

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**TEZE
DISERTAČNÍ
PRÁCE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

Optimalizace a řízení lehkých poddajných mechanismů s přídatnými aktuátory a senzory

Ing. Jiří Volech

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Mechanika tuhých a poddajných těles a prostředí

Školitel: prof. Ing. Zbyněk Šika, Ph.D.

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha

06.2021

Název anglicky: Optimization and control of lightweight flexible mechanisms with additional actuators and sensors

Disertační práce byla vypracována v prezenční/ kombinované* formě doktorského studia na Ústavu mechaniky, biomechaniky a mechatroniky Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: Ing. Jiří Volech

Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky, Fakulta strojní
ČVUT v Praze
Technická 4
160 00 Praha 6
IČO: 68407700

Školitel: Prof. Ing. Zbyněk Šika, Ph.D.

Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky, Fakulta strojní
ČVUT v Praze
Technická 4
160 00 Praha 6
IČO: 68407700

Oponenti:

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod.

v zasedací místnosti č. 17 (v přízemí) Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6

před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Mechanika tuhých a poddajných těles a prostředí. S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.

předseda oborové rady oboru Mechanika tuhých a poddajných těles a prostředí

Fakulta strojní ČVUT v Praze

1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Hlavní požadavky na roboty, manipulátory a další mechanismy v průmyslu lze sumarizovat čtyřmi hlavními body

1. Přesnost
2. Rychlost
3. Pracovní/zástavbový prostor
4. Nízká hmotnost

Každá oblast použití upřednostňuje jeden či více těchto bodů, ale obecně platí, že při návrhu či výběru mechanismu pro daný účel se zohledňují všechny. Obecně lze mechanismy rozdělit do dvou velkých skupin, z nichž každá v určitém bodě výrazně vyniká. První skupinou mechanismů, která v jedné z těchto oblastí výrazně vyniká, jsou roboti se sériovou kinematickou strukturou. Mají dobré vlastnosti, pokud jde o poměr velikosti pracovního a zástavbového prostoru [1]. Hlavní nevýhoda, která vyplývá z jejich topologie, je obvykle nízká účinná tuhost a tlumení koncového efektoru nesoucího nástroj, chapadlo nebo jinou aktivní složku [2]. Druhou skupinou mechanismů, která výrazně vyniká v nějaké oblasti, jsou paralelní kinematické mechanismy (PKM). Lze je použít jako alternativu k sériovým strukturám s lepší tuhostí, ale s horším poměrem zastavěného / využitelného prostoru. Také mají obvykle složitější syntézu řízení s vyšším počtem možných kolizí v pracovním prostoru [3]. V případě redundantně ovládaných PKM lze z pracovního prostoru eliminovat i singulární pozice. Redundance umožňuje autokalibraci [4] a lze vylepšit i další parametry mechanismu [5], ale redundance přináší ještě komplikovanější syntézu řízení [6]. Zajímavou variantou PKM jsou kabelové varianty, které kombinují principy paralelní kinematiky s využitím kabelů / vláken / lan / pásů jako spojů, což přináší další výhody – jmenovitě nízkou hmotnost, velký rozsah pohybu, možnost ochrany proti vůli [7], snadnou rekonfiguraci, a dokonce levnější konstrukci ve srovnání s mechanismy s tradičními vazbami. Oblast použití sahá od pokročilých jeřábů [8] a kabelových manipulátorů [9] po astronomické aplikace [10], robotická ramena [11] a rekonfigurovatelné manipulátory [12]. U PKM poháněných kabely musí být zajištěno, že všechny působící kabely zůstanou v tahu buď gravitační silou, nebo pomocí pohonů. Z důvodu zanedbatelné tuhosti v ohybu kabelů [2], [13] je nutné se zabývat problémem složitých vibrací. Bylo zkoumáno několik konceptů pro dosažení nižších vibrací a vyšší tuhosti, ale žádný z nich úplně a uspokojivě nevyřešil všechny problémy. Mnoho přístupů je zaměřeno na odstranění těchto problémů pomocí pokročilých metod řízení a plánování trajektorie [2], [14]. Kombinace sériové a paralelní konfigurace by mohla kombinovat výhody

obou konfigurací, ale není příliš běžná a obvykle nevyužívá svého potenciálu co nejlépe. Existuje několik způsobů, jak kombinovat sériové a paralelní struktury. Projekt VERNE [15] zkoumá stroj, který se skládá z paralelního modulu s 3 DOF a sériového naklápačícího stolu se 2 DOF. Sériové řetězce dvou nebo více paralelních manipulátorů jsou popsány v [16] a v [17]. Další konfigurací je sériový manipulátor nesený kabelovou platformou paralelního pohybu [18]. Víceúrovňovou architekturu tvořenou paralelním manipulátorem a aktivní strukturou upevněnou na jeho platformu lze také použít pro potlačení vibrací [19]. V této aplikaci je konstrukce další platformy obvykle založena na piezo – pohonech s velmi nízkým zdvihem. Proto přidaná platforma nemá vliv na kinematiku celé struktury a ovlivňuje se pouze vibrační vlastnosti. Směs tuhých prvků a kabelů (nemusí být nutně redundantní) se používá v manipulátorech inspirovaných endo/exoskelety zvířecích nohou. Sériová struktura představuje kosti a kabely představují svaly. Podobné struktury (exoskelety) se často používají také k rehabilitačním účelům [20]. Typicky používají kabelové systémy umístěné mimo mechanismus – kostru. Zajímavý koncept je popsán v [21] a v [22]. Jedná se o sériový řetěz pasivních dvou článků poháněný paralelními kabely. Je zde však uvažován pouze jednoduchý rovinný případ a chybí obecná analýza různých struktur a konfigurací. Taková analýza je skutečně potřebná a důležitá, protože v hybridních sériových paralelních strukturách se kombinují nejen výhody, ale i nevýhody. Například sériová struktura přenášená paralelním kabelovým manipulátorem v [18] musí vzít v úvahu oba hlavní zdroje vibrací – flexibilitu v kabelech a malou tuhost sériového manipulátoru samotného.

Z tohoto důvodu je třeba se primárně zaměřit na oba kinematické řetězce podrobněji a pokusit se zlepšit jejich základní vlastnosti. Jak bylo popsáno v úvodu, jedná se nám hlavně o tuhost, pracovní/zástavbový prostor, přesnost a lehkost. Sériová struktura má problémy s tuhostí a tím i s přesností. Naopak PKM mají problémy s pracovním/zástavbovým prostorem. Pro nás zajímavou variantou jsou vláknové PKM, které tento problém nemají, vyvstává u nich však spousta jiných problémů, které je třeba vyřešit.

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

U sériových struktur, při zpřesňování přídavným odměřováním, často dochází k zahrnutí do řídicího algoritmu pouze poddajnosti převodovek. Ovšem studie prokázaly, že poddajnost ramen je taktéž nezanedbatelná. Proto byly vyvinuty postupy, které poddajnost ramen započítávají. Jednalo se především o matematické modely, které předpočítávají reznou sílu u obráběcích robotů a následně ji kompenzují motory pouze u jednoho

výrobního postupu. Nebo se jednalo o výrazné omezení pracovního prostoru přidanou strukturou. Dále byly úspěšné projekty, u kterých byly do řízení zahrnuty pouze poddajnosti převodovek a poddajnosti ramen dorovnával obrobek upnutý na aktivní stůl. Ovšem komplexní odměřování podél struktury robota a zahrnutí všech jeho poddajností do jednoho řídicího algoritmu je zatím otevřené téma, které se s vývojem odměřovací techniky stále více diskutuje.

U vláknových paralelních struktur, které se začínají stále více využívat, je problémů s řešením nepřesnosti koncového členu ještě daleko více než u sériových struktur. Je to především proto, že vlákna přináší do systému nižší frekvence, než na která jsou uživatelé tuhých strojů zvyklí a velice těžko se modelují. Dále také z důvodu pohánění platformy na velkou vzdálenost, problémy se zpětnovazebním řízením (odměřováním koncového členu) a v neposlední řadě nutnosti mít stroj s redundancí pohonů (díky možnému namáhání lan pouze tahem), což vede ke složitějším zákonům řízení. Jak bylo popsáno v předešlé kapitole, vývoj v této oblasti jde velice rychle kupředu a přístupy ke zpřesňování se ubírají od čím dál dokonalejších modelů, přes přídavné odměřování až po přidané struktury. Ovšem oblast přidaných struktur a zapojení zpětnovazebního řízení je nejméně prozkoumanou. Zpětnovazební řízení přináší omezení pracovního prostoru, ale může přinést i spoustu pozitiv. Ať už se jedná o kalibraci vláknového mechanismu nebo o jeho výrazné zpřesnění a odrušení kmitání v lanech.

Na základě provedeného rozboru současného stavu poznání si tato disertační práce klade za cíl vyvinout a rozpracovat konkrétní koncepty využití přídavných senzorů a přídavných aktuátorů pro zlepšení dosažitelné přesnosti a pracovní rychlosti robotů a manipulátorů při důrazu na rozsah a variabilitu pracovního prostoru. Koncept přídavných senzorů je zkoumán a vyvíjen pro sériové robotické mechanismy s obecně velkým pracovním prostorem. Koncept přídavných aktuátorů pak pro paralelní vláknové (lanové) robotické mechanismy, které v kategorii paralelních mechanismů nabízejí obvykle největší pracovní prostor se snadnou adaptivitou. Pro naplnění tohoto globálního cíle jsou vytyčeny následující dílčí cíle.

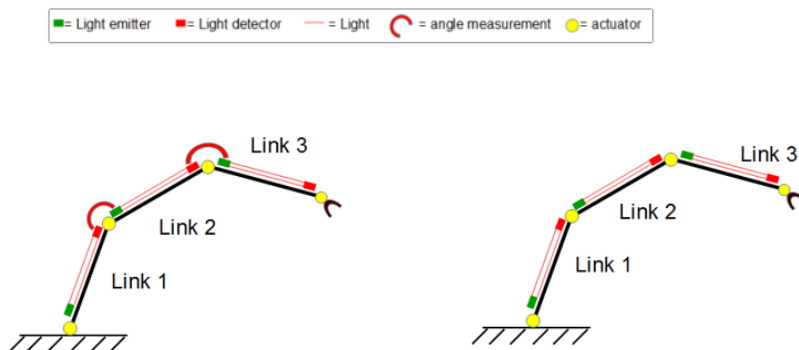
1. Navrhnout a zkoumat vhodné koncepty přídavného odměřování pro sériovou strukturu robotického typu, které zlepší dosažitelnou přesnost řízení pohybu a neomezí pracovní prostor.
2. Vyvinout vhodné řízení s použitím vybraného přídavného odměřování sériové struktury, otestovat ho na detailním simulačním dynamickém modelu a částečně i na experimentálním demonstrátoru.

3. Navrhnout a rozvinout koncept přidavných aktuátorů pro zlepšení přesnosti řízení pohybu výkonného členu lanového paralelního mechanismu při rychlých pohybech, včetně optimalizace mechanických vlastností vzniklé přidané struktury.
4. Vyvinout vhodné řízení vícestupňového lanového mechanismu s přidavnými aktuátory a otestovat ho na detailním simulačním dynamickém modelu a částečně i na experimentálním demonstrátoru.

3. METODY ZPRACOVÁNÍ

3.1. Sériová struktura

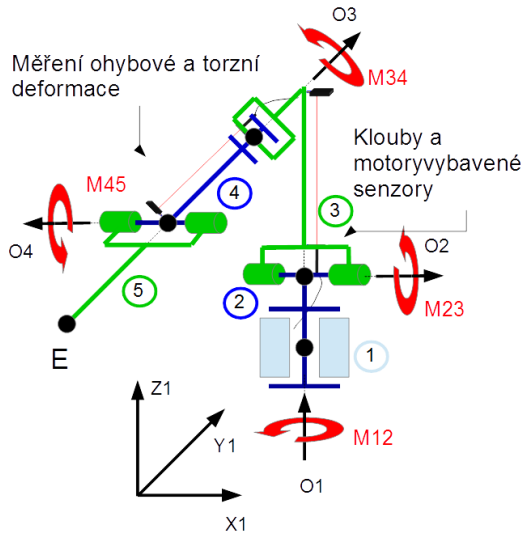
Nevýhody používání robotů se sériovou kinematickou strukturou byly zmíněny v úvodu. Je to především poddajnost ramen a převodovek. Tyto nevýhody jsou však kompenzovány velkým rozsahem pracovního prostoru, větší pohyblivostí a zpravidla také nižšími pořizovacími náklady. K tomu, aby se zlepšila jejich přesnost, se využívá několik zkoumaných přístupů (kapitola 2.1 v disertační práci). Proto byl vymyšlen přístup, který tyto metody spojuje. Snahou je odměřit, ať už přímo nebo nepřímo, poddajnosti robota a následně je v reálném čase kompenzovat skrze řízení motory. Tento přístup je velice komplexní a pro použití v této práci bylo připraveno několik metod odměřování. Při výsledném výběru metody je třeba brát v úvahu nejen její přínos k přesnosti robota, ale i její omezení pracovního prostoru (Obr. 1) [23]



Obr. 1 Rovinný koncept měření jednotlivých prvků ramene

Pro experimenty byla vybrána měřicí technika, která se sestává z 4-kvadrantových diod, tvořených PSD prvky, a vhodných laserových zdrojů. Jelikož kvadrantové diody mohou měřit pouze změnu ve dvou směrech, musíme na každé rameno použít dvě sestavy čidlo-laser, aby bylo možné odměřovat jak ohyb nosníku, tak krut.

Pro zpřesnění koncového bodu robota bylo nejprve nutné vytvořit komplexní dynamický poddajný model robota [24], na kterém byla teorie řízení zkoušena. V rámci diplomové práce Ing. Ladislava Mráze, PhD vznikl software na modelování poddajných struktur, který jsme použili [25]. Tento software umožňuje modelovat poddajné struktury s velkou přesností a variabilitou. Toto opatření je z důvodu bezpečnosti, protože rozsah pohybu robota a jeho dynamika jsou při zkoušení reálného řízení velice nebezpečné. Pro zjednodušení konstrukce a zmenšení zástavbového prostoru experimentátoru byl model redukován na kompozici se 4 DOF (Obr. 2).



Obr. 2 Redukovaný model experimentátoru

Dynamický model byl vytvořen pomocí kompozitní metody pro poddajný mechanismus. Pro poddajná tělesa byl použit rekurzivní formalismus a výsledný systém pohybových rovnic je uveden v (1)

$$\begin{bmatrix} M^R(q, E) & M^{RF}(q, E) & \mathbf{0} \\ (M^{RF}(q, E))^T & M^F(q, E) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & M^M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \ddot{\mathbf{E}} \\ \ddot{\mathbf{q}}_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q^R(q, \dot{\mathbf{q}}, E, \dot{\mathbf{E}}, \mathbf{q}_M, \dot{\mathbf{q}}_M) \\ Q^F(q, \dot{\mathbf{q}}, E, \dot{\mathbf{E}}, \mathbf{q}_M, \dot{\mathbf{q}}_M) \\ Q^M(q, \dot{\mathbf{q}}, E, \dot{\mathbf{E}}, \mathbf{q}_M, \dot{\mathbf{q}}_M) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Symbol M^R reprezentuje část matice hmotnosti příslušná „tuhému“ pohybu, M^F je část matice hmotnosti příslušnou „poddajnému“ pohybu a M^{RF} reprezentuje vztahy mezi oběma výše popsanými částmi. Symboly na pravé straně rovnice odpovídají generalizovaným silovým vektorům.

Poddajné převodovky jsou realizovány jako ideální torzní pružiny. Jsou použity tři sady souřadnic. Kloubové souřadnice $\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3, q_4]^T$, modální souřadnice \mathbf{E} popisující deformace ramen $\mathbf{E} = [\mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3]$. Vektory \mathbf{e}_2 a \mathbf{e}_3 reprezentují deformace ramen 3 a 4 (při indexaci se nebere v potaz základní rám) a souřadnice popisují pozici motoru $\mathbf{q}_m = [q_{1m}, q_{2m}, q_{3m}, q_{4m}]^T$. Parametry modelu musely být odhadnuty na základě znalosti rozměrů robota a konstrukčního materiálu. Vlastní tvary poddajných ramen byly získány pomocí MKP analýzy [26].

3.1.1. Řízení metodou výpočtu momentů (Computed Torques)

Computed Torques realizují linearizaci dynamického systému prostřednictvím inverzní dynamiky. Tento přístup funguje v celém pracovním prostoru mechanismu, ale na druhé straně klade vysoké hardwarové požadavky, pokud chceme provést výpočet v reálném čase.

Do systému jsou zadány kinematické charakteristiky pohybu koncového efektoru v kartézských souřadnicích (2). Pomocí inverzní kinematiky získáme kinematické charakteristiky pohybu motoru, které se dále používají v inverzní dynamice (souřadnice kloubů (3)).

$$\mathbf{q}_e = [x_e, y_e, z_e]^T \quad (2)$$

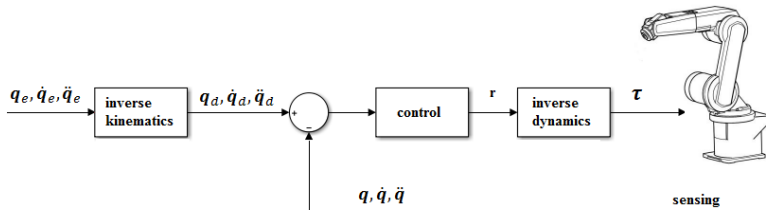
$$\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3, q_4]^T \quad (3)$$

Inverzní dynamika je systém rovnic. Nezávislé proměnné popisují kinematiku vybraného pohybu motoru ($\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$) [27]. Závislé proměnné jsou hnací síly (nejčastěji kroutící momenty), které tento pohyb realizují $\boldsymbol{\tau} = [M_1, M_2, M_3, M_4]^T$. V těchto rovnicích jsou zahrnuty hmotnostní a rozměrové charakteristiky manipulátoru.

Ze získaných točivých momentů se vypočítají elektrické proudy pro každý motor. Potom motory provedou daný pohyb.

Bohužel neznáme přesné hmotové charakteristiky, přesné odchylky ramen manipulátorů a existující další vnější vlivy, takže pohyb manipulátoru je odlišný. Proto musíme použít některé senzory na stroji a regulátory zpětné vazby. Z tohoto důvodu bude dalším přístupem neuro-fuzzy kalibrace robotů, aby se stanovil přesný kinematický popis ramen manipulátoru.

Kompletní schéma je na Obr. 3.



Obr. 3 Computed Torques kompletní schéma

Inverzní dynamika ramena robota (4) je odvozena pomocí Newton Eulerových rovnic.

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1} \cdot \mathbf{Q}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}). \quad (4)$$

Všechny části jsou považovány za pevná tělesa. Používáme zde pouze klasické kloubové souřadnice pro popis polohy ramene

$\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3, q_4]^T$. Hnací momenty $\boldsymbol{\tau} = [M_1, M_2, M_3, M_4]^T$, které realizují pohyb $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$, se počítají z (4).

3.1.2. Lineární systém pro HIFOO řízení

Pro lepší přehled je uveden rozpis jednotlivých prvků stavového systému s uvedenými všemi signály ze senzorů [28]. Každá převodovka reprezentuje 4 stavy, které jsou:

Natočení ramena robota \mathbf{g}_i , rychlost ramena robota $\dot{\mathbf{g}}_i$, natočení motoru \mathbf{g}_{mi} , rychlost motoru $\dot{\mathbf{g}}_{mi}$. Kde i značí pozici převodovky $i \in \langle 1:4 \rangle$. Pro poddajná ramena jsou uvedeny následující stavy:

- Čtyři vlastní tavary natočení \mathbf{E}_i ($\dim[\mathbf{E}_i (*)] = 4 \times 1$)
- Čtyři vlastní tavary rychlosti $\dot{\mathbf{E}}_i$ ($\dim[\dot{\mathbf{E}}_i (*)] = 4 \times 1$)

Poté stavový vektor ($\dim[\mathbf{x} (*)] = 36 \times 1$) je:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{g}_i \quad \mathbf{E}_3 \quad \mathbf{E}_5 \quad \dot{\mathbf{g}}_i \quad \dot{\mathbf{E}}_3 \quad \dot{\mathbf{E}}_5 \quad \mathbf{g}_{mi} \quad \dot{\mathbf{g}}_{mi} \quad \mathbf{I}_i)^T \quad (5)$$

Je zde přidán ještě vektor řídicích proudů \mathbf{I}_i . Výstupní vektor ($\dim[\mathbf{y} (*)] = 18 \times 1$) lze napsat jako:

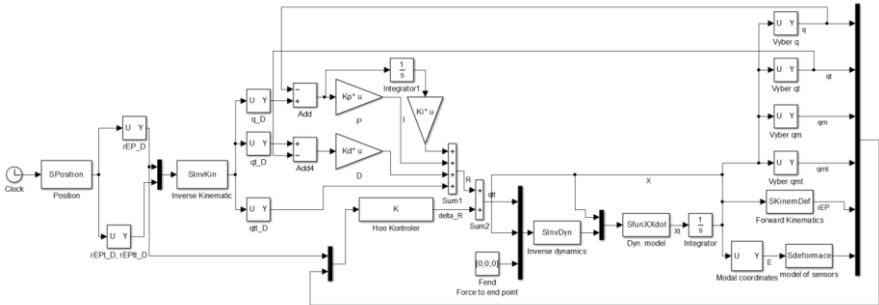
$$\mathbf{y} = (\dot{\mathbf{g}}_{mi} \quad \mathbf{g}_i \quad d_{3x} \quad d_{3y} \quad d_{4x} \quad d_{4y} \quad \mathbf{R}_{ep1-3} \quad \boldsymbol{\varphi}_{ep1-3})^T \quad (6)$$

Výstupní vektor \mathbf{y} se skládá ze čtyř stavů odpovídajících rychlostem motorů $\dot{\mathbf{g}}_{mi}$, čtyř stavů natočení ramene \mathbf{g}_i , naměřené odchylky na rameni číslo 3 v x -ové ose d_{3x} a y -ové ose d_{3y} , měřené odchylky na rameni číslo 4 v x -ové ose d_{4x} a y -ové ose d_{4y} , poloha koncového bodu v kartézských souřadnicích \mathbf{R}_{ep1-3} a tří natočení koncového bodu $\boldsymbol{\varphi}_{ep1-3}$ [29].

Vektor vstupů ($\dim[\mathbf{u} (*)] = 4 \times 1$) je

$$\mathbf{u} = (\mathbf{I}_i)^T \quad (7)$$

Kompletní architektura použité kombinace CT – H^∞ pro ladění regulačních zákonů před experimentální implementací je na Obr. 4 [30]

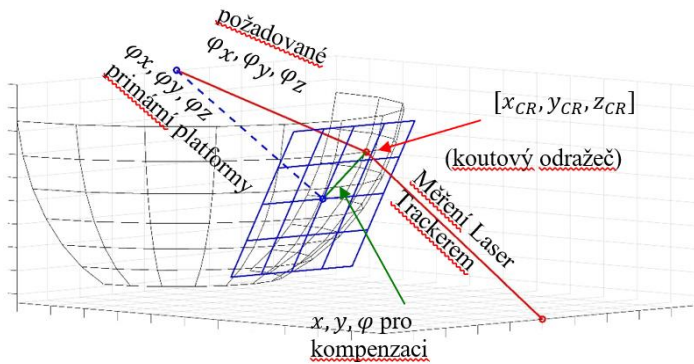


Obr. 4 Konfigurace řízení Computed Torques plus metoda kompenzace H^∞

3.2. Víceúrovňový experimentální demonstrátor

Kabelový sférický demonstrátor QuadroSphere byl znovu sestaven a pro první verzi aktivní platformy bylo použito 6 dostupných piezoelektrických aktuátorů (PSA) PST150/7/60 VS12 (Piezomechanik GmbH). Byla připravena krychlová aktivní platforma s 6 DOF [31]. Lze uvažovat o různých koncepcích korekcí pohybu sférického mechanismu sekundární platformou. Aktivní platforma se 6 DOF přidanými do mechanismu s 3 DOF nabízí nejen opravu dynamických pohybových chyb primárního mechanismu poháněného kabely, ale také opravy geometrických chyb struktury mechanismu (odchytky od ideální sférické kinematiky). Bohužel parametry piezo - aktuátorů (tuhost, maximální zdvih, rozsah kmitočtu atd.) použité pro tyto první experimenty byly dány a jejich optimálnost pro demonstrátor nebyla zaručena. Nejdůležitějším výsledkem prvních experimentů bylo to, že maximální zdvih (60 μm) dostupných piezoelektrických pohonů nestačil k opravě chyb při polohování primární plošiny poháněné kabely. Využití mechanicky zesílených piezo – aktuátorů (APA) (konkrétně typu APA 400MML od Cedrat Technologies) s maximálním zdvihem 300 μm bylo nakonec po simulacích vybráno jako optimální řešení. Limity finančních prostředků na experimenty vedly k rozhodnutí použít pouze 3 nové piezo – aktuátory. Primární sférický demonstrátor QuadroSphere má 3 DOF, sekundární přídavný mechanismus má nově také 3 DOF pro korekci pohybu. Protože však cílem výzkumu a experimentů s demonstrátorem nebyl v žádném případě vývoj konkrétního zařízení, ale ověření principu víceúrovňového

řízení struktury, nebylo toto snížení problémem [32]. Formulace cíle korekce pohybu pro toto druhé experimentální uspořádání je popsáno následovně.



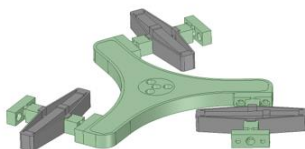
Obr. 5 Schéma řídicích souřadných systémů a souřadnic

Požadovaná poloha mechanismu je předepsána pomocí tří úhlů $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$. Koncový efektor je představován koutovým odražečem (CR). Poloha CR se měří LT. LT měří kartézské souřadnice CR $[x_{CR}, y_{CR}, z_{CR}]$. Všimněte si, že inverzní transformace z $[x_{CR}, y_{CR}, z_{CR}]$ na $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ není jednoznačná, protože existuje nekonečné množství řešení představujících rotaci kolem osy mezi středem koule a CR. Proto se měří pouze prostorová orientace této osy. Lze si představit, že osa znázorňuje např. laserový paprsek nebo dalekohled, který musí být přesně zaměřen. Z tohoto hlediska není rozdíl, pokud CR leží na kulové ploše nebo kdekoliv jinde na ose. Primární kabelová plošina nedosahuje přesně požadované polohy. Pomocí rovinných sekundárních korekcí přidané platformy je možné posunout CR do požadované polohy na ose, viz Obr. 5. Navíc, protože umístění bodu v rovině je problémem 2 DOF a naše platforma má 3 DOF, je možné optimalizovat řešení s ohledem na ideální rozdělení zdvihů mezi pohony. První úroveň optimalizace rovinného mechanismu byla zaměřena na návrh kinematických parametrů – velikost a tvar platformy, umístění pohonů. Cílová funkce zohlednila velikost pracovního prostoru, dexteritu a tuhost v rovině mechanismu. Dosažitelný pracovní prostor každého kandidáta byl vypočítán dopřednou kinematikou pomocí rozsahu pohybu APA. Výsledky byly získány ve formě cloudu (oblaku) polohových trojic $[x, y, \varphi]$ představujících 3 DOF rovinné platformy. Kritériem optimalizace pracovního

prostoru byla maximalizace průměru d koule, která je zapsána v uvedeném oblaku bodů. Střed koule definuje počáteční polohu plošiny. Dexterita D byla vypočtena pro všechny body uvnitř koule se dvěma optimalizačními cíli – nejlepší průměrnou hodnotou \bar{D} a nejmenší kvadratickou odchylkou $\sigma^2(D)$ ve všech pozicích. Tuhost S v rovině mechanismu byla vypočtena jako statická rovnováha v definovaných polohách při aplikaci jednotkových zatížení ve všech DOF. Cíl byl podobný dexteritě – nejlepší průměrná hodnota \bar{S} a nejmenší kvadratická odchylka $\sigma^2(S)$. Všechna kritéria byla vynásobena váhovými koeficienty C_i a sčítána za účelem vytvoření cílové funkce CF (8).

$$CF = C_1 \frac{1}{d} + C_2 \frac{1}{\bar{D}} + C_3 \sigma^2(D) + C_4 \frac{1}{\bar{S}} + C_5 \sigma^2(S) \quad (8)$$

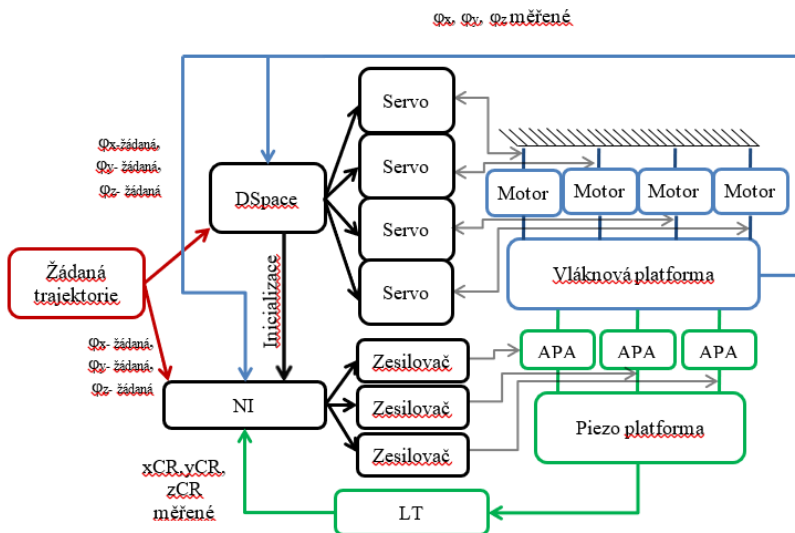
Druhá úroveň optimalizace je MKP analýza přídatné platformy 3 DOF, která byla provedena pro všechny podrobné prostorové modely, zde pouze vybraná varianta platformy (Obr. 6)



e) IV. konfigur., APA v rovině

Obr. 6 Vybraný model pro analýzu FEM přídatné platformy 3 DOF.

Schéma celého experimentu z hlediska signálů a řízení je na Obr. 7. Implementace se setkává s omezením experimentálního hardwaru. Server dSpace 1103 používaný pro ovládání kabelové platformy nemůže číst výstupní signál LT. Proto byla kontrola celého experimentu rozdělena do dvou větví. První z nich je ovládání kabelové platformy prováděné na ovladačích dSpace a AC serv. Druhým je ovládání piezo platformy prováděné na NI PXI 8464/2. Řízení celého experimentu s NI není možné, protože nesplňuje požadavky na výpočetní výkon [33].



Obr. 7 Schéma víceúrovňového experimentálního demonstrátoru – řízení a tok signálů

3.2.1. Kalibrace experimentálního demonstrátoru

Po finální instalaci přídavné piezo – platformy byl kalibrován celý víceúrovňový demonstrátor. Kalibrační postup je založen na modifikované Newtonově metodě pro přeúčtenou množinu rovnic [34]. Tyto vazbové rovnice jsou funkcemi změřených souřadnic v kloubech \mathbf{s} , rozměrů mechanismu \mathbf{d} a koncové polohy efektoru \mathbf{v} . Pro j -tou polohu v pracovním prostoru je lze zapsat do tvaru

$$\mathbf{f}_j = \mathbf{f}(\mathbf{d}, \mathbf{s}_j, \mathbf{v}_j) = \mathbf{0}. \quad (9)$$

Skutečné rozměry mechanismu \mathbf{d} se liší od jejich konstrukčních hodnot $\hat{\mathbf{d}}$, ale zůstávají konstantní pro všechny pozice v pracovním prostoru. Proto jsme pro n změřených pozic dostali přeúčtený systém rovnic. Je použit první člen Taylorova rozvoje s ohledem na kalibrované (neznámé) rozměry, které máme

$$\mathbf{F}(\hat{\mathbf{d}}, \mathbf{S}, \mathbf{V}) + \mathbf{J}_d \delta \mathbf{d} + \dots = \mathbf{0}, \quad (10)$$

kde J_d je Jacobian matice parciálních derivací s ohledem na skutečné rozměry d . Korekci rozměrů lze tedy vypočítat v i -tém iteračním kroku jako

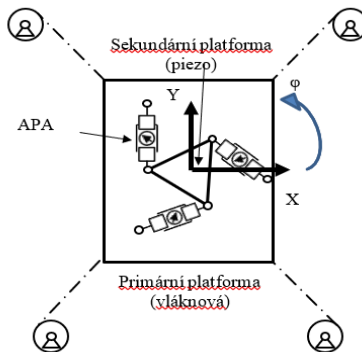
$$\delta d_i = -(J_{d_i}^T J_{d_i})^{-1} J_{d_i}^T F(d_i, S, V) = 0, \quad (11)$$

a následně vypočítat nové hodnoty rozměrů jako

$$d_{i+1} = d_i + \delta d_i. \quad (12)$$

Absolutní kartézský souřadný systém byl definován LT a kinematický model demonstrátoru byl popsán pomocí 21 parametrů ve formě transformačních matic. Celkem bylo měřeno 125 poloh a pro každou určena odchylka kalibrovaného modelu od měření.

Syntéza H^∞ s předdefinovanou strukturou regulátoru je metoda optimalizace ve frekvenční oblasti pro ladění regulátoru. Je třeba znovu zdůraznit, že ovládání piezo – platformy probíhá odděleně od kabelové platformy. Proto je nezávislé na ovládání kabelové platformy. První myšlenkou bylo navrhnout regulátor pomocí modelu piezoelektrické platformy pouze s experimentálně změřenými hodnotami parametrů. Výsledky ukázaly, že u kabelů předepjatých 50 N mají setrvačné síly z piezoelektrické platformy téměř zanedbatelný účinek na kabelovou plošinu. Regulátor funguje dobře a koriguje odchylku od požadované polohy, ale nízké frekvence z kabelů nejsou ovlivněny. Proto musí být základní model kabelové platformy také součástí návrhu, aby do syntézy zahrnoval vlastnosti kabelové platformy (Obr. 8) [35], [36].



Obr. 8 Model víceúrovňového mechanismu pro syntézu řízení

Pro účely syntézy řízení pomocí H^∞ (Obr. 9) byl matematický model systému linearizován. Má dvanáct stavů [37]:

$$X = [x_c, y_c, \varphi_c, \dot{x}_c, \dot{y}_c, \dot{\varphi}_c, x_p, y_p, \varphi_p, \dot{x}_p, \dot{y}_p, \dot{\varphi}_p] \quad (13)$$

kde index „c“ odpovídá kabelové platformě a index „p“ piezo platformě. Existuje pět vstupů

$$U = [F, M, U_1, U_2, U_3]. \quad (14)$$

F a M znamenají rušící sílu a moment působící na vláknovou platformu a U_1, U_2, U_3 jsou vstupní napětí pro jednotlivé APA. Vstupy a výstupy matematického modelu jsou navrženy jako odchylka od původní polohy v globálním souřadném systému. Výstupy modelu jsou:

$$Y = [x_c, y_c, \varphi_c, x_p, y_p, \varphi_p]. \quad (15)$$

Tento linearizovaný model byl transformován do syntaxe H^∞ . Úhlová poloha plošiny je nastavena jako volný parametr, aby se minimalizoval zdvih piezoelektrických prvků. Požadovanou trajektorii lze tudíž popsat pouze se dvěma referenčními sledovacími signály. Referenční vstupy systému jsou následující

$$[\Delta x_p; \Delta y_p]. \quad (16)$$

Výkonové výstupy jsou

$$[e_x; e_y], \quad (17)$$

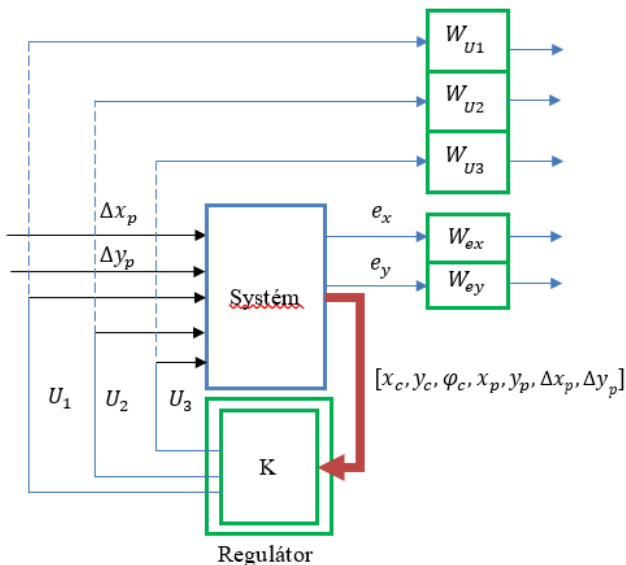
měřené hodnoty

$$Y = [x_c, y_c, \varphi_c, x_p, y_p] \quad (18)$$

výstupy z regulátoru

$$[U_1 \ U_2 \ U_3]. \quad (19)$$

Což odpovídá napěťovým vstupům pro jednotlivé APA



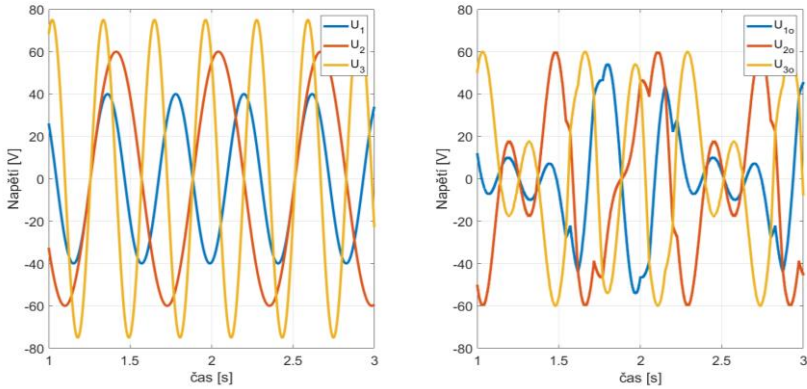
Obr. 9 Schéma návrhu regulátoru

3.2.2. Minimalizace zdvihů piezoelektrických pohonů

Řídicí úloha piezo ovládané platformy má dva stupně volnosti, ale existují tři aktuátory pro provedení této úlohy. Z tohoto konceptu je piezo platforma přeurčena. To má kořeny v malém rozsahu pohybu APA. Jeden další aktuátor má význam při snižování rozsahu pohybu jednotlivých APA. Toho lze dosáhnout díky rozdělení dvou stupňů pohybu do tří aktuátorů a zapsat řídicí napětí ve formě vektoru s danou strukturou

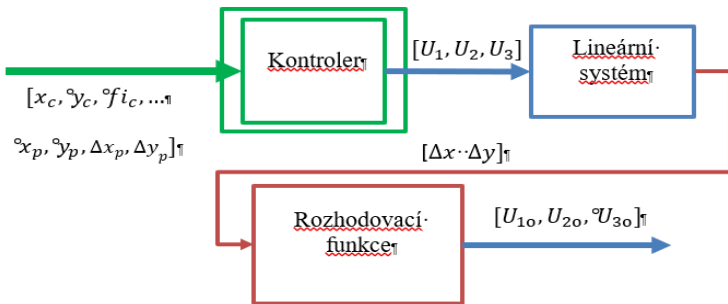
$$F = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{u}_2 \\ \mathbf{u}_3 \end{bmatrix} F = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{u}_2 \\ \mathbf{u}_3 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

Pro vyhodnocení byly na každý vstup aplikovány tři různé sinové vlny. Jsou to vstupy $(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3)$ do stavového modelu piezo ovládané platformy, výstupy (x, y) jsou pak nastaveny jako vstupy do rozhodovací funkce, která určuje nové optimální vstupy $(\mathbf{u}_{1o}, \mathbf{u}_{2o}, \mathbf{u}_{3o})$ viz Obr. 11, a jsou testovány na stejném modelu stavového prostoru. Výsledky jsou uvedeny na Obr. 10.



Obr. 10 Optimalizované napětí

Konečná struktura řízení s rozhodovací funkcí je uvedena níže (Obr. 11).



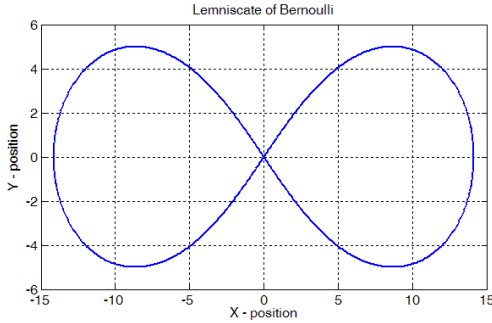
Obr. 11 Schéma s rozhodovací funkcí a optimálním napětím

4. Experimenty

4.1. Sériový demonstrátor – výsledky

Z důvodů bezpečnosti a kompaktnosti experimentu byl vytvořen 4 - osý sériový experimentální demonstrátor, který byl osazen odměřovací technikou.

Výsledné regulátory byly použity na testovací trajektorii. Za testovací trajektorii byla zvolena Bernoulliho lemniskáta (Obr. 12).

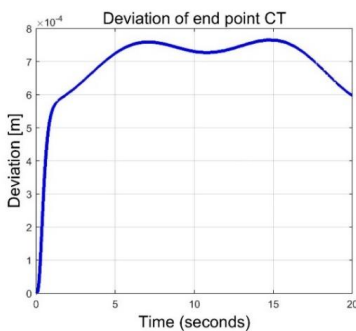


Obr. 12 Testovací trajektorie

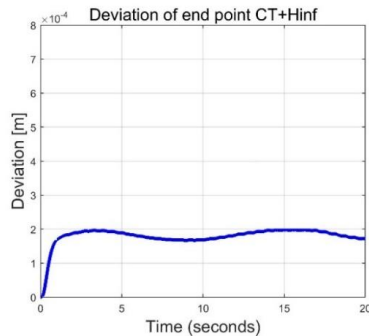
Trajektorie byla zvolena jako rovinný prvek kolmý na osu z základního souřadného systému. Díky tomu je možné zajistit stálý kontakt koutového odražeče a laserového paprsku z LT.

Je třeba podotknout, že experimentální demonstrátor robota byl navrhnout extrémně poddajný, aby na něm byly tyto poddajnosti dobře měřitelné. Nicméně z Obr. 13 je dobře patrné, že výsledná odchylka je zdatně menší při zahrnutí poddajnosti ramen do syntézy řízení.

Na Obr. 13 je uvedeno srovnání obou testovaných řídicích přístupů Computed Torques a ComputedTorques + H^∞ . Výsledná odchylka je počítána jako součet čtverců odchylek v x – ové a y – ové ose.



a) Řízení Computed Torques

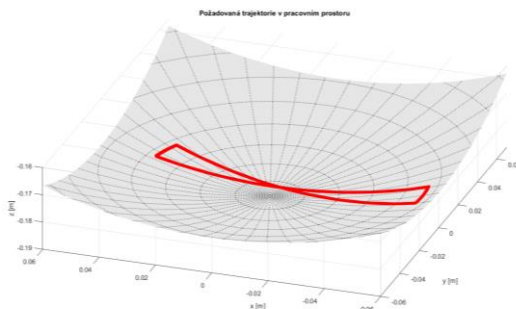


b) Řízení Computed Torques + H^∞

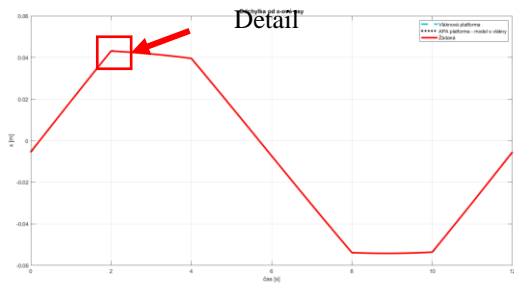
Obr. 13 Odchylka polohy koncového efektoru na zkušební dráze

4.2. Víceúrovňový experimentální demonstrátor výsledky

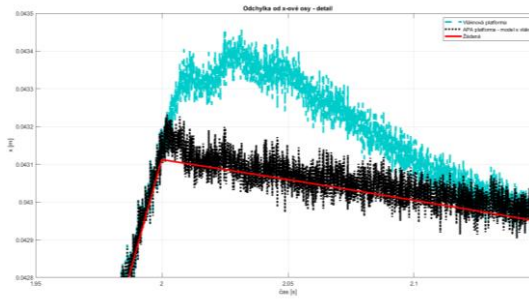
Jako experimentální trajektorie, pro měření na demonstrátoru, byla vybrána trajektorie č. 1 (Obr. 14). Je měřen CR na piezo platformě, který je na grafech označen jako APA platforma – model s vlákny (Obr. 15, Obr. 16, Obr. 17, Obr. 18). Poloha vláknové platformy (označená jako vláknová platforma) je dopočítávána pomocí kalibračních rovnic.



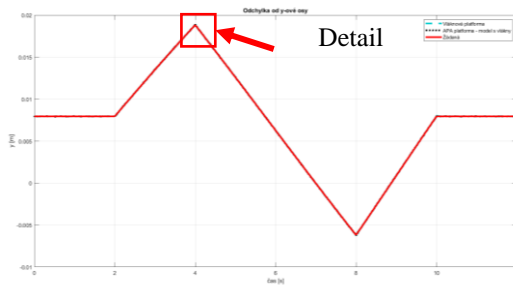
Obr. 14. Požadovaná 1 trajektorie



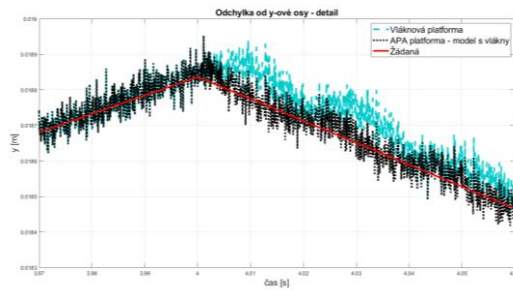
Obr. 15 Experiment – časový průběh na ose X



Obr. 16 Odchylka od x – ové osy – Detail



Obr. 17 Experiment – časový průběh na ose Y



Obr. 18 Odchylka od y – ové osy – Detail

5. Závěr

Disertační práce byla zaměřena na možnosti zlepšení vlastností mechanismů na základě redundantního odměřování či aktuování. Po analýze problému a dosavadního poznání v této oblasti byl formulován poznatek, že jsou dvě velké skupiny strojů. První skupina potřebuje ke zlepšení svých vlastností primárně redundantní odměřování a druhá skupina, které zase více pomůže redundantní aktuování. Pro obě tyto skupiny byly vybrány zástupci mechanismů pro podrobnější analýzu. Pro redundantní odměřování jsou to roboti se sériovou strukturou a pro redundantní aktuování roboti s paralelní kinematickou strukturou, přesněji vláknové mechanismy. S těmito znalostmi byly definovány cíle práce, které definují kroky u jednotlivých skupin pro dosažení požadovaného zlepšení přesnosti.

Prvním cílem přímo vycházejícím z požadavku zpřesnění koncového členu robota pomocí přídavného odměřování bylo navržení konceptu takového odměřování, aby byla co nejvíce zachována jeho pohyblivost a byl co nejméně omezen jeho pracovní prostor. [V kapitole 4 (v disertační práci) je představena sériová struktura a podrobněji popsané její nedostatky. V podkapitole 0 jsou představeny možné koncepty redundantního odměřování a srovnány jejich přednosti a nedostatky. Na základě toho byl vybrán koncept odměřování podél struktury robota, co nejméně omezujícího pracovní prostor. Zde je nejmenší riziko přerušení laserového paprsku odměřování, a tím i ztráty dat. V podkapitole 4.1 (v disertační práci) je představena vhodná odměřovací technika a principy jejího modelování a použití.

Druhým cílem, který na předchozí přímo navazuje, bylo navrhnout vhodnou syntézu řízení zohledňující zvolený koncept odměřování včetně přidaných senzorů. Pro tento úkol bylo potřeba vytvořit detailní poddajný simulační model obsahující přídavné odměřování, protože zkoušet syntézu řízení na reálném demonstrátoru přímo je velice nebezpečné. Proto byl představen detailní simulační dynamický poddajný model demonstrátoru s přídavným odměřováním (podkapitola 4.2 (v disertační práci)). Tento model popisuje reálný demonstrátor, na kterém byla výsledná syntéza řízení odzkoušena. Syntéza řízení, která se běžně v praxi používá, je představena v podkapitole 4.4 (v disertační práci) pomocí vypočítaných točivých momentů (Computed Torques) a následně je obohacena o regulátor navržený metodou H^∞ v podkapitolách 4.7-4.9 (v disertační práci). Regulátor navržený pomocí vypočtených točivých momentů se používá na řízení motorů s jejich primární zpětnou vazbou. Regulátor optimalizovaný pomocí H^∞ zahrnuje přídavné odměřování za převodovkami a signály z laserových odměřovačů,

měřící poddajnosti ramen. Výsledky z modelu i z reálného demonstrátoru dosahují uspokojivých výsledků a přesnost demonstrátoru je s přídavnými čidly zlepšena přibližně čtyřikrát (podkapitola 4.11 (v disertační práci)). Je zde třeba podotknout, že demonstrátor byl navržen záměrně poddajný, aby bylo zlepšení co nejvíce patrné.

Třetí dílčí cíl se zaměřil již na mechanismy, kterým více než nadbytečné odměřování pomůže dodatečné aktuování. Je zaměřen na vláknové paralelní mechanismy, kde je nadbytečné odměřování složité a dochází k velkému omezení jejich pracovního prostoru. Na základě této znalosti byl třetí cíl zaměřen na návrh vhodného konceptu nadbytečného aktuování, které by dosáhlo zlepšení polohování vláknových mechanismů při rychlých pohybech. To je spojeno s návrhem a optimalizací mechanických vlastností přídavné platformy. Prvotně je představen demonstrátor lanového mechanismu Hexasphere, na kterém budou probíhat experimenty (podkapitola 5.3 (v disertační práci)3.2). V této podkapitole je rovněž prezentováno návrh a optimalizace mechanických vlastností přidané struktury pro co nejlepší funkčnost při řešení daného problému sledování trajektorie.

Čtvrtý dílčí cíl přímo navázal na třetí a klade si za úkol navrhnout vhodnou syntézu řízení pro přidanou strukturu na simulačním modelu a následně regulátor otestovat i na reálném demonstrátoru. Pro detailnější popis demonstrátoru byl nejprve představen princip kalibrace vláknového mechanismu s externím odměřováním koncového členu (podkapitola 5.4.1 (v disertační práci)). Tento kalibrovatelný model byl použit při řízení a při syntéze regulátoru. Syntéza regulátoru je dělána pomocí optimalizace H^∞ a je představena v podkapitole 5.4.2 (v disertační práci), jak pro samotnou přidanou strukturu, tak pro přidanou strukturu s modelem vláknové platformy. V další podkapitole je představena detailní implementace řízení. Z principu přidané platformy a požadavků na redukci rovinných odchylek se třemi aktuátory můžeme říci, že platforma je přeúčtovaná. Jelikož piezoelektrické pohony, které jsou pro platformu použity, mají malý zdvih, je v podkapitole 5.5.1 představen princip využití nadbytečného pohonu k redukci zdvihů všech piezoelektrických pohonů. Výsledný regulátor je testován na reálném demonstrátoru Hexasphere. Výsledky, které vykazují velké zlepšení koncového členu vláknového mechanismu, jsou představeny v podkapitole 5.6 a 5.7 (v disertační práci). Z výsledků je patrné, že navržená přídavná struktura zlepšila sledování požadované polohy zhruba o 60 % v závislosti na rychlosti pohybu a složitosti požadované trajektorie.

Všechny vytyčené cíle disertační práce byly splněny. Disertační práce pokryla problematiku od teoretického výzkumu přidaných aktuátorů a senzorů, přes optimalizaci jejich struktur, pohonů a senzorů až po výzkum vhodných metod řízení a jejich implementaci na experimentální demonstrátory.

6. Citovaná literatura

- [1] N. Vahrenkamp a T. Asfour, „Representing the robot’s workspace through constrained manipulability analysis,“ *Auton Robot*, sv. 38, pp. 17-30, 2015.
- [2] R. Fareh, M. Saad a M. Saad, „Distributed control strategy for flexible link manipulators,“ *Robotica*, p. 33, 2014.
- [3] S. Lahouar, E. Ottaviano, S. Zeghou, L. Romdhanec a M. Ceccarelli, „Collision free path-planning for cable-driven parallel robots,“ *Robotics and Autonomous Systems*, sv. 57, pp. 1083-1093, 2009.
- [4] P. Borgstrom a e. al., „A Cable-Driven Robot With Self-Calibration Capabilities,“ *IEEE Transactions on Robotics*, sv. 29, č. 5, pp. 1005-1015, 2009.
- [5] A. Preumont, *Mechatronics: dynamics of electromechanical and piezoelectric systems*, Dordrech: Springer, 2006.
- [6] T. Müller, „Model-based control of redundantly actuated parallel manipulators in redundant coordinates,“ *Robotics and Autonomous System*, sv. 60, pp. 563-571, 2012.
- [7] M. Valášek a M. Karásek, „Kinematical Analysis of HexaSphere,“ v *Conference Proceedings of Engineering Mechanics*, 2009.
- [8] A. Aflakiyan, H. Bayani a T. M. Masouleh, „Computed Torque Control of a Cable Suspended Parallel Robot,“ v *Proc. of the 3rd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics*, Teheran, 2015.
- [9] A. Pott a V. Schmidt, „On the Forward Kinematics of Cable-Driven Parallel Robots,“ v *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Hamburg, 2015.
- [10] M. A. Khosravi a D. H. Taghirad, „Dynamic Modeling and Control of Parallel Robots With Elastic Cables - Singular Perturbation Approach,“ *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*, sv. 30, č. 3, pp. 694-704, 2014.
- [11] G. Yang, S. K. Mustafa, S. H. Yeo, W. Lin a W. B. Lim, „Kinematic design of an anthropomorphic 7-DOF cable-driven,“ *Front. Mech. Eng.*, sv. 6, č. 1, pp. 45-60, 2011.
- [12] B. Zi, S. Qian a A. Kecskeméthy, „Design and Development of a Reconfigurable Cable Parallel Robot,“ v *Proceedings of The 14th IFToMM World Congress*, Taipei, 2015.
- [13] S. Yeo, G. Yang a W. Lim, „Design and analysis of cable-driven manipulators with variable stiffness,“ *Mechanism and Machine Theory*, sv. 69, pp. 230-244, 2013.
- [14] K. J. Park, „Flexible robot manipulator path design to reduce the endpoint residual vibration under torque constraints,“ *Journal of Sound and Vibration*, sv. 275, pp. 1051-1068, 2004.

- [15] D. Kanaan, W. P. a D. Chablat, „Kinematic analysis of a serial–parallel machine tool: The VERNE machine,“ *Mechanism and Machine Theory*, sv. 44, č. 2, pp. 487-498, 2009.
- [16] L. Yi a Z. Dai, „Dynamic model of redundant hybrid manipulators connected in series by three or more different parallel manipulators with linear active legs,“ *Mechanism and Machine Theory*, sv. 103, pp. 222-235, 2016.
- [17] B. Hu, „Complete kinematics of a serial-parallel manipulator formed by two Tricept parallel manipulators connected in serials,“ *Nonlinear Dynamics*, sv. 78, pp. 2685-2698, 2017.
- [18] G. El-Ghazaly, M. Gouttefarde, V. Creuze a F. Pierrot, „Maximum Wrench Feasible Payload in Cable-Driven Parallel Robots Equipped with a Serial Robot,“ v *Proceedings of IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 2016.
- [19] P. Svatoš, Z. Šika, P. Beneš, H. M. a J. Zavřel, „Cable Driven Mechanisms with Added Piezo Active Platform,“ *Bulletin of Applied Mechanics*, sv. 11, č. 38, pp. 19-24, 2015.
- [20] M. Ying a A. S. Kumar, „Design of a Cable-Driven Arm Exoskeleton (CAREX) for Neural Rehabilitation,“ *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*, sv. 28, 2012.
- [21] Q. Duan, X. Jin a S. Agrawal, „Addition of springs and its impact on cable-driven serial manipulators,“ v *Proceedings of the ASME 2014 IDETC/CIE*, New York, 2014.
- [22] L. Piganì a P. Gallina, „Cable-direct-driven-robot (CDDR) with a 3-link passive serial support,“ *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, sv. 30, pp. 265-276, 2014.
- [23] J. Volech, L. Mráz, Z. Šika a M. Valášek, „Concepts of Robot Accuracy Enhancement by Integrated Redundant Measurements,“ *Bulletin of Applied Mechanics*, sv. 9, č. 33, pp. 12-17, 2013.
- [24] J. Volech, L. Mráz, Z. Šika a M. Valášek, „Model of Flexible Robot with Deformation Detection,“ *Procedia Engineering*, sv. 96, č. 96, pp. 510-516, 2014.
- [25] L. Mráz, *Master Thesis - Symbolické generování pohybových rovnic pro soustavy poddajných těles*, Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2010-01-20.
- [26] Z. Šika, J. Volech, L. Mráz, M. Valášek a P. Beneš, „Modelling and Control Synthesis of Flexible Robot Arm Equipped with Additional Sensors,“ v *MULTIBODY 2015 - Proceedings of the ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics 2015*, Barcelona, 2015.
- [27] Z. Šika, J. Volech, J. Plecháček, L. Mráz, M. Valášek a P. Beneš, „Synthesis of Computed Torques Control of Flexible Robot with Additional Sensors,“ v *Computational Mechanics 2015.*, Špičák, 2015.
- [28] J. Volech a Z. Šika, „Control of Flexible Robotic Arm with Experiments,“ v *20th Workshop of Applied Mechanics - Book of Papers*, Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016.

- [29] L. Mráz, J. Volech, P. Beneš, Z. Šika a M. Valášek, „Control of Serial Robot Concerning Arm Flexibilities,“ *Bulletin of Applied Mechanics*, sv. 10, č. 36, pp. 1-4, 2014.
- [30] J. Volech, Z. Šika, P. Beneš a M. Valášek, „Modelling and Control Synthesis of Flexible Robot Arm Equipped with Additional Sensors,“ v *MULTIBODY 2017 - Proceedings of the ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics 2017*, Praha, 2017.
- [31] P. Svatoš, Optimization and Control of Movement of Fibre Driven Parallel Mechanisms - Ph.D. Thesis (in Czech), Prague: CTU in Prague, 2016.
- [32] J. Volech a Z. Šika, „Control and Design of the Piezoelectric Platform on Top of the Cable Driven Platform,“ v *2016*, Praha: ČVUT FS, Ústav mechaniky, Odbor pružnosti a pevnosti, 22nd Workshop of Applied Mechanics - Book of Papers.
- [33] Z. Šika, P. Beneš, M. Valášek, J. Volech a K. Kraus, „Cable Driven Spherical Mechanism Quadrosphere Enhanced by 3 DOF Piezo-actuated Platform,“ v *MULTIBODY 2017 - Proceedings of the ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics 2017*, Praha: ČVUT, 2017.
- [34] J. Volech, Z. Šika, K. Kraus a P. Beneš, „Calibration of Light Mechanisms to Improve Positioning,“ v *27th Workshop of Applied Mechanics - Proceedings*, Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2019.
- [35] J. Volech, P. Beneš, K. Kraus a Z. Šika, „Model of Planar Cable Driven Mechanism with Active Structure,“ v *21st Workshop of Applied Mechanics -*, Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2016.
- [36] R. Bulín, M. Hajžman a P. Polach, „Nonlinear dynamics of a cable–pulley system using the absolute nodal coordinate formulation,“ *Mechanics Research Communications*, sv. 28, pp. 21-82, 2017.
- [37] J. Volech, Z. Šika, K. Kraus a P. Beneš, „H-inf Control of Additional Piezo-actuated Platform of Cable Mechanism,“ v *33rd conference with international participation Computational Mechanics 2017 - Extended Abstracts*, Špičák, Železná Ruda, 2017.

6.1. Publikace autora k tématu disertační práce

Články v časopisech

- [23] J. Volech, L. Mráz, Z. Šika a M. Valášek, „Concepts of Robot Accuracy Enhancement by Integrated Redundant Measurements,“ *Bulletin of Applied Mechanics*, sv. 9, č. 33, pp. 12-17, 2013.
- [24] J. Volech, L. Mráz, Z. Šika a M. Valášek, „Model of Flexible Robot with Deformation Detection,“ *Procedia Engineering*, sv. 96, č. 96, pp. 510-516, 2014.
- [29] L. Mráz, J. Volech, P. Beneš, Z. Šika a M. Valášek, „Control of Serial Robot Concerning Arm Flexibilities,“ *Bulletin of Applied Mechanics*, sv. 10, č. 36, pp. 1-4, 2014.

Příspěvky na mezinárodních konferencích a seminářích

- [26] Z. Šika, J. Volech, L. Mráz, M. Valášek a P. Beneš, „Modelling and Control Synthesis of Flexible Robot Arm Equipped with Additional Sensors,“ v *MULTIBODY 2015 - Proceedings of the ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics 2015*, Barcelona, 2015.
- [30] J. Volech, Z. Šika, P. Beneš a M. Valášek, „Modelling and Control Synthesis of Flexible Robot Arm Equipped with Additional Sensors,“ v *MULTIBODY 2017 - Proceedings of the ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics 2017*, Praha, 2017.
- [33] Z. Šika, P. Beneš, M. Valášek, J. Volech a K. Kraus, „Cable Driven Spherical Mechanism Quadrosphere Enhanced by 3 DOF Piezo-actuated Platform,“ v *MULTIBODY 2017 - Proceedings of the ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics 2017*, Praha: ČVUT, 2017