VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA | FAKULTA STROJNÍ

Ing. Jakub Mlotek

Tvarově měnitelné segmenty nosných prvků robotických systémů

Shape-changing segments of load- bearing elements of robotic systems

Disertační práce

Školitel:
doc. Ing. Zdenko Bobovský, PhD.

Ostrava 2023

Bibliografický záznam

Autor: Ing. Jakub Mlotek, MLO0006

Název práce: Tvarově měnitelné segmenty nosných prvků robotických systémů

Studijní program: P2346 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2301V013 Robotika

Školitel: doc. Ing. Zdenko Bobovský, PhD.

Akademický rok: 2022/2023

Počet stran: 102

Klíčová slova: segment, změna tvaru, manipulátor, robot, pracovní oblast, deformační oblast

Anotace disertační práce:

MLOTEK, Jakub. *Tvarově měnitelné segmenty nosných prvků robotických systémů*, Katedra robotiky, Fakulta strojní, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 96 stran, 65 obrázků, 26 tabulek, 3 příloh.
Školitel: doc. Ing. Zdenko Bobovský, PhD.

Robotické systémy mají v dnešních výrobních procesech pevné spojovací segmenty mezi klouby. Tyto prvky jsou velmi často vyrobeny z běžně dostupných polotovarů, jako jsou trubky, tyče, odlitky apod. Tyto prvky jsou převážné rovné a jejich tvar a rozměry vymezují pracovní prostor robotického systému. Robotický systém s těmito prvky má pevnou kinematickou strukturu. To přináší vzhledem k požadavkům výhody jako je, dobrá opakovatelnost polohování, nosnost atd. Nevýhodou je, že tyto systémy nejsou flexibilní a většinou slouží jednoúčelově. V případě změny pracovního úkolu může nastat stav, kdy stávající kinematika systému nebude dostatečná nebo optimální. Jedním ze způsobů řešení tohoto problému je změna konfigurace robotického systému a tím pracovního prostoru manipulátoru zvýšením stupně volnosti (DoF) přidáním modulu. Stále častěji se objevují systémy, které nenavyšují počet stupňů volnosti, ale dochází u nich ke tvarové změně spojovacích segmentů. Při vhodné změně tvaru spojovacího segmentu může systém dosáhnout změny pracovního prostoru tak, aby byl dostatečný a optimální pro novou úlohu. Předkládaná disertační práce se zabývá tématem tvarově měnitelných segmentů jako nosných prvků robotických systémů.

Úvodní část této disertační práce se věnuje možnostem zvyšování flexibility pomocí přídavných modulů do stávajících struktur. Jsou zde popsány typy modulů a jejich možnosti spojování. Dále se úvod práce zabývá systémy s variabilní tuhostí a schopnosti měnit tvar. Jsou zde popsány principy, jak systémy dosahují změny tuhosti a tím i tvaru. Následně jsou stanoveny cíle práce, které vycházejí z rešerše aktuálního stavu problematiky tvarově měnitelných segmentů. Vlastní část práce je rozdělena na dílčí kapitoly, dle jednotlivých definovaných cílů práce. V práci je popsáno určení možnosti ohybu segmentu tvarově měnitelného segmentu a metoda definice jeho délky. Jsou zde pomocí simulace představeny možnosti robotických systémů se zakřivenými prvky. Dále je představen experimentální segment s variabilní tuhostí na základě použití materiálu s nízkou teplotou tání. Na experimentální segmentu byli provedeny tři experimenty pro zjištění jeho mechanických parametrů. Následně se práce zabývá nutnou změnou materiálu s nízkou teplotou táním a způsobem změny jeho tuhosti. V předposlední a poslední kapitole jsou shrnuty výsledky a definovány přínosy pro vědní obor, praxi a doporučení pro další výzkum.

Annotation of Dissertation Thesis:

MLOTEK, Jakub. *Shape-changing segments of load-bearing elements of robotic systems*, Department of Robotics, Faculty of Mechanical Engineering, VSB – Technical University of Ostrava, 96 pages, 65 figures, 26 tables, 3 supplements.
Tutor: doc. Ing. Zdenko Bobovský, PhD.

Robotic systems in today's manufacturing processes have fixed connecting segments between joints. These elements are very often made from commonly available semi-finished products such as tubes, rods, castings, etc. These elements are mostly straight and their shape and dimensions define the working envelope of the robotic system. A robotic system with these elements has a rigid kinematic structure. This brings advantages with respect to the requirements such as, good repeatability of positioning, load capacity, etc. The disadvantage is that these systems are not flexible and mostly serve a single purpose. In case of a change in the work task, a situation may arise where the existing kinematics of the system is not sufficient or optimal. One way to solve this problem is to reconfigure the robotic system and thus the manipulator workspace by increasing the degree of freedom (DoF) by adding a module. Increasingly, systems are emerging that do not increase the number of degrees of freedom, but do change the shape of the connecting segments. With a suitable change in the shape of the connecting segment, the system can achieve a change in the working envelope that is sufficient and optimal for the new task. The present thesis deals with the topic of shape changing segments as supporting elements of robotic systems.

The introductory part of this thesis explores the possibilities of increasing flexibility by adding modules to existing structures. The types of modules and the possibilities of connecting them are described. Furthermore, the introduction of the work deals with systems with variable stiffness and shape changing capabilities. The principles of how systems achieve variation in stiffness and thus shape are described. Then, the objectives of the thesis are stated, which are based on a survey of the current state of the art of shape changeable segments. The actual part of the thesis is divided into subchapters, according to the individual defined objectives of the thesis. The thesis describes the determination of the bending possibility of a shape-changing segment and the method of defining its length. The possibilities of robotic systems with curved elements are presented by simulation. Furthermore, an experimental segment with variable stiffness based on the use of a low melting point material is presented. Three experiments were performed on the experimental segment to determine its mechanical parameters. Subsequently, the paper discusses the necessary variation of the low melting temperature material and the

method of changing its stiffness. In the penultimate and last chapter, the results are summarized and the contributions to science, practice and recommendations for further research are defined.

Obsah

Seznam použitých zkratek 8

Poděkování 9

Úvod 10

1. Přehled současného stavu problematiky 12

1.1 Změna kinematické struktury na principu přidání/ odebrání modulů 12

1.1.1. CUMA manipulátor 12

1.1.2. DoF manipulátor 13

1.1.3. Connection disk – spojení pasivní 13

1.1.4. UBot – spojení aktivní 14

1.1.5. MTran – spojení mechanicko magnetické 14

1.2 Změna kinematické struktury pomocí změny tvaru segmentů nosných prvků robotických ramen 15

1.2.1. Systém změny tvaru na principu rozdílu tuhostí 15

1.2.2. Systém změny tvaru na principu páteře a drátu 16

1.2.3. Systém změny tvaru na principu páteře a podtlaku 16

1.2.4. Systém změny tvaru na principu materiálu s nízkou teplotou tání 17

1.3 Materiál s nízkou teplotou tání 19

2. Cíle disertační práce 21

3. Určení možností ohybu tvarově měnitelného segmentu 22

3.1. 2D ohyb do pravidelného oblouku 23

3.2. 2D ohyb segmentu pro vytvoření deformační oblasti 23

3.3. Určení optimální délky segmentu 25

4. Experiment – Vliv zakřiveného segmentu na pracovní oblast 3 DoF manipulátoru 27

4.1. Popis simulace 28

4.2. Výsledky experimentu 33

5. Návrh experimentálního segmentu 37

5.1. Konstrukce experimentálního segmentu 37
5.2. FEA analýzy ohybů 39
5.3. Definice pozice koncového bodu 40
5.4. Výsledky FEA analýzy 42
6. Experiment – Měření vznikajících sil a momentů s force – torque senzorem 46
6.1. Popis experimentu 46
6.2. Výsledky experimentu 48
7. Experiment – Vliv ekvivalentního napětí na Fieldovou slitinou 53
7.1. Popis experimentu 53
7.2. Výsledky experimentu 54
8. Modifikace a efektivní změna skupenství segmentu 58
8.1. Modifikace segmentu – změna typu nízkotavitelného materiálu 58
8.2. Efektivní změna skupenství segmentu z PETG 60
9. Shrnutí výsledků 62
10. Závěry 69
10.1. Přínos pro vědní obor a praxi 71
10.2. Přínos pro vědní obor a praxi 72
10.3. Doporučení pro další výzkum 72
11. Conclusions 73
11.1. Contribution for scientific discipline and for practice 76
11.2. Contribution for practice 76
11.3. Recommendations for further research 76
Vlastní publikace 78
Reference 80
Seznam obrázků 86
Seznam tabulek 90
Seznam příloh 91

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Název	Význam
AO	Analog output	Analogový výstup
CTE	Coefficient of thermal expansion	Koeficient tepelné roztažnosti
DoF	Degree of Freedom	Stupeň volnosti
FEA	Finite element analysis	Analýza metodou konečných prvků
FFF	Fused Filament Fabrication	Výroba z tavených vláken
It	Inner temperature	Vnitřní teplota
LMPA	Low melting point alloy	Slitina s nízkým bodem tání
Ot	Outer temperature	Vnější teplota
PETG	Polyethylene terephthalate glycol	Glykolem modifikovaný Polyethylene Terephthalate
SMA	Shape memory alloy	Slitina s tvarovou pamětí

Poděkování

Rád bych touhle cestou poděkoval:

Vedoucímu disertační práce doc. Ing. Zdenku Bobovskému, PhD. Za připomínky, rady, konzultace, pomoc při směřování výzkumu a za odborné vedení práce.

Vedoucímu Katedry robotiky prof. Dr. Ing. Petru Novákovi za možnost se podílet na výzkumných projektech.

Pracovníkům a doktorandům z kanceláře CPIT C202 (Ing. Dominik Heczko, Ph.D.; Ing. Daniel Huczala, Ph.D.; Ing. Jiří Suder, Ph.D.; Ing. Michal Vocetka, Ph.D.; Ing. Petr Oščádal) za veškerou spolupráci, rady, diskuse k tématům a přátelské pracovní prostředí.

Svým rodičů Kateřině a Radkovi za podporu po celou dobu studia, motivaci a klidné rodinné zázemí.

Svým sourozencům Davidovi a Elišce za podporu během mého studia a za přínosné diskuse k řešeným problémům.

Na závěr ale ne naposled bych chtěl poděkovat své snoubence Marii, za veškerou trpělivost a podporu při studiu a psaní závěrečné práce.

Výzkum v rámci disertační práce byl podpořen z projektů:

Centrum výzkumu pokročilých mechatronických systémů, číslo projektu: CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000867. Dále byla tato práce podpořena ze specifických projektů VŠB-TUO [SP2019/69, SP2020/141, SP2021/47, SP2022/67, SP2023/060].

Úvod

V robotizaci, popřípadě v problematice manipulace s robotickým ramenem se stále častěji objevují požadavky na flexibilitu, přizpůsobení systému na dynamickou změnu pracovního prostředí. První oblast, jak dosáhnout flexibility je softwarové řešení. Pomocí těchto softwarových řešení lze standartní průmyslový robot integrovat do flexibilních procesů. Tím snížit časové nároky na kalibraci a použít plánovací algoritmy pro vytváření rekonfigurovatelných pracovních cyklů. Další oblastí je flexibilní mechanická struktura. V dnešní době existují dva možné mechanické principy, jak dosáhnout zvýšení flexibility zmíněných systémů.

Prvními jsou škálovatelné systémy využívající pro zvyšování stupňů volnosti moduly, které se dodatečně připojují ke kinematickému řetězci a vytvářejí tak novou strukturu. Moduly jsou buď jednoduché konstrukce obsahující pouze pohybovou jednotku a připojovací rozhraní nebo složitější obsahující pohybovou jednotku, uzamykací systémy a rozhraní pro přenos energie ve velmi kompaktním provedení. Nevýhodou jednoduchých konstrukcí je nutnost ruční montáže a demontáže. U složitých modulů je rychlost montáže a demontáže velmi vysoká, ale uzamykací systém nemusí být pro danou úlohu dostatečně robustní a tuhý.

Dalším možností je měnit tvar (deformovat) prvky mezi klouby. Prvním principem změny tvaru je princip, kde je deformace řízená lankem rozšířená o systém, který zvyšuje tuhost vnitřní segmentové struktury. Jedná se o strukturu, složenou z velmi přesných lamel, která je umístěna po celém obvodu a délce segmentované struktury umístěné v neprodyšném obalu. Lamely se svírají pomocí vytvoření podtlaku v obalu. Výhodou je rychlá změna tuhosti, a tím možnost rychlé změny tvaru. Nevýhodou je segmentovaná struktura omezující deformaci. Hlavní nevýhodu však spatřuji v možné ztrátě vakua v případě výpadku energií nebo v důsledku poškození membrány. V těchto případech dojde k okamžité ztrátě tuhosti systému.

