

Posudek vedoucího bakalářské práce

Vedoucí: Mgr. Karla Štěpánová, PhD

Pracoviště: CIIRC ČVUT v Praze

Vedoucí specialista: Mgr. Matěj Hoffmann, PhD

Pracoviště: FEL ČVUT v Praze

Autor bakalářské práce: Jakub Rozlivek

Název: Automatic kinematic calibration of dual arm manipulator using self-contact and plane constraints

Název česky: Automatická kinematická kalibrace dvojrukého manipulátoru za pomoci sebedoteku a rovinných omezení

Příložená práce se zabývá kalibrací průmyslového dvojrukého manipulátoru za pomoci doteku koncových článků a kontaktu s rovinami. Výsledky jsou porovnány s kalibrací pomocí externího metrologického systému Leica. Vypracování bakalářské práce vyžadovalo velké množství podúloh, zahrnujících jak práci s hardware (přípravu nových koncových článků robota a osazení nových kamer), přípravu a sběr obsáhlého datasetu, tak i rozšíření optimalizačního frameworku a implementaci nových metod. Práce navazovala na předchozí diplomovou práci Františka Puciowa, kterou Jakub Rozlivek rozšířil v kvantitě a kvalitě naměřených dat, implementací nových funkcí v optimalizačním frameworku (rozšíření o kalibraci pomocí Leica a planárních podmínek) a výrazně podrobnějším zpracováním výsledků s důrazem na kvalitu nalezených DH parametrů.

Student pracoval na daném tématu intenzivně v průběhu celého roku, práci si dobře organizoval a s přípravou samotného textu práce začal s dostatečným přestihem, čemuž odpovídají i kvalitní výsledky shrnuté v práci o nadstandardním rozsahu 63 stran (74 stran včetně příloh) s odkazy na relevantní literaturu. Jakub Rozlivek pracoval velmi samostatně, dokázal sám navrhnout jednotlivá možná řešení a vyrovnat se i s rozličnými netriviálními problémy při sběru datasetu i v průběhu samotné kalibrace. Zároveň dokázal implementovat metody dle popisu ve vědeckých člancích a navrhovaná řešení také modifikovat či rozšířit. Jakub v průběhu práce na bakalářské práci ukázal, že dokáže pracovat jak s hardware, tak i software. Práce je dobře strukturovaná, zpracování výsledků je provedeno pečlivě - práce obsahuje velké množství vizualizací, grafů a tabulek shrnující jednotlivé kroky postupu práce i samotné výsledky. Závěrečné shrnutí porovnává jednotlivé metody s kalibrací získanou pomocí systému Leica a původní kalibrací robota na nezávislém testovacím datasetu.

Studentovi navrhuji známku A – výborně.

30.5.2019

I. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

Název práce:	Automatická kinematická kalibrace dvojrukého manipulátoru za pomoci sebedoteku a rovinných omezení
Jméno autora:	Jakub Rozlívek (466263)
Typ práce:	bakalářská
Fakulta/ústav:	Fakulta elektrotechnická (FEL)
Katedra/ústav:	Kat. kybernetiky
Oponent práce:	Tomáš Werner
Pracoviště oponenta:	Kat. kybernetiky FEL ČVUT

II. HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ

Zadání	náročnější
<i>Hodnocení náročnosti zadání závěrečné práce.</i>	
Zadání vidím jako nadprůměrně náročné spíše z praktické než z teoretické stránky, vzhledem k velkému počtu experimentů na robotu. Příprava hardwaru, softwaru a snímání dat musela zabrat hodně času.	

