

## Oponentní posudek disertační práce

**Autor:** Ing. Michal Chaluš, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Katedra kybernetiky

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

Předložená disertační práce se zabývá především optimalizací procesu hand-eye kalibrace optického nástroje robota za účelem získání co nejlepší celkové přesnosti navádění i pro nejnáročnější aplikace automatických robotických naváděcích systémů. Přestože vývoj těchto systémů probíhá již řadu let, nelze jej určitě považovat za zcela vyřešený a se zvyšujícími se nároky a pokrokem jednotlivých technologií aktuálnost a potřebnost řešení této problematiky stále trvá.

Celý dokument včetně příloh a všech formálních náležitostí práce má celkem 150 stran. Stěžejní část práce je rozdělena do osmi kapitol. V rámci první kapitoly jsou vedle úvodu a definice důležitých pojmů stanoveny hlavní cíle práce, které jsou po teoretické formulaci problematiky hand-eye kalibrace ve druhé kapitole, ve stejné struktuře následně postupně detailně řešeny v jednotlivých navazujících kapitolách. Třetí kapitola tak představuje autorem navržený obecný postup pro hand-eye kalibraci optického snímače na základě vytvoření modelu celého kalibračního postupu. Tento model je pak podrobně představen ve čtvrté kapitole, která tak obsahuje model robota, model měřícího principu snímače v podobě profilového skeneru, který je v STS využíván nejčastěji i model zvoleného kalibračního objektu s autorem upraveným algoritmem pro robustní vyhodnocení vzájemné pozice mezi skenerem a kalibračním objektem z měřených dat. Představeny jsou také z literatury převzaté čtyři možné metody řešení rovnice hand-eye kalibrace a vlastní návrh iterativního algoritmu, který odstraňuje z výběru kalibrační pozice způsobující největší chybu, a tím zásadně zpřesní finální hand-eye kalibraci. V páté kapitole je navržený model kalibračního procesu podrobně analyzován. V úvahu byly brány a precizně simulovány možné vlivy vstupních chyb i nastavení jednotlivých parametrů kalibrace. Závěrem jsou navrženy optimální parametry pro generování kalibračních pozic a optimální parametry pro zpracování kalibračních dat a celý proces analýzy je řádně vyhodnocen. Pomocí provedené analýzy a nalezení optimálních parametrů MCP se autorovi podařilo až třikrát zlepšit hodnoty přesnosti a spolehlivosti kalibrace.

Šestá kapitola se věnuje vlivu absolutní chyby robota na proces kalibrace nástroje robota. Tato chyba u sériově vyráběných robotů, individuálně nekalibrovaných, může dosahovat až jednotek milimetrů a mít tak podle autora zásadní vliv na přesnost kalibrace, přesto je v odborných publikacích velmi opomíjena. Proto zde disertant ukazuje na základě provedené analýzy vliv této chyby na proces kalibrace a praktický dopad na přesnost naváděcích systémů a shrnuje svá doporučení pro využití navrženého modelu v praxi. V sedmé kapitole je nejdříve představen kognitivní softwarový nástroj CogniGuide, jehož je autor hlavním tvůrcem, který obstarává veškerou činnost ve spolupráci s firmou LeserTherm vyvíjených naváděcích systémů, a tedy obsahuje i modul kalibrace profilového skeneru jako nástroje robota pomocí navrženého MCP. Dále je pak ukázáno využití navrženého postupu na třech reálných aplikacích – laserové navařování stelitové vrstvy na náběžnou hranu lopatky, naváděcí systém pro svařování trubek na vyhořelé jaderné palivo a automatický systém pro svařování pивních, nerezových tanků. Ověření přesnosti kalibrace a celého principu navrženého MCP je z pochopitelného důvodu velmi složité, za důkaz správnosti a užitečnosti postupu však lze považovat předložené ukázky funkčnosti naváděcích systémů a popsané provedené zkoušky (např. tlakové, rentgenové, mikroskopické atd.). Závěrečná kapitola pak shrnuje jednotlivé řešené kroky a dosažené výsledky.

Členění dokumentu považuji vzhledem ke struktuře vytyčených cílů za logické. V práci se však poměrně často vyskytují odkazy na jiné části dokumentu směrem dozadu i vpřed (především do příloh), což trochu komplikuje orientaci a porozumění textu, ale u takto rozsáhlého a tematicky širokého dokumentu je toto vcelku pochopitelné. Po formální stránce je dokument velmi dobře upravený. Jazyková úroveň je také velmi dobrá. Vytkla bych jen kvalitu některých obrázků, resp. jejich vypovídající hodnotu. Např. u Obr. 5.2 podle mě není příliš jasné, které hodnoty očekávané a skutečné hodnotící funkce (body  $x$  a  $*$ ) k sobě patří či na Obr. 5.10, zda je spodní obrázek výřezem horního. Oceňuji jasnou a srozumitelnou definici jednotlivých proměnných a parametrů, jen podle mého názoru měly být některé parametry místo absolutních hodnot uvedeny relativně k velikosti pracovního prostoru robota (např. kalibrační objekt, podobnost kalibračních pozic apod.).

Disertant nepřináší k řešené problematice nějaký zcela nový výpočetní aparát, naopak jeho práce ukazuje na perfektní nastudování problematiky a výbornou práci se zdroji, kdy si na základě vlastních analýz, testů a v neposlední řadě rozsáhlých získaných zkušeností vybírá z více zdrojů jednotlivé přínosné postupy, které pak upravuje a dává do jednotného funkčního celku a přidává vlastní postřehy, podmínky a samoopravné mechanismy. O některých zvolených postupech lze sice samozřejmě diskutovat, zda by jiná volba nebo jiné nastavení nevedly k lepším výsledkům, ale za důležité považuji, že byly všechny potřebné dílčí kroky řešeny a vyřešeny.

Hlavní přínos disertace tak vidím hned v několika rovinách. Nejdříve ve výše zmíněné analýze literární zdrojů a výběru vhodných postupů. Dále v několika vylepšeních jednotlivých dílčích kroků (např. změna řešení soustavy rovnic s využitím resultantu, algoritmus generování pozic skeneru nad kalibračním objektem, iterativní algoritmus selekce vhodných kalibračních pozic a dalších). V rozsáhlé simulační části, která vedla k cenným učiněným a rozebraným závěrům a k nalezení problematických částí celé kalibrace a definici doporučeného nastavení kalibračního procesu s ohledem na požadovanou přesnost. A především ve spojení jednotlivých dílčích částí do komplexního postupu celé kalibrace naváděcích systémů, jehož funkčnost a robustnost byla ověřena na praktických úlohách.

Disertant v práci uvádí seznam vlastních publikací čítající 27 položek. Velká část ze seznamu jsou výzkumné zprávy, což ukazuje na chvályhodné zapojení disertanta do projektů. Vedle další početné skupiny publikací na Studentské vědecké konferenci FAV my však chybí více „hodnotnějších“ konferenčních či časopiseckých příspěvků, kde by byl disertant prvním autorem.

Předložená práce, podle mého názoru, splňuje s výše uvedenými připomínkami požadované náležitosti, které jsou na disertační práce k získání akademického titulu Ph.D. kladeny, proto práci doporučuji k obhajobě.

#### **Otázky doporučené k obhajobě:**

1. Zvažoval jste i jinou podobu kalibračního objektu, resp. úpravu zvolené? Nevedlo by přidání nějakého detekovatelného bodu/bodů (např. v podobě drážky) ke snadnějšímu, jednoznačnému řešení nelineárních rovnic?
2. Čím si vysvětlujete to, že metoda ZhuangShiu, která v páté kapitole dosahovala nejlepších výsledků, při uvažování vlivu absolutní chyby robota na hand-eye kalibraci skeneru je výrazně horší?