Vhodnější řešením je použít přístup, který využívá energii dodávanou do systému pouze ke změně tvaru struktury. Tím se eliminuje problém ztráty tuhosti při přerušení dodávky energie. Tato řešení využívají nízkotavitelné materiály (LMPA) uzavřené v pružném obalu. Při zahřátí nízkotavitelného materiálu ztrácí struktura svou tuhost a je umožněna její deformace. Tento princip byl využit pro rekonfigurovatelné nohy kráčejícího robota. Využití nízkotavitelného materiálu je navrženo pro použití deformovatelného segmentu manipulátoru v práci, na kterou navazuji. Výhodou je stabilita deformace do zahřátí. Nevýhodou je nízká pevnost čistého materiálu.

První kapitola se věnuje aktuálnímu stavu modulárních a flexibilních systému a rozebírá řešenou problematiku. Jsou uvedeny typy modulárních systémů, jejich možnosti z pohledu

spojování modulů, přenosu řídících signálů a energií. Také jsou uvedeny flexibilní systémy se zaměřením na jejich princip změny tvaru a dosažení variabilní tuhosti. Následuje definování cílů. V dalších kapitolách je popsáno naplnění dílčích cílů pro splnění hlavního cíle.

Cílem této práce je představit možnosti tvarově měnitelných segmentů na principu variability tuhosti. Segment na principu variability tuhosti využívá jádro z materiálu s nízkou teplotou tání. Při zahřátí tohoto jádra na danou teplotu, ztrácí jádro svou tuhost a lze pak segment deformovat. Po ochlazení segment znovu zvýší zpět svou tuhost. Díky tomu lze měnit kinematiku manipulátoru z těchto segmentů. Tím dosáhnout změnu pracovní obálky, schopnost dosahu manipulátoru bez nutnosti montáže nebo demontáže prvků. Tak lze zvýšit aplikaci manipulátoru v dynamicky se měnícím pracovním prostředí. Dále pak uzpůsobit strukturu manipulátoru tak, aby svými vlastnostmi co nejvíce odpovídala požadované pracovní úloze.

1. Přehled současného stavu problematiky

Kapitola popisuje aktuální stav problematiky změny kinematiky robotických ramen. V kapitole jsou popsány dva možné principy této změny.

1.1 Změna kinematické struktury na principu přidání/ odebrání modulů

Změna kinematické struktury je v těchto případech docílena pomocí odebrání anebo přidání modulů do struktury ramene.

Moduly můžeme rozdělit na zcela pasivní, kdy pouze slouží jako nová nosná struktura anebo aktivní, kdy lze pomocí interface na modulech přenášet řídící signály a energie. Spojení modulů je převážně řešeno ve dvou principech. Mechanicky a magnetomechanicky.

Mechanické řešení můžeme rozdělit do dvou kategorií. Pasivní a aktivní. Mechanická spojení pasivní vyžadují manuální montáž spojovacího materiálu. Mechanická spojení aktivní využívají ovládací prvek (motor, SMA slitinu) pro pohyb uzamykacího prvku (háčky, trny). Jde o tzv. „genderové“ spojení uzamykacího prvku s aktivním otvorem anebo aktivního uzamykacího prvku s pasivním otvorem.

Magnetomechanické spojení využívá permanentní magnety pro spojení modulů. Při rozpojení jsou magnety od sebe oddalovány pomocí vyvinuté mechanické síly.

1.1.1. CUMA manipulátor

CUMA Obrázek 1 je modulární platforma až s 7 DoF a otevřeným kinematickým řetězcem. Manipulátor byl vytvořen pro vyhodnocení kinematických algoritmů a identifikaci vlastností obecných sériových manipulátorů. Manipulátor je složen s komerčních pohybových jednotek Schunk PowerCube tří druhů PR70, PR90 a PW70. Jednotky jsou mezi sebou spojeny předem zakřivenými unikátními segmenty. Kinematický algoritmus pomocí daných segmentů definuje optimální strukturu manipulátoru pro dané parametry. Segmenty jsou vyrobené z karbon hliníkového kompozitu a jsou k pohybovým jednotkám připojeny pomocí šroubového spoje. Napájení a řídící signály jsou vedeny podél manipulátoru pomocí krouceného kabelu. [1]

(a) (b)

Obrázek 1 – (a) manipulátor CUMA v jedné z konfigurací (b) zakřivený segment s pohybovými jednotkami [1]

1.1.2. DoF manipulátor

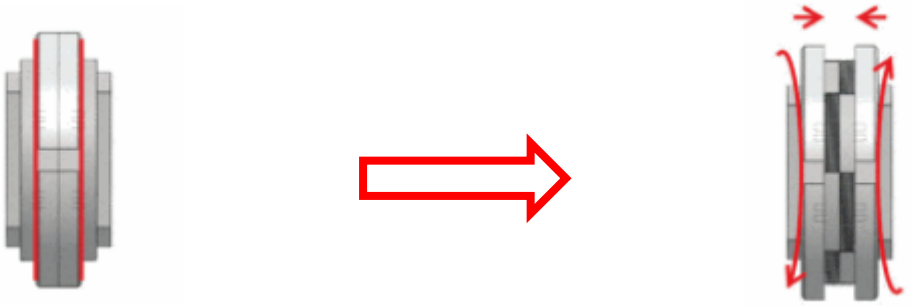
Manipulátor Obrázek 2 (a) je možné složit ze tří různých navržených kloubů Obrázek 2 (b). Mechanická struktura je pro všechny klouby stejná. Podle výstupního momentu se ale dělí na malé, střední a velké. Otočné klouby se pomocí šroubového spoje spojují přes T a L hliníkové spojky. Pomocí těchto spojek se klouby spojují do požadovaných konfigurací [2].

(a) (b)

Obrázek 2 – (a) DoF manipulátor (b) kloub manipulátoru [2]

1.1.3. Connection disk – spojení pasivní

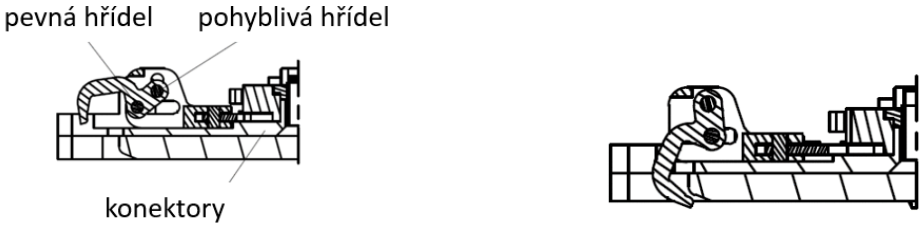
Tento spojovací disk využívá symetrických přírub pro vytvoření pevného spojení. Každá příruba ve dvojici se skládá z fixačního kroužku a těla příruby osazeného čtyřmi zuby. Fixační kroužek má vnitřní závit a na zubech příruby je závit vnější. Sesazení přírub probíhá tak, aby zuby jedné příruby zapadly do mezer příruby druhé. Následně po zašroubování fixačních kroužků na závit protilehlé příruby dojde k vytvoření pevného spojení Obrázek 3. Ve středu disku je osazena PCB deska s konektory pro přenos napájení a signálů. [3]



Obrázek 3 – Ukázka spojení disku [3]

1.1.4. UBot – spojení aktivní

Moduly UBot mají dva DoF a rozdělují se na aktivní a pasivní. Aktivní moduly mají čtyři uzamykací háky, které jsou ovládány jedním motorem Obrázek 4 (a). Pasivní modul má pak čtyři otvory, do kterých aktivní háky zapadají Obrázek 4 (b). Komunikace mezi moduly probíhá bezdrátově. [4]

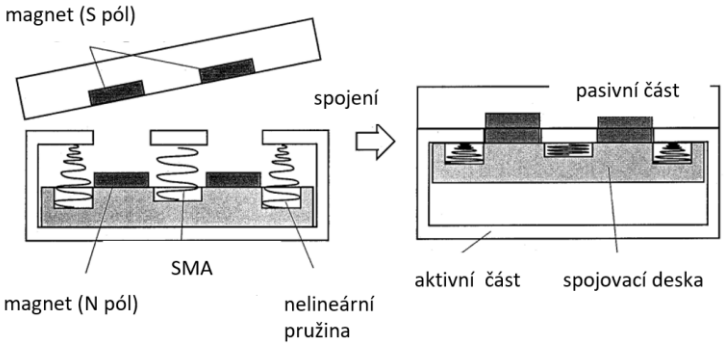


(a) (b)

Obrázek 4 – UBot mechanismus (a) odemčená (b) uzamčená pozice [4]

1.1.5. MTran – spojení mechanicko magnetické

Modul s dvěma DoF je tvořen plastovým tělem. Čelní plochy modulu se dělí na pasivní a aktivní. Pasivní plocha obsahuje pouze čtyři permanentní magnety. Aktivní plocha je pak složena z nelineárních pružin, cívek ze slitiny s tvarovou pamětí (SMA) a magnetů upevněných na pohyblivé desce. Princip spojování a odpojování pak funguje na principu vnitřně vyváženém magnetismu. Mechanická síla nelineární pružiny je slabší než síla magnetická. Tak dojde ke spojení aktivního a pasivního modulu. Pro odpojení se zahřeje cívka z SMA a její mechanická síla společně se silou pružiny překoná magnetickou sílu Obrázek 5. Pro opětovné spojení je nutné SMA cívku nechat vychladnou. [5]



Obrázek 5 – Princip spojení a odpojení MTran modulu [5]

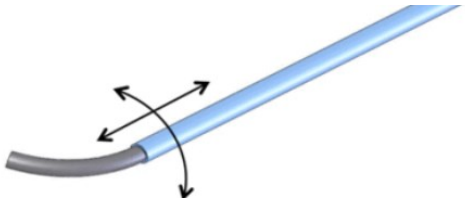
1.2 Změna kinematické struktury pomocí změny tvaru segmentů nosných prvků robotických ramen

Změna kinematické struktury je v těchto případech docílena pomocí změny tvaru robotického ramene. V současné době existuje několik možných způsobů, jak této změny dosáhnout. Principy jsou rozebrány v následujících podkapitolách.

1.2.1. Systém změny tvaru na principu rozdílu tuhostí

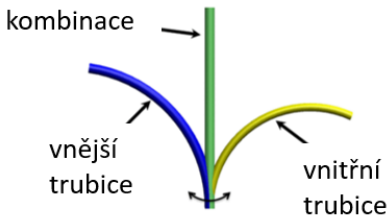
Změna tvaru je dosažena na principu různých tuhostí trubic. V aktuálním stavu jsou takovéto manipulátory tvořeny dvěma [6], třemi a více trubicemi [7]. Tento princip je hojně využíván pro lékařské nástroje.

V případě kombinace dvou trubic rozlišujeme dva případy. Prvním je případ, kdy poměr mezi tuhostmi trubic je velmi vysoký a tvar první trubice ovlivňuje tvar trubice druhé Obrázek 6.