Splnění zadání	splněno s menšími výhradami
<i>Posuďte, zda předložená závěrečná práce splňuje zadání. V komentáři případně uveďte body zadání, které nebyly zcela splněny, nebo zda je práce oproti zadání rozšířena. Nebylo-li zadání zcela splněno, pokuste se posoudit závažnost, dopady a případně i příčiny jednotlivých nedostatků.</i>	
Bylo nasnímáno velké množství dat a tyto použity k mnoha různým způsobům kalibrace robota. Ovšem toto množství dat nebylo plně využito k porozumění, proč některé způsoby fungují lépe a jiné hůře. Není jasné, zda výsledky některých metod kalibrace jsou špatné kvůli neodstranitelným teoretickým omezením, chování optimalizačního algoritmu (lokální minima), neznámým systematickým chybám (chyba v programu, špatně změřená poloha reflektoru trackeru), či něčemu jinému. Špatná identifikovatelnost některých parametrů u některých metod je také často pouze konstatována bez vysvětlení. Ze sekce 4.4 se zdá (i když si tím nejsem zcela jistý kvůli nejasnosti textu, viz níže), že i nejnáročnější způsoby kalibrace celého kinematického řetězce byly nakonec méně přesné než nominální parametry (spočtené z rozměrů robota v dokumentaci). Můj názor je, že by bylo bývalo lépe naměřit méně dat a vyzkoušet méně metod kalibrace, ale udělat to čistěji a s větším porozuměním.	

Zvolený postup řešení	správný
<i>Posuďte, zda student zvolil správný postup nebo metody řešení.</i>	
Škoda, že student plně nevyužil přesnosti špičkového 3D trackeru Leica (v řádu mikronů) k získání velmi přesné kalibrace, kterou by pak sloužila jako „ground truth“ pro hodnocení ostatních metod kalibrace. To jednak kvůli možné nepřesnému umístění měřicího terčiku (sekce 5.2) a jednak kvůli nevhodně zvolené metodě odhadu transformace mezi soustavou robota a soustavou trackeru. Jak se zdá ze sekce 2.4.1, tato transformace (2.12) se spočítá jednou provždy před kalibrací a do kalibrace pak vstupují již jen body transformované do soustavy robota. Není uvedeno, jak se získají body v soustavě robota po odhad této transformace, pravděpodobně s použitím dopředné kinematiky s nominálních parametrů, což je nepřesné. Vhodnější by bylo zahrnout odhad transformace (parametry R a T) do kalibrace (to by vyžadovalo zahrnout do optimalizačního algoritmu omezení, že matice R je rotační, což je možné různými způsoby).	

Odborná úroveň	C - dobře
<i>Posuďte úroveň odbornosti závěrečné práce, využití znalostí získaných studiem a z odborné literatury, využití podkladů a dat získaných z praxe.</i>	
Teoretická část práce, Sekce 2.4, má slabou úroveň. Tato sekce má za cíl formulovat použité způsoby kalibrace jako optimalizační úlohy. Má to udělat tak jasně a jednoznačně, aby čtenář neměl pochyby, co se ve zbytku práce dělá. Ovšem tak	

tomu není. Popis je často nejasný a nejednoznačný, přesnost matematického jazyka není využita. Použití matematických symbolů není konzistentní, některé symboly nejsou definované nebo jsou až v pozdější sekci. Některé výhrady k sekci 2.4 podrobně:

