivých nástrojů robota, kterými jsou laserová procesní hlava a snímač pro detekování svařované oblasti. V případě optických snímačů je zapotřebí využít speciální hand-eye kalibrace, jež určí hledaný transformační vztah mezi přírubou robota a snímačem na základě měřených dat z kalibračního objektu. V odborné literatuře je věnována velká pozornost matematickému řešení rovnice hand-eye kalibrace. Chybí zde však zaměření na volbu konkrétních kalibračních pozic, které taktéž hrají významnou roli ve výsledné přesnosti hand-eye kalibrace. Cílem autora práce je tak optimalizovat proces hand-eye kalibrace optického nástroje jako celek s ohledem na následné využití v praxi.

Autor práce se v první řadě věnuje návrhu postupu pro hand-eye kalibraci optických snímačů, jenž vychází z vytvoření a analýzy kompletního modelu kalibračního procesu. Ten musí obsahovat modely jednotlivých částí naváděcího systému (robot, snímač, kalibrační objekt) a také algoritmus pro zpracování kalibračních dat. Pomocí provedené analýzy modelu kalibračního procesu jsou nalezeny optimální parametry pro generátor kalibračních pozic a optimální parametry pro následné vyhodnocení kalibračních dat. Navíc provedená analýza určí dosažitelnou přesnost a robustnost kalibrace. Dle toho lze následně rozhodnout o využití daného automatického naváděcího systému z pohledu náročnosti jednotlivých technologií.

Navržený obecný postup hand-eye kalibrace je v dalším textu podrobně popsán pro naváděcí systém využívající laserový profilový skener ke snímání dat ze svařovaného objektu. Nalezené optimální parametry pro generátor kalibračních pozic a optimální parametry pro vyhodnocení kalibračních dat umožní dosáhnout přesnosti kalibrace potřebné pro laserové svařovací úlohy.

V textu je dále ukázán vliv absolutní chyby robota na přesnost hand-eye kalibrace i přesnost celého procesu navádění. Absolutní chyba robota totiž hraje důležitou roli při využití navrženého postupu hand-eye kalibrace v praxi. Navržený postup kalibrace je implementován jako jeden z kognitivních modulů v autorem vyvíjeném softwaru CogniGuide, jehož účelem je řídit úlohy navádění v laserových robotických systémech. Pomocí ukázek konkrétních systémů je pak ověřena funkčnost navrženého postupu hand-eye kalibrace profilového skeneru v praxi.

Abstract

Seam tracking systems are used for automatic guidance of welding robots. They have been developed for several decades and offer higher accuracy, robustness and time efficiency compared to the manual welding process. In addition, the knowledge acquired in this area is further transformed into the areas such as reverse engineering or medicine. Requirements for the accuracy of seam tracking systems have been increasing over the years with the development of welding technologies. Especially laser robotic systems require the precise path planning with the accuracy of tenths of a millimeter. One of the most important factors influencing the overall accuracy of the path planning is the accuracy of the calibration of the individual robot tools, specifically the process head and the sensor for detecting the welded area. In case of optical sensors, it is necessary to use a special hand-eye calibration which determines the required transformation relationship between the robot flange and the sensor based on the measured data from a specific calibration object. In the literature, great attention is paid to the mathematical solution of the equation of the hand-eye calibration. However, only a small attention is paid to the selection of appropriate calibration positions which also play a significant role in the resulting accuracy of the hand-eye calibration. Therefore, the main goal of the thesis is to optimize the whole process of the hand-eye calibration of the optical sensor with subsequent practical application.

At the beginning, the author introduces the proposed procedure for the hand-eye calibration of optical sensors as robot tools based on the creation and the analysis of the complete model of the calibration process. The model must contain models of all individual parts of the seam tracking system (robot, sensor, calibration object) as well as algorithms for the processing of the calibration data. Using the analysis of the model of the calibration process, the optimal parameters for the generator of calibration positions and the optimal parameters for the subsequent processing of the calibration data are found. In addition, the analysis of the model of the calibration process determines the achievable accuracy and robustness of the hand-eye calibration. This information can affect the decision about feasibility of the given seam tracking system for a specific application according to its accuracy requirements.

The proposed procedure is then implemented for the task of the hand-eye calibration of a laser profile scanner as the robot tool. The found optimal parameters for the generator of the calibration positions and the optimal parameters for the processing of the calibration data meet the requirements for the accuracy of laser welding tasks.

The author also shows the effect of the absolute error of the robot positioning on the accuracy of the hand-eye calibration and the accuracy of the whole welding process. The absolute error of the robot positioning plays an important role in using the proposed procedure in practice. The proposed procedure of the hand-eye calibration is implemented as one of the cognitive modules in the CogniGuide software. This software is developed by the author and its purpose is to control robotic laser welding systems. The functionality of the proposed procedure of the hand-eye calibration in practice is verified on these robotic laser welding systems.

Poděkování

Na tomto místě bych velice rád poděkoval všem, kteří přispěli ke vzniku této práce. Předem bych rád poděkoval svému školiteli panu Doc. Ing. Eduardu Janečkovi, CSc. a svému konzultantu specialistovi panu Ing. Jindřichu Liškovi, Ph.D. za vedení, rady a ochotu během studia. Poděkování patří i kolegům z laboratoře DiagEn za vzájemnou spolupráci. Velké poděkování pak náleží celé rodině. V první řadě rodičům za přípravu do života a nadále probíhající podporu. Dále bych také rád vyjádřil poděkování manželce a dceři se syny za motivaci, podporu a nenahraditelné životní chvíle.

Obsah

Použité zkratky	iv
Použité matematické značení	v
1 Úvod.....	1
1.1 Seam tracking systém	2
1.2 Hlavní cíle.....	4
1.3 Struktura práce.....	5
2 Formulace problému hand-eye kalibrace nástroje robota	6
2.1 Stávající stav hand-eye kalibrace	7
2.2 Princip hand-eye kalibrace	9
2.2.1 Řešení rovnice hand-eye kalibrace.....	10
2.2.2 Transformační matice A	11
2.2.3 Transformační matice B	12
2.3 Formulace úlohy	13
3 Návrh nového postupu hand-eye kalibrace optického nástroje robota	15
3.1 Vytvoření modelu kalibračního procesu MCP	16
3.2 Analýza vlivů na přesnost kalibračního procesu	17
3.3 Návrh generátoru optimálních kalibračních pozic.....	18
4 Model procesu hand-eye kalibrace profilového skeneru jako nástroje robota	20
4.1 Model robota.....	20
4.2 Model profilového skeneru.....	24
4.3 Model kalibračního objektu	27
4.3.1 Algoritmus výpočtu vzájemné pozice mezi skenerem a kalibračním objektem	28
4.3.2 Navržené řešení nelineární soustavy tří kvadratických kosinových rovnic pomocí resultantu	31
4.3.3 Algoritmus generování pozice profilového skeneru nad kalibračním objektem	36
4.3.4 Algoritmus pro generování měřeného profilu	37
4.4 Metody řešení rovnice hand-eye kalibrace	38
4.4.1 Řešení rotační rovnice pomocí obecné osy rotace – TL metoda.....	39
4.4.2 Řešení rotační rovnice pomocí kvaternionů – ZR metoda.....	39
4.4.3 Řešení rotační matice pomocí Euklidovy grupy – PM metoda.....	40
4.4.4 Jednofázový algoritmus – ZS metoda	41
4.5 Návrh iterativního algoritmu pro zpřesnění hand-eye kalibrace IRHEC	42

5	Analýza vlivů na přesnost procesu hand-eye kalibrace profilového skeneru.....	45
5.1	Nastavení, průběh a vyhodnocení simulací	45
5.1.1	Základní nastavení.....	46
5.1.2	Generování kalibračních pozic a měřených dat	47
5.1.3	Zpracování kalibračních dat	52
5.1.4	Vyhodnocení simulace	58
5.2	Vliv vstupních chyb.....	62
5.2.1	Chyba opakovatelnosti robota.....	62
5.2.2	Chyba měření profilovým skenerem	64
5.2.3	Chyba odhadu ruční kalibrace.....	66
5.3	Vliv nastavení generátoru	67
5.3.1	Počet kalibračních pozic.....	68
5.3.2	Podobnost kalibračních pozic.....	69
5.3.3	Podmínky kladené na očekávanou pozici profilového skeneru	70
5.4	Vliv nastavení zpracování kalibračních dat.....	72
5.4.1	Podmínky na vyhodnocení pozice profilového skeneru	72
5.4.2	Nastavení navrženého algoritmu IRHEC	73
5.5	Vliv rozměrů kalibračního objektu.....	75
5.6	Optimální nastavení MCP	76
5.7	Vyhodnocení analýzy	82
6	Vliv absolutní chyby robota na proces kalibrace nástroje robota.....	84
6.1	Vliv na hand-eye kalibraci skeneru pomocí MCP	85
6.2	Vliv na standardní metodu kalibrace nástroje	90
6.3	Vliv na přesnost navádění.....	92
6.4	Zhodnocení	94
7	Reálné využití navrženého postupu hand-eye kalibrace profilového skeneru	96
7.1	Software CogniGuide	96
7.2	Navařování lopatky.....	99
7.3	Další ukázky STS	102
8	Závěr.....	104
	Literatura.....	106
	Vlastní publikace	111
	Přílohy	114

A	Reprezentace polohy	114
A.1	Transformační matice	114
A.2	Matice rotace.....	115
A.3	Jednotkový kvaternion	117
B	Analýza pravděpodobnostního rozložení vstupů do modelu kalibračního procesu	119
B.1	Chyba opakovatelnosti a absolutní přesnosti robota.....	119
B.2	Chyba měření profilových dat.....	121
B.3	Chyba ruční kalibrace profilového skeneru jako nástroje robota	124
C	Doplňující grafy pro optimální MCP	129

Použité zkratky

STS	automatické naváděcí systémy svařování (<i>Seam Tracking System</i>)
TCP	střední bod nástroje robota (<i>Tool Center Point</i>)
DGM	přímý geometrický model (<i>Direct Geometric Model</i>)
IGM	inverzní geometrický model (<i>Inverse Geometric Model</i>)
DH	Denavit-Hartenbergova úmluva či parametry
MCP	model kalibračního procesu (<i>Model of Calibration Process</i>)
IRHEC	iterativní algoritmus pro zpřesnění hand-eye kalibrace (<i>Iterative Refinement of Hand-Eye Calibration</i>)
TL	řešení rovnice hand-eye kalibrace pomocí Tsai a Lenz (1989)
ZR	řešení rovnice hand-eye kalibrace pomocí Zhuang a Roth (1991)
PM	řešení rovnice hand-eye kalibrace pomocí Park a Martin (1994)
ZS	řešení rovnice hand-eye kalibrace pomocí Zhuang a Shiu (1993)

Použité matematické značení

CS_W, \mathbf{W}	světový souřadný systém robota v pozici \mathbf{W}
CS_N, \mathbf{N}	souřadný systém příruby robota v pozici \mathbf{N}
CS_S, \mathbf{S}	souřadný systém profilového skeneru v pozici \mathbf{S}
CS_L, \mathbf{L}	souřadný systém laserové procesní hlavy v pozici \mathbf{L}
CS_E, \mathbf{E}	souřadný systém kalibračního objektu v pozici \mathbf{E}
$\mathbf{T}_{N_i}^W$	transformační matice reprezentující polohu příruby N_i v CS_W
$\mathbf{T}_{S_i}^E$	transformační matice reprezentující polohu příruby S_i v CS_E
$\mathbf{X}, \mathbf{T}_S^N$	transformační matice reprezentující mechanické spojení profilového skeneru k přírubě robota
$\mathbf{A}_i, \mathbf{T}_{N_{i+1}}^{N_i}$	transformační matice reprezentující změnu polohy příruby
$\mathbf{B}_i, \mathbf{T}_{S_{i+1}}^{S_i}$	transformační matice reprezentující změnu polohy profilového skeneru
\mathbf{J}_i	i -tá pozice hledané trajektorie pro obrobení
\mathbf{T}_L^N	transformační matice reprezentující mechanické spojení laserové procesní hlavy k přírubě robota
\mathbf{Q}_i	vektor kloubových souřadnic robota
ξ	vektor geometrických parametrů robota
Y_i	kalibrační data
\mathbf{c}	vektor rozměrů kalibračního objektu
$\{ {}^S \mathbf{p}_j \}$	posloupnost měřených bodů profilovým skenerem
\mathbf{w}	řešení nelineární soustavy kosinových rovnic
${}^S \mathbf{P}_k$	pozice průsečíků v měřeném profilu kalibračního objektu
NoP	počet generovaných kalibračních pozic
$calPosLim_{Trans}$	translační limit v generátoru kalibračních pozic
$calPosLim_{Rot}$	rotační limit v generátoru kalibračních pozic
w_{min}^{diff}	podmínka pro řešení nelineární soustavy kosinových rovnic v generátoru kalibračních pozic

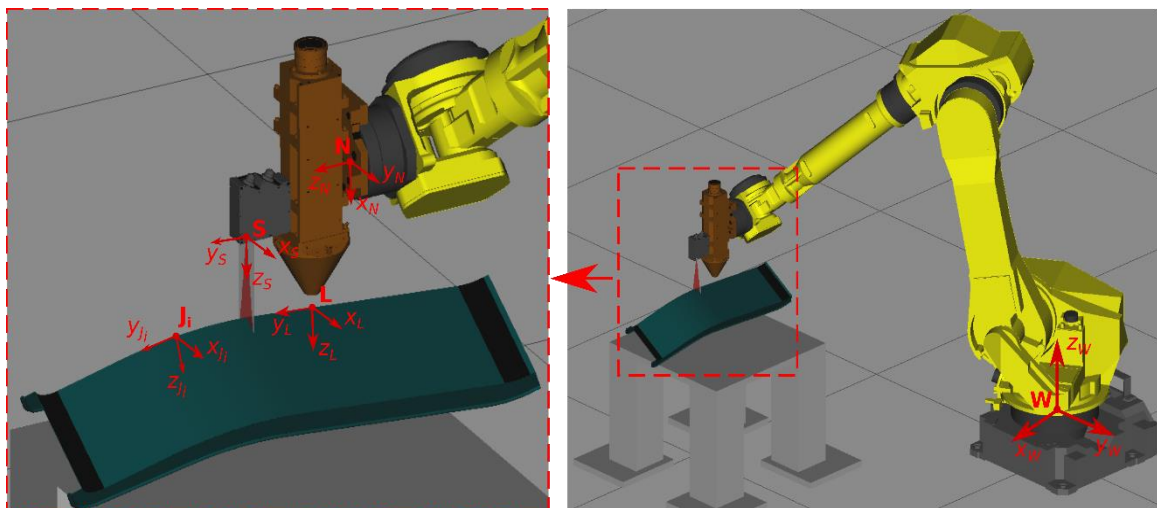
$pointsPerPlane_{min}$	limit minimálního počtu měřených bodů jednotlivých stěn kalibračního objektu v generátoru kalibračních pozic
$Slimit_{Trans}$	translační limit pro vyhodnocení pozice profilového skeneru
$Slimit_{Rot}$	rotační limit pro vyhodnocení pozice profilového skeneru
l_{max}	ukončovací podmínka pro algoritmus <i>IRHEC</i>
$NoExec$	počet provedení v simulaci
$correct_{w_i}$	korektně vyhodnocená pozice profilového skeneru z pohledu řešení nelineární soustavy kosinových rovnic
$IR_NoInputPos$	počet vstupních kalibračních pozic do algoritmu <i>IRHEC</i>
$IR_NoCorrInputPos$	počet korektních kalibračních vstupních pozic do algoritmu <i>IRHEC</i>
IR_NoIter	počet iterací algoritmu <i>IRHEC</i>
$IR_NoUsedPos$	počet finálních kalibračních pozic algoritmu <i>IRHEC</i>
$IR_NoCorrUsedPos$	počet korektních finálních kalibračních pozic algoritmu <i>IRHEC</i>
$NoSuccessExec$	počet úspěšně dokončených kalibrací v simulovaných provedeních
δ_{Trans}	translační odchylka mezi dvěma transformačními maticemi
δ_{Rot}	rotační odchylka mezi dvěma transformačními maticemi
$Q_{Trans}^{0,5}$	medián translační odchylky δ_{Trans} v simulaci označovaný jako translační přesnost kalibrace dané simulace
$Q_{Rot}^{0,5}$	medián rotační odchylky δ_{Rot} v simulaci označovaný jako rotační přesnost kalibrace dané simulace
$Q_{Trans}^{0,95}$	95 % kvantil translační odchylky δ_{Trans} v simulaci označovaný jako translační spolehlivost kalibrace dané simulace
$Q_{Rot}^{0,95}$	95 % kvantil rotační odchylky δ_{Rot} v simulaci označovaný jako rotační spolehlivost kalibrace dané simulace

1 Úvod

Dominujícím trendem v oblasti svařování je už řadu let využívání nejmodernějších robotických systémů pro automatizaci výrobního procesu vyznačující se vysokou výkonností, přesností, efektivitou a spolehlivostí. Z ekonomického hlediska je nejvýznamnější přínos těchto robotických systémů ve zvýšení produkce, jelikož automatická výroba bývá několikanásobně rychlejší než ruční. Příkladem takovéto výroby jsou roboti pro svařování karoserií v automobilovém průmyslu. Ti jsou naprogramováni na cyklické provádění činností od uchycení součásti, svařování až po odložení hotového dílu. Robot je naprogramován na určitou potřebnou sekvenci, kterou pak vykonává v řádu tisíců kusů bez velkého zásahu operátora či programátora. Časová efektivita se ovšem vytrácí v provozech, kde dochází k časté změně produkce. Trajektorie svařovací hlavy pro novou součást musí být většinou definována ručně bod po bodu (tzv. „teach and play“) specializovaným operátorem pro danou technologii. Plánovat trajektorii je možné i offline pomocí specializovaných softwarů na základě znalosti 3D modelu pracoviště a obrobků. Také zde jsou však nutné úpravy předpřipravené trajektorie přímo na reálném pracovišti. Pro komplikovanější trajektorie tak může doba přípravy dosáhnout až 90 % celkového času pro zpracování zakázky, což se vylučuje s maximálním využitím pracovní doby systému. Navíc výsledná kvalita zpracování je z velké části ovlivněna zkušenostmi obsluhy v oblasti znalosti procesu a programování trajektorie robota. Další problémy nastávají změnou trajektorie oproti původní naprogramované. Svařovaná součást může být špatně uchycena do upínacího přípravku nebo nespĺňuje přesně původní rozměry. Ke změně trajektorie může docházet i během samotného procesu, především vlivem deformace součásti vneseným teplem. I malá změna oproti původní plánované trajektorii na vzorovém obrobku může mít na proces svařování nevratné fatální následky.

Požadavky na přesnost plánování trajektorie jsou dány zvolenou technologií svařování. Pro nejčastěji využívané svařování elektrickým obloukem je vyžadována přesnost do hodnoty ± 1 milimetr. Vzhledem ke snaze zvyšovat kvalitu svařovacího procesu dochází k neustálému nárůstu využití laserové technologie. V procesní laserové hlavě se pomocí zrcátek a čoček usměrní a zaostří přivedený paprsek laseru do požadované ohniskové vzdálenosti, ve které probíhá svařování daných materiálů. Laserové svařování umožňuje dosahovat vyšších rychlostí, menšího vnesení tepla a tím pádem menších deformací spojovaných materiálů oproti klasickým technologiím. Proces je stabilnější a přináší vyšší kvalitu svarů s minimální nutností na další opracování. Navíc laserová technologie nemusí být využita pouze pro svařování, ale její uplatnění se nachází i v oblastech kalení povrchu materiálu či navařování přídavných materiálů na součásti. Na druhou stranu je vyžadována vyšší přesnost plánování trajektorie, jelikož průměr laserového spotu v ohniskové vzdálenosti se pohybuje v desetinách milimetrů v závislosti na využití technologie a kvalitě technického zpracování systému. Proto je obecně vyžadována přesnost plánování trajektorie $\pm 0,1$ milimetru pro svařování laserovou procesní hlavou.

Zmíněné požadavky na přesnost plánování trajektorie a její opakovatelnost se mohou řešit pomocí velmi přesných upínacích přípravků doplněných o polohové sensory nebo koncové spínače pro zajištění neměnné polohy součásti. Tyto přípravky ale vyžadují poměrně velké investice a jsou realizovatelné opět spíše pro sériovou výrobu daného obrobku. Lepším řešením



Obr. 1.1: Robotické pracoviště pro automatické laserové svařování pomocí profilového snímače.

problému plánování a korekce původní trajektorie jsou vyvíjené automatické naváděcí systémy pro svařování, tzv. seam tracking systémy STS. Původní motivací bylo opravdu využití těchto systému pro automatické svařování, ale v dnešní době je jejich princip využit i v dalších odvětvích jako jsou například 3D měřicí systémy nebo medicínská robotická chirurgie.

1.1 Seam tracking systém

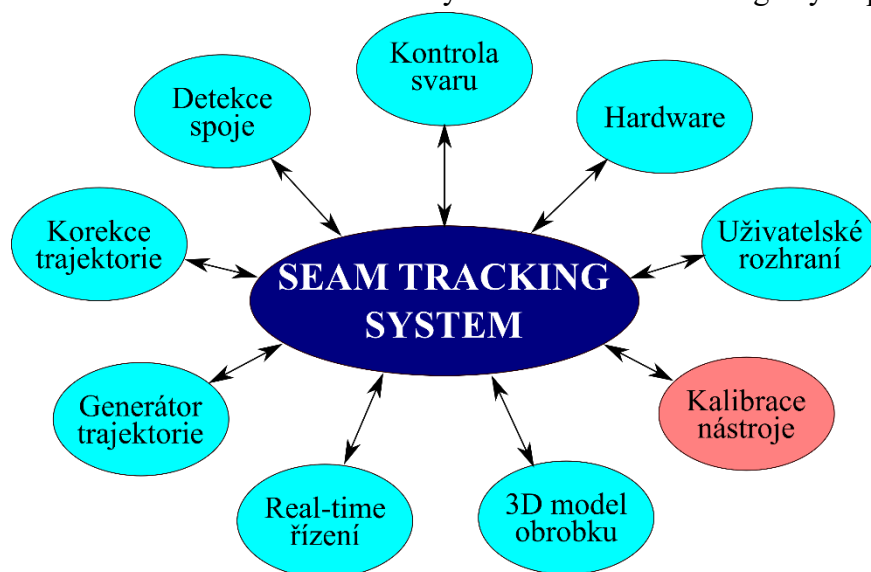
První verze naváděcích systémů se objevovaly již v devadesátých letech minulého století a jejich vývoj pokračuje dodnes Pérez et al. (2016). Jejich nasazení je stále ve většině případů uzpůsobené konkrétní úloze vzhledem k různým úskalím. Pro polohování procesní hlavou mohou být využiti portáloví roboti s výbornou absolutní přesností, ovšem neumožňují polohovat svařovací hlavu do všech šesti stupňů volnosti v prostoru (zejména rotace). Proto jsou v takovém případě použity šestiosé antropomorfní manipulátory, které se vyznačují opakovatelností pohybu v setinách milimetrů, avšak pro STS důležitá absolutní přesnost je horší, i v řádu milimetrů Abderrahim et al. (2006). K přírubě na koncovém rameni robota je přichycena procesní svařovací hlava, která se tak stává jedním z nástrojů robota. Pro automatickou detekci pozice spoje je procesní hlava doplněna jedním nebo více sensory, jež se tudíž stávají dalšími nástroji robota. U některých STS se lze setkat s odlišnou konfigurací, kde snímač je umístěn staticky v pracovním prostoru robota, ale princip systému zůstává stejný Li et al. (2016). Nejčastěji jsou využívány optické snímače pro měření povrchu obrobku a nalezení místa spoje materiálů u hledané trajektorie pro svařování.

Na obr. 1.1 je zřejmě nejvyužívanější konfigurace pro STS. Skládá se z šestiosého sériového manipulátoru se sférickým zápěstím, na jehož přírubě je umístěna svařovací procesní hlava a jako snímač je použit laserový profilový skener. Jedná se o optický snímač s aktivním viděním, jenž rozmítá laserový paprsek v měřicí rovině na povrch obrobku. Ten je snímán optickým čipem uvnitř skeneru a na základě výpočtu pomocí laserové triangulace je vracen 2D měřený profil. Každá z důležitých částí STS má přiřazen svůj pravotočivý systém souřadnic CS s místem počátku a směrovými osami x , y a z :

- CS_W – pevně umístěný souřadný systém robota v bodě **W** označovaný jako světový či bázový. Bod **W** leží na ose otáčení prvního kloubu, která zároveň představuje osu z tohoto souřadného systému.
- CS_N – souřadný systém příruby v bodě **N**, který je standardně definován uprostřed příruby robota s osou z kolmou na tuto plochu.
- CS_S – souřadný systém skeneru v bodě **S** pevně vázaný k jeho konstrukci, k němuž jsou vztažena měřená data. Měřená rovina je dána rovinou xz .
- CS_L – souřadný systém procesní hlavy v bodě **L** určuje pevnou pozici vůči hlavě, kterým musí procházet svařovaná trajektorie obrobku. Osa z se většinou definuje ve směru laserového paprsku, osa y pak ve směru pohybu svařování.
- CS_{J_i} – souřadný systém i -tého bodu **J_i** ležícího na svařované trajektorii.

Kontrolér robota generuje řízení pro své jednotlivé aktuátory za účelem sledování požadované trajektorie zvoleným nástrojem robota. Každý nástroj robota má definovaný svůj tzv. střední bod nástroje (tool center point TCP), který je počátkem jeho systému souřadnic. TCP skeneru tedy odpovídá CS_S a TCP procesní hlavy zase CS_L . Nominálním nástrojem pro robota je souřadný systém příruby CS_N , jelikož jeho vztah vzhledem ke světovému souřadnému systému CS_W je dán mechanickým uspořádáním robota z výroby. Pokud má být požadovaná trajektorie sledována jiným nástrojem, je nejprve nutné předat kontroléru informaci o poloze a natočení souřadného systému daného nástroje vzhledem k nominálnímu souřadnému systému CS_N .

Základním cílem naváděcích systémů je detekce hledané trajektorie pro svařování pomocí měřených dat snímačem, do které je následně řízen TCP procesní hlavy dle technologických požadavků. STS je možné rozdělit na několik dílčích úloh, jež musí být v systému zahrnuty, viz obr. 1.2. V první fázi je nutné správně nastavit jednotlivé hardwarové prvky STS systému včetně komunikace s řídicím softwarem naváděcího systému. Jedná se zejména o robota, snímače, procesní hlavu a další možné prvky systému jako například chladič zařízení či nadřazené bezpečnostní PLC. Nezbytnou částí řídicího softwaru je taktéž uživatelské rozhraní pro operátora s možnostmi nastavení celého systému včetně technologických požadavků na



Obr. 1.2: Struktura seam tracking systému.

proces. Důležitou úlohou je kalibrace jednotlivých nástrojů robota ve formě nalezení již zmíněného vztahu souřadného systému daného nástroje vůči nominálnímu TCP příruby. Měřená data snímačem jsou totiž vztažena k jeho souřadnému systému CS_s , ale pro možnost plánování trajektorie TCP procesní hlavy je nutné je přepočítat do společného souřadného systému, jímž je fixní světový souřadnicový systém CS_w . Na základě funkcí pro detekci spoje hledané trajektorie z měřených dat je korigována předurčená trajektorie či generována odpovídající trajektorie procesní hlavy. Naváděcí systémy mohou fungovat ve dvou režimech:

- *Offline* – v první fázi je senzorem proměřena celá oblast, kde se má nacházet spoj pro svařování. Trajektorie sensoru může být zvolena na základě známého 3D modelu obrobku nebo již operátorem předprogramované dráhy. V druhé fázi jsou tato data zpracována a využita pro generování trajektorie procesní hlavy. Někdy se pak tyto systémy nazývají „seam teaching“.
- *Online* – obě fáze probíhají paralelně. Sensor detekuje aktuální pozici spoje hledané trajektorie přímo během procesu a zároveň je vyhodnocována korekce procesní hlavy. Důležitou úlohou je zde synchronizace mezi měřenými daty v CS_s a korekcí trajektorie TCP procesní hlavy v reálném čase.

Funkce naváděcího systému mohou dále poskytnout kontrolu prováděného procesu, zda byl proveden dle nastavených technologických požadavků (výška a šířka svaru).

1.2 Hlavní cíle

Stěžejní úlohou pro požadovanou přesnost naváděcích systémů je kalibrace nástrojů robota, zejména v případě laserového svařování s požadavky na maximální chybu navádění do $\pm 0,1$ milimetru. Kontroléry dodávaných robotů jsou standardně vybavené implementovanými metodami pro kalibraci nástrojů, které jsou však relativně přesné jen pro fyzicky dostupné TCP nástroje, např. svařovací hrot TIG hořáku. Ovšem TCP optického snímače či laserové procesní hlavy fyzicky dostupný není, nachází se v určitém místě optické soustavy. Toto místo je známé pouze orientačně, a tak kalibrace optických TCP pomocí standardních metod v kontroléru robota je pouze přibližná a nevyhovující vzhledem k požadavkům na vyšší přesnost některých svařovacích systémů. Proto se pro jejich kalibraci používá tzv. *hand-eye kalibrace*, která spočívá v nalezení řešení homogenní transformační maticové rovnice $\mathbf{AX} = \mathbf{XB}$ pro hledaný vzájemný vztah příruby a snímače \mathbf{X} na základě změn polohy příruby \mathbf{A} a změn polohy snímače \mathbf{B} . Naprostá většina publikací ohledně hand-eye kalibrace se věnuje různým matematickým přístupům k nalezení řešení této rovnice. Ověření přesnosti těchto metod pak probíhá přidáním náhodně přidaného šumu ke změnám polohy \mathbf{A} a \mathbf{B} nebo pomocí jen obecně popsanych postupů kalibrace na reálných naváděcích systémech.

Autor této práce se věnuje v rámci aktivit týmu DiagEn na Katedře Kybernetiky FAV ZČU vývoji naváděcích systémů ve spolupráci s firmou LaserTherm s.r.o., která se zabývá robotickým laserovým svařováním. Autorovi této práce se nepodařilo ověřit či replikovat v literatuře publikované výsledky v simulačních ani v reálných experimentech kalibrace STS s laserovým profilovým skenerem, které jsou využívány v naváděcích systémech vyvíjených s firmou LaserTherm s.r.o. Došel tak k poznání, že pro zajištění požadované přesnosti kalibrace nástroje je nutné analyzovat a řešit celý proces kalibrace s ohledem na konkrétní konfiguraci

STS, a ne se zaměřit především na volbu konkrétního matematického řešení rovnice hand-eye kalibrace, jak by se mohlo z rešerše této oblasti zdát. Cíle této práce jsou shrnuty do následujících bodů:

- Návrh obecného postupu pro hand-eye kalibraci optického nástroje robota založeného na modelu celého kalibračního procesu.
- Navržený postup ověřit při kalibraci profilového skeneru jako nástroje robota se zvoleným kalibračním objektem. Ověření se bude skládat z těchto kroků:
 - Vytvoření modelu kalibračního procesu.
 - Analýza modelu kalibračního procesu. Optimalizace vnitřních algoritmů modelu.
 - Návrh optimálních parametrů modelu kalibračního procesu pro generování kalibračních pozic a optimálních parametrů pro následné zpracování kalibračních dat.
 - Analyzovat vliv absolutní chyby polohování robota na přesnost a využitelnost navrženého postupu.
 - Experimentální ověření v reálných úlohách firmy LaserTherm s.r.o.

1.3 Struktura práce

V první části práce se autor věnuje formulaci problému hand-eye kalibrace včetně rešerše aktuálního stavu. Na základě představené problematiky pak formuluje konkrétní cíle této práce. V kapitole 3 je popsán navržený postup pro kalibraci optických snímačů jako nástroje robota na základě vytvoření modelu celého kalibračního procesu. Tento model kalibračního procesu je v kapitole 4 podrobně představen a popsán pro optický snímač v podobě profilového skeneru, který je v STS využíván nejčastěji. V kapitole 5 je představený model kalibračního procesu analyzován a jsou navrženy optimální parametry pro generování kalibračních pozic a optimální parametry pro zpracování kalibračních dat. Vzhledem k plánovanému využití navrženého postupu se sériově vyráběnými manipulátory je v kapitole 6 analyzován vliv absolutní chyby robota na kalibraci profilového skeneru jako nástroje robota. V kapitole 7 je nakonec představen autorem vyvinutý software CogniGuide pro řízení STS a využití navrženého postupu pro kalibraci profilového skeneru v reálných STS.

2 Formulace problému hand-eye kalibrace nástroje robota

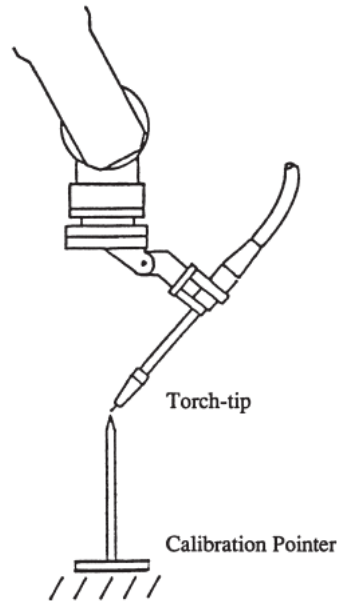
Cílem STS je pomocí snímače detekovat hledanou trajektorii v jeho souřadném systému CS_S , přenést tuto informaci do společného pevného souřadnicového systému CS_W naváděcího systému a dle této polohy následně řídit pohyb procesní hlavy daný jejím TCP umístěným v CS_L , viz obr. 1.1. Důležitým nástrojem pro reprezentaci polohy je transformační matice $\mathbf{T}_{CS_2}^{CS_1}$ udávající natočení a posun souřadného systému CS_L vzhledem k souřadnému systému CS_2 . Detailnější popis reprezentace polohy je k nahlédnutí v příloze A. Skládání po sobě jdoucích transformací představuje násobení jejich transformačních matic. Lze tak definovat následující dvě rovnice

$$\mathbf{T}_{J_i}^W = \mathbf{T}_{N_i}^W \cdot \mathbf{T}_S^N \cdot \mathbf{T}_{J_i}^{S_i}, \quad (2.1)$$

$$\mathbf{T}_{J_i}^W = \mathbf{T}_{L_j}^W = \mathbf{T}_{N_j}^W \cdot \mathbf{T}_L^N. \quad (2.2)$$

Rovnice (2.1) představuje fázi detekce polohy i -tého bodu \mathbf{J}_i hledané trajektorie a její přepočítání do pevného souřadnicového systému CS_W daný transformační maticí $\mathbf{T}_{J_i}^W$. Ta je napočtena pomocí známé polohy příruby $\mathbf{T}_{N_i}^W$ z kontroléru robota, fixní matice \mathbf{T}_S^N určené kalibrací snímače jako nástroje robota a nalezené pozice \mathbf{J}_i z měřených dat snímačem reprezentované maticí $\mathbf{T}_{J_i}^{S_i}$. Rovnice (2.2) určuje druhou fázi STS, kdy je potřebné naplánovat trajektorii TCP procesní hlavy. Zjednodušeně by pozice \mathbf{L}_j procesní hlavy podél její trajektorie měly kopírovat nalezené pozice \mathbf{J}_i . Polohování robota je pak řízeno do těchto pozic dle jeho vnitřních algoritmů pro polohování příruby $\mathbf{T}_{N_j}^W$ s ohledem na pevně danou transformační maticí \mathbf{T}_L^N z kalibrace TCP procesní hlavy jako nástroje robota.

Každá z uvedených transformačních matic obsahuje chyby způsobené mechanickými nepřesnostmi při výrobě, výpočetními chybami nebo chybami měření, o kterých bude diskutováno v dalším textu. Při pohledu na rovnici (2.1) je vidět přímý vliv přesnosti kalibrace snímače jako nástroje robota na přesnost celého naváděcího systému. Vzájemný vztah mezi TCP snímače a TCP příruby robota je dán konstantní transformační maticí \mathbf{T}_S^N , která je určena konkrétním mechanickým spojením těchto částí. Parametry hledané transformační matice mohou být určeny konstrukčními výkresy nástroje, což ale klade vysoké nároky na přesnost výroby a přesné uchycení nástroje k přírubě. Pro kalibraci nástroje je možné využít také standardních metod dostupných v kontroléru robota již od výrobce. Pro přesnou kalibraci je nutnou podmínkou fyzicky hmatatelný TCP nástroje. Metody jsou založené na najíždění TCP nástroje k pevnému bodu (většinou hrotu) v souřadném systému robota s různým natočením (obr. 2.1). Z těchto pozic je nalezena translační část transformační matice a definováním dvou souřadnicových os (xy , xz nebo zy) pomocí předepsaného pohybu je určena také rotační část transformační matice. TCP optických nástrojů robota (například uchycená kamera k přírubě) je známý pouze orientačně, protože se nachází v určitém místě jeho optické soustavy. Proto kalibrace výše uvedeným způsobem je pouze přibližná a může sloužit pro úlohy s nižšími nároky na přesnost navádění či jako počáteční odhad pro přesnější proces kalibrace těchto typů nástrojů v literatuře označovaný jako hand-eye kalibrace.



Obr. 2.1: Princip standardních metod pro kalibraci TCP nástroje robota implementovaných v kontroléru robota (Nayak a Ray, 1993).

2.1 Stávající stav hand-eye kalibrace

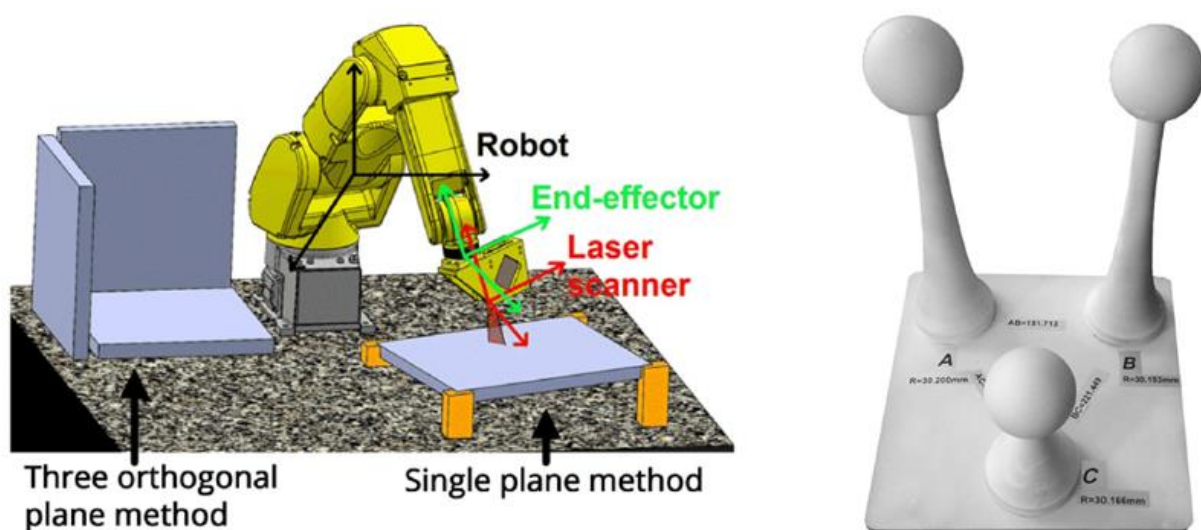
Obecně udávaná rovnice hand-eye kalibrace

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{X} \cdot \mathbf{B}, \quad (2.3)$$

je složená z homogenních transformačních matic. Transformační matice \mathbf{A} definuje změnu polohy souřadného systému příruby. Matice \mathbf{B} potom změnu polohy souřadného systému sensoru vyvolanou daným pohybem příruby. Hledaná transformační matice \mathbf{X} je konstantní transformační matice popisující pozici souřadného systému sensoru v souřadném systému příruby. Tento vztah je pevně dán mechanickým spojením snímače na přírubě robota. Rovnici hand-eye kalibrace lze řešit obecně dle Gantmacher (1959). Vzhledem ke specifickému významu transformačních matic není ale nutné řešit tuto rovnici takto složitě. Pokud bude uvažována rovnice bez jakýchkoliv chyb, je rovnice řešitelná algebraicky pomocí dvou změn polohy $(\mathbf{A}_1^*, \mathbf{B}_1^*)$ a $(\mathbf{A}_2^*, \mathbf{B}_2^*)$, viz Shiu a Ahmad (1987). Nutnými podmínkami pro toto řešení jsou nerovnoběžné osy otáčení a úhel otočení se nesmí rovnat 0° nebo 180° . Stejný problém následně řešili Chou a Kamel (1988) s využitím kvaternionů, což je rozšířený obor komplexních čísel podrobněji popsány v příloze A.3. V dalších pracích věnujících se řešení této kalibrace byly tyto postupy rozšiřovány a byly do nich zahrnovány metody eliminující přítomnosti šumu, zejména pomocí metody nejmenších čtverců (Shiu a Ahmad, 1989; Tsai a Lenz, 1989; Chou a Kamel, 1991; Zhuang a Shiu, 1993; Park a Martin, 1994; Lu et al., 1996). Zmíněná literatura popisuje matematické vztahy, které jsou ověřovány převážně simulačně. Změna polohy sensoru reprezentovaná maticí \mathbf{B} v rovnici (2.3) je nejčastěji měřena vůči pevně umístěnému kalibračnímu objektu, viz obr. 2.2. V případě kamer se používá většinou objekt s rovnou plochou a známým kontrastním vzorem jako je například šachovnice (Wei et al., 1998; Fan et al., 2016; Heller et al., 2016). Nejvíce využívaným senzorem pro úlohu seam tracking je laserový profilový snímač poskytující informaci ve 2D prostoru. Proto se změna polohy souřadného systému sensoru v matici \mathbf{B} neměří jen pomocí rozpoznávání definovaného vzoru

na kalibračním objektu, nýbrž častěji na základě jeho specifické geometrie. Nayak a Ray (1994) definovali souřadnicové systémy profilového sensoru a svařovací hlavy včetně postupu pro jejich kalibraci pomocí pevně umístěného fyzického hrotu. Huissoon (2002) představil kalibrační objekt se čtyřmi reprezentujícími hranami, podle nichž je určena transformační matice mezi senzorem a přírubou robota. Přidáním vhodně umístěného CCD čipu pro snímání pilotu laserové procesní hlavy ke kalibračnímu objektu pak je určen vztah mezi TCP sensoru a laserové hlavy s přesností $\pm 0,2$ mm. Podobný přístup využil ve své disertaci de Graaf (2007), ve které jsou popsány samostatné postupy pro určení transformačních vztahů mezi přírubou a senzorem, respektive laserovou hlavou. Ty ovšem nedosahují dostatečné přesnosti pro laserové svařování, takže je vytvořen kalibrační objekt spojující oba postupy, který umožní nalézt vztah přímo mezi nástroji s přesností $\pm 0,1$ mm. Na jeho práci navázal svojí disertací Iakovou (2009), jenž vyvinul sensor s třemi promítanými paprsky, které vytváří trojúhelník kolem laserového spotu, čemuž musela být přizpůsobena i kalibrace tohoto sensoru.

Přesnosti měření s odchylkou 0,062 mm se podařilo dosáhnout po kalibraci v práci Ren et al. (2012), kteří využili jako kalibrační těleso kulovou plochu. Ta je jako kalibrační objekt zvolena i v dalších publikacích (Xu et al., 2016; Mu et al., 2017; Xie et al., 2019). Místo koule použili Chen et al. (2018) disk pro kalibraci profilového snímače. Navržený algoritmus porovnal s algoritmy využívající kouli a dle výsledků jsou oba přístupy porovnatelné. Carlson et al. (2015) kalibrovali optický snímač pomocí sběru dat z několika rovin, které nebyly paralelní. Iterativním algoritmem byl hledán transformační vztah mezi přírubou a senzorem, jenž se snažil co nejlépe proložit roviny skrze nasbíraná mračna bodů pomocí analýzy hlavních komponent (Principal Component Analysis, PCA). Na tuto práci navázali Sharifzadeh et al. (2020), kteří zredukovali kalibrační objekt na jednu rovinu pomocí výběru optimálních pozic, odkud má být kalibrační objekt snímán senzorem. Podobné i odlišné přístupy pro kalibraci profilových sensorů nabízí některé další práce (Borangiu et al., 2009; Heikkilä et al., 2014; Wagner et al., 2015). Během let vzniklo také velké množství článků shrnující postupy řešení rovnice hand-



Obr. 2.2: Ukázka kalibračních objektů. Vlevo kalibrační objekt je dán jednou nebo třemi rovnými plochami - Sharifzadeh et al. (2020), vpravo je kalibrační objekt složený ze třech koulí s různým průměrem a pozicí - Mu et al. (2017).

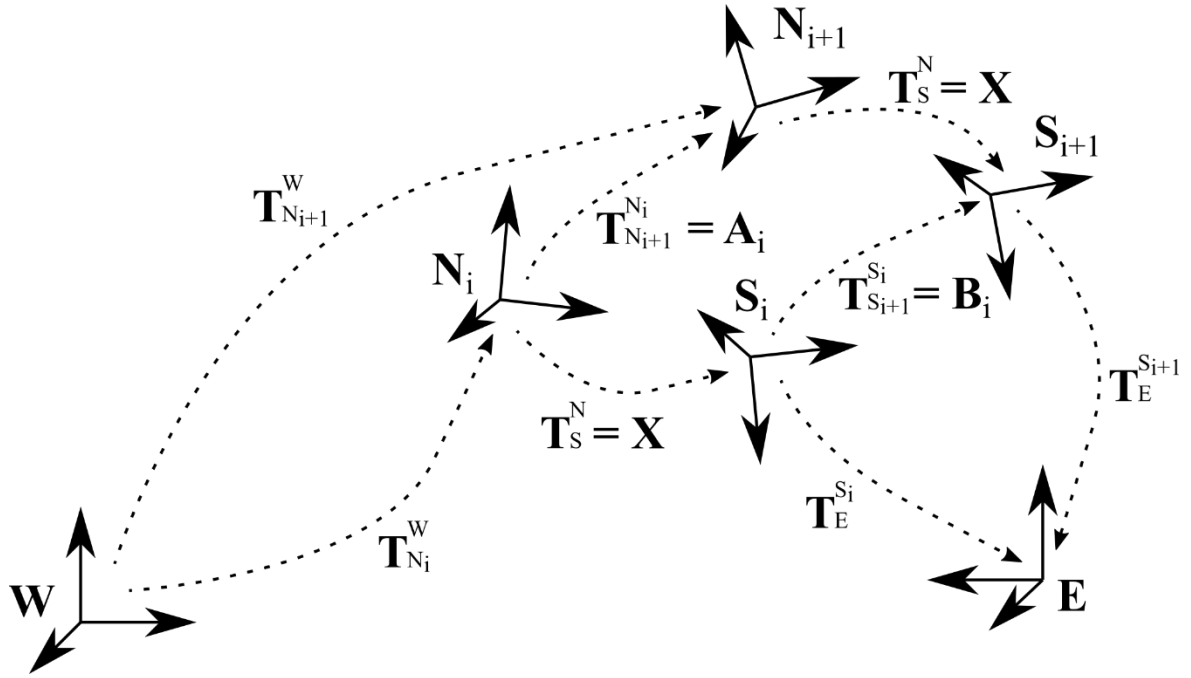
eye kalibrace, z nichž lze vycházet při výběru vhodné metody pro konkrétní úlohu (Shah et al., 2012; Pérez et al., 2016; Ali et al., 2019).

Přesnost hand-eye kalibrace je závislá na přesnosti určení matic \mathbf{A} a \mathbf{B} v rovnici (2.3). Matice \mathbf{B} je ovlivněna především chybou vlastního měření sensoru, jenž musí být sám o sobě také kalibrován dle daného principu, a chybou vyhodnocení tohoto měření. Přesnost matice \mathbf{A} je dána přesností polohování koncového efektoru (zpravidla příruba) robotem. Je nutné rozlišovat vlastnosti opakovatelnosti pohybu a absolutní přesnosti pohybu robota, respektive interpretace polohy koncového efektoru v jeho básovém souřadnicovém systému CS_W (Abderrahim et al., 2006; Dombre a Khalil, 2010). Ta je závislá na přesném určení geometrického modelu robota. Při výrobě jednotlivých částí robota a jejich sesazení však dochází k odchylkám od nominálního modelu. Yin et al. (2013) kromě samotné kalibrace laserového profilometru pomocí kulového objektu jako kalibrační těleso představili i metodu pro kalibraci geometrického modelu robota jen z dat uchyceného snímače. Díky tomu se jim v experimentu povedlo redukovat průměrnou chybu měření na 0,069 mm. Podobný přístup aplikovali také Xie et al. (2019) s jejich modifikovaným Denavit-Hartenbergovým geometrickým modelem robota. Na základě vzdálenostního chybového modelu měřicího systému (26 parametrů) zahrnujícího kinematické chyby robota a chyby matice \mathbf{X} byla algoritmem Mu et al. (2017) dosažena průměrná přesnost měření 0,216 mm a 0,044°. Pro upřesnění geometrických modelů robota využívají další práce také kalibrovaného snímače jako nástroje robota spolu s implementací Kalmanova filtru (Park et al., 2012; Du et al., 2013, 2015). Princip hand-eye kalibrace může být využit také pro kalibraci vzájemné polohy mezi spolupracujícími roboty Wu et al. (2016).

Výše uvedené publikace o hand-eye kalibraci jsou především z oblastí svařování, obrábění součástí nebo 3D měření, kde je využívána nejčastěji. Postupně ale přechází do dalších odvětví. Za zmínku s ohledem na budoucnost stojí především nasazení v oblasti medicíny, i když publikované přesnosti ve velké většině nevyhovují požadavkům na přesnost v mezích desetin milimetru. Jedním z důvodů může být, že tyto systémy jsou s ohledem na bezpečnost stále více či méně řízeny lidským odborníkem, viz chirurgičtí roboti. Avšak pro chirurgické operace za asistence robotů je také velmi důležitá kalibrace jeho nástrojů jako je například endoskop (Lai et al., 2018; Pachtrachai et al., 2016, 2018, 2019). Přesnost systému pro vytváření virtuální reality na pomoc při ortopedických operacích vylepšili pomocí hand-eye kalibrace de Oliveira et al. (2019). Tan et al. (2018) zkoumali možnosti pro kalibraci jednotlivých robotických prstů.

2.2 Princip hand-eye kalibrace

Hand-eye kalibrace je využívána především při kalibraci optických nástrojů robota. Její princip je zobrazen na obr. 2.3. Základem je vhodně navržený kalibrační objekt dle daného principu měření snímače, jenž je pevně umístěn do pracovního prostoru robota a je mu přiřazen souřadný systém CS_E v bodě \mathbf{E} , který se vzhledem k CS_W nemění. Během kalibrace je snímač polohován do různých pozic tak, aby se v každé nacházel kalibrační objekt v jeho měřicím rozsahu. Tedy pozice \mathbf{W} a \mathbf{E} jsou neměnné, zatímco pozice \mathbf{N}_i a \mathbf{S}_i se mění s každou kalibrační pozicí. Zároveň se také nemění vzájemná transformace \mathbf{X} mezi přírubou a snímačem, jelikož je pevně dána mechanickou konstrukcí. Náhradou kalibračního objektu může být externí snímač pro měření změny polohy uchyceného snímače Lai et al. (2018), princip kalibrace je však stále stejný.



Obr. 2.3: Princip hand-eye kalibrace s kalibračním objektem.

Uvedenou rovnici (2.3) hand-eye kalibrace lze přepsat do popisu pomocí transformačních matic $\mathbf{T}_{CS_2}^{CS_1}$ dle schématu na obr. 2.3 jako

$$\mathbf{T}_{N_{i+1}}^{N_i} \mathbf{T}_S^N = \mathbf{T}_S^N \mathbf{T}_{S_{i+1}}^{S_i}, \quad (2.4)$$

kde \mathbf{T}_S^N představuje hledanou konstantní transformační matici mezi přírubou robota a nástrojem, v tomto případě senzorem. Matice $\mathbf{T}_{N_{i+1}}^{N_i}$ vyjadřuje změnu polohy příruby, jež je většinou dopočitatelná skrze její udávanou polohu kontrolérem robota v jednotlivých kalibračních pozicích

$$\mathbf{A}_i = \mathbf{T}_{N_{i+1}}^{N_i} = \left(\mathbf{T}_{N_i}^W \right)^{-1} \mathbf{T}_{N_{i+1}}^W. \quad (2.5)$$

Matice $\mathbf{T}_{S_{i+1}}^{S_i}$ je změna polohy nástroje. Ta se nejčastěji určuje pomocí vyhodnocených měřených dat kalibračního objektu v jeho pevném CS_E

$$\mathbf{B}_i = \mathbf{T}_{S_{i+1}}^{S_i} = \mathbf{T}_E^{S_i} \left(\mathbf{T}_E^{S_{i+1}} \right)^{-1}. \quad (2.6)$$

Během formulace úlohy v této kapitole bude využito obecné značení z rovnice (2.3), zatímco v následujících kapitolách budou již využity zápisy transformačních matic s horním i dolním indexem $\mathbf{T}_{CS_2}^{CS_1}$.

2.2.1 Řešení rovnice hand-eye kalibrace

Jak již bylo v textu uvedeno, pro homogenní transformační rovnici (2.3) existuje algebraické řešení Shiu a Ahmad (1987), které vyžaduje tři kalibrační pozice, tedy dvě změny polohy $(\mathbf{A}_1^*, \mathbf{B}_1^*)$ a $(\mathbf{A}_2^*, \mathbf{B}_2^*)$. Ve skutečnosti jsou ale matice \mathbf{A}_i i \mathbf{B}_i ovlivněny různými zdroji chyb během kalibračního procesu

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{X} = (\mathbf{A}^* + \Delta\mathbf{A})\mathbf{X} = \mathbf{X}(\mathbf{B}^* + \Delta\mathbf{B}) = \mathbf{X} \cdot \mathbf{B}, \quad (2.7)$$

kde proměnné se symboly * označují skutečné hodnoty a symboly Δ chyby. Proto není možné nalézt algebraické řešení, ale je nutné provést větší počet změn poloh a řešení transformační matice \mathbf{X} hledat pomocí minimalizace zvoleného kritéria, např.

$$\eta = \min_{\mathbf{X}} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{A}_i \cdot \mathbf{X} - \mathbf{X} \cdot \mathbf{B}_i\|^2 = \min_{\mathbf{X}} \sum_{i=1}^n \|\varepsilon_i\|^2. \quad (2.8)$$

Nalezené řešení bude také obecně obsahovat určitou chybu

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}^* + \Delta\mathbf{X}. \quad (2.9)$$

Existuje více způsobů, jak danou minimalizaci řešit. Nejčastějším způsobem je rozepsat transformační matice v rovnici (2.3) na jejich rotační matice \mathbf{R} a translační vektory \mathbf{P}

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_A & \mathbf{P}_A \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_X & \mathbf{P}_X \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_X & \mathbf{P}_X \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_B & \mathbf{P}_B \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.10)$$

Roznásobením levé a pravé strany rovnice vzniknou dvě samostatné rovnice

$$\mathbf{R}_A \mathbf{R}_X = \mathbf{R}_X \mathbf{R}_B, \quad (2.11)$$

$$\mathbf{R}_A \mathbf{P}_X + \mathbf{P}_A = \mathbf{R}_X \mathbf{P}_B + \mathbf{P}_X. \quad (2.12)$$

V první fázi se pak dle zvoleného kritéria hledá řešení matice \mathbf{R}_X v rotační rovnici (2.11). Popis rotace pomocí obecné osy rotace a úhlu otočení využili pro minimalizační kritérium Tsai a Lenz (1989). Zhuang a Roth (1993) navrhli kritérium na základě reprezentace transformace kvaterniony. Teorie Lieových grup je zakomponována v práci Park a Martin (1994). Vypočtená matice \mathbf{R}_X je následně použita při řešení translační rovnice (2.12) jejím přepsáním do tvaru

$$\begin{aligned} (\mathbf{R}_A - \mathbf{I})\mathbf{P}_X &= \mathbf{R}_X \mathbf{P}_B - \mathbf{P}_A \\ \mathbf{M} \cdot \mathbf{P}_X &= \mathbf{m} \end{aligned} \quad (2.13)$$

a vyřešením pomocí metody nejmenších čtverců

$$\hat{\mathbf{P}}_X = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \mathbf{m}. \quad (2.14)$$

za předpokladu regulární matice $(\mathbf{M}^T \mathbf{M})$. Nevýhodou těchto algoritmů je propagace chyby při výpočtu matice \mathbf{R}_X do výpočtu translačního vektoru \mathbf{P}_X . Existují však i jednokrokové algoritmy, které všechny hledané parametry transformační matice \mathbf{X} řeší najednou Zhuang a Shiu (1993).

Uvedené i neuvedené algoritmy řeší způsob nalezení řešení \mathbf{X} na základě zvoleného matematického aparátu. Malá pozornost je ale věnována transformačním maticím \mathbf{A}_i a \mathbf{B}_i vstupujícím do výpočtu rovnice hand-eye kalibrace. Přitom velikosti jednotlivých chyb $\Delta\mathbf{A}$ a $\Delta\mathbf{B}$ jsou kromě jiného zásadně závislé na konkrétních kalibračních pozicích, ve kterých je snímán kalibrační objekt.

2.2.2 Transformační matice \mathbf{A}

Jak již bylo zmíněno, informace o změně polohy příruby je získávána pomocí hodnot z kontroléru robota, který využívá pro řízení polohy příruby přímý geometrický model robota (Direct Geometric Model DGM). Geometrické parametry jsou určeny na základě zvoleného

modelu a daného mechanického uspořádání ramen a kloubů (rotační nebo prismatický) robota Siciliano a Sciavicco (2000). Nejčastěji je využíván model dle Denavit-Hartenbergovy úmluvy (DH parametry). Pozice příruby \mathbf{N}_i je tak kontrolérem robota počítána jako

$$\mathbf{N}_i = \mathbf{N}_i^* + \Delta\mathbf{N}_i = f_{DGM}(\mathbf{Q}_i, \boldsymbol{\xi}) = f_{DGM}(\mathbf{Q}_i^* + \Delta\mathbf{Q}_i, \boldsymbol{\xi}^* + \Delta\boldsymbol{\xi}), \quad (2.15)$$

kde \mathbf{Q}_i je vstupující vektor kloubových souřadnic a $\boldsymbol{\xi}$ vektor konstantních geometrických parametrů použitého geometrického modelu robota. Oba vektory mohou mít svoji určitou chybu, kvůli kterým pak pozice příruby čtená z kontroléru robota neodpovídá realitě. Zde je vhodné upozornit na rozdíl mezi opakovatelností a absolutní přesností robota Abderrahim et al. (2006). Dostupné hodnoty opakovatelnosti od výrobce udávají schopnost robota najet opakovaně zvoleným TCP nástroje do stejného bodu s chybou v setinách milimetru. Ovšem z pohledu hand-eye kalibrace je důležitá absolutní přesnost polohy TCP nástroje vzhledem k bázovému souřadnému systému robota CS_W , kde se chyba může pohybovat v řádech jednotek milimetrů. Velkou měrou se na tom podílí chyba geometrického modelu robota $\Delta\boldsymbol{\xi}$ daná výrobními odchylkami jednotlivých ramen a sesazením celého robota (nedodržení vzájemné polohy souřadných systémů aktuátorů). Chyba polohování robota se pak v některých publikacích zjednodušuje právě na chybu geometrického modelu jako v rovnici (2.15). Dalšími faktory ovlivňující absolutní chybu robota jsou například pružnost ramen, hmotnost osazených nástrojů k přírubě, přesnost aktuátorů, vůle a excentricita převodovek (vlivem opotřebení robota ve výrobě) apod. Zakomponovat jejich projevy do modelu je již obtížnější a závislé také na konkrétním robotu. Při předpokládání jen chyby geometrického modelu robota lze psát změnu pozice příruby \mathbf{A}_i v následujícím tvaru

$$\mathbf{A}_i = \mathbf{A}_i^* + \Delta\mathbf{A}_i = \mathbf{A}_i^{DGM}(\mathbf{N}_i, \mathbf{N}_{i+1}) = \mathbf{A}_i^{DGM}\left(f_{DGM}(\mathbf{Q}_i^* + \Delta\mathbf{Q}_i, \boldsymbol{\xi}^* + \Delta\boldsymbol{\xi}), f_{DGM}(\mathbf{Q}_{i+1}^* + \Delta\mathbf{Q}_{i+1}, \boldsymbol{\xi}^* + \Delta\boldsymbol{\xi})\right). \quad (2.16)$$

Jak je vidět z rovnice (2.16), změnu pozice příruby \mathbf{A}_i lze jednoznačně vypočítat pomocí známých kloubových souřadnic seskupených do vektorů \mathbf{Q}_i a \mathbf{Q}_{i+1} při změně polohy příruby z pozice \mathbf{N}_i do \mathbf{N}_{i+1} a pomocí konstantních geometrických parametrů $\boldsymbol{\xi}$. Důležitým faktem je rozdílná hodnota chyby $\Delta\mathbf{A}_i$ při stejných odchylkách $\Delta\boldsymbol{\xi}$ pro různé změny pozice z bodu \mathbf{N}_i do \mathbf{N}_{i+1} . To znamená, že konstantní chyba geometrických parametrů $\Delta\boldsymbol{\xi}$ se projevuje rozdílně v různých částech pracovního prostoru robota. Vytvořený model chyby se pak může využít během řešení hand-eye kalibrace i k nalezení konstantních geometrických odchylek $\Delta\boldsymbol{\xi}$ a dalších případných parametrů pomocí vhodně navrženého kritéria (Mu et al., 2017; Xie et al., 2019).

2.2.3 Transformační matice B

Změna pozice souřadného systému snímače je vypočtena na základě měřených dat kalibračního objektu v pozicích \mathbf{S}_i a \mathbf{S}_{i+1} . Je vhodné upozornit, že kromě měřených dat stačí pro výpočet jen znalost kalibračního objektu a případných počátečních odhadů. Není ale vyžadována znalost jakékoli informace od robota. Algoritmus pro získání transformační matice mezi snímačem a kalibračním objektem je navržen dle konkrétního typu snímače (profilový snímač, kamera apod.) a zvoleného kalibračního objektu. Některé kombinace snímače a kalibračního objektu umožňují výpočet pouze vzájemné translační polohy v každé kalibrační pozici Ren et al.

(2012), některé polohu včetně rotace de Graaf (2007). Získaná měřená data Y_i ze snímače jsou napočtena algoritmem uvnitř snímače dle jeho měřicího principu

$$Y_i = Y_i^* + \Delta Y_i = f_{MP}(\mathbf{S}_i^*, \mathbf{c}^*, \boldsymbol{\sigma}_S) \quad (2.17)$$

na základě konkrétní skutečné pozice snímače \mathbf{S}_i^* vzhledem ke kalibračnímu objektu, parametrech kalibračního objektu daných vektorem \mathbf{c}^* a vektorem $\boldsymbol{\sigma}_S$ definujícího chybu snímače danou jeho konstrukcí jako například rozlišení osazeného kamerového čipu. Chyba měřených dat ΔY_i se promítne do následného určení pozice \mathbf{S}_i vyhodnocením měřených dat

$$\mathbf{S}_i = \mathbf{S}_i^* + \Delta \mathbf{S}_i = f_{ME}(Y_i, \mathbf{c}, \mathbf{p}_{ME}, {}^0\mathbf{g}_{ME_i}) = f_{ME}(f_{MP}(\mathbf{S}_i^*, \mathbf{c}^*, \boldsymbol{\sigma}_S), \mathbf{c}, \mathbf{p}_{ME}, {}^0\mathbf{g}_{ME_i}) \quad (2.18)$$

Algoritmus f_{ME} kromě měřených dat Y_i vyžaduje ještě tyto vstupy:

- \mathbf{c} – očekávané parametry kalibračního objektu, které však nemusí odpovídat skutečnosti $\mathbf{c} = \mathbf{c}^* + \Delta \mathbf{c}$.
- \mathbf{p}_{ME} - vektor nastavitelných parametrů pro vyhodnocení.
- ${}^0\mathbf{g}_{ME_i}$ - případné počáteční odhady pro algoritmus.

Opět je vhodné si povšimnout, že chyba $\Delta \mathbf{S}_i$ vypočtené pozice \mathbf{S}_i je kromě jiného závislá na konkrétní pozici \mathbf{S}_i^* během měření dat Y_i . Změnu pozice snímače lze pak definovat jako

$$\mathbf{B}_i = \mathbf{B}_i^* + \Delta \mathbf{B}_i = \mathbf{B}_i^{ME}(\mathbf{S}_i, \mathbf{S}_{i+1}) = \mathbf{B}_i^{ME}\left(f_{ME}(Y_i, \mathbf{c}, \mathbf{p}_{ME}, {}^0\mathbf{g}_{ME_i}), f_{ME}(Y_{i+1}, \mathbf{c}, \mathbf{p}_{ME}, {}^0\mathbf{g}_{ME_{i+1}})\right) \quad (2.19)$$

Chyba změny pozice snímače $\Delta \mathbf{B}_i$ je tak závislá na měřených datech Y_i v konkrétních kalibračních pozicích \mathbf{S}_i^* , na parametrech chyb snímače $\boldsymbol{\sigma}_S$, na kalibračním objektu \mathbf{c} a na parametrech \mathbf{p}_{ME} vyhodnocovacího algoritmu.

2.3 Formulace úlohy

Jak je vidět z rešerše v podkapitole 2.1, oblast hand-eye kalibrace je hojně zkoumána již řadu let. Většina prací se zabývá rozdílným přístupem k řešení rovnice hand-eye kalibrace (2.3) teoreticky či v návaznosti na konkrétní STS. Ověření těchto metod pak probíhá zejména simulačně za pomoci náhodně přidaného šumu do transformačních matic \mathbf{A}_i a \mathbf{B}_i . Jak ale vyplývá z analýzy matic \mathbf{A} a \mathbf{B} v předchozí podkapitole, přístup s generováním náhodné chyby je minimálně zavádějící pro následně uváděné výsledky přesnosti s ohledem na využití v reálném provozu. Dalším překvapivým faktem je malý počet změn poloh příruby a snímače (většina od pěti do dvaceti), které autoři vědeckých publikací využívají k následnému řešení. Přitom větší počet změn polohy by standardně měl redukovat vnesené chyby z jednotlivých zdrojů lépe, což alespoň některé publikace v posledních letech berou v potaz Chen et al. (2018). Autorovi této práce je pak známá jediná publikace, která by se kromě řešení rovnice hand-eye kalibrace (2.3) zaměřila i na optimalizaci kalibrační pozice snímače vůči kalibračnímu objektu. Jedná se o publikovaný článek Sharifzadeh et al. (2020), kde se autoři zaměřují pro konkrétní STS na optimalizaci poloh kalibračních pozic a jejich počtu s využitím kalibračního objektu v podobě roviny.

Cílem autora této práce je obecně analyzovat celý proces kalibrace nástroje robota, který bude kromě vybrané metody pro řešení rovnice hand-eye kalibrace brát v potaz také jednotlivé změny poloh v transformačních maticích \mathbf{A}_i a \mathbf{B}_i . Ty jsou totiž ovlivněny mnoha faktory, viz rovnice (2.16) a (2.19). Pro zajištění dostatečné přesnosti kalibrace tak výběr kalibračních pozic musí být plánovaný s ohledem na použitého robota, snímač, kalibrační objekt, způsob vyhodnocení měřených dat a volby minimalizačního kritéria pro řešení rovnice hand-eye kalibrace. Všechny tyto části dohromady tvoří **model procesu kalibrace nástroje pomocí hand-eye kalibrace**. Autor práce v první řadě uvede navržený zobecněný postup pro kalibraci nástroje robota založený na tomto modelu.

Dále s ohledem na spolupráci při vývoji naváděcích systémů s firmou LaserTherm s.r.o. bude navržený postup aplikován a ověřen cíleně na kalibraci profilového skeneru jako nástroje robota. Tvar kalibračního objektu v podobě seříznutého kvádrů je převzat z práce de Graaf (2007), jelikož umožňuje z 2D měřených dat v každé pozici určit vzájemnou polohu včetně rotace mezi snímačem a kalibračním objektem. Autor této práce upravil vyhodnocení vzájemné pozice oproti původní práci s cílem vyšší přesnosti a robustnosti. Důležitými výsledky autora této práce pak budou doporučená nastavení pro kalibraci profilového skeneru jako nástroje robota z pohledu minimalizace chyb matic \mathbf{B}_i . Jedná se zejména o parametry generátoru kalibračních pozic a parametry následného vyhodnocení dat. Chyby matice \mathbf{A}_i budou v této fázi simulovány dle standardně uváděné chyby opakovatelnosti robota, tudíž s nulovými odchylkami geometrických parametrů $\Delta\xi$.

V samostatné kapitole však bude ukázán vliv chyb geometrických parametrů robota $\Delta\xi$ na proces kalibrace skeneru jako nástroje robota. Jedná se o situaci, kdy není k dispozici přesně kalibrovaný robot s nulovou absolutní chybou, což je případ většiny STS se sériově vyráběnými manipulátory. Tento vliv není v autorovi známých publikací z oblasti hand-eye kalibrace nástroje robota řešen, i když z hlediska jejího využití pro reálné systémy je tato znalost naprosto zásadní. V této části bude s využitím navrženého modelu procesu kalibrace analyzována také přesnost kalibrace TCP laserové hlavy a vzájemná kalibrace mezi TCP skeneru a TCP laserové hlavy, která je pro přesnost naváděcích systémů stěžejní.

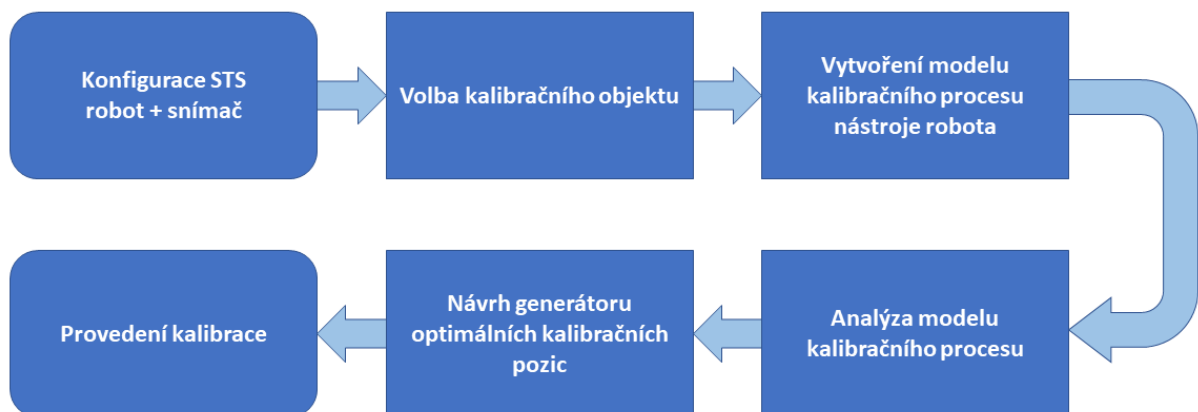
3 Návrh nového postupu hand-eye kalibrace optického nástroje robota

Jak již bylo zmíněno v předchozím textu, většina vědeckých publikací o kalibraci optických snímačů jako nástrojů robota využitých pro STS řeší především způsob nalezení řešení rovnice hand-eye kalibrace na základě zvoleného matematického přístupu nebo eventuálně návrh kalibračního objektu pro daný princip měření snímače. Automaticky je počítáno s dostatečnou přesností vstupních matic \mathbf{A}_i a \mathbf{B}_i , což ale vzhledem k reálným kalibračním úlohám rozhodně neplatí. Pokud chyba robota bude omezena pouze na chybu jeho geometrického modelu, lze přepsat rovnici hand-eye kalibrace (2.3) s využitím rovnic (2.16) a (2.19) do tvaru

$$\begin{aligned} & \mathbf{A}_i^{DGM}(\mathbf{N}_i, \mathbf{N}_{i+1}) \cdot \mathbf{X} = \\ & \mathbf{A}_i^{DGM} \left(f_{DGM}(\mathbf{Q}_i^* + \Delta\mathbf{Q}_i, \xi^* + \Delta\xi), f_{DGM}(\mathbf{Q}_{i+1}^* + \Delta\mathbf{Q}_{i+1}, \xi^* + \Delta\xi) \right) \cdot \mathbf{X} = \\ & \mathbf{X} \cdot \mathbf{B}_i^{ME} \left(f_{ME}(Y_i, \mathbf{c}, \mathbf{p}_{ME}, {}^0\mathbf{g}_{ME_i}), f_{ME}(Y_{i+1}, \mathbf{c}, \mathbf{p}_{ME}, {}^0\mathbf{g}_{ME_{i+1}}) \right) = \\ & \mathbf{X} \cdot \mathbf{B}_i^{ME}(\mathbf{S}_i, \mathbf{S}_{i+1}) \end{aligned} \quad (3.1)$$

ze které je patrné možné zásadní ovlivnění velikosti chyb transformačních matic \mathbf{A}_i a \mathbf{B}_i více faktory, tedy také zásadní ovlivnění výsledné přesnosti vypočtené matice \mathbf{X} pomocí zvoleného minimalizačního kritéria v rovnici (2.8). Důležitým faktem je rozdílný projev případných konstantních chyb (např. chyba geometrických parametrů robota $\Delta\xi$) v různých kalibračních pozicích. Výběr vhodných kalibračních pozic pak může mít větší význam než vybraná metoda pro řešení rovnice hand-eye kalibrace. Proto autor textu navrhl nový komplexní postup pro kalibraci zejména optických nástrojů robota, jenž je graficky znázorněn na obr. 3.1. Kromě samotné kalibrace nástroje umožní navržený postup zjistit předem, zda daná konfigurace STS může být zkalibrována na požadovanou přesnost a případně s jakým nutným nastavením.

Prvotním úkolem popisovaného postupu je zvolit či navrhnout vhodný kalibrační objekt s ohledem na konfiguraci celého naváděcího systému, především měřicí princip snímače. Výběr kalibračního objektu je ovlivněn také tím, zda je potřebné určit v každé kalibrační pozici pouze vzájemný translační vztah mezi snímačem a kalibračním objektem nebo má být zjištěno i vzájemné natočení. Následnou velmi důležitou fází je vytvoření modelu celého kalibračního



Obr. 3.1: Diagram navrhovaného postupu pro kalibraci nástroje robota.

procesu nástroje robota, v němž jsou zakomponovány všechny kroky kalibrace od jednotlivých principů hardwarových částí, algoritmů pro vyhodnocení měřených dat až po metodu řešící rovnici hand-eye kalibrace. Tento model je poté analyzován s cílem najít problematické části celé kalibrace a dle nich definovat doporučená nastavení kalibračního procesu s ohledem na požadovanou přesnost. Doporučené nastavení je přeneseno do návrhu generátoru optimálních kalibračních pozic, který je následně využíván pro kalibraci nástroje naváděcího systému se stejnou konfigurací. Stejně tak jsou pomocí provedené analýzy navrženy optimální parametry pro následné zpracování kalibračních dat. Nejdůležitější kroky navrženého postupu budou rozepsány detailněji v následujících podkapitolách.

3.1 Vytvoření modelu kalibračního procesu MCP

Každý model kalibračního procesu (Model of Calibration Process MCP) musí být sestaven pro konkrétní konfiguraci STS, nelze jej jednoznačně zobecnit kvůli vzájemným návaznostem mezi jednotlivými částmi. V první řadě je nutné definovat model robota. Většina výrobců robotů neposkytuje algoritmus řízení implementovaného v kontroléru robota. Ovšem hlavně pro sériově vyráběné roboty odpovídá často polohování příruby \mathbf{N} opravdu jeho přímému geometrickému modelu dle DH úmluvy (rovnice (2.15)), jehož geometrické parametry modelu lze získat například z technického výkresu. Tento postup si autor ověřil u robotů od výrobce firmy Fanuc. Kromě DGM robota je nutné definovat také jeho inverzní geometrický model IGM

$$\mathbf{Q}_i = \mathbf{Q}_i^* + \Delta\mathbf{Q}_i = f_{IGM}(\mathbf{N}_i, \xi) = f_{IGM}(\mathbf{N}_i^* + \Delta\mathbf{N}_i, \xi^* + \Delta\xi), \quad (3.2)$$

který zpětně napočítává pozice jednotlivých kloubových souřadnic \mathbf{Q}_i na základě polohy příruby \mathbf{N}_i a geometrických parametrů robota ξ . Zde je nutné upozornit na nejednoznačnost řešení IGM pro sériové manipulátory, kde stejné pozice příruby \mathbf{N} může být dosaženo pomocí více konfigurací kloubových souřadnic \mathbf{Q} , viz Goubej et al. (2012). Avšak při volbě řešení je možné díky známé konfiguraci STS a IGM robota vzít v úvahu reálné uspořádání systému, například omezení na natočení druhé a čtvrté osy kvůli přivedenému optickému vláknu do laserové procesní hlavy. Pokud je cílem hand-eye kalibrace upřesnit také parametry geometrického modelu, je nutné dle toho vhodně upravit DGM i IGM robota.

MCP musí dále obsahovat model měřicího principu snímače (rovnice (2.17)) a model kalibračního objektu \mathbf{c} , na jejichž základě je vytvořen algoritmus pro výpočet měřených dat Y_i v konkrétní pozici \mathbf{S}_i s ohledem na chybu snímače σ_S a také obrácený algoritmus pro výpočet vzájemné pozice mezi snímačem a kalibračním objektem na základě měřených dat (rovnice (2.18)). Díky této části modelu je možné testovat vlastnosti snímače a navázaného zpracování dat v různých polohách vůči měřenému kalibračnímu objektu dle zvolené chyby místo náhodného generování chyb matice \mathbf{B}_i . Pro model jsou důležité také počáteční informace o přibližné poloze kalibračního objektu v CS_W a přibližné transformační matici \mathbf{X}_0 určené například pomocí standardních implementovaných metod pro kalibraci nástroje v kontroléru robota.

Poslední důležitou částí MCP je zvolená metoda řešení rovnice hand-eye kalibrace (2.8). Autor během své práce v této oblasti navíc vyvinul iterativní algoritmus pro zpřesnění kalibrace

IRHEC hledané transformační matice \mathbf{X} (Chaluš a Liška, 2018; Liška et al., 2018a), který je do modelu rovněž implementován.

Takto sestavený model kalibračního procesu mnohem lépe odpovídá reálným situacím a lze tak mnohem věrohodněji simulovat jeho chování oproti náhodnému generování chyb pro transformační matice \mathbf{A}_i a \mathbf{B}_i .

3.2 Analýza vlivů na přesnost kalibračního procesu

Cílem tohoto kroku je nalézt problematická místa modelu kalibračního procesu, která nejvíce ovlivňují správnost řešení hledané transformační matice \mathbf{X} . Vhodným způsobem analýzy je vygenerování nominálních dat se známými parametry modelu bez jakýchkoliv chyb v celém dovoleném rozsahu kalibračních pozic. Následně pak vygenerovat data se stejným nastavením MCP až na některý pozměněný parametr či vnesenou chybu do modelu kalibrace a porovnat správnost jednotlivých částí modelu s nominálními daty. Během tohoto procesu je nutné testovat model především na reálné chyby (chyba polohování robota, šum a rozlišení snímače), parametry pro vyhodnocovací algoritmy či volby počátečních odhadů. Při porovnávání výsledků je potřeba sledovat kromě velikosti vlivu pozměněného parametru také to, zda se chyba projevuje přibližně stejně ve všech kalibračních pozicích nebo je zde patrná závislost na konkrétní kalibrační pozici.

Chování robota by mělo být analyzováno v části jeho pracovního prostoru, ve kterém operuje během své normální činnosti, protože chyba polohování robota je v každé části pracovního prostoru jiná. Platí to zejména pro řešení, kdy jsou hledány chyby geometrického modelu robota. Sestavený model robota pomocí DGM a IGM umožní také kontrolu realizovatelnosti kalibrace s umístěným kalibračním objektem v daném místě CS_w . Jak již bylo uvedeno, v případě často využívaných sériových manipulátorů IGM nemá jednoznačné řešení. Tato vlastnost je nejvíce problémová v singulárních bodech, viz Goubej et al. (2012), avšak díky znalosti IGM je možné tyto pozice eliminovat z kalibračního procesu.

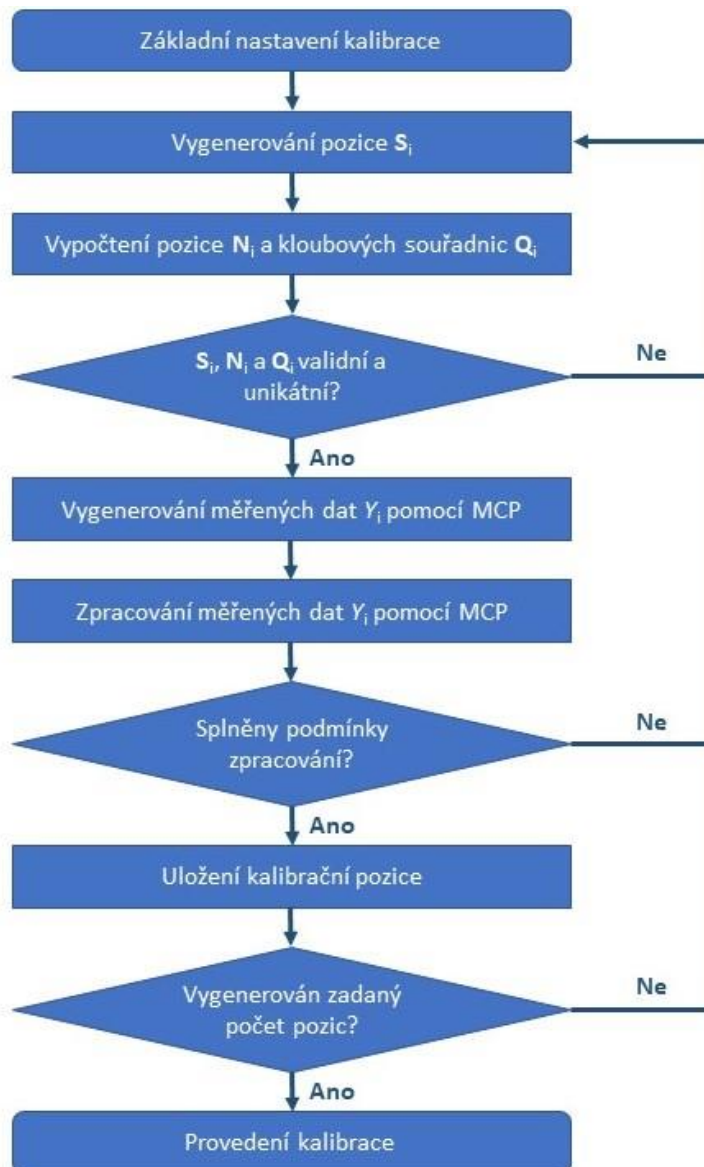
Analýza vyhodnocení měřených dat se musí soustředit především na vliv šumu v měřených datech (dle specifikace výrobce snímače či provedených experimentů) a jeho projevech při různých pozicích snímače vůči kalibračnímu objektu. Dále je v této fázi zkoumán vliv nastavení parametrů vyhodnocovacího algoritmu a vstupujících počátečních odhadů opět i s ohledem na konkrétní kalibrační pozice. Zejména části výpočtů, které mají více možných řešení. Analyzován by měl být i vliv nepřesnosti výroby kalibračního objektu, pokud je zde vyšší riziko jeho odchylky od požadovaného tvaru (např. tisk určitého vzoru na papír).

Při zkoumání modelu kalibračního procesu je také potřeba věnovat se vlivu vygenerovaných kalibračních pozic na řešení rovnice hand-eye kalibrace dle zvolené metody. Například sledování přesnosti řešení transformační matice \mathbf{X} na soubor pozic, kde některé změny polohy příruby či snímače jsou si podobné či se nacházejí v blízkosti dalších pozic. Důležitým faktorem je určení počtu potřebných kalibračních pozic pro dosažení požadované přesnosti. Dále je nutné nalézt vhodné nastavení parametrů navrženého algoritmu *IRHEC*.

Provedená analýza MCP kromě nastavení optimálních parametrů modelu slouží také pro vytvoření souboru podmínek na jednotlivé fáze procesu vyhodnocení kalibrační pozice, čímž lze opět eliminovat případný negativní vliv některých pozic na přesnost kalibrace.

3.3 Návrh generátoru optimálních kalibračních pozic

Posledním důležitým krokem navrženého postupu při kalibraci nástroje je návrh generátoru optimálních kalibračních pozic, který využívá předchozí dva provedené kroky. Vytvořený model kalibračního procesu je součástí generátoru a jeho nastavení je dáno jeho provedenou analýzou. Tímto způsobem lze podrobit testování a případně vyřadit některé kalibrační pozice ještě před jejich skutečnou realizací. Obr. 3.2 zobrazuje vývojový diagram s jednotlivými kroky během generování optimálních kalibračních pozic dle analýzy MCP. Na začátku je nutné provést počáteční nastavení generátoru obsahující mj. počet kalibračních pozic, nastavitelné parametry MCP, soubor parametrů pro vyhodnocení kalibračních dat, přibližnou pozici kalibračního objektu a přibližný hledaný vzájemný vztah X_0 mezi přírubou a snímačem.



Obr. 3.2: Diagram navrženého generátoru kalibračních pozic.

Následuje cyklus generování kalibračních pozic, dokud jich není předem zvolený počet. Jednotlivé iterace se skládají z těchto postupných kroků:

1. Na základě měřicího principu snímače, kalibračního objektu umístěného v konkrétním místě CS_W a dovoleného rozsahu kalibračních pozic je náhodně vygenerována pozice S_i . Dle známé matice X_0 je určena pozice příruby N_i a pomocí IGM robota souřadnice jednotlivých kloubových souřadnic Q_i .
2. Pokud pozice S_i a N_i nebo kloubové souřadnice Q_i nejsou fyzicky realizovatelné vzhledem k dané konfiguraci STS či dle stanovených podmínek jsou příliš podobné již vygenerovaným pozicím, vrací se generátor do kroku 1.
3. Pro pozici S_i jsou vygenerována očekávaná měřená data Y_i dle rovnice (2.17) implementované v modelu kalibračního procesu.
4. Pomocí algoritmů pro vyhodnocení v MCP jsou zpracována měřená data Y_i .
5. Pokud jsou splněny všechny stanovené podmínky na vyhodnocení kalibrační pozice, je tato pozice uložena. V opačném případě je vrácen cyklus do kroku 1 bez ukládání.

Vygenerované kalibrační pozice jsou pak využity pro reálnou kalibraci snímače jako nástroje robota. Je nutné upozornit, že proces generování kalibračních pozic je potřeba opakovat pro stejný STS v případě změny polohy kalibračního objektu nebo změny uchycení snímače k přírubě robota, jelikož se tím změní rozmístění jednotlivých pozic N_i a S_i .

V představeném návrhu generátoru je zmíněno náhodné generování pozice S_i z dovoleného rozsahu kalibračních pozic nad kalibračním objektem. Druhou možností je procházení tohoto prostoru sekvenčně se zvoleným krokem v jednotlivých osách translace a natočení. Kalibrační pozice splňující všechny podmínky jsou opět uloženy. Navíc zde ale musí být vytvořena hodnotící funkce pro jednotlivé kalibrační pozice, dle které bude na konci vybrán zvolený počet nejlepších kalibračních pozic. Tento přístup může být však výpočetně i časově velmi náročný.

4 Model procesu hand-eye kalibrace profilového skeneru jako nástroje robota

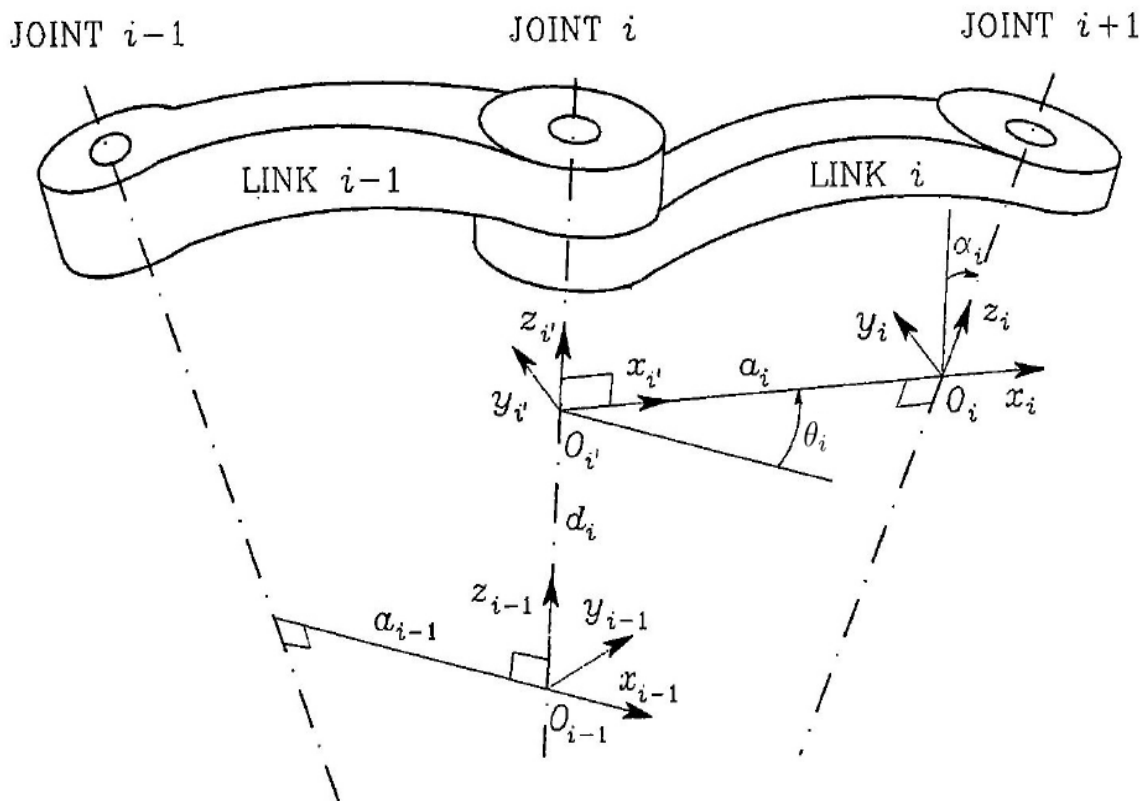
Navržený postup pro kalibraci nástroje robota v kapitole 3 bude implementován a ověřen na konfiguraci naváděcího systému, který je využíván ve spolupráci mezi firmou LaserTherm s.r.o. a výzkumným týmem DiagEn výzkumného centra NTIS na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni, jehož je autor součástí. Vyvíjené STS jsou složeny z robota, procesní hlavy a snímače v podobě profilového skeneru, který je v naváděcích systémech velmi obvyklou variantou pro měření dat, viz obr. 1.1. V případě laserového opracování součástí je pro naváděcí systémy kritickou úlohou přesnost vzájemné transformační matice mezi TCP snímače a TCP laserové hlavy, jež je u nejnáročnějších úloh požadována s maximální odchylkou do 0,1 milimetru. Proto je nutné provést před samotným procesem opracování hand-eye kalibraci profilového skeneru jako nástroje robota. Provedení kalibrace podle navrženého postupu vyžaduje v prvním kroku sestavení modelu kalibračního procesu, jenž se bude skládat z modelu robota, modelu profilového skeneru, modelu vybraného kalibračního objektu, algoritmů pro vyhodnocení měřených dat, zvolených metod pro řešení rovnice hand-eye kalibrace a navrženého algoritmu *IRHEC*. Takto sestavený model je pak využit pro následnou. Zároveň je tento model součástí navrženého generátoru kalibračních pozic, který byl představen na obr. 3.2. Všechny zmíněné části MCP budou detailněji popsány v následujících podkapitolách.

4.1 Model robota

Znalost chování robota a jeho vlastností je důležitou součástí při vytváření MCP. V první řadě model robota zabezpečuje plánování a fyzickou realizaci kalibrace s ohledem na mechanickou konstrukci robota včetně osazení nástrojů a dalšího příslušenství a také s ohledem na pracovní prostor robota. Druhou významnou výhodou zakomponování tohoto modelu je možné realističtější generování chyb polohování oproti náhodnému generování, které je mnohdy v odborných pracích využíváno při řešení problému hand-eye kalibrace. Stanovený model robota může být navíc využit také k vlastní kalibraci návrhových parametrů, jež jsou v řídicím kontroléru využívány.

Jak již bylo v textu uvedeno, poloha nominálního nástroje příruby \mathbf{N}_i je vypočitatelná za pomoci přímého geometrického modelu robota se vstupujícími hodnotami kloubových souřadnic jednotlivých aktuátorů \mathbf{Q}_i a konstantními geometrickými parametry ξ . Kontrolér robota řídící jednotlivé aktuátory pracuje ovšem především v obráceném režimu. To znamená, že operátorem či jiným systémem je určena sekvence bodů $\{{}^W\mathbf{N}_i\}^1$ v pevném souřadném systému CS_W , pro něž je kontrolérem kromě jiného vygenerováno natočení kloubových souřadnic $\{\mathbf{Q}_i\}$ pomocí inverzního geometrického modelu robota. Přímý i inverzní geometrický model robota tak musí být součástí celkového modelu kalibračního procesu. Jelikož kalibrační pozice jsou měřeny v ustálených statických pozicích, není do MCP nutné zahrnout také kinematický model robota.

¹ Levý horní index označuje souřadný systém, ke kterému je daná poloha vztažena.



Obr. 4.1: Souřadné systémy dle Denavit-Hartenbergovy úmluvy (Goubej et al., 2012).

Implementované algoritmy v kontroléru robota pro jeho řízení nejsou standardně od výrobců dostupné, avšak přímý geometrický model získat lze na základě technického výkresu. V této práci je zvolena nejčastěji využívaná Denavit-Hartenbergova (DH) úmluva (Siciliano a Sciavicco, 2000) i s ohledem na využívání šestiosých sériových manipulátorů od firmy Fanuc pro vyvíjené STS. Na těchto manipulátorech si autor platnost úmluvy také prakticky ověřil. Konstrukce sériových robotů je složena z řetězce ramen (links) a kloubů (joints), jež mohou být rotační nebo prismatické. Každému ramenu *Link i* je pevně přiřazen jeho vlastní souřadný systém F_i s počátkem v bodě O_i , jenž musí ležet na ose otáčení/posunu kloubu *Joint i+1*, viz obr. 4.1. Tato osa kloubu zároveň reprezentuje osu z_i . Osa x_i je dána směrem vektoru, který probíhá skrze příčku na osy otáčení kloubů *Joint i* a *Joint i+1* (nejkratší vzdálenost mezi osami, k oběma kolmá). Přejít mezi po sobě jdoucími souřadnými systémy ramen je dle DH úmluvy možné plně popsat pomocí čtyř DH geometrických parametrů. Je k tomu nutné znát předchozí souřadný systém F_{i-1} a pomocný souřadný systém F'_i , jenž je umístěn do průsečíku osy otáčení kloubu *Joint i* a výše popsané příčky mezi osami, viz obr. 4.1. Předchozí souřadný systém F_{i-1} se nejprve v ose z_{i-1} posune o vzdálenost d_i do počátku souřadného systému F'_i a otočí okolo této osy o úhel θ_i , tak aby se zarovnal osy x_{i-1} a x_i . Následně je souřadný systém přesunut do bodu O_i rovnající se vzdálenosti příčky a_i a je natočen o úhel α_i okolo osy x_i pro zarovnání os z_{i-1} a z_i . Tyto čtyři DH parametry (d_i , θ_i , a_i , α_i) jsou konstantní kromě proměnného posunu d_i u prismatických kloubů, respektive proměnného natočení θ_i u rotačních kloubů. Transformační matice udávající přechod ze souřadného systému F_{i-1} do F_i je pak dána posloupností elementárních transformačních matic *Trans()* a *Rot()* pro posun či natočení podél či okolo konkrétní osy následujícím vztahem

$$\mathbf{T}_i^{i-1} = \text{Trans}(\mathbf{z}, d_i) \cdot \text{Rot}(\mathbf{z}, \theta_i) \cdot \text{Trans}(\mathbf{x}, a_i) \cdot \text{Rot}(\mathbf{x}, \alpha_i) =$$

$$\mathbf{T}_i^{i-1} = \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i} c_{\alpha_i} & s_{\theta_i} s_{\alpha_i} & a_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i} c_{\alpha_i} & -c_{\theta_i} s_{\alpha_i} & a_i s_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.1)$$

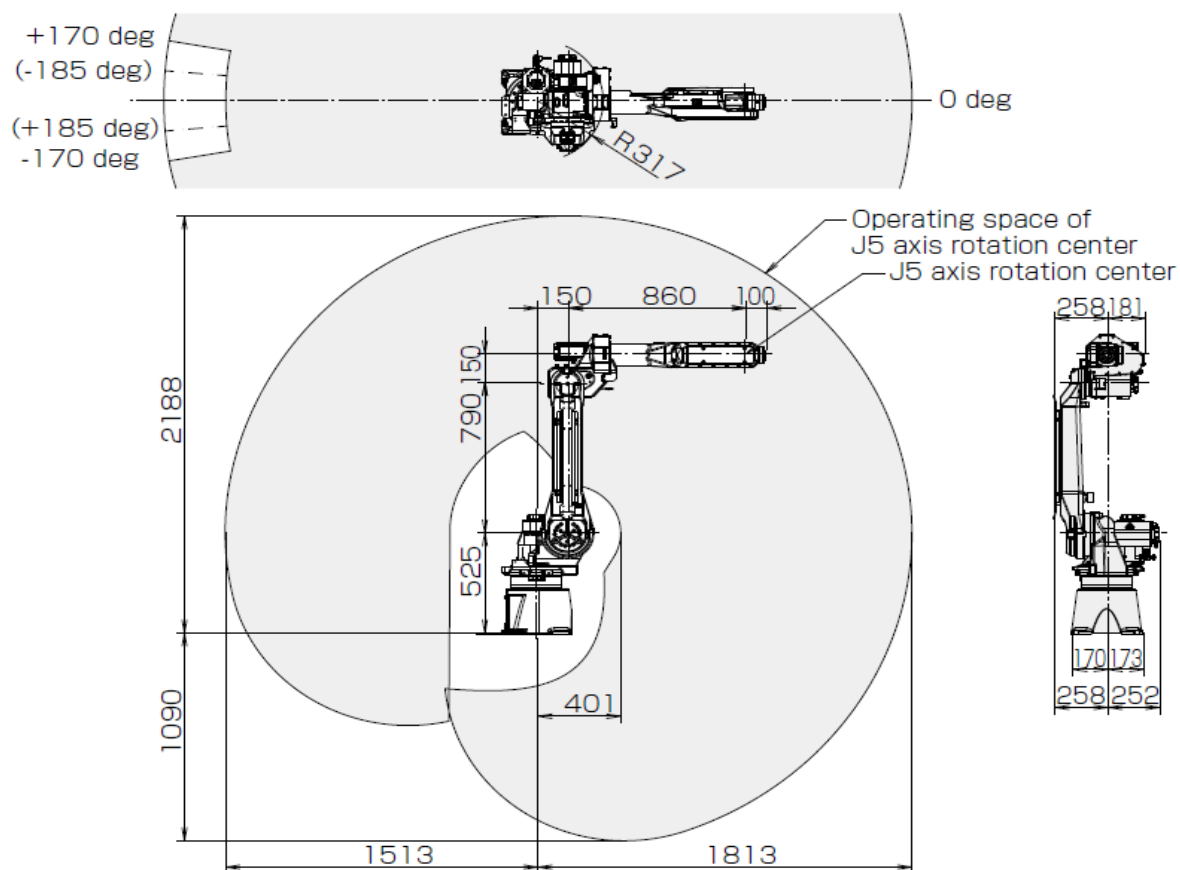
kde zkratky s a c představují funkce sinus a kosinus proměnných v jejich indexu. Při některých situacích během určování DH parametrů může dojít k nejednoznačným polohám bodů či os souřadných systémů, při kterých je vhodné brát ohled na další okolnosti robota, typicky umístění bodu \mathbf{O}_0 (Goubej et al., 2012). V případě v této práci využívaného sériového manipulátoru skládajícího se z šesti rotačních kloubů je transformační matice \mathbf{T}_N^W reprezentující polohu příruby \mathbf{N}_i v CS_W možné složit pomocí transformačních matic mezi dílčími souřadnými systémy

$$\mathbf{T}_N^W = f_{DGM}(\Theta_i, \xi) = \mathbf{T}_6^0 = \mathbf{T}_1^0 \cdot \mathbf{T}_2^1 \cdot \mathbf{T}_3^2 \cdot \mathbf{T}_4^3 \cdot \mathbf{T}_5^4 \cdot \mathbf{T}_6^5. \quad (4.2)$$

Ze vztahu (4.2) je patrné, že počátek světového souřadného systému byl umístěn do bodu \mathbf{O}_0 a počátek souřadného systému příruby do bodu \mathbf{O}_6 . Pro možnost následné analýzy modelu kalibračního procesu bude využit konkrétní robot Fanuc M-20iA/20M, jenž je jedním z robotů využívaných autorem ve vyvíjených naváděcích systémech. Vyznačuje se dle specifikace výrobce opakovatelností $\pm 0,03$ mm s možným zatížením až 20 kg na přírubě, což je pro uchycení laserové procesní hlavy a profilového skeneru dostačující. DH parametry tohoto robota byly určeny pomocí jeho technického výkresu zveřejněného výrobcem, viz obr. 4.2. Jednotlivé DH parametry po sobě jdoucích souřadných systémů jsou uvedeny v tab. 4-1. Proměnné q_1 až q_6 představují natočení jednotlivých aktuátorů v konkrétní pozici šestiosého manipulátoru, které jsou sdruženy do vektoru \mathbf{Q}_i . Autor této práce následně úspěšně ověřil platnost těchto parametrů pomocí porovnání pozice příruby z reálného kontroléru robota a pozice příruby určené z přímého geometrického modelu (4.2) na několika různých konfiguracích kloubových souřadnic \mathbf{Q}_i .

Tab. 4-1: DH parametry robota Fanuc M-20iA/20M

Souřadný systém	d_i [mm]	θ_i [°]	a_i [mm]	α_i [°]
1	0	q_1	150	90
2	0	$q_2 + 90$	790	0
3	0	q_3	150	90
4	860	q_4	0	-90
5	0	q_5	0	90
6	100	q_6	0	0



Obr. 4.2: Technický výkres robota Fanuc M-20iA/20M ze specifikace výrobce.

Řešení inverzní geometrické úlohy je obecně kvůli její nejednoznačnosti mnohem komplikovanější než řešení DGM, proto zde bude uveden soupis metod, které mohou být využity pro implementaci. Kvůli více možným řešením je nutné brát v potaz fyzická omezení jednotlivých kloubů a také například jejich aktuální konfiguraci, ke které má být nalezené řešení co nejbližší. V případě obecných architektur manipulátorů je nejvyužívanější Raghavan-Rothova metoda, jež získává řešení ze soustavy polynomiálních rovnic (Raghavan a Roth, 1993). Alternativou může být řešení na základě Gröbnerových bází (Wang et al., 2006). Pro některé jednoduché architektury lze nalézt algebraická řešení, zatímco jiná řešení jsou přímo uzpůsobená konkrétnímu případu architektury manipulátoru. Zajímavým řešením vzhledem k používanému sériovému manipulátoru se šesti rotačními klouby je publikace Brandstötter et al. (2014), která zjednodušuje geometrický popis na sedm parametrů přímo pro tento typ architektury robota. Tato metoda byla také autorem této práce implementována a úspěšně ověřena na robota Fanuc M-20iA/20M, viz tab. 4-2. Poslední variantou pro řešení IGM jsou numerické metody ve spojení se specializovaným softwarem jako je například Maple, Matlab apod.

Tab. 4-2: OPW parametry robota Fanuc M-20iA/20M

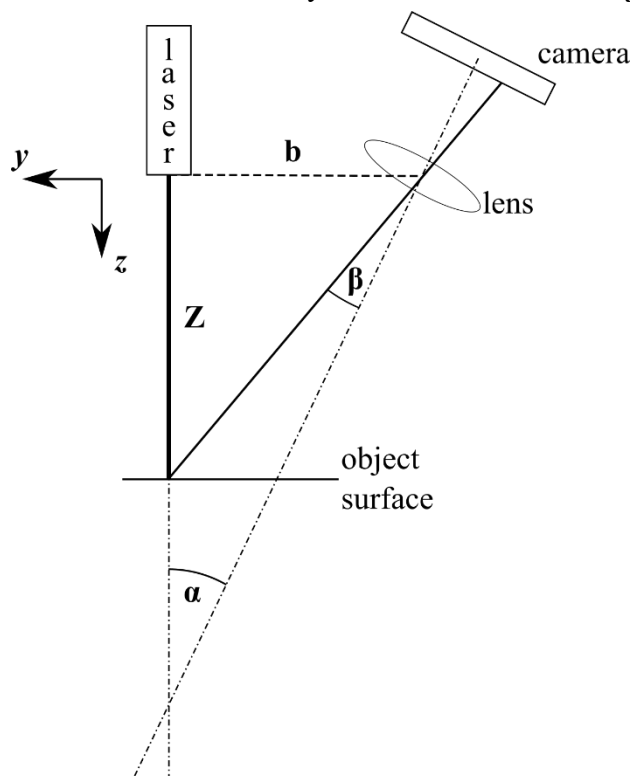
Parametr	a_1	a_2	b_1	c_1	c_2	c_3	c_4
Délka [mm]	150	-150	0	0	790	860	100

4.2 Model profilového skeneru

Důležitou součástí naváděcích systémů je použitý sensor pro snímání prostoru hledané trajektorie, proto jeho model nemůže chybět ani v MCP. Pro úlohy vyžadující vysokou přesnost navádění včetně měnící se orientace procesní hlavy je pouhé snímání a vyhodnocení kamerou většinou nedostatečné, jelikož je tak získána pouze 2D informace o trajektorii. Proto jsou využívány snímače spadající do kategorie tzv. „aktivního vidění“, jež se skládají kromě kamerového čipu také ze zdroje externího světla, který promítá definovaný vzor na povrch měřeného objektu. Vyhodnocení pak probíhá pomocí několika principů. Jednou z možností je měření doby letu (time of flight) světelného paprsku od zdroje k objektu a zpět. Vzhledem k rychlosti světla se jedná o náročné hardwarové řešení. Dalším způsobem je využití strukturovaného světla, které je vyzařováno projektorem na objekt ve formě náhodného neměnného rastru, jehož deformace jsou snímány kamerou a následně vyhodnoceny ve formě hloubkové mapy. Kvůli obvyklému použití zdroje infračerveného světla dochází k problémům při přítomnosti slunečního záření z vnějšku s ohledem na velkou promítací plochu. Nejpoužívanější z technik aktivního vidění pro navádění robota je laserová triangulace. Na základě geometrie v triangulačním trojúhelníku mezi laserovým zdrojem paprsku, objektem a snímačem je dopočtena vzdálenost objektu. Schéma zjednodušeného principu bodové laserové triangulace je na obr. 4.3, pro který platí vztah

$$Z = \frac{b}{\tan(\alpha + \beta)}. \quad (4.3)$$

Jako promítaný vzor je nejběžněji používána linie podél osy x_S sensoru, čímž dochází k získání profilu povrchu ve 2D rovině xz souřadného systému sensoru CS_S , viz jeho definice vzhledem



Obr. 4.3: Princip bodové laserové triangulace.

k pouzdru profilového skeneru na obr. 1.1. Přesnost a rozlišení skeneru závisí především na typu a rozlišení použitého kamerového čipu a konstrukce celé optické soustavy. Výstupem z profilového skeneru je posloupnost bodů podél osy x_S se souřadnicemi

$$\{ {}^S \mathbf{p}_j \} = \left\{ \left[{}^S p_{xj}, 0, {}^S p_{zj} \right]^T \right\}, \quad j=1, 2, \dots, spl, \quad (4.4)$$

kde proměnná spl určuje počet bodů na jeden měřený profil. Jelikož souřadnice v ose y_S je vždy nulová, reálným datovým výstupem skeneru je pouze posloupnost dvojic v ose x_S a z_S . Zpracování optické soustavy a následného vyhodnocení měřených dat kamerovým čipem určuje také měřicí rozsah skeneru v rovině xz . Tato plocha se liší dle daného výrobce skeneru. Některé jsou obdélníkového typu, což znamená, že rozestupy mezi body v ose x_S jsou konstantní pro celý měřený rozsah v ose z_S . Častěji optické řešení soustavy ale vymezuje plochu v podobě lichoběžníku v měřicí rovině xz . Na začátku měřicího rozsahu smr nejbliže k profilovému skeneru je šířka měřeného profilu v ose x_S nejúžší. Šířka profilu se pak postupně rozšiřuje se zvyšující se vzdáleností v ose z_S až do konce měřicího rozsahu emr . Dle tohoto principu funguje i profilový skener scanCONTROL 2600-100 od firmy MICRO-EPSILON, který je k dispozici pro reálné experimenty, a proto bude využit pro vytvoření konkrétního modelu snímače do MCP. Vnitřní konstrukce skeneru a algoritmy pro vyhodnocení měřených dat kamerovým čipem zůstávají pochopitelně výrobním tajemstvím jednotlivých dodavatelů. Proto autor této práce navrhl vlastní zjednodušený model profilového skeneru, který je možné vytvořit na základě udávaných parametrů pro skenery a který dostatečně věrohodně simuluje reálné měření při standardních podmínkách. Princip navrženého modelu je na obr. 4.4, na němž je vlevo zobrazena situace měřeného povrchu objektu skenerem a vpravo výsledný vygenerovaný profil. Jednotlivé body profilu jsou vypočteny pomocí průsečíků vektorů \mathbf{s}_j s povrchem měřeného objektu v rovině xz CS_S . Vektory \mathbf{s}_j vycházejí z počátku souřadného systému snímače v jeho rovině xz tak, aby rovnoměrně vyplnily výseč pokrývající lichoběžníkový měřicí rozsah. Úhel výseče γ_S je buď přímo udávaný výrobcem, či je dopočitatelný například ze známé šířky profilu v ose x_S ve střední vzdálenosti měřicího rozsahu mmr v ose z_S

$$\gamma_S = 2 \cdot \arctan \left(\frac{mmr_x}{2 \cdot mmr_z} \right). \quad (4.5)$$

Úhlový rozestup mezi jednotlivými vektory \mathbf{s}_j je tedy

$$\Delta\gamma_S = \frac{\gamma_S}{spl-1}. \quad (4.6)$$

Souřadnice vektorů \mathbf{s}_j lze následně dopočítat otáčením vektoru osy z_S okolo osy y_S

$$\gamma_{s_j} = -\frac{\gamma_S}{2} + (j-1) \cdot \Delta\gamma_S. \quad (4.7)$$

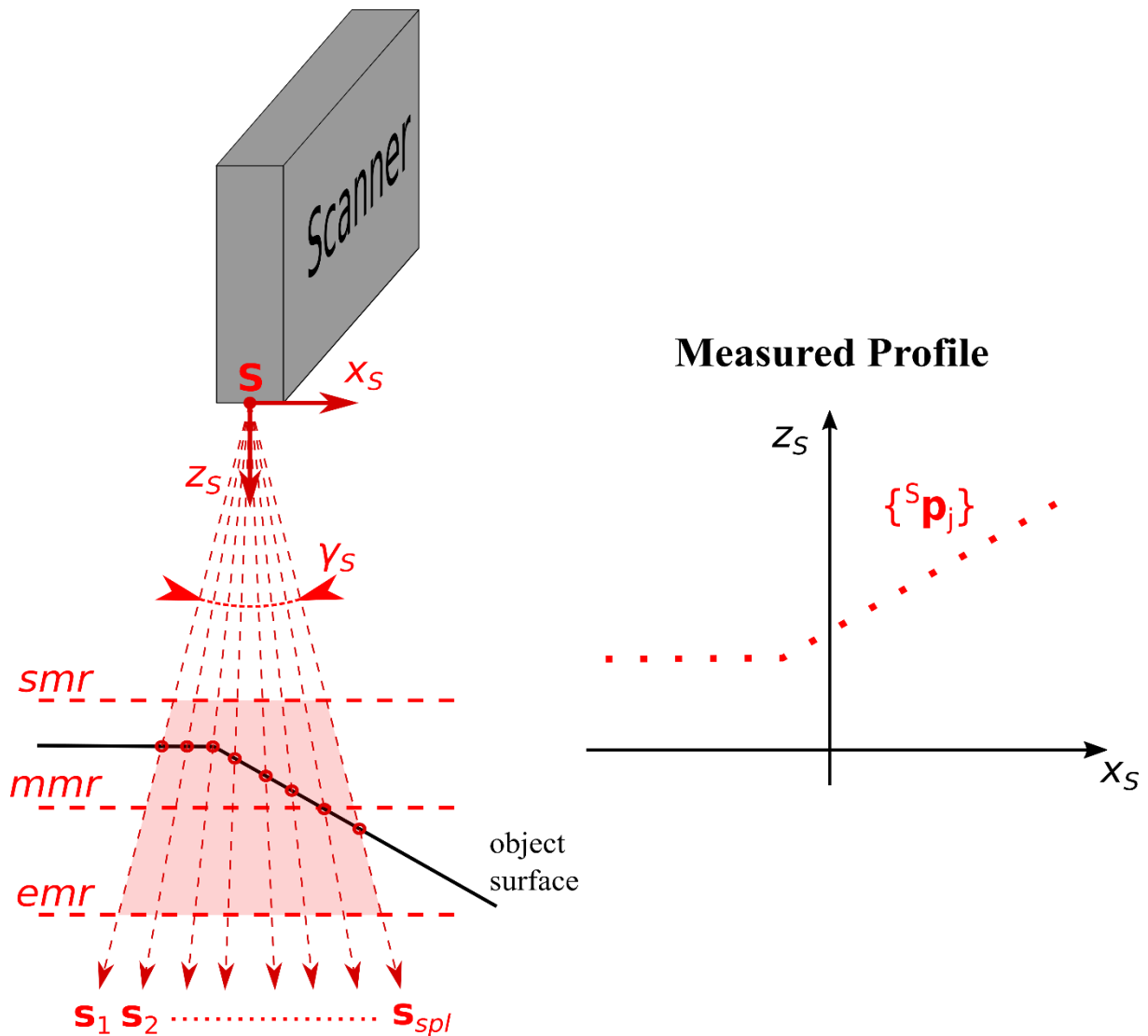
$$\mathbf{s}_j = \left[\sin(\gamma_{s_j}), 0, \cos(\gamma_{s_j}) \right]^T. \quad (4.8)$$

Takto sestavený model profilového skeneru umožňuje simulovat měřený profil objektu se známou geometrií a se známou vzájemnou pozicí vzhledem k CS_S . Průsečíky vektorů \mathbf{s}_j s povrchem měřeného objektu nacházející se mimo měřicí rozsah profilového skeneru jsou

nahrazeny hodnotami (nejčastěji nulami) indikující nezměřenou část profilu. Parametry modelu pro scanCONTROL 2600-100 jsou shrnuty v tab. 4-3, kde je také uvedeno výrobcem uváděné rozlišení v ose z_S .

Tab. 4-3: Parametry modelu profilového skeneru scanCONTROL 2600-100

smr_x	83,1 mm
smr_z	190 mm
mmr_x	100 mm
mmr_z	240 mm
emr_x	120,8 mm
emr_z	290 mm
γ_S	23,5 °
Počet bodů na profil spl	640
Referenční rozlišení v ose z_S	12 μm

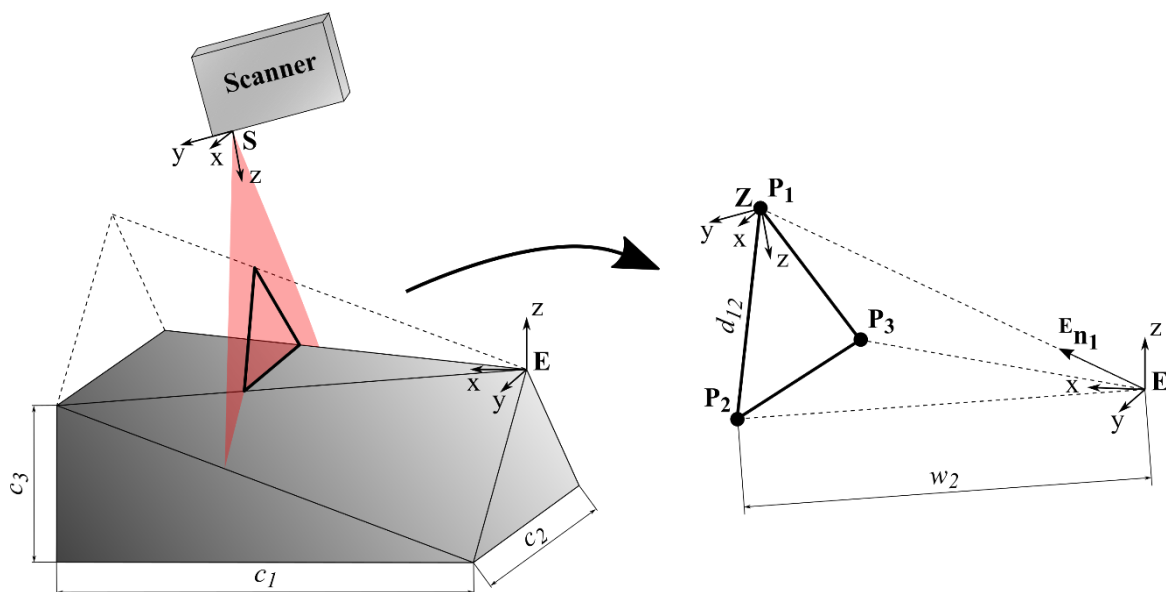


Obr. 4.4: Princip navrženého modelu profilového skeneru.

4.3 Model kalibračního objektu

Pro model kalibračního procesu je také nezbytným prvkem model kalibračního tělesa, jelikož umožňuje simulovat měřená data a provádět jejich následné vyhodnocení. Kalibrační objekt je volen s ohledem na měřicí princip snímače a požadované vlastnosti vyhodnocení vzájemné pozice mezi snímačem a kalibračním objektem z měřených dat. Profilové skenery měří data pouze ve 2D rovině, ale výběrem vhodného kalibračního objektu lze v každé kalibrační pozici dopočítat 3D informaci o vzájemné poloze. Zřejmě nejvyužívanějším kalibračním objektem pro profilové skenery jsou kulové plochy, které však umožňují získat na základě měřených dat v konkrétní kalibrační pozici pouze vzájemný translační vztah. Cílem autora této práce ale bylo zvolit kalibrační objekt, jenž kromě určení vzájemného posunutí mezi souřadnými systémy skeneru CS_S a kalibračního objektu CS_E poskytne díky vyhodnocení měřených dat také jejich vzájemnou orientaci. Proto byla dle provedené rešerše vybrána geometrie kalibračního objektu představená v disertační práci de Graaf (2007), viz obr. 4.5. Kalibrační objekt vznikne seříznutím bočních stěn kvádrů tak, aby vrchní stěna tvořila rovnoramenný trojúhelník. Vzájemná pozice mezi souřadnými systémy sensoru a kalibračního objektu je vyhodnocena na základě řezu čtyřstěnu měřicí rovinou, jenž je na obr. 4.5 vykreslen čárkovanou čarou a vznikne imaginární průsečnicí šikmých bočních stěn. Původní algoritmus pro vyhodnocení implementovaný v práci de Graaf (2007) je částečně modifikován, zejména v těchto bodech:

- **Změna pozice CS_S** – definice dle místa, ke kterému jsou vztažena data využívaných profilových skenerů. Počátek souřadného systému je uvažován přibližně v místě vystupujícího laserového světla ze skeneru. Osa z_S leží ve středu rozmítaného laserového trojúhelníku, osa x_S také leží v rovině měřeného profilu, zatímco osa y_S je k ní kolmá a má směr od kamerového čipu směrem ke zdroji laserového světla, viz obr. 4.5. Proto musela být také upravena definice pomocného souřadného systému CS_Z pro výpočet vzájemné pozice.



Obr. 4.5: Geometrie kalibračního tělesa a vzniklý čtyřstěn pro výpočet vzájemné pozice mezi skenerem a kalibračním objektem.

- **Změna řešení nelineární soustavy tří kvadratických kosinových rovnic** – v původní verzi bylo řešení hledáno pomocí numerické metody. Tato soustava má větší počet možných řešení \mathbf{w}_m , ale pouze jedno z těchto řešení \mathbf{w}^{real} odpovídá aktuální pozici skeneru vůči kalibračnímu objektu. Použitý Levenberg-Marquardtův iterační algoritmus však nezaručuje nalezení tohoto řešení. Konvergence iteračního algoritmu je závislá především na konkrétní pozici skeneru vůči kalibračnímu objektu. Různé pozice skeneru totiž generují různě blízka řešení \mathbf{w}_m k řešení \mathbf{w}^{real} . Takže i přes velmi dobrý počáteční odhad nemusí být nalezeno iteračním algoritmem řešení \mathbf{w}^{real} odpovídající aktuální pozici profilového skeneru vůči kalibračnímu objektu. Proto byl navržen nový způsob řešení nelineární soustavy rovnic s využitím resultantu, který umožňuje nalézt všechna řešení soustavy. Velkou výhodou tohoto řešení je možná dopředná selekce vhodných kalibračních pozic, jež v definované oblasti okolo řešení \mathbf{w}^{real} soustavy rovnic nemají žádné jiné další řešení \mathbf{w}_m .

Povrch kalibračního objektu musí být uzpůsoben principu měření profilových skenerů, to znamená vyhnout se odrazivým lesklým typům povrchů. Ani v místě provádění kalibrace by se neměly nacházet jiné lesklé povrchy, které by na kamerovém čipu skeneru mohly vytvářet parazitní odrazy promítaného paprsku. Vektor parametrů kalibračního objektu \mathbf{c} je pak dán těmito třemi rozměry

$$\mathbf{c} = [c_1 \quad c_2 \quad c_3]^T. \quad (4.9)$$

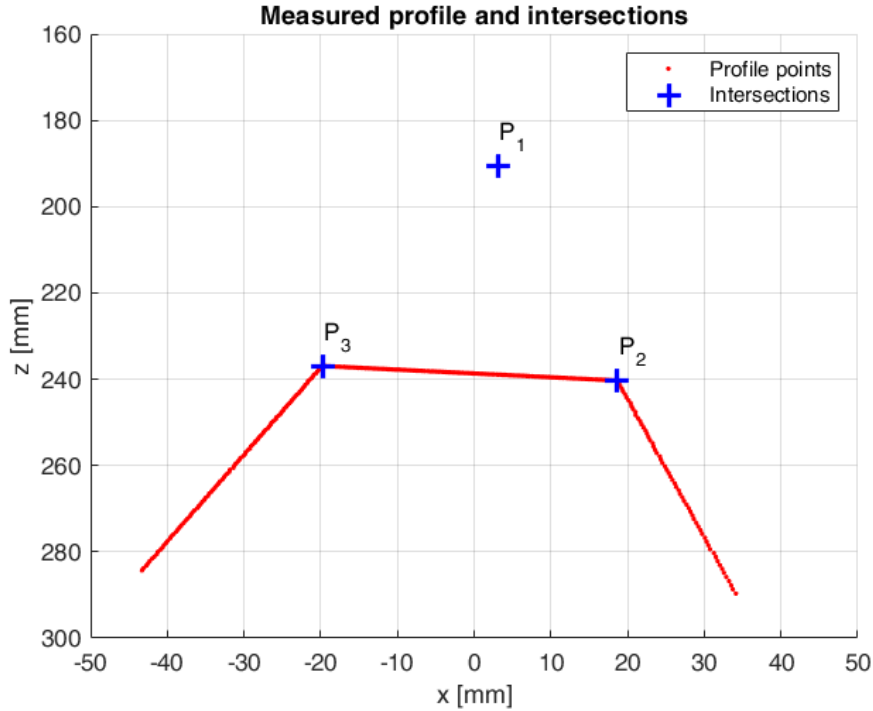
Pomocí nich lze jednoznačně definovat směrové jednotkové vektory hran čtyřstěnu

$$\begin{aligned} {}^E \mathbf{n}_1 &= \frac{[c_1 \quad 0 \quad c_3]^T}{\|[c_1 \quad 0 \quad c_3]^T\|_2}, \\ {}^E \mathbf{n}_2 &= \frac{[c_1 \quad 0,5 \cdot c_2 \quad 0]^T}{\|[c_1 \quad 0,5 \cdot c_2 \quad 0]^T\|_2}, \\ {}^E \mathbf{n}_3 &= \frac{[c_1 \quad -0,5 \cdot c_2 \quad 0]^T}{\|[c_1 \quad -0,5 \cdot c_2 \quad 0]^T\|_2}, \end{aligned} \quad (4.10)$$

které jsou důležité v algoritmech pro generování měřeného profilu nebo výpočtu vzájemné pozice mezi skenerem a kalibračním objektem z měřených dat popsané v následujících podkapitolách.

4.3.1 Algoritmus výpočtu vzájemné pozice mezi skenerem a kalibračním objektem

Typický měřený profil zachycuje tři stěny kalibračního objektu v rovině xz souřadného systému skeneru CS_S , viz obr. 4.6. V prvním kroku algoritmu je nutné určit pozice třech bodů ${}^S \mathbf{P}_k$, jež jsou nalezeny jako průsečíky proložených přímek skrze každou stěnu měřeného profilu. Vhodným způsobem pro rozdělení profilu na části odpovídající jednotlivým stěnám kalibračního objektu je využití přírůstkového profilu po sobě jdoucích hodnot měřeného profilu v ose z_S , jenž lze definovat jako



Obr. 4.6: Měřený profil ze skeneru během kalibrace.

$$\begin{aligned} inc_z_j &= {}^S p_{zj} - {}^S p_{z(j-1)}, \quad j=2, 3, \dots, spl \\ inc_z_1 &= inc_z_2 \end{aligned} \quad (4.11)$$

V tomto přírůstkovém profilu lze následně pomocí dvou významných skokových změn snadno nalézt souřadnice v ose x_S , ve kterých dochází k přechodu měřeného profilu z jedné stěny na druhou, viz obr. 4.7. Nalezené průsečíky ${}^S \mathbf{P}_k$ z proložených přímek umožňují dopočítat vzájemnou polohu sensoru a kalibračního objektu z geometrie objektu a nadefinovaných souřadných systémů, viz obr. 4.5. Průsečík \mathbf{P}_1 leží na průsečnici dvou šikmých stěn. Průsečíky ${}^S \mathbf{P}_k$ v souřadném systému sensoru CS_S lze převést do souřadného systému kalibračního objektu CS_E pomocí transformační matice \mathbf{T}_S^E vztahem

$$\begin{bmatrix} {}^E \mathbf{P}_k \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_S^E \cdot \begin{bmatrix} {}^S \mathbf{P}_k \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4.12)$$

Jelikož průsečíky ${}^E \mathbf{P}_k$ leží na známých hranách popsaných směrovými vektory ${}^E \mathbf{n}_k$, musí také platit

$${}^E \mathbf{P}_k = w_k \cdot {}^E \mathbf{n}_k, \quad (4.13)$$

kde hodnoty w_k sdružené do vektoru \mathbf{w} odpovídají vzdálenostem jednotlivých průsečíků ${}^E \mathbf{P}_k$ od počátku CS_E . Z výše uvedených rovnic vyplývá vztah

$$w_k \cdot {}^E \mathbf{n}_k = \mathbf{R}_S^E \cdot {}^S \mathbf{P}_k + \mathbf{P}_S^E, \quad (4.14)$$

ve kterém figurují hledané části \mathbf{R}_S^E a \mathbf{P}_S^E transformační matice \mathbf{T}_S^E a neznámé vzdálenosti w_k . Ty je možné určit pomocí soustavy tří kvadratických kosinových rovnic mezi trojúhelníky, jež jsou tvořeny vždy dvěma průsečíky a počátkem CS_E (obr. 4.5)

$$\begin{aligned}
f_{w_{12}}(w_1, w_2) &= w_1^2 + w_2^2 - 2w_1w_2 \mathbf{n}_1^T \cdot \mathbf{n}_2 - d_{12}^2 = 0, \\
f_{w_{13}}(w_1, w_3) &= w_1^2 + w_3^2 - 2w_1w_3 \mathbf{n}_1^T \cdot \mathbf{n}_3 - d_{13}^2 = 0, \\
f_{w_{23}}(w_2, w_3) &= w_2^2 + w_3^2 - 2w_2w_3 \mathbf{n}_2^T \cdot \mathbf{n}_3 - d_{23}^2 = 0.
\end{aligned} \tag{4.15}$$

Proměnné d_{ij} vyjadřují vzdálenost mezi průsečíky, jež se s různými souřadnými systémy nemění. Tudíž je lze vypočítat jako euklidovskou vzdálenost po nalezení průsečíků ${}^S\mathbf{P}_k$. Pro hledání řešení w_k této nelineární soustavy rovnic využil ve své práci De Graaf (2007) Levenberg-Marquardtův numerický iterační algoritmus, jehož nevýhody byly stručně popsány již výše. Pro větší přehlednost popisovaného algoritmu v této podkapitole bude rozbor předchozího přístupu a návrh nového způsobu řešení nelineární soustavy rovnic (4.15) popsán samostatně v následující podkapitole.

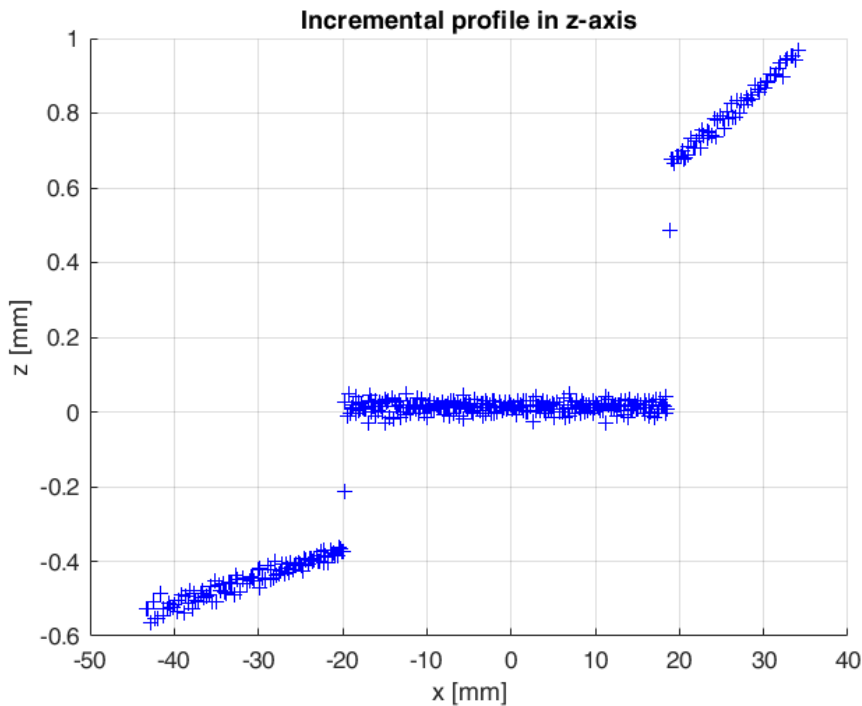
Vypočtené vzdálenosti w_k jsou dále použity k nalezení transformační matice \mathbf{T}_Z^E . Pro její určení je zaveden pomocný souřadný systém CS_Z , který má stejnou rotační část jako CS_S , ale jeho počátek je v průsečíku \mathbf{P}_1 . Transformace průsečíků ${}^S\mathbf{P}_k$ do tohoto souřadného systému je tedy dána transformační maticí

$$\mathbf{T}_Z^S = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & {}^S\mathbf{P}_1 \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}. \tag{4.16}$$

Hledanou transformační maticí je nyní \mathbf{T}_Z^E , jejíž komponenty lze získat z přepsání rovnice (4.14)

$$w_k \cdot \mathbf{n}_k^E = \mathbf{R}_Z^E \cdot {}^Z\mathbf{P}_k + \mathbf{P}_Z^E. \tag{4.17}$$

Dosazením průsečíku \mathbf{P}_1 (počátek CS_Z) je vypočtena translační část



Obr. 4.7: Přírůstkový profil po sobě jdoucích hodnot měřeného profilu v ose z_s .

$$w_1 \cdot {}^E \mathbf{n}_1 = \mathbf{P}_Z^E. \quad (4.18)$$

Průsečíky ${}^Z \mathbf{P}_k$ mají také nulovou souřadnici v ose y . Rovnici (4.17) tak lze rozepsat do tvaru obsahující jen směrové vektory os x a z v rotační matici \mathbf{R}_Z^E

$$w_k \cdot {}^E \mathbf{n}_k - \mathbf{P}_Z^E = \begin{bmatrix} {}^E \mathbf{r}_{xx} \cdot {}^Z \mathbf{P}_{kx} + {}^E \mathbf{r}_{zx} \cdot {}^Z \mathbf{P}_{kz} \\ {}^E \mathbf{r}_{xy} \cdot {}^Z \mathbf{P}_{kx} + {}^E \mathbf{r}_{zy} \cdot {}^Z \mathbf{P}_{kz} \\ {}^E \mathbf{r}_{xz} \cdot {}^Z \mathbf{P}_{kx} + {}^E \mathbf{r}_{zz} \cdot {}^Z \mathbf{P}_{kz} \end{bmatrix}. \quad (4.19)$$

Dosažením průsečíků \mathbf{P}_2 a \mathbf{P}_3 do této rovnice je možné nadefinovat lineární soustavu rovnic, jejímž řešením jsou získány směrové vektory ${}^E \mathbf{r}_x$ a ${}^E \mathbf{r}_z$

$$\begin{bmatrix} {}^Z \mathbf{P}_{2x} & {}^Z \mathbf{P}_{2z} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & {}^Z \mathbf{P}_{2x} & {}^Z \mathbf{P}_{2z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & {}^Z \mathbf{P}_{2x} & {}^Z \mathbf{P}_{2z} \\ {}^Z \mathbf{P}_{3x} & {}^Z \mathbf{P}_{3z} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & {}^Z \mathbf{P}_{3x} & {}^Z \mathbf{P}_{3z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & {}^Z \mathbf{P}_{3x} & {}^Z \mathbf{P}_{3z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^E \mathbf{r}_{xx} \\ {}^E \mathbf{r}_{zx} \\ {}^E \mathbf{r}_{xy} \\ {}^E \mathbf{r}_{zy} \\ {}^E \mathbf{r}_{xz} \\ {}^E \mathbf{r}_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_2 \cdot {}^E \mathbf{n}_{2x} - \mathbf{P}_{Z,x}^E \\ w_2 \cdot {}^E \mathbf{n}_{2y} - \mathbf{P}_{Z,y}^E \\ w_2 \cdot {}^E \mathbf{n}_{2z} - \mathbf{P}_{Z,z}^E \\ w_3 \cdot {}^E \mathbf{n}_{3x} - \mathbf{P}_{Z,x}^E \\ w_3 \cdot {}^E \mathbf{n}_{3y} - \mathbf{P}_{Z,y}^E \\ w_3 \cdot {}^E \mathbf{n}_{3z} - \mathbf{P}_{Z,z}^E \end{bmatrix}. \quad (4.20)$$

Vypočtené směrové vektory jsou normalizovány a chybějící směrový vektor osy y je určen pomocí vektorového násobení

$${}^E \mathbf{r}_y = \frac{{}^E \mathbf{r}_z \times {}^E \mathbf{r}_x}{\left| {}^E \mathbf{r}_z \times {}^E \mathbf{r}_x \right|}. \quad (4.21)$$

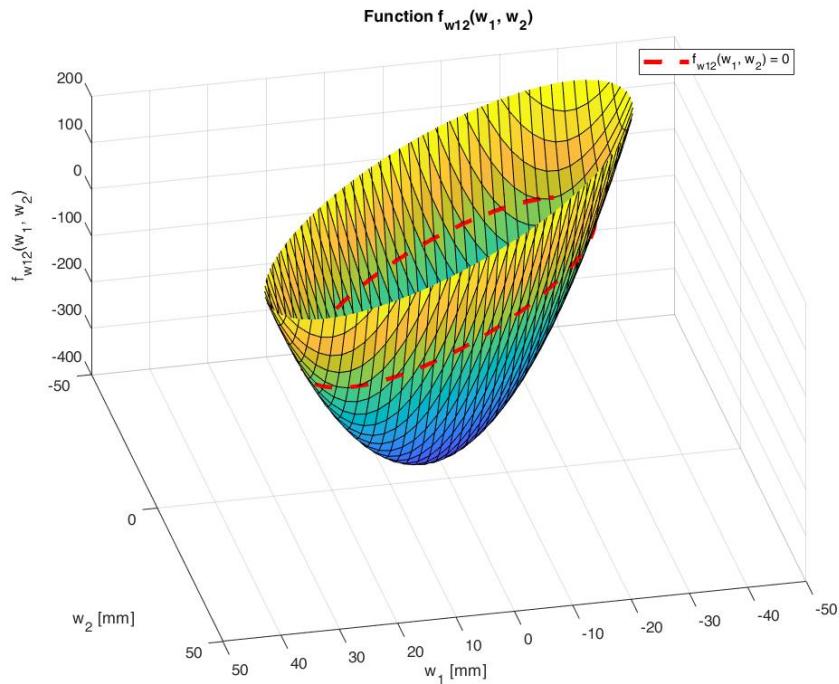
Pro zajištění ortonormality rotační matice je nutné jeden z původních směrových vektorů opět korigovat pomocí vektorového součinu. Nyní jsou známy všechny komponenty transformační matice \mathbf{T}_Z^E a může tak být určen vztah mezi pozicí kalibračního objektu a sensoru

$$\mathbf{T}_S^E = \mathbf{T}_Z^E \cdot \mathbf{T}_S^Z. \quad (4.22)$$

Tato vypočtená transformační matice $\mathbf{T}_{S_i}^E$ pro každou kalibrační pozici umožňuje výpočet po sobě jdoucích změn pozic snímače \mathbf{B}_i dle rovnice (2.6).

