

# Posudek diplomové práce

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

Autor: František Puciov

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 rozdělením 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 kameru) a RMS dotykových chyb cca 3.7 mm.
- Použití dotyku kalibraci výrazně nezlepšilo. Student to přičítá 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 kinematické kalibrace je v §1.2 definován nejasně a ne zcela správně (přitom ho lze najít v mnoha člancích, např. [Elata 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 věcí někdy zaniká v přemíře symbolů.

- Odstavce nejsou vždy jasně motivovány.
- Protože jsou oba manipulátory a obě kamery pevně spojeny s rotačním stolem, otočení stolu 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 nepotřebují kalibrovat kamery.

Text je psán dobrou angličtinou. Je vysázen v L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>Xu 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 zúročit ve výsledcích a v přehlednosti textu.

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

## Otázky 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