- ϕ je někdy vysazeno tučně a jindy ne.
- Symboly vysázené ve vzorcích kurzívou jsou v textu vysázené přímým fontem.
- Ve (2.10) nemůžeme použít stejný symbol g pro $g(\phi, D, \zeta)$ a $g(\phi, D_i, \zeta)$.
- Někdy je nad vektorem šipka, někdy ne. Např. g_l, p v (2.11) oproti g v (2.10).
- Pro funkci $p(\dots)$ ve (2.11) by měl být uveden vzorec. Mělo by být také uvedeno, co jsou vektory z_i v tomto případě, viz (2.8).
- Co znamená, „data set points where the pose of the robot is unique“ (pod (2.11))?
- Množina A v textu pod (2.11) nedefinována (je až později, ale stejně je nešikovné tento symbol zavádět).
- Co je N_i v (2.12)?
- p_1, p_2 nejsou množiny ale vektory.
- Symboly p_c, p_i, p_{1c} na straně 13 nedefinovány (i když význam lze zde domyslet).
- If $\det(X)=-1$, the algorithm fails: To není pravda. Co myslíte tím „fails“?
- V sekci 2.4.1 se zdá, že se parametry (R, T) odhadují předem před kalibrací. Ale z jakých dat? (Viz moje výtka k metodologii výše.)
- V sekci 2.4.2 není jasné, zda se parametry rovin odhadují při kalibraci (tedy uvnitř funkce g_p) nebo před ní, nebo se získají nějak jinak. Je zde sice napsáno, že „plane parameters (ρ and d) are estimated in each iteration“, ovšem v sekci 1.2 se píše, že se pro kalibraci používají známé i neznámé roviny, o čemž tu není zmínka. Proč se odhaduje jen ρ a d a neodhaduje se normalový vektor r_n ? Pokud se zd parametry roviny mohou odhadovat v rámci kalibrace, proč se nemůžou stejně odhadovat parametry (R, T) ve (2.12)?
- Nerozumím, proč ve (2.19) jsou jen tři datové sady D_1, D_2, D_3 . Přece máme tři roviny, ale datových sad je více...?
- Pro funkci $C_j(\dots)$ lépe uvést vzorec.
- Pod (2.19): místo Equation 2.4 má být Equation 2.8.
- Výraz „the error of distance between touches from...“ je příliš nepřesným, nerozumím jí.
- Výraz (2.20) není „distance error“.
- Co je ρ ve (2.20)?
- Aby d byla vzdálenost roviny od počátku, musí být n normalizované.
- „point p_m is given by forward kinematics from dataset $D_{\{i,m\}}$...“ Jednak p_m není bod, ale funkce. Dataset $D_{\{i,m\}}$ závisí na i , ale ten bod už ne.
- „Without loss of generality we assume...“ Nerozumím, proč to můžeme předpokládat.
- Na začátku odstavce „Fitting plane to measured points“ se vůbec nepíše, jaká úloha se zde řeší.
- Nepíše se, jak se ve vzorci (2.22) matice A získá z daných bodů.
- SVD se už použilo v sekci 2.4.1, tak proč se představuje až zde?
- Pod (2.24): „wlog, assume that $c=-1$ “. Ale to nemůžeme obecně předpokládat, protože rovina může být svíslá. Ovšem, dál pod (2.28) se pak píše „fitting a vertical plane by LS method does not work properly“, ale už se nepíše proč. Dojem je, že student tomu nerozumí.
- Ve vzorci (2.32) vystupuje g_l , ale v experimentech se nikdy nekombinují data z Leica-trackeru a ostatními daty (viz Tabulka 4.1).
- Obr. 2.7 měl být uveden dříve, mnoho vyjasňuje ale bohužel pozdě.
- Druhý odstavec v sekci 2.5 („Levenberg-Marq algorithm is a ...“) je velmi nepřesný, nepravdivý (Co je „variable direction“? Co je „line descent algorithm“?).
- Sekce (2.5): Jacobián jakého zobrazení a v jakém bodě? Tabulka 4.7 a Obr. 4.16 (v sekci 4.4) uvádějí identifikovatelnost parametrů řetězce, ale jak se přesně tato čísla získala, tj. V jakém bodě byl Jacobián vyhodnocen?

Kapitola 4 obsahuje také řadu nepřesností, zde jsou příklady:

- Nerozumím, proč v tabulce 4.1 nejsou uvedeny datové sady se self-observation.
- Proč jsou v Obr. 4.2 skoro stejné chyby pro trénovací a testovací množinu?
- Dle Obr. 4.1 jsou některé parametry (a_{LR} , d_{LR} , ...) neidentifikovatelné, ale v Obr. 4.3 jsou poměrně dobře odhadnuté, proč?
- V tabulce 4.5 je chyba kalibrace kamer oproti [17] až 15 cm. Nejedná se o omyl?
- Obr. 4.6: Proč je identifikovatelnost délky chapadla horší pro datovou sadu ALL než pro ostatní sady? Vždyť tato sada je obsahuje ostatní sady.
- Sekce 4.3.2: „calibration using only vertical plane does not work at all“ Proč?
- Proč kalibrace nefunguje pro velké perturbace počátečních parametrů? Je to kvůli lokálním minimům optimalizačního algoritmu nebo z jiného důvodu?
- Sekce 4.4.1: V prvním odstavci se nepíše o kalibraci z rovin, proč?
- Druhý odst. Sekce 4.4.1: „the correction after Leica tracker calibration as comparison“. Nerozumím významu věty.
- Dále: „the values do not correspond with the corrections from Leica trackers“ Proč?

Formální a jazyková úroveň, rozsah práce

B - velmi dobře

Posuďte správnost používání formálních zápisů obsažených v práci. Posuďte typografickou a jazykovou stránku.

Práce je psána slušnou angličtinou a vysázena v LaTeXu. Výhrady ovšem mám k uspořádání a srozumitelnosti textu. Sekce často nejsou uvozeny (na začátku sekce není napsáno, o čem se bude psát a proč), např. kapitola 4. Použitá metodologie by možná zasluhovala samostatnou sekci (nyní ji čtenář musí rekonstruovat ze sekcí 2.3 a 2.4), kde by se jasně motivovaly a popsaly použité způsoby kalibrace. Největší problém je ovšem to, že text je často příliš nepřesný a neformální na to, abych ho byl schopen jednoznačně pochopit. Příkladem je skoro celá sekce 4.4 (která popisuje klíčové výsledky experimentů), zvláště podsekce 4.4.3.

Výběr zdrojů, korektnost citací

A - výborně

Vyjádřete se k aktivitě studenta při získávání a využívání studijních materiálů k řešení závěrečné práce. Charakterizujte výběr pramenů. Posuďte, zda student využil všechny relevantní zdroje. Ověřte, zda jsou všechny převzaté prvky řádně odlišeny od vlastních výsledků a úvah, zda nedošlo k porušení citační etiky a zda jsou bibliografické citace úplné a v souladu s citačními zvyklostmi a normami.

Zde nevidím větší problémy. Snad jen u několika citací by bylo lépe místo URL uvést úplné bibliografické údaje či vybrat jinou publikaci, která to umožní.

Další komentáře a hodnocení

Vyjádřete se k úrovni dosažených hlavních výsledků závěrečné práce, např. k úrovni teoretických výsledků, nebo k úrovni a funkčnosti technického nebo programového vytvořeného řešení, publikačním výstupům, experimentální zručnosti apod.

III. CELKOVÉ HODNOCENÍ, OTÁZKY K OBHAJOBĚ, NÁVRH KLASIFIKACE

Shrňte aspekty závěrečné práce, které nejvíce ovlivnily Vaše celkové hodnocení. Uveďte případné otázky, které by měl student zodpovědět při obhajobě závěrečné práce před komisí.

K práci mám řadu výtek, mezi hlavní patří nejasnost vyjadřování, nepřesnosti v teorii a nedostatečná snaha porozumět obdrženým výsledkům. Pouze vzhledem k velkému rozsahu práce hodnotím známkou B.

K obhajobě navrhuji tyto otázky (mohou být zodpovězeny formou dobré prezentace):



POSUDEK OPONENTA ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

1. Jak přesně jste odhadoval transformaci mezi soustavou robota a trackeru (R a T v rovnici (2.12))?
2. Jak přesně jste dělal kalibraci z rovin, známých či neznámých?
3. Pro které kalibrační metody je dosažená přesnost kalibrace celého kinematického řetězce lepší než nominální (tj. spočtená z rozměrů robota) kalibrace? Jak jste tuto přesnost kvantitativně hodnotil?

Předloženou závěrečnou práci hodnotím klasifikačním stupněm **B** - velmi dobře.

Datum: 4.6.2019

Podpis: