

Posudek diplomové práce

Název: Automatic Self-Calibration from Self-Observation and Self-Touch
on a Dual-Arm Industrial Manipulator

Autor: František Puciow

Vedoucí: Mgr. Matěj Hoffmann, Ph.D.

Obsah a dosažené výsledky

Cílem práce bylo vyvinout a otestovat metodu kinematické kalibrace (tj. nalezení parametrů kinematických řetězců) dvojice manipulátorů na společné základně, a to na základě pozorování koncových článků manipulátorů kamerami a kinematického omezení koncových článků při jejich dotyku.

Veden zadáním, student k cíli postupoval v několik krocích: připevnění dvou kamer na společnou základnu a jejich kalibrace, vývoj a výroba speciálního koncového článku s referenčními terčíky vhodného pro dotyk, vývoj algoritmu na bezpečný dotyk (jediná povolená kolize musí být dotyk koncových článků), matematický popis zúčastněných kinematických řetězců (dva manipulátory, dvě kamery) pomocí D-H parametrů, matematická formalizace úlohy kalibrace, snímání dat, výpočet kalibrace z těchto dat a zhodnocení výsledků.

Metodě kalibrace jsem porozuměl takto. Hledáme takové parametry kinematických řetězců, které minimalizují součet čtverců reprojekčních chyb (rozdíl mezi spočtenými a skutečnými polohami kalibračních terčíků v kamerách, měřeno v pixelech) a dotykových chyb (rozdíl mezi spočtenými a skutečnými vzdálenostmi referenčních bodů koncových článků při jejich dotyku, měřeno v milimetrech). Protože obě chyby se měří v jiných jednotkách, dotykové chyby jsou násobeny pevným koeficientem. Pro optimalizaci je použita Levenberg-Marquardtova metoda. Kvalita kalibrace se hodnotí dosaženým RMS reprojekčních a dotykových chyb na trénovací a testovací množině (získaných rozdelením naměřených dat na dvě části).

Kalibrace se provádějí a hodnotí v mnoha různých scénářích. Používají se různé podmnožiny čtyř přítomných kinematických řetězců (např. levá ruka + pravá kamera nebo obě ruce + pravá kamera), s dotykem či bez dotyku. Optimalizuje se přes různé podmnožiny parametrů. Optimalizace se inicializuje nominálními (= továrními) parametry s různě velkou perturbací. Dále se provádí tzv. sekvenční kalibrace, kdy se kalibrace množiny řetězců inicializuje výsledkem kalibrace menší množiny řetězců.

Naměřené výsledky ukazují, že:

- Kalibrace je typicky přesnější při zahrnutí více řetězců a více parametrů. Nejlepší kalibrace dosahuje RMS reprojekčních chyb cca 18 pixelů (pro 14 Mpx kamery) a RMS dotykových chyb cca 3.7 mm.
- Použití dotyku kalibraci výrazně nezlepšilo. Student to přicítá skutečnosti, že v optimalizačním kritériu byla relativní váha reprojekčních chyb terčíků větší než relativní váha chyb dotyku.
- Dle Tabulky 6.9 jsou dotykové chyby výrazně menší (cca 1.7 mm) pro nominální kalibrační parametry manipulátorů (kalibrovala se pouze kamera a přidaný koncový článek) než pro parametry nalezené kalibrací.

Druhé a třetí pozorování ukazují, že metoda má nedostatky. Je škoda, že student už nestihl tyto nedostatky odstranit a případně tak dosáhnout lepší kalibrace.

Text

Srozumitelnost textu je dobrá, ne však ideální. Nebylo pro mne snadné pochopit, co přesně bylo cílem práce, jaká byla formulace kalibrační metody a jak interpretovat výsledky. Příklady:

- Úvod nepopisuje cíle práce dost jasně. Např. klíčový pojem kinematická kalibrace je v §1.2 definován nejasně a ne zcela správně (přitom ho lze najít v mnoha článcích, např. [Elasta et al: An Overview of Robot Calibration]).
- Značení není úplně dobře promyšlené. Někdy se používá značení dříve nedefinované (např. a_{turn3} , d_{cam1} atd. v Tabulce 6.2). Podstata věci někdy zaniká v přemíře symbolů.

- Odstavce nejsou vždy jasně motivovány.
- Protože jsou oba manipulátory a obě kamery pevně spojeny s rotačním stolkem, otočení stolku je nepozorovatelné a stolek by se v modelu vůbec nemusel vyskytovat.
- Z popisu v §6.4 přesně nerozumím Tabulce 6.9. Např. pro změření dotykových chyb přece nepotřebuji kalibrovat kamery.

Text je psán dobrou angličtinou. Je vysázen v L^AT_EXu bez větších typografických chyb – kromě toho, že mezi odstavci jsou nelogicky velké mezery.