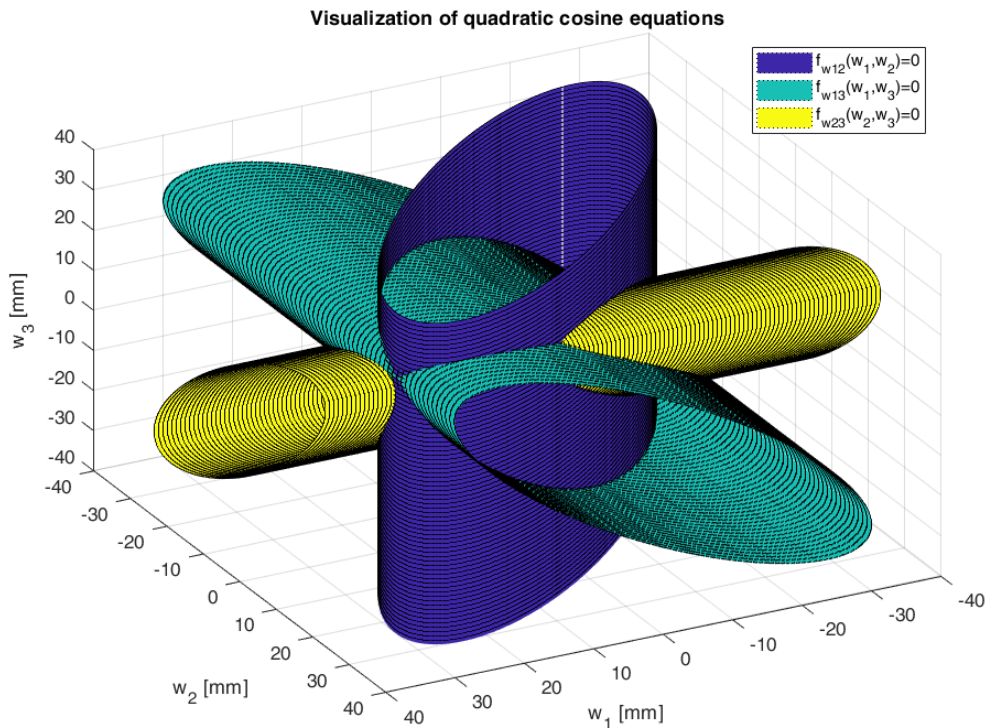
4.3.2 Navržené řešení nelineární soustavy tří kvadratických kosinových rovnic pomocí resultantu

Použité řešení nelineární soustavy rovnic (4.15) není v práci de Graaf (2007) vůbec rozebíráno, i když má podstatný vliv na přesnost celého algoritmu pro nalezení vzájemné pozice mezi profilovým skenerem a kalibračním objektem z kalibračních dat. Autor této práce při implementaci a následném ověření algoritmu podle de Graaf (2007) došel k závěru, že daný postup je nutné podrobněji analyzovat. Jednotlivé rovnice nelineární soustavy (4.15) představují horizontální řezy skrze eliptické paraboloidy popsanych funkcemi f_{w12} , f_{w13} a f_{w23} ve funkční hodnotě nula, takže tyto rovnice jsou rovnicemi elipsy, viz obr. 4.8. Každá z rovnic obsahuje dvě ze tří hledaných proměnných w_k a jejich řešení je na té třetí nezávislé. Proto může být provedeno vykreslení řešení jednotlivých rovnic ve 3D prostoru s osami proměnných w_k ,



Obr. 4.8: Eliptický paraboloid funkce $f_{w_{12}}$ a jeho horizontální řez pro $f_{w_{12}} = 0$.

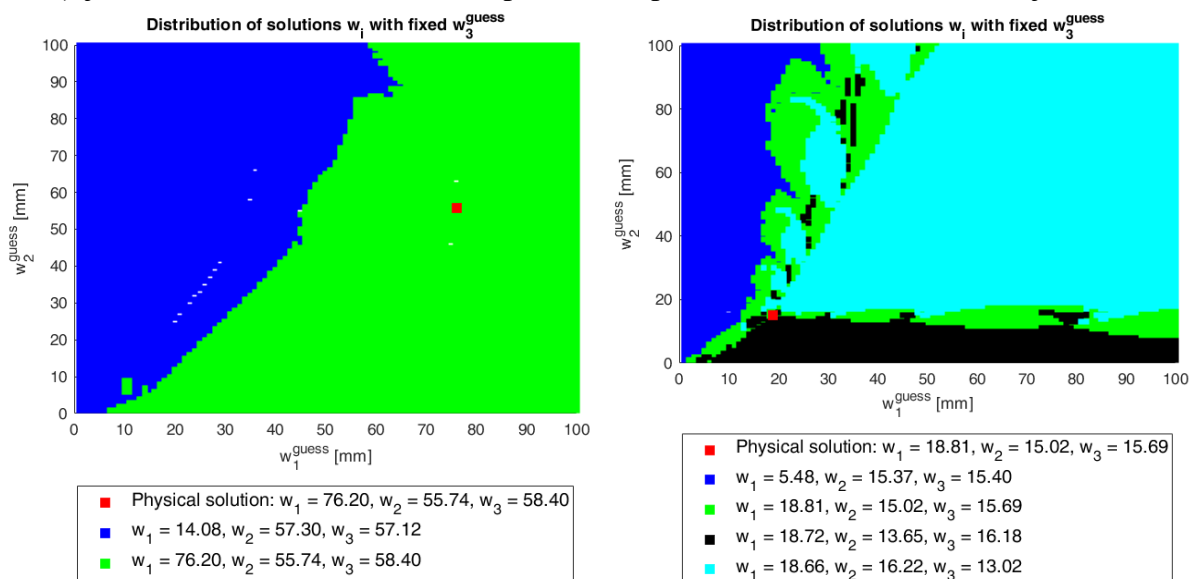
kde řešením jednotlivých rovnic je válec s elipsovou základnou. Řešeními nelineární soustavy jsou pak společné průsečíky všech tří válců, viz obr. 4.9. Jen jedno z možných řešení \mathbf{w}_m ale odpovídá řešení \mathbf{w}^{real} aktuální pozice profilového skeneru nad kalibračním objektem. Využití



Obr. 4.9: Vizualizace soustavy nelineárních kvadratických kosinových rovnic délek stran w_k čtyřstěnu ve 3D prostoru.

numerického řešení nelineární soustavy (4.15) pomocí Levenberg-Marquardtovo iteračního algoritmu v práci de Graaf (2007) však nezaručuje nalezení potřebného řešení \mathbf{w}^{real} . Konvergence do řešení odpovídající skutečné poloze skeneru nad kalibračním objektem je závislá na více faktorech. V literatuře existuje několik metod pro numerické řešení soustavy nelineární rovnic. Během testování autor této práce použil různé metody implementované ve výpočetním prostředí Matlab. Ukázalo se, že při stejných počátečních podmínkách konvergují všechny metody téměř vždy do stejného řešení. Dalším faktorem ovlivňujícím konvergenci do daného řešení je právě volba počátečních odhadů délek w_k^{guess} , ze kterých iterační algoritmy startují. Třetím faktorem, jenž ovlivňuje hledání vzdáleností w_k , je konkrétní poloha profilového skeneru nad kalibračním objektem. Tento faktor byl shledán jako nejvýraznější, protože generuje pro řešení \mathbf{w}^{real} aktuální pozice skeneru různě blízka ostatní řešení \mathbf{w}_m soustavy nelineárních rovnic (4.15).

Obr. 4.10 znázorňuje dva zcela odlišné případy řešení nelineární soustavy rovnic pro danou polohu skeneru nad kalibračním objektem. Pro možnost vykreslení závislosti konvergence řešení na volbě počátečních odhadů w_k^{guess} byla hodnota w_3^{guess} zafixována dle skutečné pozice skeneru a měněny byly pouze zbývající dvě hodnoty. Oba grafy zobrazují konvergenci do určitého řešení v závislosti na počátečních odhadech w_1^{guess} a w_2^{guess} (každé řešení má svoji barvu). Na levém obrázku je velká pravděpodobnost konvergence do řešení odpovídající aktuální pozici skeneru (zelená oblast) i při relativně špatném počátečním odhadu w_k^{guess} , jelikož se zde nachází jenom dvě možná řešení. Hranice konvergence do jednoho či druhého řešení se nachází poměrně daleko od řešení \mathbf{w}^{real} odpovídající pozici skeneru (červený bod). Naopak na pravém obrázku je situace odlišná, neboť soustava nelineárních rovnic má ve sledované rovině počátečních odhadů čtyři řešení. Hranice mezi oblastí konvergence do řešení skutečné pozice skeneru (zelená barva) a oblastmi konvergence do ostatních řešení (modrá, černá a azurová barva) jsou velmi blízka řešení \mathbf{w}^{real} pro danou pozici skeneru. Může tak dojít k nalezení



Obr. 4.10: Ukázka roviny řešení při hledání vzdáleností w_k pomocí Levenberg-Marquardtovo iteračního algoritmu s různými počátečními odhady w_1^{guess} a w_2^{guess} (počáteční odhad w_3^{guess} odpovídá skutečné pozici skeneru).

nevhodného řešení vzdáleností w_k iterativním algoritmem i při velmi dobré volbě počátečních odhadů w_k^{guess} . Odlišnost těchto kalibračních pozic je znázorněna také vykreslením nalezených řešení numerickým iteračním algoritmem do první rovnice elipsy v soustavě (4.15) na obr. 4.11

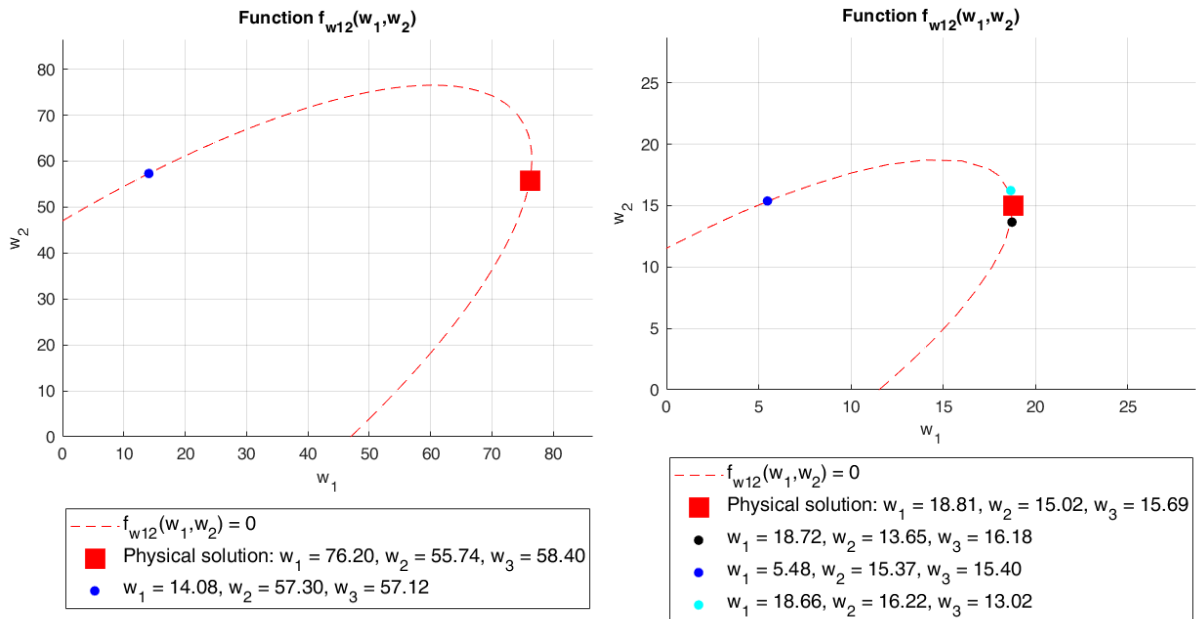
Na základě tohoto poznání byl autorem této práce stanovený cíl nalézt jiný způsob řešení soustavy nelineárních rovnic (4.15), který by umožnil vybírat vhodné kalibrační pozice odpovídající situacím vlevo na obr. 4.10 a obr. 4.11. Zde je na základě dobrého počátečního odhadu w_k^{guess} vysoká pravděpodobnost nalezení řešení \mathbf{w}^{real} odpovídající skutečné poloze skeneru nad kalibračním objektem. Možným způsobem pro nalezení všech řešení \mathbf{w}_m soustavy je využití resultantu, který eliminuje společnou proměnnou dvou polynomů spočtením determinantu Sylvesterovy matice těchto dvou polynomů (Collins, 1971). Nejprve je tedy eliminována proměnná w_1 z první a druhé rovnice soustavy (4.15)

$$f_{w_1213}(w_2, w_3) = \text{res}(f_{w_12}, f_{w_13}, w_1) = w_2^4 - 4c_{n12}c_{n13}w_2^3w_3 + w_3^4 + 2\left((2c_{n12}^2 + 2c_{n13}^2 - 1)w_3^2 - 2c_{n12}^2d_{13}^2 - d_{12}^2 + d_{13}^2\right)w_2^2 + 2\left(d_{12}^2 - 2c_{n13}^2d_{12}^2 - d_{13}^2\right)w_3^2 + 4\left(-c_{n12}c_{n13}w_3^3 + c_{n12}c_{n13}\left(d_{12}^2 + d_{13}^2\right)w_3\right)w_2 + d_{12}^4 - 2d_{12}^2d_{13}^2 + d_{13}^4, \quad (4.23)$$

kde hodnoty proměnných c_{n12} a c_{n13} jsou velikosti kosinů úhlů sevřených příslušnými směrovými vektory hran čtyřstěnu (4.10) nahrazující jejich skalární součin v rovnicích (4.15). Následnou eliminací proměnné w_2 z rovnice (4.23) a z třetí rovnice soustavy (4.15)

$$f_{w_121323}(w_3) = \text{res}(f_{w_1213}, f_{w_23}, w_3) = a_4w_3^8 + a_3w_3^6 + a_2w_3^4 + a_1w_3^2 + a_0 \quad (4.24)$$

je získán polynom 8. stupně s jednou proměnnou w_3 . Vzhledem ke složitosti byl resultant řešen pomocí matematického softwaru Maple, konkrétní hodnoty koeficientů a_i je možné vidět na výstupu skriptu z tohoto softwaru na obr. 4.12. Výsledný polynom (4.24) je vzhledem k jeho



Obr. 4.11: Vykreslení nalezených řešení numerickým iteračním algoritmem do první rovnice soustavy (4.15) pro případy zobrazené na Obr. 4.10.

struktúre možné řešit jako hledání kořenů polynomu 4. stupně, pokud je provedena substituce za proměnou w_3^2 . Nalezené kořeny w_3 jsou následně dosazeny do rovnice (4.23). Tato rovnice je opět řešena jako polynom 4. stupně s neznámou proměnnou w_2 pro všechny nalezené řešení w_3 . Vypočtené kořeny jsou nakonec dosazeny do první rovnice soustavy (4.15), pro niž jsou hledány kořeny polynomu 2. stupně s neznámou proměnnou w_1 . Z nalezených kombinací řešení w_1 , w_2 a w_3 jsou ponechány pouze varianty se všemi kladnými reálnými hodnotami. Ty je navíc vhodné vzhledem k řešení polynomů pomocí výpočetního softwaru dosadit do všech tří původních rovnic soustavy (4.15) a pro každou otestovat výslednou nulovou hodnotu (se zvolenou tolerancí). Kombinace řešení \mathbf{w}_m splňující všechny tyto podmínky jsou možnými reálnými řešeními soustavy nelineárních rovnic (4.15), ale pouze jedno z nich odpovídá aktuální skutečné pozici profilového skeneru nad kalibračním objektem. Výběr nejlepšího řešení \mathbf{w}^{best} z možných kombinací \mathbf{w}_m pak může být provedeno na základě počátečního odhadu vzdáleností $\mathbf{w}^{\text{guess}}$ a zvoleného kritéria

$$\eta_w = \min_{\mathbf{w}_m} \left(\left| w_{m1} - w_1^{\text{guess}} \right| + \left| w_{m2} - w_2^{\text{guess}} \right| + \left| w_{m3} - w_3^{\text{guess}} \right| \right). \quad (4.25)$$

$$\begin{aligned}
f_{w_{121323}} = & (64 c_{n12}^2 c_{n13}^2 c_{n23}^2 - 64 c_{n12}^3 c_{n13} c_{n23} - 64 c_{n12} c_{n13}^3 c_{n23} - 64 c_{n12} c_{n13} c_{n23}^3 + 16 c_{n12}^4 + 32 c_{n12}^2 c_{n13}^2 + 32 c_{n12}^2 c_{n23}^2 + 16 c_{n13}^4 + 32 c_{n13}^2 c_{n23}^2 \\
& + 16 c_{n23}^4 + 64 c_{n12} c_{n13} c_{n23} - 32 c_{n12}^2 - 32 c_{n13}^2 - 32 c_{n23}^2 + 16) w_3^8 + (128 c_{n12} c_{n13}^3 c_{n23}^3 d_{12}^2 - 128 c_{n12}^2 c_{n13}^2 c_{n23}^2 d_{12}^2 - 64 c_{n12}^2 c_{n13}^2 c_{n23}^2 d_{13}^2 \\
& - 64 c_{n12}^2 c_{n13}^2 c_{n23}^2 d_{23}^2 - 64 c_{n13}^4 c_{n23}^2 d_{12}^2 - 64 c_{n13}^2 c_{n23}^4 d_{12}^2 + 32 c_{n12}^3 c_{n13} c_{n23} d_{12}^2 + 96 c_{n12}^3 c_{n13} c_{n23} d_{13}^2 + 96 c_{n12}^3 c_{n13} c_{n23} d_{23}^2 \\
& - 32 c_{n12} c_{n13}^3 c_{n23} d_{12}^2 + 32 c_{n12} c_{n13}^3 c_{n23} d_{13}^2 + 96 c_{n12} c_{n13}^3 c_{n23} d_{23}^2 - 32 c_{n12} c_{n13} c_{n23}^3 d_{12}^2 + 96 c_{n12} c_{n13} c_{n23}^3 d_{13}^2 + 32 c_{n12} c_{n13} c_{n23}^3 d_{23}^2 \\
& - 32 c_{n12}^4 d_{13}^2 - 32 c_{n12}^4 d_{23}^2 + 32 c_{n12}^2 c_{n13}^2 d_{12}^2 - 32 c_{n12}^2 c_{n13}^2 d_{13}^2 - 64 c_{n12}^2 c_{n13}^2 d_{23}^2 + 32 c_{n12}^2 c_{n23}^2 d_{12}^2 - 64 c_{n12}^2 c_{n23}^2 d_{13}^2 - 32 c_{n12}^2 c_{n23}^2 d_{23}^2 \\
& + 32 c_{n13}^4 d_{12}^2 - 32 c_{n13}^4 d_{23}^2 + 128 c_{n13}^2 c_{n23}^2 d_{12}^2 - 32 c_{n13}^2 c_{n23}^2 d_{13}^2 - 32 c_{n13}^2 c_{n23}^2 d_{23}^2 + 32 c_{n23}^4 d_{12}^2 - 32 c_{n23}^4 d_{13}^2 + 32 c_{n12} c_{n13} c_{n23} d_{12}^2 \\
& - 96 c_{n12} c_{n13} c_{n23} d_{13}^2 - 96 c_{n12} c_{n13} c_{n23} d_{23}^2 - 32 c_{n12}^2 d_{12}^2 + 64 c_{n12}^2 d_{13}^2 + 64 c_{n12}^2 d_{23}^2 - 64 c_{n13}^2 d_{12}^2 + 32 c_{n13}^2 d_{13}^2 + 64 c_{n13}^2 d_{23}^2 - 64 c_{n23}^2 d_{12}^2 \\
& + 64 c_{n23}^2 d_{13}^2 + 32 c_{n23}^2 d_{23}^2 + 32 d_{12}^2 - 32 d_{13}^2 - 32 d_{23}^2) w_3^6 + (64 c_{n12}^2 c_{n13}^2 c_{n23}^2 d_{12}^2 d_{13}^2 + 64 c_{n12}^2 c_{n13}^2 c_{n23}^2 d_{12}^2 d_{23}^2 + 64 c_{n12}^2 c_{n13}^2 c_{n23}^2 d_{13}^2 d_{23}^2 \\
& - 32 c_{n12}^3 c_{n13} c_{n23} d_{12}^2 d_{13}^2 - 32 c_{n12}^3 c_{n13} c_{n23} d_{12}^2 d_{23}^2 - 32 c_{n12}^3 c_{n13} c_{n23} d_{13}^2 d_{23}^2 - 128 c_{n12}^3 c_{n13} c_{n23} d_{13}^2 d_{23}^2 - 32 c_{n12}^3 c_{n13} c_{n23} d_{23}^4 - 32 c_{n12} c_{n13}^3 c_{n23} d_{12}^4 \\
& - 32 c_{n12} c_{n13}^3 c_{n23} d_{13}^2 d_{12}^2 + 64 c_{n12} c_{n13}^3 c_{n23} d_{12}^2 d_{23}^2 - 32 c_{n12} c_{n13}^3 c_{n23} d_{13}^2 d_{23}^2 - 32 c_{n12} c_{n13}^3 c_{n23} d_{23}^4 - 32 c_{n12} c_{n13}^3 c_{n23}^3 d_{12}^4 \\
& + 64 c_{n12} c_{n13} c_{n23}^3 d_{12}^2 d_{13}^2 - 32 c_{n12} c_{n13} c_{n23}^3 d_{12}^2 d_{23}^2 - 32 c_{n12} c_{n13} c_{n23}^3 d_{13}^2 d_{23}^2 + 16 c_{n12}^4 d_{13}^4 + 64 c_{n12}^4 d_{13}^2 d_{23}^2 \\
& + 16 c_{n12}^4 d_{23}^4 + 16 c_{n12}^2 c_{n13}^2 d_{12}^4 - 64 c_{n12}^2 c_{n13}^2 d_{12}^2 d_{23}^2 + 16 c_{n12}^2 c_{n13}^2 d_{13}^4 + 32 c_{n12}^2 c_{n13}^2 d_{13}^2 d_{23}^2 + 48 c_{n12}^2 c_{n13}^2 d_{23}^4 + 16 c_{n12}^2 c_{n23}^2 d_{12}^4 \\
& - 64 c_{n12}^2 c_{n23}^2 d_{12}^2 d_{13}^2 + 48 c_{n12}^2 c_{n23}^2 d_{13}^2 d_{23}^2 + 32 c_{n12}^2 c_{n23}^2 d_{13}^2 d_{23}^2 + 16 c_{n12}^2 c_{n23}^2 d_{23}^4 + 16 c_{n13}^4 d_{12}^4 - 32 c_{n13}^4 d_{12}^2 d_{23}^2 + 16 c_{n13}^4 d_{23}^4 \\
& + 48 c_{n13}^2 c_{n23}^2 d_{12}^4 - 64 c_{n13}^2 c_{n23}^2 d_{12}^2 d_{13}^2 - 64 c_{n13}^2 c_{n23}^2 d_{12}^2 d_{23}^2 + 16 c_{n13}^2 c_{n23}^2 d_{13}^4 + 16 c_{n13}^2 c_{n23}^2 d_{23}^4 + 16 c_{n23}^4 d_{12}^4 - 32 c_{n23}^4 d_{12}^2 d_{13}^2 \\
& + 16 c_{n23}^4 d_{13}^4 + 16 c_{n12} c_{n13} c_{n23} d_{12}^4 - 32 c_{n12} c_{n13} c_{n23} d_{12}^2 d_{13}^2 - 32 c_{n12} c_{n13} c_{n23} d_{12}^2 d_{23}^2 + 16 c_{n12} c_{n13} c_{n23} d_{13}^4 + 160 c_{n12} c_{n13} c_{n23} d_{13}^2 d_{23}^2 \\
& + 16 c_{n12} c_{n13} c_{n23} d_{23}^4 - 8 c_{n12}^2 d_{12}^4 + 48 c_{n12}^2 d_{12}^2 d_{13}^2 + 48 c_{n12}^2 d_{12}^2 d_{23}^2 - 40 c_{n12}^2 d_{13}^4 - 112 c_{n12}^2 d_{13}^2 d_{23}^2 - 40 c_{n12}^2 d_{23}^4 - 40 c_{n13}^2 d_{12}^4 \\
& + 48 c_{n13}^2 d_{12}^2 d_{13}^2 + 80 c_{n13}^2 d_{12}^2 d_{23}^2 - 8 c_{n13}^2 d_{13}^4 - 48 c_{n13}^2 d_{13}^2 d_{23}^2 - 40 c_{n13}^2 d_{23}^4 - 40 c_{n23}^2 d_{12}^4 + 80 c_{n23}^2 d_{12}^2 d_{13}^2 + 48 c_{n23}^2 d_{12}^2 d_{23}^2 \\
& - 40 c_{n23}^2 d_{13}^4 - 48 c_{n23}^2 d_{13}^2 d_{23}^2 - 8 c_{n23}^2 d_{23}^4 + 24 d_{12}^4 - 48 d_{12}^2 d_{13}^2 - 48 d_{12}^2 d_{23}^2 + 24 d_{13}^4 + 48 d_{13}^2 d_{23}^2 + 24 d_{23}^4) w_3^4 \\
& + (32 c_{n12}^3 c_{n13} c_{n23} d_{12}^2 d_{13}^2 d_{23}^2 + 32 c_{n12}^3 c_{n13} c_{n23} d_{13}^2 d_{23}^2 + 32 c_{n12}^3 c_{n13} c_{n23} d_{23}^4 - 32 c_{n12}^4 d_{13}^4 d_{23}^2 - 32 c_{n12}^4 d_{13}^2 d_{23}^4 - 16 c_{n12}^2 c_{n13}^2 d_{12}^4 d_{23}^2 \\
& + 32 c_{n12}^2 c_{n13}^2 d_{12}^2 d_{23}^4 - 16 c_{n12}^2 c_{n13}^2 d_{13}^4 d_{23}^2 - 16 c_{n12}^2 c_{n13}^2 d_{23}^6 - 16 c_{n12}^2 c_{n23}^2 d_{12}^4 d_{13}^2 + 32 c_{n12}^2 c_{n23}^2 d_{12}^2 d_{13}^4 - 16 c_{n12}^2 c_{n23}^2 d_{13}^6 \\
& - 16 c_{n12}^2 c_{n23}^2 d_{13}^2 d_{23}^4 + 8 c_{n12} c_{n13} c_{n23} d_{12}^6 - 8 c_{n12} c_{n13} c_{n23} d_{12}^4 d_{13}^2 - 8 c_{n12} c_{n13} c_{n23} d_{12}^4 d_{23}^2 - 8 c_{n12} c_{n13} c_{n23} d_{12}^2 d_{13}^4 + 48 c_{n12} c_{n13} c_{n23} d_{12}^2 d_{13}^2 d_{23}^2 \\
& - 8 c_{n12} c_{n13} c_{n23} d_{12}^2 d_{23}^4 + 8 c_{n12} c_{n13} c_{n23} d_{13}^4 d_{23}^2 - 40 c_{n12} c_{n13} c_{n23} d_{13}^2 d_{23}^4 + 8 c_{n12} c_{n13} c_{n23} d_{23}^6 + 8 c_{n12}^2 d_{12}^4 d_{13}^2 \\
& + 8 c_{n12}^2 d_{12}^2 d_{23}^2 - 16 c_{n12}^2 d_{12}^2 d_{13}^4 - 64 c_{n12}^2 d_{12}^2 d_{13}^2 d_{23}^2 - 16 c_{n12}^2 d_{12}^2 d_{23}^4 + 8 c_{n12}^2 d_{13}^6 + 56 c_{n12}^2 d_{13}^4 d_{23}^2 + 56 c_{n12}^2 d_{13}^2 d_{23}^4 + 8 c_{n12}^2 d_{23}^6 \\
& - 8 c_{n13}^2 d_{12}^6 + 16 c_{n13}^2 d_{12}^4 d_{13}^2 + 24 c_{n13}^2 d_{12}^4 d_{23}^2 - 8 c_{n13}^2 d_{12}^2 d_{13}^4 - 32 c_{n13}^2 d_{12}^2 d_{13}^2 d_{23}^2 - 24 c_{n13}^2 d_{12}^2 d_{23}^4 + 8 c_{n13}^2 d_{13}^4 d_{23}^2 + 16 c_{n13}^2 d_{13}^2 d_{23}^4 \\
& + 8 c_{n13}^2 d_{23}^6 - 8 c_{n23}^2 d_{12}^6 + 24 c_{n23}^2 d_{12}^4 d_{13}^2 + 16 c_{n23}^2 d_{12}^4 d_{23}^2 - 24 c_{n23}^2 d_{12}^2 d_{13}^4 - 32 c_{n23}^2 d_{12}^2 d_{13}^2 d_{23}^2 - 8 c_{n23}^2 d_{12}^2 d_{23}^4 + 8 c_{n23}^2 d_{13}^6 \\
& + 16 c_{n23}^2 d_{13}^4 d_{23}^2 + 8 c_{n23}^2 d_{13}^2 d_{23}^4 + 8 d_{12}^6 - 24 d_{12}^4 d_{13}^2 - 24 d_{12}^4 d_{23}^2 + 24 d_{12}^2 d_{13}^4 + 48 d_{12}^2 d_{13}^2 d_{23}^2 + 24 d_{12}^2 d_{23}^4 - 8 d_{13}^6 - 24 d_{13}^4 d_{23}^2 \\
& - 24 d_{13}^2 d_{23}^4 - 8 d_{23}^6) w_3^2 - 4 d_{12}^6 d_{13}^2 - 4 d_{12}^6 d_{23}^2 + 6 d_{12}^4 d_{13}^4 + 6 d_{12}^4 d_{23}^4 - 4 d_{12}^2 d_{13}^6 - 4 d_{12}^2 d_{23}^6 + 4 d_{13}^6 d_{23}^2 + 6 d_{13}^4 d_{23}^4 + 4 d_{13}^2 d_{23}^6 + d_{12}^8 \\
& + d_{13}^8 + d_{23}^8 + 16 c_{n12}^4 d_{13}^4 d_{23}^4 - 8 c_{n12}^2 d_{12}^4 d_{13}^2 d_{23}^2 + 16 c_{n12}^2 d_{12}^2 d_{13}^4 d_{23}^2 + 16 c_{n12}^2 d_{12}^2 d_{13}^2 d_{23}^4 - 8 c_{n12}^2 d_{13}^6 d_{23}^2 - 16 c_{n12}^2 d_{13}^4 d_{23}^4 \\
& - 8 c_{n12}^2 d_{13}^2 d_{23}^6 + 12 d_{12}^4 d_{13}^2 d_{23}^2 - 12 d_{12}^2 d_{13}^4 d_{23}^2 - 12 d_{12}^2 d_{13}^2 d_{23}^4
\end{aligned}$$

Obr. 4.12: Výsledný polynom $f_{w_{121323}}$ vypočtený pomocí softwaru Maple.

Významnou výhodou nově navrženého řešení soustavy nelineárních rovnic (4.15) oproti původnímu řešení z práce de Graaf (2007) je znalost všech řešení \mathbf{w}_m soustavy. Toho je využito při generování konkrétních kalibračních pozic profilového skeneru nad kalibračním objektem k definování hodnotící funkce, dle které budou vybírány kalibrační pozice s menším rizikem na možnou chybu vyhodnocení, jak bylo ukázáno na příkladech pravých grafů na obr. 4.10 a obr. 4.11. Pokud je známý vektor vzdáleností \mathbf{w}^{real} odpovídající skutečným (očekávaným) vzdálenostem pro danou pozici skeneru nad kalibračním objektem, může být z ostatních řešení \mathbf{w}_m nalezeno nejbližší řešení \mathbf{w}^{near} dle nejmenšího součtu odchylek dané kombinace vůči \mathbf{w}^{real}

$$\min_{\mathbf{w}_m} \left(|w_{m1} - w_1^{\text{real}}| + |w_{m2} - w_2^{\text{real}}| + |w_{m3} - w_3^{\text{real}}| \right). \quad (4.26)$$

Daná kalibrační pozice je pak ohodnocena funkcí

$$w^{\text{diff}} = \max \left(|w_1^{\text{real}} - w_1^{\text{near}}|, |w_2^{\text{real}} - w_2^{\text{near}}|, |w_3^{\text{real}} - w_3^{\text{near}}| \right), \quad (4.27)$$

jelikož čím vyšší je hodnota w^{diff} , tím vyšší je pravděpodobnost nalezení potřebného řešení \mathbf{w}^{real} pomocí (4.25) z pohledu skutečné polohy skeneru nad kalibračním objektem, i když se tato pozice nenachází přesně na očekávané poloze se vzdálenostmi $\mathbf{w}^{\text{guess}}$.

4.3.3 Algoritmus generování pozice profilového skeneru nad kalibračním objektem

Další důležitou částí MCP je algoritmus pro generování pozice skeneru \mathbf{S}_i nad kalibračním objektem, jelikož se jedná o první krok navrhovaného generátoru kalibračních pozic, viz obr. 3.2. Pozice skeneru ${}^E\mathbf{S}_i$ je hledána vzhledem k souřadnému systému kalibračního objektu, je tedy reprezentovaná transformační maticí $\mathbf{T}_{S_i}^E$. V první řadě je zvolena startovní pozice skeneru ${}^E\mathbf{S}_{\text{start}}$, ze které se bude vycházet při hledání konkrétní i -té pozice ${}^E\mathbf{S}_i$. Pozici ${}^E\mathbf{S}_{\text{start}}$ je vhodné nastavit do poloviny kalibračního objektu v ose x_E a středu měřicího rozsahu skeneru v ose z_S . Počáteční natočení skeneru je dáno tak, aby jeho osa z_S směřovala kolmo ke kalibračnímu objektu a osa y_S byla rovnoběžná s osou x_E . Pro uvedené parametry profilového skeneru a kalibračního objektu je vhodná startovní pozice ${}^E\mathbf{S}_{\text{start}} = \{[60; 0; 240]^T, [0; 180; -90]^T\}$, kde první vektor určuje translační posun odpovídající $\mathbf{P}_{S_{\text{start}}}^E$ a druhý vektor definuje úhly $[\psi; \theta; \phi]^T$, jež jednoznačně reprezentují matici rotace $\mathbf{R}_{S_{\text{start}}}^E$ dle rovnice (8.7). Dále je nutné stanovit maximální možný rozsah \mathbf{S}_{lim} pro jednotlivé osy a úhly vzhledem k ${}^E\mathbf{S}_{\text{start}}$, ve kterém se musí nacházet všechny vygenerované pozice skeneru ${}^E\mathbf{S}_i$

$$\mathbf{S}_{\text{lim}} = \left\{ \left[\pm S_{\text{lim},x}, \pm S_{\text{lim},y}, \pm S_{\text{lim},z} \right]^T, \left[\pm S_{\text{lim},\psi}, \pm S_{\text{lim},\theta}, \pm S_{\text{lim},\phi} \right]^T \right\}. \quad (4.28)$$

Nyní bude popsána sekvence kroků algoritmu, které se opakují do vygenerování stanoveného počtu pozic skeneru:

1. Vygeneruj náhodně pomocí rovnoměrného rozdělení hodnoty v dovolených rozsazích \mathbf{S}_{lim} pro osu x , y a z . Následně je přičti k vektoru posunutí $\mathbf{P}_{S_{\text{start}}}^E$, čímž je získán vektor posunutí $\mathbf{P}_{S_i}^E$.
2. Pozice $\mathbf{P}_{S_i}^E$ se musí nacházet nad zvolenou výškou h_{plim} vůči rovinám šikmých stěn kalibračního objektu, aby mohly být alespoň teoreticky snímány profilovým skenerem

všechny tři stěny. Proto spočti a porovnej vzdálenost bodu $\mathbf{P}_{S_i}^E$ k rovinám šikmých stěn definovaných normálovými vektory $\boldsymbol{\rho}_2$ a $\boldsymbol{\rho}_3$

$${}^E\boldsymbol{\rho}_2 = {}^E\mathbf{n}_2 \times \begin{bmatrix} 0 & \frac{c_2}{2} & -c_3 \end{bmatrix}^T, \quad (4.29)$$

$${}^E\boldsymbol{\rho}_3 = {}^E\mathbf{n}_3 \times \begin{bmatrix} 0 & -\frac{c_2}{2} & -c_3 \end{bmatrix}^T, \quad (4.30)$$

$$h_\rho = \left(\mathbf{P}_{S_i}^E\right)^T \cdot {}^E\boldsymbol{\rho}. \quad (4.31)$$

3. Osa z_S skeneru musí směřovat k ose x_E kalibračního objektu. Pozici na ose x_E vygeneruj náhodně v rozsahu $c_x \in (0; c_1)$ a následně vypočti směrový vektor ${}^E\mathbf{r}_z$ osy z_S

$${}^E\mathbf{r}_z = \begin{bmatrix} c_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \mathbf{P}_{S_i}^E. \quad (4.32)$$

4. Směrový vektor ${}^E\mathbf{r}_x$ osy x_S skeneru je kolmý k rovině dané osou z_S skeneru a osou x_E kalibračního objektu

$${}^E\mathbf{r}_x = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times {}^E\mathbf{r}_z. \quad (4.33)$$

5. Dopočti pomocí vektorového součinu zbývající vektor ${}^E\mathbf{r}_y$, všechny tři vektory normuj a koriguj pro zajištění ortonormality výsledné rotační matice

$$\mathbf{R}_{S_i}^E = \begin{bmatrix} {}^E\mathbf{r}_x & {}^E\mathbf{r}_y & {}^E\mathbf{r}_z \end{bmatrix}. \quad (4.34)$$

6. Pomocí skalárního součinu vektorů jednotlivých os mezi $\mathbf{R}_{S_{\text{start}}}^E$ a $\mathbf{R}_{S_i}^E$ otestuj splnění dovoleného rozsahu úhlů dle \mathbf{S}_{lim} .
7. Pokud jsou splněny všechny podmínky v průběhu algoritmu, je daná pozice skeneru ${}^E\mathbf{S}_i$ reprezentovaná transformační maticí $\mathbf{T}_{S_i}^E$ validní.

Pokud v průběhu algoritmu dojde k nesplnění některé podmínky, je generování pozice ${}^E\mathbf{S}_i$ vráceno zpět do kroku 1. Představený algoritmus odpovídá variantě náhodného výběru kalibrační pozice z dovoleného prostoru nad kalibračním objektem. Druhou možností je otestovat tento dovolený prostor celý se zvolenými rozestupy pro jednotlivé osy a úhly. V tom případě by stačilo krok 1 algoritmu nahradit sekvenčním výběrem pozic z dovoleného prostoru. Jak již bylo ale v předchozím textu zmíněno, tato varianta je časově a výpočetně velmi náročná. Pro představu při volbě $\mathbf{S}_{\text{lim}} = \{[60; 30; 30]^T, [30; 30; 30]^T\}$ a kroku 1 milimetr respektive 1 stupeň pro jednotlivé osy se jedná o cca $3,5 \cdot 10^9$ kombinací pozic \mathbf{S}_i .

4.3.4 Algoritmus pro generování měřeného profilu

Významnou výhodou modelu kalibračního procesu je možnost generování měřeného profilu při známé či předpokládané pozici profilového skeneru v souřadném systému kalibračního objektu vyjádřené maticí \mathbf{T}_S^E . Je tak nahrazen způsob ověření vyvíjených metod pro hand-eye

kalibraci pomocí náhodného generování chyby matic \mathbf{B}_i , který se ve většině případů nepřibližuje reálným situacím hand-eye kalibrace nástroje robota. Tento algoritmus musí vycházet z již představených modelů profilového skeneru a kalibračního objektu. Cílem je nalézt měřené body profilu ${}^S\mathbf{p}_j$ (4.4) jako průsečíky jednotlivých vektorů \mathbf{s}_j (4.8) reprezentující body měřeného profilu s povrchem kalibračního objektu. V první fázi algoritmu je nutné nalézt pozice průsečíků ${}^E\mathbf{P}_k$, což je možné vypočítat pomocí průsečíků hran čtyřstěnu ${}^E\mathbf{n}_k$ s měřicí rovinou xz profilového skeneru vyjádřenou parametrickou rovnicí

$$w_k \cdot {}^E\mathbf{n}_k = \mathbf{P}_S^E + u_k \cdot {}^E_S\mathbf{r}_x + v_k \cdot {}^E_S\mathbf{r}_z. \quad (4.35)$$

Tento zápis lze převést do maticového zápisu jako

$$\mathbf{P}_S^E = \begin{bmatrix} {}^E\mathbf{n}_k & -{}^E_S\mathbf{r}_x & -{}^E_S\mathbf{r}_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_k \\ u_k \\ v_k \end{bmatrix}. \quad (4.36)$$

a nalézt tak neznámý pravý vektor analyticky pro každý průsečík ${}^E\mathbf{P}_k$. Jeho souřadnice v CS_E jsou tedy dány dosazením vypočtené hodnoty w_k do rovnice (4.13). Zároveň hodnoty w_k představují řešení \mathbf{w}^{real} pro tuto kalibrační pozici při řešení soustavy nelineárních rovnic (4.15) popsané v podkapitole 4.3.2. Souřadnice průsečíků ${}^S\mathbf{P}_k$ v souřadném systému profilového skeneru odpovídají přímo hodnotám u_k pro osu x_S a v_k pro osu z_S . Pro nyní známé průsečíky ${}^S\mathbf{P}_2$ a ${}^S\mathbf{P}_3$ jsou vypočteny úhly γ_{P_2} a γ_{P_3} , které svírají jimi procházející vektory z počátku CS_S s osou z_S tohoto souřadného systému. Na základě těchto úhlů je následně rozdělen výpočet měřených bodů profilu ${}^S\mathbf{p}_j$ do třech částí dle úhlu γ_{s_j} (4.7) daného vektoru \mathbf{s}_j (4.8):

- $\gamma_{s_j} < \gamma_{P_3}$

$${}^S\mathbf{p}_j \in \mathbf{s}_j \cap \overline{{}^S\mathbf{P}_3 {}^S\mathbf{P}_1}. \quad (4.37)$$

- $\gamma_{s_j} \in \langle \gamma_{P_3}, \gamma_{P_2} \rangle$

$${}^S\mathbf{p}_j \in \mathbf{s}_j \cap \overline{{}^S\mathbf{P}_3 {}^S\mathbf{P}_2}. \quad (4.38)$$

- $\gamma_{s_j} > \gamma_{P_2}$

$${}^S\mathbf{p}_j \in \mathbf{s}_j \cap \overline{{}^S\mathbf{P}_1 {}^S\mathbf{P}_2}. \quad (4.39)$$

Takto vygenerovaný měřený profil kalibračního objektu s přidáním náhodné chyby měření pro jednotlivé body dle specifikace výrobce umožňuje věrohodné simulování chování profilového skeneru během hand-eye kalibrace.

4.4 Metody řešení rovnice hand-eye kalibrace

Jak již bylo v textu zmíněno, cílem autora této práce není nalézt nový způsob matematického řešení \mathbf{T}_S^N rovnice hand-eye kalibrace (2.3). Součástí MCP však musí být také metoda pro řešení této rovnice. V odborné literatuře se nachází několik způsobů jejího řešení (viz rešerše v podkapitole 2.1), které jsou mezi sebou často porovnávány. Proto také pro otestování vlivu a přínosu generátoru kalibračních pozic navrženého v této práci na základě MCP byly vybrány čtyři metody řešení rovnice hand-eye kalibrace. Tři spadají do kategorie dvojfázových metod,

kdy je nejprve nalezena matice rotace \mathbf{R}_S^N z rotační rovnice (2.11) dle zvoleného způsobu daného autora. Translační vektor \mathbf{P}_S^N je následně řešen pro všechny metody stejně. Vypočtená matice \mathbf{R}_S^N je využita v translační rovnici (2.12), která je převedena do tvaru (2.13) a vyřešena pomocí metody nejmenších čtverců (2.14). Kvůli nevýhodě dvojfázového přístupu při hledání řešení rovnice hand-eye kalibrace (propagace potenciální chyby rotační matice \mathbf{R}_S^N do řešení vektoru posunutí \mathbf{P}_S^N) je do modelu kalibračního procesu implementována také jednofázová metoda řešící \mathbf{R}_S^N a \mathbf{P}_S^N současně.

4.4.1 Řešení rotační rovnice pomocí obecné osy rotace – TL metoda

Tsai a Lenz (1989) představili řešení rotační rovnice (2.11) hand-eye kalibrace založené na obecné ose rotace, které si oproti řešení v práci Shiu a Ahmad (1989) zachovává stejný počet neznámých nezávisle na počtu provedených měření. Tím je celý proces zjednodušen a zrychlen. Matici rotace \mathbf{R} lze vyjádřit úhlem ϑ a jednotkovým vektorem \mathbf{r} , jenž definuje osu otáčení

$$\mathbf{R} = \text{Rot}(\mathbf{r}, \vartheta). \quad (4.40)$$

Zároveň je \mathbf{r} vlastní vektor matice \mathbf{R} odpovídající vlastnímu číslu $\lambda = 1$. Autoři definovali následně vektor \mathbf{p} , který plně reprezentuje požadovanou rotaci jako

$$\mathbf{p} = 2 \sin \frac{\vartheta}{2} \mathbf{r}, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi. \quad (4.41)$$

Zpětný převod na matici rotace určuje rovnice

$$\mathbf{R} = \left(1 - \frac{|\mathbf{p}|^2}{2}\right) \mathbf{I} + \frac{1}{2} \left(\mathbf{p}\mathbf{p}^T + \sqrt{4 - |\mathbf{p}|^2} \cdot \text{skew}(\mathbf{p})\right), \quad (4.42)$$

kde definice operátoru *skew* je dána rovnicí (8.23). Pomocí odvození je pak představen jednoduchý algoritmus pro nalezení řešení rotační matice sestavením nejprve soustavy rovnic z jednotlivých měření

$$\text{skew}(\mathbf{p}_{N_{i+1}}^{N_i} + \mathbf{p}_{S_{i+1}}^{S_i}) \mathbf{P}_S^N = \mathbf{p}_{S_{i+1}}^{S_i} - \mathbf{p}_{N_{i+1}}^{N_i}. \quad (4.43)$$

Vektory $\mathbf{p}_{N_{i+1}}^{N_i}$ a $\mathbf{p}_{S_{i+1}}^{S_i}$ jsou určeny převodem měřených matic $\mathbf{T}_{N_{i+1}}^{N_i}$ a $\mathbf{T}_{S_{i+1}}^{S_i}$ do reprezentace pomocí obecné osy rotace (4.40) a přepočítáním dle rovnice (4.41). Vektor $\hat{\mathbf{p}}_S^N$ je odhadnut pomocí metody nejmenších čtverců. Následně je využit pro nalezení vektoru

$$\hat{\mathbf{p}}_S^N = \frac{2\hat{\mathbf{p}}_S^N}{\sqrt{1 + |\hat{\mathbf{p}}_S^N|^2}}. \quad (4.44)$$

Ten již představuje hledaný vztah natočení a do matice $\hat{\mathbf{R}}_S^N$ může být převeden pomocí rovnice (4.42).

4.4.2 Řešení rotační rovnice pomocí kvaternionů – ZR metoda

Jinou cestu zvolili při řešení hand-eye kalibrace Zhuang a Roth (1991), kteří odvodili řešení rotační rovnice na základě kvaternionů, viz popis jednotkového kvaternionu v příloze A.3. Homogenní transformační rovnice (2.4) je převedena do rovnice s kvaterniony

$$\xi_{N_{i+1}}^{N_i} \otimes \xi_S^N = \xi_S^N \otimes \xi_{S_{i+1}}^{S_i}. \quad (4.45)$$

Kvaterniony $\xi_{N_{i+1}}^{N_i}$, $\xi_{S_{i+1}}^{S_i}$ a ξ_S^N jsou dány rovnicemi (8.15), (8.16), (8.18) využívající převedení příslušných rotačních matic na reprezentaci pomocí úhlu a jednotkové osy otáčení

$$\mathbf{R}_{N_{i+1}}^{N_i} = \text{Rot}(\mathbf{k}_{N_{i+1}}^{N_i}, \theta_i), \quad (4.46)$$

$$\mathbf{R}_{S_{i+1}}^{S_i} = \text{Rot}(\mathbf{k}_{S_{i+1}}^{S_i}, \theta_i), \quad (4.47)$$

$$\mathbf{R}_S^N = \text{Rot}(\mathbf{k}_S^N, \omega). \quad (4.48)$$

Úhly otočení okolo jednotkové osy jsou pro obě matice $\mathbf{R}_{N_{i+1}}^{N_i}$ a $\mathbf{R}_{S_{i+1}}^{S_i}$ shodné. Úpravou kvaternionové rovnice lze pak odvodit zápis soustavy rovnic řešitelných pomocí metody nejmenších čtverců

$$\mathbf{G} \cdot \mathbf{z} = \mathbf{h}, \quad (4.49)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \text{skew}(\mathbf{k}_{N_2}^{N_1} + \mathbf{k}_{S_2}^{S_1}) \\ \text{skew}(\mathbf{k}_{N_3}^{N_2} + \mathbf{k}_{S_3}^{S_2}) \\ \vdots \end{bmatrix}, \quad (4.50)$$

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{S_2}^{S_1} - \mathbf{k}_{N_2}^{N_1} \\ \mathbf{k}_{S_3}^{S_2} - \mathbf{k}_{N_3}^{N_2} \\ \vdots \end{bmatrix}. \quad (4.51)$$

Pomocí odhadnutého vektoru $\hat{\mathbf{z}}$ jsou poté určeny parametry rotační matice \mathbf{R}_S^N

$$\hat{\mathbf{k}}_S^N = \frac{\hat{\mathbf{z}}}{\|\hat{\mathbf{z}}\|}, \quad (4.52)$$

$$\hat{\omega} = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{\hat{\mathbf{z}}_{\max}}{\hat{\mathbf{k}}_{S,\max}^N} \right), \quad (4.53)$$

kde index *max* značí největší prvek daného vektoru. Rotační matice $\hat{\mathbf{R}}_S^N$ je vypočtena dosazením $\hat{\mathbf{k}}_S^N$ a $\hat{\omega}$ do rovnice (4.48). Výhodou tohoto odvození je možnost zahrnout i změny rotace $\theta_i = \pm 180^\circ$, které odpovídají změnám polohy příruby z jedné krajní pozice do druhé.

4.4.3 Řešení rotační matice pomocí Euklidovy grupy – PM metoda

Jiný postup k nalezení \mathbf{R}_S^N zvolili Park a Martin (1994), kteří hledali řešení v Euklidově grupě, jelikož svým fyzikálním významem transformační matice spadají do speciální Euklidovy grupy SE(3). Za pomoci teorie Lieovy algebry pak odvodili algebraické řešení rovnice (2.3), ale i variantu uvažující přítomnost šumu, a tedy potřeby většího počtu měření. Matematické pozadí je možné najít v daném článku, níže budou uvedeny jen důležité skutečnosti vzhledem k algoritmu pro kalibraci nástroje. Matice rotace patří do speciální Lieovy grupy SO(3), jejíž Lieova algebra je vektorovým prostorem složeným z antisymetrických matic 3x3 dle rovnice (8.23). Ty lze pomocí operace „exponenciální zobrazení“ převést do Lieovy grupy SO(3). Obrácenou operací je inverze exponenciálního zobrazení, také nazývanou „logaritmické zobrazení“, kterou lze vyjádřit jako

$$\log \mathbf{R} = \frac{\varphi}{2 \sin \varphi} (\mathbf{R} - \mathbf{R}^T), \quad (4.54)$$

kde φ odpovídá

$$1 + 2 \cdot \cos \varphi = \text{Tr}(\mathbf{R}), \quad |\varphi| < \pi, \quad \|\log \mathbf{R}\|^2 = \varphi^2. \quad (4.55)$$

Pomocí přístupu řešení přes Lieovy grupy lze rotační rovnici (2.11) přeformulovat operací logaritmického zobrazení na

$$\mathbf{R}_S^N \cdot \boldsymbol{\beta}_i = \boldsymbol{\alpha}_i, \quad (4.56)$$

$$\boldsymbol{\beta}_i = \text{skewToVector}(\log \mathbf{R}_{S_{i+1}}^{S_i}), \quad (4.57)$$

$$\boldsymbol{\alpha}_i = \text{skewToVector}(\log \mathbf{R}_{N_{i+1}}^{N_i}). \quad (4.58)$$

Hledaná matice rotace \mathbf{R}_S^N je pak získána minimalizací kritéria

$$\eta_{PM} = \sum_i \|\mathbf{R}_S^N \boldsymbol{\beta}_i - \boldsymbol{\alpha}_i\|^2, \quad (4.59)$$

jejíž řešení je dáno jako

$$\hat{\mathbf{R}}_S^N = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-\frac{1}{2}} \mathbf{M}^T, \quad (4.60)$$

$$\mathbf{M} = \sum_i \boldsymbol{\beta}_i \boldsymbol{\alpha}_i^T. \quad (4.61)$$

Důležitá je ještě poznámka nutnosti alespoň tří změn poloh, aby matice \mathbf{M} byla regulární a existovalo tak řešení.

4.4.4 Jednofázový algoritmus – ZS metoda

Zmíněný problém pro dvoufázové vyhledávání transformační matice je možné obejít použitím jednofázového iteračního algoritmu Zhuang a Shiu (1993), jenž hledá parametry rotační a translační části současně. Jejich publikace ukazuje, že jednofázový iterační algoritmus je přesnější než dvoufázový neiterační, pokud šum ovlivňující matici $\mathbf{R}_{S_{i+1}}^{S_i}$ není zanedbatelný ve srovnání se šumem působící na translační vektor $\mathbf{P}_{S_{i+1}}^{S_i}$. Algoritmus zavádí matici \mathbf{Z}_i vyjadřující měřicí chybu daného posunu

$$\mathbf{Z}_i = \mathbf{T}_{N_{i+1}}^{N_i} \mathbf{T}_S^N - \mathbf{T}_S^N \mathbf{T}_{S_{i+1}}^{S_i}, \quad (4.62)$$

který je přepsatelný do vektorové reprezentace vztahem

$$\mathbf{z}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{Z_i} \\ \text{Col}(\mathbf{R}_{Z_i})_1 \\ \text{Col}(\mathbf{R}_{Z_i})_2 \\ \text{Col}(\mathbf{R}_{Z_i})_3 \end{bmatrix}. \quad (4.63)$$

Operátor $\text{Col}(\cdot)_i$ značí i -tý sloupec dané matice. Chybový vektor \mathbf{z}_i bude v případě nepřítomnosti šumu nulový, v reálné situaci jej lze ale využít k definici kriteriální funkce pro minimalizaci

$$\eta_{ZS} = \sum_i \mathbf{z}_i(\boldsymbol{\rho})^T \mathbf{z}_i(\boldsymbol{\rho}). \quad (4.64)$$

Vektor $\boldsymbol{\rho}$ parametrizuje transformační matici \mathbf{T}_S^N . Jeho volba může být dána například jako vektor o velikosti 6×1 , jenž se skládá z úhlů Roll-Pitch-Yaw schématu matice \mathbf{R}_S^N a vektoru posunutí \mathbf{P}_S^N . Jelikož kriteriální funkce je nelineární vzhledem k hledanému vektoru $\boldsymbol{\rho}$, řešení je možné nalézt pomocí některých známých numerických iteračních metod implementovaných ve výpočetních softwarech, např. Gauss-Newtonova metoda (Björck, 1996) nebo algoritmus Levenberg-Marquardt (Marquardt, 1963). V daném článku s odvozeným algoritmem je v případě potřeby definována i Jacobiho matice a rovnice pro iterační vyhledávání transformační matice \mathbf{T}_S^N . Jako počáteční odhad může být využita přibližná ruční kalibrace skeneru jako nástroje robota. Algoritmus lze zjednodušit na případ, kdy není měřitelná matice $\mathbf{R}_{S_{i+1}}^{S_i}$. Výsledné řešení při redukci vektoru \mathbf{z}_i na první 3 řádky je ale stejné jako v původním případě.

4.5 Návrh iterativního algoritmu pro zpřesnění hand-eye kalibrace IRHEC

Většina publikací zabývající se problematikou hand-eye kalibrace nástroje robota určí hledanou transformační matici $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ pouze na základě provedení několika kalibračních pozic. Případná chyba měření, vyhodnocení apod. u některé kalibrační pozice má následně silný vliv na chybu nalezené matice $\hat{\mathbf{T}}_S^N$. Proto bylo jedním z cílů autora této práce provádět větší množství kalibračních pozic a následně navrhnout algoritmus pro zpřesnění hand-eye kalibrace (Iterative Refinement of Hand-Eye Calibration *IRHEC*), který by selektoval vhodné kalibrační pozice pro finální řešení $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ a odstraňoval z výběru kalibrační pozice s největší chybou dle zvoleného kritéria (Chaluš a Liška, 2018; Liška et al., 2018a).

Vstupem do navrženého algoritmu jsou všechny změřené kalibrační pozice nad kalibračním objektem. Pro každou kalibrační pozici je tak známá poloha příruby $\mathbf{T}_{N_i}^W$ v souřadnicovém systému robota a poloha profilového skeneru $\mathbf{T}_{S_i}^E$ vzhledem ke kalibračnímu objektu. Z těchto transformačních matic je poté spočtena hledaná transformační matice $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ dle vybrané metody z podkapitoly 4.4. Pokud by polohování přírubou bylo naprosto přesné a také měřená data profilovým skenerem by neobsahovala žádnou chybu včetně jejich následného vyhodnocení, tak by transformační matice $\mathbf{T}_{E_i}^W$ spočteny pro každou kalibrační pozici pomocí nalezené transformační matice $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ ze vztahu

$$\mathbf{T}_{E_i}^W = \mathbf{T}_{N_i}^W \cdot \hat{\mathbf{T}}_S^N \cdot (\mathbf{T}_{S_i}^E)^{-1} \quad (4.65)$$

měly totožný tvar. Tudíž by se i jednotlivé počátky ${}^W\mathbf{E}_i$ souřadného systému kalibračního objektu CS_E

$$\begin{bmatrix} {}^W\mathbf{E}_i \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{E_i}^W [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{E_i}^W \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.66)$$

ve světovém souřadnicovém systému CS_W nacházely na stejné pozici odpovídající jeho počátku \mathbf{E} . Ve skutečnosti ovšem body ${}^W\mathbf{E}_i$ tvoří určitý shluk kvůli nepřesnostem polohování, chybám měření a chybám vyhodnocení dat, viz obr. 4.13. Předpokladem navrženého algoritmu *IRHEC* je, že vypočtená transformační matice $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ alespoň přibližně odpovídá reálné skutečnosti. Kalibrační pozice s největší chybou se pak projeví největší vzdáleností bodů ${}^W\mathbf{E}_i$ od středu jejich shluku. Hledaná transformační matice $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ je iterativně upřesňována následujícím algoritmem:

1. Z aktuálně vybraných kalibračních pozic urči pomocí zvolené metody hand-eye kalibrace transformační matici ${}^{iter}\hat{\mathbf{T}}_S^N$ pro dané číslo iterace *iter*.
2. Pro odfiltrování příliš velkých změn vypočti výslednou transformační matici $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ jako průměrnou transformační matici za zvolený počet N_f^{IR} předchozích iterací

$$\hat{\mathbf{T}}_S^N = \text{mean} \left(\left\{ ({}^{iter-N_f^{IR}+1})\hat{\mathbf{T}}_S^N, \dots, {}^{iter}\hat{\mathbf{T}}_S^N \right\} \right). \quad (4.67)$$

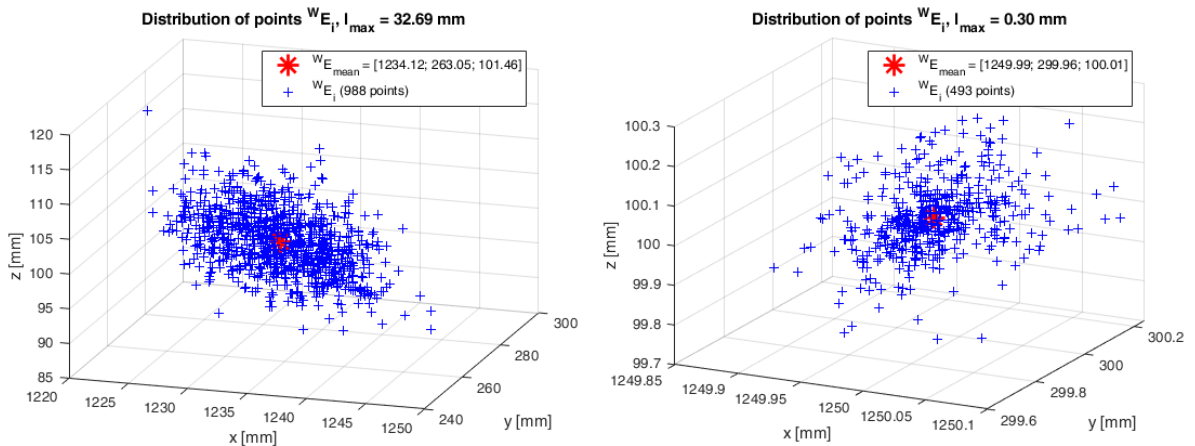
Na začátku jsou chybějící transformační matice do počtu N_f^{IR} nahrazeny maticemi počátečního odhadu ${}^{\text{guess}}\mathbf{T}_S^N$ zejména kvůli stabilitě algoritmu.

3. Pro každou kalibrační pozici najdi pozici ${}^W\mathbf{E}_i$ dle rovnic (4.65) a (4.66).
4. Vypočti průměrnou pozici ${}^W\mathbf{E}_M$ shluku daného body ${}^W\mathbf{E}_i$ a ke každému zjisti jeho euklidovskou vzdálenost l_i

$${}^W\mathbf{E}_M = \text{mean} \left(\left\{ {}^W\mathbf{E}_i \right\} \right), \quad (4.68)$$

$$l_i = \left\| {}^B\mathbf{E}_i - {}^B\mathbf{E}_M \right\|. \quad (4.69)$$

5. Pokud jsou všechny hodnoty l_i menší než zvolené maximum l_{\max} nebo počet zbývajících profilů je menší než zvolené minimum N_{\min}^{IR} , ukonči algoritmus. V opačném případě odstraň zvolený počet nejvzdálenějších kalibračních pozic N_{del}^{IR} a vrať se do kroku 1.



Obr. 4.13: Shluk jednotlivých bodů \mathbf{E}_i na začátku a na konci algoritmu *IRHEC*.

Vzhledem k vždy přítomným chybám v transformačních maticích $\mathbf{T}_{N_i}^W$ a $\mathbf{T}_{S_i}^E$ nebude shluk bodů ${}^W\mathbf{E}_i$ nikdy v jednom konkrétním bodě korespondující s počátkem \mathbf{E} souřadného systému kalibračního objektu. Navržený algoritmus *IRHEC* však významně zredukuje prostor, na kterém se shluk rozprostírá, viz ukázka rozložení shluku na začátku a na konci algoritmu na obr. 4.13. Hodnota l_{max} je snížena o dva řády. Toho je docíleno odstraněním kalibračních pozic přinášející největší chybu do výpočtu transformační matice $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ mezi profilovým skenerem a kalibračním objektem.

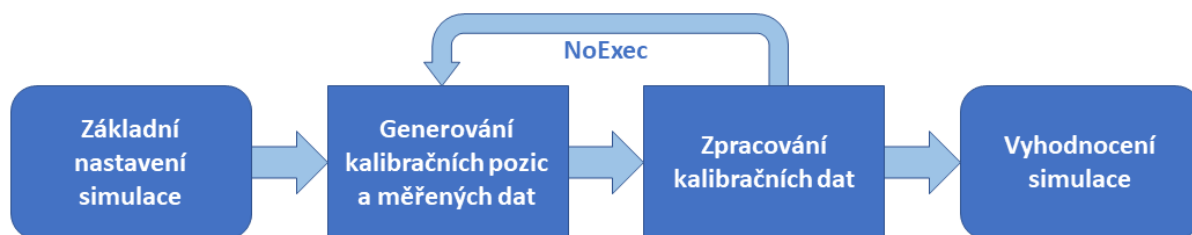
5 Analýza vlivů na přesnost procesu hand-eye kalibrace profilového skeneru

Následným krokem po vytvoření modelu MCP je jeho analýza, která odhalí nejproblematictější vlivy na výslednou přesnost a spolehlivost transformační matice \hat{T}_S^N . Dle této analýzy je optimalizováno nastavení generátoru kalibračních pozic a nastavení parametrů pro zpracování kalibračních dat. Některé zdroje zkoumaných vlivů jsou dány mechanickou konstrukcí STS systému jako například chyba polohování robota či chyba měření profilovým skenerem. Tyto vlivy nelze měnit, ale pomocí analýzy je možné zjistit jejich konkrétní dopad na přesnost kalibrace a uzpůsobit tak tomu její nastavení a průběh. Možnost simulace a analýzy nastavení generátoru kalibračních pozic a zpracování kalibračních dat představuje jeden z významných přínosů této práce. Lze tak nalézt nejslabší místa celého kalibračního procesu a navrhnout vhodné způsoby jejich ošetření. Analýza je také vhodným nástrojem při návrhu rozměrů kalibračního objektu. Analyzovaná přesnost kalibrace nakonec určuje oblasti využití konkrétního STS dle nároků zmíněných laserových technologií.

Jednotlivé části MCP (popsané v předchozí kapitole) byly autorem této práce implementovány ve výpočetním softwaru Matlab R2018b 64-bit. Tyto části pak byly využity při simulaci procesu kalibrace či jeho určité části za účelem jeho analýzy. Zdrojové kódy testovacích skriptů obsahují tisíce řádků, nad kterými autor strávil stovky hodin včetně ověřování svých poznatků ze simulací v reálném prostředí na robotickém pracovišti. Díky tomu mohl provést řadu úprav a doplnění generátoru kalibračních pozic i vyhodnocovací fáze kalibrace pro dosažení její větší přesnosti a robustnosti. Cílem této kapitoly je nejprve detailně popsat nastavení, průběh a vyhodnocení simulací. Podle uvedeného postupu bude možné replikovat provedené simulace libovolnému čtenáři se stejnými výsledky. Tento postup autorovi chyběl u většiny jemu známých publikací. V dalších podkapitolách budou pak rozebrány nejvýznamnější či nejzajímavější vlivy na kalibraci profilového skeneru jako nástroje robota a jejich dopady. Autor této práce si je vědom, že jedním ze způsobů analýzy by mohlo být identifikování všech nastavitelných parametrů. Pro každý z nich následně zvolit dovolený rozsah a provést simulace všech možných kombinací, ze kterých by byla vybrána varianta s nejmenší odchylkou hledané transformační matice \hat{T}_S^N . Uživatel by však v tomto případě neznal dopady jednotlivých parametrů na výslednou kalibraci a těžko by určoval, zda je daná konfigurace dostatečně robustní. Navíc tento způsob by vyžadoval výpočetní čas v řádu týdnů či dokonce měsíců na některém z výpočetních serverů a byl by platný pouze pro konkrétní konfiguraci STS. Vzhledem k osobním zkušenostem autora s reálnými STS je postupné analyzování jednotlivých vlivů vhodnější postup, kterým lze získat odborné poznatky o širším okruhu možných změn konfigurací STS (např. výměna typu profilového skeneru).

