

TAČR Centrum kompetence CIDAM

Survey: Paralell structures in robotics and possible applications
for special robots operating in chemically aggressive
environments

Výzkumná zpráva WP5 D5.11

Martin Švejda

5.1.2015

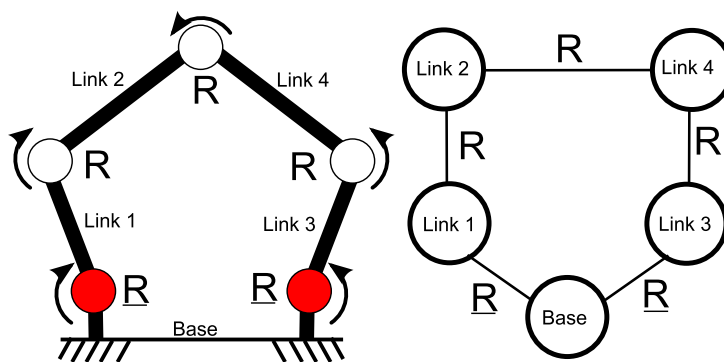
Abstrakt

Výzkumná zpráva zahrnuje přehled současného stavu využití paralelních architektur manipulatorů v robotice s ohledem na použití v chemicky agresivním prostředí.

1 Úvod

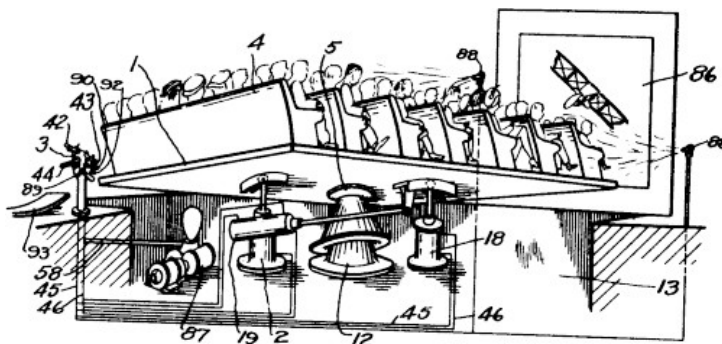
Paralelní kinematické struktury (paralelní manipulátory) v robotice v posledních letech stále více vystupují do popředí z důvodu nových vlastností, které jsou v průmyslových aplikacích často vyžadovány. Historie využití paralelních manipulátorů však zdaleka nešla ruku v ruce s využíváním manipulátorů sériových. Díky své složitější mechanické konstrukci a potenciálně tak větším nárokům na jejich návrh a řízení, technikou veřejnost svým způsobem spíše odrazovaly. To, co však bylo pro průmysl „zbytečně“ složité, se brzy stalo výzvou pro akademiky. Právě díky nim dnes paralelní manipulátory směle konkurují svým sériovým protějškům a postupně tak smazávají hlubokou propast mezi technologicky-průmyslovým povědomím a akademickou sférou. Přesto však, ve srovnání se sériovými manipulátory, lze paralelní manipulátory nalézt v reálných průmyslových aplikacích relativně málokdy. Většinou se jedná o značně specializované robotické mechanismy (specializované obráběcí stroje, polohovací systémy v leteckém a vesmírném výzkumu, antivibrační robotizované platformy, atd.).

Základ paralelních manipulátorů tvoří tzv. *uzavřený kinematický řetězec*, viz Obrázek 1, který lze popsat cyklickým grafem a vzniká uzavřením *otevřeného kinematického řetězce*. Mohli bychom tedy říci, že koncový efektor manipulátoru je spojen se základnou manipulátoru dvěma či více otevřenými kinematickými řetězci, v podstatě sériovými manipulátory.



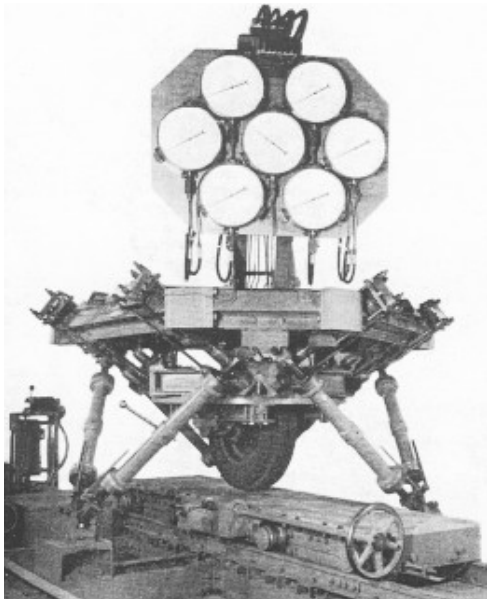
Obrázek 1: Planární paralelní manipulátor a jeho grafová reprezentace

Prvotní zmínky o paralelních kinematických strukturách se objevují mezi technickou veřejností již v první polovině dvacátého století. Přesto, že nemůžeme s jistotou říci, že se jedná o skutečně první mechanismus s paralelní architekturou, a dokonce ani zda-li byl skutečně někdy postaven, v roce 1931 si nechal James Gwinnett patentovat mobilní platformu pro zábavní průmysl, viz Obrázek 2.

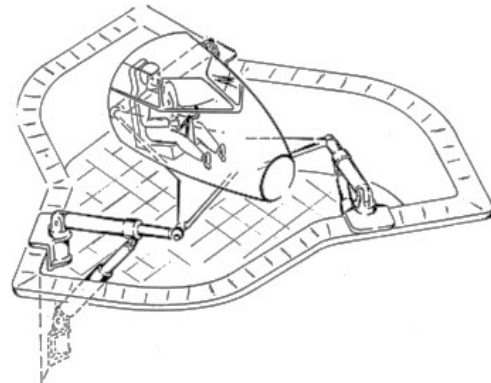


Obrázek 2: Pravděpodobně první paralelní manipulátor Jamese Gwinnetta

Dnes snad nejznámější paralelní kinematickou architekturou je tzv. Stewartova platforma. Její objev je však bezpochyby připisován Ericu Goughovi, automobilovému inženýrovi firmy Dunlop Rubber Co., Birmingham, England. Ten v roce 1954 představil paralelní platformu pro testování pneumatik letadlových podvozků při variabilním zatížení, viz Obrázek 3(a). O několik let později, v roce 1965, D. Stewart na konferenci UK Institution of Mechanical Engineers prezentoval svůj vynález paralelního leteckého simulátoru, viz Obrázek 3(b). Přesto, že Stewartův vynález nebyl příliš podobný tomu Goughovu, je právě Goughova platforma dnes paradoxně nazývána platformou Stewartovou, někdy pak jako Gough-Stewartova platforma. Více o historii paralelních manipulátorů lze nalézt např. v [3], [12]. Pro své vlastnosti se paralelní manipulátory používají zejména v aplikacích leteckých simulátorů, aktivně tlumených anti-vibračních plošin, při velmi přesných a rychlých aplikacích typu "pick and place", pro testovací stendy v automobilovém průmyslu atd.



(a) Původní Goughova platforma pro testování pneumatik



(b) Původní Stewartova platforma pro letecký simulátor

Obrázek 3: Goughova-Stewartova platforma (1954) a Stewartova platforma (1965)

Tabulka 1 shrnuje základní rozdíly mezi sériovými a paralelními manipulátory.

Sériové manipulátory	Paralelní manipulátory
<p>+ jednoduchá mechanická architektura Zpravidla jednodušší řešení přímé a inverzní kinematiky, přímá kinematika lze vždy řešit analyticky, inverzní kinematika obecně nelze řešit analyticky.</p>	<p>- složitější mechanická architektura Řešení přímé a inverzní kinematiky může být obtížnější, inverzní kinematika lze většinou řešit analyticky (s výjimkou složitých kinematických architektur), přímá kinematika obecně nelze řešit analyticky.</p>
<p>- užité zatížení manipulátoru Všechna ramena manipulátoru jsou zatěžována výhradně na ohyb a každé z ramen musí být dimenzováno tak, aby udrželo celou váhu břemene => manipulátor musí být dostatečně robustní (vyšší hmotnost, horší dynamické vlastnosti, poddajnost manipulátoru)</p>	<p>+ užité zatížení manipulátoru Síla potřebná k udržení břemene je rozdělena mezi jednotlivé kinematické řetězce (koncový efektor manipulátoru je podepírán ve více bodech) => manipulátor nemusí být tak robustní (nižší hmotnost, lepší dynamické vlastnosti, vyšší tuhost manipulátoru)</p>
<p>- přesnost a opakovatelnost manipulátoru Nasčítávání chyb vzniklých při polohování jednotlivých ramen nejčastěji v důsledku jejich průhybů, případně chyb snímačů v jednotlivých aktuátorech => ztráta přesnosti a opakovatelnosti.</p>	<p>+ přesnost a opakovatelnost manipulátoru Vzhledem k odlišné mechanické konstrukci jsou chyby vzniklé při polohování jednotlivých ramen průměrovány => dosažení větší přesnosti a opakovatelnosti.</p>
<p>- umístění aktuátorů Aktuátory musí být umístěny v každém kloubu manipulátoru (aktuátory se pohybují společně s manipulátorem) => horší dynamické vlastnosti, větší robustnost manipulátoru, nutnost vézt kabeláž v celé mechanické konstrukci.</p>	<p>+ umístění aktuátorů Aktuátory mohou být umístěny na základně manipulátoru (a to v mnoha případech i napevno) => lepší dynamické vlastnosti, lehčí konstrukce manipulátoru, možnost prostorově oddělit aktuátor (v případě že manipulátor musí pracovat v agresivním, vybušném či jinak nestandardním prostředí)</p>
<p>+ pracovní prostor Relativně velký pracovní prostor.</p>	<p>- pracovní prostor Pracovní prostor je z důvodu složitější mechanické konstrukce více komplikovaný (neregulární tvar s řadou výdutí a prohlubní).</p>

Tabulka 1: Porovnání základních vlastností paralelních a sériových manipulátorů

Při návrhu paralelních robotických systémů je třeba řešit některé problémy, které jsou v případě sériových manipulátorů buď přímočaré, nebo je jejich řešení relativně snadné. Jedná se zejména o následující oblasti:

Výpočet kinematických transformací

Pro sériové manipulátory je ze známo, [14], [7], [9], že přímá kinematická úloha, tzn. transformace z kloubových souřadnic Q na zobecněné souřadnice X (popisující polohu a orientaci koncového efektoru), lze vždy řešit analyticky a existuje zde právě jedno řešení. Naopak inverzní kinematická úloha, tzn. transformace ze zobecněných souřadnic X na kloubové souřadnice Q obecně nelze řešit analyticky, navíc zde může existovat celá řada izolovaných řešení, viz [18]. Pro paralelní manipulátory je situace ještě komplikovanější, neboť obecně není možné řešit přímou ani inverzní kinematiku. Však vzhledem k faktu, že mnohé paralelní manipulátory jsou konstruované s využitím relativně jednoduchých kinematických řetězců, lze velmi často řešit právě klíčovou inverzní

kinematiku jednoduše a analyticky, např. pro výše zmíněnou Stewartovu platformu je řešení triviální, viz [12]. Naopak řešení přímé kinematiky je problém v drtivé většině případů velmi komplikovaný (analyticky neřešitelný, mnoho izolovaných řešení), podrobněji v Kapitole 2.1.

Výpočet pracovního prostoru manipulátoru

Výpočet pracovního prostoru pro paralelní manipulátory je opět komplikovanější, než u robotů sériových. Důvodem je především složitější mechanická konstrukce manipulátoru, které často velmi výrazně omezuje jeho pohyb. Problém výpočtu pracovních prostorů sériových manipulátorů lze často odvodit přímo a intuitivně, bez nutnosti detailnější analýzy, pracovní prostor paralelních manipulátorů však naráží na řadu komplikací v důsledku interakce jednotlivých kinematických řetězců. V současnosti existuje celá řada metod pro výpočet pracovních prostorů paralelních manipulátorů, mezi nejvýznamnější patří např.:

- Geometrický přístup
Tento přístup k vyšetřování pracovního prostoru je založen na vyšetření průniku geometrických entit generovaných dílčími kinematickými řetězci. Přesto, že v principu dává korektní a přesné výsledky (výpočet průníků analyticky), výpočetní náročnost algoritmů je vysoká díky matematicky komplikovanému formalismu průniku více entit a následnému nalezení řešení. Nevýhodou je rovněž komplikované zahrnutí různých omezení na pohyb ramen manipulátoru či kvalitu pracovního prostoru (podmíněnost, kompromis mezi převody sil a rychlostí, atd.)
- Diskrétních metody
Diskrétní metody jsou většinou založené na algoritmech hrubé síly, či algoritmech inteligentního prořezávání pracovního prostoru. Pracovní prostor manipulátoru je diskretizován a dílčí vlastnosti či omezení jsou vyšetřovány v každém bodě zvlášť. Přístup umožňuje zahrnout v podstatě jakoukoliv omezující podmínku (pokud je tato matematicky formulovatelná). Algoritmy založené na tomto přístupu dávají sice korektní výsledky ve vyšetřovaných bodech a je tak možné s globální platností prozkoumat celý potenciální pracovní prostor, nicméně o chování mezi diskretizovanými body nelze rozhodnout. Řešení do jisté míry přináší zjemnění diskretizace, které je však limitováno vzrůstajícím požadovaným výpočetním výkonem.
- Numerické metody
Numerické metody jsou pro vyšetřování pracovních prostorů pravděpodobně nejrozšířenější variantou. Jsou často založené na vyšetřování hranic pracovního prostoru, viz vyšetřování pracovního prostoru paralelního manipulátoru v [16], [17], podrobněji v Kapitole 2.1. V poslední době poměrně zajímavou metodou pro vyšetřování pracovního prostoru je intervalová analýza, [10], [11], [12], založená na hledání intervalů (boxů) zobecněných souřadnic manipulátoru spadajících do pracovního prostoru. Na rozdíl od diskrétních metod intervalová analýza zaručuje existenci pracovního prostoru kontinuálně uvnitř nalezeného intervalu.

Optimální návrh manipulátoru

Klíčovým bodem při syntéze robotického zařízení je právě návrh jeho kinematického uspořádání a samotných kinematických parametrů. Jinými slovy, jakým způsobem vůbec konstruovat dané zařízení, aby vyhovělo všem požadavkům a zároveň maximálním možným způsobem redukovalo komplikace při řešení přidružených problémů (výpočet kinematických transformací, návrhy a realizace algoritmů řízení, atd.). Tato oblast je bohužel často opomíjena, což s sebou v řadě případů nese nemalé problémy, které mnohdy lze jen obtížně dále řešit, nebo dokonce tyto není možné řešit vůbec (zejména pro komplikované architektury právě paralelních manipulátorů).

Návrh manipulátoru dělíme na *strukturální* a *parametrickou* syntézu (optimalizaci), viz[19]. Uvedme některé příklady:

- **Strukturální syntéza**

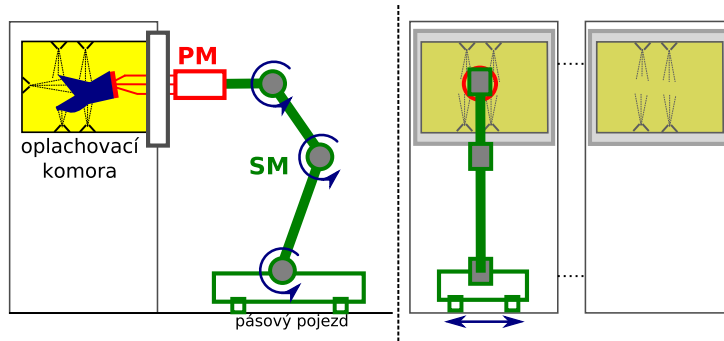
Nevhodnou strukturální syntézou lze výrazně zkomplikovat řešení kinematických úloh. V drtivé většině případů v průmyslové praxi je strukturální návrh geometrické konstrukce určen již konkrétní aplikací, ve které bude manipulátor využit. Strukturální návrh je tak zpravidla navržen odborníky z oblasti nasazení manipulátoru. V některých případech je nutné strukturální návrh dále modifikovat v průběhu návrhu manipulátoru a jeho řídicího systému. Typickým případem takové modifikace je situace, kdy pro původně navržený manipulátor nelze uspokojivě vypočítat právě kinematické úlohy, avšak relativně drobná změna ve strukturálním uspořádání ramen a kloubů vede na zachování požadované funkčnosti manipulátoru a zároveň k výrazné redukci výpočetní složitosti kinematických úloh. S ohledem na paralelní manipulátory hraje strukturální syntéza prioritní roli při určování stupňů volnosti koncového efektoru, neboť při posuzování počtu stupňů volnosti pro paralelní manipulátory většinou není možné použít intuici jako v případě manipulátorů sériových. Snadno se tak při návrhu robotického zařízení můžeme dostat do problémů, kdy výsledná struktura manipulátoru nevykazuje požadovaný počet a typ stupňů volnosti (přeurčené resp. nedourčené paralelní struktury, kdy koncový efektor manipulátoru nelze polohovat resp. vykazuje pohyb i při uzamčených aktuátorech).

- **Parametrická syntéza**

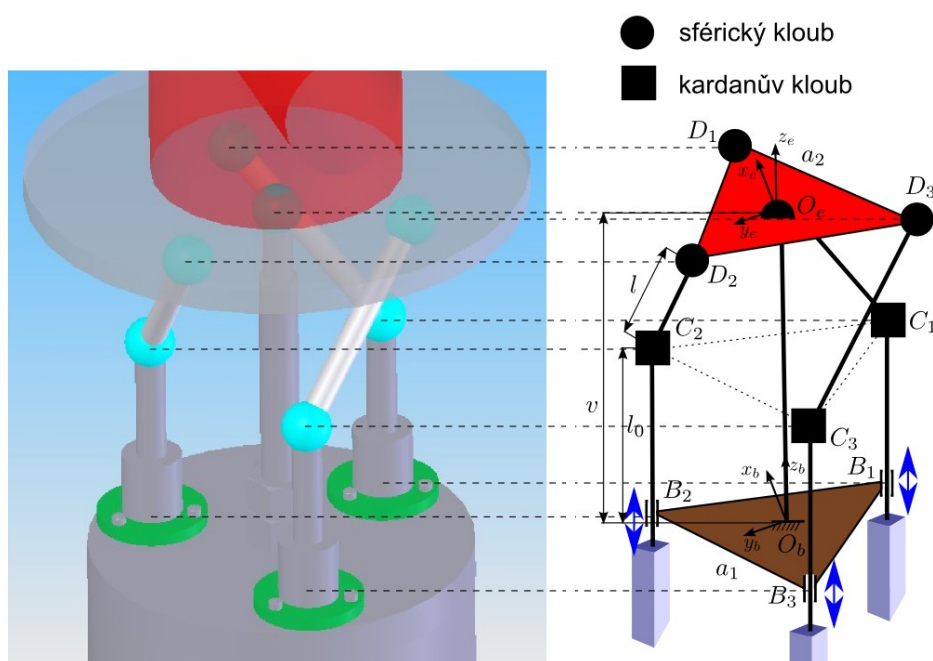
Nevhodným navržením parametrů ramen a kloubů manipulátoru (typicky např. Denavit-Hartenbergových [4] či Khalil-Kleinfingerových parametrů [8], [18], reprezentující délky ramen a umístění kloubů) nelze docílit požadovaných DoF, není možné pokrýt celý požadovaný pracovní prostor či dochází při požadovaném pohybu manipulátoru k jeho přiblížení k singulárním polohám. Dále často dochází k nevhodnému poměru převodu sil/momentů či rychlostí (kinetostatická dualita, viz [14]) mezi aktuátory a koncovým efektem manipulátoru. Parametrická syntéza hraje významnou roli jak pro sériové tak pro paralelní manipulátory a jejím nevyhovujícím řešením lze snadno zkazit vlastnosti jinak dobře strukturálně navrženého manipulátoru.

2 Pilotní projekt: Manipulátor AGEBOT

Pilotním projektem na katedře kybernetiky ZČU v Plzni využívající paralelní strukturu manipulátoru v aplikacích chemicky agresivního prostředí byl manipulátor AGEBOT (AGressive Environment roBOT), který byl vyvíjen ve spolupráci s firmou Eurotec JKR. Základní koncepce manipulátoru a jeho nasazení do průmyslové aplikace je znázorněno na Obrázku 4. Jedná se o sério-paralelní konstrukci manipulátoru, která slouží k zakládání omývaných součástí do průmyslové myčky a jejich polohování uvnitř oplachovacích komor. Takový pohyb uvnitř myčky je požadován zejména z důvodu oplachu různých vývrtů a prohlubní v omývaných součástech. Chemicky agresivní prostředí v kombinaci s vysokou teplotou a vlhkostí uvnitř mycích komor však v podstatě neumožňuje umístit celý manipulátor dovnitř mycí komory z důvodu poškození citlivých elektromechanických komponent. Tento problém byl úspěšně vyřešen právě použitím paralelní struktury manipulátoru, tzv. paralelního sférického zápěstí, viz Obrázek 5.



Obrázek 4: Manipulátor AGEBOT v aplikaci průmyslového mytí



Obrázek 5: Paralelní sférické zápěstí manipulátoru AGEBOT

Paralelní sférické zápěstí (PSZ) bývá velmi častá architektura, kterou můžeme v průmyslových aplikacích nalézt. Jedná se o mechanismus umožňující tři rotační stupně volnosti koncového efektoru (rotace kolem os xyz) a v sériové podobě je používán například jako poslední část antropomorfního manipulátoru. Manipulátor je poháněn třemi translačními aktuátory (lineární motory). Koncový efektor je k základně manipulátoru připevněn čtyřmi nezávislými kinematickými řetězci **PUS**¹, z nichž prostřední tvoří tzv. pasivní stabilizační element, který omezuje počet stupňů volnosti koncového efektoru (s takovým uspořádáním se u paralelních manipulátorů můžeme setkat velmi často). Vzhledem ke své konstrukci je PSZ vhodným kandidátem pro použití do chemicky agresivního prostředí výše uvedených průmyslových myček, a to z následujících důvodů:

- umožňuje právě 3 rotační stupně volnosti \Rightarrow libovolné orientování součásti uvnitř oplachovací komory (např. proti oplachovacím tryskám)

¹**R** rotační kloub, **P** prizmatický kloub, **S** sférický (kulový) kloub, **U** univerzální (kardanův) kloub

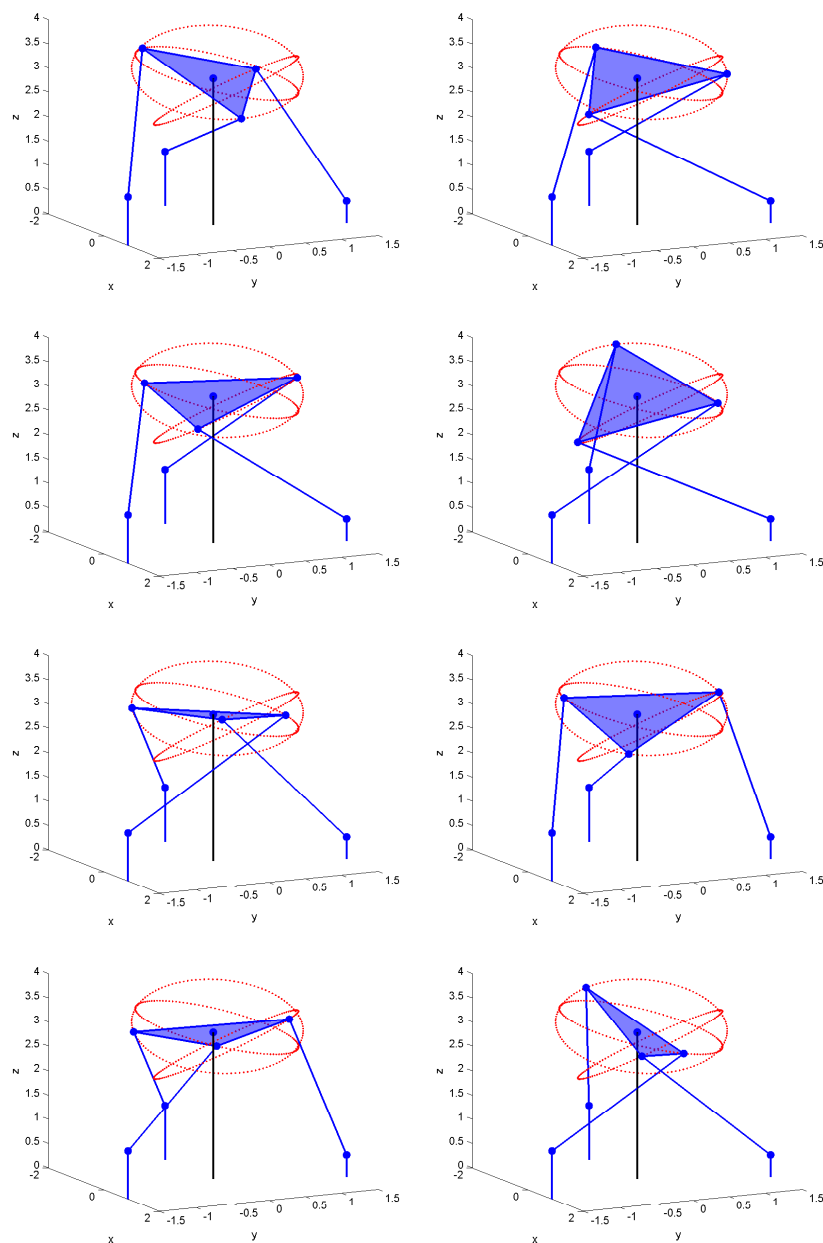
- lineární aktuátory (přípevněny na základně manipulátoru - přednost právě paralelních architektur) je možné dobře utěsnit mimo oplachovací komoru
- všechna důležitá elektronika včetně aktuátorů je umístěna mimo oplachovací komoru (uvnitř oplachovací komory zůstává pouze soustava táhel, které lze vyrobit z chemicky odolného materiálu)
- paralelní struktura z principu umožňuje vysokou tuhost koncového efektoru a přesnost polohování

2.1 Některé vybrané řešené problémy

Jedná se zejména o následující problematiku spojené ze syntézou PSZ.

Výpočet kinematických transformací

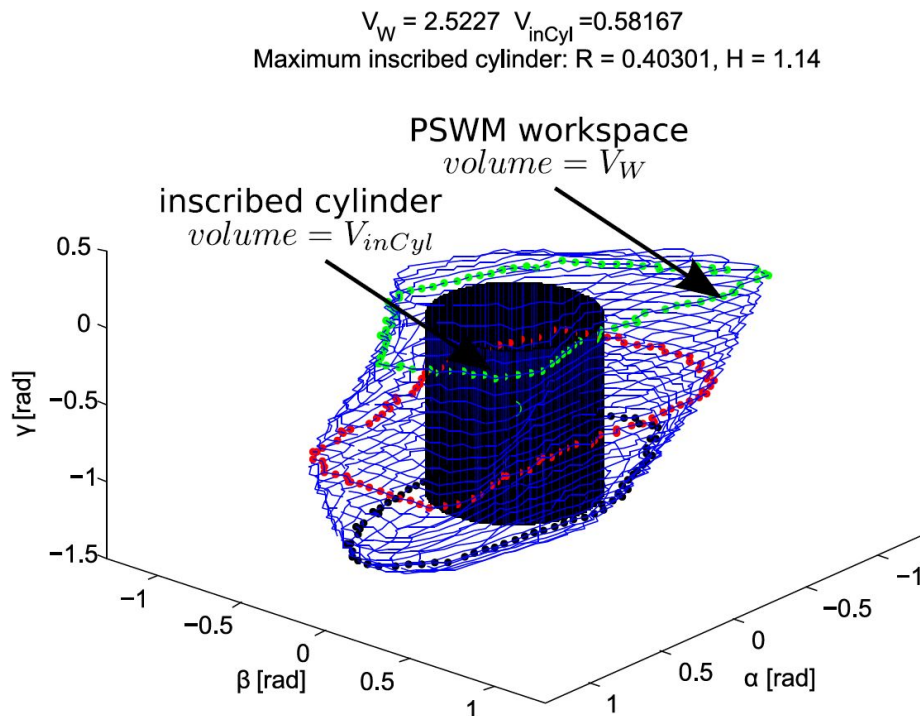
Vzhledem k jednoduchosti dílčích kinematických řetězců lze inverzní kinematiku manipulátoru spočítat v analytickém tvaru bez větších komplikací. Situace se ovšem výrazně komplikuje pro výpočet dopředné kinematiky, tedy jak bude vypadat poloha (orientace) koncového efektoru pro dané polohy lineárních aktuátorů. Tento problém byl řešen detailně v [18]. Bylo dokázáno, že existuje celkem 8 různých řešení, viz Obrázek 6 a tyto řešení je možné získat pouze numericky (neexistuje řešení v uzavřeném tvaru).



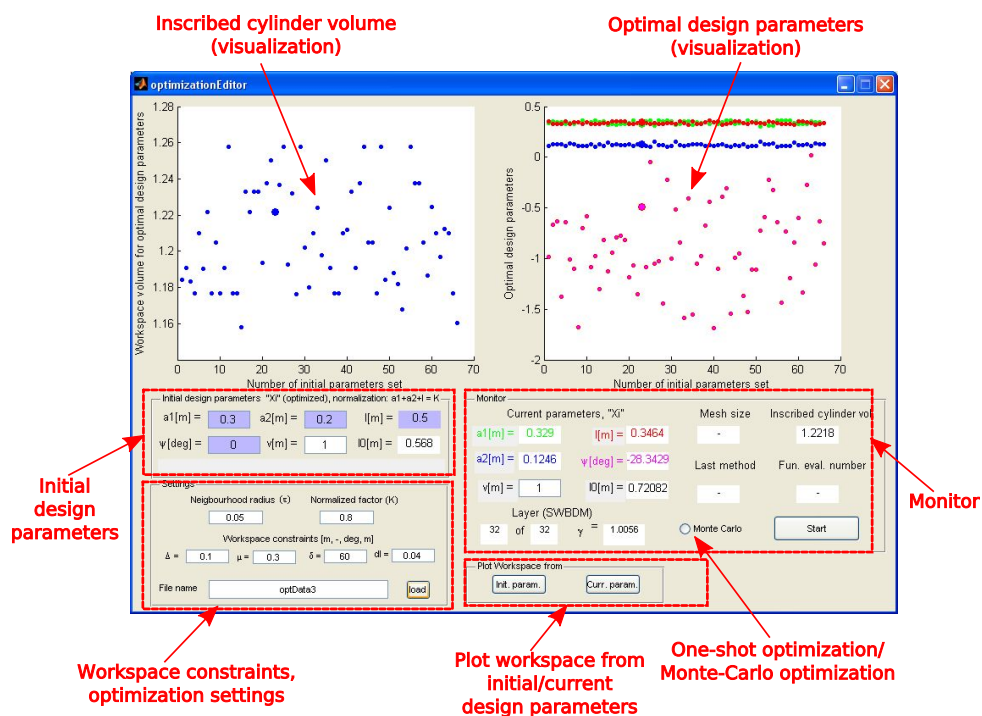
Obrázek 6: Možné polohy koncového efektoru pro danou polohu aktuátorů

Optimální návrh PSZ

Vzhledem k podstatě aplikace bylo hlavním požadavkem na konstrukci PSZ, aby získaný pracovní prostor (ve smyslu polohování ve třech nezávislých rotacích α , β , γ) byl co možná největší a dobře podmíněný, viz [15], [6], [16]. Optimalizované byly kinematické návrhové parametry manipulátoru (výška pasivního stabilizačního elementu, délka ramen, atd.). Bohužel při podrobnější analýze se ukázalo, že pracovní prostor PSZ nevykazuje regulární tvar (krychle, válec, atd.), ale je značně zborcený s řadou prohlubní, tzn. hodnotit velikost pracovního prostoru pouze jeho objemem bylo v podstatě nepoužitelné. Kritérium optimalizace bylo proto upraveno na maximální regulární objem pracovního prostoru, resp. na maximalizaci válce, který je kompletně v pracovním prostoru obsažen, viz Obrázek 7. Současně s tím se kladl požadavek na podmíněnost nalezeného pracovního prostoru, v našem případě index pohyblivosti (podmíněnost kinematického jakobiánu, kompromis mezi převody sil a momentů v každém bodě pracovním prostoru je větší než zadaná mez). V rámci optimálního návrhu bylo vyvinuto GUI pro uživatelskou správu optimalizačního procesu, viz Obrázek 8.



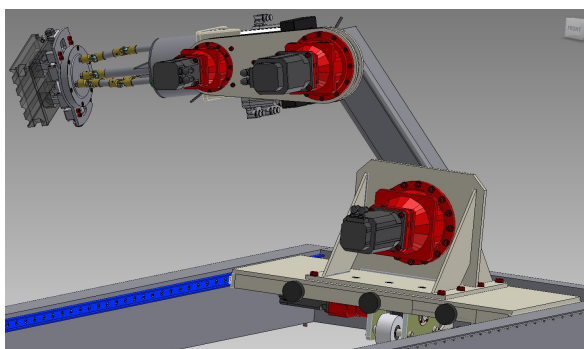
Obrázek 7: Optimalizovaný pracovní prostor PSZ s vepsaným regulárním tvarem (válcem)



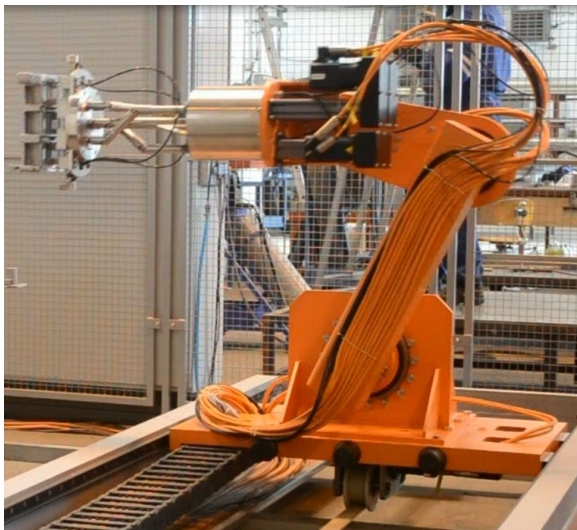
Obrázek 8: GUI pro uživatelskou správu optimalizace

2.2 Finální verze AGEBOTu

Výsledná prototypová verze manipulátoru AGEBOT využívající paralelní architekturu je znázorněna na Obrázku 9.



(a) 3D CAD výkres



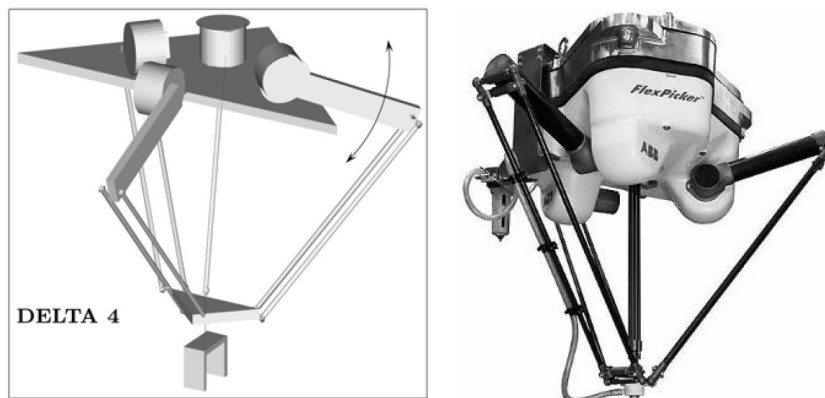
(b) Reálný prototyp

Obrázek 9: Finální prototyp manipulátoru (CAD výkres a reálný prototyp)

3 Další alternativy a aplikace paralelních architektur v aplikacích průmyslového mytí

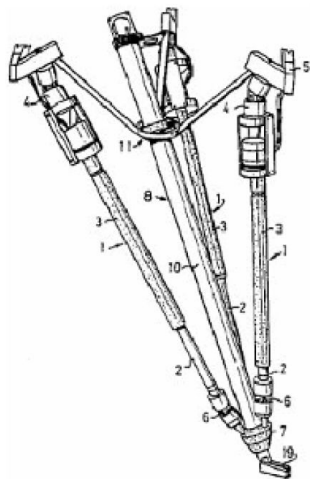
Zabývejme se dále možnostmi využití paralelních architektur v aplikacích průmyslového mytí. Obecně lze říci, že výhodou paralelních struktur v takových aplikacích je především právě možnost umístit aktuatory na základnu manipulátoru. Pohyb koncového efektoru je pak vykonáván pouze prostřednictvím paralelních mechanických převodů (mechanické konstrukce) odolných vůči agresivnímu prostředí. Podobná možnost se sice nabízí i u sériových manipulátorů přemístěním aktuatorů z jednotlivých kloubů na základnu a převod sil/momentů realizovat přes převodové mechanismy (táhla, bowdeny, lana, atd.), nicméně tím se stále neodstraňují problémy vyplývající ze sériového uspořádání (menší tuhost, přesnost, atd.). Možné architektury paralelních manipulátorů využitelné v aplikacích průmyslového mytí jsou uvedeny na následujících obrázcích.

Obrázek 10 představuje průmyslově používaný delta paralelní robot s třemi translačními stupni volnosti primárně používaný pro velmi rychlé „pick and place“ aplikace. Koncový efektor je připojen ke koncovému efektoru trojicí paralelogramů, které jsou připojeny přes rotační pohony k základně. V případě použití pro manipulaci v oplachovacích komorách myčky je možné přes manžety rotační pohony na základně manipulátoru utěsnit.



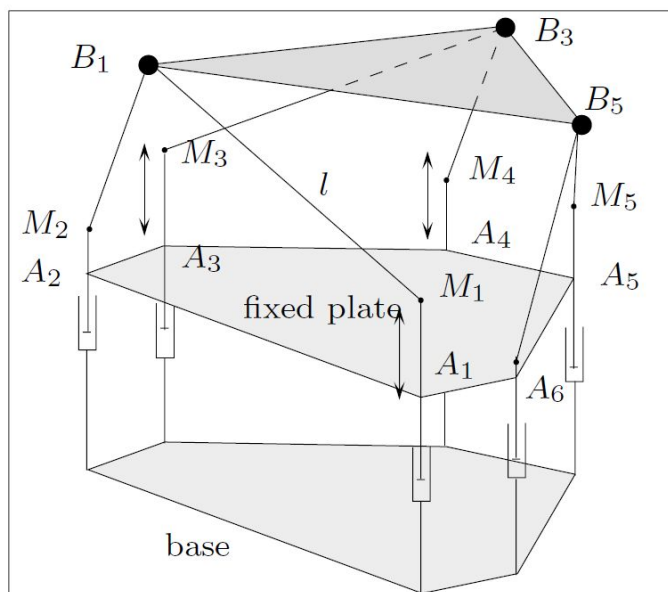
Obrázek 10: FlexPicker IRB 340 (ABB)

Obrázek 11 představuje robot opět se třemi translačními stupni volnosti, v tomto případě je koncový efektor manipulátoru připojen 3 kinematickými řetězci typu **RRPS**, kde prizmatický kloub realizuje aktuator. Pasivním stabilizačním elementem je kinematický řetězec **UP** (teleskopický výsuv připojený pevně ke koncovému efektoru a kloubem typu **U** k základně manipulátoru). Lineární aktuatory včetně pasivního stabilizačního elementu je opět možné relativně snadno utěsnit.



Obrázek 11: Tricept IRB 940 (ABB)

Na Obrázku 12 je znázorněn manipulátor s kompletními šesti stupni volnosti (3 rotační, 3 translační), který je zobecněním architektury použité pro paralelní sférické zápěstí manipulátoru AGEBOT. Koncový efektor je zde k základně připojen 6 kinematickými řetězci **PUS**. V uvedené konfiguraci je opět snadné utěsnit výsuvy prismatických aktuátorů (výsuvy vykazují pohyb dokonce pouze ve vertikálním směru).



Obrázek 12: Active wrist (INRIA)

Na Obrázcích 10, 11, 12 jsou zachyceny některé známé architektury paralelních manipulátorů, které jsou z hlediska uspořádání pohonů vhodné právě pro aplikace průmyslového mytí, neboť všechna elektronika a samotné pohony lze osadit mimo oplachovací komory a relativně snadno utěsnit. Diskutujeme však některé další možnosti, kde využití paralelních struktur přináší výhody. Častým problémem u sériových manipulátorů (sériovou část manipulátoru AGEBOT nevyjímaje)

s velkými nosnostmi, např. manipulátor firmy ABB se šesti stupni volnosti, viz Obrázek 14(b). Zde je patrný systém statického vyvažování momentu v prvním kloubu nejbližší k základně (momentově většinou nejvíce namáhaný kloub), vyvažování je realizováno paralelním připojením tlumiče s pružinou. U uvedeného modelu manipulátoru je navíc přidána další paralelní struktura, analogicky jako u modifikace manipulátoru AGEBOT, a to přesun aktuátoru druhého ramena ze standardní polohy (na konci ramena prvního) na základnu manipulátoru \Rightarrow snížení hmotnosti, se kterou musí být manipulováno.



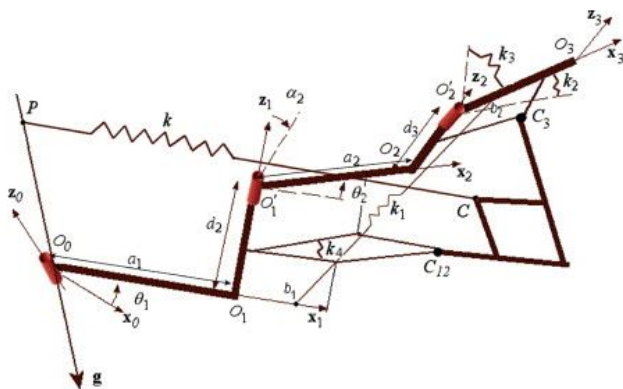
(a) KR 700 PA (KUKA)



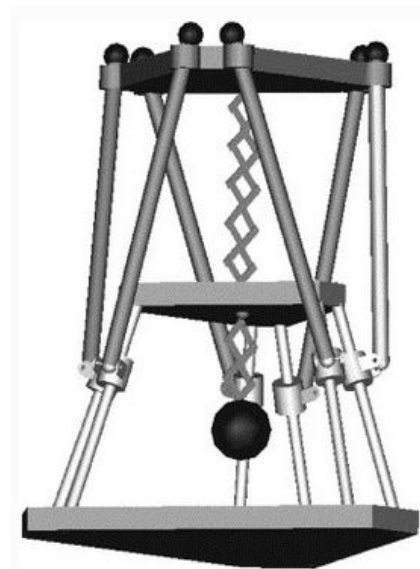
(b) IRB 6400 (ABB)

Obrázek 14: Paralelní struktury u průmyslových sériově dodávaných robotů

Paralelní struktury, které jsou využívány pro statické či dynamické vyvažování robotů lze nalézt i v odborné literatuře, [2], [5], [1], [13]. Většinou se jedná o přídavné paralelní mechanismy, které jsou k ramenům manipulátoru připojovány za účelem nalezení těžiště ramen během pohybu manipulátoru. K těmto těžištím jsou potom připojovány pružiny o specifické tuhosti, které automaticky zajišťují vyvažování celého manipulátoru, viz Obrázek 15(a). Na Obrázku 15(b) je znázorněn paralelní manipulátor s šesti kinematickými řetězci typu **PUS** (lineární aktuátory), který je vyvažován přidanou hmotností připevněnou opět na přídavném paralelogramu.



(a) Sériový **RRR** manipulátor s vyvažováním pomoc pružin



(b) Paralelní manipulátor s řetězcí **PUS** s vyvažováním pomocí přídavné hmoty

Obrázek 15: Přídavné paralelní struktury pro vyvažování manipulátorů

4 Závěr

Uvedená zpráva zahrnuje přehled současného stavu využití paralelních architektur manipulátorů v robotice. Jedná se zejména o aplikace, kdy má být manipulátor nasazen v chemicky agresivním prostředí průmyslových mycích linek. V textu je poukázáno na výhody/nevýhody, které doprovází paralelní manipulátory ve srovnání s jejich sériovými protějšky. Ilustrativní příklad nasazení takových paralelních architektur je demonstrován na pilotním projektu sério-paralelního manipulátoru AGEBOT a současně jsou uvedeny některé klíčové řešené problémy. V navazující části jsou představeny možné paralelní architektury manipulátorů, které je díky svému mechanickému uspořádání možné použít pro aplikace průmyslového mytí, neboť je možné veškerou důležitou elektromechanickou část manipulátorů dostatečně odizolovat od chemicky agresivního prostředí uvnitř oplachových komor. Závěrem jsou představeny některá průmyslová řešení využívající paralelní architektury i řešené problémy na úrovni akademické sféry.

Reference

- [1] Agrawal, G. G. P. S., Sunil K.: Design and Fabrication of an Active Gravity Balanced Planar Mechanism Using Auxiliary Parallelograms. *Journal of Mechanical Design*, doi:10.1115/1.1413771.
- [2] Agrawal, S. K.; Fattah, A.: Gravity-balancing of spatial robotic manipulators. *Mechanism and Machine Theory*, ročník 39, č. 12, 2004: s. 1331 – 1344, ISSN 0094-114X, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2004.05.019, <ce:title>11th National Conference on Machines and Mechanisms (NaCoMM-2003)</ce:title>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X0400151X>
- [3] Bonev, I.: The True Origins of Parallel Robots. *www.parallemic.org*, 2003.
- [4] Denavit, J.; Hartenberg, R. S.: A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *Trans. of the ASME. Journal of Applied Mechanics*, ročník 22, 1955: s. 215–221. URL <http://ci.nii.ac.jp/naid/10008019314/en/>
- [5] Fattah, A.; Agrawal, S.: Gravity-balancing of classes of industrial robots. In *Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on*, 2006, ISSN 1050-4729, s. 2872–2877, doi:10.1109/ROBOT.2006.1642137.
- [6] Goubej, M.; Svejda, M.: Dynamic analysis and control of robotic manipulator for chemically aggressive environments. In *Mechatronics (ICM), 2013 IEEE International Conference on*, Feb 2013, s. 273–278, doi:10.1109/ICMECH.2013.6518548.
- [7] Khalil, W.; Dombre, E.: *Modeling, Identification and Control of Robots*. Kogan Page Science paper edition, Elsevier Science, 2004, ISBN 9780080536613. URL <http://books.google.cz/books?id=nyrY0Pu5k10C>
- [8] Khalil, W.; Kleinfinger, J.: A new geometric notation for open and closed-loop robots. In *Robotics and Automation. Proceedings. 1986 IEEE International Conference on*, ročník 3, Apr 1986, s. 1174–1179, doi:10.1109/ROBOT.1986.1087552.
- [9] Mark W. Spong, M. V., Seth Hutchinson: *Robot Modeling and Control*. Wiley, 2005.
- [10] Merlet, J.-P.: Interval Analysis and Reliability in Robotics. Březen 2006. URL <http://hal.inria.fr/inria-00001152>
- [11] Merlet, J.-P.: Interval analysis for Certified Numerical Solution of Problems in Robotics. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, ročník -, 2009: s. -. URL <http://hal.inria.fr/inria-00362431>
- [12] Merlet, J. P.: *Parallel Robots*. Springer Publishing Company, Incorporated, druhé vydání, 2010, ISBN 9048170532, 9789048170531.
- [13] Russo, A.; Sinatra, R.; Xi, F.: Static balancing of parallel robots. *Mechanism and Machine Theory*, ročník 40, č. 2, 2005: s. 191 – 202, ISSN 0094-114X, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2004.06.011. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X0400120X>
- [14] Sciavicco, L.; Siciliano, B.: *Modelling and Control of Robot Manipulators*. Advanced Text-books in Control and Signal Processing, Springer London, 2000, ISBN 9781852332211. URL <http://books.google.fr/books?id=v9PLbcYd9aUC>

- [15] Svejda, M.; Goubej, M.: Innovative design and control of robotic manipulator for chemically aggressive environments. In *Carpathian Control Conference (ICCC), 2012 13th International*, May 2012, s. 715–720, doi:10.1109/CarpathianCC.2012.6228739.
- [16] Švejda, M.: Kinematic Analysis of Parallel Spherical Wrist Manipulator. Technická zpráva, University of West Bohemia, 2009.
URL http://home.zcu.cz/~msvejda/_publications/2009/1_PSWmanipulatorOptimal.pdf
- [17] vSvejda, M.: OPTIMAL KINEMATIC DESIGN OF PARALLEL SPHERICAL WRIST MANIPULATOR. In *International Carpathian Control Conference*, 2010.
- [18] Švejda, M.: Kinematika robotických architektur. Katedra Kybernetiky, ZČU v Plzni (online: http://home.zcu.cz/~msvejda/_publications/2011/rigo.pdf), 2011.
- [19] Švejda, M.: Existing methods and tools for optimization of mechatronic systems in terms of structure, parameters and control. Technická zpráva, University of West Bohemia, 2015.
URL http://home.zcu.cz/~msvejda/_publications/2015/1_optimalizace.pdf