Hodnocení

Cíle práce byly splněny. Student se postavil k práci odpovědně a vložil do ní velmi mnoho času a úsilí. Věřím, že díky této pečlivosti budou vytvořené nástroje budou snadno využitelné i jinými výzkumníky pracujícími na tomto robotu.

Na druhou stranu, metodika a text mají slabiny. Je škoda, že investovaný čas a námahu se nepodařilo zcela zíročit ve výsledcích a v přehlednosti textu.

Z těchto důvodů hodnotím práci známkou B (velmi dobré).

Oázky k obhajobě

1. Je diskutabilní při kalibraci minimalizovat reprojekční chybu v kamerách. Vždyť přeci při použití manipulátoru např. ve výrobě potřebujeme minimalizovat chybu polohy (translace + rotace) koncového článku. Nebylo by tedy lépe minimalizovat přímo tuto chybu, přičemž polohy koncových článků by se měřily např. pevně kalibrovanými kamerami? Prosím komentujte.
2. Použití kamer má nevýhodu v tom, že se spoléháme na jejich kalibraci. Bylo by možné provádět kalibraci manipulátorů jen na základě dotykových chyb? Pokud ne, tak proč?
3. V práci nikde neuvádíte D-H parametry nalezené kalibrací. Je-li to možné, uveďte prosím tyto parametry, porovnejte je s nominálními parametry a okomentujte.
4. Z Tabulky 6.9 (řádky 5-6) se zdá, že nominální kalibrace je lepší než kalibrace dosažená navrženou metodou. To naznačuje, že kalibrační metoda přesnost manipulátorů zhoršila. Prosím komentujte.

Tomáš Werner
19. června 2018

Posudek vedoucího diplomové práce

Vedoucí: Mgr. Matěj Hoffmann, PhD

Vedoucí specialista: Mgr. Karla Štěpánová, PhD

Student: František Puciow

Název: Automatic self-calibration from self-observation and self-touch on a dual arm industrial manipulator

Název česky: Automatická kalibrace pomocí sebedotyku a sebepozorování u dvojrukého průmyslového manipulátoru

Práce se zabývá kalibrací kinematických parametrů průmyslového dvourukého manipulátoru. Na rozdíl od klasických přístupů, které využívají nějakou formu měření pomocí externích přístrojů, předložená práce se zabývá „sebekalibrací“ s využitím pouze senzorů na platformě jako takové. To je motivováno tím, že roboty jsou čím dál častěji osazeny celou řadou dostupných a výkonných senzorů. V tomto případě jde o dvojici kamer připevněných na základnu robota a dále o nový přístup využívající fyzický kontakt dvou ramen manipulátoru ve sdíleném pracovním prostoru. Kombinace „sebepozorování“ a „sebedotyku“ v příslušných konfiguracích umožňuje provádět sebekalibraci všech protínajících se kinematických řetězců. Cílem práce bylo porovnat přínos jednotlivých kombinací řetězců a formulací optimalizační úlohy pro výslednou chybu.

Diplomová práce zahrnovala pestrý soubor podúloh spojených s přípravou robotické platformy pro sběr dat pro následnou optimalizaci. Šlo především o vývoj speciálních koncových článků, osazení vizuálními markery, přidání externích kamer a jejich dálkové napájení a ovládání – s výjimkou designu koncových článků v CAD bylo vše provedeno studentem Puciowem. Dále pak bylo zapotřebí všechny nové komponenty přidat do modelu robota. Student dále vyvinul software, který navádí ramena do sebekolizních konfigurací na základě zpětné vazby ze silových senzorů. Přestože měl student předchozí zkušenosť s platformou a sebekolizní regulátor vyvinul převážně v rámci projektu předcházejícího DP, i tak byla „přípravná fáze“ pro vlastní optimalizační úlohu velmi náročná a student se se všemi úlohami vypořádal samostatně. Po softwarové stránce bylo zapotřebí využít celou řadu nástrojů (ROS, MoveIt!, Rviz, atd.), které jsou v práci dokumentovány. Dále pak student vyvinul model robota a optimalizační „pipeline“ v prosředí Matlab.

Výsledky prezentované v DP jsou rozsáhlé, byť částečně předběžné – vyžadovaly by podrobnější analýzu a na jejím základě pravděpodobně dodatečný sběr dat. Práce je psaná slušnou angličtinou a je velmi rozsáhlá. Studentovi lze vytknout, že na poslední fázi nealkoval dostatečný čas. Výsledný dokument je nicméně ve velmi dobrém stavu a umožňuje na studentovu práci navázat.

Ve zhuštěné podobě a po dopracování některých výsledků byla práce 15.6. poslána jako konferenční příspěvek na konferenci Conference on Robot Learning 2018.

Studentovi navrhoji známku A – výborně.

15.6.2018

Matěj Hoffmann