V Brně 30.8.2021

Ing. Ilona Janáková, Ph.D.  
FEKT, VUT v Brně

**Vypracoval:** Ing. Pavel Krsek, Ph.D.

České vysoké učení technické v Praze  
Český institut informatiky, robotiky a kybernetiky  
Jugoslávských partyzánů 1580/3, 160 00 Praha 6, Dejvice  
Tel.: +420 224 354 194, e-mail [pavel.krsek@cvut.cz](mailto:pavel.krsek@cvut.cz)

**Pro:** **Západočeská univerzita v Plzni**  
Fakulta aplikovaných věd  
Děkanát FAV, Univerzitní 8, 306 14 Plzeň

# Posudek oponenta

## Disertační práce

### Úvod

Byl jsem požádán, abych vypracoval posudek disertační práce:

**Název:** Optimalizace hand-eye kalibrace profilového skeneru  
jako nástroje robota.

**Autor:** Ing. Michal Chaluš

Ing. Michal Chaluš předložil posuzovanou disertační práci k obhajobě na Západočeské univerzitě v Plzni na Fakultě aplikovaných věd. Práce je napsána v českém jazyce. Rozsah textu práce je včetně příloh 132 stran. Školitelem pana Chaluše byl doc. Ing. Eduard Janeček, CSc. a konzultantem specialistou Ing. Jindřich Liška, Ph.D.

### Téma, cíle a řešení

Tématem posuzované práce je kalibrace polohy optického senzoru umístěného na rameni manipulátoru. Tato kalibrace se v literatuře označuje jako „hand-eis“ (oko-ruka). Postup kalibrace je demonstrován na hloubkovém snímači s laserovou rovinou, který je součástí systému pro navádění svařovacích robotů. Autor se v práci věnuje celému procesu kalibrace zejména výběru kalibračních poloh, sestavení pracoviště a analýze chyb. Za tímto účelem sestavil model kalibračního procesu, který obsahuje jednotlivé komponenty systému (robot, snímač, kalibrační objekt). Tento model umožňuje ověřovat proces kalibrace za různých podmínek a analyzovat vliv jednotlivých zdrojů chyb.

V práci autor navazuje na stručný úvod (kapitola 1 a 2) popisem navrhovaného postupu kalibrace včetně generování kalibračních pozic (kapitola 3). Rozsáhlejší část práce je následně věnována sestavení modelu kalibračního procesu (kapitola 4), jehož součástí je také samotný algoritmus kalibrace. Autor využívá 4 převzaté metody řešení kalibračních

rovníc. Výsledky dále zpracovává vlastním algoritmem IRHEC (iterative Refinement of Hand-Eye Calibration). Další text práce se věnuje vyhodnocení vlivu jednotlivých zdrojů chyb na přesnost kalibrace (kapitola 5 a 6). V závěru je popsána implementace a využití navrženého postupu kalibrace v programu CogniGuide.

Autor postupoval při řešení problémů systematicky za použití odpovídacích metod. Pro kalibraci byl využit stávající algoritmy řešení, které autor v souladu s cílem práce upravil či doplnil o vlastní algoritmy. Podstatnou myšlenkou je výběr pozic pro kalibraci na základě modelu kalibračního procesu.

## **Výsledky práce a přínos**

Předložená práce je prakticky zaměřená s jasným cílem vylepšit proces měření a kalibrace v robotických svářecích systémech. Pro vylepšení procesu kalibrace je podstatný, autorem popsaný postup návrhu kalibračních poloh s ohledem na minimalizaci celkové chyby měření. Práce je tvořena řadou dílčích vlastních i převzatých řešení sestavených do celku, který tvoří model kalibračního procesu. Za nejpodstatnější z autorských řešení považuji využití algoritmu IRHEC a zpřesnění odhadu polohy senzoru vůči kalibračnímu objektu. Tato řešení byla publikována v odborném tisku a na konferencích. Pro čtenáře je jistě zajímavé také vyhodnocení vlivu jednotlivých zdrojů chyb na přesnost kalibrace.

Seznam publikací autora, který je součástí disertační práce, považuji spíše za průměrný. Z uvedených publikací se přímo tématu práce týká 1 článek v odborném zahraničním časopise a 4 příspěvky na mezinárodních konferencích. Publikační činnost autora odpovídá tématu a zaměření práce a je podle mého názoru postačující pro obhajobu této práce.

## **Připomínky k textu práce**

Obecně platí, že psát práci na toto téma v českém jazyce je obtížné vzhledem k anglickému názvosloví. Autor se s tímto úkolem úspěšně vypořádal, ale i tak se v textu objevují občas zbytečná anglická či počeštěná slova. Text práce je značně rozsáhlý. Podle mého názoru by bylo možné text zkrátit omezením opakování informací zejména v záhlaví kapitol. Stejně tak jsou poměrně nadbytečné obsáhlé závěry jednotlivých kapitol.

Dále uvádím vybrané konkrétní připomínky k textu práce:

- a) Na začátku práce by bylo dobré zmínit, že se pracuje v homogenních souřadnicích. Naproti tomu by bylo dobré omezit výklad D-H notace a nahradit ho referencí.
- b) Srozumitelnosti rovnic by napomohlo typografické rozlišování matic a vektorů.
- c) V případě rovnice 4.5 a 4.6 a tabulky 4-3 postrádám vysvětlení proměnných.
- d) Odkazy do literatury jsou uváděny jménem a rokem, ale seznam literatury je číslován. Takto se odkazy hůře hledají.

- e) Anglické nadpisy obrázků jsou nadbytečné a někdy rušivé. Doporučuji držet se jednoho jazyka, byť je to pracnější.
- f) Obr. 5.10 nemá dobrý popis. Není jasné, proč jsou zde dva grafy.
- g) Obr. 5.37 nepřináší žádné informace. Lépe by bylo použít rozdíl počtu poloh.
- h) Závěr (kapitola 8) se mi jeví jako opakovaný popis struktury práce bez zdůraznění autorova přínosu či uvedení jakýchkoliv numerických výsledků. Závěr je v takovéto formě neuspokojivý a pro pozorného čtenáře zcela nadbytečný.

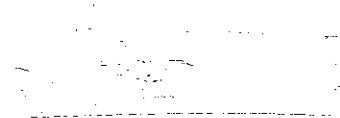
## Otázky k obhajobě

1. Algoritmus IRHEC je použit pro zpřesnění odhadu hledané transformace. Dle mého je o algoritmus podobný algoritmům pro odstranění odlehlých hodnot (outliers). U těchto algoritmů je problémem možné ovlivnění výsledku statistickým rozložením dat či počátečním odhadem. Z obrázku 4.13 mi není zřejmé, zda k tomuto nežádoucímu chování nedochází. Bylo provedeno nějaké statistické vyhodnocení vstupů algoritmu?
2. Autor dále na straně 73 tvrdí, že algoritmus IRHEC „... zaručuje konvergenci hledané  $T_S^N$  ke skutečné transformační matici  $*T_S^N$  ve většině simulovaných provedeních ...“. Jde v tomto případě o záruku či jen pozorování na základě provedených testů? Jsou definovány podmínky za nich ke konvergenci dochází?
3. Z jakého materiálu, s jakou povrchovou úpravou je vyroben kalibrační objekt?
4. Mohl by autor vzhledem k formě “Závěru” vybrat 2 či 3 podle něj nejpodstatnější výsledky a prezentovat je?

## Závěr

Nemohu říci, že by práce přinášela zásadní převrat v oboru, ale představeným řešením přispívá k praktickému vylepšení procesu kalibrace oko-ruka v robotických aplikacích. Nejde o práci excelentní, ale vzhledem ke svému zaměření je to disertační práce dobrá jejímuž řešení musel autor věnovat nemálo úsilí. Na základě uvedených skutečností **doporučuji tuto disertační práci ke obhajobě.**

Praha, 20.8.2021



Ing. Pavel Krsek, Ph.D.