5.1 Nastavení, průběh a vyhodnocení simulací

Velkou výhodou simulovaného procesu kalibrace nástroje oproti reálné kalibraci je možnost porovnání dat mezi výchozím MCP a modifikovaným MCP (určitou změnou parametru či vnesenou chybou). Lze tak jednoznačně analyticky sledovat vliv modifikace MCP na přesnost výsledné kalibrace nebo přesnost některých mezikroků ve vyhodnocení. Na obr. 5.1 je zobrazen diagram simulace konkrétní konfigurace MCP. Nejprve jsou nastaveny všechny potřebné



Obr. 5.1: Diagram simulace analýzy MCP s konkrétní konfigurací parametrů.

parametry modelu včetně konkrétní hodnoty testovaného vlivu (např. velikost chyby opakovatelnosti robota, počet generovaných kalibračních pozic atd.). Tato konfigurace modelu je následně opakovaně simulována zvoleným počtem provedení *NoExec*. **V následujícím textu je tedy zapotřebí mít na paměti, že pod pojmem jedna simulace se skrývá definovaný počet provedení kalibrace nástroje se stejným nastavením MCP.** Výsledky jednotlivých provedení jsou nakonec hromadně vyhodnoceny z pohledu několika faktorů, nejen z pohledu přesnosti hledané transformační matice $\hat{\mathbf{T}}_S^N$.

Autor této práce zavedl na základě svých zkušeností defaultní konfiguraci MCP pro jeho analýzu. Tato konfigurace obsahuje analyzované chyby STS v příloze B (chyby opakovatelnosti robota, chyby měření profilovým skenerem a chyby ruční kalibrace) a také částečně optimalizované nastavení generátoru kalibračních pozic a parametrů pro zpracování kalibračních dat. Tato defaultní konfigurace tak simuluje chování STS a zároveň umožňuje konvergenci hledané transformační matice $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ ke skutečné ${}^* \mathbf{T}_S^N$ ve všech provedeních simulace. Testování vlivu změny některého parametru či chyby na modifikovaném MCP pak bude prováděno jeho změnou v této defaultní konfiguraci. Jednotlivé hodnoty defaultní konfigurace budou uváděny postupně při následujícím popisu jednotlivých kroků simulace na obr. 5.1. Během tohoto popisu budou také představeny důležité pozorované veličiny včetně způsobu zobrazení jak v mezikrocích simulace, tak v závěrečném vyhodnocení všech provedení.

5.1.1 Základní nastavení

V prvním kroku je potřeba nastavit parametry, které se během jednotlivých provedení simulované konfigurace MCP nebudou měnit. Parametry modelu robota a profilového skeneru byly uvedeny v předchozí kapitole. Pro polohování robota bude v tomto případě uvažována pouze výrobcem udávaná chyba opakovatelnosti. Vliv případné absolutní chyby robota bude popsán v následující samostatné kapitole. Jak již bylo zmíněno, vstupní chyby STS (související s robotem, profilovým skenerem a jeho ruční kalibrací) jsou simulovány dle pravděpodobnostních rozdělení popsanych v příloze B. Ostatní nastavení, jejich defaultní hodnoty a významy jsou následující:

- $NoExec = 100$ – počet provedení konkrétní konfigurace simulace.
- $NoP = 200$ – počet generovaných kalibračních pozic pro každé provedení simulace.
- $timeout_{genData} = 60\text{ s}$ – časový limit pro vygenerování další kalibrační pozice v generátoru. Pokud po tuto dobu není nalezena nová kalibrační pozice splňující dané podmínky konfigurace, je provedení simulace ukončeno s patřičně definovanou chybou.

- ${}^*T_S^N = T([-166 \quad -17 \quad 260]^T, [91 \quad -2 \quad -90]^T)$ – skutečná hodnota transformační matice reprezentující vzájemný vztah TCP příruby robota a TCP profilového skeneru vybraná na základě reálného STS.
- $Q_0 = [140^\circ \quad 20^\circ \quad -60^\circ \quad -60^\circ \quad 70^\circ \quad 20^\circ]$ – výchozí vektor kloubových souřadnic robota zvolený na základě mechanického uspořádání uchycené laserové procesní hlavy a profilového skeneru k přírubě robota.
- $c^* = [120 \quad 80 \quad 80]$ – vektor rozměrů kalibračního objektu, který byl autorem navržen a doposud využíván. Vzhledem k přesné výrobě v rámci desetin mikrometrů CNC strojem nebudou v simulacích uvažovány chyby rozměrů kalibračního objektu.
- ${}^*T_E^W = T([600 \quad 0 \quad 100]^T, [0 \quad 0 \quad 0]^T)$ – pozice kalibračního objektu v CS_W potřebná pro generování kalibračních pozic profilového skeneru. Pozici kalibračního objektu je v reálném procesu možné určit velmi přesně pomocí kalibrovaného fyzického hrotu jako nástroje robota, takže ani zde nebude uvažována chyba umístění.
- $T_{S_{start}}^E = T([60 \quad 0 \quad 240]^T, [0 \quad 180 \quad -90]^T)$ – transformační matice výchozí pozice ${}^E S_{start}$ profilového skeneru nad kalibračním objektem zvolená na základě jeho měřicího rozsahu.
- $S_{lim} = \{[80; 50; 60]^T, [30; 30; 30]^T\}$ – dovolený rozsah kalibračních pozic skeneru vzhledem k výchozí poloze.

5.1.2 Generování kalibračních pozic a měřených dat

Fázi generování kalibračních dat lze rozdělit do dvou částí. První vychází z již zmíněného obecného postupu v podkapitole 3.3. Kalibrační pozice příruby robota N_i (daná kloubovými souřadnicemi Q_i) a pozice profilového skeneru S_i spolu s profilovými daty Y_i jsou generovány a otestovány na základě zadané ruční kalibrace profilového skeneru ${}^{guess}T_S^N$. Pro obě pozice a měřená data jsou pak ve druhé části generátoru napočtena nominální kalibrační data MCP a modifikovaná kalibrační data MCP na základě skutečné transformace ${}^*T_S^N$. Tato data by byla ve skutečnosti měřena během kalibračního procesu. V průběhu a na konci analýzy simulace tak mohou být sledovány a porovnávány tři typy dat:

- Očekávaná kalibrační data napočtená na základě ${}^{guess}T_S^N$ - značena indexem „exp“.
- Skutečná nominální kalibrační data napočtená na základě ${}^*T_S^N$ bez jakýchkoliv chyb v modelu MCP - značena indexem „*“.
- Modifikovaná kalibrační data napočtená na základě ${}^*T_S^N$ a modifikovaného MCP (simulace měřených dat z reálného kalibračního procesu) - značena indexem „meas“.

Pro každé provedení simulace je vygenerována nová hodnota ruční kalibrace profilového skeneru ${}^{guess}T_S^N$ dle postupu v příloze B.3. Nyní bude popsána sekvence kroků generátoru dat pro jednu kalibrační pozici ze zvoleného počtu pozic NoP :

1. Pomocí algoritmu popsaného v podkapitole 4.3.3 je náhodně vygenerována transformační matice ${}^{exp}T_{S_i}^E$ reprezentující očekávanou polohu profilového skeneru ${}^E S_i^{exp}$ nad kalibračním objektem.

2. Dle zadané pozice kalibračního objektu a pozice skeneru nad kalibračním objektem je spočtena očekávaná pozice skeneru ${}^W\mathbf{S}_i^{\text{exp}}$ v CS_W reprezentovaná maticí

$$\exp\mathbf{T}_{S_i}^W = {}^*\mathbf{T}_E^W \cdot \exp\mathbf{T}_{S_i}^E. \quad (5.1)$$

3. Dále je pak pomocí ruční kalibrace určena očekávaná pozice příruby robota ${}^W\mathbf{N}_i^{\text{exp}}$ reprezentovaná maticí

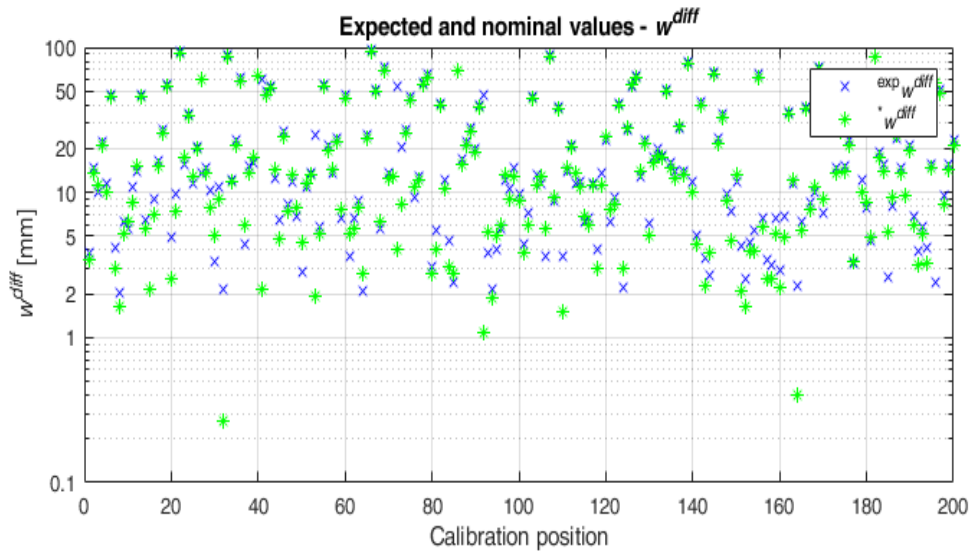
$$\exp\mathbf{T}_{N_i}^W = \exp\mathbf{T}_{S_i}^W \cdot \left(\text{guess}\mathbf{T}_S^N \right)^{-1}. \quad (5.2)$$

4. Pro pozici příruby je dále určen vektor kloubových souřadnic $\mathbf{Q}_i^{\text{exp}}$ pomocí IGM úlohy (Brandstötter et al., 2014) popsané v podkapitole 4.1 a výchozího vektoru \mathbf{Q}_0 .
5. Nyní je provedena trojí kontrola dosud vygenerovaných dat. Pokud jedna z následujících podmínek není splněna, je generování vráceno zpět do kroku 1:
- Pozice ${}^W\mathbf{S}_i^{\text{exp}}$ a ${}^W\mathbf{N}_i^{\text{exp}}$ nesmí mít ve svém okolí $\text{calPosLim}_{\text{Trans}} = 1 \text{ mm}$ žádnou jinou vygenerovanou pozici v předchozích iteracích.
 - Alespoň jeden z úhlů mezi směrovými vektory os pozic ${}^W\mathbf{S}_i^{\text{exp}}$ a ${}^W\mathbf{N}_i^{\text{exp}}$ a příslušnými směrovými vektory os vygenerovaných pozic v předchozích iteracích musí mít velikost větší než $\text{calPosLim}_{\text{Rot}} = 1^\circ$. Úhly mezi příslušnými vektory os dvou rotačních matic \mathbf{R}_2^1 a \mathbf{R}_3^2 lze spočítat jako

$$\begin{aligned} \delta_x(\mathbf{T}_2^1, \mathbf{T}_3^2) &= \cos^{-1} \left(\left(\begin{matrix} 1 \\ 2 \end{matrix} \mathbf{r}_x \right)^T \cdot \begin{matrix} 2 \\ 3 \end{matrix} \mathbf{r}_x \right), \\ \delta_y(\mathbf{T}_2^1, \mathbf{T}_3^2) &= \cos^{-1} \left(\left(\begin{matrix} 1 \\ 2 \end{matrix} \mathbf{r}_y \right)^T \cdot \begin{matrix} 2 \\ 3 \end{matrix} \mathbf{r}_y \right), \\ \delta_z(\mathbf{T}_2^1, \mathbf{T}_3^2) &= \cos^{-1} \left(\left(\begin{matrix} 1 \\ 2 \end{matrix} \mathbf{r}_z \right)^T \cdot \begin{matrix} 2 \\ 3 \end{matrix} \mathbf{r}_z \right). \end{aligned} \quad (5.3)$$

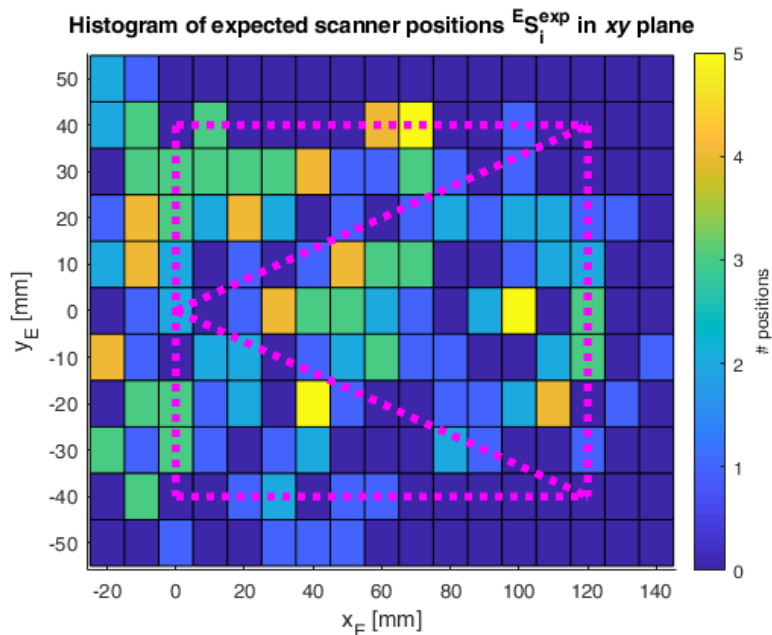
- Kontrola, zda konfigurace kloubových souřadnic $\mathbf{Q}_i^{\text{exp}}$ není v blízkosti některé ze singulárních poloh robota.
6. Pro očekávanou pozici profilového skeneru nad kalibračním objektem je dle podkapitoly 4.3.4 vygenerována posloupnost bodů měřeného profilu $\{ {}^S\mathbf{p}_j \}_i^{\text{exp}}$ kalibračního objektu spolu s pozicemi průsečíků ${}^S\mathbf{P}_k^{\text{exp}}$ a řešením ${}^{\text{exp}}\mathbf{w}_i^{\text{real}}$ nelineární soustavy rovnic (4.15). Pokud každá ze tří měřených stěn kalibračního objektu není reprezentována zvoleným minimálním počtem bodů v profilu $\text{pointsPerPlane}_{\text{min}} = 50$, je vráceno generování do kroku 1.
7. Pomocí postupu v podkapitole 4.3.2 je určeno nejbližší řešení ${}^{\text{exp}}\mathbf{w}_i^{\text{near}}$ k řešení ${}^{\text{exp}}\mathbf{w}_i^{\text{real}}$ a spočtena hodnota ${}^{\text{exp}}w_i^{\text{diff}}$ hodnotící funkce (4.27). Pokud je tato hodnota menší než zadané minimum $w_{\text{min}}^{\text{diff}} = 2 \text{ mm}$, je vráceno generování do kroku 1.

Tímto krokem končí fáze generování kalibračních pozic dle diagramu na obr. 3.2. Pokud se podařilo vygenerovat požadovaný počet kalibračních pozic NoP , jsou pro kalibraci převzaty pouze hodnoty kloubových souřadnic $\mathbf{Q}_i^{\text{exp}}$ a ${}^{\text{exp}}\mathbf{w}_i^{\text{real}}$. Robot je postupně polohován do pozic dle $\mathbf{Q}_i^{\text{exp}}$, v nichž jsou v ustáleném stavu snímána profilová data měřeného kalibračního objektu. Hodnoty ${}^{\text{exp}}\mathbf{w}_i^{\text{real}}$ jsou pak využity při zpracování kalibračních dat jako počáteční

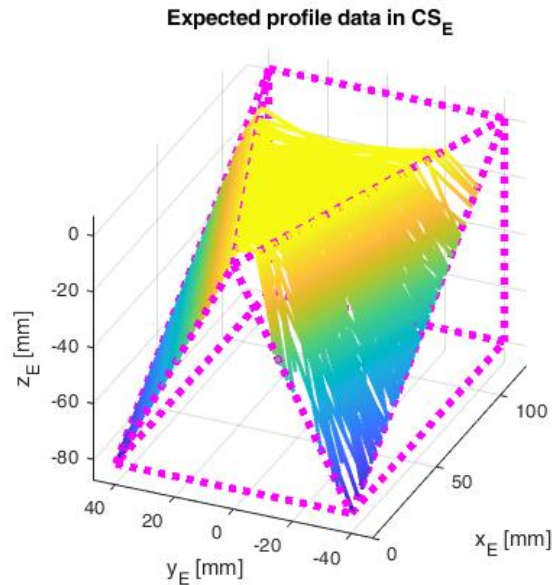


Obr. 5.2: Rozložení očekávaných a skutečných hodnot hodnotící funkce w_i^{diff} – defaultní MCP.

hodnoty w_i^{guess} v rovnici (4.25). Z pohledu analýzy vygenerovaných kalibračních pozic je vhodné sledovat hodnoty w_i^{exp} hodnotící funkce (4.27). Jak bude později ukázáno, hraje nastavení limitu $w_{\text{min}}^{\text{diff}}$ zásadní roli v procesu kalibrace. Pro defaultní MCP je ukázka rozložení těchto hodnot v jednom provedení simulace na obr. 5.2. Pro lepší čitelnost je osa y vykreslena v logaritmském měřítku. Dalším důležitým aspektem pro pozorování je rozložení kalibračních pozic profilového skeneru v prostoru vůči kalibračnímu objektu. Lze tak sledovat využití dovoleného rozsahu S_{lim} , který může být případně korigován. K tomuto účelu je používán histogram četnosti kalibračních pozic v rovině xy CS_E , tedy při pohledu na kalibrační objekt shora, viz obr. 5.3. Do histogramu je navíc vykreslen půdorys kalibračního objektu pro lepší



Obr. 5.3: Histogram očekávaných kalibračních pozic skeneru v xy rovině CS_E – defaultní MCP.



Obr. 5.4: Rozložení očekávaných profilových dat měřeného kalibračního objektu v jednotlivých pozicích skeneru přepočtené do CS_E – defaultní MCP.

orientaci. Posledním navrženým hodnocením vygenerovaných kalibračních pozic je rozložení očekávaných profilových dat $\{ {}^S\mathbf{p}_j \}_i^{\text{exp}}$, které jsou přepočteny do společného souřadného systému CS_E , viz obr. 5.4. Na obrázku je vidět rozmístění jednotlivých profilů vzhledem k fialově vykresleným hranám kalibračního objektu. Především kvůli parametru $pointsPerPlane_{min}$ stanovenému v kroku 6 nejsou měřeny oblasti ve špičce a na koncové části kalibračního objektu. Tato informace může být využita pro výrobu jen využitě části kalibračního objektu a ušetření tak finančních nákladů na materiál.

Druhá fáze generátoru kalibračních dat je vytvořena jen pro analýzu MCP. Nahrazuje kalibraci její simulací. Skutečná transformační matice ${}^*T_S^N$ je totiž známá. Definované jsou i vstupní chyby pro polohování robota a měření profilových dat skenerem, viz příloha B. V každém následujícím kroku jsou tak vygenerována nominální kalibrační data a zároveň měřená data simulující kalibraci:

8. Chyba jednotlivých aktuátorů není uvažována, proto očekávané kloubové souřadnice $\mathbf{Q}_i^{\text{exp}}$ odpovídají skutečným souřadnicím \mathbf{Q}_i^* a měřeným souřadnicím $\mathbf{Q}_i^{\text{meas}}$. Na základě známých DH parametrů je dle rovnic (4.1) a (4.2) možné spočítat transformační matici ${}^{\text{meas}}T_{N_i}^W$ reprezentující polohu příruby $\mathbf{N}_i^{\text{meas}}$, která je během kalibrace vracena z kontroléru robota. Transformační matice ${}^{\text{meas}}T_{N_i}^W$ zároveň odpovídá transformační matici ${}^{\text{exp}}T_{N_i}^W$ určené v kroku 3. Skutečná poloha příruby \mathbf{N}_i^* však bude nepatrně odlišná, neboť je nutné brát v potaz chybu opakovatelnosti robota. Její transformační matice ${}^*T_{N_i}^W$ tak bude mít stejnou matici rotace jako ${}^{\text{meas}}T_{N_i}^W$, ale translační vektor ${}^*P_{N_i}^W$ bude dán součtem translačního vektoru ${}^{\text{meas}}P_{N_i}^W$ a vygenerované chyby opakovatelnosti dle postupu v příloze B.1.
9. Skutečná pozice profilového skeneru \mathbf{S}_i^* je pak jednoznačně dána v CS_W i CS_E transformačními maticemi

$${}^* \mathbf{T}_{S_i}^W = {}^* \mathbf{T}_{N_i}^W \cdot {}^* \mathbf{T}_S^N, \quad (5.4)$$

$${}^* \mathbf{T}_{S_i}^E = \left(\left({}^* \mathbf{T}_{S_i}^W \right)^{-1} \cdot {}^* \mathbf{T}_E^W \right)^{-1}. \quad (5.5)$$

10. Pro skutečnou pozici profilového skeneru \mathbf{S}_i^* nad kalibračním objektem je nakonec (podkapitola 4.3.4) vygenerována posloupnost bodů skutečného profilu $\{ {}^S \mathbf{p}_j \}_i^*$ kalibračního objektu spolu s pozicemi průsečíků ${}^S \mathbf{P}_k^*$ a řešením ${}^* \mathbf{w}_i^{\text{real}}$. Měřená data profilovým skenerem jsou ale ještě ovlivněna chybou snímače. Proto je posloupnost bodů měřeného profilu $\{ {}^S \mathbf{p}_j \}_i^{\text{meas}}$ dána přičtením náhodně vygenerovaných odchylek k jednotlivým bodům profilu $\{ {}^S \mathbf{p}_j \}_i^*$ v ose x_S a z_S dle pravděpodobnostního rozdělení popsaného v příloze B.2.

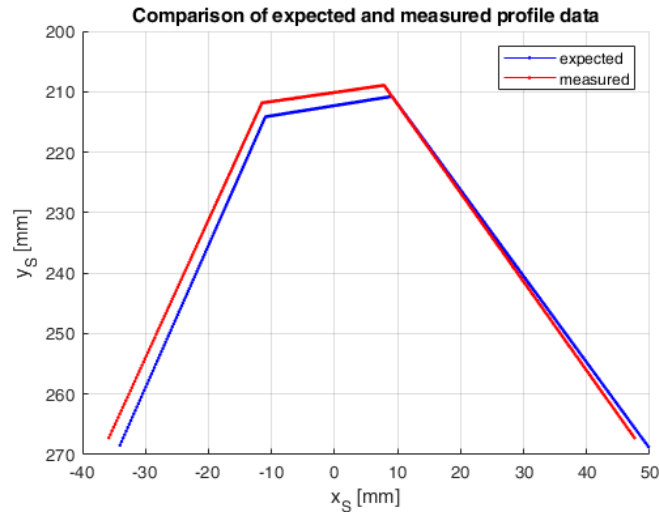
Výstupem simulované kalibrace pro následné zpracování kalibračních dat jsou pozice příruby $\mathbf{N}_i^{\text{meas}}$, profilová data $\{ {}^S \mathbf{p}_j \}_i^{\text{meas}}$ a hodnoty ${}^{\text{exp}} \mathbf{w}_i^{\text{real}}$, které jsou využity jako počáteční hodnoty $\mathbf{w}_i^{\text{guess}}$. Ostatní zmíněné proměnné ve druhé části generátoru slouží především pro možnost porovnání s očekávanými kalibračními daty z první části generátoru nebo pro porovnání s později zpracovanými kalibračními daty. Největší odchylky mezi očekávanými a skutečnými kalibračními daty způsobuje chyba vstupní ruční kalibrace skeneru ${}^{\text{guess}} \mathbf{T}_S^N$ vůči skutečné ${}^* \mathbf{T}_S^N$. Pro možnost porovnání odchylek dvou transformačních matic je autorem této práce definována translační odchylka transformačních matic δ_{Trans}

$$\delta_{Trans}(\mathbf{T}_2^1, \mathbf{T}_3^2) = \left\| \mathbf{P}_3^2 - \mathbf{P}_2^1 \right\| \quad (5.6)$$

a rotační odchylka δ_{Rot}

$$\delta_{Rot}(\mathbf{T}_2^1, \mathbf{T}_3^2) = \left| \delta_x(\mathbf{T}_2^1, \mathbf{T}_3^2) \right| + \left| \delta_y(\mathbf{T}_2^1, \mathbf{T}_3^2) \right| + \left| \delta_z(\mathbf{T}_2^1, \mathbf{T}_3^2) \right| \quad (5.7)$$

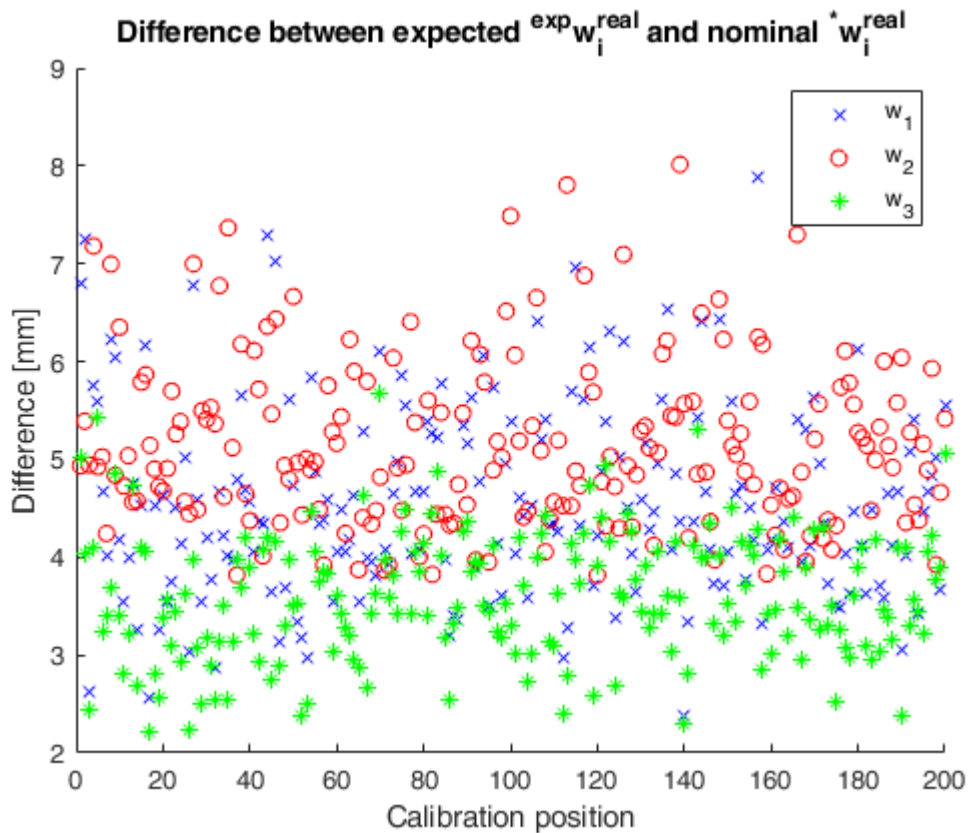
využívající úhly mezi příslušnými směrovými vektory dle rovnic (5.3). Jak již bylo zmíněno, rozdíl mezi očekávanou ${}^W \mathbf{N}_i^{\text{exp}}$ a skutečnou ${}^W \mathbf{N}_i^*$ pozicí příruby je vlivem chyby opakovatelnosti nepatrný, maximálně v setinách milimetru. Naproti tomu odchylka mezi očekávanou ${}^E \mathbf{S}_i^{\text{exp}}$ a skutečnou ${}^E \mathbf{S}_i^*$ pozicí profilového skeneru vůči kalibračnímu objektu už je v řádu milimetrů a jednotek stupňů. Tato chyba odpovídá velikosti chyby vstupního odhadu ${}^{\text{guess}} \mathbf{T}_S^N$ v daném provedení simulace. Rozsah těchto generovaných chyb je znázorněn v grafech přílohy na obr. 8.12. Odchylka mezi očekávanou ${}^E \mathbf{S}_i^{\text{exp}}$ a skutečnou ${}^E \mathbf{S}_i^*$ pozicí profilového skeneru pak způsobuje významný rozdíl mezi očekávaným $\{ {}^S \mathbf{p}_j \}_i^{\text{exp}}$ a měřeným $\{ {}^S \mathbf{p}_j \}_i^{\text{meas}}$ profilem. Ukázka rozdílu těchto profilů je na obr. 5.5, kde je jasně zřetelné jejich posunutí a různé natočení. To má samozřejmě vliv i na odlišnost očekávaných řešeních ${}^{\text{exp}} \mathbf{w}_i^{\text{real}}$ a skutečných řešeních ${}^* \mathbf{w}_i^{\text{real}}$. Jejich rozdíl pro defaultní MCP je na obr. 5.6. Změna pozice skeneru má také vliv na skutečnou hodnotu ${}^* w^{\text{diff}}$ hodnotící funkce (4.27), která je pro porovnání vykreslena společně s očekávanou hodnotou v grafu na obr. 5.2. Z grafu je patrné, že některé kalibrační pozice nyní nesplňují podmínku minimální hodnoty $w_{\text{min}}^{\text{diff}} = 2 \text{ mm}$ z kroku 7 generátoru, což může komplikovat navazující zpracování kalibračních dat.



Obr. 5.5: Porovnání očekávaného a měřeného profilu kalibračního objektu pro konkrétní pozici profilového skeneru S_i .

5.1.3 Zpracování kalibračních dat

Jak již bylo uvedeno, výstupem z měřicího procesu během kalibrace do jejího zpracování jsou pozice příruby N_i^{meas} z kontroléru robota, měřená profilová data $\{ S_i \mathbf{p}_j \}_i^{\text{meas}}$ a odhady řešení $\mathbf{w}_i^{\text{guess}}$ nelineární soustavy rovnic (4.15). Tato kalibrační data jsou (spolu s uživatelskými parametry pro nastavení) vstupem do procesu jejich zpracování za účelem nalezení hledané transformační matice \hat{T}_S^N . Zpracování dat částečně vychází z jednotlivých



Obr. 5.6: Rozdíl řešení nelineární soustavy rovnic pro očekávané a skutečné kalibrační pozice.

postupů v předchozí kapitole. Další části zpracování byly autorem doplněny na základě simulací a reálných kalibrací. V každém provedení simulace je použit navržený algoritmus *IRHEC* popsáný v podkapitole 4.5 v kombinaci se všemi uvedenými metodami řešící rovnici hand-eye kalibrace (2.4). Proto pro každé provedení simulace budou napočteny 4 sady řešení odlišených indexy dle jmen autorů dané metody:

- *TL* – využití obecné osy rotace Tsai a Lenz (1989) popsané v podkapitole 4.4.1.
- *ZR* – využití kvaternionů Zhuang a Roth (1991) popsané v podkapitole 4.4.2
- *PM* – využití Euklidovy grupy Park a Martin (1994) popsané v podkapitole 4.4.3.
- *ZS* – využití jednofázového algoritmu Zhuang a Shiu (1993) popsané v podkapitole 4.4.4.

Nastavitelné parametry jsou opět částečně optimalizovány dle poznatků autora práce v první fázi testování MCP. Zároveň jsou nastaveny tak, aby bylo možné otestování defaultního MCP v širším rozsahu modifikovaných vlivů. Použité hodnoty nastavení budou uvedeny v jednotlivých krocích u následujícího popisu zpracování dat:

1. Z měřeného profilu $\{ {}^S\mathbf{p}_j \}_i^{\text{meas}}$ jsou pro každou kalibrační pozici odstraněny nezměřené body a body nepříslušející měřenému profilu kalibračního objektu (zejména případná část profilu podložky, na níž je umístěn kalibrační objekt).
2. Pro každý předzpracovaný profil spolu s příslušným odhadem řešení $\mathbf{w}_i^{\text{guess}}$ jsou (algoritmy v podkapitole 4.3.1 a 4.3.2) spočteny pozice průsečíků ${}^S\mathbf{P}_k$, řešení \mathbf{w}_i nelineární soustavy rovnic a pozice skeneru ${}^E\mathbf{S}_i$ reprezentovaná transformační maticí $\mathbf{T}_{S_i}^E$. Během tohoto kroku může dojít při zpracování zejména k těmto dvěma problémům:
 - V důsledku chybně určené ruční kalibrace ${}^{\text{guess}}\mathbf{T}_S^N$ je v některých pozicích skeneru změřen jen částečný profil kalibračního objektu či dokonce žádný.
 - Profil je špatně vyhodnocen vnitřními algoritmy profilového skeneru vlivem odlesků či okolního zdroje světla.

Obě situace jsou však dobře detekovatelné pomocí přírůstkového profilu a dané kalibrační pozice jsou tak z dalšího zpracování vyřazeny. V rámci simulovaného procesu kalibrace je pro každou úspěšně vyhodnocenou kalibrační pozici testováno vypočtené řešení \mathbf{w}_i . Pokud řešení \mathbf{w}_i je z možných řešení \mathbf{w}_m pro tuto i-tou pozici nejbližší k řešení ${}^*\mathbf{w}_i^{\text{real}}$, je kalibrační pozici nastaven příznak $correct_w_i = 1$, v opačném případě $correct_w_i = 0$.

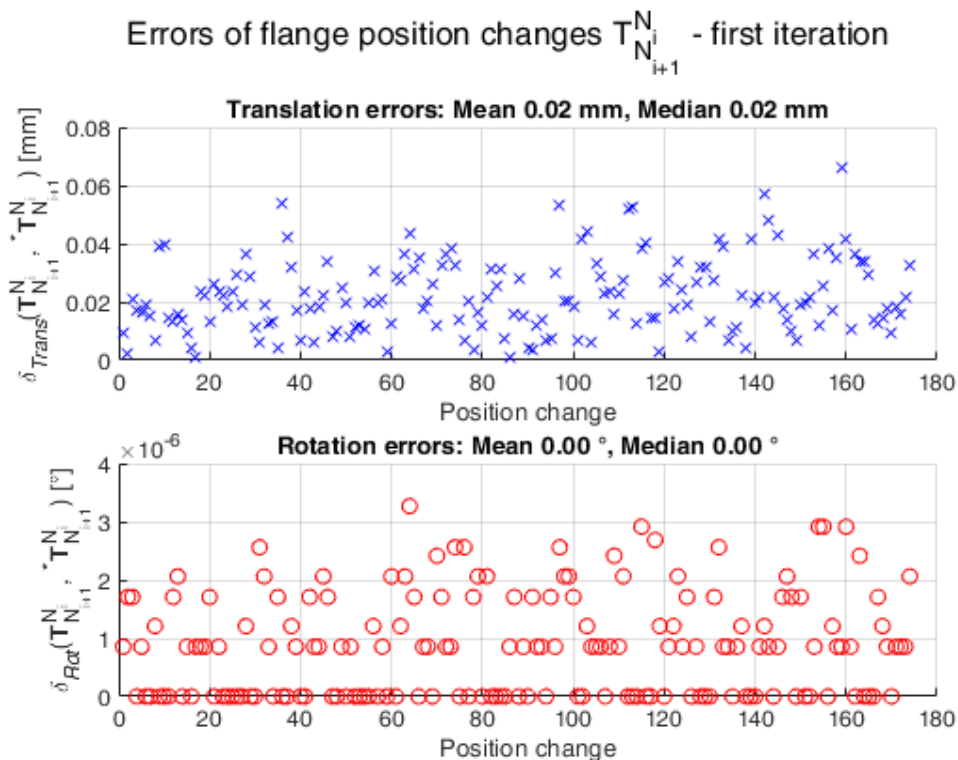
3. Pomocí nalezených průsečíků ${}^S\mathbf{P}_k$ pro i-tou kalibrační pozici a odhadu $\mathbf{w}_i^{\text{guess}}$ je dle algoritmu v 4.3.1 určena očekávaná transformační matice ${}^{\text{exp}}\mathbf{T}_{S_i}^E$. Ta je poté využita k výpočtu translační odchylky $\delta_{Trans}({}^{\text{exp}}\mathbf{T}_{S_i}^E, \mathbf{T}_{S_i}^E)$ dle (5.6) a úhlů mezi příslušnými osami $\delta_x({}^{\text{exp}}\mathbf{T}_{S_i}^E, \mathbf{T}_{S_i}^E)$, $\delta_y({}^{\text{exp}}\mathbf{T}_{S_i}^E, \mathbf{T}_{S_i}^E)$ a $\delta_z({}^{\text{exp}}\mathbf{T}_{S_i}^E, \mathbf{T}_{S_i}^E)$ dle (5.3). Pokud je translační odchylka větší než $Slimit_{Trans} = 20 \text{ mm}$ nebo jeden z úhlů větší než $Slimit_{Rot} = 10^\circ$, daná kalibrační pozice nespĺňuje podmínky na očekávané řešení ${}^{\text{exp}}\mathbf{T}_{S_i}^E$ a je vyřazena z dalšího zpracování. Počet kalibračních pozic splňujících tyto podmínky je značen *IR_NoInputPos*. V případě simulace je navíc určen počet kalibračních pozic

IR_NoCorrInputPos, jenž kromě splnění popsaných podmínek má také nastavený příznak *correct_w_i* = 1.

- Pomocí známých pozic příruby robota a pozic profilového skeneru lze určit jednotlivé změny poloh příruby $\mathbf{T}_{N_{i+1}}^{N_i}$ a skeneru $\mathbf{T}_{S_{i+1}}^{S_i}$ dle rovnic (2.5) a (2.6). Lze tedy řešit rovnici hand-eye kalibrace (2.4) pomocí navrženého algoritmu *IRHEC* (podkapitole 4.5) postupně pro všechny představené metody v podkapitolách 4.4.1 až 4.4.4. Pro algoritmus *IRHEC* byly nastaveny parametry $N_f^{IR} = 3$; $l_{max} = 0,3 \text{ mm}$; $N_{min}^{IR} = 20$ a $N_{del}^{IR} = 1$. Kromě nalezené transformační matice $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ jsou určeny ještě tyto proměnné popisující průběh algoritmu *IRHEC* v kombinaci s každou metodou:

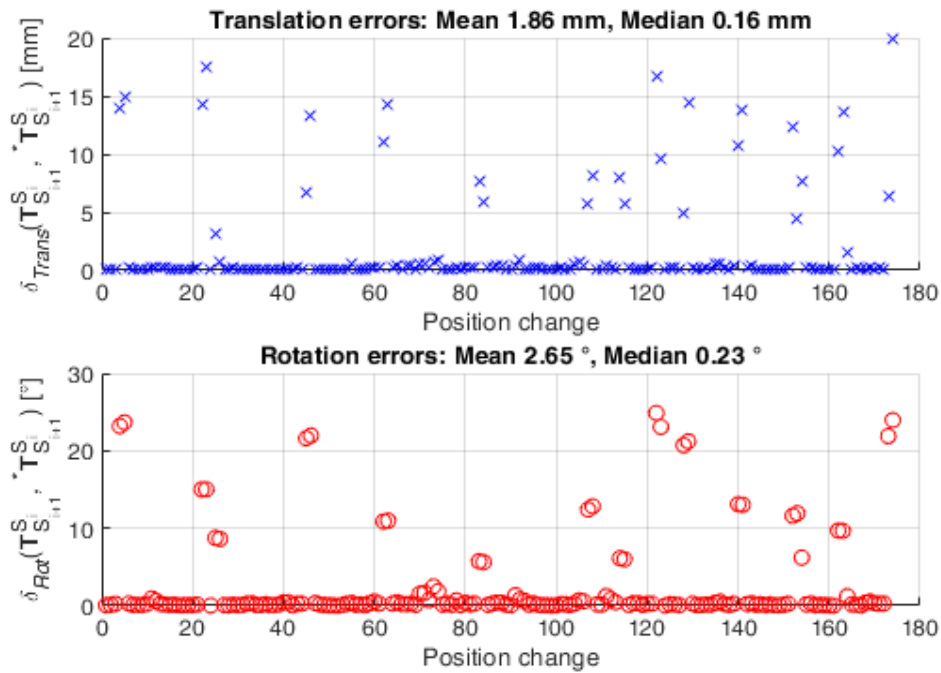
- *IR_NoIter* – počet provedených iterací.
- *IR_NoUsedPos* – počet využitých kalibračních pozic v poslední iteraci.
- *IR_NoCorrUsedPos* – počet využitých kalibračních pozic v poslední iteraci s příznakem *correct_w_i* = 1.
- *IR_Time* – doba výpočtu algoritmu *IRHEC*.

Tato fáze opět nabízí širokou škálu možností pro sledování průběhu zpracování kalibračních dat v mezikrocích či na jeho konci, zejména porovnání se skutečnými hodnotami během simulované kalibrace. Nejdůležitějšími informacemi jsou vstupní chyby změn polohy příruby a skeneru vstupujících do rovnice hand-eye kalibrace v kroku 4. Translační i rotační chyba změn polohování příruby $\mathbf{T}_{N_{i+1}}^{N_i}$ je pro defaultní MCP na obr. 5.7. Jelikož je uvažována pouze chyba opakovatelnosti robota, je rotační chyba nulová a translační chyba jen v řádu setin



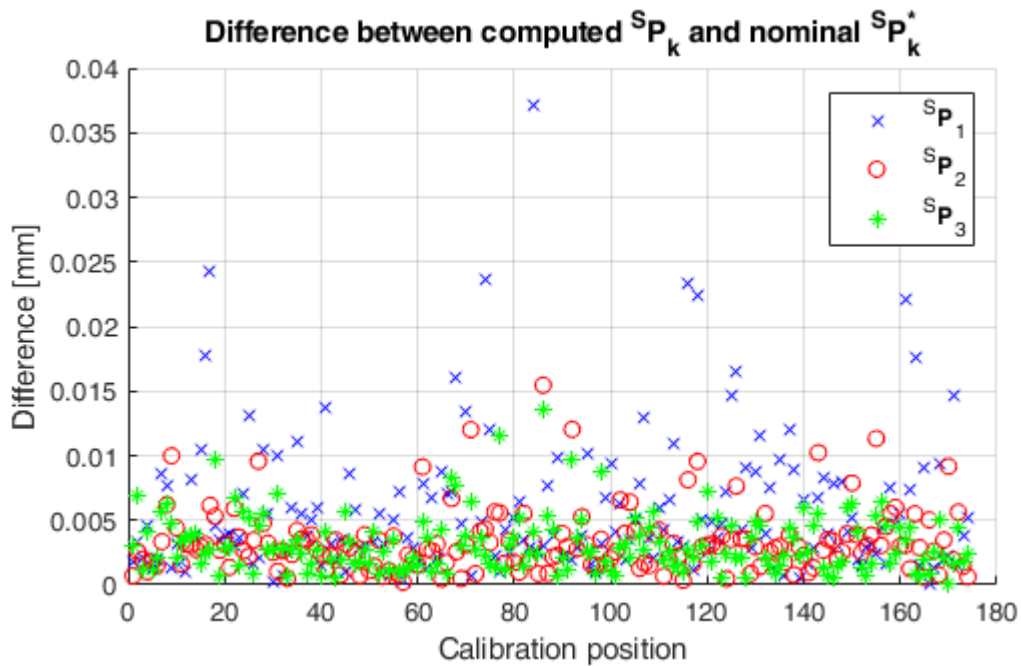
Obr. 5.7: Chyba změn polohy příruby v první iteraci algoritmu *IRHEC* – defaultní MCP.

Errors of scanner position changes $T_{S_{i+1}}^{S_i}$ - first iteration



Obr. 5.8: Chyba změn polohy skeneru v první iteraci algoritmu IRHEC - defaultní MCP.

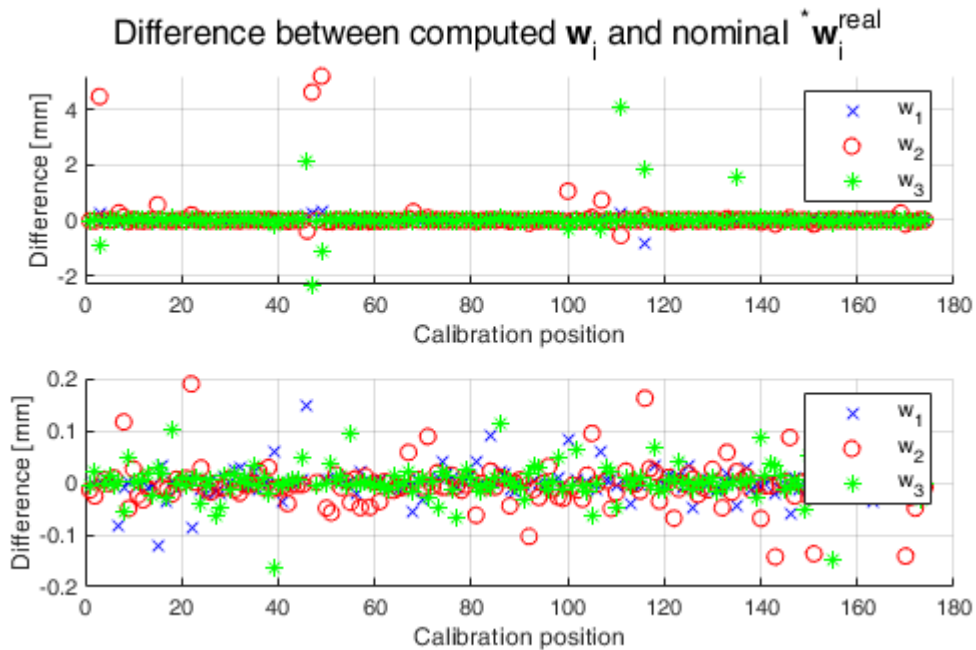
milimetru. Naproti tomu translační a rotační chyby změn polohy skeneru $T_{S_{i+1}}^{S_i}$ jsou řádově vyšší vlivem chyby měření skeneru a jeho následného vyhodnocení, viz obr. 5.8. Proto jedním z cílů autora je pomocí analýzy MCP zpřesnit výpočet pozice profilového skeneru ${}^E S_i$ reprezentované transformační maticí $T_{S_i}^E$. První zdroj výsledné chyby pozice skeneru ${}^E S_i$ je v chybě měření profilových dat $\{ {}^S \mathbf{p}_j \}_i^{\text{meas}}$, jež neodpovídají přesně geometrii měřeného profilu na kalibračním objektu, viz obr. 8.6. Následkem je nepřesné určení pozice průsečíků ${}^S \mathbf{P}_k$ pomocí proložených přímek skrze jednotlivé stěny kalibračního objektu. Jejich translační chyba vůči skutečným pozicím průsečíků ${}^S \mathbf{P}_k^*$ je zobrazena v grafu na obr. 5.9. Druhým zdrojem chyby nalezené pozice skeneru ${}^E S_i$ je následné řešení \mathbf{w}_i nelineární soustavy rovnic (4.15). Řešení této soustavy se ukázalo jako nejproblematictější místo ve zpracování kalibračních dat v postupu práce de Graaf (2007), a proto byla autorem navržena jeho úprava (podkapitola 4.3.2). Navržený postup je robustnější v porovnání s výsledky v Liška et al. (2018a), jelikož umožňuje vybrat kalibrační pozice dle stanovené odchylky w_{\min}^{diff} . Pro většinu kalibračních pozic defaultního MCP je tak vybráno řešení \mathbf{w}_i nejbližší k řešení ${}^* \mathbf{w}_i^{\text{real}}$ (skutečná pozice skeneru). Vzhledem k chybě v průsečících ${}^S \mathbf{P}_k$ je zde ale určitá odchylka, viz obr. 5.10. Ve výsledku obě chyby způsobí translační i rotační odchylku vypočtené $T_{S_i}^E$ oproti skutečné ${}^* T_{S_i}^E$ v rádech desetin až jednotek milimetrů, respektive jednotek stupňů, viz obr. 5.11. V tomto obrázku je v pravé části vykresleno rozložení těchto chyb v souřadném systému, které je rovnoměrné vzhledem k tučně vyznačenému počátku (osa x – červená, osa y – zelená, osa z – modrá). Chyby vypočtené změny pozice skeneru $T_{S_{i+1}}^{S_i}$ dle (2.6) tak hrají mnohem zásadnější



Obr. 5.9: Translační odchylka mezi vypočtenou pozicí a skutečnou pozicí průsečíků – defaultní MCP.

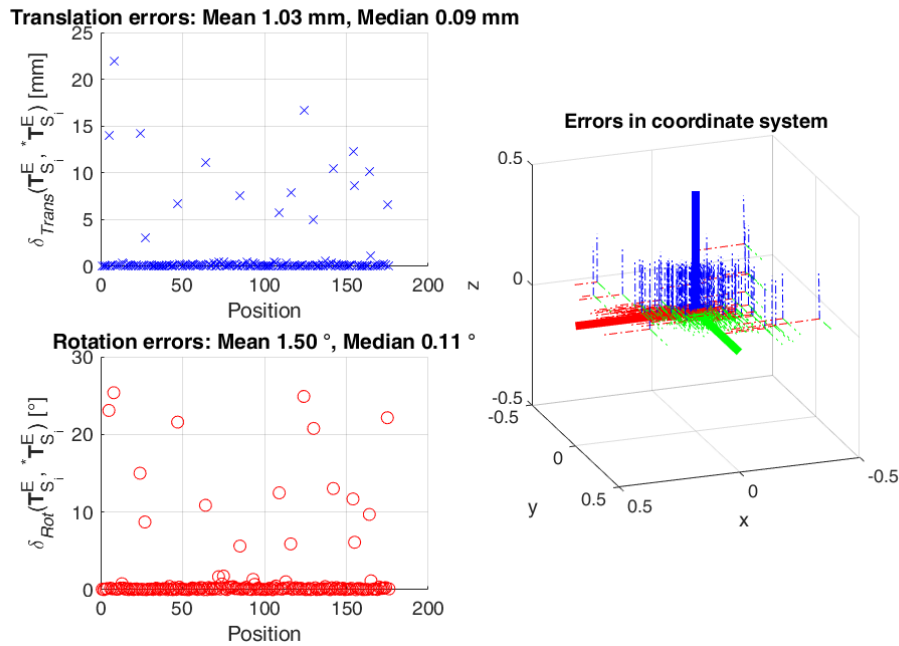
roli pro přesnost celé kalibrace v porovnání s chybami změn polohy příruby, viz porovnání mezi obr. 5.7 a obr. 5.8.

Navržený algoritmus *IRHEC* lze hodnotit také z několika pohledů. Pro každou zvolenou metodu hand-eye kalibrace je vyhodnocena přesnost vypočtené transformační matice $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ - $\delta_{Trans}(\hat{\mathbf{T}}_S^N, * \mathbf{T}_S^N)$ a $\delta_{Rot}(\hat{\mathbf{T}}_S^N, * \mathbf{T}_S^N)$. Počet proběhlých iterací *IR_NoIter* by měl být alespoň



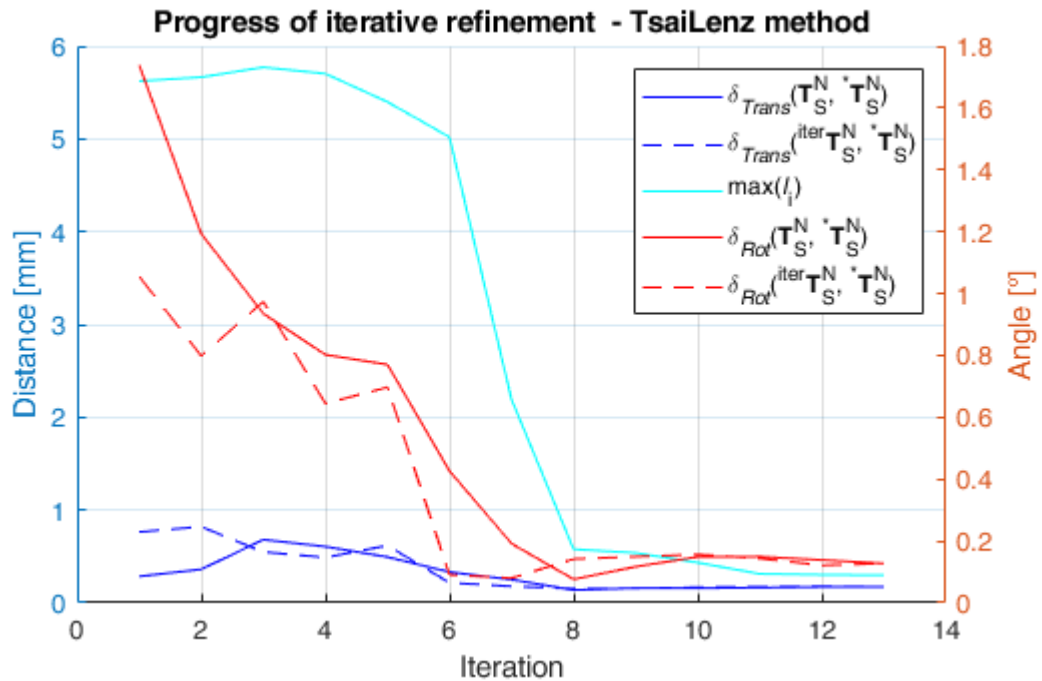
Obr. 5.10: Rozdíl mezi vypočtenými a skutečnými řešeními nelineární soustavy rovnic – defaultní MCP.

Errors of scanner positions $\mathbf{T}_{S_i}^E$ - first iteration



Obr. 5.11: Rozdíl mezi vypočtenými a skutečnými pozicemi profilového skeneru – defaultní MCP.

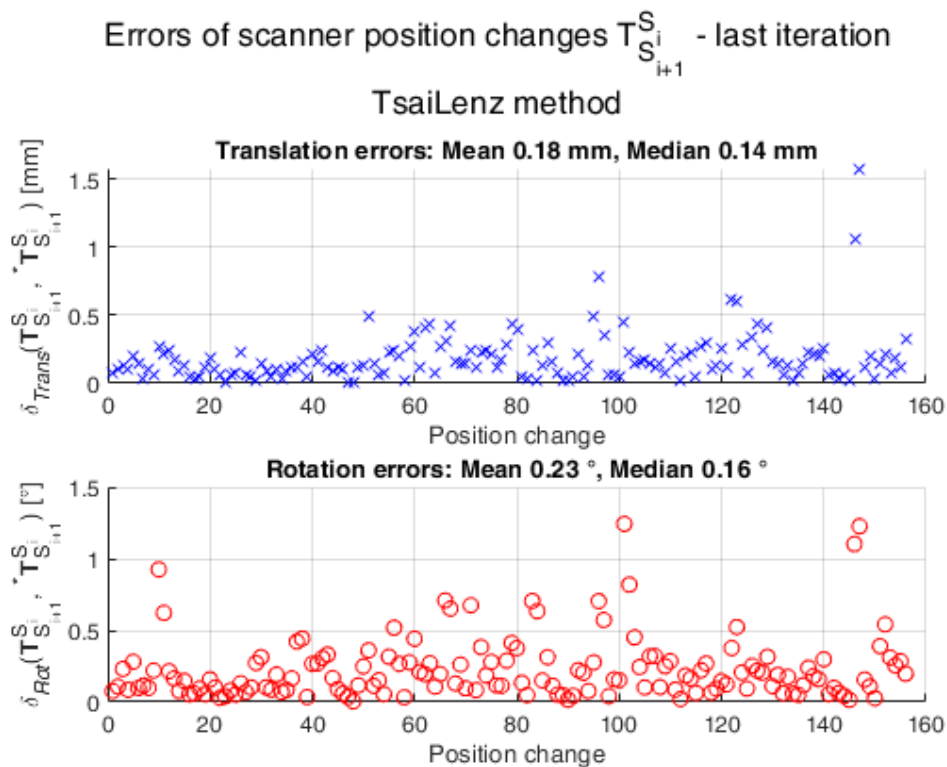
dvojnásobný oproti nastavené velikosti filtru N_f^{IR} , aby nedošlo k ovlivnění výsledné transformační matice $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ počáteční inicializací filtru maticí ${}^{guess}\mathbf{T}_S^N$. Dále je možné pozorovat rozložení shluku bodů ${}^W\mathbf{E}_i$ před a po skončení algoritmu, viz obr. 4.13. Během analýzy nastavení parametrů algoritmu *IRHEC* v simulovaném kalibračním procesu je pak nutné dojít k nastavení, které bude separovat všechny špatně vyhodnocené kalibrační pozice, to znamená $IR_NoUsedPos = IR_NoCorrUsedPos$. Vhodným způsobem pro dosažení tohoto cíle je pozorování vývoje odchylek $\delta_{Trans}(\hat{\mathbf{T}}_S^N, *T_S^N)$ a $\delta_{Rot}(\hat{\mathbf{T}}_S^N, *T_S^N)$ během výpočtu algoritmu *IRHEC*, viz obr. 5.12. V něm se nachází translační i rotační odchylky nejen pro filtrovanou matici $\hat{\mathbf{T}}_S^N$, ale pro porovnání také odchylky transformační matice v dané iteraci ${}^{iter}\hat{\mathbf{T}}_S^N$. Dále je v grafu zobrazen průběh maximální hodnoty l_i , která je důležitým parametrem pro nastavení algoritmu *IRHEC*. Hlavní ukazatele na nestandardní průběh výpočtu kalibrace jsou náhle se zvyšující hodnoty veličin v grafu na obr. 5.12. Tyto situace je nutné dále analyzovat. Posledním doporučením je pozorování chyb změn polohy příruby a skeneru po poslední iteraci algoritmu *IRHEC*. Chyby změn poloh příruby $\mathbf{T}_{N_{i+1}}^{N_i}$ jsou vzhledem k malé chybě opakovatelnosti robota prakticky stejné jako v první iteraci na obr. 5.7. Chyby změn polohy skeneru $\mathbf{T}_{S_{i+1}}^{S_i}$ na obr. 5.13 však ukazují v porovnání s obr. 5.8 významný přínos navrženého algoritmu *IRHEC*, jelikož pomocí něj byly eliminovány kalibrační pozice s největšími chybami l_i . Průměrná translační odchylka $\delta_{Trans}(\mathbf{T}_{S_{i+1}}^{S_i}, *T_{S_{i+1}}^{S_i})$ o velikosti 1,86 mm v první iteraci klesla na hodnotu 0,18 mm v poslední iteraci. Stejně tak průměrná rotační odchylka $\delta_{Rot}(\mathbf{T}_{S_{i+1}}^{S_i}, *T_{S_{i+1}}^{S_i})$ klesla u daného provedení simulace MCP z 2,65 ° na 0,23 °.



Obr. 5.12: Průběh vybraných veličin algoritmu IRHEC – defaultní MCP.

5.1.4 Vyhodnocení simulace

Nastavení daného MCP není vhodné posuzovat pouze na základě jednoho provedení simulace, jako je tomu v některých publikacích o metodách řešících rovnici hand-eye kalibrace. Korektním přístupem je provést dostatečný počet provedení, jenž umožní pozorovat

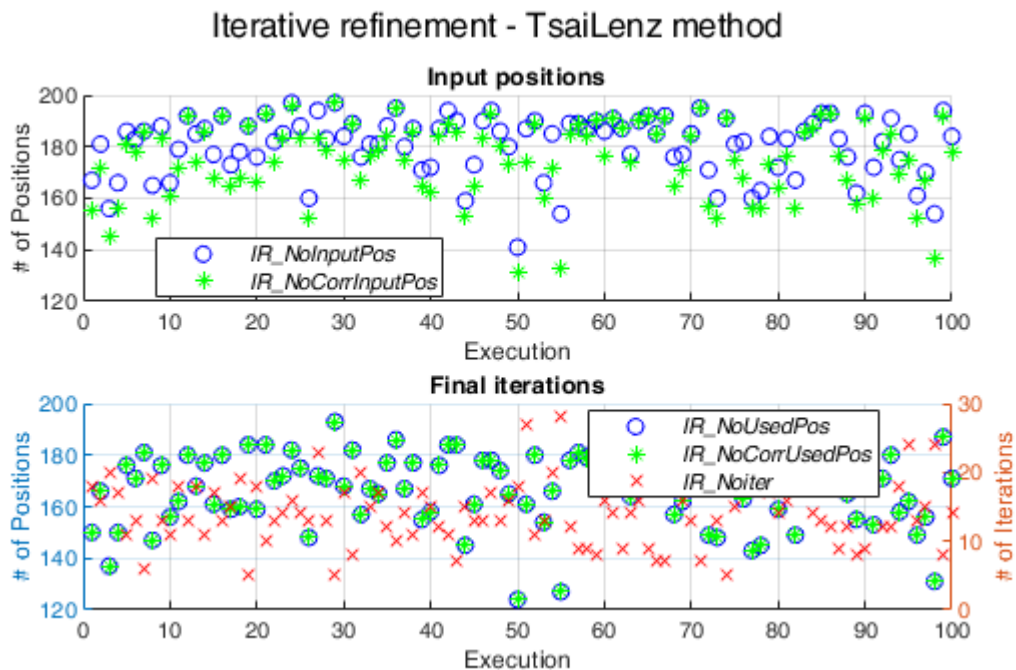


Obr. 5.13: Chyba změn polohy skeneru v poslední iteraci algoritmu IRHEC – defaultní MCP.

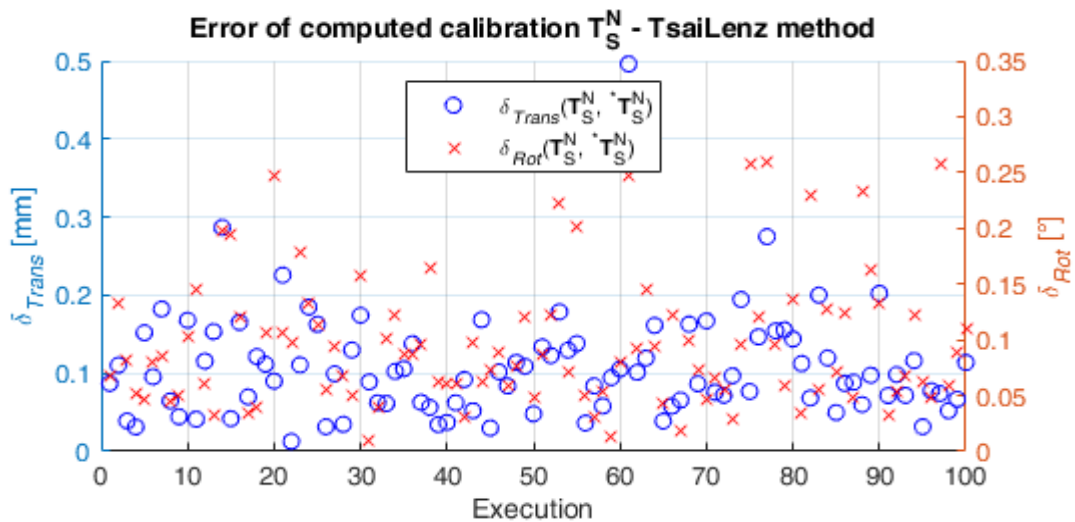
pravděpodobnostní rozdělení přesnosti výsledků. Lze tak pozorovat i výsledky způsobené méně pravděpodobnou souhrnou náhodně vygenerovaných vstupů do daného provedení simulace. Cílem autora této práce je totiž kromě přesnosti hledané transformační matice $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ dosáhnout také dostatečné robustnosti navrženého postupu. Zejména za účelem následného využití postupu méně zkušenými a méně odborně znalými operátory těchto robotických zařízení.

Posouzení konkrétního MCP je příhodné založit především na základě třech pozorovaných oblastí. Tou první je pozorování počtu úspěšně dokončených kalibrací *NoSuccessExec* z celkového počtu provedení *NoExec* (pro každou metodu řešící rovnici hand-eye kalibrace). Úspěšně dokončenou kalibrací je označeno provedení simulace, které končí splněnou podmínkou $l_{max} > l_i$ v algoritmu *IRHEC*. Všechna provedení simulace pro defaultní MCP končí úspěšně nalezenou transformační maticí $\hat{\mathbf{T}}_S^N$, tudíž platí např. rovnost $NoSuccessExec_{TL} = NoExec = 100$.

Další pozorovanou oblastí jsou počty kalibračních pozic *IR_NoInputPos* a *IR_NoCorrInputPos* (příznak $correct_{w_i} = 1$) vstupujících do algoritmu *IRHEC*. V této oblasti je sledován také počet iterací algoritmu *IR_NoIter*. Posledními pozorovanými veličinami v této části jsou počty kalibračních pozic *IR_NoUsedPos* a *IR_NoCorrUsedPos* využitých v poslední iteraci algoritmu *IRHEC*. Tyto veličiny jsou zobrazeny v grafech na obr. 5.14 pro defaultní MCP s využitím *TL* metody. Z grafu vstupních pozic do algoritmu *IRHEC* je patrné, že při zpracování dat dojde vždy k vyřazení některých měřených kalibračních pozic ($NoP = 200$). Pro většinu provedení simulace platí $IR_NoInputPos \neq IR_NoCorrInputPos$. Naopak pro poslední iteraci algoritmu *IRHEC* již platí $IR_NoUsedPos = IR_NoCorrUsedPos$. Tím je ověřen přínos navrženého algoritmu *IRHEC*,



Obr. 5.14: Počet vstupujících a využitých pozic v algoritmu *IRHEC* s *TL* metodou – defaultní MCP.

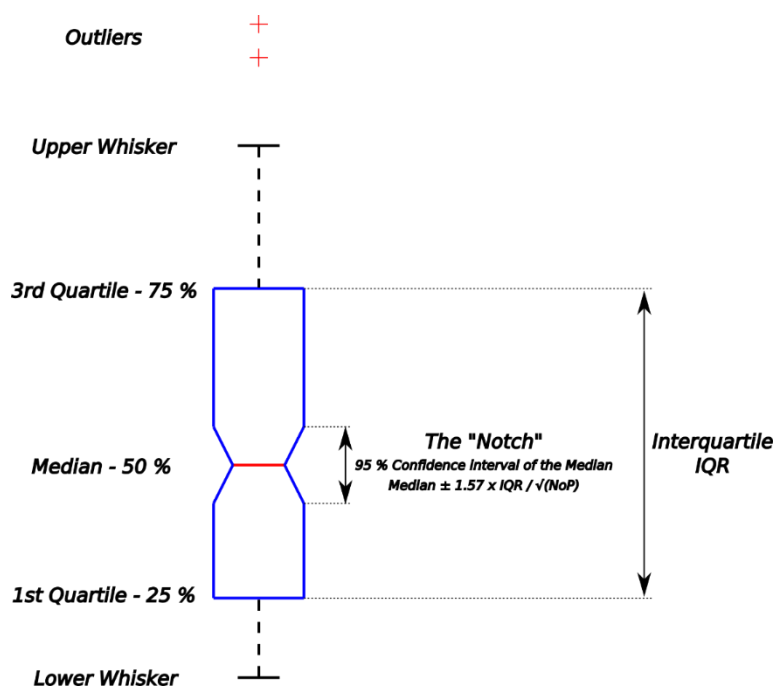


Obr. 5.15: Translační a rotační odchylka vypočtené kalibrace oproti skutečné kalibraci pro TL metodu – defaultní MCP.

neboť v první řadě vyřazuje všechny kalibrační pozice s příznakem $correct_w_i = 0$. Počet provedených iterací IR_NoIter ovšem občas jen těsně přesahuje velikost okna pro filtraci N_f^{IR} . Proto je vhodné uvažovat o snížení hodnoty parametru l_{max} za účelem dosažení vyšší přesnosti kalibrace.

Přesnost kalibrace je třetí pozorovanou oblastí při posuzování daného MCP. V každém provedení simulace jsou určeny translační odchylka $\delta_{Trans}(\hat{\mathbf{T}}_S^N, * \mathbf{T}_S^N)$ a rotační odchylka $\delta_{Rot}(\hat{\mathbf{T}}_S^N, * \mathbf{T}_S^N)$ vypočtené kalibrace $\hat{\mathbf{T}}_S^N$. Ukázka těchto odchylek pro defaultní MCP s využitím TL metody je na obr. 5.15. Z výsledných hodnot je patrné, že autorem navržený defaultní MCP konverguje ve všech provedeních simulace ke skutečné transformační matici $* \mathbf{T}_S^N$ s přesností v řádu desetin milimetru, respektive desetin stupně. Dosažená přesnost by byla dostačující například pro naváděcí systémy svařování elektrickým obloukem nebo pro některé méně náročné laserové technologie. Pro proces laserového svařování s úzkým pracovním spotem do desetiny milimetru by ovšem vyhověly výsledky jen některých simulovaných provedení kalibrace.

Způsob vykreslení výsledků simulace na obr. 5.14 a na obr. 5.15 není však příliš vhodným nástrojem pro porovnání výsledků mezi zvolenými metodami pro řešení rovnice hand-eye kalibrace. Stejně tak porovnání výsledků mezi různě modifikovanými MCP by bylo komplikované, jelikož by se společné grafy staly značně nepřehledné. Tvary průběhů pravděpodobnostních rozdělení výsledků jsou napříč modifikovanými MCP rozdílné. Porovnávání výsledků na základě vypočteného prvního a druhého momentu normálního rozdělení by tak nebylo korektní. Proto se autor rozhodl pro porovnávání jednotlivých simulací pomocí boxplotů, také nazývanými krabicovými grafy, jež graficky zobrazují pravděpodobnostní rozdělení jednorozměrných dat pomocí kvartilů. Ukázka boxplotu s popisem jednotlivých částí je na obr. 5.16 (interpretace boxplotů se může nepatrně lišit dle konkrétního výpočetního softwaru, autor vychází z verze využívané v Matlabu). Hlavní box modré barvy vyznačuje oblast mezi prvním a třetím kvantilem, ve které se nachází 50 % posuzovaných dat a vzdálenost mezi těmito kvartily je nazývána také mezikvartilové rozpětí

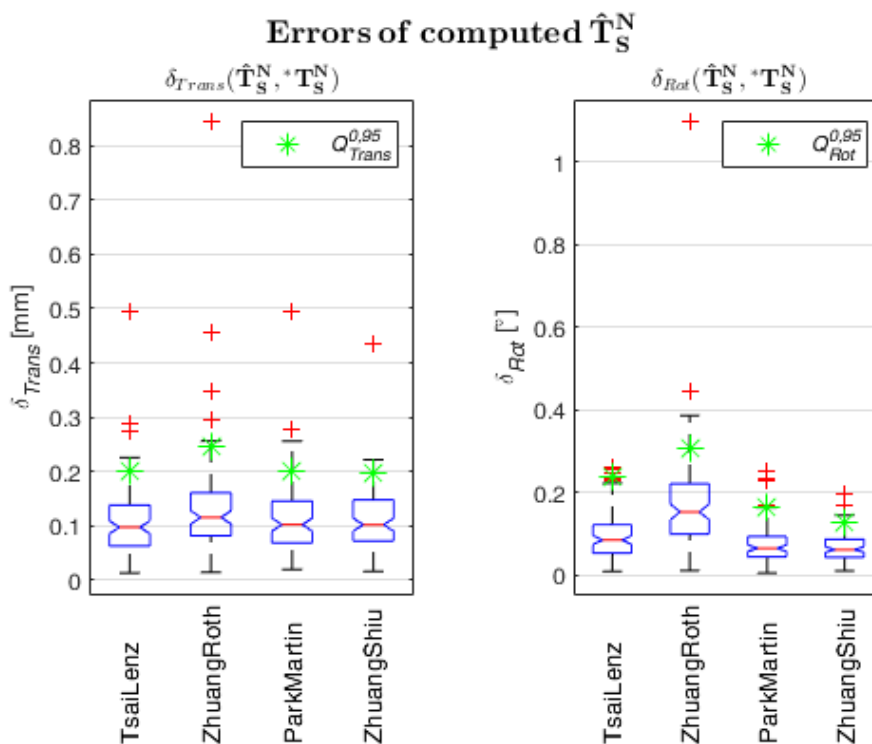


Obr. 5.16: Ukázka a popis částí boxplotu.

IQR. Uvnitř boxu je červeně vyznačena hodnota mediánu. Zkosená část boxu k mediánu určuje 95 % interval spolehlivosti mediánu („notch“). Rozsah rozložení ostatních hodnot pod prvním a nad třetím kvantilem zobrazují tzv. vousy (whiskers). Maximálně však do vzdálenosti jedna a půl násobku *IQR*. Pokud některé hodnoty ze souboru dat leží dál, jsou vizualizovány samostatně pomocí červených křížků jako odlehlé hodnoty (outliers).

Porovnání metod řešící rovnici hand-eye kalibrace pomocí boxplotů je na obr. 5.17, kde jsou zobrazeny zvláště translační odchylky $\delta_{Trans}(\hat{\mathbf{T}}_S^N, * \mathbf{T}_S^N)$ a zvláště rotační odchylky $\delta_{Rot}(\hat{\mathbf{T}}_S^N, * \mathbf{T}_S^N)$. Z grafu je patrné, že jednotlivé metody se mezi sebou liší jen nepatrně vyjma rotačních odchylek pro ZR metodu. To potvrzuje autorovo domněnku, že mnohem větší význam na přesnost kalibrace má výběr poloh kalibračních pozic než výběr metody pro řešení rovnice hand-eye kalibrace. Pro číselné porovnání přesnosti kalibrace je vhodnější využití mediánové hodnoty (značeny jako kvantily $Q_{Trans}^{0,5}$ a $Q_{Rot}^{0,5}$), jelikož průměrná hodnota by vzhledem k odlehlým hodnotám mohla být zavádějící. Druhými autorem zvolenými hodnotami pro číselné porovnání jsou hodnoty kvantilů $Q_{Trans}^{0,95}$ a $Q_{Rot}^{0,95}$, na něž může být nahlíženo jako na míru 95 % spolehlivosti přesnosti kalibrace. Jejich hodnoty jsou v grafech defaultního MCP vykresleny zelenými hvězdičkami.

Během analýzy defaultního MCP byly jednotlivé vlivy testovány samostatně či ve zvolené kombinaci dvou nebo tří parametrů. Pro testování vlivu jednoho parametru je vhodné analyzovat chování MCP pomocí představeného boxplotu či pomocí průběhů hodnot $Q_{Trans}^{0,5}$, $Q_{Rot}^{0,5}$, $Q_{Trans}^{0,95}$ a $Q_{Rot}^{0,95}$. Při testování vlivu kombinace parametrů je přehlednější vykreslit závislost v 3D grafu. Osy *x* a *y* odpovídají testovaným parametrům a osa *z* odpovídá zvolené veličině jako např. *NoSuccessExec*, *IR_NoUsedPos*, $Q_{Trans}^{0,5}$ apod. (v Matlabu využita funkce *surf*).



Obr. 5.17: Porovnání translační a rotační odchylky vypočtené kalibrace oproti skutečné kalibraci pomocí boxplotů – defaultní MCP.

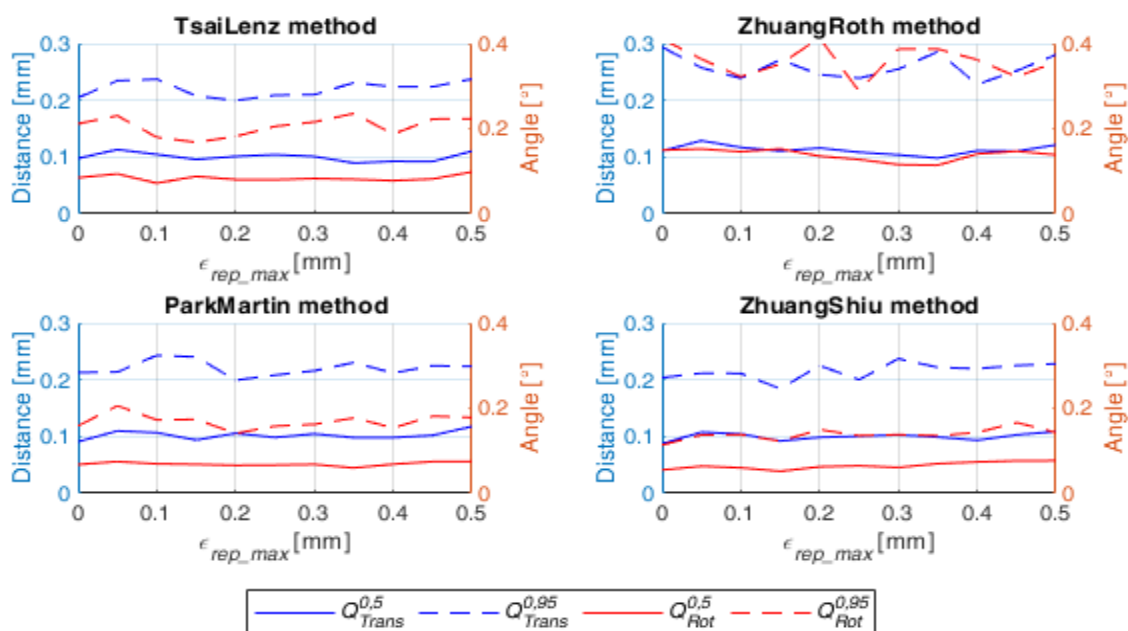
5.2 Vliv vstupních chyb

První analyzovanou oblastí MCP jsou vstupní chyby do modelu, jejichž zdroji jsou hardwarové vybavení robotického pracoviště (robot a profilový skener) a vstupní odhad ruční kalibrace \mathbf{T}_S^N . Pravděpodobnostní rozdělení chyb bylo analyzováno v příloze B. Analýza defaultního MCP při změně velikosti jednotlivých vstupních chyb umožní určit, zda zde existuje přímý vliv dané chyby na přesnost kalibrace. Pokud ano, lze tímto způsobem během návrhu naváděcího systému změnit typ robota nebo profilového skeneru tak, aby bylo dosaženo požadované přesnosti a robustnosti kalibrace $\hat{\mathbf{T}}_S^N$. Stejně jako ve většině ostatních publikací bude v této podkapitole analyzována pouze chyba opakovatelnosti robota. V následující kapitole však bude ukázán i vliv chyb geometrických parametrů robota ξ , jelikož vzhledem k reálnému využití je tato znalost také zásadní.

5.2.1 Chyba opakovatelnosti robota

Vzhledem k velikosti chyby opakovatelnosti robota je chyba změny polohy příruby $\delta_{Trans}(\mathbf{T}_{N_{i+1}}^{N_i}, * \mathbf{T}_{N_{i+1}}^{N_i})$ v řádu setin milimetru, viz obr. 5.7. Proto její podíl na celkové chybě kalibrace u defaultního MCP je minoritní při porovnání s chybou změn pozic $\mathbf{T}_{S_{i+1}}^{S_i}$ profilového skeneru, viz porovnání s obr. 5.8. Pro analýzu vlivu opakovatelnosti robota byla měněna hodnota $\varepsilon_{rep,max}$ (význam příloha B.1) v rozsahu od 0 do 0,5 milimetru s krokem 0,05 milimetru. V každém takto modifikovaném MCP došlo k úspěšnému výpočtu kalibrace ve všech provedeních simulace ($NoSuccessExec = 100$). Jak je patrné z grafů hodnot $Q_{Trans}^{0,5}$,

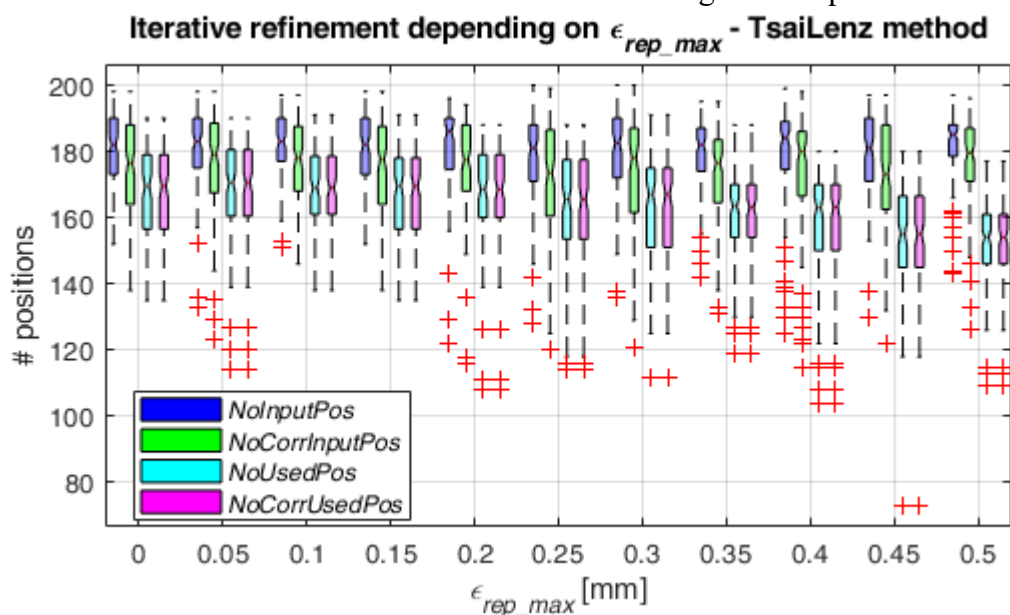
Dependence of calibration accuracy on ϵ_{rep_max}



Obr. 5.18: Přesnost kalibrace v závislosti na chybě opakovatelnosti robota.

$Q_{Trans}^{0,95}$, $Q_{Rot}^{0,5}$ a $Q_{Rot}^{0,95}$ pro jednotlivé metody na obr. 5.18, přesnost kalibrace je téměř neměnná i pro řádově vyšší hodnotu chyby opakovatelnosti. K dosažení této přesnosti je však zapotřebí se zvyšující se chybou opakovatelnosti ϵ_{rep_max} většího počtu iterací v algoritmu IRHEC, viz například boxploty počtů pozic pro TL metodu na obr. 5.19.

Vliv chyby opakovatelnosti robota na přesnost kalibrace profilového skeneru jako nástroje robota je tak pro defaultní MCP minimální. Vyšší chyba opakovatelnosti by způsobila spíše problém v samotném obrábění materiálu laserovou technologií. Vliv opakovatelnosti robota by



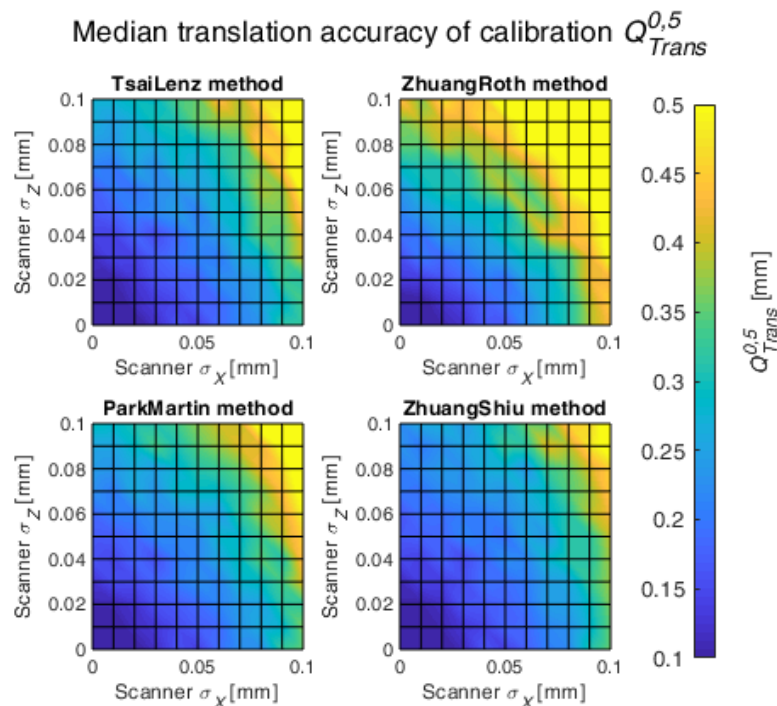
Obr. 5.19: Vliv opakovatelnosti robota na počet vstupních a finálních pozic do algoritmu IRHEC.

se však stal marginálním v případě menší hodnoty l_{max} pro algoritmus *IRHEC* nebo v případě snížení chyb vypočtené pozice skeneru nad kalibračním objektem $\delta_{Trans}(\mathbf{T}_{S_i}^E, {}^*\mathbf{T}_{S_i}^E)$ a $\delta_{Rot}(\mathbf{T}_{S_i}^E, {}^*\mathbf{T}_{S_i}^E)$.

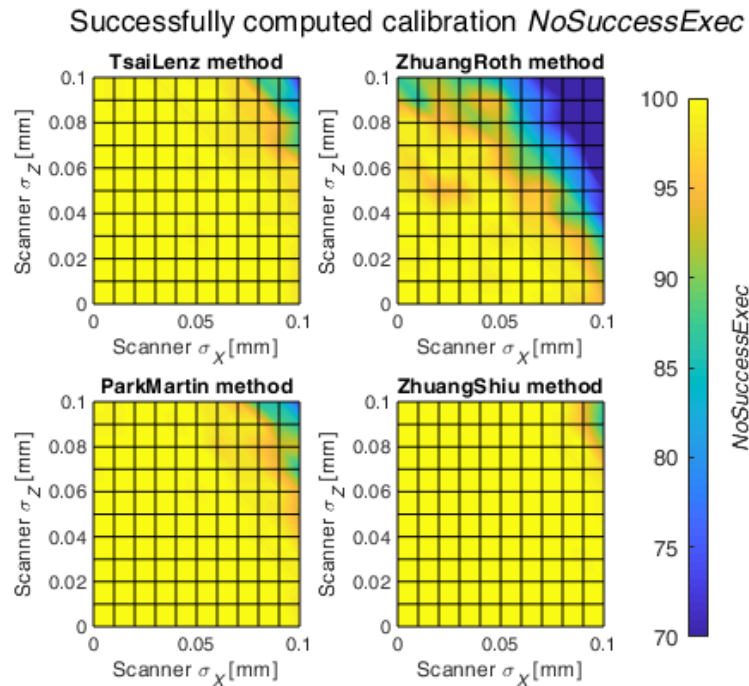
5.2.2 Chyba měření profilovým skenerem

Dalším analyzovaným vlivem je chyba měření profilového skeneru. Její nastavení pro defaultní MCP bylo autorem implementováno na základě analýzy v příloze B.2. Chyba měření je vzhledem k principu snímače uvažována pouze v ose x_S a z_S jeho CS_S . Dostupný skener scanCONTROL 2600-100 lze v současnosti zařadit do nižší střední třídy v jeho oblasti použití. Autor této práce využil svých zkušeností z měření pro nastavení vnitřních parametrů skeneru i pro složitější úlohy (skrže specializovaný software od výrobce). Zásadním faktem opomíjeným v praxi je nutnost kontroly tohoto nastavení s každou změnou typu měřeného povrchu. K tomu však ze strany operátorů většinou dochází až při hlášené chybě naváděcího systému. Chybějící optimalizace vnitřního nastavení profilového skeneru pro aktuálně měřený povrch tak často výrazně zvyšuje chybu měření a degraduje ho do oblasti kvality levných skenerů. Pro analýzu vlivu chyby měření na přesnost kalibrace byly pro obě osy x_S a z_S náhodně generovány odchylky dle normálního rozdělení. Střední hodnota rozdělení byla nulová a směrodatná odchylka byla měněna od 0 do 0,1 milimetru s krokem 0,01 milimetr. Jelikož spolu chyby v obou osách profilu přímo souvisí, byly simulovány všechny vzájemné kombinace modifikovaných MCP dle definovaných rozsahů chyb.

Z výsledků přesnosti kalibrace je pak jasně viditelný jejich silný vliv na velikost odchylek $\delta_{Trans}(\hat{\mathbf{T}}_S^N, {}^*\mathbf{T}_S^N)$ a $\delta_{Rot}(\hat{\mathbf{T}}_S^N, {}^*\mathbf{T}_S^N)$ (pro všechny metody řešící rovnici hand-eye kalibrace). Mediánová hodnota translační odchylky $Q_{Trans}^{0,5}$ je v grafech na obr. 5.20. Z grafů je vidět



Obr. 5.20: Medián translační odchylky přesnosti kalibrace v závislosti na chybě měření profilového skeneru.



Obr. 5.21: Počet úspěšných kalibrací v závislosti na chybě měření profilového skeneru.

násobně se zvyšující hodnota této odchylky oproti defaultnímu MCP, zejména v případě využití ZR metody. Stejným způsobem se zhoršují i ostatní sledované parametry pro přesnost a spolehlivost kalibrace $Q_{Trans}^{0,95}$, $Q_{Rot}^{0,5}$ a $Q_{Rot}^{0,95}$ u jednotlivých simulací. Důležitým faktem je také počet úspěšně dokončených kalibrací *NoSuccessExec* znázorněný na obr. 5.21. V oblastech kombinací s největšími směrodatnými odchylkami chyb měření již neplatí, že každé provedení simulace je zakončeno úspěšnou kalibrací. Malou robustností se prezentuje zejména ZR metoda. Počet vstupních pozic *IR_NoInputPos* do algoritmu *IRHEC* je v mediánu stále dostatečný, okolo 130 kalibračních pozic i pro MCP s největšími chybami měření. Největším problémem nepřesnosti kalibrace je však výrazná chyba v nalezených průsečících ${}^S\mathbf{P}_k$ u jednotlivých profilů a s tím související velké chyby dopočtených pozic skeneru nad kalibračním objektem $\delta_{Trans}(\mathbf{T}_{S_i}^E, {}^*\mathbf{T}_{S_i}^E)$ a $\delta_{Rot}(\mathbf{T}_{S_i}^E, {}^*\mathbf{T}_{S_i}^E)$.

V této části analýzy se také ukazuje vysoký přínos autorem navrženého MCP v porovnání s výsledky z vlastní publikace Liška et al. (2018a). V tomto příspěvku byl poprvé představen algoritmus *IRHEC*. Jeho ověření probíhalo pomocí jednoduchého modelu kalibračního procesu jako v ostatních známých publikacích (neobsahoval model robota, model skeneru apod.). Z tohoto příspěvku si autor odnesl následující poznatky:

- Výsledky simulace s číslem 1, které vychází z chyb měření skeneru dle údajů výrobce, splňují požadavky na přesnost nejnáročnějších laserových úloh.
- Pro zvyšující se chybu měření se násobně zhoršuje přesnost, a především spolehlivost kalibrace. Pro dosažení určité přesnosti je zapotřebí navíc vysokého počtu kalibračních pozic $NoP = 1000$.
- Proto se autor práce rozhodl pokračovat ve zkoumání hand-eye kalibrace nástrojů robota. Pro další vývoj bude zapotřebí vytvořit kompletní model procesu kalibrace.

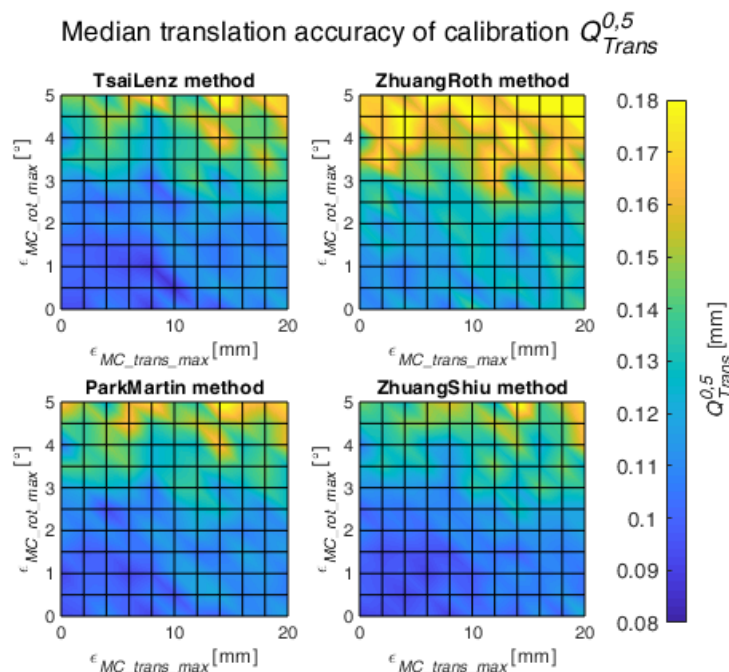
Například translační chyba simulace s číslem 3 v Liška et al. (2018) je v řádu jednotek milimetrů. Translační chyba navrženého defaultního MCP však v testovaných rozsazích chyby snímače dosahuje maximálně desetin milimetru, viz obr. 5.20. Tato přesnost je navíc dosažena s pětkrát menším počtem kalibračních pozic. Navržený výběr kalibračních pozic na základě znalosti kompletního MCP tak výrazně zpřesňuje celý proces kalibrace nástroje.

5.2.3 Chyba odhadu ruční kalibrace

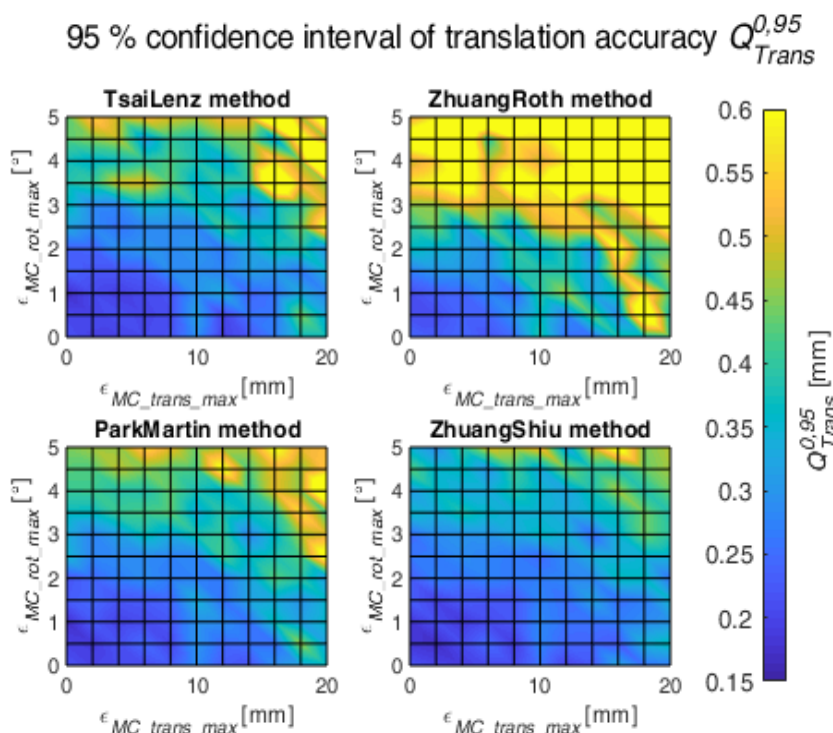
Posledním testovaným vstupním vlivem je chyba ručního odhadu kalibrace ${}^{\text{guess}}\mathbf{T}_S^N$, která je důležitým vstupem pro navržený generátor kalibračních pozic v této práci. Jak již bylo zmíněno, problémem při kalibraci optických snímačů jako nástrojů robota je jejich fyzicky nedostupný TCP. Proto kalibrace tohoto typu nástroje pomocí standardních metod implementovaných v kontroléru robota je pouze orientační s přesností v řádu jednotek milimetrů a jednotek stupňů. Autor této práce představil v příloze B.3 vlastní postup ruční kalibrace profilového skeneru s využitím standardní metody v kontroléru robota. Zde se nachází také analýza tohoto postupu s následným popisem způsobu náhodného generování ruční kalibrace ${}^{\text{guess}}\mathbf{T}_S^N$ pro jednotlivá provedení simulace. Pro testování vlivu na přesnost a spolehlivost kalibrace byly kombinace chyb pro translační a rotační část ruční kalibrace testovány v těchto rozsazích:

- Translační odchylka $\epsilon_{MC_trans_max}$ byla měněna v rozsahu od 0 do 20 milimetrů s krokem 2 milimetry.
- Složky vektoru $\epsilon_{MC_rot_max}$ byly měněny v rozsahu od 0 do 5 stupňů s krokem 0,5 stupně.

V grafech na obr. 5.22 je zobrazeno rozložení mediánu translační odchyly $Q_{Trans}^{0,5}$ v závislosti na kombinaci dané velikosti chyby v translaci a rotaci ruční kalibrace ${}^{\text{guess}}\mathbf{T}_S^N$. V kombinacích



Obr. 5.22: Medián translační odchyly přesnosti kalibrace v závislosti na chybě vstupní ruční kalibrace skeneru.



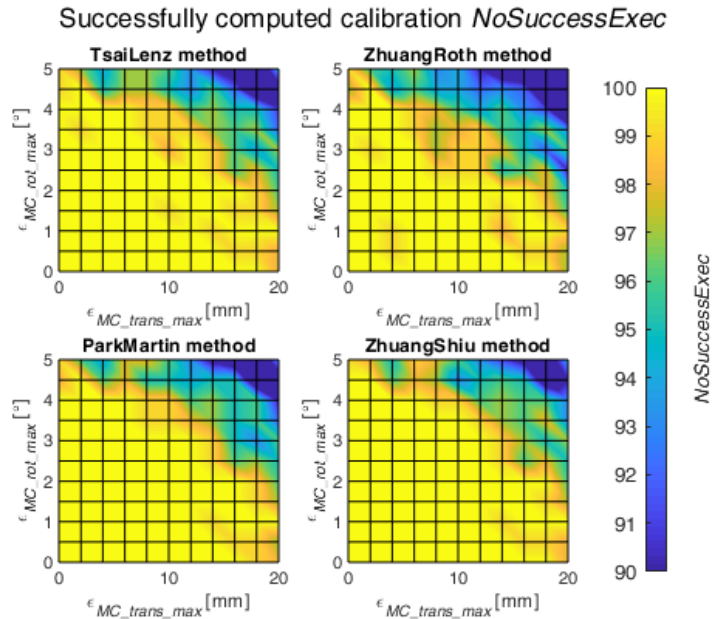
Obr. 5.23: Spolehlivost translační odchylky přesnosti kalibrace v závislosti na chybě vstupní ruční kalibrace skeneru.

s největšími vstupními chybami dojde ke zhoršení o 0,1 milimetru přibližně, což v porovnání s vlivem chyb měření profilového skeneru na obr. 5.20 neukazuje na dominantní vliv chyby ruční kalibrace. Navíc přesnost kalibrace je dle grafů závislá především na zvětšující se chybě v rotační části odhadu. Míra spolehlivosti kalibrace $Q_{Trans}^{0,95}$ však nevykazuje podobný trend jako medián $Q_{Trans}^{0,5}$, naopak zde dochází k výrazně vyššímu nárůstu hodnot, viz grafy na obr. 5.23. Spolehlivost kalibrace se tedy s vyššími chybami výrazně zhoršuje. Stejnou závislost je možné pozorovat také pro vyhodnocení spolehlivosti kalibrace z pohledu rotace. Výrazné zhoršení přesnosti je především u ZR metody. Velmi dobrý a robustní odhad natočení má naopak vypočtená kalibrace ZS metodou. Vyšší hodnoty chyb ruční kalibrace mají také zásadní vliv na počet úspěšně dokončených kalibrací `NoSuccessExec` v jednotlivých provedeních simulací, viz obr. 5.24. Oproti vlivu chyby měření profilového skeneru na obr. 5.21 se ale chyba ruční kalibrace projevuje velmi podobně pro všechny zvolené metody.

Z hlediska reálného provádění kalibrací profilového skeneru jako nástroje robota je důležitým zjištěním, že přesnost a robustnost kalibrace je závislá především na rotační chybě ručního odhadu ${}^{\text{guess}}\mathbf{T}_S^N$. Autorem navržený postup pro ruční kalibraci skeneru popsán v příloze B.3 totiž umožňuje určit natočení odhadované ruční kalibrace ${}^{\text{guess}}\mathbf{T}_S^N$ s malou chybou. Zvolené metody produkují v této oblasti chyb podobnou přesnost i robustnost kalibrace. Všechna provedení simulované kalibrace v této oblasti chyb jsou navíc úspěšně dokončena.

5.3 Vliv nastavení generátoru

Další analyzovanou částí MCP je nastavení generátoru kalibračních pozic, který byl detailně popsán v podkapitole 5.1.2. Provedená analýza této části, kromě zlepšení přesnosti a robustnosti hand-eye kalibrace profilového skeneru, umožní také optimalizovat čas potřebný

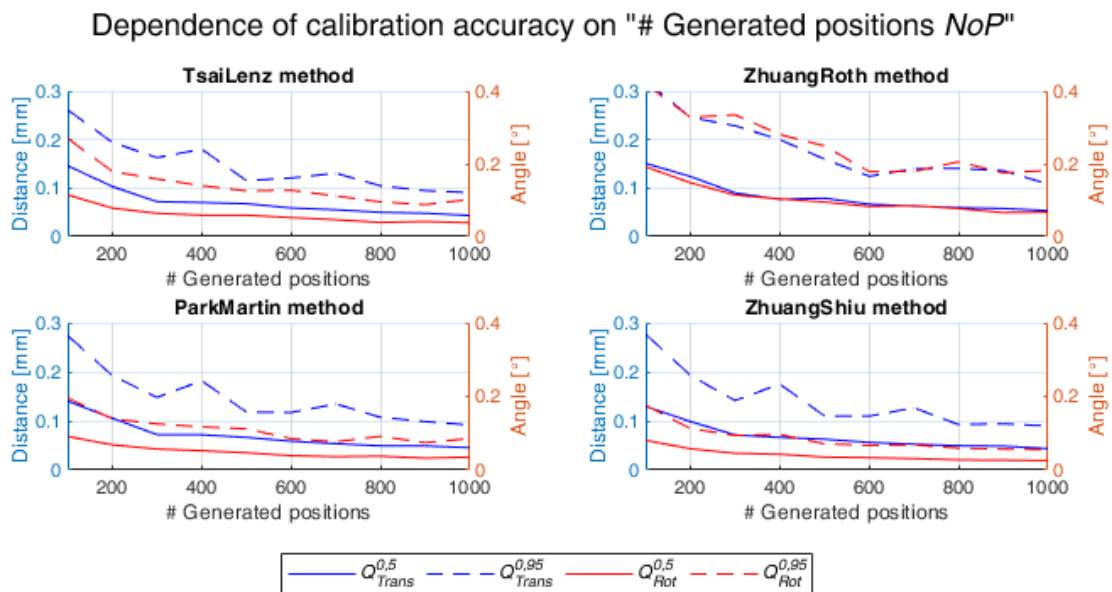


Obr. 5.24: Počet úspěšných kalibrací v jednotlivých provedeních simulace pro modifikovaný MCP v závislosti na chybě ruční kalibrace.

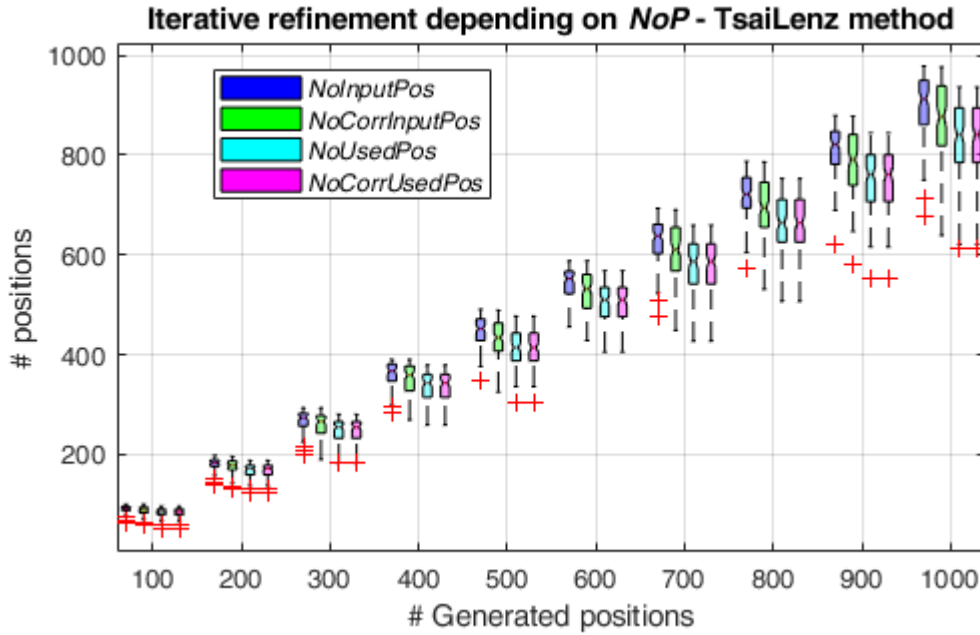
k vygenerování zadaného počtu kalibračních pozic. Například výběrem vhodného nastavení rozsahu kalibračního prostoru nad kalibračním objektem S_{lim} pomocí grafického zobrazení jako na obr. 5.3. V následujících podkapitolách budou rozebrány nejdůležitější nastavitelné parametry generátoru.

5.3.1 Počet kalibračních pozic

Významný vliv na požadovanou přesnost a robustnost kalibrace má pochopitelně zvolený počet generovaných kalibračních pozic NoP . V rámci analýzy MCP byla tato hodnota měněna od 100 do 1000 s krokem 100 pozic. V žádném provedení simulace pro jakoukoli nastavenou hodnotu NoP nedošlo k neúspěšnému dokončení kalibrace. Na obr. 5.25 jsou zobrazeny průběhy



Obr. 5.25: Přesnost kalibrace v závislosti na počtu generovaných kalibračních pozic.



Obr. 5.26: Vliv počtu generovaných kalibračních pozic na počet vstupních a finálních pozic v algoritmu IRHEC.

translační a rotační přesnosti kalibrace spolu se spolehlivostmi v závislosti na počtu generovaných pozic. Z těchto průběhů je patrné, že defaultní MCP by bylo robustně využitelné i pro laserové úlohy opracování s vysokou požadovanou přesností při použití zhruba 1000 kalibračních pozic. Při porovnání jednotlivých metod pro řešení rovnice hand-eye kalibrace zaujmou opět nepatrně horší výsledky u ZR metody, a naopak velmi dobré odhady $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ u ZS metody (zejména v rotační části).

Během zpracování kalibračních dat je pro každou testovanou hodnotu NoP vyřazeno zhruba 10 % kalibračních pozic. Ze zbylého množství kalibračních pozic vstupujících do algoritmu IRHEC je naprostá většina korektních (příznak $correct_w_i = 1$), viz obr. 5.26. V tomto grafu je vidět také vysoký počet kalibračních pozic využitých v poslední iteraci $IR_NoUsedPos$. To je dáno poměrně malým počtem proběhlých iterací IR_NoIter . Pro nastavení vyššího počtu kalibračních pozic NoP a nižší hodnoty zastavovací podmínky l_{max} algoritmu IRHEC tak lze očekávat výrazné snížení chyb kalibrace $\delta_{Trans}(\hat{\mathbf{T}}_S^N, {}^* \mathbf{T}_S^N)$ a $\delta_{Rot}(\hat{\mathbf{T}}_S^N, {}^* \mathbf{T}_S^N)$.

5.3.2 Podobnost kalibračních pozic

Dalšími testovanými vlivy generátoru bylo nastavení dovolené vzájemné translační $calPosLim_{Trans}$ a rotační $calPosLim_{Rot}$ odchylky mezi jednotlivými pozicemi příruby ${}^W \mathbf{N}_i^{exp}$ i pozicemi skeneru ${}^W \mathbf{S}_i^{exp}$. Oba parametry byly testovány vzhledem ke vzájemné souvislosti současně v rozsahu 0 až 10 milimetrů s krokem 1 milimetr, respektive 0 až 5 stupňů s krokem 0,5 stupně. Na defaultní MCP však změny těchto parametrů nemají žádný vliv v ani jednom sledovaném hodnocení kalibrace. Důvodem je s největší pravděpodobností fakt, že kalibrační pozice jsou náhodným generováním rozmístěny samovolně do poměrně rozsáhlého prostoru daného \mathbf{S}_{lim} , viz obr. 5.3. Tato situace se však může změnit v případě specifitějšího nastavení MCP a volbou většího počtu kalibračních pozic NoP , které by splňovaly již jen menší vybrané

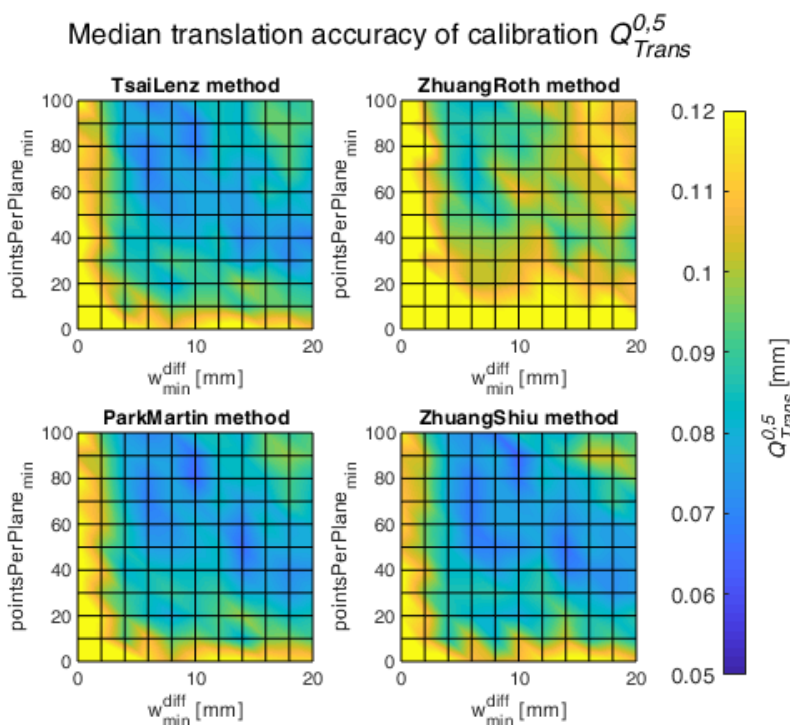
části prostoru kalibračních pozic skeneru $W_{S_i}^{\text{exp}}$ nad kalibračním objektem. Proto autor doporučuje navýšit limity na hodnoty $\text{calPosLim}_{\text{Trans}} = 5 \text{ mm}$ a $\text{calPosLim}_{\text{Rot}} = 2^\circ$.

5.3.3 Podmínky kladené na očekávanou pozici profilového skeneru

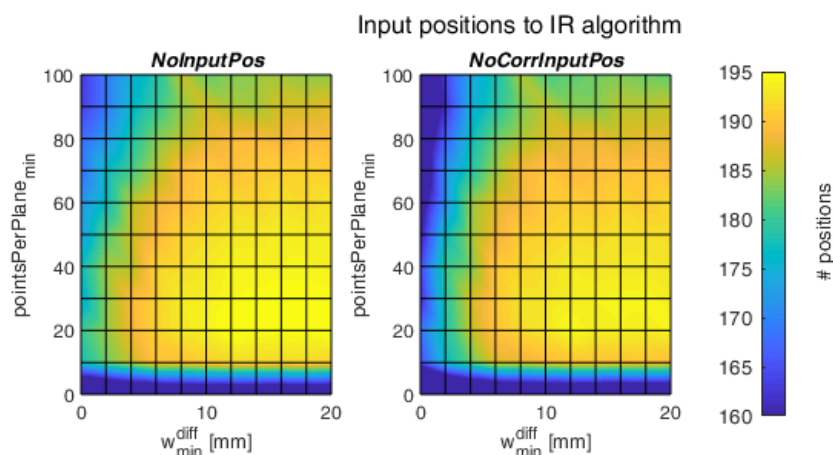
Těmito podmínkami jsou myšlené hodnoty $w_{\text{min}}^{\text{diff}}$ a $\text{pointsPerPlane}_{\text{min}}$. Parametr $w_{\text{min}}^{\text{diff}}$ byl autorem navržen pro zamezení chyby řešení soustavy nelineárních rovnic popsané v podkapitole 4.3.2. Hodnota $\text{pointsPerPlane}_{\text{min}}$ definuje minimální počet bodů měřeného profilu, který musí ležet na každé stěně snímaného kalibračního objektu. Tato podmínka napomáhá snížení chyb u následně určovaných průsečíků ${}^S P_k$. Jelikož obě podmínky mají přímý vliv na pozici skeneru vůči kalibračnímu objektu, byly testovány jejich vzájemné kombinace nastavení v defaultním MCP v těchto rozsazích:

- $w_{\text{min}}^{\text{diff}}$ – od 0 do 20 milimetrů s krokem 2 milimetry.
- $\text{pointsPerPlane}_{\text{min}}$ – od 0 do 100 profilových bodů s krokem 10 bodů (celý profil má 640 bodů).

Mimo třech případů u ZR metody byla všechna provedení simulací u testovaných kombinací podmínek zakončena úspěšným nalezením transformační matice \hat{T}_S^N . Z hodnot translační odchylky $Q_{\text{Trans}}^{0,5}$ pro jednotlivé metody na obr. 5.27 je v první řadě vidět oprávněnost navržených podmínek. Provedené kalibrace jsou totiž výrazně méně přesné a spolehlivé pro nulové nastavení podmínek. Při pohledu na obr. 5.27 nelze usuzovat o úměrné závislosti translační přesnosti $Q_{\text{Trans}}^{0,5}$ na jednu z testovaných podmínek. Naopak pro kombinace podmínek s nejvyššími hodnotami dochází k jejímu opětovnému zhoršení. Stejným způsobem

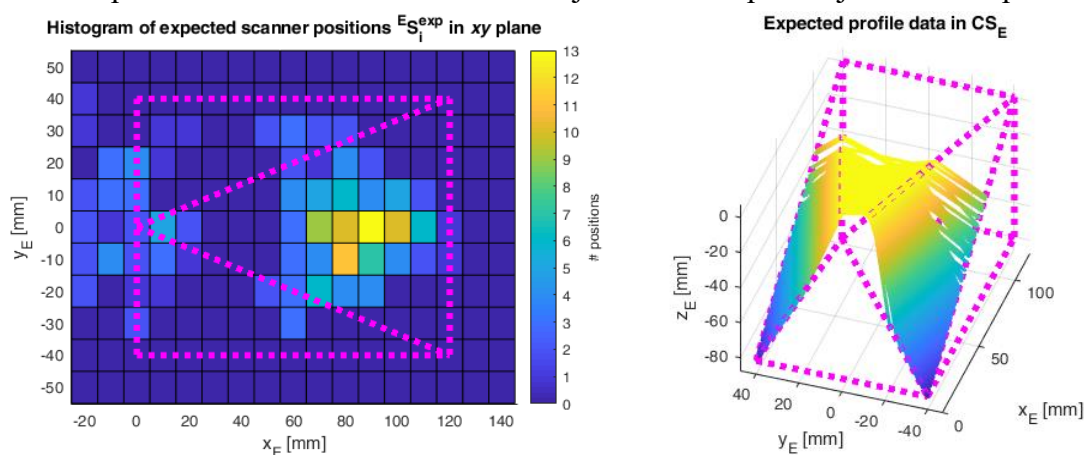


Obr. 5.27: Medián translační odchylky přesnosti kalibrace v závislosti na nastavených podmínkách generátoru pro pozici profilového skeneru.



Obr. 5.28: Počet vstupních pozic do algoritmu IRHEC v závislosti na nastavených podmínkách generátoru pro pozici profilového skeneru.

se chovají i ostatní hodnoty $Q_{Trans}^{0,95}$, $Q_{Rot}^{0,5}$ a $Q_{Rot}^{0,95}$. Pro nalezení příčiny tohoto chování je vhodné se nejprve podívat na počet vstupních pozic $IR_NoInputPos$ do algoritmu $IRHEC$, viz obr. 5.28. Výrazně menší počty vstupních pozic v případě nulových hodnot u testovaných podmínek jsou očekávané. Z grafů je ale patrné, že nejvyšší počty vstupních pozic náleží kombinacím s hodnotami w_{min}^{diff} mezi 10 až 20 milimetry a $pointsPerPlane_{min}$ mezi 10 až 80 body měřeného profilu na stěnu kalibračního objektu. Důvodem je shlukování očekávaných kalibračních pozic skeneru $E_{S_i}^{exp}$ v prostoru s rostoucími hodnotami testovaných podmínek. Na obr. 5.29 je ukázka tohoto shlukování pro jedno provedení simulace defaultního MCP s nejvyššími hodnotami testovaných podmínek. Levý graf zobrazuje histogram počtu kalibračních pozic skeneru v xy rovině CS_E vůči umístěnému kalibračnímu objektu. Při porovnání s histogramem na obr. 5.3 je vidět výrazný shluk pozic nad středem horní trojúhelníkové plochy kalibračního objektu. Pravý graf na obr. 5.29 pak znázorňuje očekávané rozložení měřených profilů na kalibračním objektu. Oproti grafu na obr. 5.4 je zde vidět mnohem menší pokrytí plochy kalibračního objektu očekávanými profilemi. Menší rozptýlení kalibračních pozic skeneru nad kalibračním objektem tak způsobuje zhoršení přesnosti a



Obr. 5.29: Histogram očekávaných pozic skeneru nad kalibračním objektem (vlevo) a rozložení očekávaných profilových dat na kalibračním objektu (vpravo) pro defaultní MCP s nastavením podmínek $w_{min}^{diff} = 20$ mm a $pointsPerPlane_{min} = 100$.

spolehlivosti kalibrace $\hat{\mathbf{T}}_S^N$. Na základě této analýzy jsou autorem doporučena nastavení parametrů $w_{min}^{diff} = 20 \text{ mm}$ a $pointsPerPlane_{min} = 70$.

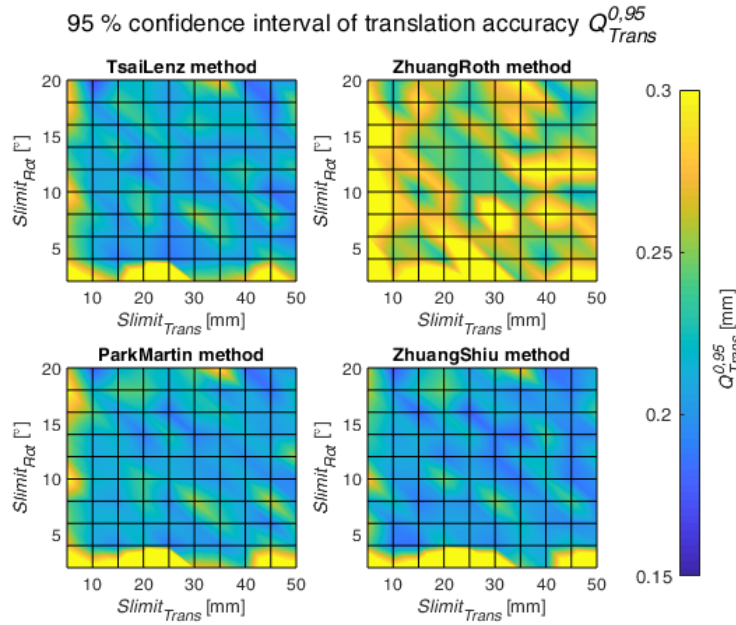
5.4 Vliv nastavení zpracování kalibračních dat

Vygenerované kalibrační pozice jsou následně využity pro získání kalibračních dat (reálně či simulačně), které se skládají z pozic příruby $\mathbf{N}_i^{\text{meas}}$, měřených profilových dat $\{ \mathbf{S}_i^{\text{meas}} \}_i$ kalibračního objektu a odhadů řešení $\mathbf{w}_i^{\text{guess}}$ nelineární soustavy rovnic. Tato kalibrační data jsou (spolu s uživatelskými parametry pro nastavení) vstupem do procesu jejich. Proto je potřeba analyzovat i tuto část navrženého MCP. V první části zpracování jsou na základě profilových dat určeny pozice skeneru ${}^E\mathbf{S}_i$ nad kalibračním objektem (reprezentované transformačními maticemi $\mathbf{T}_{S_i}^E$) a je provedena selekce kalibračních pozic dle stanovených podmínek. V druhé části jsou pak zbylé kalibrační pozice využity navrženým algoritmem *IRHEC* pro výpočet $\hat{\mathbf{T}}_S^N$. Obě části budou rozebrány v následujících podkapitolách.

5.4.1 Podmínky na vyhodnocení pozice profilového skeneru

Během návrhu zpracování kalibračních dat pro MCP se ukázala nutnost zavést určitou kontrolu vyhodnocených pozic skeneru ${}^E\mathbf{S}_i$ nad kalibračním objektem, zejména z důvodu popsaného v podkapitole 4.3.2 při řešení nelineární soustavy rovnic (4.15). Proto autor navrhl na základě vstupního odhadu $\mathbf{w}_i^{\text{guess}}$ porovnání očekávané ${}^E\mathbf{S}_i^{\text{exp}}$ a vypočtené ${}^E\mathbf{S}_i$ pozice skeneru v translaci a rotaci pomocí podmínek $Slimit_{Trans}$ a $Slimit_{Rot}$, viz podkapitola 5.1.3. Obě podmínky byly testovány současně v rozsahu 5 až 50 milimetrů s krokem 5 milimetrů, respektive 2 až 20 stupňů s krokem 2 stupně. Prvním zásadním zjištěním je nízký počet úspěšně dokončených kalibrací $NoSuccessExec$ pro hodnotu $Slimit_{Rot} = 2^\circ$ v kombinaci s libovolnou hodnotou $Slimit_{Trans}$, v průměru okolo 70 kalibrací z celkových 100 kalibrací. To je zapříčiněno především špatným vstupním odhadem ruční kalibrace ${}^{\text{guess}}\mathbf{T}_S^N$ do některých provedení simulace a následným výrazným selektováním kalibračních pozic. Pro ostatní kombinace testovaných podmínek již všechny kalibrace proběhly úspěšně.

Z pohledu vyhodnocení přesnosti a spolehlivosti kalibrace se veličiny $Q_{Trans}^{0,5}$, $Q_{Trans}^{0,95}$, $Q_{Rot}^{0,5}$ a $Q_{Rot}^{0,95}$ v podstatě nemění a shodují se ve všech kombinacích analyzovaných podmínek s hodnotami defaultního MCP. Výjimkou je translační spolehlivost $Q_{Trans}^{0,95}$ v nejnižších testovaných hodnotách, viz grafy na obr. 5.30. Ta je poznamenána již zmíněným nižším počtem úspěšně dokončených kalibrací. To dokazuje i nižší počet vstupních pozic $NoInputPos$ do algoritmu *IRHEC* v grafech na obr. 5.31. Z těchto grafů je také patrné, že vhodným nastavením podmínek jsou limity $Slimit_{Trans} < 30 \text{ mm}$ a $Slimit_{Rot} < 14^\circ$. Uvolněnější podmínky mají za efekt vyšší počet vstupujících pozic $IR_NoInputPos$ do algoritmu *IRHEC*, ale tyto pozice nesplňují sledovaný příznak $correct_w_i = 1$ (hodnota $IR_NoCorrInputPos$ zůstává stejná). Autor tedy doporučuje pro optimální nastavení vyhodnocení ponechat $Slimit_{Rot} = 10^\circ$ a zvýšit hodnotu $Slimit_{Trans} = 25 \text{ mm}$.

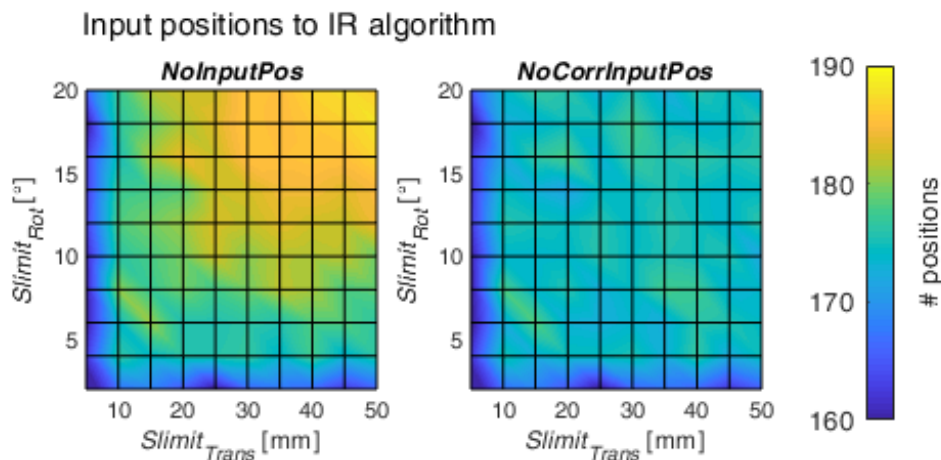


Obr. 5.30: Spolehlivost translační odchyly přesnosti kalibrace v závislosti na podmínkách $Slimit_{Trans}$ a $Slimit_{Rot}$.

5.4.2 Nastavení navrženého algoritmu IRHEC

Nejvýznamnějším faktorem ovlivňující přesnost a spolehlivost kalibrace profilového skeneru jako nástroje robota je nastavení autorem navrženého algoritmu *IRHEC* (podkapitola 4.5). Jeho implementace zaručuje konvergenci hledané $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ ke skutečné transformační matici ${}^* \mathbf{T}_S^N$ ve většině simulovaných provedeních, i když některá z nich obsahují velký počet velmi nepřesně vyhodnocených kalibračních pozic. Pokud by tyto kalibrační pozice byly zpracovány jen metodami pro řešení rovnice hand-eye kalibrace, výsledné chyby kalibrace $\delta_{Trans}(\hat{\mathbf{T}}_S^N, {}^* \mathbf{T}_S^N)$ a $\delta_{Rot}(\hat{\mathbf{T}}_S^N, {}^* \mathbf{T}_S^N)$ by byly v lepších případech v řádu jednotek milimetrů a jednotek stupňů.

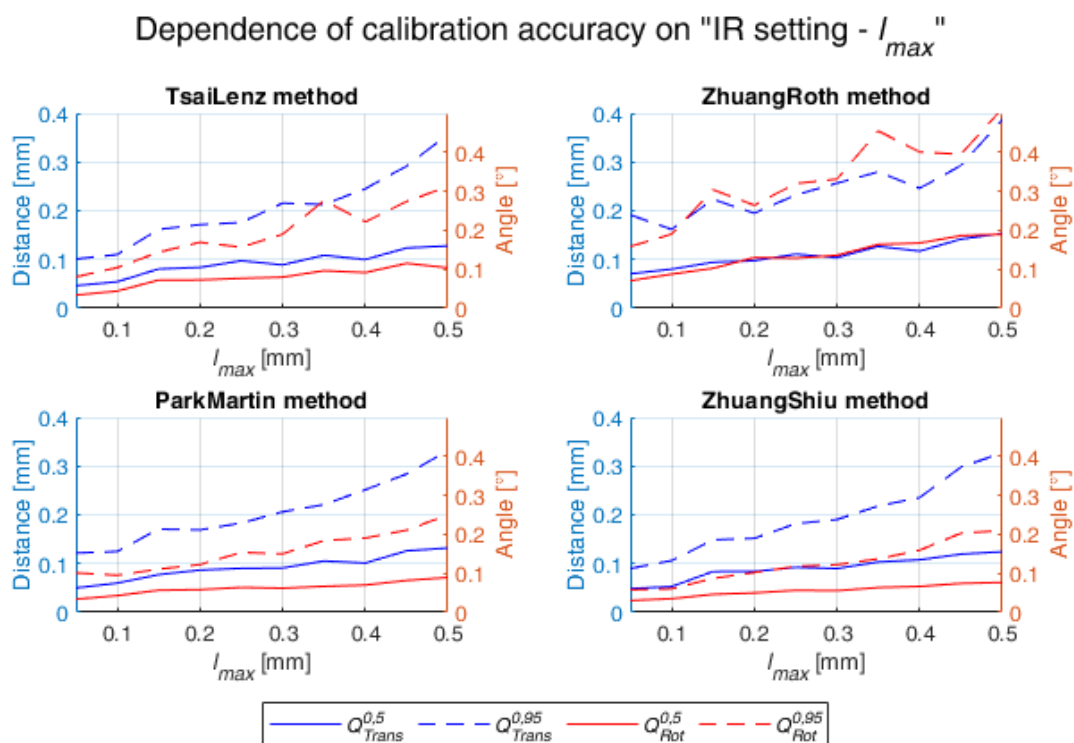
Parametry N_f^{IR} , N_{min}^{IR} a N_{del}^{IR} slouží především k zaručení robustnosti algoritmu *IRHEC*. Jejich změna oproti zvolenému nastavení pro defaultní MCP přináší změny přesnosti kalibrace



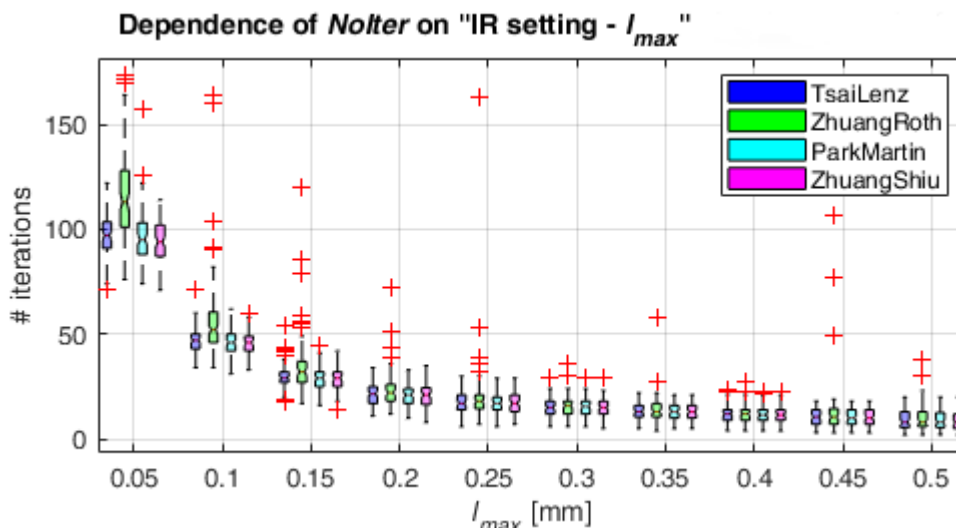
Obr. 5.31: Počet vstupních pozic do algoritmu IRHEC v závislosti na podmínkách $Slimit_{Trans}$ a $Slimit_{Rot}$.

v setinách milimetru či setinách stupně. Parametr N_f^{IR} koriguje vyřazování kalibračních pozic dle aktuálně dopočtených $iter \hat{\mathbf{T}}_S^N$. Zejména na začátku algoritmu mohou být tyto transformační matice zkresleny velkým počtem nepřesných kalibračních pozic. Pro defaultní MCP není zapotřebí hodnotu $N_f^{IR} = 3$ měnit. Zastavovací podmínku N_{min}^{IR} pro neúspěšnou kalibraci by měl uživatel volit s ohledem na celkový počet kalibračních pozic NoP a také s ohledem na důvěryhodnost kalibrace. Dle obecných požadavků na statistické zpracování dat by tato hodnota měla být minimálně 50. Autor ji však doporučuje volit jako polovinu počtu generovaných pozic NoP . Selektování většího počtu kalibračních pozic totiž značí, že očekávaný MCP se neshoduje s reálnou situací (chyby polohování robota či chyby měření skenerem jsou vyšší, než bylo předpokládáno). Počet vyřazených kalibračních pozic N_{del}^{IR} v každé iteraci pak především zmenší časovou náročnost algoritmu *IRHEC*. V případě defaultního MCP se však jedná o jednotky sekund i pro případy s $IR_NoIter > 150$, takže není důvod měnit volbu $N_{del}^{IR} = 1$.

Z pohledu přesnosti a spolehlivosti celého procesu kalibrace je nejdůležitější analýza a nastavení podmínky l_{max} dle očekávaného MCP. Vygenerovaná kalibrační data byla postupně zpracovávána s podmínkou l_{max} v rozsahu od 0,05 do 0,5 milimetru s krokem 0,05 milimetru. Výsledná přesnost a spolehlivost kalibrace jsou znázorněny v grafech na obr. 5.32. Z těchto průběhů je jasně viditelný pokles chyb kalibrace v translaci $Q_{Trans}^{0,5}$ i rotaci $Q_{Rot}^{0,5}$ s klesající hodnotou l_{max} , i když na vstupu jsou stejná vstupní kalibrační data. Ještě významnější pokles pak zaznamenávají hodnoty spolehlivosti kalibrace $Q_{Trans}^{0,95}$ a $Q_{Rot}^{0,95}$. Dosažená přesnost a spolehlivost kalibrace pro nastavení $l_{max} = 0,1 \text{ mm}$ by vyhověla i úlohám laserového obrábění s vyššími požadavky na přesnost navádění. Kromě sledování vlivu na přesnost a spolehlivost



Obr. 5.32: Přesnost kalibrace v závislosti na změně parametru l_{max} v algoritmu *IRHEC*.



Obr. 5.33: Počet iterací algoritmu IRHEC pro jednotlivé metody v závislosti na změně parametru l_{max} .

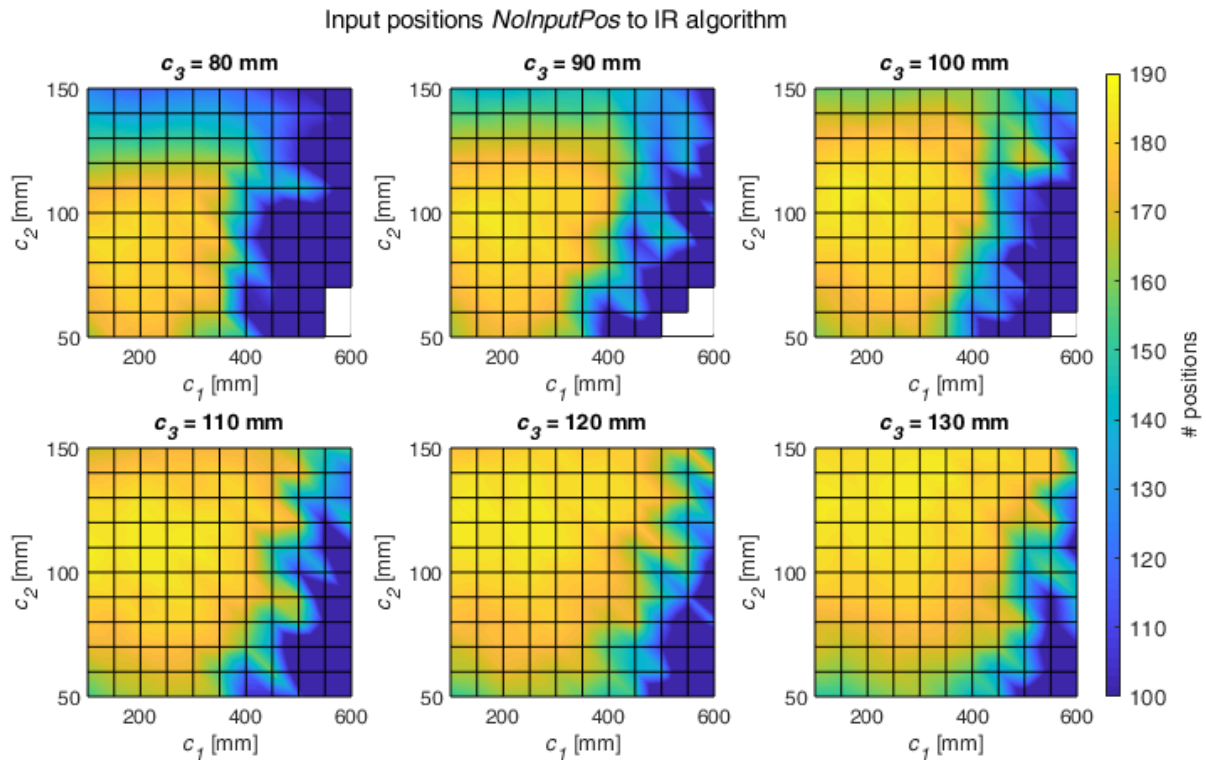
kalibrace je nutné v tomto případě také sledovat počet provedených iterací IR_NoIter , viz obr. 5.33. Z grafů je patrný očekávaný růst počtu iterací se zmenšováním hodnoty l_{max} . Pro hodnotu $l_{max} = 0,05$ mm se počet iterací IR_NoIter u ZR metody již přibližuje počtu vstupních pozic $IR_NoInputPos \cong 180$. Počet kalibračních pozic $IR_NoUsedPos$ v poslední iteraci algoritmu IRHEC se v některých provedeních blíží k hodnotě 50, což je z pohledu spolehlivosti algoritmu autorem bráno jako minimum. Pro ZR metodu dokonce v 11 provedeních daná kalibrace skončila neúspěchem.

Nastavení hodnoty l_{max} hraje spolu s nastavením počtu generovaných pozic NoP nejvýznamnější roli na přesnost a spolehlivost kalibrace skeneru jako nástroje robota. Proto jejich hodnoty budou analyzovány ještě jednou pro MCP, který bude mít již ostatní parametry optimalizované dle předchozí analýzy.

5.5 Vliv rozměrů kalibračního objektu

Poslední analyzovanou oblastí MCP je vliv rozměrů kalibračního objektu na přesnost a spolehlivost kalibrace. Původní rozměry $\mathbf{c}^* = [120 \ 80 \ 80]$ byly navrženy intuitivně na základě měřicího rozsahu profilového skeneru scanCONTROL 2600-100 a principu laserové triangulace. Vzhledem k velkému množství kombinací rozměrů se výpočetní časové nároky pohybují v řádu dní až týdnů (vztaženo k implementaci MCP v Matlabu a s nastavením 14 paralelních výpočetních vláken). Proto je vhodné nejprve provést hrubé prozkoumání v širším rozsahu rozměrů a až následně zvolit rozsahy pro podrobnější analýzu. Dle tohoto postupu byly autorem testovány rozměry kalibračního objektu v těchto rozsazích:

- c_1 – od 100 do 600 milimetrů s krokem 50 milimetrů.
- c_2 – od 50 do 150 milimetrů s krokem 10 milimetrů.
- c_3 – od 80 do 130 milimetrů s krokem 10 milimetrů.



Obr. 5.34: Počet vstupních pozic do algoritmu *IRHEC* v závislosti na rozměrech kalibračního objektu.

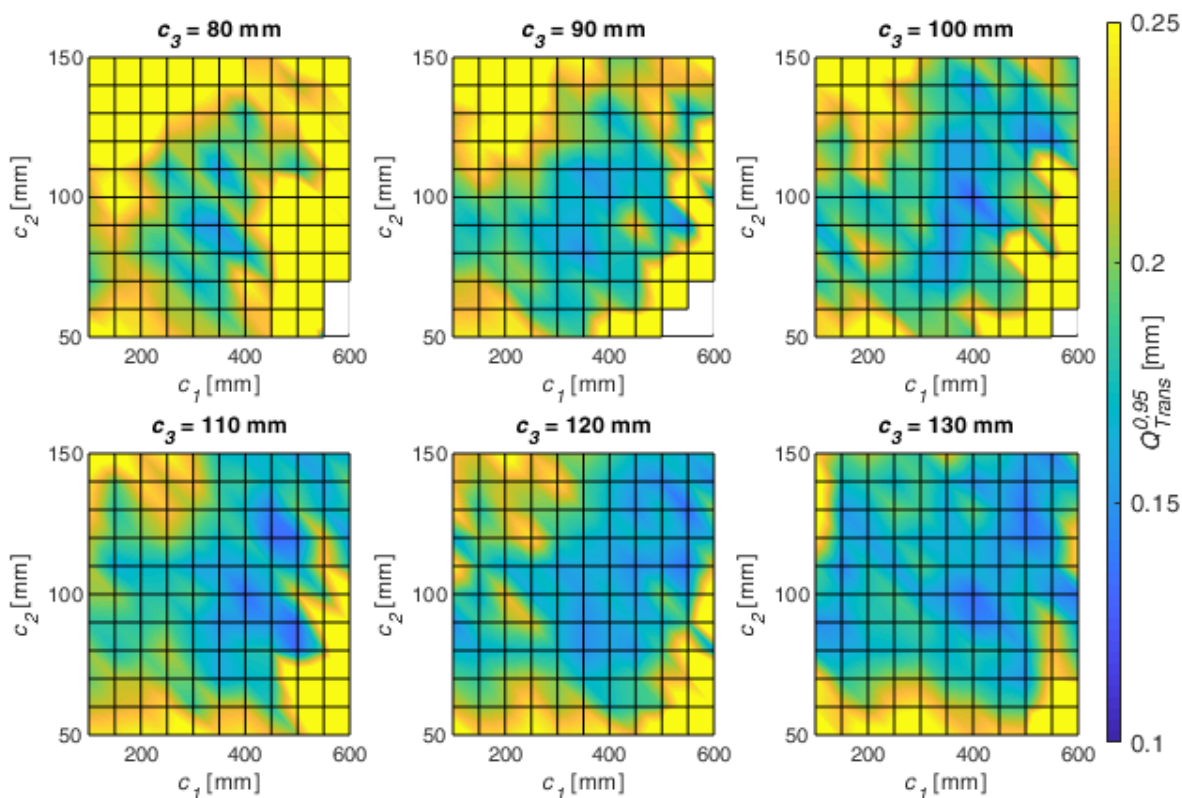
První sledovanou veličinou byl počet kalibračních pozic *IR_NoInputPos* vstupujících do algoritmu *IRHEC*, viz grafy na obr. 5.34. Jelikož testovaný prostor je třídimenzionální, je zobrazení výsledků provedeno v řezech parametru c_3 . Bílá místa v grafech značí oblasti, ve kterých se nepodařilo pro dané rozměry kalibračního objektu vygenerovat zadaný počet kalibračních pozic $NoP = 200$. Pro ostatní kombinace rozměrů byl vygenerován požadovaný počet pozic ve všech provedeních dané simulace. Z grafů na obr. 5.34 je vidět velký rozdíl počtu vstupujících kalibračních pozic *IR_NoInputPos* do algoritmu *IRHEC*. Toto rozložení je prvním kritériem při volbě vhodných rozměrů kalibračního objektu.

Testované kombinace rozměrů kalibračního objektu mají v oblastech s dostatečným počtem vstupních kalibračních pozic *IR_NoInputPos* velmi podobné hodnoty chyb přesnosti kalibrace v translaci $Q_{Trans}^{0,5}$ i rotaci $Q_{Rot}^{0,5}$. Výrazněji se však projeví změny rozměrů na sledované spolehlivosti kalibrace, viz například translační spolehlivost kalibrace $Q_{Trans}^{0,95}$ pro ZS metodu na obr. 5.35. Právě spolehlivost kalibrace je druhým doporučeným kritériem při volbě rozměrů kalibračního objektu. Z grafů na obr. 5.34 a na obr. 5.35 je patrné, že intuitivně zvolené rozměry kalibračního objektu byly poměrně dobrou volbou. Při výrobě nového kalibračního objektu by autor doporučil rozměry $\mathbf{c}^* = [300 \ 100 \ 130]$.

5.6 Optimální nastavení MCP

V předchozích podkapitolách byly analyzovány vlivy parametrů pro nastavení generátoru kalibračních pozic a vlivy parametrů pro následné zpracování kalibračních dat. Většina z parametrů nemá přímo či nepřímo úměrný dopad na přesnost a spolehlivost kalibrace. Pomocí

95 % confidence interval of translation accuracy $Q_{Trans}^{0,95}$ - ZhuangShiu method



Obr. 5.35: Spolehlivost translační odchylky přesnosti kalibrace v závislosti na rozměrech kalibračního objektu.

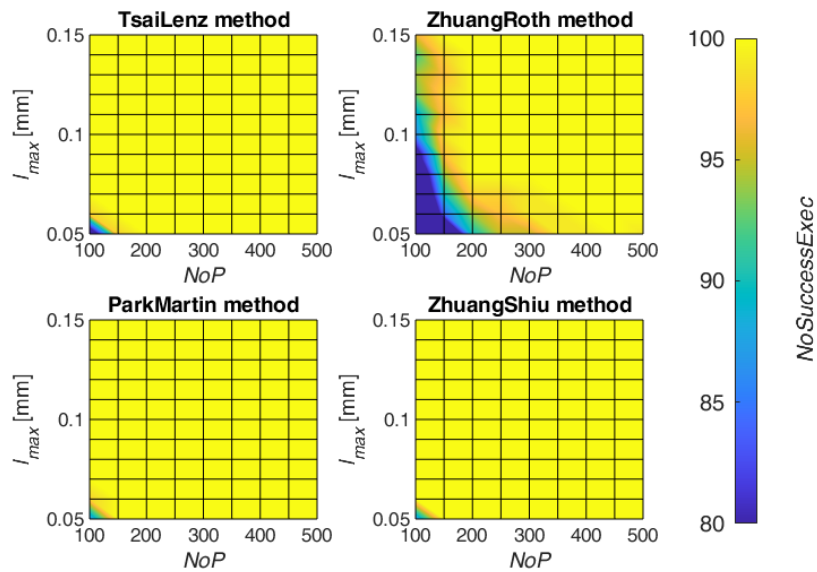
analýzy byly však určeny vhodné rozsahy nastavení těchto parametrů. Autor pak pro každý z těchto parametrů navrhl doporučenou hodnotu pro optimální nastavení MCP. Shrnutí doporučených hodnot je následující:

- Generátor kalibračních pozic
 - $calPosLim_{Trans} = 5 \text{ mm}$, $calPosLim_{Rot} = 2^\circ$,
 - $w_{min}^{diff} = 20 \text{ mm}$,
 - $pointsPerPlane_{min} = 70$.
- Zpracování kalibračních dat
 - $Slimit_{Trans} = 25 \text{ mm}$, $Slimit_{Rot} = 10^\circ$,
 - Algoritmus *IRHEC*: $N_f^{IR} = 3$, $N_{min}^{IR} = \frac{NoP}{2}$, $N_{del}^{IR} = 1$.

Během analýzy pak byly identifikovány dva nejvýznamnější parametry s přímým dopadem na přesnost a spolehlivost kalibrace. Prvním parametrem je hodnota počtu generovaných pozic NoP . Druhým parametrem je nastavení ukončovací podmínky l_{max} v algoritmu *IRHEC*. Z tohoto důvodu byla provedena ještě dodatečná analýza upraveného MCP dle zmíněných doporučených hodnot. Testovány byly kombinace parametrů NoP a l_{max} v těchto rozsazích:

- NoP – od 100 do 500 kalibračních pozic s krokem 50,
- l_{max} – od 0,05 do 0,15 milimetru s krokem 0,01 milimetru.

Successfully computed calibration *NoSuccessExec*

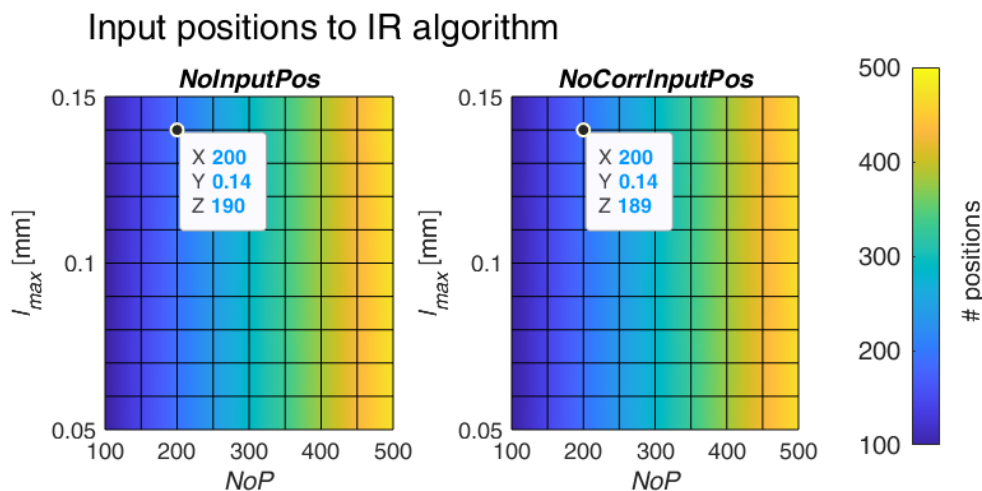


Obr. 5.36: Počet úspěšně dokončených kalibrací pro optimalizovaný MCP v závislosti na NoP a l_{max} .

V první řadě je nutné podívat se na úspěšnost dokončených kalibrací pro jednotlivé testované kombinace, viz obr. 5.36. Automaticky jsou tak vyloučeny kombinace parametrů, ve kterých není splněna podmínka $NoSuccessExec = 100$.

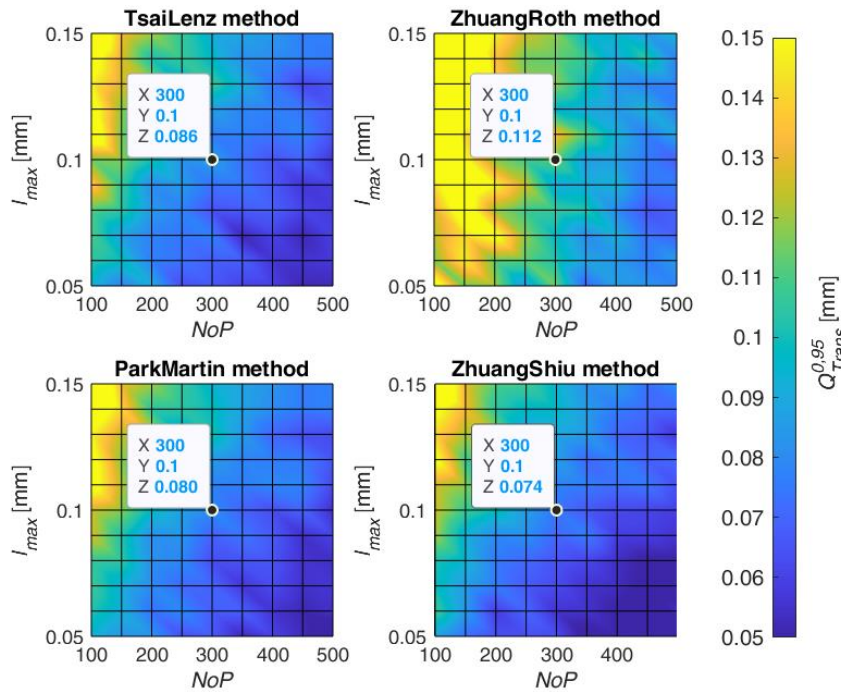
Jeden z přínosů upravených parametrů MCP je vidět na počtu vstupních pozic $IR_NoInputPos$ do algoritmu $IRHEC$ na obr. 5.37. Oproti defaultnímu MCP klesla selekce nevhodných kalibračních pozic během úvodního zpracování dat z 10 % na 5 %. Navíc počet pozic $IR_NoCorrInputPos$ je téměř totožný s $IR_NoInputPos$.

Nejdůležitějšími informacemi pro rozhodnutí o vhodné volbě kombinace parametrů NoP a l_{max} jsou hodnoty přesnosti a spolehlivosti kalibrace $Q_{Trans}^{0,5}$, $Q_{Rot}^{0,5}$, $Q_{Trans}^{0,95}$ a $Q_{Rot}^{0,95}$. Autor pak



Obr. 5.37: Počet vstupních pozic $IR_NoInputPos$ pro optimalizovaný MCP v závislosti na NoP a l_{max} .

95 % confidence interval of translation accuracy $Q_{Trans}^{0,95}$

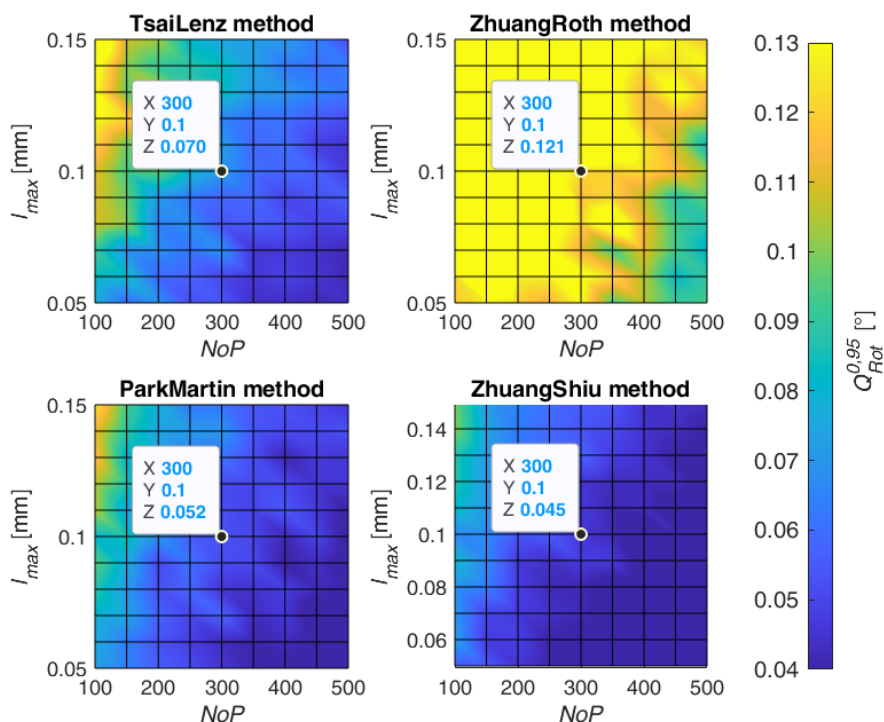


Obr. 5.38: Translační spolehlivost kalibrace $Q_{Trans}^{0,95}$ pro optimalizovaný MCP v závislosti na NoP a l_{max} .

doporučuje zaměřit se především na spolehlivost kalibrace s ohledem na využití postupu pro kalibraci reálných STS. Závislosti $Q_{Trans}^{0,95}$ a $Q_{Rot}^{0,95}$ na testovaných parametrech jsou vykresleny na obr. 5.38 a na obr. 5.39. Z grafů je patrné, že ZR metoda vykazuje mírně horší výsledky než zbylé tři metody. Dle požadované přesnosti navádění je nutné vybrat vhodnou kombinaci parametrů. Pro nejnáročnější úlohy laserového obrábění je vyžadována přesnost navádění do jedné desetiny milimetru, resp. jedné desetiny stupně. Proto se autor rozhodl zvolit pro optimální MCP hodnoty $NoP = 300$ a $l_{max} = 0,1 \text{ mm}$. Požadované přesnosti lze dosáhnout i jinými kombinacemi parametrů. Jednou variantou je snížit počet generovaných pozic NoP , a zároveň snížit ukončovací podmínku l_{max} . Tato kombinace parametrů bude ale více náchylná na přítomnost neočekávaných chyb v modelu MCP, např. větší chyba měření. Druhou možností je zvýšit počet generovaných pozic NoP a také hodnotu l_{max} . Tato kombinace bude robustnější z hlediska výpočtu hledané transformační matice $\hat{\mathbf{T}}_S^N$. Z praktického hlediska ale přinese také delší dobu především pro proces snímání dat v kalibračních pozicích. Jeden přesun skeneru do kalibrační pozice a následné snímání dat trvá v autorem vyvíjených STS cca 4 sekundy. Rozhodnutí o počtu generovaných pozic je tak dáno také otázkou frekvence provádění kalibrace na daném pracovišti (jednoúčelové stroje versus pracoviště s častou výměnou procesní hlavy a skeneru).

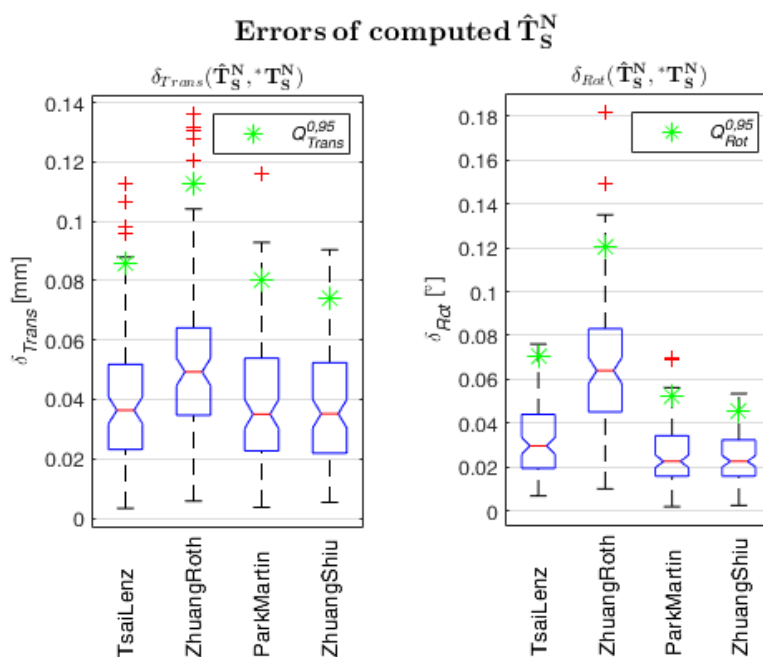
Pro porovnání s defaultním MCP bylo optimální MCP také simulováno pomocí $NoExec = 100$ provedení. Rozložení chyb výsledné kalibrace $\delta_{Trans}(\hat{\mathbf{T}}_S^N, *T_S^N)$ a $\delta_{Rot}(\hat{\mathbf{T}}_S^N, *T_S^N)$ pro optimální MCP je na obr. 5.40. Číselné porovnání vybraných veličin mezi oběma modely je uvedeno v tab. 5-1. Pomocí provedené analýzy a nalezení optimálních parametrů MCP se

95 % confidence interval of rotation accuracy $Q_{Rot}^{0,95}$



Obr. 5.39: Rotační spolehlivost kalibrace $Q_{Rot}^{0,95}$ pro optimalizovaný MCP v závislosti na NoP a l_{max} .

podářilo dvakrát až třikrát zlepšit hodnoty přesnosti a spolehlivosti kalibrace $Q_{Trans}^{0,5}$, $Q_{Rot}^{0,5}$, $Q_{Trans}^{0,95}$ a $Q_{Rot}^{0,95}$. V tab. 5-1 je uvedena také dosud nezmíněná časová náročnost generování



Obr. 5.40: Rozložení chyb kalibrace δ_{Trans} a δ_{Rot} - optimální MCP.

kalibračních pozic a jejich následného zpracování jednotlivými metodami. Zvýšení časové náročnosti pro optimální MCP je jen v jednotkách až desítkách sekund, což v porovnání s dobou trvání sběru dat v kalibračních pozicích (cca 20 minut) je zanedbatelné.

Tab. 5-1: Porovnání výsledků kalibrace skeneru defaultním MCP a optimálním MCP

	Veličina	Defaultní MCP	Optimální MCP
	<i>NoP</i>	200	300
	<i>Med(timeGenData)</i> [s]	18,72	143,02
	<i>Med(IR_NoInputPos)</i>	184	288
	<i>Med(IR_NoCorrInputPos)</i>	176	285
TL metoda	<i>Med(IR_NoUsedPos)</i>	170	237
	$Q_{Trans}^{0,5}$ [mm]	0,097	0,037
	$Q_{Trans}^{0,95}$ [mm]	0,201	0,086
	$Q_{Rot}^{0,5}$ [°]	0,086	0,030
	$Q_{Rot}^{0,95}$ [°]	0,240	0,070
	<i>Med(IR_Time)</i> [s]	0,14	0,68
ZR metoda	<i>Med(IR_NoUsedPos)</i>	169	233
	$Q_{Trans}^{0,5}$ [mm]	0,115	0,049
	$Q_{Trans}^{0,95}$ [mm]	0,248	0,112
	$Q_{Rot}^{0,5}$ [°]	0,154	0,064
	$Q_{Rot}^{0,95}$ [°]	0,308	0,121
	<i>Med(IR_Time)</i> [s]	0,14	0,73
PM metoda	<i>Med(IR_NoUsedPos)</i>	170	237
	$Q_{Trans}^{0,5}$ [mm]	0,102	0,035
	$Q_{Trans}^{0,95}$ [mm]	0,200	0,080
	$Q_{Rot}^{0,5}$ [°]	0,066	0,023
	$Q_{Rot}^{0,95}$ [°]	0,167	0,052
	<i>Med(IR_Time)</i> [s]	0,93	6,22
ZS metoda	<i>Med(IR_NoUsedPos)</i>	170	236
	$Q_{Trans}^{0,5}$ [mm]	0,102	0,035
	$Q_{Trans}^{0,95}$ [mm]	0,197	0,074
	$Q_{Rot}^{0,5}$ [°]	0,063	0,023
	$Q_{Rot}^{0,95}$ [°]	0,130	0,045
	<i>Med(IR_Time)</i> [s]	1,05	5,78

Jedním z cílů autora bylo pomocí analýzy MCP také snížit chyby změn polohy skeneru $\mathbf{T}_{S_{i+1}}^{S_i}$, které vstupují do rovnice hand-eye kalibrace. Vstupní průměrná chyba těchto změn polohy do algoritmu *IRHEC* klesla oproti defaultnímu MCP o jeden řád na hodnoty okolo 0,5 milimetru

v translaci a 0,5 stupně v rotaci. Průměrná chyba změn polohy skeneru \mathbf{T}_{Si+1}^{Si} po skončení algoritmu *IRHEC* je pak 0,1 milimetru, resp. 0,15 stupně. V porovnání s chybami pro defaultní MCP (obr. 5.7 a obr. 5.8) je opět jasně patrný přínos optimálního MCP. Pro možnost porovnání přínosu optimálního MCP proti defaultnímu MCP jsou v příloze C grafy pozorovaných veličin popsanych v podkapitole 5.1.

5.7 Vyhodnocení analýzy

Na začátku této kapitoly byl nejprve představen kompletní postup pro generování kalibračních dat a jejich následného zpracování během simulací MCP. Tento postup je autorem navržený dle reálného průběhu kalibrace profilového skeneru jako nástroje robota. Zahrnuje tedy vstupní chyby do kalibrace v podobě chyby polohování robota, chyby měření skeneru a chyby zadané ruční kalibrace ${}^{\text{guess}}\mathbf{T}_S^N$. Z hlediska důvěryhodnosti dosažených výsledků se každá simulace konkrétního nastavení MCP skládá ze $NoExec = 100$ provedení, které jsou následně statisticky zpracovány. Nedojde tak ke zkreslení pohledu na výsledky vlivem ojedinělého provedení z jednoho či druhého kraje jejich pravděpodobnostního rozložení. Autor také představil několik sledovaných veličin pro ohodnocení a porovnání jednotlivých MCP, z nichž nejvýznamnější jsou samozřejmě parametry hodnotící přesnost kalibrace $Q_{Trans}^{0,5}$, $Q_{Rot}^{0,5}$ a také její spolehlivost $Q_{Trans}^{0,95}$, $Q_{Rot}^{0,95}$.

V první fázi byly analyzovány vstupní chyby do procesu kalibrace. Uvažovaná chyba opakovatelnosti robota způsobuje chybu polohování příruby v setinách milimetru, takže oproti řádově vyšším chybám dopočítávané polohy profilového skeneru nad kalibračním objektem se její změna na přesnosti a spolehlivosti kalibrace neprojeví. Naopak vliv chyby měření profilového skeneru hraje zásadní roli, neboť jejím zvýšením (simulující například změnu typu skeneru nebo jeho špatné nastavení vůči měřenému povrchu) dochází k násobnému zhoršení sledovaných parametrů $Q_{Trans}^{0,5}$, $Q_{Rot}^{0,5}$, $Q_{Trans}^{0,95}$ a $Q_{Rot}^{0,95}$. V této části byl však ukázán významný přínos navrženého MCP oproti klasickému přístupu v Liška et al. (2018a). Posledním testovaným vstupním vlivem byla chyba ruční kalibrace ${}^{\text{guess}}\mathbf{T}_S^N$, která je důležitým vstupem pro automatické plánování kalibračních pozic. Z analýzy vyplynulo, že větší vliv na kalibraci má především chyba v natočení tohoto odhadu. Vzhledem k autorem navrženému postupu pro ruční kalibraci skeneru v příloze B.3 by však vstupní chyby neměly být v hodnotách, které způsobují významné chyby v přesnosti a spolehlivosti kalibrace či které by dokonce způsobovaly její neúspěšné dokončení $NoSuccessExec \neq 100$.

Analýza nastavení generátoru kalibračních pozic a nastavení následného zpracování kalibračních dat rozřazuje parametry do dvou kategorií. V té první jsou parametry, pomocí jejichž hodnot lze ovlivnit počet vstupních pozic $IR_NoInputPos$ do algoritmu *IRHEC* (včetně počtu korektních pozic $IR_NoCorrInputPos$). Nastavení těchto parametrů však nepůsobí na přesnost a spolehlivost kalibrace úměrně, ale spíše rovnoměrně v určitém vhodném rozsahu. Autor pro jednotlivé parametry doporučil optimální hodnoty. Ve druhé kategorii jsou pak parametry, které mají úměrný vliv na sledovanou přesnost a spolehlivost kalibrace. Jsou jimi počet generovaných pozic NoP a nastavení podmínky l_{max} na shluk bodů v algoritmu *IRHEC*. Optimální nastavení těchto dvou parametrů má nejvyšší efekt na snížení výsledných chyb

kalibrace $\delta_{Trans}(\hat{\mathbf{T}}_S^N, {}^*\mathbf{T}_S^N)$ a $\delta_{Rot}(\hat{\mathbf{T}}_S^N, {}^*\mathbf{T}_S^N)$. Proto jejich nastavení je optimalizováno samostatně v podkapitole 5.6. Výsledná přesnost a spolehlivost kalibrace pro optimální MCP je až třikrát lepší než přesnost a spolehlivost kalibrace pro defaultní MCP. Dosažená spolehlivost kalibrace splňuje požadavky na STS pro nejnáročnější laserové úlohy.

Autor se v analýze MCP dále věnoval volbě vhodných rozměrů kalibračního objektu pro jeho případnou novou výrobu. Změna rozměrů na doporučené hodnoty by zvýšila především robustnost kalibračního procesu. Během analýzy byly porovnávány také výsledky jednotlivých metod řešící rovnici hand-eye kalibrace v navrženém algoritmu *IRHEC*. Jako nejhorší z pohledu úspěšně dokončených kalibrací, jejich přesnosti a spolehlivosti lze označit *ZR* metodu založenou na kvaternionech. Zbylé tři metody jsou si v dosažených výsledcích velmi podobné, i když z pohledu sledování rotační přesnosti $Q_{Rot}^{0,5}$ a spolehlivosti $Q_{Rot}^{0,95}$ je *ZS* metoda ještě nepatrně lepší než zbylé dvě metody.

Pokud je analýza MCP provedena již během návrhu naváděcího systému, mohou být její výsledky jedním z hodnotících kritérií pro volbu konkrétního typu robota a profilového skeneru s ohledem na požadovanou přesnost dané technologie svařování, kalení apod. Lze tak ušetřit velké investované finanční prostředky do hardwaru či na druhé straně vyhnout se nespolehlivému systému neplnícímu svůj účel ve výrobě. V této fázi je také nutné podívat se na vliv rozměrů vybraného kalibračního objektu a zvolit je zejména z pohledu robustnosti následné kalibrace. I zde je však zapotřebí vzít v úvahu finanční hledisko, jelikož se cena precizně vyrobeného kalibračního objektu s rostoucími rozměry zvyšuje.

6 Vliv absolutní chyby robota na proces kalibrace nástroje robota

Nalezený optimální MCP je nyní ověřený pro naváděcí systém s robotem, jehož geometrické parametry ξ byly přesně kalibrovány. Takový robot tudíž v praxi nemá žádnou nebo jen minimální absolutní chybu polohování příruby. Dosažená přesnost a spolehlivost vypočtené transformační matice $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ bude vyhovovat nejnáročnějším úlohám pro laserové technologie, viz výsledky v předchozí kapitole. V praxi ovšem jen velmi malá část STS využívá individuálně kalibrovaných robotů. Většina těchto systémů se skládá ze sériově vyráběných robotů, které mají řízení stanovené na základě jednotných geometrických parametrů ξ pro daný model robota. Není tak zohledněna přesnost výroby a montáže jednotlivých součástí pro konkrétního robota. Výsledkem je vznik absolutní chyby polohování robota, jenž dosahuje až jednotek milimetrů (Abderrahim et al., 2006; Joubair a Bonev, 2015; Yang et al., 2017). Absolutní chyba robota je tak o dva řády větší než chyba opakovatelnosti. Velikost absolutní chyby robota je navíc proměnná dle aktuální pozice v pracovním prostoru robota a dle aktuálních kloubových souřadnic \mathbf{Q}_i (do stejného místa v pracovním prostoru se lze dostat více konfiguracemi kloubových souřadnic u sériových manipulátorů). Autorovi této práce je však známo velmi malé množství odborných publikací z oblasti hand-eye kalibrace, které by podrobně řešily vliv této významné chyby na přesnost kalibrace nástroje robota, respektive přesnost naváděcích systémů. Dle autorovy zkušenosti s vývojem STS v praxi i odborníci v této oblasti vliv absolutní chyby robota v podstatě opomíjejí. Jedním z důvodů je, že sami výrobci robotů neposkytují informaci o absolutní chybě robota, ale pouze o chybě opakovatelnosti. Druhým významným důvodem je dosavadní způsob programování robotů pomocí metody „teach and play“, která absolutní chyby při plánování trajektorie kompenzuje vizuální kontrolou operátora. Na základě výše popsané skutečnosti autor považuje za důležité popsat vliv absolutní chyby robota na proces kalibrace nástroje. A to jak na proces hand-eye kalibrace profilového skeneru, tak také na kalibraci libovolného nástroje robota pomocí standardně dostupných metod v kontrolé robota. Dále bude popsán praktický dopad absolutní chyby robota na přesnost naváděcích systémů. Na konci kapitoly pak budou shrnuty praktická doporučení pro využití navrženého MCP v praxi. Na konci bude popsáno plánované rozšíření navrženého MCP tak, aby mohl být daný postup využit i pro kalibraci robota.

Analyzovaný robot Fanuc M-20ia/20M také spadá do kategorie sériově vyráběných robotů bez dodatečné kalibrace, a tudíž lze očekávat přítomnost absolutní chyby polohování. Tato domněnka byla potvrzena provedeným testem absolutní přesnosti, viz příloha B.1. Autor této práce nedisponuje měřicím systémem, který by mu pomohl určit konkrétní velikosti absolutní chyby polohování či dokonce velikosti chyb geometrických parametrů $\Delta\xi$. Na základě výše zmíněných publikací ale autor zvolil chyby jednotlivých DH parametrů tak, aby se výsledná chyba polohování příruby pohybovala v rozmezí jeden až dva milimetry. Ostatní vlivy na absolutní přesnost autor zanedbal. Velikost chyby je závislá na konkrétní konfiguraci kloubových souřadnic \mathbf{Q}_i a konkrétní pozici příruby \mathbf{N}_i v pracovním prostoru robota. Zvolené chyby DH parametrů robota jsou uvedeny v tab. 6-1. Skutečné DH parametry ξ^* jsou pak dle rovnice (2.15) dány rozdílem očekávaných DH parametrů ξ^{exp} v tab. 4-1 a zvolených chyb DH parametrů $\Delta\xi$ v tab. 6-1

$$\xi^* = \xi^{\text{exp}} - \Delta\xi. \quad (6.1)$$

Tab. 6-1: Zvolené chyby DH parametrů robota Fanuc M-20iA/20M

Souřadný systém	Δd_i [mm]	$\Delta\theta_i$ [°]	Δa_i [mm]	$\Delta\alpha_i$ [°]
1	0	0,03	0,2	-0,01
2	0,1	-0,01	0,2	-0,02
3	0	-0,03	0,1	0,04
4	0,1	0,02	0	0,01
5	-0,1	-0,03	0	0,02
6	-0,2	-0,01	0	0,01

Navržený MCP opět umožňuje generovat kalibrační pozice dle očekávaných vstupů „exp“ do modelu a následně simulovat proces kalibrace dle skutečných hodnot „*“, viz postup v předchozí kapitole. Lze tak analyzovat vliv absolutní chyby robota na vypočtenou transformační matici $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ a další sledované veličiny. Jak již bylo uvedeno, absolutní chyba robota je závislá na konkrétním umístění kalibračního objektu ${}^*\mathbf{T}_E^W$ a na konkrétních kloubových souřadnicích \mathbf{Q}_0 . Proto bude vliv absolutní chyby v další části textu analyzován pro tyto dvě konfigurace:

- Konfigurace 1
 - $\mathbf{Q}_0 = [60^\circ \ 100^\circ \ 110^\circ \ -130^\circ \ 100^\circ \ -160^\circ]$,
 - ${}^*\mathbf{T}_E^W = T([600 \ 600 \ 100]^T, [0 \ 0 \ 0]^T)$.
- Konfigurace 2
 - $\mathbf{Q}_0 = [30^\circ \ 110^\circ \ 90^\circ \ -60^\circ \ -100^\circ \ 0^\circ]$,
 - ${}^*\mathbf{T}_E^W = T([600 \ 600 \ 100]^T, [0 \ 0 \ 90]^T)$.

Autorův výběr konfigurací je záměrný, neboť chce ukázat, že i relativně velmi podobné konfigurace mohou způsobit významný rozdíl ve vypočtené transformační matici $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ a také v přesnosti celého STS.

6.1 Vliv na hand-eye kalibraci skeneru pomocí MCP

Zásadní změnou oproti MCP analyzovaného v předchozí kapitole je velikost a zejména rozložení chyb očekávaných pozic příruby ${}^{\text{exp}}\mathbf{T}_{N_i}^W$ vůči skutečným pozicím příruby ${}^*\mathbf{T}_{N_i}^W$. Velikosti translační odchylky $\delta_{Trans}({}^{\text{exp}}\mathbf{T}_{N_i}^W, {}^*\mathbf{T}_{N_i}^W)$ i rotační odchylky $\delta_{Rot}({}^{\text{exp}}\mathbf{T}_{N_i}^W, {}^*\mathbf{T}_{N_i}^W)$ pro obě zmíněné konfigurace jsou na obr. 6.1, resp. na obr. 6.2. Zásadními zjištěními jsou:

- Velikosti chyb polohování příruby jsou o dva řády vyšší oproti chybám v MCP zahrnující pouze chybu opakovatelnosti robota.
- V porovnání s chybami vypočtených $\mathbf{T}_{S_i}^E$ a skutečných ${}^*\mathbf{T}_{S_i}^E$ pozic skeneru (obr. 5.11) je patrné zcela odlišné rozložení chyb. V případě chyb polohování příruby jsou translační i rotační odchylky rozloženy v úzkém pásmu okolo konstantní nenulové hodnoty. Tyto chyby převedené do souřadného systému pak tvoří určitý shluk, který

není rovnoměrně rozložený vůči počátku souřadného systému, viz pravé grafy na obr. 6.1 a na obr. 6.2.

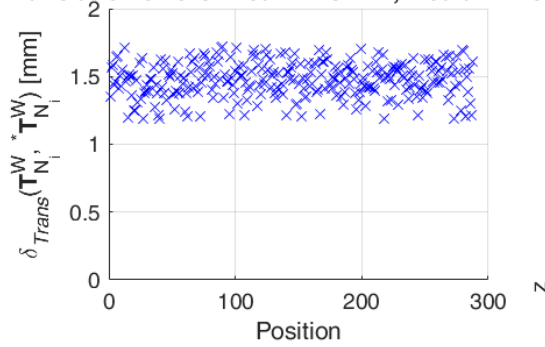
- Velikosti odchylek a poloha shluku chyb polohování příruby je odlišná i pro velmi podobné konfigurace.

Obě zvolené konfigurace byly simulovány opět $NoExec = 100$ provedeními, aby mohly být výsledky zpracovány stejným způsobem jako v předchozí kapitole. Nastavení parametrů MCP je zvoleno na základě získaného optimálního MCP. Pouze hodnotu ukončovací podmínky algoritmu *IRHEC* bylo zapotřebí zvednout na hodnotu $l_{max} = 0,3 \text{ mm}$. Důvodem je vyšší chyba změn příruby $T_{N_{i+1}}^{N_i}$ vstupujících do rovnice hand-eye kalibrace. Proto musí být uvolněna i podmínka na kompaktnost shluku bodů ${}^W E_i$ (podkapitola 4.5), aby pro výpočet výsledné \hat{T}_S^N byl využit autorem doporučený nadpoloviční počet kalibračních pozic. Přesnost nalezené transformační matice \hat{T}_S^N je pro zvolené konfigurace na obr. 6.3, resp. na obr. 6.4. Dosažená přesnost $Q_{Trans}^{0,5}$, $Q_{Rot}^{0,5}$ a spolehlivost $Q_{Trans}^{0,95}$, $Q_{Rot}^{0,95}$ kalibrace je násobně horší než výsledky optimálního MCP na obr. 5.40, který zahrnoval pouze chybu opakovatelnosti robota. Je nutné si ale všimnout důležitého faktu, že rozložení hodnot translační odchylky $\delta_{Trans}(\hat{T}_S^N, {}^*T_S^N)$ není v celém rozsahu od 0 do hodnoty $Q_{Trans}^{0,95}$. Minimální hodnoty jsou větší než 0,4 milimetru. Důvodem je, že transformační matice \hat{T}_S^N nyní kompenzuje také absolutní chybu polohování robota, která má nerovnoměrné rozložení vůči středu souřadného systému. Dobře je tento jev pozorovatelný pomocí grafů na obr. 6.5, resp. na obr. 6.6. V těchto grafech je pro jednotlivé metody vždy tučně vykreslen souřadný systém reprezentující skutečnou transformaci ${}^*T_S^N$ a pak souřadné systémy reprezentující vypočtená řešení \hat{T}_S^N . Ty opět tvoří určitý shluk, který není rovnoměrně rozložený vůči souřadnému systému matice ${}^*T_S^N$. Navíc při porovnání obou konfigurací je opět patrný rozdíl v umístění shluku.

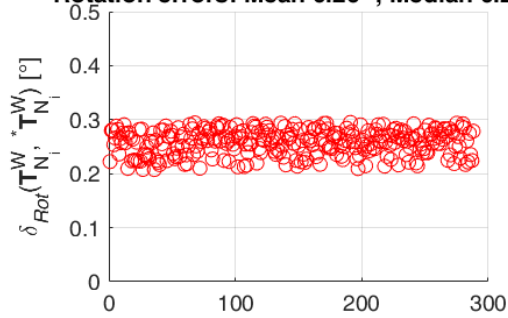
Dosažená přesnost kalibrace skeneru by s touto absolutní chybou robota již nemusela vyhovovat požadavkům na přesnost navádění pro nejnáročnější laserové úlohy. Pokud daný naváděcí systém může být ovlivněn absolutní chybou polohování, je zapotřebí provádět kalibraci profilového skeneru za podmínek co nejbližších následnému laserovému obrábění. To znamená umístit kalibrační objekt do vhodné části pracovního prostoru včetně natočení a použít pro kalibraci vhodnou konfiguraci kloubových souřadnic.

Errors of flange positions $T_{N_i}^W$ - first iteration

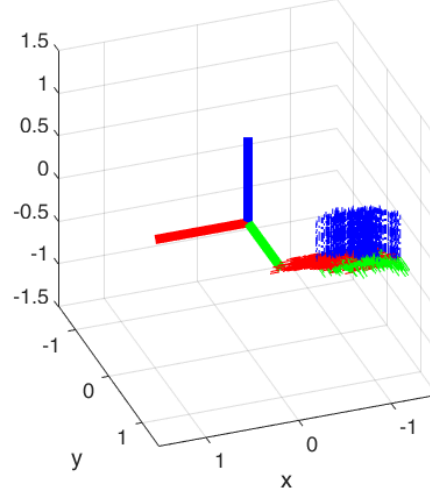
Translation errors: Mean 1.48 mm, Median 1.48 mm



Rotation errors: Mean 0.26 °, Median 0.26 °



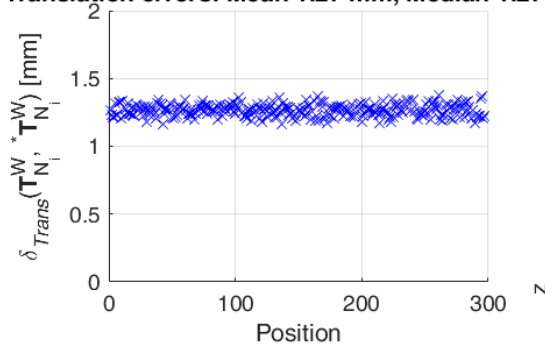
Errors in coordinate system



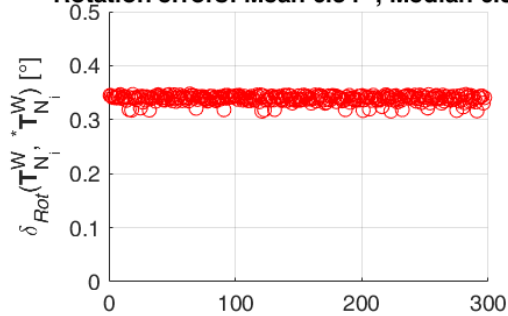
Obr. 6.1: Rozdíl očekávaných a skutečných pozic příruby pro konfiguraci 1.

Errors of flange positions $T_{N_i}^W$ - first iteration

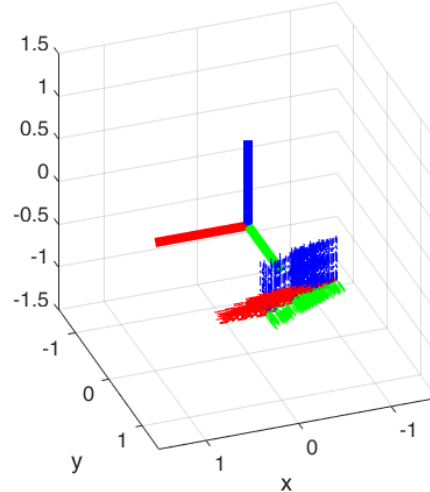
Translation errors: Mean 1.27 mm, Median 1.27 mm



Rotation errors: Mean 0.34 °, Median 0.34 °

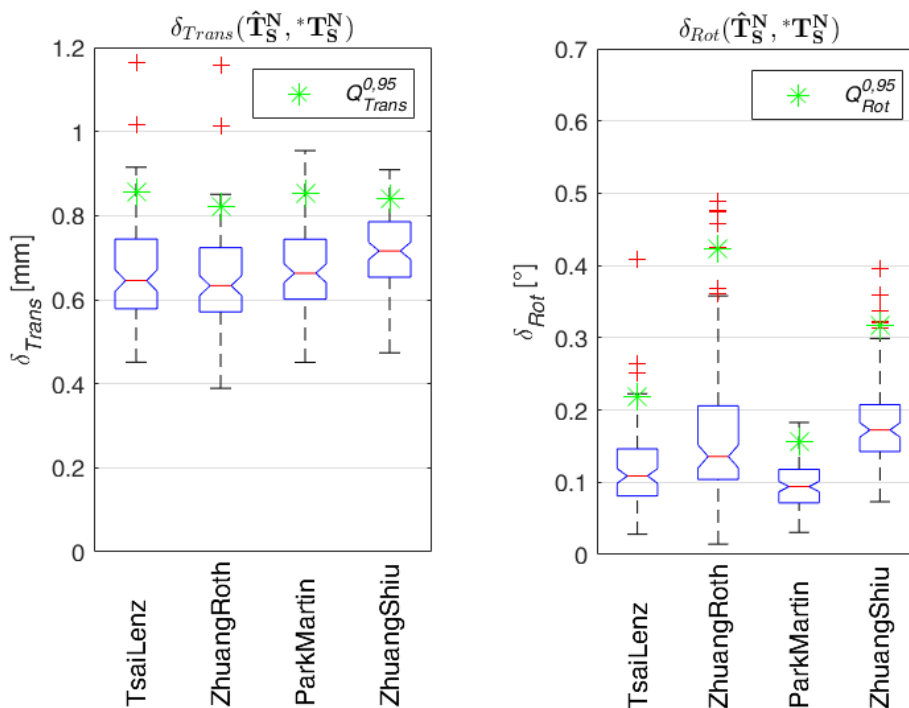


Errors in coordinate system



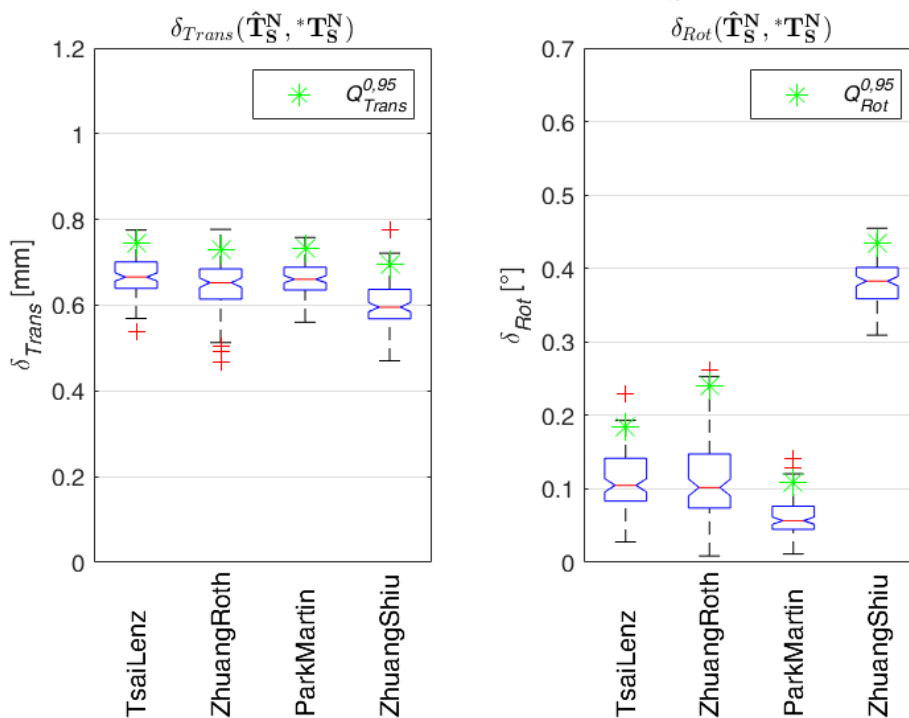
Obr. 6.2: Rozdíl očekávaných a skutečných pozic příruby pro konfiguraci 2.

Errors of computed $\hat{\mathbf{T}}_S^N$



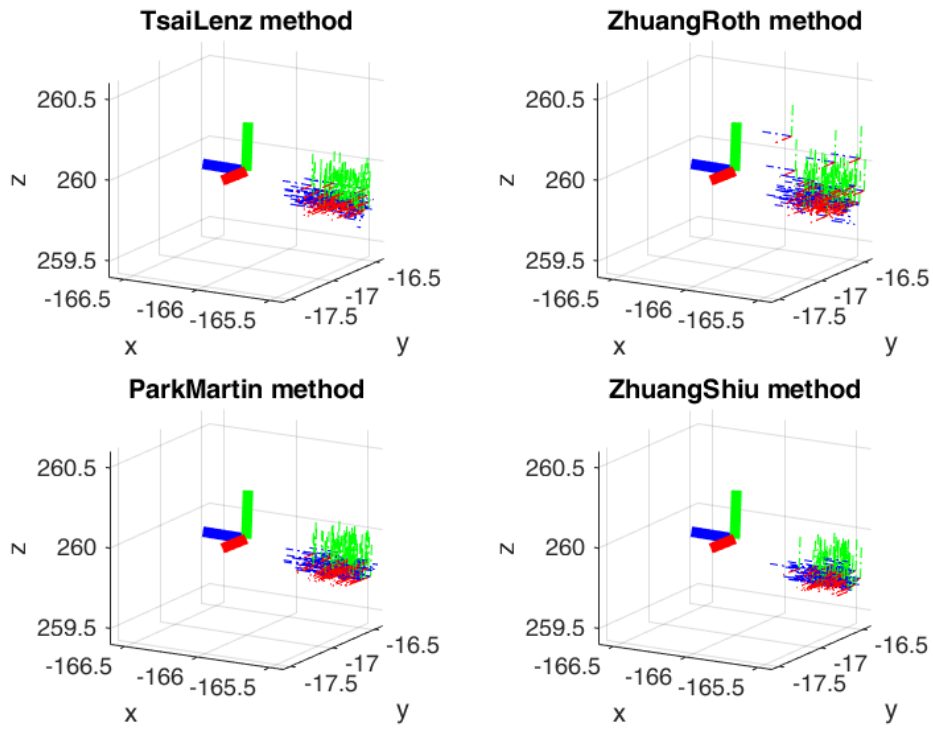
Obr. 6.3: Přesnost transformační matice pro konfiguraci 1.

Errors of computed $\hat{\mathbf{T}}_S^N$



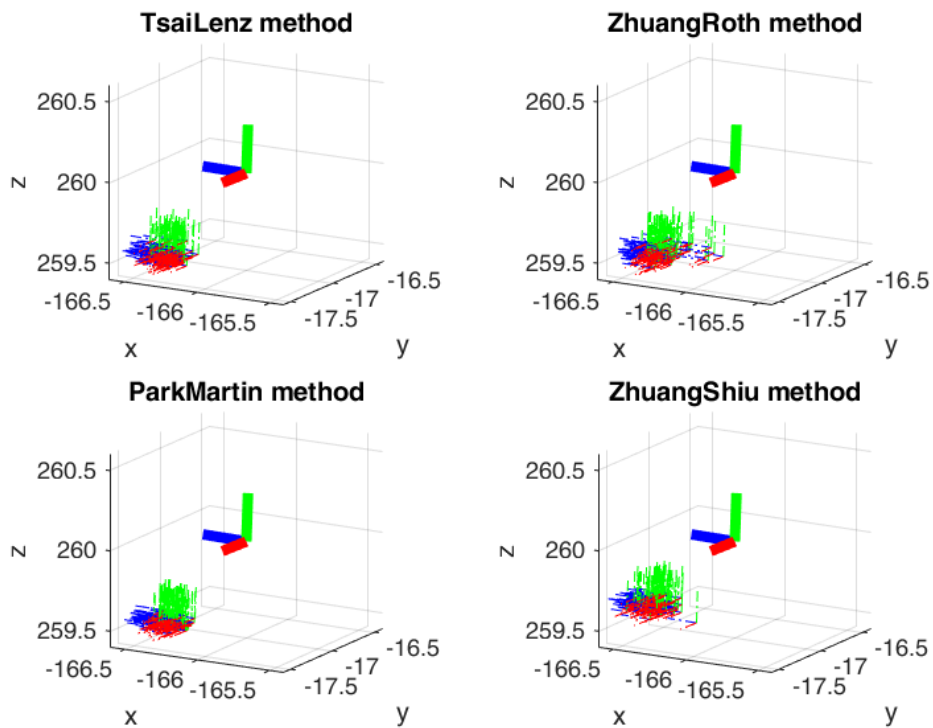
Obr. 6.4: Přesnost transformační matice pro konfiguraci 2.

Distribution of computed \hat{T}_S^N



Obr. 6.5: Rozložení jednotlivých řešení kalibrace pro konfiguraci 1.

Distribution of computed \hat{T}_S^N



Obr. 6.6: Rozložení jednotlivých řešení kalibrace pro konfiguraci 2.

6.2 Vliv na standardní metodu kalibrace nástroje

Absolutní chyba při polohování robota má vliv také na standardní metody pro kalibraci nástroje implementované v kontroléru robota. Autor této práce využívá především šestibodovou metodou v kontrolérech od výrobce Fanuc (příloha B.3). Tato metoda je vhodná především pro nástroje, jejichž TCP je známý a fyzicky hmatatelný jako například hrot svařovací hlavy. Tento TCP nástroje se nejprve umístí ke stejnému bodu (označovaného jako hrot či tooltip) ze třech různých směrů, viz obr. 2.1. Tímto způsobem je určena translační část hledaného vztahu mezi TCP příruby a TCP nástroje. Samotný výpočet v kontroléru robota probíhá dle postupu uvedeného v kapitole 2 článku Cakir a Deniz (2019), což si autor úspěšně ověřil na reálném pracovišti s robotem Fanuc. Natočení TCP nástroje vůči TCP příruby je pak dopočteno pomocí třech bodů, kterými jsou definovány směry osy x a z . Výpočet je opět snadno implementovatelný. Jen je zapotřebí při výpočtu v případě potřeby korigovat vzájemnou kolmost vektorů reprezentujících osy x , y a z .

Touto metodou je možné kalibrovat také TCP laserové hlavy a získat tak transformační vztah $\hat{\mathbf{T}}_L^N$. TCP laserové hlavy se totiž nachází v ohniskové vzdálenosti od laserové hlavy a osa z je dána směrem letu laserového paprsku. Osa y je definována ve směru pohybu laserové hlavy během procesu, viz obr. 1.1. Autor práce na základě výše popsaného doplnil do MCP také standardní šestibodovou metodu pro kalibraci nástroje. Lze tak paralelně s kalibrací profilového skeneru simulovat kalibraci laserové hlavy jako nástroje robota. Skutečná transformační matice ${}^* \mathbf{T}_L^N = T([-380 \ 80 \ 250]^T, [91 \ -2 \ -91]^T)$ vychází z reálné mechanické konstrukce STS. Pozice hrotu ${}^* \mathbf{T}_F^W$ pro určení translační části kalibrace je stejná s pozicí kalibračního objektu ${}^* \mathbf{T}_E^W$ pro profilový skener. Výchozí pozice laserové hlavy je pak dána jako $\mathbf{T}_{L_{Start}}^F = T([0 \ 0 \ 0]^T, [0 \ 180 \ -90]^T)$. Na základě této pozice jsou následně dopočteny konkrétní tři pozice laserové hlavy pro kalibraci

$$\mathbf{T}_{L_1}^W = \mathbf{T}_F^W \cdot \mathbf{T}_{L_{Start}}^F \cdot T\left([0 \ 0 \ 0]^T, [-15 \ -10 \ 20]^T\right), \quad (6.2)$$

$$\mathbf{T}_{L_2}^W = \mathbf{T}_F^W \cdot \mathbf{T}_{L_{Start}}^F \cdot T\left([0 \ 0 \ 0]^T, [15 \ 0 \ 0]^T\right), \quad (6.3)$$

$$\mathbf{T}_{L_3}^W = \mathbf{T}_F^W \cdot \mathbf{T}_{L_{Start}}^F \cdot T\left([0 \ 0 \ 0]^T, [-15 \ 10 \ -20]^T\right). \quad (6.4)$$

Volba jednotlivých natočení laserové hlavy vychází z požadavku, aby kalibrační pozice pro laserovou hlavu byly podobné kalibračním pozicím profilového skeneru. Tudíž jsou tyto kalibrační pozice laserové hlavy ovlivněny podobnou absolutní chybou robota. Pro určitou náhodnost v každém provedení simulované kalibrace je ke každému úhlu ve funkci $T()$ přičtena hodnota z rovnoměrného rozdělení $U(-3, 3)$. Pozice pro získání natočení laserové hlavy jsou určeny jako

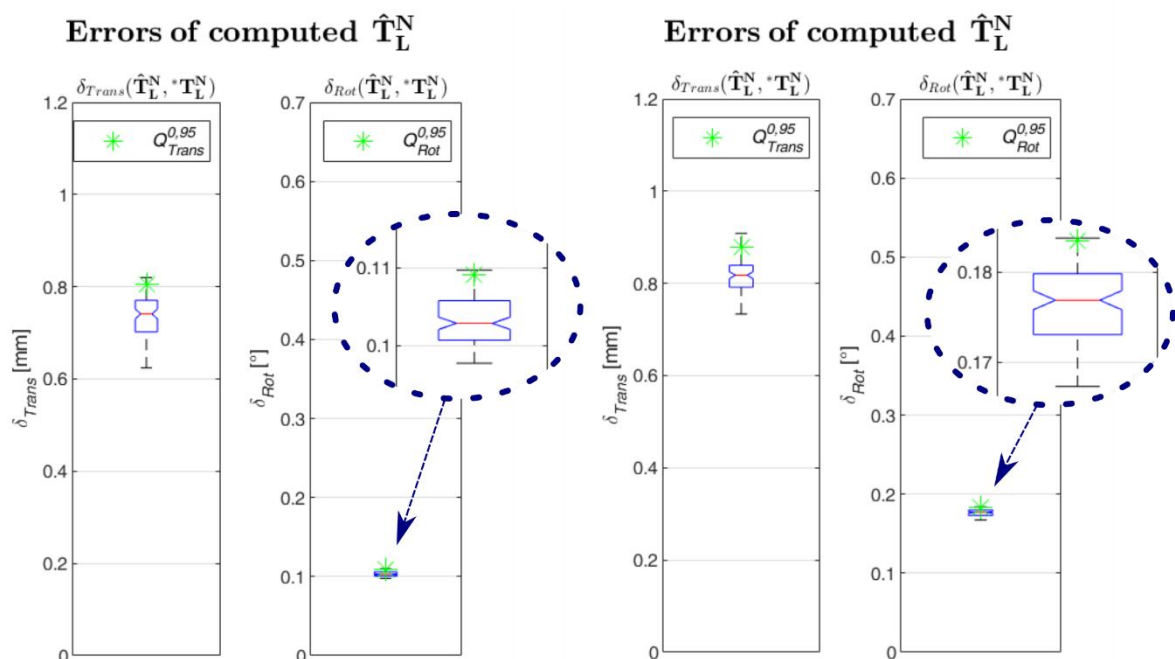
$$\mathbf{T}_{L_4}^W = \mathbf{T}_F^W \cdot \mathbf{T}_{L_{Start}}^F, \quad (6.5)$$

$$\mathbf{T}_{L_5}^W = \mathbf{T}_{L_4}^W \cdot T\left([200 \ 0 \ 0]^T, [0 \ 0 \ 0]^T\right), \quad (6.6)$$

$$\mathbf{T}_{L_6}^W = \mathbf{T}_{L_4}^W \cdot T\left([0 \ 0 \ 200]^T, [0 \ 0 \ 0]^T\right). \quad (6.7)$$

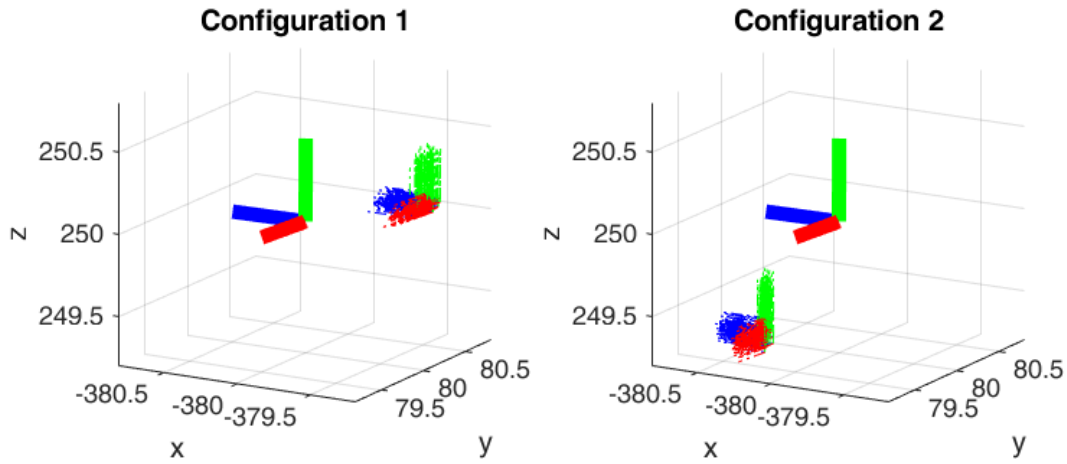
Opět pro určitou náhodnost v každém provedení simulované kalibrace laserové hlavy je nejprve ke každé složce translačního vektoru \mathbf{P}_F^W přičtena hodnota z rovnoměrného rozdělení $U(-50, 50)$. Pro všech šest kalibračních pozic laserové hlavy pak mohou být dopočteny související pozice příruby. Může tak být simulován výpočet transformační matice $\hat{\mathbf{T}}_L^N$ dle standardní metody v kontroléru robota s ohledem na zvolenou absolutní chybu robota způsobenou chybami DH parametrů $\Delta\xi$ v tab. 6-1.

Představený postup pro kalibraci laserové hlavy byl simulován stejným počtem $NoExec = 100$ provedení jako u kalibrace profilového skeneru. Porovnání odchylek mezi kontrolérem vypočtenou transformační maticí $\hat{\mathbf{T}}_L^N$ a skutečnou maticí ${}^*\mathbf{T}_L^N$ je pro obě zvolené konfigurace na obr. 6.7. Translační odchylky $\delta_{Trans}(\hat{\mathbf{T}}_L^N, {}^*\mathbf{T}_L^N)$ jsou svojí velikostí i rozložením podobné hodnotám při kalibraci profilového skeneru, viz obr. 6.3 a obr. 6.4. Rotační odchylky $\delta_{Rot}(\hat{\mathbf{T}}_L^N, {}^*\mathbf{T}_L^N)$ jsou malé a rozložené ve velmi úzkém pásmu. Důvodem je zanedbání ostatních vlivů jako například vizuální chyba operátora při najíždění do konkrétních kalibračních pozic. Pro obě konfigurace byly také vykresleny souřadné systémy reprezentující jednotlivá řešení $\hat{\mathbf{T}}_L^N$ do společného grafu se souřadným systémem skutečné transformace ${}^*\mathbf{T}_L^N$ (tučně), viz obr. 6.8. Tyto souřadné systémy opět tvoří určité shluky, jejichž umístění jsou pro obě konfigurace odlišná. Porovnání těchto shluků s umístěním shluků pro $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ (obr. 6.5 a obr. 6.6) však vykazuje podobnost mezi jednotlivými konfiguracemi. Výsledná hodnota vypočtené transformační matice $\hat{\mathbf{T}}_L^N$ dle standardní metody v kontroléru robota je tedy také výrazně závislá na pracovním místě kalibrace a využitých kloubových souřadnicích, pokud polohování příruby je ovlivněno absolutní chybou robota.



Obr. 6.7: Přesnost transformační matice reprezentující kalibraci laserové hlavy standardní šestibodovou metodou. Vlevo konfigurace 1, vpravo konfigurace 2.

Distribution of computed $\hat{\mathbf{T}}_L^N$



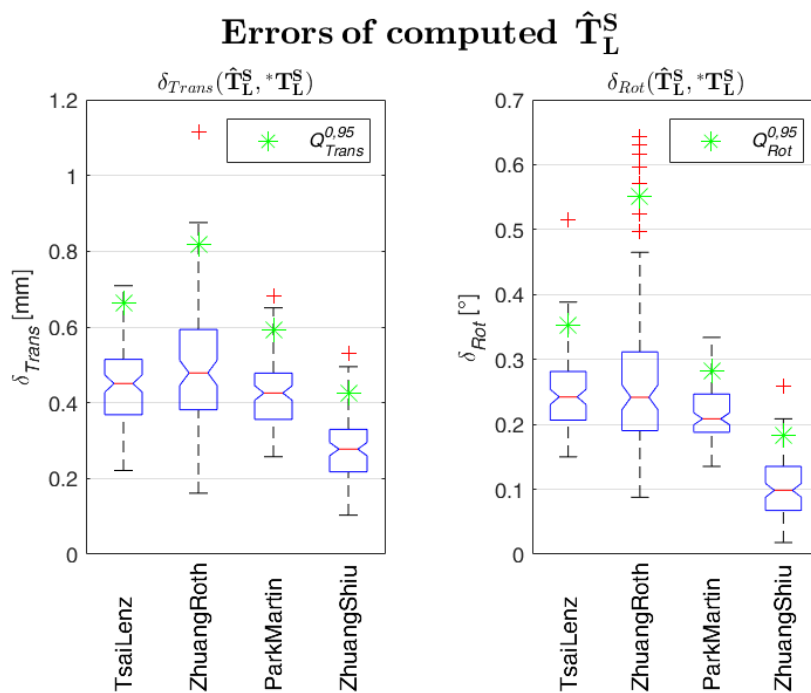
Obr. 6.8: Rozložení jednotlivých řešení kalibrace laserové hlavy. Vlevo konfigurace 1, vpravo konfigurace 2.

6.3 Vliv na přesnost navádění

Poslední neznámou v této kapitole je vliv absolutní chyby robota na přesnost STS. Tedy jak se projeví chyba transformační matice $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ a chyba transformační matice $\hat{\mathbf{T}}_L^N$ na celkovou přesnost navádění. Zde je zapotřebí vrátit se k základním rovnicím pro princip STS popsaných v kapitole 2. V první fázi probíhá detekce jednotlivých bodů \mathbf{J}_i hledané trajektorie pomocí rovnice (2.1). Dle těchto nalezených bodů je následně generována trajektorie laserové hlavy pomocí rovnice (2.2). Jednou ze zásadních znalostí pro správnou funkci STS je tak vzájemná transformační matice

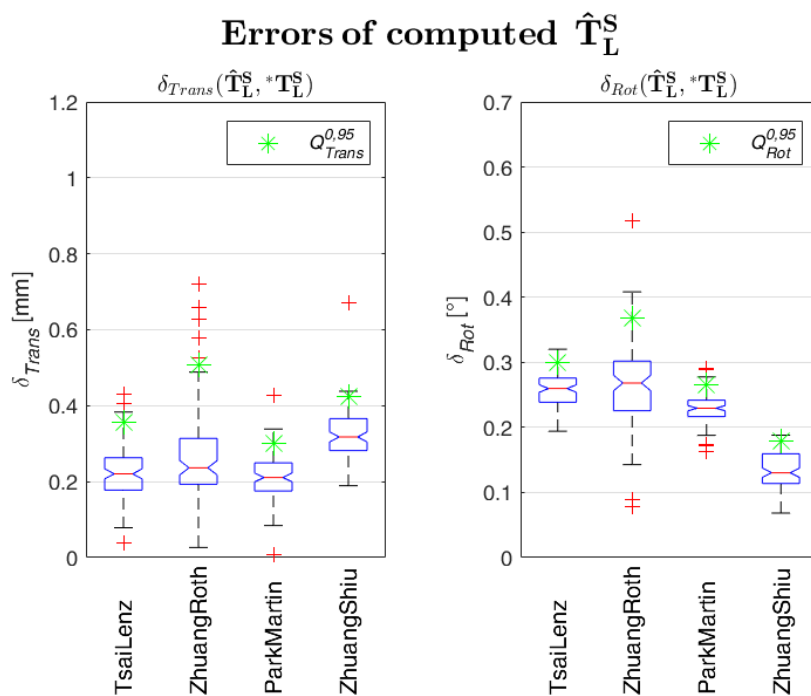
$$\mathbf{T}_L^S = \mathbf{T}_S^S \cdot \mathbf{T}_L^N. \quad (6.8)$$

mezi TCP profilového skeneru a TCP laserové hlavy. Tato transformace je dána mechanickou konstrukcí a je snadno dopočitatelná z individuálních transformací TCP nástrojů vůči TCP příruby. Proto autor této práce zkoumal kromě přesností samostatných transformací $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ a $\hat{\mathbf{T}}_L^N$ také přesnost jejich vzájemné transformace $\hat{\mathbf{T}}_L^S$. Dosažená přesnost a spolehlivost $\hat{\mathbf{T}}_L^S$ je na obr. 6.9 pro konfiguraci 1 a na obr. 6.10 pro konfiguraci 2. Translační odchylka $\delta_{Trans}(\hat{\mathbf{T}}_L^S, * \mathbf{T}_L^S)$ klesla dvakrát až třikrát oproti translační odchylce pro individuální kalibrace $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ a $\hat{\mathbf{T}}_L^N$, viz porovnání s obr. 6.3, obr. 6.4 a obr. 6.7. Hodnoty rotační odchylky $\delta_{Rot}(\hat{\mathbf{T}}_L^S, * \mathbf{T}_L^S)$ se zvýšily oproti rotační odchylce $\delta_{Rot}(\hat{\mathbf{T}}_S^N, * \mathbf{T}_S^N)$ přibližně o 0,1 stupně. Celkově lze tedy označit dosaženou přesnost vzájemné transformace $\hat{\mathbf{T}}_L^S$ za lepší než dosažené přesnosti u individuálních transformací $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ a $\hat{\mathbf{T}}_L^N$. Důvodem je především fakt, že tyto individuální transformace byly vypočteny na základě podobných kalibračních pozic z pohledu umístění v prostoru a zvolených kloubových souřadnic. Kompenzují tedy velmi podobnou absolutní chybu robota. Pokud by však vzájemná transformace $\hat{\mathbf{T}}_L^S$ byla určena dle rovnice (6.8) například pomocí $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ z konfigurace 1 a $\hat{\mathbf{T}}_L^N$ z konfigurace 2, výsledná translační odchylka $\delta_{Trans}(\hat{\mathbf{T}}_L^S, * \mathbf{T}_L^S)$ by se již pohybovala okolo 1,3 milimetru. Při porovnání přesností $\hat{\mathbf{T}}_L^S$ mezi jednotlivými konfiguracemi



Obr. 6.9: Přesnost transformační matice reprezentující vzájemnou transformaci mezi TCP skeneru a TCP laserové hlavy. Konfigurace 1.

je také patrné, že velikost rotační i translační odchylky bude velmi závislá na volbě pracovního prostoru, kde ke kalibraci dochází, a také na dané konfiguraci kloubových souřadnic.



Obr. 6.10: Přesnost transformační matice reprezentující vzájemnou transformaci mezi TCP skeneru a TCP laserové hlavy. Konfigurace 2.

6.4 Zhodnocení

Autor práce se v této kapitole věnoval vlivu absolutní chyby robota na přesnost a spolehlivost kalibrace skeneru dle navrženého MCP, vlivu na přesnost standardních kalibračních metod nástroje robota a vlivu na výslednou přesnost STS. Tato problematika je totiž v této oblasti zanedbána jak ze strany výrobců robotů, tak ze strany odborných publikací. Přitom jen velmi malá část STS využívá individuálně kalibrovaného robota, jenž by neměl žádnou nebo jen velmi malou absolutní chybu polohování. Většina STS využívá sériově vyráběných manipulátorů, jejichž absolutní chyba se pohybuje v řádu jednotek milimetrů. Autor proto navrhl chyby geometrických parametrů $\Delta\xi$, které způsobí chybu polohování příruby pro zvoleného robota mezi jedním až dvěma milimetry, viz tab. 6-1. Velikost absolutní chyby polohování je závislá na konkrétním pracovním místě a zvolené konfiguraci kloubových souřadnic. Důležitou ukázanou vlastností je, že chyba polohování příruby není rovnoměrně rozložená okolo počátku souřadného systému na rozdíl od chyby vypočtené polohy skeneru nad kalibračním objektem, viz obr. 6.1.

V první řadě byl zkoumán vliv absolutní chyby robota na optimální MCP pro kalibraci profilového skeneru. Hodnoty přesnosti i spolehlivosti transformační matice $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ se zhorší vlivem absolutní chyby. Zároveň se ale příliš nezmění rozptyl translačních a rotačních odchylek. Vykreslení jednotlivých řešení $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ v souřadném systému pak ukázalo kompaktnost tohoto shluku, viz obr. 6.5. To je dáno tím, že vypočtený transformační vztah kompenzuje absolutní chybu polohování příruby pro konkrétní umístění kalibračního objektu. Pozice tohoto shluku se mění právě s pozicí kalibrace v pracovním prostoru robota.

Stejný dopad má absolutní chyba robota také na standardní metodu pro kalibraci nástrojů robota, která je implementována v kontroléru robota. Pomocí této metody je kalibrován TCP laserové hlavy v autorem vyvíjených STS. Dopady absolutní chyby robota na transformační matici $\hat{\mathbf{T}}_L^N$ jsou na obr. 6.7 a obr. 6.8.

Dále byl zkoumán dopad absolutní chyby robota na vzájemnou transformaci $\hat{\mathbf{T}}_L^S$ mezi TCP profilového skeneru a TCP laserové hlavy, jejíž znalost je jednou ze stěžejních podmínek pro přesnost STS. Přesnost vzájemné transformace $\hat{\mathbf{T}}_L^S$ je lepší než přesnost individuálních transformací $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ a $\hat{\mathbf{T}}_L^N$, pokud jsou tyto transformace získány kalibrací ve stejném pracovním prostoru.

Z praktického hlediska je důležité zjištění, že autorem navržený optimální MCP i v případě přítomnosti absolutní chyby robota zaručuje dosažení potřebné přesnosti a spolehlivosti kalibrace pro všechny standardní metody svařování a také pro velkou část úloh laserového svařování. Dle autorových zkušeností s reálnými STS se zbývající chyba navržené kalibrace skeneru projevuje převážně translační chybou ve výsledné trajektorii laserové hlavy, která je snadno kompenzovatelná pomocí korekčního parametru. Navržený postup tak lze využít i pro laserové úlohy s nejvyššími požadavky na přesnost. Všechny navržené parametry optimálního MCP zůstávají stejné s předchozí kapitolou. Pouze nastavení ukončovací podmínky l_{\max} je třeba zvýšit tak, aby výsledný počet využitých kalibračních pozic v algoritmu *IRHEC* byl větší než doporučená polovina počtu kalibračních pozic *NoP*. Konkrétní nastavení podmínky l_{\max} je závislé na konkrétní absolutní chybě v daném pracovním prostoru. Pokud se bude zdát, že

chyby změn polohy příruby $\mathbf{T}_{N_{i+1}}^{N_i}$ a chyby změn polohy skeneru $\mathbf{T}_{S_{i+1}}^{S_i}$ vstupujících do rovnice hand-eye kalibrace jsou vyšší než očekávané hodnoty chyb v této práci, je na místě zvýšit také počet kalibračních pozic NoP .

Pokud u daného STS je očekávána absolutní chyba robota, je zapotřebí vzít na vědomí, že získaná transformační matice $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ pro profilový skener má nejlepší přesnost právě v místě kalibrace. V tomto místě nejlépe kompenzuje chybu polohování příruby. V ostatních místech pracovního prostoru robota bude přesnost transformace $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ v kombinaci s absolutní chybou robota v nejlepším případě stejná, ale reálně zásadně horší. Proto by všechny nástroje robota měly být kalibrovány v pracovním prostoru, ve kterém pak budou vykonávat svoji činnost. A to včetně natočení nástroje do správné polohy.

Navržený MCP je navíc připravený pro plánované využití ke kalibraci samotného robota. V představeném modelu bude potřeba provést pouze dvě změny:

- Základní geometrický model robota v podkapitole 4.1 bude nahrazen zvoleným modelem, který lépe popisuje mechanickou konstrukci daného robota. Například geometrický model robota založený na součinu maticových exponenciál (Brockett, 1984).
- Navrhnout minimalizační funkci, která bude obsahovat kromě minimalizace chyby rovnice hand-eye kalibrace (2.8) také minimalizaci chyby polohování příruby na základě zvoleného geometrického modelu robota.

Pomocí tohoto modelu by tak kromě hledané transformační matice $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ byly získány i přesnější geometrické parametry $\hat{\xi}$ pro konkrétního robota. Tyto geometrické parametry by mohly být následně zakomponovány do řídicího kontroléru robota, pokud to daná platforma robota podporuje. Došlo by tak ke zpřesnění sledování trajektorie. Další využití nalezených geometrických parametrů $\hat{\xi}$ je při rekonstrukci měřených dat obrobku do 3D modelu. Kalibrace robota pomocí navrženého MCP by přinesla i značnou finanční úsporu, protože pořizovací cena specializovaných zařízení pro kalibraci robota se pohybuje v řádu milionů korun, zatímco pořizovací cena profilového skeneru je ve stovkách tisíc korun.

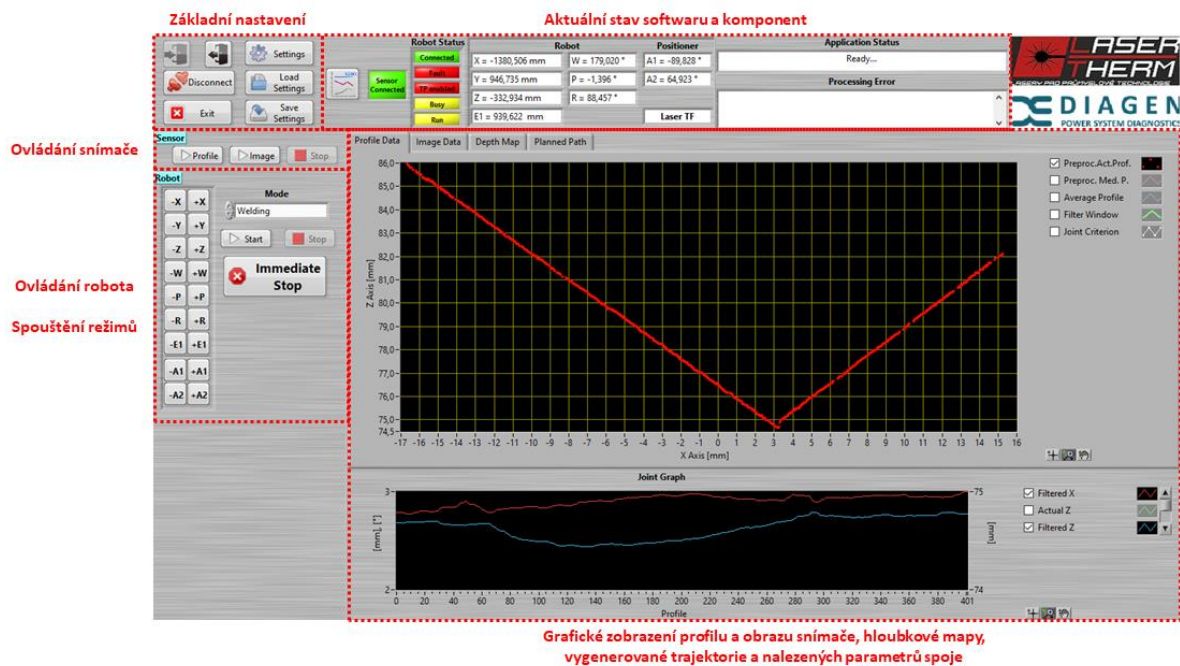
7 Reálné využití navrženého postupu hand-eye kalibrace profilového skeneru

Jak již bylo zmíněno, autor práce se v laboratorním týmu DiagEn zabývá zejména vývojem naváděcích systémů pro laserové svařování, kalení a navařování ve spolupráci s firmou LaserTherm. V rámci této spolupráce vznikl kognitivní software CogniGuide, jehož je autor práce hlavním tvůrcem (Liška et al., 2019a). Software CogniGuide obstarává veškerou činnost vyvinutého naváděcího systému. Kalibrace profilového skeneru jako nástroje robota pomocí navrženého MCP je také jedním z modulů v CogniGuide, který se využívá vždy při počátečním nastavení naváděcích systémů jak ve vlastní výrobě firmy LaserTherm, tak v naváděcích systémech dodávaných do jiných provozů touto firmou. Bohužel však autor práce nemá k dispozici metodu či externí měřicí zařízení, kterými by mohl ověřit přesnost získané transformační matice \hat{T}_S^N a tím také ověřit princip navrženého MCP v reálném provozu. Autor práce navíc nemá možnost souvislejšího testování na reálném pracovišti, jelikož jsou tyto pracoviště součástí výroby. Za určité ověření navrženého MCP lze však považovat správnou funkci těchto naváděcích systémů, jelikož bez přesné kalibrace profilového skeneru by nebylo možné dosáhnout požadované přesnosti pro automatické navádění laserových technologií (pro nejpřesnější úlohy se jedná o požadavky přesnosti navádění v rámci jedné desetiny milimetru). Důkazem správně provedeného laserového procesu jsou následné materiálové zkoušky prováděné na obrobkách při jejich prvním zakomponování do výroby. Například mikroskopické zkoušky v řezech svařovaného materiálu. Důležitým naplněným cílem autora je také robustnost navrženého MCP. Kalibraci skeneru pomocí MCP v CogniGuide totiž provádí ve většině případů přímo operátor daného pracoviště, který nemá žádné odborné znalosti v oblasti hand-eye kalibrace. Pomocí jednoduchého postupu operátor snadno připraví STS do počátečního stavu kalibrace. Poté již následuje plně automatizovaný kalibrační proces profilového skeneru řízený softwarem CogniGuide na základě představeného MCP.

V této kapitole budou nejprve popsány základní vlastnosti vyvinutého softwaru CogniGuide. V další části pak bude popsáno využití CogniGuide včetně kalibrace skeneru pro navařování stelitové vrstvy na náběžnou hranu lopatky. V této úloze je přínos navrženého MCP ověřen přesností jednotlivých navařených housenek a také porovnáním 3D skenovaných dat lopatky softwarem CogniGuide a externím 3D měřicím systémem. V poslední části budou představeny další dva naváděcí systémy, jejichž výroba podléhá pravidelným kontrolám výrobků na přesnost navádění. Počáteční kalibrace skeneru pomocí MCP je tak u těchto STS také stěžejní úlohou.

7.1 Software CogniGuide

Software CogniGuide je primárně určen pro automatické navádění laserového robotického systému uvedeného na obr. 1.1. Ten se skládá z robota Fanuc, k jehož přírubě je uchycena laserová hlava spolu s profilovým skenerem. Všechny tyto části jsou propojeny do lokální sítě, do které je připojen také počítač se softwarem CogniGuide. CogniGuide tak má možnost přímé komunikace se všemi částmi systému. Uvedená konfigurace systému může být navíc doplněna o lineární pojezd robota a externí dvouosé polohovadlo. CogniGuide obsahuje několik kognitivních modulů, jejichž hlavním cílem je nahradit ruční programování požadované



Obr. 7.1: Hlavní uživatelská obrazovka softwaru CogniGuide.

trajektorie laserové hlavy operátorem. Zejména v provozech s častou změnou výrobků, jejichž trajektorie jsou mnohdy velmi komplexní. Hlavní výhody využití softwaru CogniGuide je automatizace plánování trajektorie, zvýšení přesnosti a robustnosti procesu a také úspora času. Dalšími přidanými benefity tohoto systému jsou například možnost komunikovat s nadřazeným PLC, inspekce laserového procesu (jako výška a šířka svaru), ukládání potřebných dat pro zpětné dohledání historie obrobku apod. Nejdůležitějšími kognitivními funkcemi CogniGuide jsou:

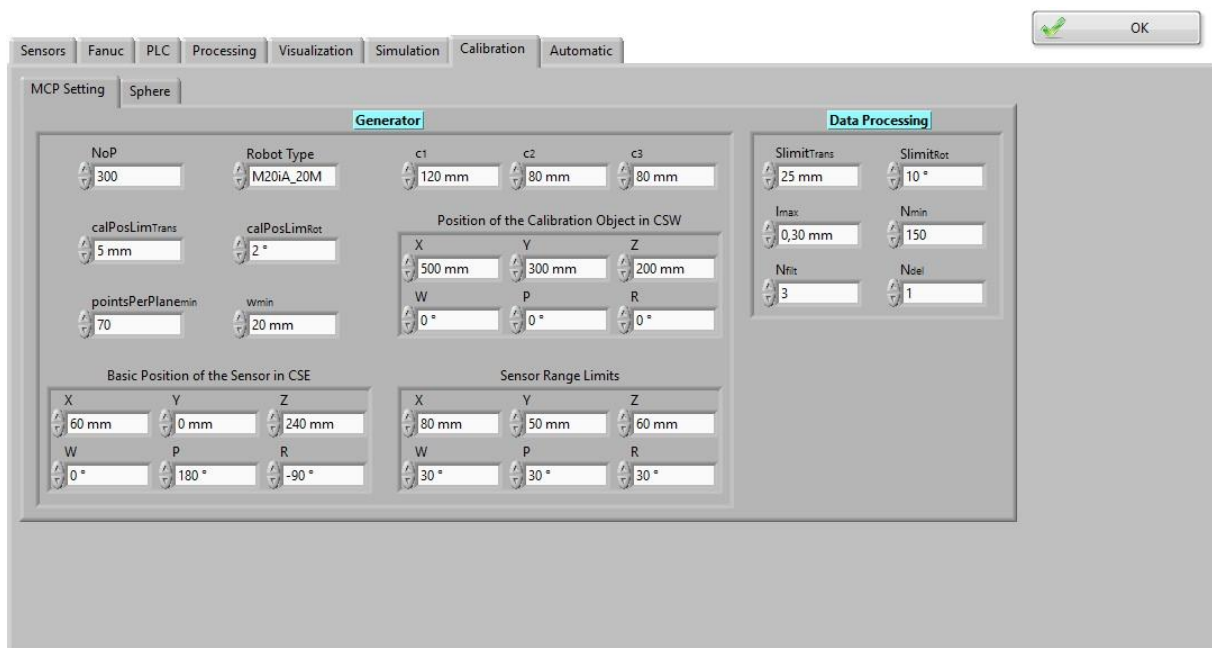
- *Automatic Calibration* – kalibrace TCP profilového skeneru na základě představeného MCP v této práci. Pro řešení rovnice hand-eye kalibrace je využita ZS metoda.
- *Welding* – režim pro řízení procesu svařování, navařování materiálu či kalení. Dostupné jsou dva módy:
 - *Offline* – generování trajektorie laserové hlavy na základě dříve skenovaných dat v režimu *Scanning*.
 - *Online* – korekce trajektorie laserové hlavy přímo během procesu na základě aktuálně snímaných dat.
- *Scanning* – režim pro získání 3D modelu obrobku. Obrobek je snímán profilovým skenerem z různých pozic pomocí řízeného polohování robotem. CogniGuide následně přepočte měřená data do mračna bodů ve společném souřadném systému. Mračno bodů je pak využito k rekonstrukci 3D modelu obrobku pomocí hloubkové mapy či ke zpracování dle potřeb konkrétní geometrie obrobku a dle potřeb jeho laserového opracování.

Hlavní obrazovka uživatelského rozhraní CogniGuide je na obr. 7.1. Je rozdělena do několika částí vyznačených v obrázku obdélníky s červenou čárkovanou čarou a s vedle stojícím popisem. V levém horním rohu se nachází tlačítka pro základní nastavení a připojení

k jednotlivým hardwarovým částem STS. Uprostřed horní části uživatelského rozhraní kognitivního modulu jsou informace o aktuálním stavu aplikace a stavu jednotlivých hardwarových částí. V levé části uživatelského okna pod základním nastavením je možnost samostatně ovládat sběr dat z profilového skeneru. Pod tímto nastavením se nachází tlačítka pro polohování robotem v režimu *Handly Move* v jednotlivých osách souřadného systému včetně lineárního pojezdu a dvouosého polohovačla. Dále je zde selektor *Mode*, jenž slouží k výběru jednoho z implementovaných kognitivních režimů CogniGuide. Největší část uživatelského rozhraní zabírají grafy, jež jsou rozděleny do několika záložek na hlavním panelu. CogniGuide umožňuje zobrazení profilových a obrazových dat ze skeneru, zobrazení hloubkové mapy rekonstruovaného 3D modelu obrobku, zobrazení plánované trajektorie laserové hlavy apod.

Cílem CogniGuide je obsáhnout širší okruh naváděcích úloh než sloužit jako jednoúčelová platforma pro konkrétní proces. Tomu odpovídá také široká možnost nastavení tohoto softwaru. Na obr. 7.2 je dialogové okno pro nastavení CogniGuide, konkrétně záložka pro nastavení kalibrace skeneru navrženým MCP. Účel jednotlivých záložek je následující:

- *Sensors* – záložka pro výběr konkrétního profilového snímače a jeho nastavení. CogniGuide podporuje profilové skenery od firmy Micro-Epsilon, Keyence a Metralight.
- *Fanuc* – nastavení komunikace s kontrolérem robota Fanuc.
- *PLC* – nastavení komunikace s nadřazeným PLC od firmy Siemens.
- *Modes* – jednotlivá nastavení pro implementované kognitivní módy jako *Welding*, *Scanning* apod.
- *Processing* – parametry pro zpracování dat z profilového snímače a plánování trajektorie procesní hlavy.
- *Visualization* – nastavení parametrů pro výstupní grafy v softwaru CogniGuide.



Obr. 7.2: Okno pro nastavení softwaru CogniGuide.

- *Simulation* – možnost simulovat proces skenování dat pomocí dříve uložených dat. Slouží především k testování a ověření zpracování dat mimo reálné pracoviště.
- *Calibration* – záložka pro nastavení procesu kalibrace snímače dle navrženého MCP.
- *Automatic* – funkce pro možnost automatického procházení sekvence implementovaných módů.

Jednou z velkých výhod CogniGuide je jeho modulárnost a možnost doplnění dalších funkcí dle specifických požadavků daného obrobku. Jeden takový případ bude podrobněji popsán v následující podkapitole.

7.2 Navařování lopatky

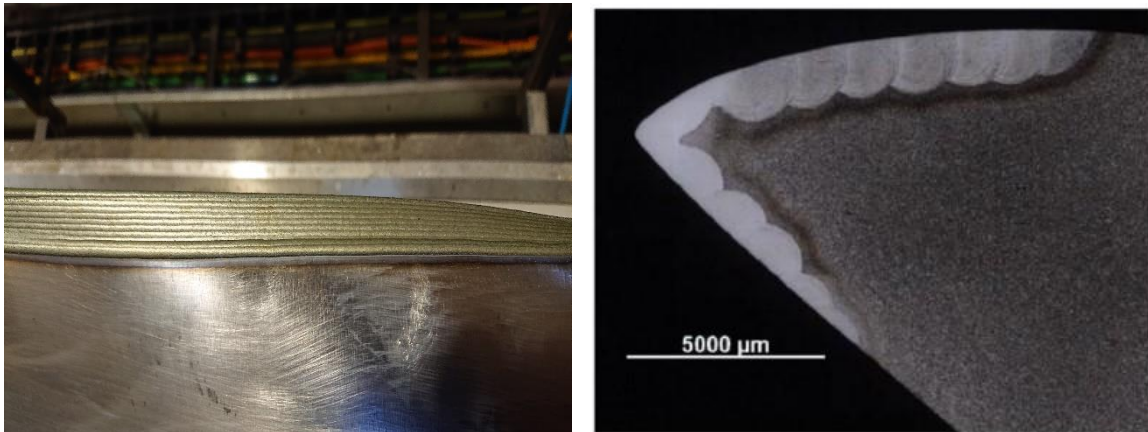
Laserové navařování lopatek je ukázkou úlohy, kde je využití automatického navádění naprosto nezbytné s ohledem na vyžadovanou přesnost procesu a zároveň časovou efektivitu výroby. Cílem této úlohy je navaření kobaltové slitiny na náběžné hraně turbínových lopatek, která má zvýšit životnost lopatek především proti erozi vodními kapkami. Na obou stranách náběžné hrany lopatky je v prostoru od špičky do poloviny lopatky vyfrézovaná kapsa, kterou je nutné pomocí podélně navařovaných housenek vyplnit. Počet navařovaných housenek se pohybuje v rozmezí 20-40 v závislosti na velikosti lopatky a zvolených parametrech laserové technologie. Navaření housenek tradičním manuálním programováním trajektorie laserové hlavy vyžadovalo časovou náročnost mezi šesti až osmi hodinami. Navíc výsledná kvalita procesu byla nevyhovující, zejména z pohledu nerovnoměrného rozmístění navařených housenek na komplexně tvarovaném povrchu lopatky. Přesnost plánování trajektorie je vyžadována v rozmezí $\pm 0,3$ milimetru. Proto bylo zapotřebí automatizovat tento proces pomocí softwaru CogniGuide.

Robotické pracoviště pro laserové navařování lopatek je na obr. 7.3. Navařovaná lopatka je uchycena do jednoosého polohovadla. Robot se nachází na lineárním pojezdu. Na jeho přírubě je laserová hlava pro navařování a také profilový skener. Pod profilovým skenerem je umístěn kalibrační objekt, jehož poloha a orientace je zvolena dle pracovní pozice v následném procesu navařování. Nezbytnou úlohou při přípravě robotického pracoviště je totiž kalibrace TCP profilového skeneru pomocí navrženého MCP v CogniGuide. Parametry MCP jsou dány parametry optimálního MCP představeného v podkapitole 5.6. Pouze na základě počtu využitých kalibračních pozic *IR_NoUsedPos* v algoritmu *IRHEC* byl zvýšen počet generovaných kalibračních pozic na $NoP = 500$ a také byla zvýšena ukončovací podmínka $l_{max} = 1,1$ mm. Hlavním důvodem je pravděpodobně větší absolutní chyba polohování tohoto robota oproti simulované absolutní chybě v kapitole 6. Jak bylo v této kapitole ale vysvětleno, vypočtená transformační matice $\hat{\mathbf{T}}_S^N$ tyto absolutní chyby částečně kompenzuje pro danou pracovní pozici a ve výsledku se v kombinaci s chybou kalibrovaného TCP laserové hlavy projeví zejména translační chybou v generované trajektorii pro laserovou hlavu. Tak tomu bylo i v tomto případě, kdy se výsledná trajektorie laserové hlavy korigovala v ose *x* o -0,15 milimetru a v ose *z* o 0,1 milimetr. Z měřených dat profilovým skenerem je pak také patrný větší rozptyl bodů v krajních polohách natočení skeneru vůči kalibračnímu objektu, než předpokládá zvolené rozložení v příloze B.2. To má za následek také větší vstupní chybu změn polohy skeneru do rovnice hand-eye kalibrace.



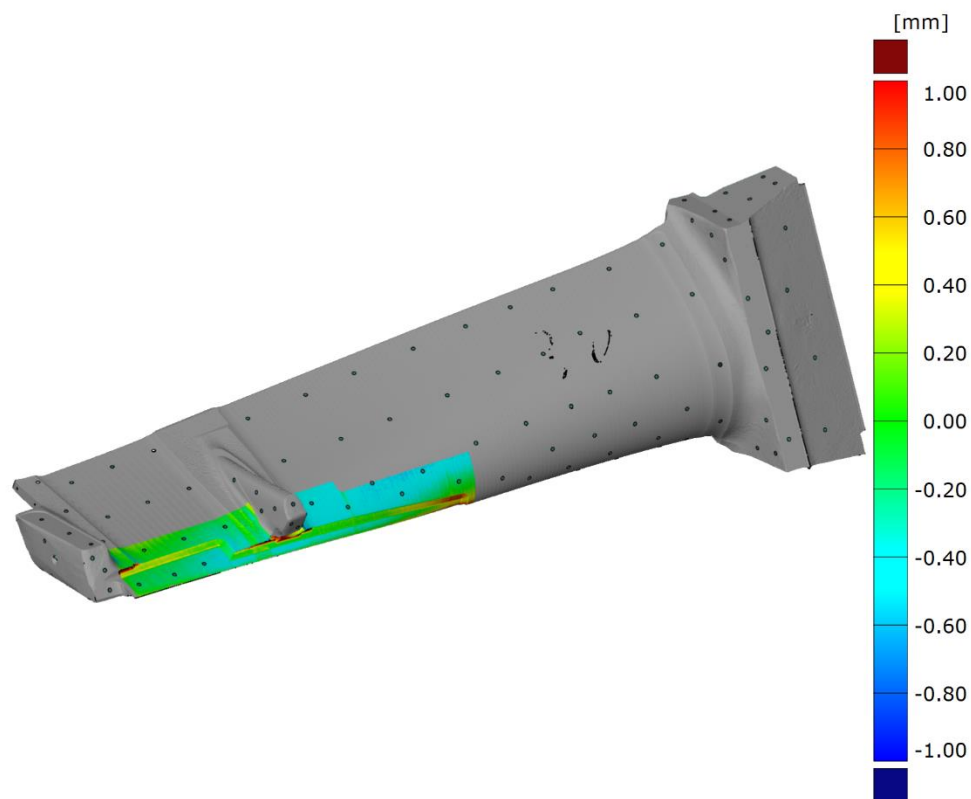
Obr. 7.3: Robotické pracoviště během navařování lopatek.

Software CogniGuide byl doplněn o kognitivní modul uzpůsobený přímo pro úlohu navaření lopatky. Lopatka je v první fázi skenována podélnými lineárními přejedy, během nichž se lopatka polohovadlem otáčí tak, aby skenerem byla zachycena vyfrézovaná kapsa z obou stran. Z měřených dat se následně rekonstruuje 3D model lopatky v oblasti vyfrézované kapsy. Dle nastavených technologických parametrů jsou poté automaticky naplánovány trajektorie jednotlivých housenek pro navaření. Ty jsou ve finální části softwarem CogniGuide transformovány pro TCP laserové hlavy a tyto trajektorie jsou pak využity CogniGuide při řízení robota během navařování. Více o kognitivním modulu pro navařování lopatek lze nalézt ve Vaníček et al. (2020). Ukázka navařené lopatky je na obr. 7.4. V pravé části je ukázka z makroskopické zkoušky, která byla jednou z několika druhů zkoušek ověřujících správnost navrženého technologického postupu. Kromě jiného tyto zkoušky ověřily přesnost automaticky navařených housenek pomocí CogniGuide, čímž je částečně ověřena také přesnost nezbytné kalibrace TCP skeneru pomocí navrženého MCP v této práci. Pouhá ruční kalibrace TCP skeneru by neumožnila získat dostatečně přesná měřená data pro rekonstrukci 3D modelu lopatky (Chaluš a Liška, 2016; Liška et al., 2018b). Kognitivní modul navíc zkrátil celkový čas procesu navařování jedné lopatky na hodinu a půl.



Obr. 7.4: Vlevo detail navařené lopatky, vpravo makroskopická zkouška návaru (Glusa, 2020).

V rámci ověření navržené technologie byla navařovaná lopatka externě skenována pomocí specializovaného 3D skeneru ATOS Core 300 s přesností měření 0,12 milimetru. Tato měřená data byla následně zpracována v softwaru GOM Inspect Suite a byl z nich vytvořen rekonstruovaný model lopatky, viz jeho šedá interpretace na obr. 7.5. Autor této práce pak využil možnosti GOM Inspect Suite pro porovnání tohoto modelu s 3D modelem oblasti okolo kapsy na náběžné hraně lopatky vytvořeného v CogniGuide. Rozdíl mezi modely je vykreslen pomocí barevné stupnice na obr. 7.5. Z hodnot je patrné, že přesnost modelu ve vyvažované kapse je v požadovaném rozmezí $\pm 0,3$ milimetru. Lokální přesnost měřených dat získaných



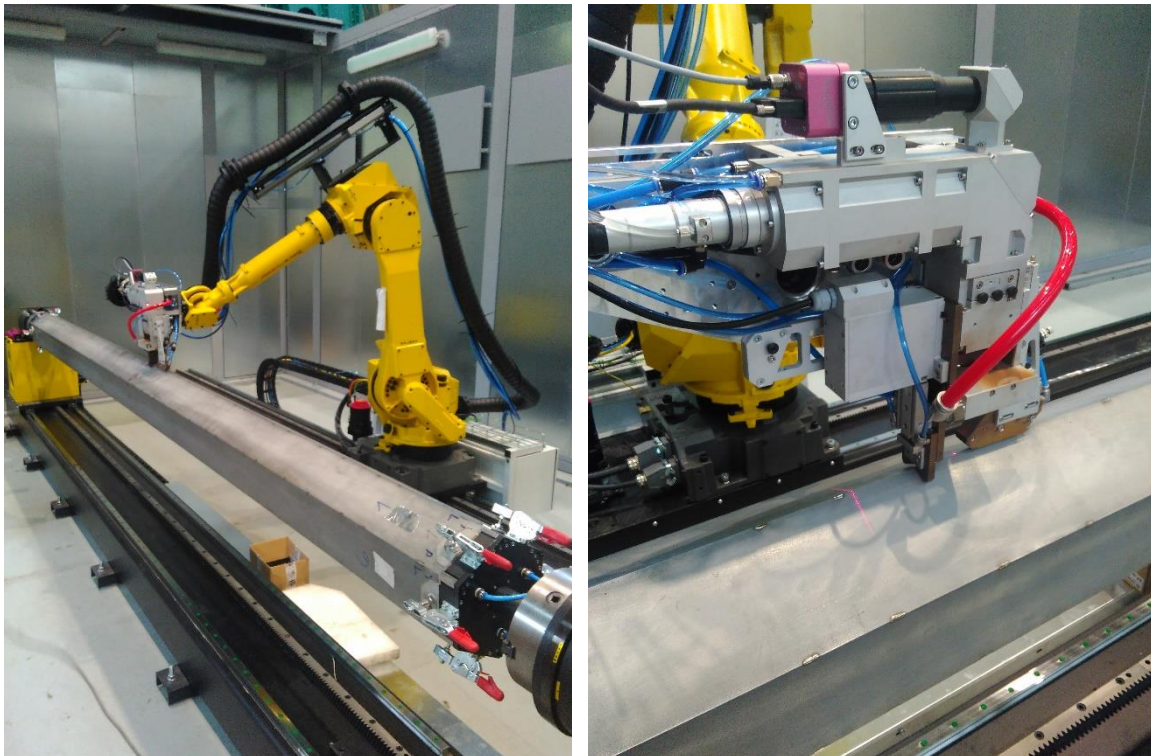
Obr. 7.5: Porovnání 3D modelu lopatky rekonstruované pomocí měřených dat skenerem ATOS Core 300 a měřených dat SW CogniGuide + skener scanCONTROL 2600-100.

pomocí vypočtené transformační matice \hat{T}_S^N tak opět částečně ověřuje přínos navrženého MCP v této práci. Pokud by však robotický systém spolu s CogniGuide měl být využit pro získání přesného kompletního modelu lopatky, bylo by nutné využít robota bez absolutních chyb polohování robota nebo minimálně mít tuto chybu analyzovanou a známou.

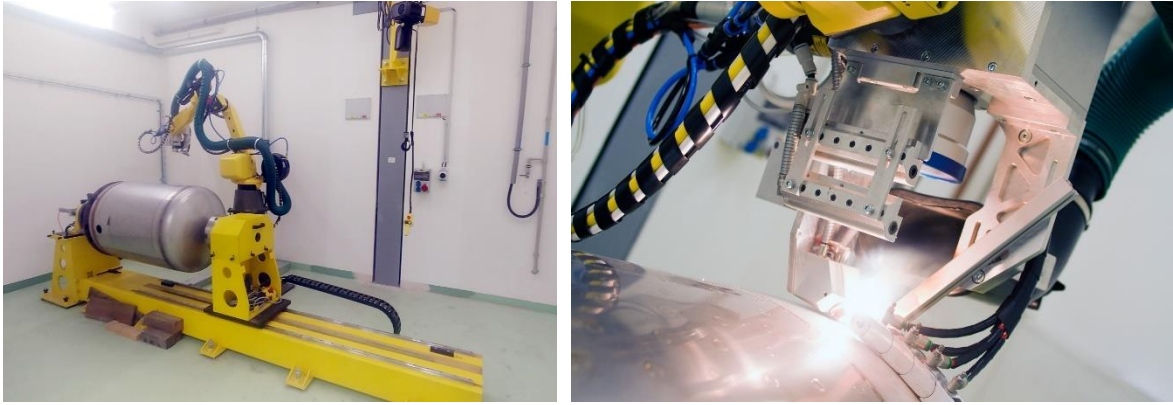
7.3 Další ukázky STS

Přínos navrženého postupu pro kalibraci skeneru bude krátce popsán na dalších dvou laserových robotických pracovištích, které byly s využitím CogniGuide realizovány. Prvním z nich je naváděcí systém pro svařování trubek na vyhořelé jaderné palivo, viz obr. 7.6. Trubky o délce tři až pět metrů jsou uchyceny do polohovačů a svařovány dlouhými kontinuálními svary. Vzhledem k velkému vnesenému teplu (svažuje se výkonem v řádu jednotek kilowatt) dochází k deformaci obrobků během procesu, a tudíž ke změně potřebné procesní trajektorie. Proto software CogniGuide musí online během procesu korigovat trajektorii laserové hlavy na základě měřených dat profilovým skenerem. Pro přesné transformování polohy nalezené trajektorie v souřadném systému skeneru do souřadného systému procesní hlavy je opět stěžejní úlohou kalibrace TCP profilového skeneru navrženým MCP. Přesnost navádění je u tohoto systému vyžadována v toleranci $\pm 0,1$ milimetru v celé délce trubek. Přesnost celého systému byla opět ověřena velkým množstvím zkoušek, které jsou na výrobu těchto trubek kladeny, zejména z pohledu jaderné bezpečnosti.

Druhým představeným STS je dodaný automatický systém pro svařování pivních, nerezových tanků, viz obr. 7.7. Tank se skládá z prostředního pláště, kde je nutné provést podélný svar. K němu jsou pak pomocí obvodových svarů přivařeny boční části. Vzhledem k vyžadované



Obr. 7.6: Laserový robotický systém pro svařování trubek na vyhořelé jaderné palivo.



Obr. 7.7: Laserový robotický systém pro svařování pivních tanků (www.lasertherm.cz).

přesnosti ($\pm 0,2$ milimetru), robustnosti a časové efektivitě celého procesu je pro automatické navádění opět využít CogniGuide. V první fázi přípravy pracoviště tak bylo nutné kalibrovat TCP skeneru navrženým MCP. Přesnost systému byla opět ověřena sérií zkoušek (zejména tlakových a rentgenových).

8 Závěr

Automatické naváděcí systémy hrají důležitou roli pro integraci laserových svařovacích robotů do středních a malých podniků s častěji měnící se výrobou. Kromě přínosu v přesnosti a robustnosti prováděného procesu umožňují totiž výrazně šetřit čas nutný pro přeprogramování trajektorie laserové hlavy. Zároveň jsou naváděcí systémy schopné kompenzovat geometrické nepřesnosti obrobku, jeho špatné usazení v upínacím přípravku nebo změnu trajektorie spoje během procesu vlivem deformací. Důležitou roli v přesnosti naváděcího systému hraje přesnost kalibrace optického snímače jako nástroje robota (přesnost navádění nejnáročnějších laserových úloh je vyžadována do desetiny milimetru). Jelikož pro fyzicky nedostupný TCP optického snímače jsou standardní kalibrační metody v kontrolé robota nepřesné, je zapotřebí využít tzv. hand-eye kalibrace. Ta umožňuje získat transformační vztah mezi TCP příruby robota a TCP optického snímače na základě měření kalibračního objektu z různých kalibračních pozic. Odborná literatura se ve většině případů zabývá matematickým řešením rovnice hand-eye kalibrace. Nezabývá se však vstupními daty do rovnice hand-eye kalibrace. Rozboru a dopadu vstupních dat na řešení rovnice hand-eye kalibrace se autor věnoval v kapitole 2. Zde autor ukázal, že kromě matematického řešení rovnice má zásadní vliv na přesnost hand-eye kalibrace také výběr konkrétních kalibračních pozic. Proto hlavním cílem autora v této práci bylo navrhnout postup pro vytvoření optimálního generátoru kalibračních pozic založeného na modelu procesu hand-eye kalibrace optického snímače.

V kapitole 3 představuje autor navržený obecný postup pro hand-eye kalibraci optického snímače. V první řadě musí být sestaven model celého procesu kalibrace, který obsahuje model robota, model měřicího principu snímače, model kalibračního objektu, model generátoru kalibračních pozic, algoritmy pro zpracování kalibračních dat, metodu pro řešení rovnice hand-eye kalibrace apod. Takto sestavený model procesu pro kalibraci optického snímače je dále nutné simulačně analyzovat jak z pohledu změn vstupních veličin (přesnost polohování robota, přesnost měření), tak z pohledu změn vnitřních parametrů modelu (počet kalibračních pozic, hodnoty limitů během vyhodnocení atd.). Na základě analýzy jsou navrženy optimální parametry pro generátor kalibračních pozic a optimální parametry pro následné zpracování kalibračních dat. Provedená analýza dá taky odpověď na otázku, s jakou přesností může být daný optický snímač jako nástroj robota kalibrován.

Autor práce se věnuje vývoji naváděcích systémů ve spolupráci s firmou LaserTherm, spol. s r.o. Tyto systémy využívají jako snímací prvek profilový skener a pro polohování technologie šestiosý robotický manipulátor. Pro tuto konfiguraci systému tak autor detailně popsal celý model procesu hand-eye kalibrace profilového skeneru v kapitole 4. Kromě jiného tento model obsahuje autorem navržený model měřicího principu skeneru, upravený algoritmus pro robustní vyhodnocení vzájemné pozice mezi skenerem a kalibračním objektem z měřených dat nebo vlastní iterativní algoritmus pro zpřesnění finálního řešení rovnice hand-eye kalibrace. Tento model kalibračního procesu byl následně analyzován v kapitole 5. Pomocí analýzy autor navrhl optimální parametry pro generátor kalibračních pozic a také optimální parametry pro vyhodnocení kalibračních dat. Například autor prokázal, že pro dostatečnou přesnost hand-eye kalibrace profilového skeneru je zapotřebí generovat stovky kalibračních pozic. Odborné publikace z oblasti hand-eye kalibrace však využívají při ověřování svých metod pouze

jednotky až desítky kalibračních pozic. Dále navržený postup prokazuje dostatečnou spolehlivost kalibrace, která byla jedním z cílů autora pro využití postupu i v této oblasti ne odborně znalými operátory naváděcích systémů.

V samostatné kapitole 6 se autor věnuje vlivu absolutní chyby polohování robota na proces hand-eye kalibrace profilového skeneru, která je ve většině publikací z této oblasti opomíjena. Přitom na přesnost hand-eye kalibrace i přesnost celého procesu navádění má zásadní vliv. Absolutní chybu polohování lze očekávat u všech sériově vyráběných robotů v řádu jednotek milimetrů. Jak autor ukázal, tak nalezený transformační vztah mezi TCP příruby a TCP skeneru částečně kompenzuje absolutní chybu polohování robota v daném místě kalibrace. Výsledná přesnost kalibračního procesu se zhorší, ale jeho chyba má především translační charakter, takže z praktického hlediska je snadno kompenzovatelná v reálných naváděcích systémech. Důležité je ale upozornit, že velikost a orientace absolutní chyby polohování je v pracovním prostoru různá. Proto je důležité provádět kalibraci profilového skeneru, a i dalších nástrojů robota, v pracovní pozici, ve které probíhá následný technologický proces.

Autorem navržený postup pro hand-eye kalibraci profilového skeneru je součástí softwaru CogniGuide. Jedná se o řídicí software vyvíjených naváděcích systémů pro laserové svařování se společností LaserTherm, jehož je autor práce hlavním tvůrcem. Pomocí ukázek využití tohoto softwaru na konkrétních úlohách z oblasti navařování materiálu na náběžnou hranu lopatek, svařování trubek pro vyhořelé jaderné palivo či svařování nerezových pivních tanků autor prokázal také praktickou užitečnost navrženého postupu hand-eye kalibrace profilového skeneru. Její přesnost totiž hraje zásadní roli v celkové přesnosti naváděcího systému.

Literatura

- [1] Abderrahim, M., Khamis, A., Garrido, S. and Moreno, L. (2006) “Accuracy and Calibration Issues of Industrial Manipulators”, *In Industrial Robotics: Programming, Simulation and Applications*, Huat, L.K., Eds., InTech, Rijeka, Croatia, pp. 131–146.
- [2] Ali, I., Suominen, O., Gotchev, A.P. and Morales, E.R. (2019) “Methods for Simultaneous Robot-World-Hand–Eye Calibration: A Comparative Study”, *Sensors*, Vol. 19, No. 12, pp. 2837-2852.
- [3] Altmann, S.L. (2005) *Rotations, Quaternions, and Double Groups*, Courier Corporation.
- [4] Ang, M.H. and Tourassis, V.D. (1987) “Singularities of Euler and Roll-Pitch-Yaw Representations”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-23, No. 3, pp. 317-324.
- [5] Björck, A. (1996) *Numerical Methods for Least Squares Problems*, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, USA.
- [6] Borangiu, T., Dogar, A. and Dumitrache, A. (2009) “Calibration of Wrist-Mounted Profile Laser Scanning Probe using a Tool Transformation Approach”, *Proceedings of the RAAD 2009*, Brasov, Romania.
- [7] Brandstötter, M., Angerer, A. and Hofbauer, M. (2014) “An Analytical Solution of the Inverse Kinematics Problem of Industrial Serial Manipulators with an Ortho-parallel Basis and a Spherical Wrist”, *In Proceedings of the Austrian Robotics Workshop*, Linz, Austria, pp. 7-11.
- [8] Cakir, M. and Deniz, C. (2019) “High precise and zero-cost solution for fully automatic industrial robot TCP calibration”, *Industrial Robot*, Vol. 46, No. 5, pp. 650-659.
- [9] Campa, R. and Camarillo, K. (2008) “Unit Quaternions: A Mathematical Tool for Modeling, Path Planning and Control of Robot Manipulators”, *Robot Manipulators*, Marco Ceccarelli (Ed.), InTech.
- [10] Carlson, F.B., Johansson, R. and Robertsson, A. (2015) “Six DOF eye-to-hand calibration from 2D measurements using planar constraints”, *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Hamburg, Germany, pp. 3628-3632.
- [11] Collins, G.E. (1971). “The Calculation of Multivariate Polynomial Resultants”, *Journal of the Association for Computing Machinery*, Vol. 18, No. 4, pp. 515-532.
- [12] De Graaf, M. (2007) *Sensor-Guided Robotic Laser Welding*, PhD thesis, University of Twente, Enschede, Netherlands.
- [13] Dombre, E. and Khalil, W. (2010) *Modeling, Performance Analysis and Control of Robot Manipulators*, Wiley Online Library: Hoboken, NJ, USA.

- [14] Du, G. and Zhang, P. (2013) “Online robot calibration based on vision measurement”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 29, Issue 6, pp. 484-492.
- [15] Du, G., Zhang, P. and Li, D. (2015) “Online robot calibration based on hybrid sensors using Kalman Filters”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 31, pp. 91-100.
- [16] Fan, J., Jing, F., Fang, Z. and Liang, Z. (2016) “A simple calibration method of structured light plane parameters for welding robots”, *2016 35th Chinese Control Conference (CCC)*, Chengdu, China, pp. 6127-6132.
- [17] Gantmacher, F.R. (1959) *The Theory of Matrices*, Volume One, Chelsea Publishing Company, New York, USA.
- [18] Glusa, T. (2020) “Visual seam tracking system for butt weld of thin plate”, *15. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Srní, pp. 57-62.
- [19] Goubej, M., Švejda, M. and Schlegel, M. (2012) “Úvod do mechatroniky, robotiky a systémů řízení pohybu“, *skriptum*, Katedra kybernetiky, ZČU Plzeň.
- [20] Heikkilä, T., Ahola, J.M., Koskinen, J. and Seppälä, T. (2014) “Calibration procedures for object locating sensors in flexible robotized machining”, *2014 IEEE/ASME 10th International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)*, Senigallia, pp. 1-6.
- [21] Heller, J., Havlena, M. and Pajdla, T. (2016) “Globally Optimal Hand-Eye Calibration Using Branch-and-Bound”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 38, Issue 5, pp. 1027-1033.
- [22] Huissoon, J.P. (2002) “Robotic laser welding: seam sensor and laser focal frame registration”, *Robotica*, Vol. 20, pp. 261–268.
- [23] Chen, W., Du, J., Xiong, W., Wang, Y., Chia, S., Liu, B., Cheng, J. and Gu, Y. (2018) “A Noise-Tolerant Algorithm for Robot-Sensor Calibration Using a Planar Disk of Arbitrary 3-D Orientation”, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 251-263.
- [24] Chou, J.C.K. and Kamel, M. (1988) “Quaternions approach to solve the kinematic equation of rotation $AaAx = AxAb$ of a sensor mounted robotic manipulator”, *Proceedings of the 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Philadelphia, pp. 656–662.
- [25] Chou, J.C.K. and Kamel, M. (1991) “Finding the position and orientation of a sensor on a robot manipulator using quaternions”, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 10, Issue 3, pp. 240–254.
- [26] Iakovou, D. (2009) *Sensor development and integration for robotized laser welding*, PhD thesis, University of Twente, Enschede, Netherlands.

- [27] Józwik, J., Ostrowski, D., Jarosz, P. and Mika, D. (2016) “Industrial robot repeatability testing with high speed camera Phantom V2511”, *Advances in Science and Technology Research Journal*, Vol. 10, No. 32, pp. 86-96.
- [28] Katayama, S. (2013) *Handbook of Laser Welding Technologies*, Elsevier.
- [29] Kim, Ch., Choi, T. and Suh, J. (2008) “Development of Welding Profile Sensor and Its Application”, *International Conference on Smart Manufacturing Application*, Gyeonggi-do, Korea, pp. 24-29.
- [30] Kluz, R. and Trzepieciński, T. (2014) “The repeatability positioning analysis of the industrial robot arm”, *Assembly Automation*, Vol. 34, No. 3, pp. 285-295.
- [31] Lai, M., Shan, C. and de With, P.H.N. (2018) “Hand-Eye Camera Calibration with an Optical Tracking System”, *Proceedings of the 12th International Conference on Distributed Smart Cameras (ICDSC '18)*, Association for Computing Machinery, New York, USA, pp. 1–6.
- [32] Li, W. L., Xie, H., Zhang, G., Yan, S. J. and Yin, Z. P. (2016) “Hand-Eye Calibration in Visually-Guided Robot Grinding”, *IEEE Transactions on Cybernetics*, Vol. 46, No. 11, pp. 2634-2642.
- [33] Lu, C.P., Mjolsness, E. and Hager, G.D. (1996) “Online Computation of Exterior Orientation with Application to Hand-Eye Calibration”, *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 24, Issues 5-6, pp. 121-143.
- [34] Marquardt, D.W. (1963) “An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters”, *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, Vol. 11, No. 2, pp. 431-441.
- [35] McLachlan, G. and Peel, D. (2000) *Finite Mixture Models*, Wiley & Sons Ltd.
- [36] Mu, N., Wang, K. Xie, Z. and Ren, P. (2017) “Calibration of a flexible measurement system based on industrial articulated robot and structured light sensor”, *Optical Engineering*, Vol. 56, No. 5, 054103.
- [37] Nayak, N. and Ray, A. (1993) *Intelligent seam tracking for robotic welding*, Advances in Industrial Control, Springer.
- [38] Pachtrachai, K., Allan, M., Pawar, V., Hailes, S. and Stoyanov, D. (2016) “Hand-eye calibration for robotic assisted minimally invasive surgery without a calibration object”, *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Daejeon, Korea, pp. 2485-2491.
- [39] Pachtrachai, K., Vasconcelos, F., Dwyer, G., Pawar, V., Hailes, S. and Stoyanov, D. (2018) “CHESS-Calibrating the Hand-Eye Matrix with Screw Constraints and Synchronization”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 3, Issue 3, pp. 2000-2007.

- [40] Pachtrachai, K., Vasconcelos, F., Dwyer, G., Hailes, S. and Stoyanov, D. (2019) “Hand-Eye Calibration with a Remote Centre of Motion”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 4, Issue 4, pp. 3121-3128.
- [41] Park, F.C. and Martin, B.J. (1994) “Robot sensor calibration: Solving AX equals XB on the Euclidian Group”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 10, No. 5, pp. 717–721.
- [42] Park, I.W., Lee, B.J., Cho, S.H., Hong, Y.D. and Kim, J.H. (2012) “Laser-Based Kinematic Calibration of Robot Manipulator Using Differential Kinematics”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 17, No. 6, pp. 1059-1067.
- [43] Pérez, L., Rodríguez, Í., Rodríguez, N., Usamentiaga, R. and García, D.F. (2016) “Robot Guidance Using Machine Vision Techniques in Industrial Environments: A Comparative Review”, *Sensors*, Vol. 16, No. 3, pp. 335-360.
- [44] Raghavan, M. and Roth, B. (1993) “Inverse Kinematics of the General 6R Manipulator and Related Linkages”, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 115, Issue 3, pp. 502-508.
- [45] Ren, Y., Yin, S. and Zhu, J. (2012) “Calibration technology in application of robot-laser scanning system”, *Optical Engineering*, Vol. 51.
- [46] Shah, M., Eastman, R.D. and Hong, T. (2012) “An overview of robot-sensor calibration methods for evaluation of perception systems”, *Proceedings of the Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems (PerMIS '12)*, New York, USA, pp. 15–20.
- [47] Sharifzadeh, S., Biro, I. and Kinnell, P. (2020) “Robust hand-eye calibration of 2D laser sensors using a single-plane calibration artefact”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 61, 101823.
- [48] Shiu, Y.C. and Ahmad, S. (1987) “Finding the mounting position of a sensor by solving a homogenous transform equation of the form $AX = XB$,” *Proceedings of 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1666-1671.
- [49] Shiu, Y.C. and Ahmad, S. (1989) “Calibration of wrist-mounted robotic sensors by solving homogeneous transform equations of the form $AX=XB$,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 5, Issue 3, pp. 16-29.
- [50] Siciliano, B. and Sciavicco, L. (2000) *Modelling and Control of Robot Manipulators*, 2nd edition, Springer.
- [51] Tsai, R.Y. and Lenz, R.K. (1989) “A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics Hand/Eye calibration”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 5, Issue 3, pp. 345–357.
- [52] Wagner, M., Heß, P., Reitelshöfer, S. and Franke, J. (2015) “Self-calibration method for a robotic based 3D scanning system”, *IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation*, Luxembourg, pp. 1-6.

- [53] Wang, Y., Hang, L.B. and Yang, T.L.. (2006) “Inverse Kinematics Analysis of General 6R Serial Robot Mechanism Based on Groebner Base”, *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, Vol. 1, pp. 115-124.
- [54] Wei, G., Arbter, K. and Hirzinger, G. (1998) “Active self-calibration of robotic eyes and hand-eye relationships with model identification”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 14, No. 1, pp. 158-166.
- [55] Wu, L., Wang, J., Qi, L., Wu, K., Ren, H. and Meng, M.Q.-H. (2016) “Simultaneous Hand-Eye, Tool-Flange, and Robot-Robot Calibration for Comanipulation by Solving the $AXB = YCZ$ Problem”, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 32, Issue 2, pp. 413-428.
- [56] Xie, Z., Zong, P., Yao, P. and Ren P. (2019) “Calibration of 6-DOF industrial robots based on line structured light”, *Optik*, Vol. 183, pp. 1166-1178.
- [57] Xu, X., Zhu, D., Zhang, H., Yan, S. and Ding, H. (2016) “TCP-based calibration in robot-assisted belt grinding of aero-engine blades using scanner measurements”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technoly*, Vol. 90, pp. 635–647.
- [58] Yin, S., Ren, Y., Zhu, J., Yang, S. and Ye, S. (2013) “A Vision-Based Self-Calibration Method for Robotic Visual Inspection Systems”, *Sensors*, Vol. 13, No. 12, pp. 16565-16582.
- [59] Zhuang, H. and Roth, Z.S. (1991) “Comments on ‘Calibration of wrist-mounted robotic sensors by solving homogeneous transform equations of the form $AX = XB$ ’”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 6, pp. 877–876.
- [60] Zhuang, H. and Shiu, Y.C. (1993) “A noise-tolerant algorithm for robotic handeye calibration with or without orientation measurement”, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 1168–1175.

Vlastní publikace

- [61] Chaluš, M. (2013) “Vývoj nástroje pro řízení a podporu vyhodnocení experimentů ve středně-rychlostním aerodynamickém tunelu”, *sborník rozšířených abstraktů Studentská vědecká konference FAV 2013*, Plzeň.
- [62] Chaluš, M. (2014a) “Design of Control Algorithms for Experimental Devices of Flow Media”, *sborník konference Energetické stroje a zařízení, Termomechanika & Mechanika tekutin ES 2014*, Plzeň.
- [63] Chaluš, M. (2014b) “Aplikace pro měření statických tlaků na parních turbínách”, *sborník referátů Turbostroje 2014*, Plzeň.
- [64] Chaluš, M. (2014c) “Návrh řídicích algoritmů pro experimentální zařízení proudícího média”, *sborník rozšířených abstraktů Studentská vědecká konference FAV 2014*, Plzeň.
- [65] Chaluš, M. (2014d) “Aplikace pro měření statických tlaků”, *technická zpráva TZTP 0908*, Experimentální výzkum proudění, Úsek Rozvoj, Doosan Škoda Power s.r.o., Plzeň.
- [66] Chaluš, M. (2014e) “Aplikace pro sondování sedmiotvorovou sondou”, *technická zpráva TZTP 0910*, Experimentální výzkum proudění, Úsek Rozvoj, Doosan Škoda Power s.r.o., Plzeň.
- [67] Chaluš, M. (2015) “3D vidění v oblasti robotického laserového zpracování materiálů”, *sborník rozšířených abstraktů Studentská vědecká konference FAV 2015*, Plzeň.
- [68] Chaluš, M. and Liška, J. (2016) “3D robotic welding with a laser profile scanner”, *2016 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS)*, Ansan, Korea, pp. 7-12.
- [69] Steidl, P., Chaluš, M. and Liška, J. (2016) “Navařování kavity pro demonstraci proveditelnosti návaru materiálem FM52”, *závěrečná zpráva*, LaserTherm spol. s r.o., Plzeň.
- [70] Liška, J. and Chaluš, M. (2016) “Návrh metod automatické detekce předmětů v pracovním prostoru robota, identifikace trajektorie a navázání na kinematiku robota”, *výzkumná zpráva*, Katedra Kybernetiky, Západočeská univerzita v Plzni.
- [71] Chaluš, M. (2017) “3D robotické navařování s využitím hloubkové mapy”, *sborník rozšířených abstraktů Studentská vědecká konference FAV 2017*, Plzeň.
- [72] Liška, J., Chaluš, M., a Steidl, P. (2017) “Návrh metod automatické detekce předmětů v pracovním prostoru robota, identifikace trajektorie a navázání na kinematiku robota – 2. část”, *výzkumná zpráva*, Katedra Kybernetiky, Západočeská univerzita v Plzni.
- [73] Chaluš, M. and Liška, J. (2018) “Calibration and using a laser profile scanner for 3D robotic welding”, *Int. J. of Computational Vision and Robotics, Special Issue on: Recent Advances in Theory and Applications of Visual Intelligence*, Vol. 8, No. 4, pp. 351-374.

- [74] Liška, J., Chaluš, M. and Vaníček, O. (2018a) “Iterative Refinement of Hand-Eye Calibration”, *14th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Munich, Germany, pp. 457-462.
- [75] Liška, J., Vaníček, O. and Chaluš, M. (2018b) “Hand-Eye Calibration of a Laser Profile Scanner in Robotic Welding”, *2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Auckland, New Zealand, pp. 316-321.
- [76] Liška, J., Chaluš, M., a Steidl, P. (2018c) “Návrh metod automatické detekce předmětů v pracovním prostoru robota, identifikace trajektorie a navázání na kinematiku robota – 3. část”, *výzkumná zpráva*, Katedra Kybernetiky, Západočeská univerzita v Plzni.
- [77] Chaluš, M. (2019) “Automatické svařování pivních tanků”, *sborník rozšířených abstraktů Studentská vědecká konference FAV 2019*, Plzeň.
- [78] Liška, J., Chaluš, M., Vaníček, O. a Štrunc, V., (2019a) “Prototyp kognitivního modulu pro automatickou identifikaci 7D trajektorie v úloze laserového kalení, sváření a navařování”, *výzkumná zpráva*, Katedra Kybernetiky, Západočeská univerzita v Plzni.
- [79] Liška, J., Chaluš, M., Vaníček, O., Štrunc, V. a Viktora, M. (2019b) “Poloprovaz systému pro detekci a identifikaci strojních součástí”, *výzkumná zpráva*, Katedra Kybernetiky, Západočeská univerzita v Plzni.
- [80] Liška, J., Kalista, K. and Chaluš, M. (2019c) “Software pro systémy sběru dat”, *výzkumná zpráva*, Katedra Kybernetiky, Západočeská univerzita v Plzni.
- [81] Liška, J., Kalista, K. and Chaluš, M. (2019d) “Vývoj knihovny pro filtraci dat v Matlabu”, *výzkumná zpráva*, Katedra Kybernetiky, Západočeská univerzita v Plzni.
- [82] Liška, J. and Chaluš, M. (2019e) “Návrh a implementace naváděcího systému robota pro svařování tanků – Lukr”, *výzkumná zpráva*, Katedra Kybernetiky, Západočeská univerzita v Plzni.
- [83] Liška, J. and Chaluš, M. (2019f) “Návrh a implementace naváděcího systému robota pro svařování tanků – Lukr 2. část”, *výzkumná zpráva*, Katedra Kybernetiky, Západočeská univerzita v Plzni.
- [84] Chaluš, M., Vaníček, O. and Liška, J. (2020) “Finding Optimal Sensor Positions for Hand-Eye Calibration”, *2020 21th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, High Tatras, Slovakia, pp. 1-6.
- [85] Vaníček, O., Chaluš, M. and Liška, J. (2020) “Automatic Navigation System for 3D Robotic Laser Cladding”, *2020 21th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, High Tatras, Slovakia, pp. 1-6.
- [86] Liška, J. and Chaluš, M. (2020a) “Vývoj univerzálního SW pro statistické vyhodnocení měřených dat”, *výzkumná zpráva*, Katedra Kybernetiky, Západočeská univerzita v Plzni.

- [87] Liška, J. and Chalůš, M. (2020b) “Softwarová úprava pro OROS”, *výzkumná zpráva*, Katedra Kybernetiky, Západočeská univerzita v Plzni.

Přílohy

A Reprezentace polohy

Těleso umístěné ve třídimenzionálním prostoru má obecně šest stupňů volnosti, které jsou dány možností třech translačních posunů v jednotlivých osách souřadného systému a třech natočení okolo těchto os. V následujících podkapitolách bude nejprve představena transformační matice spojující informaci o poloze i natočení mezi dvěma souřadnými systémy. Dále pak budou podrobněji rozepsány dva možné způsoby reprezentace natočení.

A.1 Transformační matice

Nejvyužívanějším způsobem pro přenesení informace o poloze konkrétního bodu z jednoho systému souřadnic do druhého, jak je například znázorněno na obr. 8.1, je použití transformační matice \mathbf{T}_2^1

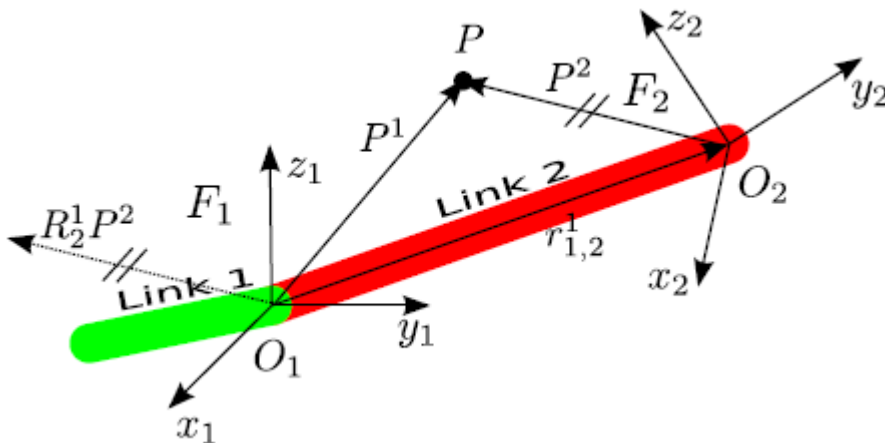
$$\begin{bmatrix} {}^1\mathbf{P} \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_2^1 \begin{bmatrix} {}^2\mathbf{P} \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_2^1 & \mathbf{r}_{1,2}^2 \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^2\mathbf{P} \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{yx} & r_{zx} & \mathbf{r}_{1,2x}^2 \\ r_{xy} & r_{yy} & r_{zy} & \mathbf{r}_{1,2y}^2 \\ r_{xz} & r_{yz} & r_{zz} & \mathbf{r}_{1,2z}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^2\mathbf{P} \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (8.1)$$

Vektor $\mathbf{r}_{1,2}^2$ určuje translační posun soustav a matice rotace \mathbf{R}_2^1 natočení souřadného systému F_2 v souřadném systému F_1 , kde sloupce této matice představují jednotkové směrové vektory. Zároveň je matice rotace ortogonální, tedy směrové vektory jsou vzájemně kolmé a platí:

$$(\mathbf{R}_2^1)^{-1} = (\mathbf{R}_2^1)^T = \mathbf{R}_1^2. \quad (8.2)$$

Na základě této skutečnosti může být snadno určena inverzní transformační matice:

$$(\mathbf{T}_2^1)^{-1} = \mathbf{T}_1^2 = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1^2 & -\mathbf{R}_1^2 \cdot \mathbf{r}_{1,2}^2 \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8.3)$$



Obr. 8.1: Dva souřadné systémy navazujících ramen – Goubej et al. (2012).

A.2 Matice rotace

Natočení jednoho souřadného systému v druhém je nejčastěji popisováno maticí rotace, jejíž sloupce interpretují jednotkové vektory os. Libovolné natočení souřadného systému lze popsat třemi po sobě jdoucími základními rotacemi. Za tu je považováno otočení souřadného systému o daný (Eulerův) úhel kolem jedné z os x , y nebo z :

$$\mathbf{R}_X(\psi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix}, \quad (8.4)$$

$$\mathbf{R}_Y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (8.5)$$

$$\mathbf{R}_Z(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8.6)$$

Výsledná matice závisí na zvoleném schématu otáčení, a zda se rotace kolem jednotlivých os provádí kolem původní fixní souřadné soustavy nebo vždy kolem aktuálně natočeného souřadného systému. Pokud rotace probíhá podle aktuálních os, výsledná matice rotace se určí vynásobením základních matic ve stejném pořadí rotace. Pokud by rotace byla prováděna dle původního souřadného systému, výsledná matice rotace by byla získána obráceným vynásobením základních matic.

Jako příklad bude uvedeno schéma rotace ZYX , nazývané *Roll-Pitch-Yaw*, které je velmi využívané v oblasti robotiky (např. Fanuc). Systém souřadnic se nejprve otočí o úhel ϕ okolo osy z , dále o úhel θ okolo aktuální osy y , nakonec o úhel ψ okolo osy x . Výsledná matice rotace má tedy podobu (zkratky „s“ a „c“ náleží funkcím sinu a kosinu daného úhlu v indexu)

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_Z(\phi)\mathbf{R}_Y(\theta)\mathbf{R}_X(\psi) = \begin{bmatrix} c_\phi c_\theta & c_\phi s_\theta s_\psi - s_\phi c_\psi & c_\phi s_\theta c_\psi + s_\phi s_\psi \\ s_\phi c_\theta & s_\phi s_\theta s_\psi + c_\phi c_\psi & s_\phi s_\theta c_\psi - c_\phi s_\psi \\ -s_\theta & c_\theta s_\psi & c_\theta c_\psi \end{bmatrix}. \quad (8.7)$$

Převod z oblasti úhlů na matici rotace je jednoznačný. Problém může však nastat v případě hledání velikosti jednotlivých úhlů při znalosti matice rotace. Porovnáním submatice (8.1) a matice (8.7) lze určit zpětně úhly pro schéma *Roll-Pitch-Yaw* v těchto intervalech:

- $\theta = \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$

$$\begin{aligned} \psi &= \operatorname{atan} 2(r_{yz}, r_{zz}), \\ \theta &= \operatorname{atan} 2\left(-r_{xz}, \sqrt{r_{yz}^2 + r_{zz}^2}\right), \\ \phi &= \operatorname{atan} 2(r_{xy}, r_{xx}) \end{aligned} \quad (8.8)$$

- $\theta = \left(\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2} \right)$

$$\begin{aligned}\psi &= \operatorname{atan} 2(-r_{yz}, -r_{zz}), \\ \theta &= \operatorname{atan} 2(-r_{xz}, -\sqrt{r_{yz}^2 + r_{zz}^2}), \\ \phi &= \operatorname{atan} 2(-r_{xy}, -r_{xx}).\end{aligned}\tag{8.9}$$

Pokud je ale prvek $r_{xz} = \pm 1$ a tedy úhel má hodnotu $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$, nachází se toto schéma rotace v tzv. singulárních bodech, kdy je možné určit pouze rozdíl, respektive součet úhlů ψ a ϕ :

$$\theta = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \psi - \phi = \operatorname{atan} 2(r_{yx}, r_{yy})\tag{8.10}$$

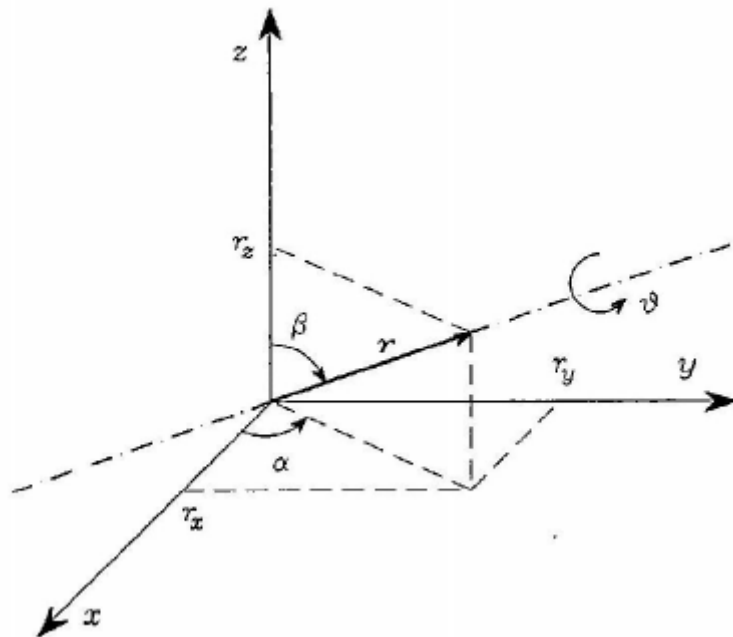
$$\theta = -\frac{\pi}{2} \Rightarrow \psi + \phi = \operatorname{atan} 2(-r_{yx}, r_{yy})\tag{8.11}$$

Řešením pro vyšší řídicí systém může být monitorování prvku r_{xz} v určitém okolí kolem singulárního bodu. Při nacházení se v tomto okolí se jeden z úhlů ψ nebo ϕ zafixuje dle předchozího výpočtu a druhý dopočte dle rovnice (8.10) či (8.11), více viz (Ang a Tourassis, 1987).

Vzhledem k návaznosti práce na řízení robotů Fanuc, kde jsou translační hodnoty udávány pomocí proměnných X , Y a Z a rotační úhly pomocí proměnných W , P a R bude definovaná transformační funkce

$$\mathbf{T} = T\left(\begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix}^T, \begin{bmatrix} W & P & R \end{bmatrix}^T\right),\tag{8.12}$$

kde první vektor představuje vektor posunutí $\mathbf{r}_{1,2}^T$ a druhý vektor úhly ψ , θ a ϕ .



Obr. 8.2: Obecná osa rotace – Siciliano a Sciavicco (2000).

A.3 Jednotkový kvaternion

Eulerovy úhly představují minimální reprezentaci libovolné rotace v prostoru. Jinou možností pro popis rotace je neminimální reprezentace pomocí obecné osy rotace, která se skládá z jednotkového vektoru \mathbf{r} , okolo kterého je otáčeno o úhel ϑ , viz obr. 8.2. Tato reprezentace má ovšem také singulární body v $\mathcal{G} = \{0, \pi\}$, jak je blíže popsáno v Siciliano a Sciavicco (2000).

Kvůli problémům se singulárními body v přechozích reprezentacích se využívá popisu rotace pomocí jednotkového kvaternionu (unit quaternion), jenž tuto nevýhodu odstraňuje. Využití jednotkového kvaternionu pro popis rotace má široké využití v oblasti robotiky, počítačové grafiky apod. Kromě neexistujících singularit přináší značné výhody i pro menší výpočetní nároky. Kvaterniony jsou rozšířením oboru komplexních čísel, kde místo jedné imaginární složky jsou zdefinovány tři i, j a k :

$$\mathbf{q} = a + b \cdot i + c \cdot j + d \cdot k. \quad (8.13)$$

Koeficienty a, b, c a d jsou reálná čísla. Bližší definici a algebru kvaternionu lze nalézt v literatuře (Altmann, 2005; Campa a Camarillo, 2008). Zde budou uvedeny jen vztahy potřebné pro tuto práci. Kvaternion je zapisován jako skalární část a a vektorová část $\mathbf{v} = [b \ c \ d]^T$:

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} a & \mathbf{v}^T \end{bmatrix}^T. \quad (8.14)$$

Ze znalosti obecné osy rotace \mathbf{r} a úhlu natočení ϑ lze přejít na tzv. Eulerovy parametry, které jednoznačně určují libovolnou rotaci v prostoru:

$$\eta = \cos\left(\frac{\vartheta}{2}\right), \quad (8.15)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_1 \\ \boldsymbol{\varepsilon}_2 \\ \boldsymbol{\varepsilon}_3 \end{bmatrix} = \sin\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \mathbf{r} = \sin\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \begin{bmatrix} \mathbf{r}_x \\ \mathbf{r}_y \\ \mathbf{r}_z \end{bmatrix}. \quad (8.16)$$

Eulerovy parametry musí splňovat podmínku

$$\eta^2 + \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\varepsilon} = 1, \quad (8.17)$$

jedná se pak zároveň o jednotkový kvaternion se zápisem

$$\boldsymbol{\xi} = \begin{bmatrix} \eta & \boldsymbol{\varepsilon}^T \end{bmatrix}^T. \quad (8.18)$$

Eulerovy parametry lze převést na matici rotace dle vztahu

$$\mathbf{R}(\eta, \boldsymbol{\varepsilon}) = \begin{bmatrix} 2(\eta^2 + \boldsymbol{\varepsilon}_1^2) - 1 & 2(\boldsymbol{\varepsilon}_1 \boldsymbol{\varepsilon}_2 - \eta \boldsymbol{\varepsilon}_3) & 2(\boldsymbol{\varepsilon}_1 \boldsymbol{\varepsilon}_3 + \eta \boldsymbol{\varepsilon}_2) \\ 2(\boldsymbol{\varepsilon}_1 \boldsymbol{\varepsilon}_2 + \eta \boldsymbol{\varepsilon}_3) & 2(\eta^2 + \boldsymbol{\varepsilon}_2^2) - 1 & 2(\boldsymbol{\varepsilon}_2 \boldsymbol{\varepsilon}_3 - \eta \boldsymbol{\varepsilon}_1) \\ 2(\boldsymbol{\varepsilon}_1 \boldsymbol{\varepsilon}_3 - \eta \boldsymbol{\varepsilon}_2) & 2(\boldsymbol{\varepsilon}_2 \boldsymbol{\varepsilon}_3 + \eta \boldsymbol{\varepsilon}_1) & 2(\eta^2 + \boldsymbol{\varepsilon}_3^2) - 1 \end{bmatrix}. \quad (8.19)$$

Jak již bylo zmíněno výše, v této reprezentaci rotace neexistuje singularita, takže zpětný převod je jednoznačně určen rovnicemi

$$\eta = \frac{1}{2} \sqrt{r_{xx} + r_{yy} + r_{zz}}, \quad (8.20)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \operatorname{sgn}(r_{zy} - r_{yz}) \sqrt{r_{xx} - r_{yy} - r_{zz} + 1} \\ \operatorname{sgn}(r_{xz} - r_{zx}) \sqrt{r_{yy} - r_{xx} - r_{zz} + 1} \\ \operatorname{sgn}(r_{yx} - r_{xy}) \sqrt{r_{zz} - r_{xx} - r_{yy} + 1} \end{bmatrix}. \quad (8.21)$$

Velký přínos při práci s kvaterniony přináší skládání rotací, jelikož pro násobení matic rotace je ekvivalentní násobení jednotkových kvaternionů, které odpovídají danému natočení. Násobení dvou kvaternionů $\xi_1 = [\eta_1 \quad \boldsymbol{\varepsilon}_1]$ a $\xi_2 = [\eta_2 \quad \boldsymbol{\varepsilon}_2]$ je definováno následovně

$$\xi_1 \otimes \xi_2 = \begin{bmatrix} \eta_1 \eta_2 - \boldsymbol{\varepsilon}_1^T \boldsymbol{\varepsilon}_2 \\ \eta_1 \boldsymbol{\varepsilon}_2 + \eta_2 \boldsymbol{\varepsilon}_1 + \boldsymbol{\varepsilon}_1 \times \boldsymbol{\varepsilon}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_1 \eta_2 - \boldsymbol{\varepsilon}_1^T \boldsymbol{\varepsilon}_2 \\ \eta_1 \boldsymbol{\varepsilon}_2 + \eta_2 \boldsymbol{\varepsilon}_1 + \operatorname{skew}(\boldsymbol{\varepsilon}_1) \boldsymbol{\varepsilon}_2 \end{bmatrix}, \quad (8.22)$$

$$\operatorname{skew}(\boldsymbol{\varepsilon}_1) = \begin{bmatrix} 0 & -\boldsymbol{\varepsilon}_{13} & \boldsymbol{\varepsilon}_{12} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{13} & 0 & -\boldsymbol{\varepsilon}_{11} \\ -\boldsymbol{\varepsilon}_{12} & \boldsymbol{\varepsilon}_{11} & 0 \end{bmatrix}. \quad (8.23)$$

Operátor $\operatorname{skew}()$ definuje převod vektoru na antisymetrickou matici. Skládání rotací pomocí matic rotace vyžaduje 18 operací sčítání a 27 operací násobení, zatím co násobení kvaternionů lze provést pomocí 12 operací sčítání a 16 operací násobení. Je tak výpočetně méně náročné, což je výhodné zejména v oblastech pro zpracování velkého objemu dat či v real-time systémech. Pro otočení vektoru \mathbf{v} pomocí kvaternionu ξ je dán vztah

$$\mathbf{v}' = \xi \otimes \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} \otimes \xi^* = \xi \otimes \bar{\mathbf{v}} \otimes \xi^*, \quad (8.24)$$

kde ξ^* značí sdružený kvaternion, jenž má opačné znaménko u vektorové části:

$$\xi^* = \begin{bmatrix} \eta \\ -\boldsymbol{\varepsilon} \end{bmatrix}. \quad (8.25)$$

Otočení vektoru lze zapsat ale i výpočetně rychlejší vztahem:

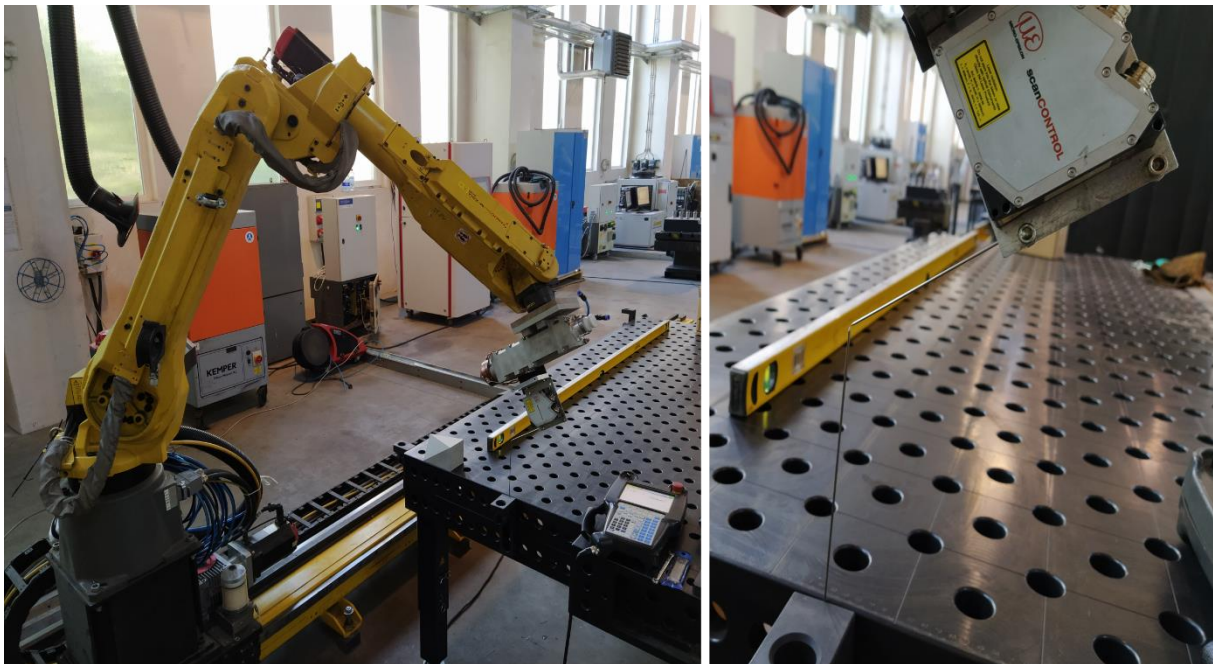
$$\begin{aligned} \mathbf{t} &= 2 \cdot (\boldsymbol{\varepsilon} \times \mathbf{v}), \\ \mathbf{v}' &= \mathbf{v} + \eta \cdot \mathbf{t} + \boldsymbol{\varepsilon} \times \mathbf{t}. \end{aligned} \quad (8.26)$$

B Analýza pravděpodobnostního rozložení vstupů do modelu kalibračního procesu

Pro využití modelu kalibračního procesu je zapotřebí znát pravděpodobnostní rozdělení některých vstupních veličin, dle kterých budou náhodně generovány vstupní hodnoty pro jednotlivá provedení simulací. Jedním z cílů autora této práce je snaha navržený postup kalibrace nástroje robota otestovat s ohledem na reálný provoz naváděcích systémů namísto náhodného přidávání chyb do matic \mathbf{A}_i a \mathbf{B}_i používaného ve většině autorovi známých publikací. V reálných případech často nespĺňují jednotlivé komponenty systému výrobcem udávané chyby (opakovatelnost robota, chyba profilového snímače apod.). Velký vliv na přesnost kalibrace dle navrženého postupu mohou mít také zadané počáteční hodnoty ruční kalibrace skeneru ${}^{guess}\mathbf{T}_S^N$. Proto budou některé ze vstupních parametrů MCP analyzovány pomocí zvolených postupů na reálném pracovišti s robotem Fanuc M20iA-20M, profilovým skenerem scanCONTROL 2600-100 a kalibračním objektem s délkami hran $\mathbf{c} = [120, 80, 80]$.

B.1 Chyba opakovatelnosti a absolutní přesnosti robota

V první řadě byly testovány vlastnosti zvoleného robota v podobě jeho opakovatelnosti a absolutní přesnosti. K tomuto účelu byl nejprve připevněn kovový hrot s ostrou špičkou k držáku profilového skeneru, viz pravý detail na obr. 8.3. Tento hrot byl následně zkalibrován standardní šesti bodovou metodou v kontroléru robota tak, aby se jeho TCP nacházel přímo na jeho špičce. Dále byl k pracovnímu stolu připevněn stejný hrot, jenž měl v pracovním prostoru robota neměnnou pozici. Zkalibrovaný TCP hrotu byl umístěn přesně proti špičce pevného hrotu tak, aby se vzájemně dotýkaly. Tato pozice nástroje byla uložena v kontroléru robota do připraveného programu, jehož jediným úkolem bylo najet lineárním pohybem přesně do zadané pozice. V rámci testování opakovatelnosti robota pak byl hrot nástroje umisťován do vzdálenosti 200 až 1000 mm v různých směrech od pevného hrotu s následným najížděním do

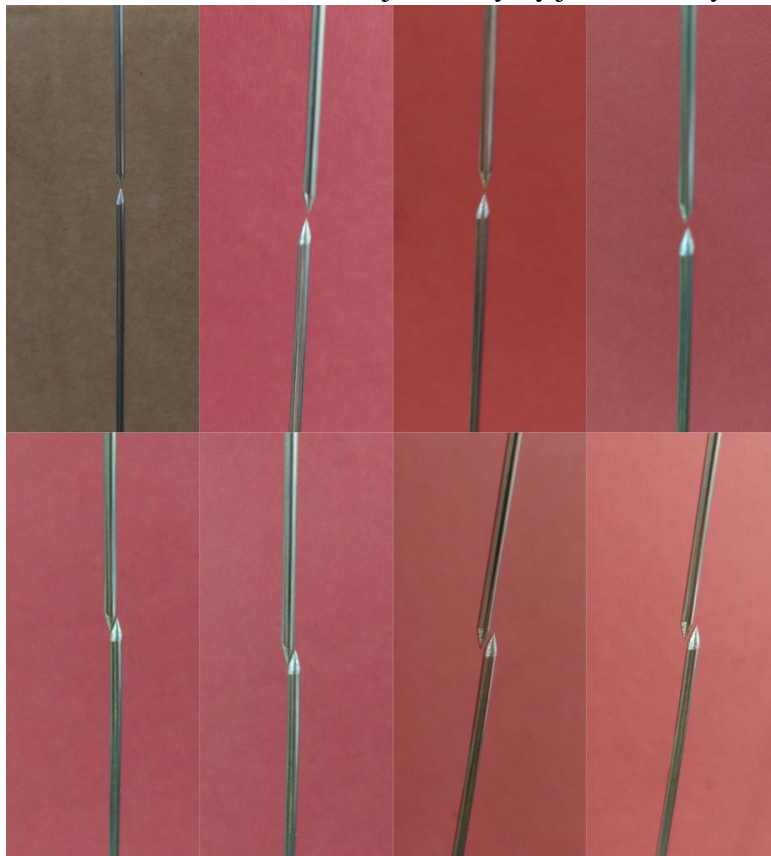


Obr. 8.3: Test opakovatelnosti robota.

uložené pozice a měřením odchylky doléhajících špiček pomocí spárové měrky (tloušťky listů 0,05 – 2 mm). Z 50 realizací experimentu se jen ve třech případech podařilo umístit mezi špičky hrotů alespoň měrku s tloušťkou 0,05 mm. Zbytek odchylek byl menší, ve většině případů dle vizuální kontroly téměř nulový. Provedený test relativně dobře potvrzuje udávanou opakovatelnost $\pm 0,03$ mm pro tento typ robota. Z pohledu nastavení pro simulace byla přesnost polohování robota zatížena dle provedeného experimentu a dostupné literatury (Józwik et al., 2016; Kluz a Trzepieciński, T. 2014) takto generovanou chybou:

1. Vzdálenostní chyba od skutečné translační pozice byla generována pomocí normálního rozdělení tak, aby 99,8 % hodnot mělo maximální chybu $\varepsilon_{rep_max} = 0,05$ mm. Tedy dle rozdělení $N\left(0; \left(\frac{\varepsilon_{rep_max}}{3}\right)^2\right)$.
2. Směrový vektor translační odchylky bude generován rovnoměrným rozdělením pro všechny tři složky dle $U(0; 1)$.

Kromě ověření opakovatelnosti daného robota byl proveden také orientační test absolutní přesnosti robota, i když cílem této práce není upřesnit jeho geometrický model. Test byl proveden na podobném principu jako test opakovatelnosti. Do uložené pozice hrot proti hrotu ve světovém souřadnicovém režimu bylo najížděno pomocí programu v kontroléru robota s různou konfigurací natočení jednotlivých aktuátorů Q_i , jelikož (jak již bylo uvedeno v 4.1) úloha IGM robota má více řešení. Odchylky mezi špičkami byly opět měřeny pomocí spárové měrky. Jednotlivá natočení aktuátorů a související odchylky jsou uvedeny v tab. 8-1. Na prvním



Obr. 8.4: Test absolutní přesnosti robota – detail odchylek špiček hrotů v jednotlivých konfiguracích aktuátorů.

řádku je konfigurace natočení, v níž byla nastavena a uložena výchozí pozice ve světovém souřadnicovém systému, viz levý horní obrázek na obr. 8.4. Další tři pozice se odlišují zejména otočením v aktuátorech q_4 a q_6 , kde je patrná mírná naměřená odchylka mezi špičkami. Výraznější chyba je však detekována při otočení q_1 o 180° na posledních čtyřech řádcích, jelikož pro dosažení požadované pozice ve světovém souřadnicovém systému musí být změněny i natočení q_2 a q_3 . Tudíž se projeví všechny odchylky geometrických parametrů $\Delta\xi$. Z pohledu vyvíjených STS podobných konstrukcí jako na obr. 1.1 existující odchylky $\Delta\xi$ příliš neovlivní přesnost navádění, jelikož natočení TCP profilového skeneru a laserové hlavy jsou velmi podobné. Proto proces skenování i svařování probíhá s podobnou konfigurací aktuátorů Q_i , a tudíž chyba absolutní přesnosti se tak kompenzuje samovolně. Problém by nastal, pokud by mechanická konstrukce spojení procesní hlavy a profilového skeneru vyžadovala polohování s různou konfigurací aktuátorů Q_i či by proces skenování probíhal v jiném pracovním prostoru robota než laserové obrábění. Průchod nalezené trajektorie během svařování s výrazně odlišnou konfigurací Q_i oproti skenování by nemusel vzhledem k chybám geometrických parametrů $\Delta\xi$ splňovat požadavky na přesnost navádění pro laserové procesy.

Tab. 8-1: Testování absolutní přesnosti robota

q_1 [°]	q_2 [°]	q_3 [°]	q_4 [°]	q_5 [°]	q_6 [°]	Chyba [mm]
144,003	19,752	-60,231	-57,837	71,508	24,469	0,00
144,005	19,751	-60,228	122,164	-71,508	204,469	0,20
144,003	19,752	-60,230	122,163	-71,507	-155,531	0,20
144,007	19,752	-60,230	-57,837	71,508	-335,530	0,25
-35,997	-35,812	210,797	-70,530	-58,376	-126,286	2,00
-35,997	-35,812	210,795	-70,530	-58,376	233,714	2,00
-35,997	-35,812	210,795	109,470	58,376	53,714	2,20
-35,997	-35,812	210,796	109,470	58,376	-306,286	2,40

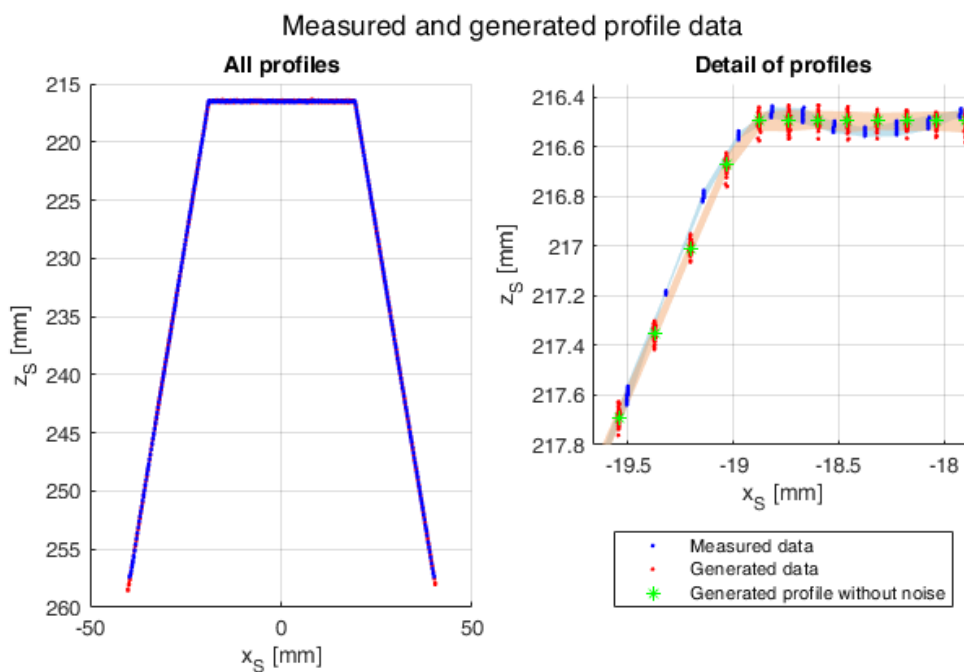
B.2 Chyba měření profilových dat

Dalším důležitým vstupem do prováděných simulací kalibračního procesu profilového skeneru je vygenerovaný měřený profil kalibračního objektu, jelikož tato data následně slouží k výpočtu matic B_i . Výpočet přesného profilu na základě zvolené geometrie kalibračního objektu, principu profilového skeneru a jejich vzájemné pozici je v podkapitole 4.3.4. K takto vygenerovanému profilu je ovšem nutné přidat určitý náhodný šum v osách x a z , aby se měření podobalo reálné situaci. Proto byl profilový skener umístěn nad kalibrační objekt, jak je zachyceno na obr. 8.5, do standardní pevné pozice. V této pozici byly nastaveny optimální parametry pro vyhodnocení dat uvnitř kontroléru skeneru pomocí dodávaného softwaru od výrobce Micro-Epsilon vzhledem k povrchu kalibračního objektu. Jednalo se zejména o nastavení parametru *Exposure time*, jenž udává dobu zachycující odražené laserové paprsky od snímaného objektu na povrchu optického snímače.

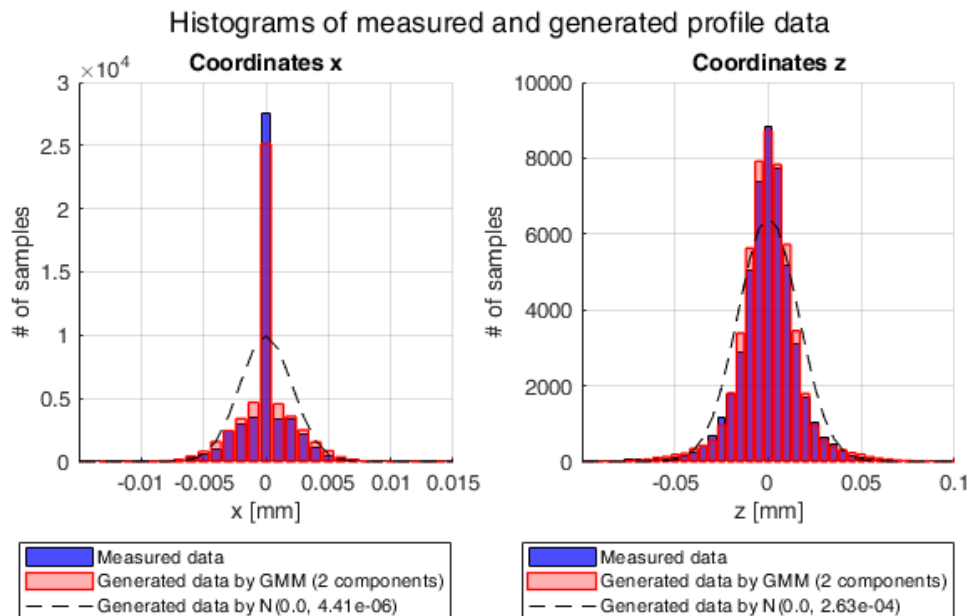


Obr. 8.5: Testování měřených dat profilovým skenerem scanCONTROL 2600-100.

V této statické poloze profilového skeneru vůči kalibračnímu objektu bylo snímáno a uloženo 100 profilů měřeného řezu kalibračním objektem. Všechna měřená data jsou vykreslena modrou barvou na obr. 8.6, kde levý graf zobrazuje kompletní změřené profily, zatímco na pravém grafu je detail měřených profilů v oblasti průsečíku $^S P_3$ včetně modře podbarvené oblasti vyznačující oblast 95 % kvantilu. Z detailu dat je patrný větší rozptyl jednotlivých



Obr. 8.6: Měřená (modré body) a generovaná (červené body) profilová data během testování profilového skeneru scanCONTROL 2600-100.



Obr. 8.7: Histogramy měřených a generovaných profilových dat. Vlevo jsou x -ové a vpravo z -ové souřadnice profilu snímané skenerem.

měřených bodů profilu (640 bodů/profil) v ose z oproti ose x . Pro každý bod profilu byla v obou osách napočítána jeho průměrná hodnota z měřených 100 hodnot, která pak byla od těchto hodnot odečtena. Došlo tak k vystředění všech měřených hodnot okolo hodnoty nula pro x -ovou i z -ovou osu. Z těchto hodnot byly následně napočítány histogramy v souřadnicích x a z pro určení vhodného rozdělení při generování šumu v jednotlivých osách. Histogramy vystředěných hodnot jsou modrou barvou na obr. 8.7. Pro měřená data byla vypočtena přibližná pozice profilového skeneru nad kalibračním objektem pomocí algoritmu popsaného v podkapitole 4.3.1. Pro tuto pozici pak byl vygenerován měřený profil pomocí definovaného modelu skeneru v podkapitole 4.3.4, viz zelené body na obr. 8.6. Z porovnání měřených dat a vygenerovaného profilu na detailu vpravo je vidět, že obojí reprezentuje stejnou geometrii řezu snímané roviny kalibračním objektem. V prvním kroku bylo testováno využití normálního rozdělení jako zdroje náhodného šumu, a proto byly napočítány rozptyly vystředěných dat pro jednotlivé osy. Následně bylo vygenerováno 100 profilů pro stejnou pozici skeneru nad kalibračním objektem a k jednotlivým bodům profilů byly přičteny náhodně vygenerované hodnoty dle normálního rozdělení $N(0; 4,41 \cdot 10^{-6})$ pro osu x a $N(0; 2,63 \cdot 10^{-4})$ pro osu z . Vygenerovaná data byla dále vystředěna stejným způsobem jako měřená data a byly pro ně vypočteny histogramy, viz čárkovaná černá křivka na obr. 8.7. Jelikož ale tyto histogramy neodpovídaly histogramům měřených dat, byly pro obě osy identifikovány Gaussovské modely směsi GMM (McLachlan a Peel, 2000) reprezentující pravděpodobnostní rozložení vystředěných dat. K identifikaci těchto modelů byl využit výpočetní software Matlab. Výsledkem pro obě osy byly jednodimenzionální modely se dvěma komponentami, jejichž parametry jsou v tab. 8-2. Vygenerovaná data s přidáním šumu dle GMM byla vykreslena červenými body na obr. 8.6. Pomocí vykresleného 95 % kvantilu také pro tato vygenerovaná data je vidět jejich dobrá shoda s měřenými daty v přibližně stejné pozici skeneru nad kalibračním objektem. Zpracované histogramy vygenerovaných dat s pomocí GMM byly

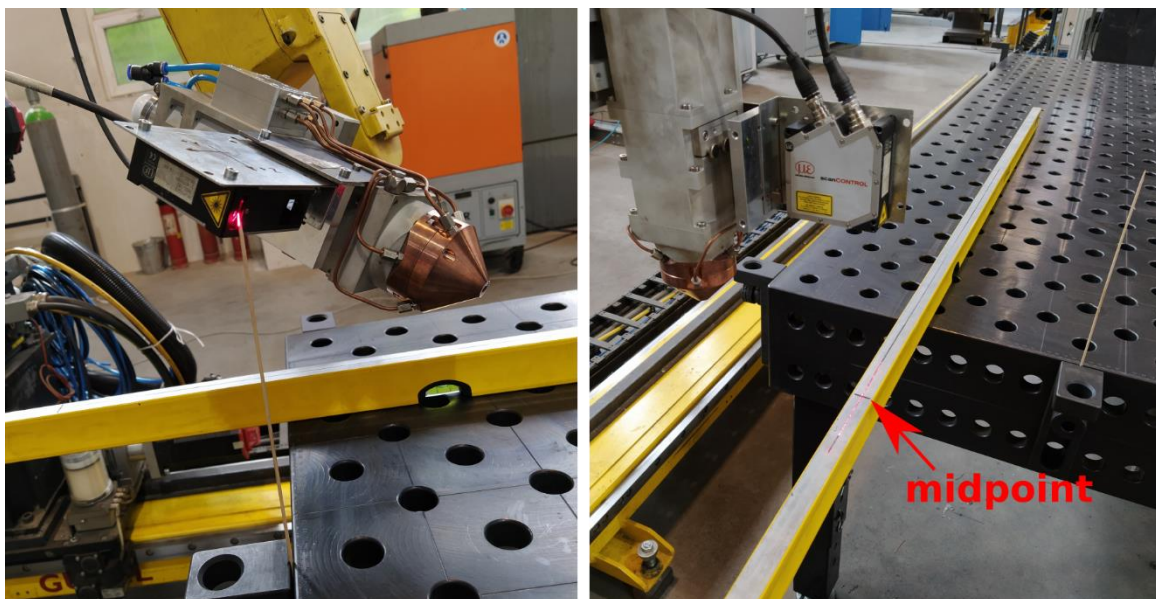
vykresleny červenou barvou do grafů na obr. 8.7 a je z nich patrná velmi dobrá shoda s histogramy měřených dat.

Tab. 8-2: Parametry GMM pro náhodně generovaný šum generovaných profilů modelem profilového skeneru

GMM model	Průměry komponent	Variance komponent	Pravděpodobnosti komponent
Osa x	$[-2,522 \cdot 10^{-16}; 1,849 \cdot 10^{-15}]$	$[2,174 \cdot 10^{-28}; 7,313 \cdot 10^{-6}]$	$[0,3973; 0,6027]$
Osa z	$[1,366 \cdot 10^{-4}; 4,738 \cdot 10^{-4}]$	$[1,034 \cdot 10^{-4}; 8,156 \cdot 10^{-4}]$	$[0,7762; 0,2238]$

B.3 Chyba ruční kalibrace profilového skeneru jako nástroje robota

Pro vygenerování vhodných kalibračních pozic profilového skeneru nad kalibračním objektem je potřebné znát alespoň přibližně transformační vztah mezi TCP příruby a skeneru, označovaný jako ${}^{\text{guess}}\mathbf{T}_S^N$. Jak již bylo zmíněno, fyzická pozice TCP skeneru není přesně známá, nachází se v určitém místě optické soustavy. Jeho přibližnou pozici si autor definoval v místě výstupu promítaného paprsku z pouzdra skeneru, viz obr. 1.1. Počáteční odhad vzájemné transformace ${}^{\text{guess}}\mathbf{T}_S^N$ je možné určit například pomocí výrobního výkresu, který ovšem nemusí být vždy dostupný. Proto si autor této práce během vývoje naváděcích systémů definoval vlastní postup pro ruční kalibraci profilového skeneru využívající standardní šestibodovou metodu pro kalibraci nástroje v kontroléru robota Fanuc. Ta pomocí šesti definovaných bodů, do kterých uživatel pomocí teach-pendantu umístí kalibrovaný nástroj, napočte transformační vztah mezi TCP příruby a TCP kalibrovaného nástroje. První tři body slouží k určení translační části. K pevně definovanému bodu v CS_W , jenž v tomto případě představuje dřevěný hrot v levé části obr. 8.8, se najede TCP kalibrovaného nástroje se třemi různými natočeními. Tyto body jsou postupně uloženy do příslušných pozic v kontroléru robota. Zbývající tři body slouží k určení



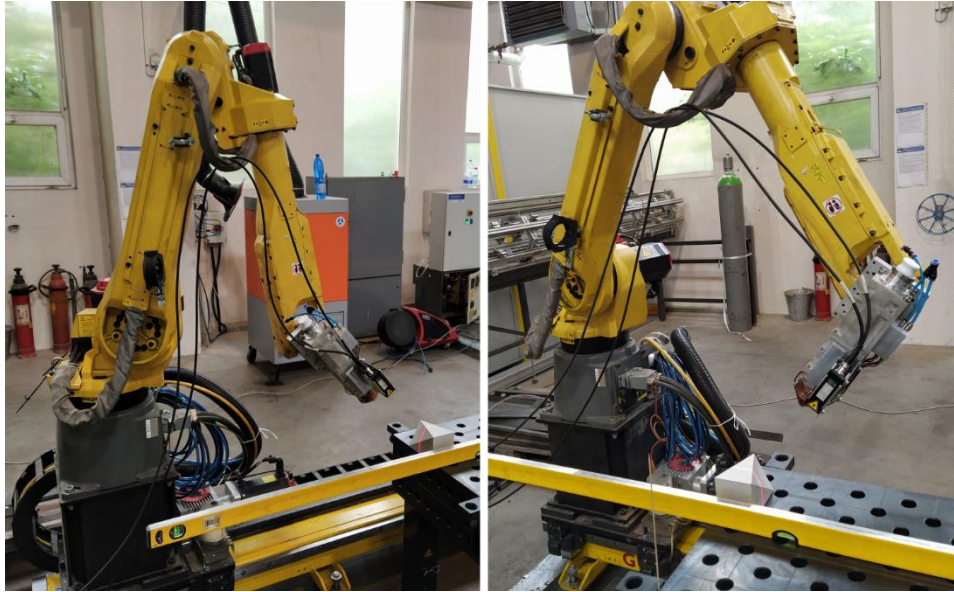
Obr. 8.8: Ruční kalibrace profilového skeneru jako nástroje robota. Vlevo kalibrace translační části TCP, vpravo rotační části TCP.

směrových os kalibrovaného nástroje. Šestibodová metoda vyžaduje definici výchozího bodu a následně pohyb TCP nástroje v x -ové a z -ové ose. Zde je využito promítaného laserového paprsku skenerem a možnost měřit profilová data během měření. Na pomoc pro definici os je připravena nakreslená přímka na rovném povrchu v délce alespoň 700 mm. V autorově případě byla využita spodní plocha vodováhy, viz pravá část obr. 8.8. Profilový skener je pomocí měřených dat srovnán tak, aby měřená rovina byla vůči ploše vodováhy kolmá. Dále je cca 100 mm od jednoho konce nakreslené přímky umístěn předmět (středový bod), který se jasně objeví v měřeném profilu jinak rovného povrchu a bude dle něj možné zarovnat nulovou souřadnici profilu v ose x . Nyní je už možné definovat výchozí bod pro rotaci TCP nástroje. Profilový skener je umístěn nad nakreslenou přímku tak, aby promítaný paprsek splýval s nakreslenou přímkou, měřená vzdálenost v ose z byla v horním rozsahu měření skeneru a profil byl zarovnán v ose x dle středového bodu. Bod pro výpočet osy x je následně určen tak, že je skener umístěn nad druhý konec nakreslené přímky. Promítaný paprsek s ní musí opět splývat a skener se nachází nad měřenou plochou ve stejné výšce jako ve výchozím bodě. Poté je skener vrácen zpět do výchozího bodu. Nakonec je určen bod pro výpočet směru osy z tak, že skener je přiblížen k měřené ploše do vzdálenosti odpovídající dolní hranici svého měřicího rozsahu. Zároveň musí promítaný paprsek stále splývat s nakreslenou přímkou a středový bod se nacházet uprostřed profilu. Z takto uložených šesti bodů je kontrolérem vypočten transformační vztah ${}^{\text{guess}}\mathbf{T}_S^N$.

Tab. 8-3: Hodnoty ručních kalibrací profilového skeneru jako nástroje robota

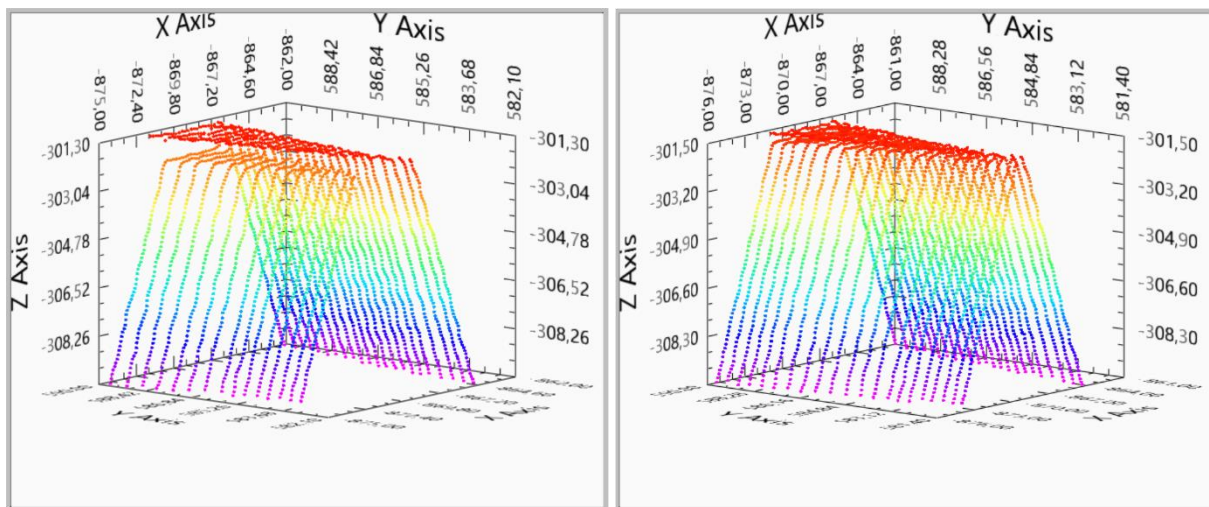
Pokus	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	W [°]	P [°]	R [°]
1	-166,522	-18,319	259,956	91,018	-0,586	-90,393
2	-166,846	-17,740	260,439	91,046	-0,577	-90,398
3	-166,164	-18,110	259,838	90,878	-0,670	-90,385
4	-166,790	-17,687	259,788	90,952	-0,476	-90,418
5	-166,242	-18,149	259,401	91,226	-0,522	-90,601
6	-166,987	-18,697	260,202	90,789	-0,740	-90,334
7	-166,475	-17,237	260,094	90,984	-0,497	-90,262
8	-166,386	-18,925	261,363	90,901	-0,872	-89,741
9	-167,805	-18,209	260,918	90,960	-0,714	-90,422
10	-166,688	-17,634	259,176	91,001	-0,612	-90,353
11	-167,792	-17,168	261,026	91,288	-0,528	-90,291
12	-166,493	-17,915	259,789	91,186	-0,846	-90,427
13	-166,058	-18,624	258,943	90,826	-0,532	-90,419
14	-166,729	-17,680	260,448	90,936	-0,362	-90,107
15	-166,873	-17,892	259,454	90,830	-0,750	-90,423

V rámci ověření opakovatelnosti tohoto postupu byla ruční kalibrace profilového skeneru jako nástroje robota provedena 15x pro neměnné uchycení skeneru k přírubě robota. Jednotlivé parametry transformačních matic ${}^{\text{guess}}\mathbf{T}_S^N$ jsou uvedeny v tab. 8-3. Z uvedených hodnot je patrné, že rozmezí pro jednotlivé translační souřadnice je menší než ± 1 mm a v případě úhlů otočení okolo jednotlivých os ještě menší. To svědčí o poměrně dobré opakovatelnosti postupu ale ne o přesnosti daných transformačních matic. Jelikož skutečná transformační matice ${}^*\mathbf{T}_S^N$

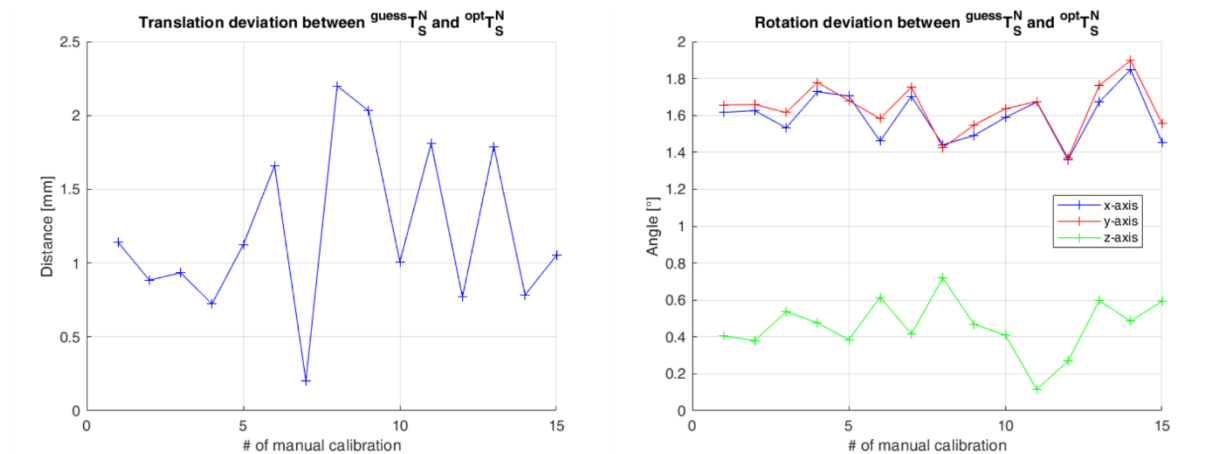


Obr. 8.9: Skenování kalibračního objektu během testování ruční kalibrace profilového skeneru jako nástroje robota.

není známá, byl navržen a proveden pokus pro její přibližné nalezení na základě složení dat ze dvou lineárních skenů kalibračního objektu. Skenování objektu probíhalo ve směru osy y v CS_S ve dvou natočeních vůči kalibračnímu objektu, viz obr. 8.9. Skenovaná data z profilového skeneru byla ukládána spolu s aktuálními pozicemi příruby. Spolu se známou hodnotou ruční kalibrace ${}^{\text{guess}}T_S^N$ je možné přepočítat všechna skenovaná data do 3D mračna bodů v souřadném systému robota CS_W , které představuje skenované stěny kalibračního objektu. Pokud by transformační matice ${}^{\text{guess}}T_S^N$ ruční kalibrace byla správná, přepočítaná skenovaná data ze dvou lineárních skenů s odlišným natočením by na sebe hladce navazovala. Jak je ale vidět na levém 3D grafu na obr. 8.10, kde se nachází detail okolí počátku CS_E při využití první ruční kalibrace, chybně určená transformační matice mezi TCP příruby a profilového skeneru transformuje fyzicky stejné body z horní části kalibračního objektu do dvou různých částí v prostoru CS_W .



Obr. 8.10: 3D mračno bodů získané skenováním kalibračního objektu v místě počátku CS_E dvěma lineárními přejezdy s různým natočením. Vlevo přepočítaná data dle první ruční kalibrace skeneru, vpravo dle nalezené optimální kalibrace.



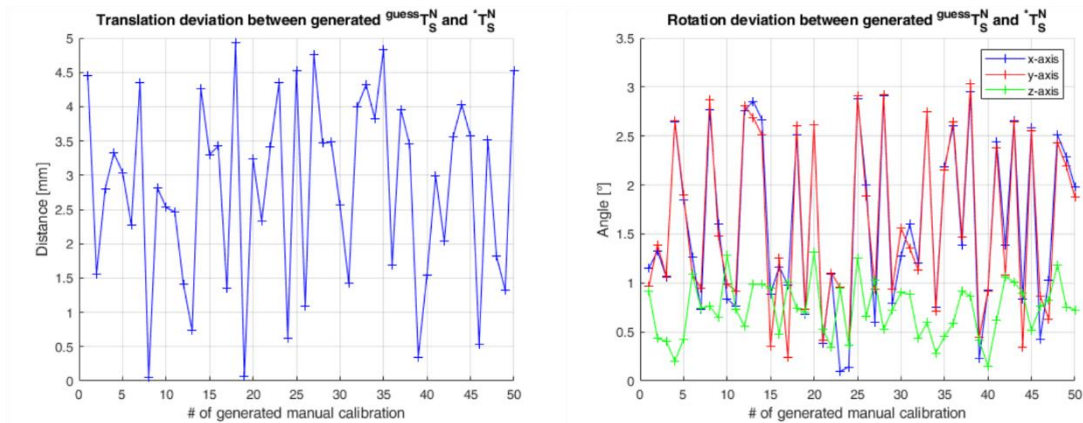
Obr. 8.11: Porovnání ručních kalibrací profilového skeneru jako nástroje robota a nalezenou optimální transformační maticí.

Autor této práce následně iterativně upravoval odhad ruční kalibrace ${}^{\text{guess}}\mathbf{T}_S^N$ dle příslušného 3D mračna bodů, až po několika desítkách iterací došel k transformační matici ${}^{\text{opt}}\mathbf{T}_S^N = T([-166,3 \quad -17,2 \quad 260]^T, [91,4 \quad -2,2 \quad -90,3]^T)$, jež bude velmi blízko skutečné transformaci, viz prolínající se přepočtená data na pravém 3D grafu na obr. 8.10. Složitost, neověřená přesnost a časová náročnost tohoto inženýrského postupu pro upřesnění transformačního vztahu mezi přírubou robota a profilovým skenerem byly jedněmi z důvodů, proč se autor práce zabýval tématem optimalizace kalibrace optických snímačů jako nástroje robota v hlavním textu této práce. Vzdálenost mezi ${}^{\text{opt}}\mathbf{T}_S^N$ a jednotlivými ručními kalibracemi ${}^{\text{guess}}\mathbf{T}_S^N$ je vykreslena vlevo na obr. 8.11 a představuje přibližnou translační chybu ruční kalibrace. Vpravo jsou pak vykresleny úhly mezi příslušnými směrovými osami ${}^{\text{guess}}CS_S$ a ${}^{\text{opt}}CS_S$. Během kalibrace se zarovnáva poměrně široký promítaný laserový paprsek na nakreslenou přímku, což nejspíše zapříčiňuje menší chybu úhlu mezi osami z. Pro analýzu modelu kalibračního procesu se tak autor rozhodl generovat chybu ruční kalibrace následujícím způsobem:

1. Translační odchylka mezi pozicemi TCP profilového skeneru dle transformačních matic ${}^{\text{guess}}\mathbf{T}_S^N$ a ${}^*\mathbf{T}_S^N$ bude generována náhodně pomocí rovnoměrného rozdělení $U(0; \varepsilon_{MC_trans_max})$, kde $\varepsilon_{MC_trans_max} = 5$ mm. Směrový vektor translační odchylky bude generován rovnoměrným rozdělením pro všechny tři složky dle $U(-1; 1)$.
2. Rotační matice generované ruční kalibrace ${}^{\text{guess}}\mathbf{R}_S^N$ pak bude dána otočením skutečné rotační matice ${}^*\mathbf{R}_S^N$ maticí \mathbf{R}_{MC_rot} , která bude spočtena pomocí náhodně vygenerovaných úhlů rovnoměrným rozdělením $W \sim U(0; \varepsilon_{MC_rotW_max})$, $P \sim U(0; \varepsilon_{MC_rotP_max})$ a $R \sim U(0; \varepsilon_{MC_rotR_max})$, kde $\varepsilon_{MC_rot_max} = [\varepsilon_{MC_rotW_max} \quad \varepsilon_{MC_rotP_max} \quad \varepsilon_{MC_rotR_max}]^T = [1 \quad 1 \quad 3]^T$.

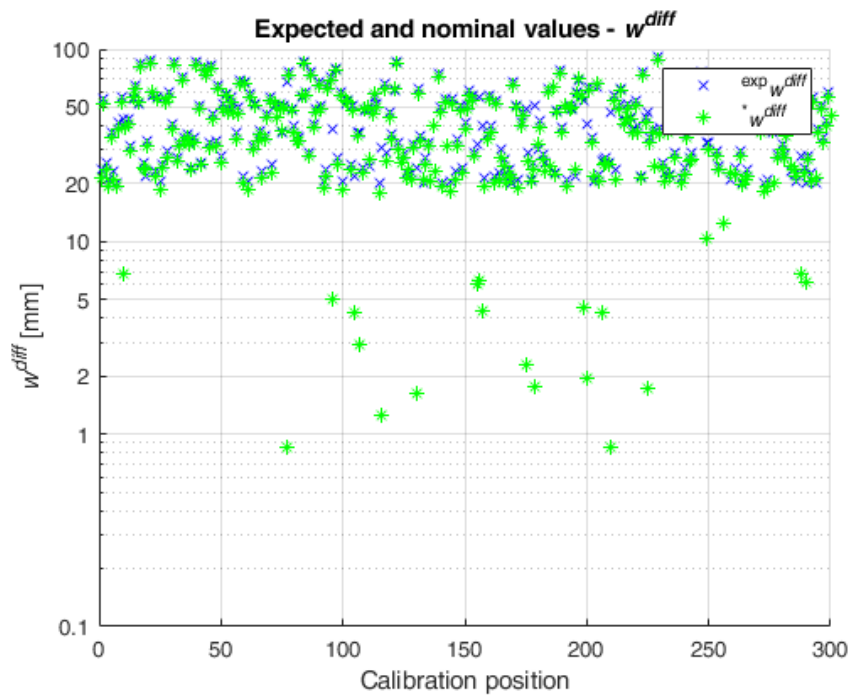
Pro porovnání odchylek generovaných ručních kalibrací ${}^{\text{guess}}\mathbf{T}_S^N$ vůči provedenému testu ručních kalibrací je na obr. 8.12 vykreslena translační odchylka mezi ${}^{\text{guess}}\mathbf{T}_S^N$ a ${}^*\mathbf{T}_S^N$ v levém grafu, zatímco v pravém grafu zobrazeny hodnoty odklonů mezi příslušejícími si směrovými

osami. Z těchto dat je patrné, že mnoho simulací bude prováděno s horší přesností ruční kalibrace, než bylo dosaženo v provedeném testu na obr. 8.11.

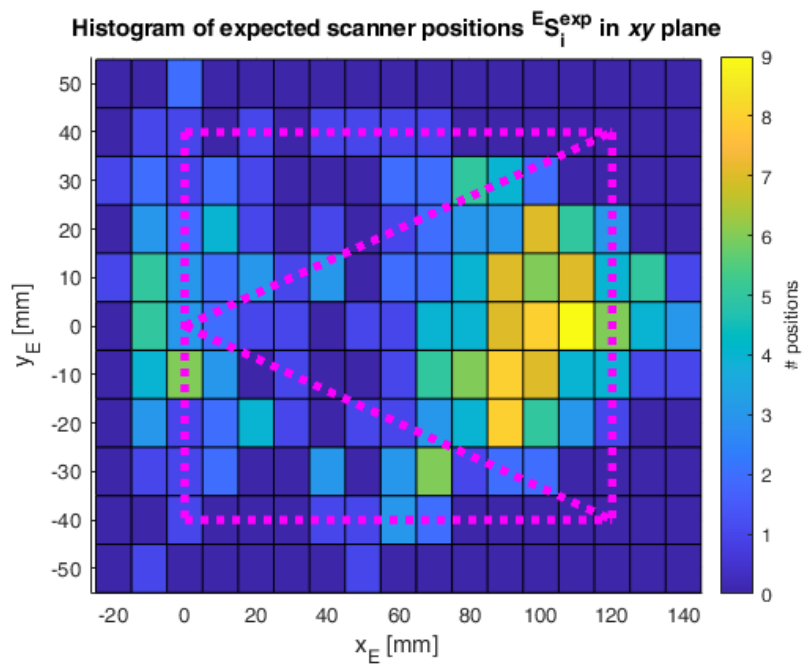


Obr. 8.12: Translační a rotační odchylky generovaných ručních kalibrací od skutečné transformační matice.

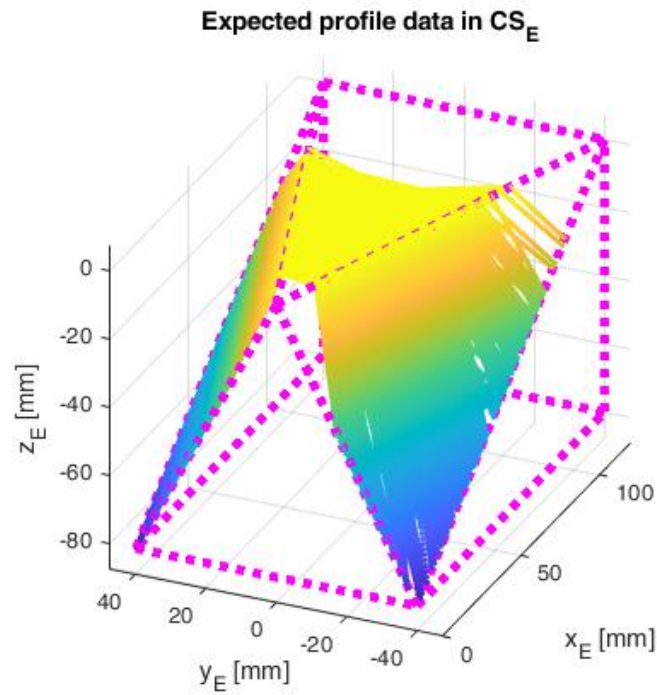
C Doplňující grafy pro optimální MCP



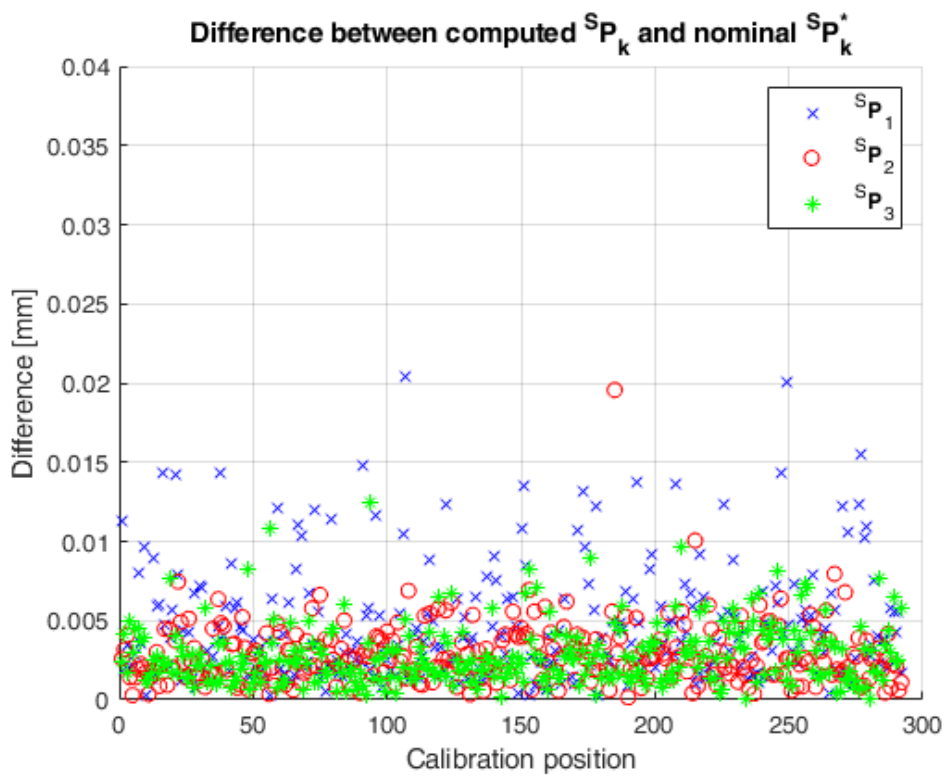
Obr. 8.13: Rozložení očekávaných a skutečných hodnot hodnotící funkce w_i^{diff} – optimální MCP.



Obr. 8.14: Histogram očekávaných kalibračních pozic skeneru v xy rovině CS_E – optimální MCP.

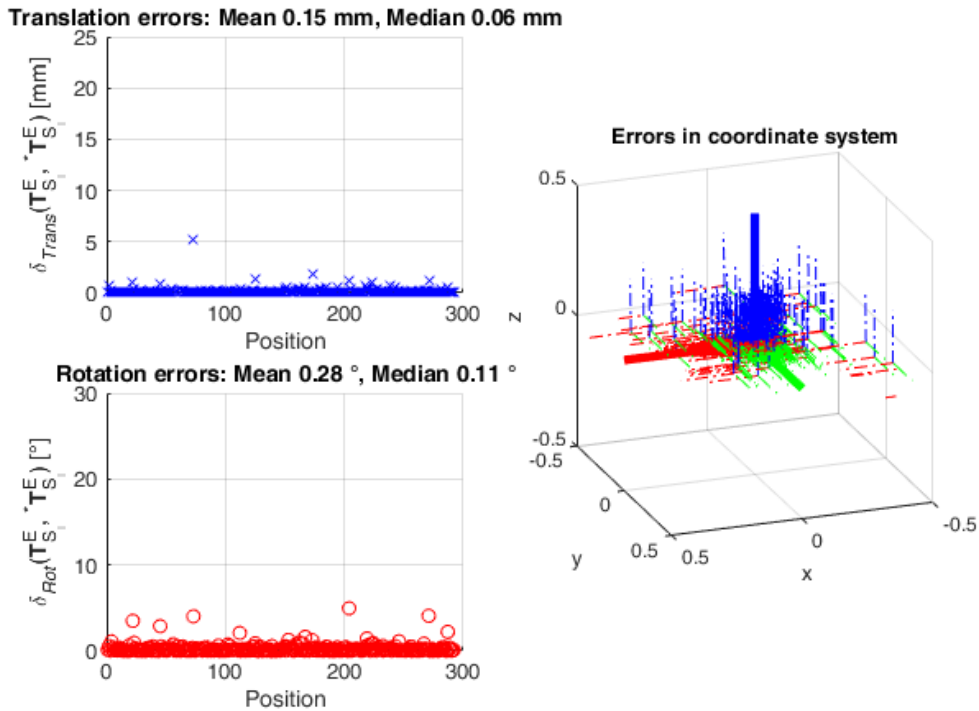


Obr. 8.15: Rozložení očekávaných profilových dat měřeného kalibračního objektu v jednotlivých pozicích skeneru přepočtené do CS_E – optimální MCP.

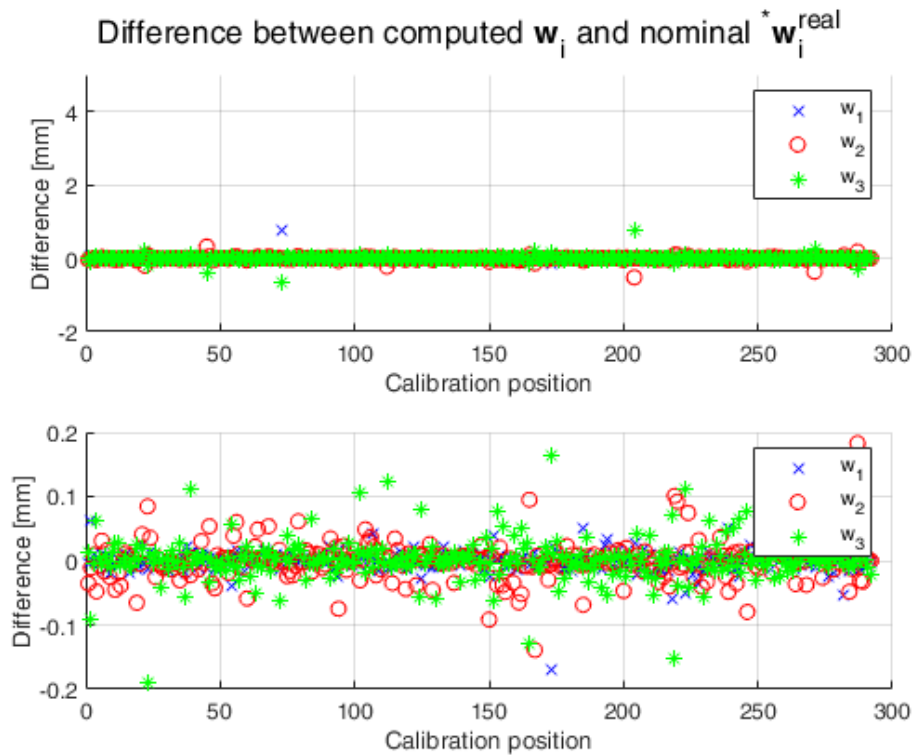


Obr. 8.16: Translační odchylka mezi vypočtenou pozicí a skutečnou pozicí průsečíků – optimální MCP.

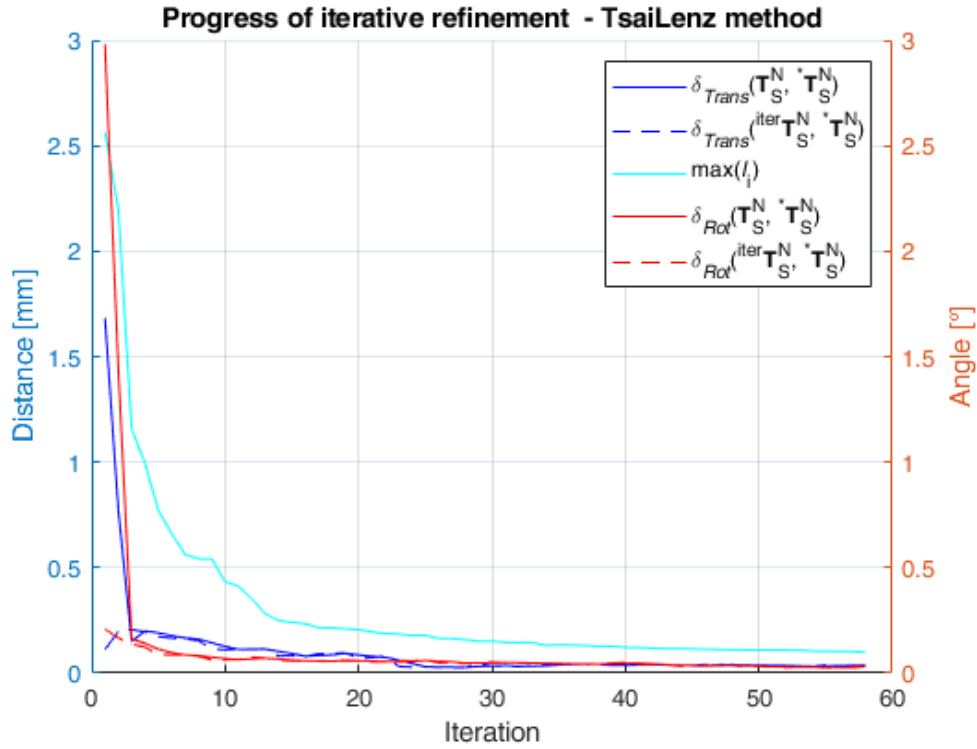
Errors of scanner positions $T_{S_i}^E$ - first iteration



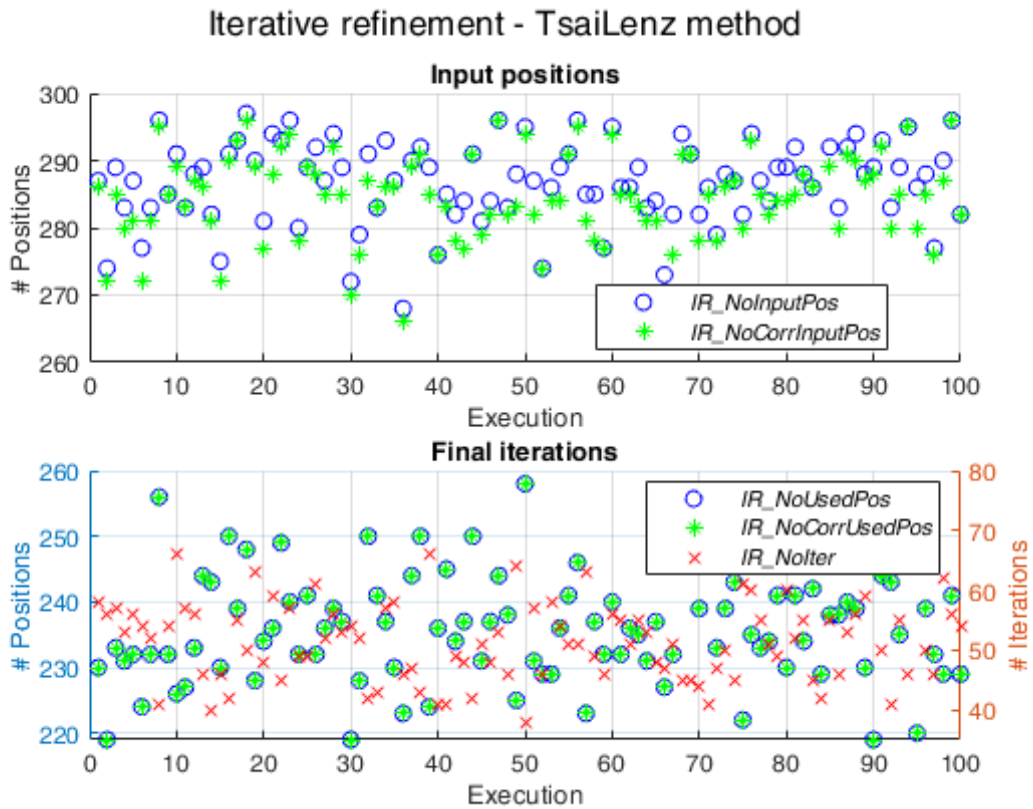
Obr. 8.17: Rozdíl mezi vypočtenými a skutečnými pozicemi profilového skeneru – optimální MCP.



Obr. 8.18: Rozdíl mezi vypočtenými a skutečnými řešeními nelineární soustavy rovnic – optimální MCP.



Obr. 8.19: Průběh vybraných veličin algoritmu IRHEC – optimální MCP.



Obr. 8.20: Počet vstupujících a využitých pozic v algoritmu IRHEC s TL metodou – optimální MCP.