Obrázek 6 – Příklad trubic s vysokým poměrem tuhosti [8]

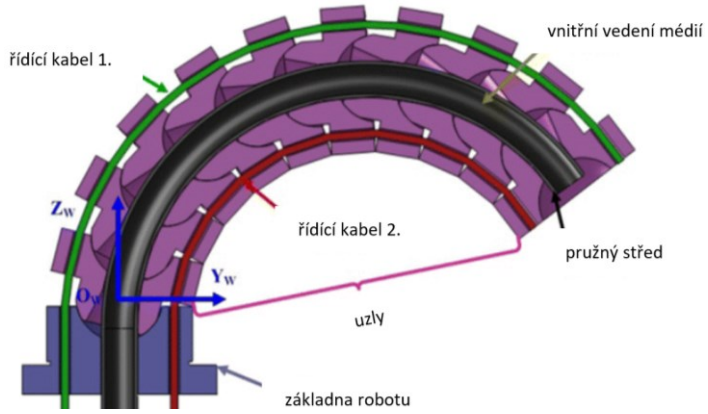
V druhém případě poměr tuhosti obou trubic je blízký 1 Obrázek 7. Pak výsledný tvar je kombinace zakřivení obou trubic. [8]



Obrázek 7 – Příklad trubic s poměrem tuhostí blízký 1 [8]

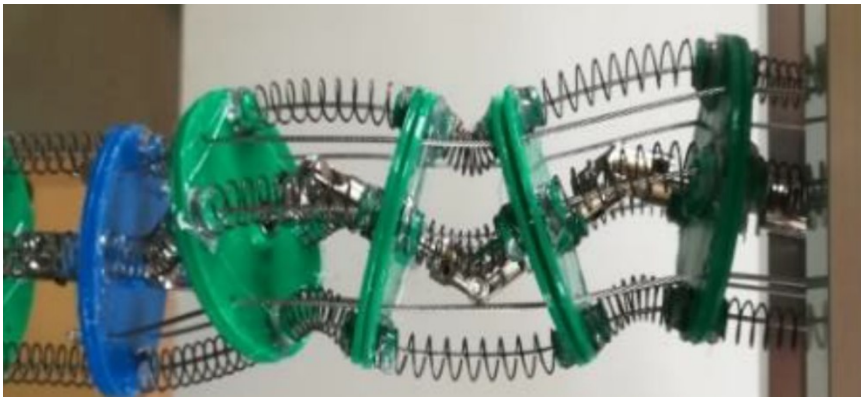
1.2.2. Systém změny tvaru na principu páteře a drátu

První systém je inspirován biologickým modelem páteře Obrázek 8. Systém využívá dvojici segmentů uskupených do sférického kloubu. Po obvodu těchto segmentů jsou otvory pro vedení řídících drátů. Středem segmentu je vedena flexibilní trubice, která může sloužit pro vedení kabelových svazků a medií. [9]



Obrázek 8 – Systém inspirovaný biologickým modelem páteře [9]

Druhý systém pracuje na principu, kdy mezi tuhými částmi struktury jsou pružné prvky. Deformovatelné prvky mohou být z pružného materiálu [10]. anebo je mohou tvořit pružiny Obrázek 9. Pak při deformaci dochází ke stažení a prodloužení řídících drátů [11].

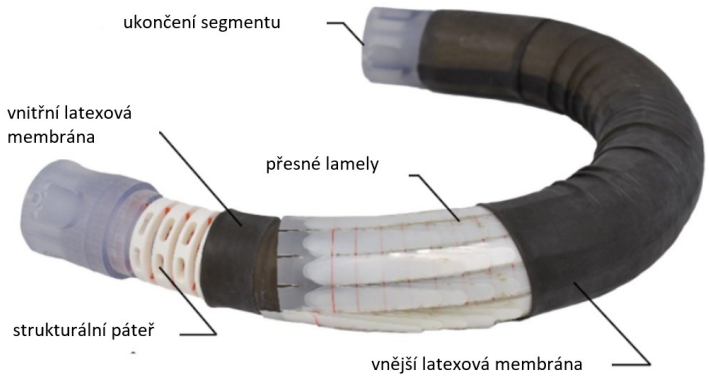


Obrázek 9 – Systém využívající jako pružné prvky pružiny [11]

1.2.3. Systém změny tvaru na principu páteře a podtlaku

Systém stejně jako v předchozí kapitole využívá strukturu podobnou páteři Obrázek 10. Neobsahuje ale řídící dráty pro realizaci ohybu. Ohyb je realizován ručně. Systém je ale naopak doplněn o mechanismus, který zajišťuje změnu tuhosti struktury. Střed struktury je složen z pevných disků, které jsou mezi sebou spojeny pružnými spojkami. Kolem tohoto středu je umístěna konstrukce z velmi přesných, do sebe zapadajících lamel. Kolem této konstrukce je

z vnějšku umístěna neprodyšná membrána. Při vytvoření podtlaku dojde k stlačení lamel a kumulativní tření mezi vrstvami lamel zvýší tuhost. Tuhost je úměrná velikosti podtlaku. [12]



Obrázek 10 – Konstrukce systému na principu páteř – podtlak [12]

1.2.4. Systém změny tvaru na principu materiálu s nízkou teplotou tání

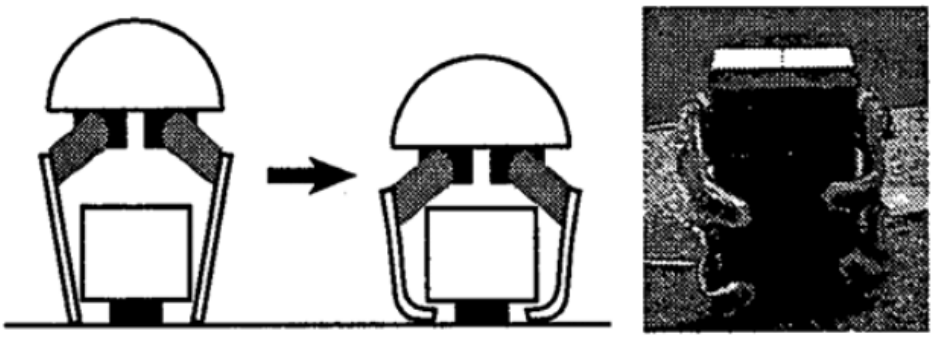
Tyto systémy pracují na principu změny tuhosti pevného jádra při jeho zahřátí. Využívají se materiály s nízkou teplotou tání. Dále jsou v práci uváděny pod zkratkou LMPA (low melting point alloy). Materiály jsou převážně slitiny nízko tavitelných kovů. Díky jejich fyzikálně chemickým a mechanickým vlastnostem je možné měnit jejich tuhost. V současném stavu již existují práce, které představují možné strategie, jak ovlivňovat tuhost LMPA a uvádí příklady kde lze LMPA využít [13]. Mezi oblasti využití patří také proměnlivé struktury robotů. Ať už se jedná o robotická ramena nebo části podvozků mobilních robotů.

Prvotní výzkumy se zabývají použitím mřížky s LMPA. V [14] se konkrétně jedná o mřížku z Fieldovy slitiny uzavřené v silikonovém obalu Obrázek 11 (a). Takto materiály tvoří kompozitní desku. Deska je tuhá při běžné pokojové teplotě 20 °C. Po zahřátí Fieldovy slitiny na teplotu tání 60 °C dochází ke ztrátě tuhosti a je možné desku deformovat. Při ochlazení deformované struktury na teplotu 20 °C deska získá původní tuhost a zároveň si zachová deformovaný tvar Obrázek 11 (b).

(a) (b)

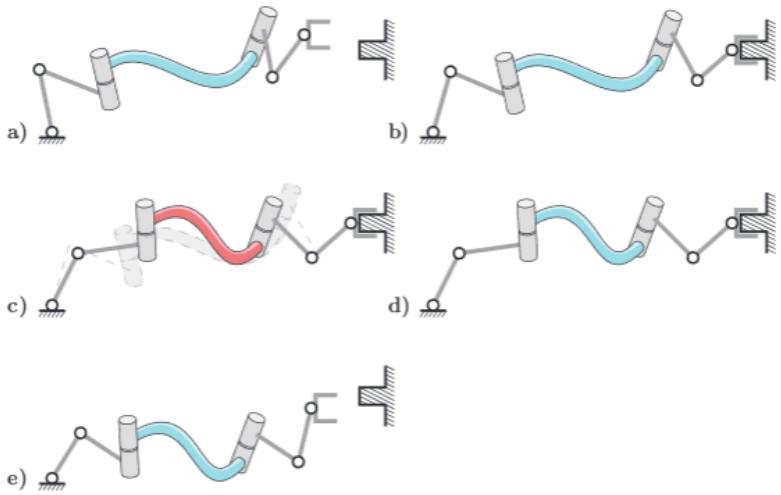
Obrázek 11 – (a) deska – kompozit mřížka z Fieldovy slitiny + silikonový obal (b)deska v tuhém deformovaném stavu [14]

Využití pro mobilní roboty je probíráno v článku [15]. Zde je jako v předchozím případě LMPA slitina uzavřena v pružném silikonovém obalu. Tento kompozit pak tvoří nohu mobilního robotu. Tato noha je tvarově měnitelná a tím je jí možno přizpůsobit dle požadavků na mobilní robot. V tomto případě je požadavek na uchopování různých předmětů mobilním robotem Obrázek 12.



Obrázek 12 – Příklad změny tvaru nohou mobilního robotu pro uchopení předmětu [15]

Další oblast, kde se začíná využívat LMPA je oblast robotických manipulátorů. Příkladem je článek [16], který se zabývá návrhem konstrukce deformovatelného segmentu robotického ramene. Definuje deformační oblast segmentu a navrhuje metodiku, jak by bylo možné segment deformovat. Segment je tvořen vnějším pružným obalem, ve kterém se nachází LMPA. Konkrétně je využita Fieldova slitina. Deformace je prováděna prozatím pouze pomocí vnějších vlivů na článek (ručně). Pevný článek se uzamkne v jednoznačné pozici pomocí kotvy. Po rozvolnění dojde k deformaci a změně tvaru článku. Po opětovném nabytí pevného stavu může být článek odemčen Obrázek 13 (a ÷ e).



Obrázek 13 – Příklad pořadí kroků metodiky pro změnu tvaru deformovatelného segmentu (a) výchozí stav, (b) manipulátor je uzamknut v uzamykacím bodě (c) rozvolněný segment ve změněném tvaru (d) segment ve změněném tvaru po ochlazení (e) odemčení manipulátoru [16]

1.3 Materiál s nízkou teplotou tání

Pro další výzkum bylo vzhledem k rešerši rozhodnuto, že se bude nadále rozvíjet problematika tvarově měnitelného segmentu za použití materiálu s nízkou teplotou tání. Tento princip přináší výhodu, že změna tuhosti je řízena pomocí změny teploty (zahřátí) segmentu z materiálu s nízkou teplotou tání. S tím souvisí výhoda taková, že pro udržení systému v tuhém stavu není potřeba mít přivedenou žádnou energii. Přivedená energie (tepelná) je potřeba pouze pro rozvolnění systému. Tím systém s materiálem s nízkou teplotou tání převažuje nad systémy uvedených v podkapitolách 1.2.2 a 1.2.3. V těchto systémech je tuhost závislá na udržení vakua, respektive je závislá na tuhosti pružných členů. Pokud např. v systému uvedeném v podkapitole 1.2.3 dojde k poškození vnější pružné membrány, dochází k okamžité ztrátě tuhosti celého segmentu kvůli ztrátě vakua.

Nevýhodou systému s materiálem s nízkou teplotou tání je nutnost vnášet do systému teplo a tím tepelně namáhat materiály tvarově měnitelného segmentu. Další nevýhodou je relativně nízká pevnost v tahu čistého materiálu.

Z tohoto důvodu byla použita Fieldova slitina Tabulka 1. Jedná se o slitinu bismutu, india a cínu Tabulka 2. [18] Výhoda této slitiny oproti jiným je, že neobsahuje olovo, kadmium případně jiné toxické prvky [17].

Tabulka 1. Vlastnosti Fieldovy slitiny [18]

Parametr	Hustota [g/cm^3]	Pevnost v tahu [MPa]	Tvrdost dle Brinella	Elektrický odpor [ohm/cm]	Lineární koeficient tepelné expanze α (CTE) [K^{-1}]	Bod tání (eutektický) [°C]
	7,88	33,4	11	$5{,}2 \cdot 10^{-5}$	$22 \cdot 10^{-6}$	60

Tabulka 2. Chemické složení Fieldovy slitiny [18]

Prvky	Bismut	Indium	Cín
Zastoupení [%]	32,5	51	16,5

Fieldova slitina bude uzavřena v obalu, který bude držet tvar slitiny při jejím zahřátí. Po zahřátí dochází k teplotní roztažnosti materiálu. Proto bylo vypočítáno o kolik se objemově roztáhne Fieldova slitina při jejím zahřátí.

Pro výpočet roztažnosti je potřeba znát objem materiálu. Objem materiálu byl určen pro Fieldovu slitinu ve formě válečku s průměrem 9,5 mm a délkou 106 mm. Parametry byly zvoleny vzhledem k předpokládané velikosti experimentálního segmentu. Základní objem materiálu určíme pomocí vztahu

$$V_0 = \pi r^2 l \tag{1}$$

kde V_0 je základní objem, r je poloměr válečku a l je délka válečku. Změna objemu je dána vztahem

$$V = V_0(1 + \beta \Delta t) \tag{2}$$

kde V je objem při změně teploty, V_0 je základní objem, β je objemová teplotní roztažnost při 20 °C a Δt je změna teploty dána vztahem

$$\Delta t = t_0 - t_x \tag{3}$$

kde t_0 je výchozí teplota (20 °C) a t_x je teplota materiálu po jeho zahřátí.

Z důvodu znalosti pouze lineárního koeficientu tepelné expanze určíme objemovou teplotní roztažnost pomocí vztahu [19]

$$\beta \approx 3\alpha \tag{4}$$

kde α je lineární koeficient tepelné expanze 20°C. Pro Fieldovu slitinu [18] je koeficient tepelné expanze roven

$$\alpha = 22\text{x}10^{-6}\text{K}^{-1} \tag{5}$$

Tepelná objemová roztažnost ΔV je dána vztahem

$$\Delta V = V - V_0 \tag{6}$$

V Tabulka 3 jsou pak uvedeny výsledky pro vztahy (1)(2)(4)(6).

Tabulka 3. Výsledky výpočtu pro určení tepelné objemové roztažnosti

Parametr	V_0 [mm^3]	β [K^{-1}]	t_x [C°]	V [mm^3]	ΔV [mm^3]	ΔV [%]
Hodnota	7513,5	$6{,}6 \cdot 10^{-5}$	60	7533,3	19,8	0,3
			70	7538,3	24,8	0,3
			80	7543,3	29,8	0,4

Z výsledku je patrné, že objemová tepelná roztažnost bude mít minimální vliv na objem Fieldovy slitiny po jejím zahřátí i na vyšší teplotu, než je její teplota tání.

2. Cíle disertační práce

Na základě přehledu aktuálního stavu problematiky a její analýzy, definuji cíle disertační práce následovně.

Hlavním cílem disertační práce je výzkum tvarově měnitelného segmentu robotického ramene na principu systému s materiálem s nízkou teplotou tání.

K hlavnímu cíli jsou definovány jednotlivé dílčí cíle disertační práce:

1) Určení pracovního prostoru tvarově měnitelného segmentu
2) Konstrukční řešení segmentu pro experimentální měření
3) Experimentální měření tvarově měnitelného segmentu
4) Modifikace materiálu s nízkou teplotou tání
5) Efektivní změna skupenství materiálu s nízkou teplotou tání
6) Matematický model segmentu
7) Zhodnocení/interpretace dosažených výsledků

Dílčí cíle jsou vypracovány v následujících kapitolách disertační práce.

3. Určení možností ohybu tvarově měnitelného segmentu

Při deformaci již existujících tvarově měnitelných segmentů, dochází často k tomu, že je segment deformován náhodně bez daných okrajových podmínek např. minimální poloměr ohybu [12]. Zde ale může docházet k přetěžování struktury segmentu nevhodnou deformací pro požadovanou úlohu. Z tohoto důvodu je při deformaci segmentu velice důležitý tvar, jaký při deformaci segmentu vznikne. K deformaci segmentu je možné pak přistoupit dvěma možnými způsoby.

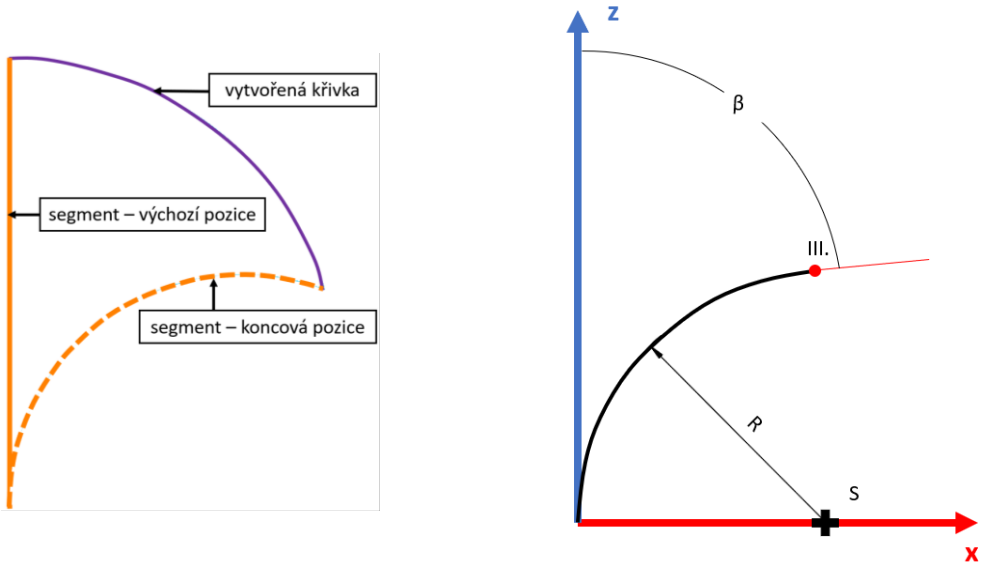
Jedním ze způsobů je deformovat segment do pravidelného oblouku [20]. Pro takovou deformaci jsou okrajové podmínky délka segmentu a minimální poloměr oblouku do kterého je segment ohýbán. Při deformaci jednoho segmentu do pravidelného oblouku nelze dosáhnout deformační oblasti [16] Obrázek 15 ale konec segmentu vytvoří pouze křivku Obrázek 14. Deformační oblastí je myšlená oblast, do které je možné ohýbat konec segmentu. Z tohoto důvodu pro dosažení větší variability deformace se jednotlivé menší segmenty ohnuté do pravidelného oblouku škálují [21]. Ke škálování segmentů dochází pomocí uzamykacích mechanismů [22]. Tyto mechanismy musí zajisti přenos řídících signálů případně energií. Možnou nevýhodou tohoto přístupu jsou spojovací místa jednotlivých segmentů, které můžou oslabit celistvost systému. Dalším možným přístupem je proto deformace celistvého segmentu, který je ale rozdělen do více sekcí [23]. Každá sekce je deformována nezávisle na té druhé do pravidelného oblouku. Výhodou je celistvá struktura bez nutnosti spojovacích uzamykacích mechanismů. Nevýhodou je složitost řízení deformace jednotlivých částí segmentů.

Druhým způsobem je deformovat segment bez požadavku na konkrétní tvar [16]. Pro takovou deformaci jsou okrajové podmínky deformace délka segmentu, minimální poloměr ohybu segmentu. Při této deformaci se vytváří deformační oblast. Oblast je ohraničena okrajovými křivkami, které definují maximální a minimální dosah segmentu při jeho deformaci [24].

V následujících podkapitolách jsou tyto dva způsoby deformace tvarově měnitelného segmentu v ploše popsány. Dále je deformace v ploše označována jako 2D ohyb. Jedná se o ohyb, který má předem definovaný tvar (podkapitola 3.1) a ohyb, kdy tvar není dán, ale je definován bod, do kterého se má segment deformovat (podkapitola 3.2). Dále je uveden způsob možného návrhu optimální délky takovéhoto deformovatelného segmentu. Návrh vychází ze tří vstupních parametrů. Parametru napětí v segmentu zatíženém na ohyb, parametr průhybu segmentu zatíženého na ohyb a parametru velikosti deformační oblasti segmentu.

3.1. 2D ohyb do pravidelného oblouku

Ohyb segmentu do pravidelného oblouku viz. Obrázek 14 je jedna z možností, jak dosáhnout deformovaného tvaru segmentu. Segment je deformován s poloměrem R od nekonečna po minimálního poloměru ohybu, kdy střed poloměru vždy leží na ose X Obrázek 14 (b). Minimální poloměr ohybu je dán mechanickými vlastnostmi reálného segmentu. Při tomto ohybu nedochází ke vzniku deformační oblasti. Konec segmentu se dá pouze ohýbat do bodů na křivce Obrázek 14 (a).



(a) (b)

Obrázek 14 – (a) popis ohýbání segmentu do pravidelného oblouku s křivkou ohybu (b) tvar deformovaného segmentu do pravidelného oblouku

Dalším parametrem segmentu je jeho délka l, která je neměnná. Pak můžeme definovat polohu koncového bodu pomocí vztahů

$$\beta = l/R \tag{7}$$

$$X = Rsin\beta \tag{8}$$

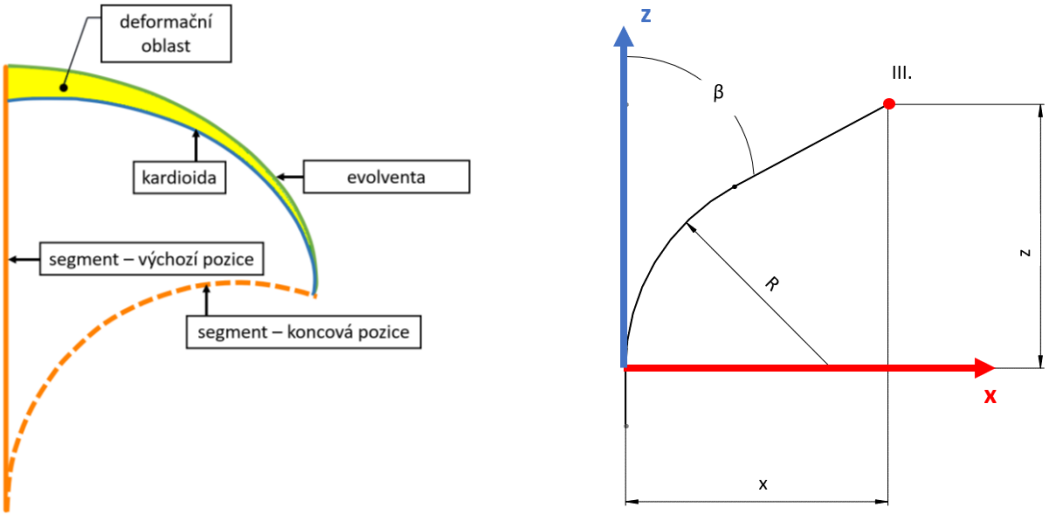
$$Z = R - Rcos\beta \tag{9}$$

kde β je úhel mezi tangentou ke kruhové části a osou Z Obrázek 14 (b), l je délka segmentu, R je minimální poloměr kruhové části, X a Z jsou souřadnice koncového bodu. Označení souřadnic je dáno předpokládanou svislou pozicí segmentu v prostoru.

3.2. 2D ohyb segmentu pro vytvoření deformační oblasti

Při tomto ohybu vzniká deformační oblast Obrázek 15 (a). Oblast je ohraničená dvěma křivkami. Jedna křivka představuje minimální dosah segmentu, druhá jeho maximální dosah při respektování okrajových podmínek délky a minimálního poloměru ohybu. Vzniklý tvar

takto deformovaného segmentu je ovlivněn pouze délkou segmentu a minimálním poloměrem ohybu. Tyto parametry jsou dány mechanickými vlastnostmi segmentu.



(a) (b)

Obrázek 15 – (a) popis deformační oblasti (b) příklad vzniklého matematického tvar segmentu při ohýbání po evolventě do definovaného bodu

Maximální dosah představuje evolventa. Jedná se o křivku, která je definována pomocí pohybu koncového bodu přímky, která se odvaluje po základní kružnici. Poloměr základní kružnice je dán minimálním poloměrem ohybu segmentu. Maximální délka odvinutí přímky od kružnice je roven délce přímky ve vertikální pozici $\beta = 0$ Obrázek 15(b). Parametrické vyjádření koncového bodu je dáno pomocí vztahů

$$X = R(\cos\beta + \beta\, sin\beta) \tag{10}$$

$$Z = R(\sin\beta - cos\beta) \tag{11}$$

kde X, Z jsou souřadnice koncového bodu, R je poloměr základní kružnice a β je úhel odvinutí [22].

Minimální dosah představuje kardioida. Jedná se o křivku, která je definována pomocí pohybu odvalované kružnice s pevným bodem. Odvalovaná kružnice se odvaluje po kružnici pevné. Obě kružnice mají stejný poloměr, který je roven minimálnímu poloměru ohybu segmentu.

$$X = 2R\cos\beta(1 + cos\beta) \tag{12}$$

$$Z = 2R\sin\beta(1 + cos\beta) \tag{13}$$

kde X, Z jsou souřadnice koncového bodu, R je poloměr odvalované a pevné kružnice a β je úhel odvalení [26].

3.3. Určení optimální délky segmentu

Po definování, jak vzniká deformační oblast byla navržena metoda, jak určit optimální délku segmentu při daném minimálním poloměru a známém průměru kruhového průřezu segmentu.

Metoda optimální délky segmentu vychází z celkové významnosti. Ta v sobě obsahuje významnost napětí, významnost průhybu a významnost plochy.

Celková významnost je dána vztahem

$$p_c = p_\sigma + p_W + p_S \tag{14}$$

kde p_c je celková významnost, p_σ je významnost napětí, p_w je významnost průhybu a p_s je významnost plochy. Při ohybu segmentu, významnost plochy do výpočtu celkové významnosti nevstupuje.

Významnost napětí je pak dána následujícím vztahem

$$p_\sigma = 100 - \left(\sigma_{VYP}\frac{100}{\sigma_{DO}}\right) \tag{15}$$

kde σ_{VYP} je vypočítané napětí a σ_{DO} je dovolené napětí.

Významnost průhybu je pak dána následujícím vztahem

$$p_W = 100 - \left(W_{POM}\frac{100}{W_{DO}}\right) \tag{16}$$

kde W_{POM} je poměrný průhyb a W_{DO} je dovolený průhyb.

Poměrný průhyb je definován vztahem

$$W_{POM} = \frac{W_{VYP}100}{l} \tag{17}$$

kde W_{VYP} je vypočítaný průhyb a l je délka segmentu. Poměrný ohyb určuje poměr průhybu k délce segmentu.

Významnost plochy je definována pouze pro 2D ohyb segmentu pro vytvoření deformační oblasti popsaném v kapitole 3.2. Významnost plochy je dána vztahem

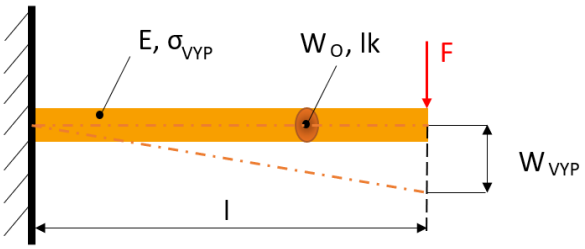
$$p_S = \frac{S_{VYP}100}{(\pi l^2)} \tag{18}$$

kde S_{VYP} je vypočtená deformační plocha a l je délka článku.

Výpočet je univerzální, kdy dovolené napětí σ_{DO} je dáno pomocí vztahu meze kluzu a koeficientem bezpečnosti.

Vypočítané napětí σ_{VYP} je dáno vztahem, do kterého vstupuje určená zatěžující síla F, hledaná optimální délka segmentu l a průřezový modul v ohybu W_O. Průřezový modul W_O je určen pro kruhovou tyč.

Dovolený průhyb je definován uživatelem. Vypočítaný průhyb W_{VYP} je dán vztahem pro výpočet průhybu pro staticky určitý nosník. Kdy je myšleno, že nosník je vetknutý a je zatížen osamělou silou Obrázek 16.



Obrázek 16 – Schéma zatíženého segmentu pro výběr optimální délky segmentu

Do výpočtu vstupuje zatěžující síla F (shodná s výpočtem napětí), hledaná optimální délka nosníku l, modul pružnosti v tahu E a kvadratický moment průřezu segmentu Ik. Kvadratický moment průřezu segmentu Ik je určen pro kruhovou tyč. Výpočet je samozřejmě jednoduše modifikovatelný pro jiný průřez segmentu.

Vypočítaná plocha S_{VYP} pak je určena tak, že pro zkoumanou délku l je definovaná velikost ploch ohraničenou křivkami evolventy a kardioidy viz. kapitola 3.2. Dále pak osami souřadnicového systému a tvar deformovaného segmentu. Od velikosti plochy ohraničenou evolventou je odečtena plocha ohraničená kardioidou.

Pak optimální délka je taková, která má nejvyšší hodnotu celkové významnosti p_c danou vztahem (14).

4. Experiment – Vliv zakřiveného segmentu na pracovní oblast 3 DoF manipulátoru

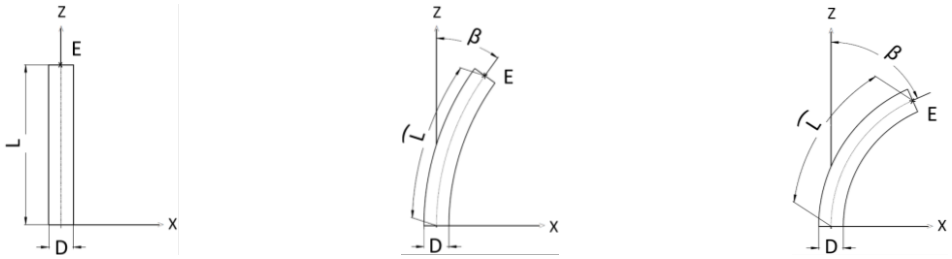
Pro poukázání výhody využití deformace segmentu na manipulátoru byly simulovány manipulátory s různými konfiguracemi segmentů. Simulace byla vytvořena v prostředí CoppeliaSim s využitím fyzikálního enginu Newton Dynamics [27].

Experiment využívá metodiku ohybu popsanou v kapitole 3.2 Kdy segment je deformován po evolventě. Segment byl pro účel simulace deformován do pozic 0, I a II Obrázek 17. Pozice zakřivení je dána koordináty koncového bodu E. Koordináty E jsou uvedeny v Tabulka 4.

Tabulka 4. Koordináty bodu E pro pozice

Pozice	x [mm]	z [mm]	β [°]
0	0	106	0
I	31,99	99,27	35,72
II	65,84	70,22	86,31

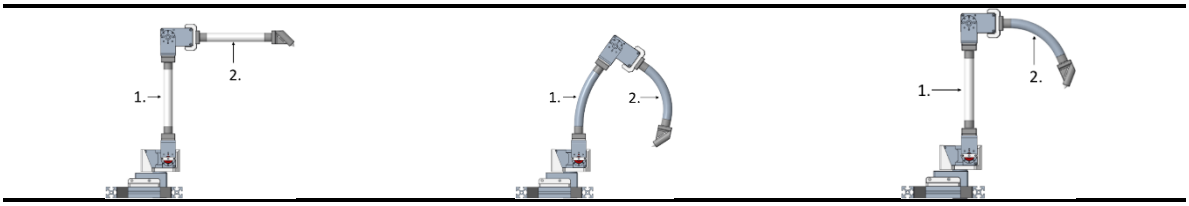
Pozice II Obrázek 17 (c) je maximální dosažitelná deformace daná mechanickou strukturou reálné deformačního standu. Tento stand je blíže popsán v kap. 6. Pozice I je pak v polovině možné deformace viz. Obrázek 17 (b).



(a) (b) (c)

Obrázek 17 – Segment manipulátoru v (a) rovné pozici 0 (b) zakřivené pozici I (c) zakřivené pozici II

Z takto připravených segmentů byli vytvořeny tři struktury manipulátorů s 3 DoF Obrázek 18. Tato struktura byla volena z důvodu toho, že u 6 DoF struktury první tři stupně volnosti vytváří převážnou část pracovní obálky. Zbylé stupně jej minimálně rozšiřují a převážně slouží k orientaci v tomto prostoru. Struktury jsou odlišné ve tvaru segmentů. Pro srovnání s ostatními strukturami je první struktura Obrázek 18 (a) složena z nedeformovaných segmentů. Druhá reprezentuje manipulátor se zakřivením obou segmentů Obrázek 18 (b). Třetí struktura představuje kombinaci prvních dvou Obrázek 18 (c).

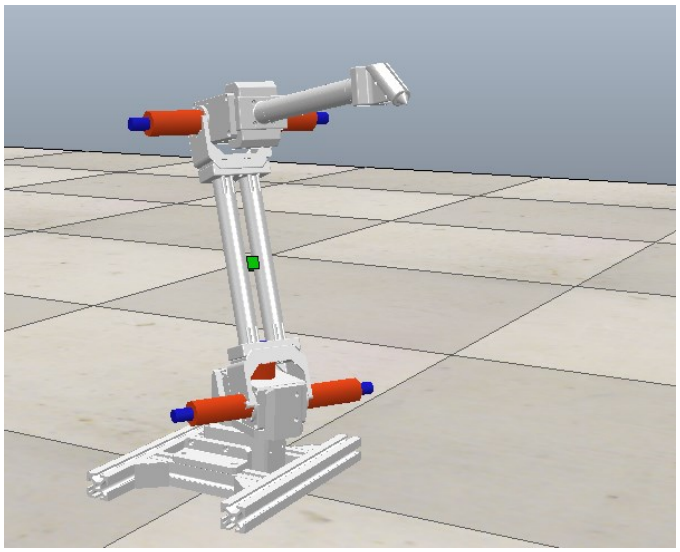


(a) (b) (c)

Obrázek 18 – Struktury manipulátorů s (a) rovnými segmenty (b) segmentem deformovaným do 1. pozice I a 2. pozice II (c) 1. rovným segmentem a 2. deformovaným segmentem do pozice II

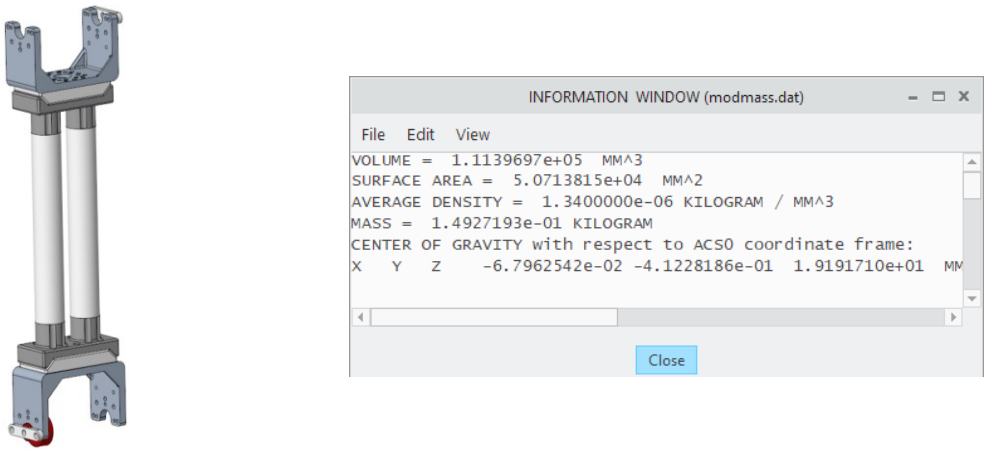
4.1. Popis simulace

Simulační model je vytvořen v prostředí CoppeliaSim Obrázek 19. Prvky simulačního modelu jsou rozděleny do dvou kategorií. Prvky, které reprezentují geometrii manipulátoru a prvky nesoucí dynamické parametry manipulátoru. K těmto prvkům řadíme klouby a hmotné prvky.



Obrázek 19 – Sestavená kinematická struktura manipulátoru s jednotlivými členy v prostředí CoppeliaSim

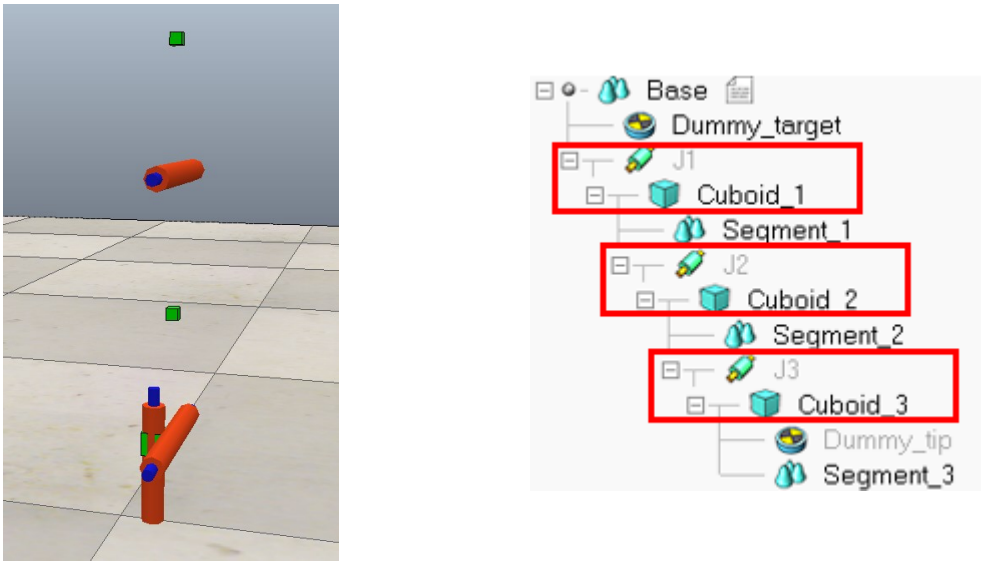
Prvky reprezentující geometrii jsou převzaty z CAD modelu Obrázek 20 (a). Vizualizují tvar manipulátoru a slouží jako kolizní objemy.



(a) (b)

Obrázek 20 – (a) sestavená část modelu manipulátoru v PTC Creo (b) parametry modelu

Prvky jsou rozděleny do čtyř celků. Celek základny (Base), prvního segmentu (Segment_1), druhého segmentu (Segment_2) a segmentu třetího (Segment_3). Pro každý prvek krom základny (Base) byly do těžiště celků umístěny prvky představující hmotné části. Tyto hmotné části jsou na Obrázek 21 (a) zobrazeny jako zelené kvádry. Ve stromě modelu jsou pak označeny pro jednotlivé celky jako Cuboid_1 až Cuboid_3. Strom modelu je vyobrazen na Obrázek 21 (b). Cuboid_1 až Cuboid_3 jsou dynamické prvky s vlastnostmi přejatými z CAD modelu Obrázek 20 (b). Nastavení dynamických parametrů je uvedeno na příkladu pro Cuboid_2 Obrázek 22 (a).

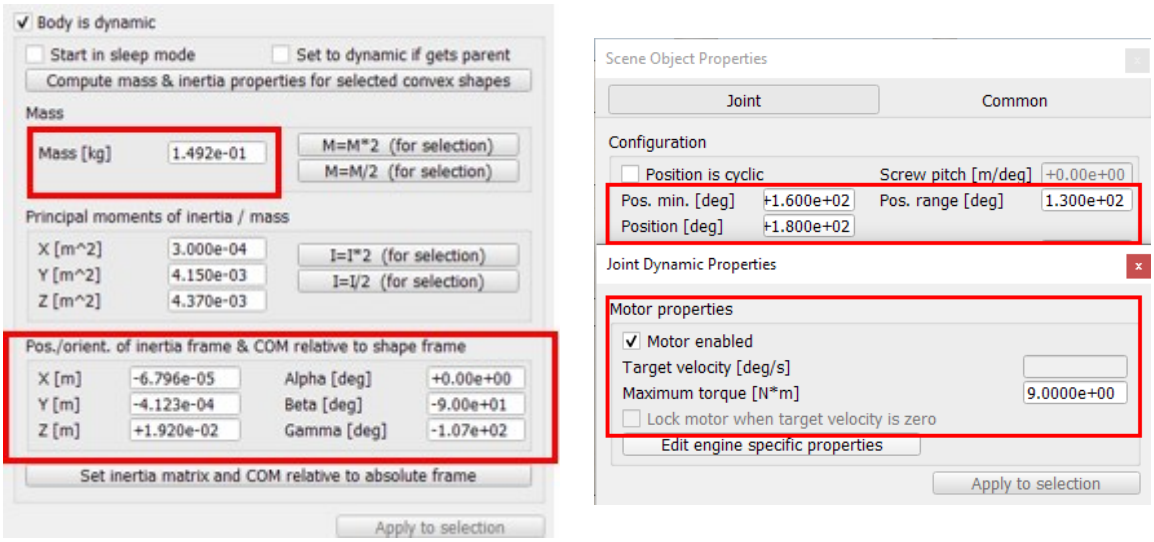


(a) (b)

Obrázek 21 – (a) kinematická struktura manipulátoru s klouby + hmotné prvky (zelené krychle) v prostředí CoppeliaSim (b) modelový strom prvků

Prvky představující klouby manipulátoru pak reprezentují pohonné jednotky manipulátorů. Klouby jsou na Obrázek 21 (a) vyobrazeny jako oranžové válce. Ve stromě

modelu jsou pak označeny pro jednotlivé celky jako J_1 až J_3. Strom modelu je vyobrazen na Obrázek 21 (b). Klouby nesou parametry pohonu. Maximální zrychlení a maximální vyvinutý moment. Nastavení dynamických parametrů je uvedeno na příkladu pro J_2 Obrázek 22 (b).

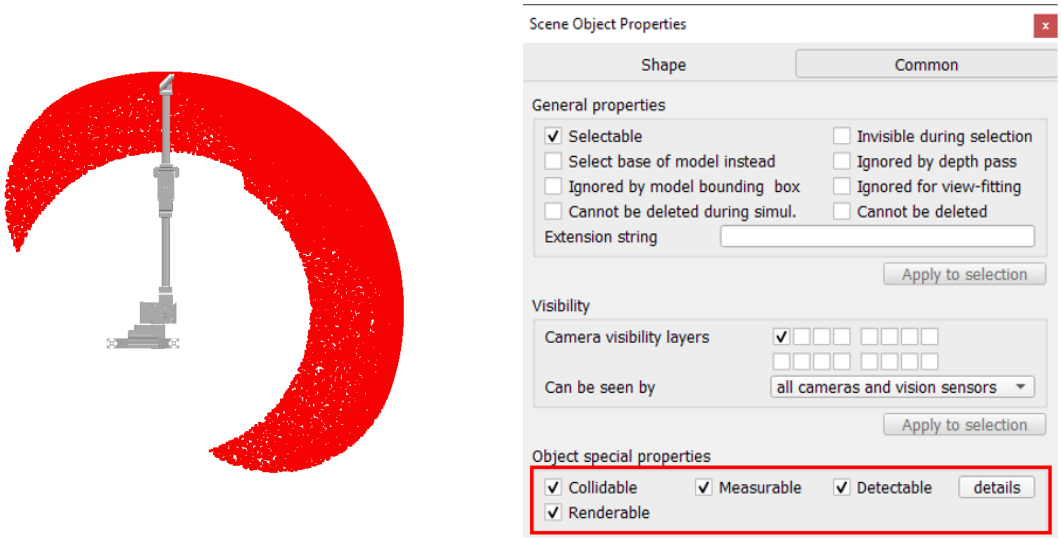


(a) (b)

Obrázek 22 – (a) dynamické parametry hmotných prvků (b) parametry kloubů

Simulace byla rozdělena na tři samostatné části. Každá část zkoumala vliv deformace segmentů manipulátoru na jiný parametr.

První část simulace zkoumá vliv deformace na tvar pracovní obálky robotu Obrázek 23 (a). Pohyb jednotlivých kloubů je omezen nastavením kolizí u geometrického modelu Obrázek 23 (b). Pro zobrazení průřezu pracovní obálky manipulátoru byla zablokována rotace prvního kloubu manipulátoru.

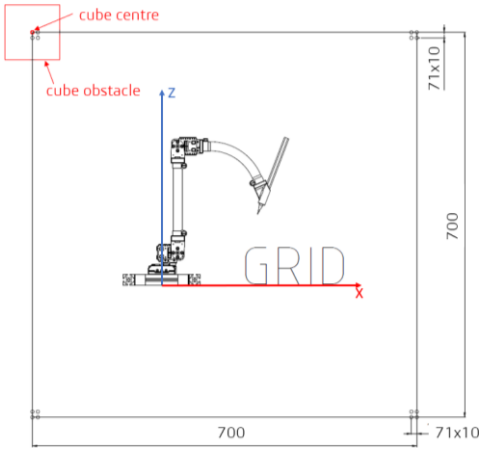


(a) (b)

Obrázek 23 – (a) příklad průřezu vygenerované pracovní obálky (b) příklad nastavení geometrické reprezentace prvků

Tvar obálky byl vykreslen pomocí upraveného algoritmu Algoritmus 1 (viz. Seznam příloh) pro vygenerování Point Cloudu integrovaném v prostředí CoppeliaSim [27].

Druhá část se zabývala ovlivněním tvaru pracovní obálky. K ovlivnění pracovní obálky došlo vložení překážky do mřížky o velikosti 700x700mm kolem manipulátoru. Velikost mřížky, její umístění, velikost kroku je prezentováno na Obrázek 24. Dále je na obrázku zobrazeno umístění překážky v krajním bodu mřížky. Překážka je krychlová o velikosti hrany 125 mm.

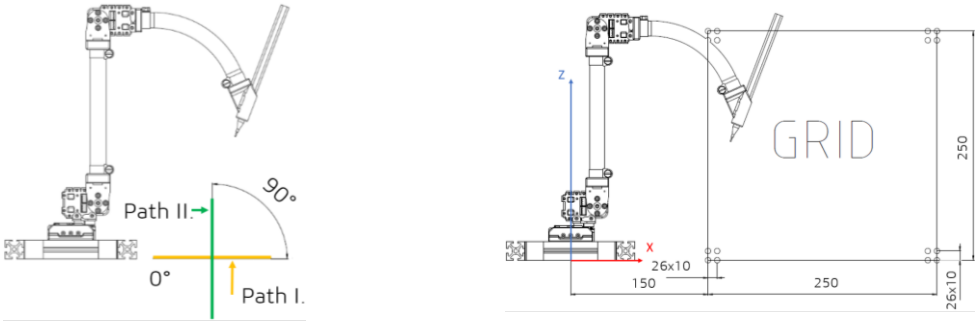


Obrázek 24 – umístění, velikost a velikost kroku mřížky do které byla vložena překážka

Pro zaznamenávání velikosti a tvaru pracovní obálky při měnící se pozici překážky v mřížce byl v prostředí CoppeliaSim vytvořen algoritmus. Algoritmus 2 (viz. Seznam příloh) využívá pro generaci pracovní obálky ve formě pointcloudu Algoritmus 1 (viz. Seznam příloh). Algoritmus 2 (viz. Seznam příloh) je rozšířen o ukládání souřadnic jednotlivých

vygenerovaných bodů v pointcloudu do textového souboru. Tím je uložena velikost pracovní obálky. Dále algoritmus řeší posun překážky, po vygenerování a uložení pointcloudu, do nové pozice.

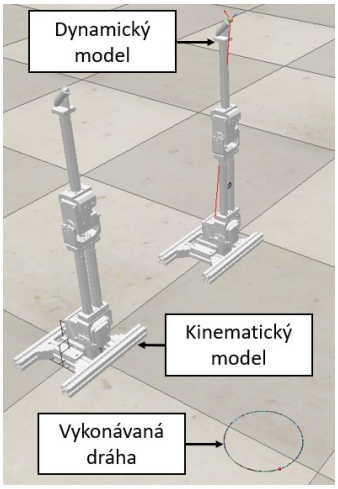
Třetí část simulace se věnuje schopnosti struktur vykonat dráhu. Dráha je kruhová s průměrem 125 mm a manipulátor ji vykonával ve dvou konfiguracích. V první konfiguraci dráha Path I. Obrázek 25 (a) není vůči základně robotu nijak natočená (úhel natočení 0°). V druhém případě je dráha Path II. natočena o 90° Obrázek 25 (a). Dráha se po pokusu manipulátoru ať úspěšném nebo neúspěšném posouvá v definované mřížce Obrázek 25 (b). Umístění mřížky a její rozměr je zvolen tak aby byla umístěna v pracovní obálce manipulátoru. Měření bylo vykonáváno pomocí Algoritmus 3 (viz. Seznam příloh).



(a) (b)

Obrázek 25 – (a) manipulátor s vyobrazením konfigurace dráhy Path I, II (b) umístění, velikost a velikost kroku mřížky

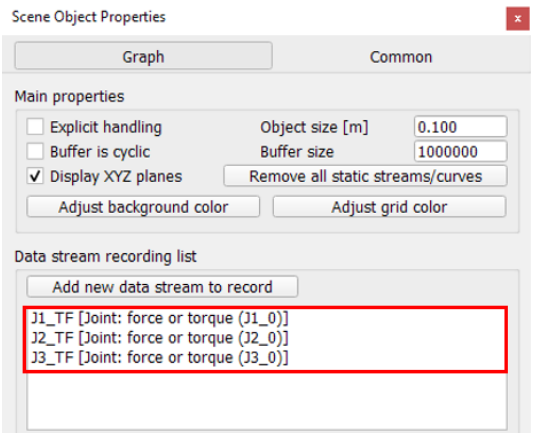
Pro společné dráhy, které jsou schopny vykonat všechny struktury bylo následně vytvořené opakované měření, při kterém byly snímány momenty, které musí klouby vyvinout pro vykonání požadovaného pohybu. Toto měření popisuje Algoritmus 4 (viz. Seznam příloh) s upravenou simulační scénou Obrázek 27. Pohyb manipulátoru a měřená dráha je vykonávaná pomocí Algoritmus 3 (viz. Seznam příloh).



Obrázek 26 – Upravená simulační scéna pro měření momentové zátěže jednotlivých kloubů manipulátorů

Pro měření momentů bylo třeba upravit scénu tak, aby zde byli dva manipulátory. První manipulátor vykonává požadovanou dráhu pomocí inverzní kinematiky. Druhý manipulátor vykonává pohyb pomocí dat z kloubu prvního manipulátoru. Funkce sim.getJointPosition načítá informace o pozici jednotlivých kloubů prvního manipulátoru. Funkce sim.setJointTargetPosition pak tuto pozici nastavuje na kloubech druhého manipulátoru Algoritmus 4.

Pro zaznamenávání velikosti a průběhu momentu byla využita funkce graph v prostředí CoppeliaSim. V tomto prostředí byli definovaný snímané veličiny momentu (force or torque) a klouby (J1_0 ÷ J3_0) Obrázek 27. Při průběhu dochází ke snímání hodnot momentů kloubů a vyobrazení tohoto průběhu v grafu. Hodnoty je možné následně exportovat do souboru CVS.



Obrázek 27 – nastavení prostředí graph v prostředí CoppeliaSim

4.2. Výsledky experimentu

Výsledky pracovních obálek jsou vyobrazeny na Obrázek 28. Z obrázku je patrné, že čím větší je zakřivení, tím vzrůstá dosažitelná plocha blíže k základně. Obrázek 28 (d) pak představuje jednu z možných výhod při využití deformovatelných segmentů manipulátoru.

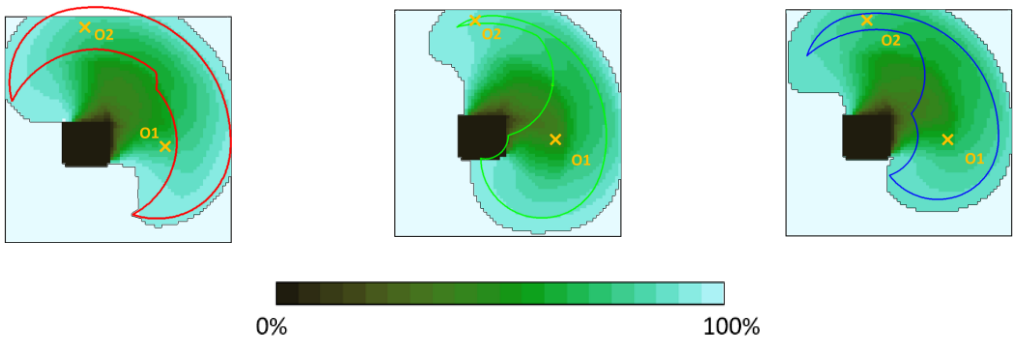
Tím je významné navýšení velikosti pracovní obálky bez nutnosti navyšování stupňů volnosti.

(a) (b) (c) (d)

Obrázek 28 – Tvar a velikost průřezu pracovní obálky manipulátoru s (a) rovnými segmenty (b) deformovanými segmenty (c) kombinací rovných a deformovaných segmentů (d) sloučená pracovní obálka

Výsledky ovlivněné velikosti pracovní obálky při vložení překážky do prostoru kolem manipulátoru jsou prezentovány na Obrázek 29. Výsledkem je mapa bodů, kde každý bod představuje pozici překážky. Barva bodu pak představuje procentuální ovlivnění pracovní obálky překážkou. Body označeny černě, představují body, kdy došlo k úplném zablokování struktury manipulátoru a pracovní obálka nebyla vygenerována. V Obrázek 29 (a ÷ c) je v mapě bodů vyznačena pozice a hranice pracovní obálky. Body, které se nachází v této hranici nebo ve vzdálenosti maximálně rovné polovině délky hrany krychlové překážky označují místa, kdy překážka přímo narušila pracovní obálku.

Z množiny bodů mapy byly vybrány dva body O1 a O2 (Obrázek 29 (a ÷ c) označeny žlutě). Tyto body jsou společné pro všechny tři struktury manipulátoru. Body byly vybrány tak, aby jeden bod ležel uvnitř pracovní obálky a druhý ležel v blízkosti hranice obálky (vně anebo uvnitř).

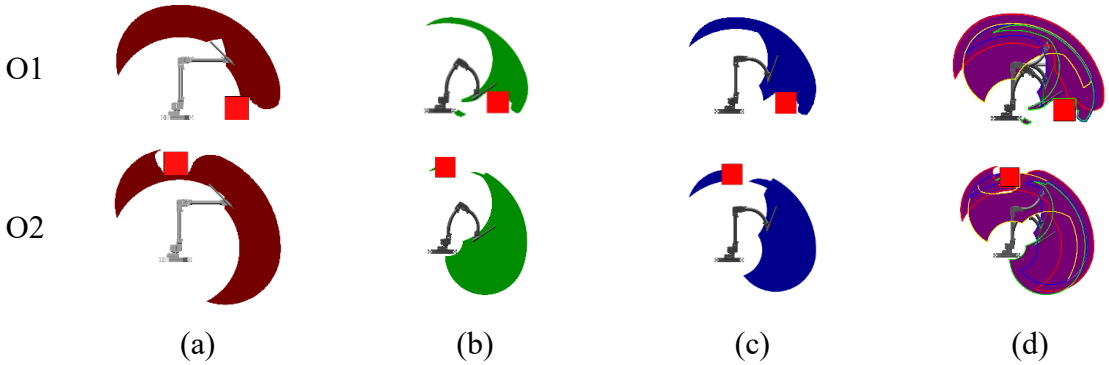


(a) (b) (c)

Obrázek 29 – Změna velikosti pracovní obálky při vložení překážky v dosažitelné oblasti struktury manipulátoru s (a) rovnými segmenty (b) deformovanými segmenty (c) kombinací rovných a deformovaných segmentů

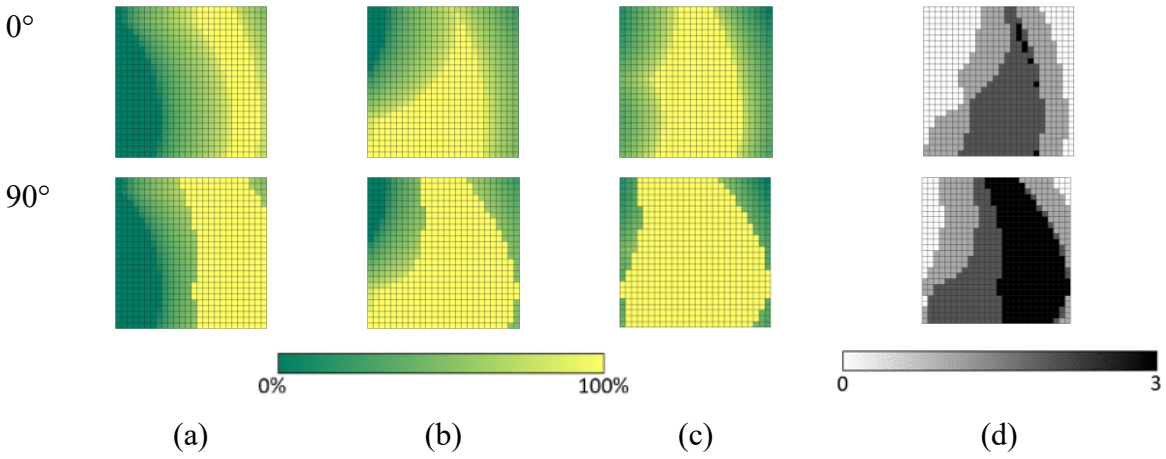
Pro takto definované body bylo znovu provedeno generování pracovní obálky pomocí point cloudu. Cílem bylo prezentovat chování pracovní obálky různých struktur při stejném

umístění překážky Obrázek 30. Z obrázku je patrné, že oproti referenčnímu manipulátoru s rovnými segmenty Obrázek 30 (a) při použití alespoň jednoho zakřiveného segmentu ve struktuře narůstá významně pracovní obálka v blízkosti překážky Obrázek 30 (b, c).



Obrázek 30 – Ovlivnění tvaru a velikosti pracovní obálky při vložení při vložení překážky do vybraných bodů O1 a O2 manipulátoru s (a) rovnými segmenty (b) deformovanými segmenty (c) kombinací rovných a deformovaných segmentů (d) sloučená pracovní obálka

Výsledky schopnosti provést průjezd požadovanou dráhou jsou vyjádřeny procentuálně. Následně jsou prezentovány jako heatmapa. Mapa je vytvořená pro jednotlivé konfigurace manipulátorů a drah Obrázek 31 (a ÷ c). Jednotlivé body v heatmapě prezentují pozici středu dráhy. Barva pak představuje úspěšnost průjezdu dráhy v procentech. Pro vydefinování společných drah, které jsou schopny provést všechny konfigurace, došlo ke sloučení heatmap do jedné Obrázek 31 (d). Jednotlivé body v heatmapě znovu prezentují pozici středu dráhy. Barva pak představuje počet konfigurací, které byli úspěšné při průjezdu dráhy v dané pozici.



Obrázek 31 – Procentuální vyjádření úspěšného projetí kruhové dráhy manipulátorem s (a) rovnými segmenty (b) deformovanými segmenty (c) kombinací rovných a deformovaných segmentů

Z těchto bodů byly vybrány body P1 a P2. V bodě P1 je dráha v konfiguraci 0° a v bodě P2 v konfiguraci 90°. Souřadnice samotných bodů jsou uvedeny v Tabulka 5.

Tabulka 5. Koordináty bodu P1 a P2 pro měření vyvinutého momentu

Pozice	x [mm]	z [mm]	Konfigurace [°]
P1	310	260	0
P2	210	250	90

V těchto bodech byl simulován průjezd dráhy všemi strukturami manipulátorů. Na jednotlivých kloubech modelu byl snímán nutný moment, který kloub musel vyvinout pro průjezd dráhou. Z Tabulka 6 je patrné, že nejmenší moment v obou konfiguracích dráhy vyvinul manipulátor s nedeformovanými segmenty. Tím můžeme říct, že pokud máme dráhu, kterou může vykonat jak nedeformovaný, tak deformovaný manipulátor je vhodnější jí vykonat nedeformovatelným manipulátorem.

Tabulka 6. Souhrn momentů vyvinutých motory manipulátoru při vykonávání dané dráhy

	J1 [Nm]		J2 [Nm]		J3 [Nm]		ΣJ [Nm]	
Konfigurace	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°
rovný	0,01	0,002	7,8	4,517	3,3	3,25	11,11	7,769
deformovaný	0,004	0,002	8,432	5,228	2,846	6,277	11,282	7,907
kombinace	0,004	0,005	9,765	6,598	2,87	2,709	12,639	9,309

5. Návrh experimentálního segmentu

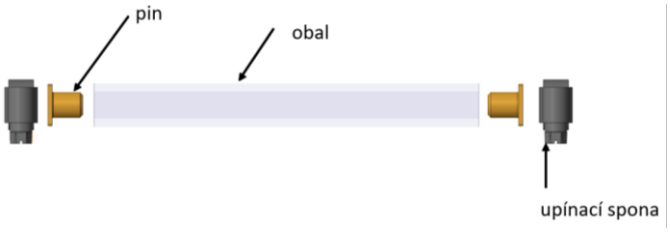
Pro zkoumání parametrů deformovatelného segmentu byla navržena jeho experimentální podoba. Experimentální segment vychází ze struktury uvedené v [16].

V pracích zabývajících se deformací struktur není často zkoumáno, jaké napětí je vnášeno do struktur při jejich deformaci [28]. Zkoumá se většinou pouze tvar [29] nebo princip řízení, jak požadovaného tvaru dosáhnout [30].

Z tohoto důvodu je v kapitole provedena, pro oba způsoby ohýbání segmentu, FEA analýza. Tato analýza představuje velikost a působení ekvivalentního napětí v deformované struktuře.

5.1. Konstrukce experimentálního segmentu

Konstrukce segmentu byla nejprve navržena v 3D modeláři PTC Creo. Konstrukce experimentálního segmentu je prezentována v sestavě, která je složena z jednotlivých dílů Obrázek 32. Konstrukce se skládá z upínacích čepů, obalu, vnitřní struktury z materiálu s nízkou teplotou tání, upínacích pinů a upínacích spon. Upínací piny slouží pro uzavření materiálu s nízkou teplotou tání v obalu. Zároveň slouží pro budoucí uchycení segmentu do měřícího standu. Konstrukce segmentu neobsahuje topný člen. Zahřívání materiálu s nízkou teplotou tání je realizováno pomocí vnějšího působení tepla na strukturu segmentu.



Obrázek 32 – Návrh struktury experimentálního segmentu

Rozměry 3D CAD modelu jsou dány předpokládaným budoucím použitím a vybraným obalem. Byla vybrána průmyslová hadice ze silikonové gumy, která odolá teplotám tání vnitřní struktury z materiálu s nízkou teplotou tání. Parametry vybrané hadice jsou uvedeny v Tabulka 7.

Tabulka 7. Parametry obalu segmentu

Materiál	Teplotní odolnost [°C]	Vnitřní průměr [mm]	Vnější průměr [mm]	Minimální poloměr ohybu [mm]	Délka [mm]	Ohybatelná délka [mm]
Silikonová guma	-60 ÷ 180	9,5	16,6	55	132	106

Ohýbatelná délka viz. Tabulka 7. je délkou obalu mezi upínacími piny tzn. Délka obalu, ve které je umístěna LMPA.

Pro díly, které budou následně zkoumány pomocí FEA analýzy byly ve 3D modelu definovány materiály. Jedná se o díly obal a piny. Pro piny je jako materiál definována ocel s parametry uvedenými v Tabulka 8. Materiál pro obal byl nastaven s nelineárními hyperelastickými parametry pomocí metody Mooney – Rivlin [31]. Tabulka 9. Materiál pro obal je silikonová guma.

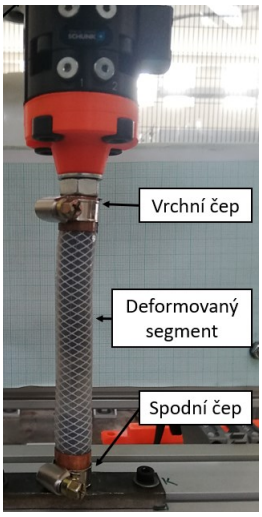
Tabulka 8. Parametry materiálu upínacích pinů (ocel) [32]

Density [kg/m^3]	**Youngus Modulus [MPa]**	**Poisson Ratio [-]**
7827	210000	0.3

Tabulka 9. Parametry materiálu obalu dle Mooney - Rivlin (silikonová guma) [32]

Density [kg/m^3]	**C10 [kPa]**	**C01 [kPa]**	**D1 [1/kPa]**
1120	259	65	1,14e-6

Pro reálně vyrobený segment dle CAD návrhu bylo provedeno prvotní měření s Fieldovou slitinou. Upínací čepy si po měření zachovali svou délku, ale kvůli průsakům byl hladký tvar dříku pozměněn. Místo vyrobeného čepu byl použit metrický šroub M10. Do závitové části šroubu se při stáhnutí pomocí hadicové spony vtlačila vnitřní pružná část průmyslové hadice. Tím došlo k utěsnění prostoru mezi čepem a hadicí a zamezení průsaků materiálu s nízkou teplotou tání. Reálný experimentální segment je zobrazen upnutý v měřícím standu na Obrázek 33.



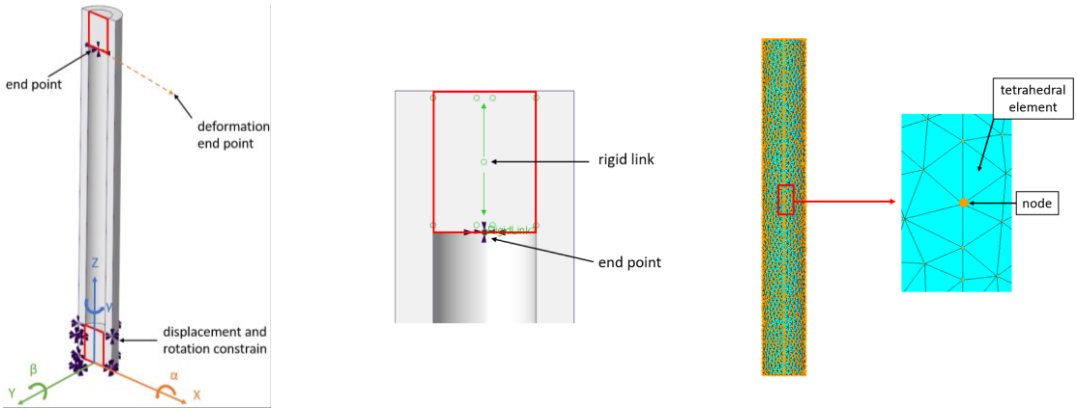
Obrázek 33 – Segment s LMPA v měřícím standu

5.2. FEA analýzy ohybů

Pomocí metody konečných prvků (FEA) jsou zjištěny předběžné výsledky tvaru a působení ekvivalentního napětí v dané struktuře. Pro FEA analýzu byl použit modul v PTC Creo.

3D model byl zjednodušen tak, že upínací piny jsou reprezentovány pouze objemem, který se nachází v těle obalu segmentu. Dále byly odebrány upínací spony, které jsou nahrazeny vazbou. Jako poslední je uvažováno, že při ohybu se pouze deformuje délka segmentu mezi vnitřními konci pinu. Proto je koncový bod (end point), který se následně posouvá, umístěn na konci pinu ve vnitřní části segmentu Obrázek 34 (a, b).

Pro nastavení simulace je potřeba nastavit okrajové podmínky pro daný model. První okrajovou podmínkou jsou vazby. Typ vazby a odebrané stupně volnosti odpovídají reálnému uchycení segmentu v měřícím standu. Proto v předpokládaném uchycení segmentu k měřícímu standu jsou odebrány všechny posunutí a rotace v osách.



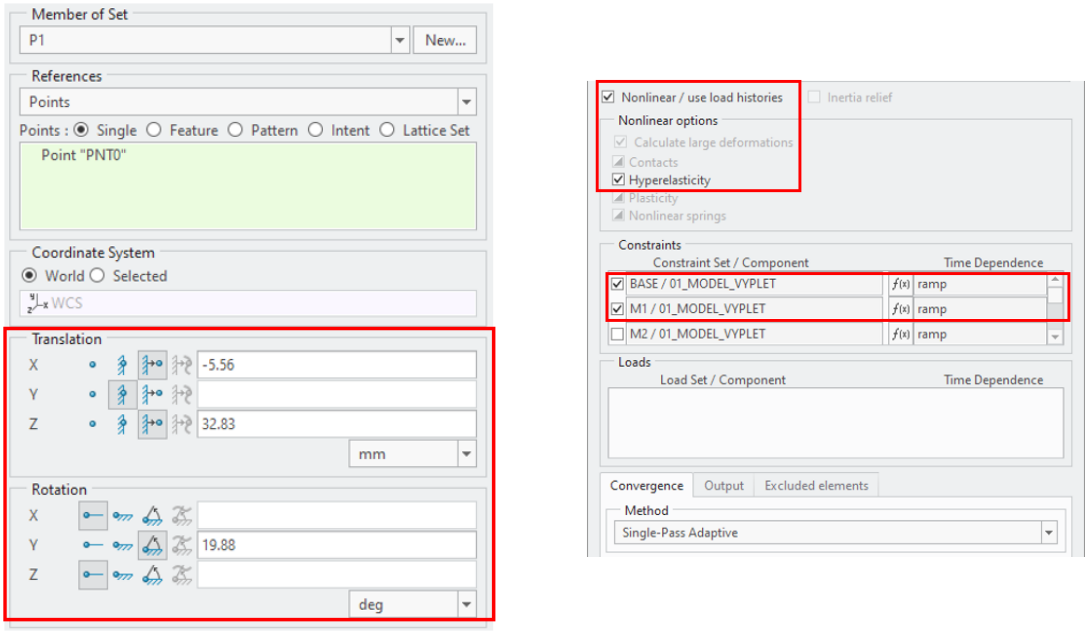
(a) (b) (c)

Obrázek 34 – FEA nastavení modelu segmentu (a) okrajové podmínky vazby a posunutí (b)nastavení rigid linku (c) popis sítě

Standartně se po vytvoření vazeb ve FEA analýze zkoumaný objekt zatíží silou, momentem nebo jejich kombinací. V tomto případě ale byla známa pozice koncového bodu segmentu. Z tohoto důvodu byla na koncový bod aplikovaná posuvná a zároveň rotační vazba. Vazba aplikuje posuv na bod v osách X a Z, omezuje posuv v ose Y. Aplikuje rotaci v ose Y (úhel β) a nechává volnou rotaci v ose X a Z. Protože toto posunutí lze aplikovat pouze na bod je pomocí nástroje rigid link toto posunutí aplikováno na celý objem, který představuje pin Obrázek 34(b).

Dalším nastavením simulace je vytvoření mřížky. Mřížka je složena z 41798 tetrahedral prvků a 9185 uzlů Obrázek 34 (c).

Na Obrázek 35 (a) je vyobrazen příklad nastavení pozice koncového bodu. Simulace Obrázek 35 (b) je pak nastavena jako nelineární a hyperelastická z důvodu simulace pružné části segmentu. V simulaci není, jak bylo zmíněno výše, aplikována žádná zátěž (Loads). Jsou aplikovány pouze vazby (Constrains). Kde vazba BASE představuje pevné uchycení jednoho konce segmentu. Vazba M1 pak určuje posuvnou vazbu s nastavením dle vzoru představeném na Obrázek 35 (a).



(a) (b)

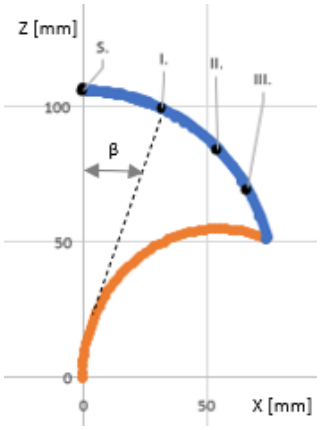
Obrázek 35 – (a) příklad nastavení pozice pro koncový bod segmentu (b) nastavení simulace

5.3. Definice pozice koncového bodu

Po definování simulačního modelu bylo následně nutné definovat pozici koncového bodu pro oba typy ohybu segmentu popsaných v kapitolách 3.1 a 3.2. Tyto pozice se následně aplikují na posuvně rotační vazbu popsanou v předchozí podkapitole.

Pro 2D ohyb do pravidelného oblouku

Pro definování koncového bodu segmentu při 2D ohybu do pravidelného oblouku je využit teoretický popis uvedený v kapitole 3.1. První pozice 0 je počátek ohybu, kdy je segment v nedeformovaném stavu. Pozice I a II jsou pak mezi-pozice rovnoměrně vzdálené od počátečního bodu. Poslední pozice III je určena jako maximální dosažitelná deformace Obrázek 36.



Obrázek 36 – Rozložení bodu na křivce vytvořené koncovým bodem segmentu při jeho deformaci

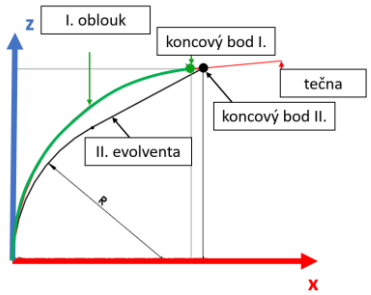
Koordináty koncového bodu jsou uvedeny v Tabulka 10.

Tabulka 10. Koordináty bodu E pro pozice

Pozice	x [mm]	z [mm]	β [°]
0	0	106	0
I	31,99	99,27	35,72
II	54,57	84,09	65,96
III	65,84	70,22	86,31

Pro 2D ohyb pro vytvoření deformační oblasti – po evolventě

Pro definování souřadnic koncového bodu segmentu při 2D ohybu pro vytvoření deformační oblasti byl využit teoretický popis uvedený v kapitole 3.2. Pro definici bodů a analýzu byla vybrána vnější okrajová křivka evolventa. Z důvodu toho, že je to maximální možný dosah segmentu a tvar takto deformovaného segmentu pro každý bod na evolventě je právě jeden. Nadále se proto bude tento ohyb nazývat jako 2D ohyb po evolventě. Dále byla pro bod stanovena další okrajová podmínka, že koncový bod segmentu v pozici (I ÷ III) leží na imaginární přímce. Přímka je definována jako tečna k oblouku, který vznikl při ohybu segmentu do pravidelného oblouku v pozici (I ÷ III) Obrázek 37. Pomocí této metody byly při znalosti souřadnic z Tabulka 10 definovány souřadnice koncového bodu pro 2D ohyb po evolventě.



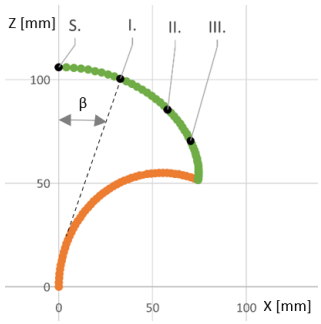
Obrázek 37 – Popis definování koncového bodu pro 2D ohyb po evolventě

Koordináty koncového bodu pro 2D ohyb po evolventě jsou uvedeny v Tabulka 11.

Tabulka 11. Koordináty bodu E pro pozice

Pozice	x [mm]	z [mm]	β [°]
0	0	106	0
I	32,83	100,44	19,88
II	58,05	85,64	41,97
III	70,16	70,50	61,84

Znázornění rozložení bodů po evolventě je uvedeno na Obrázek 38.



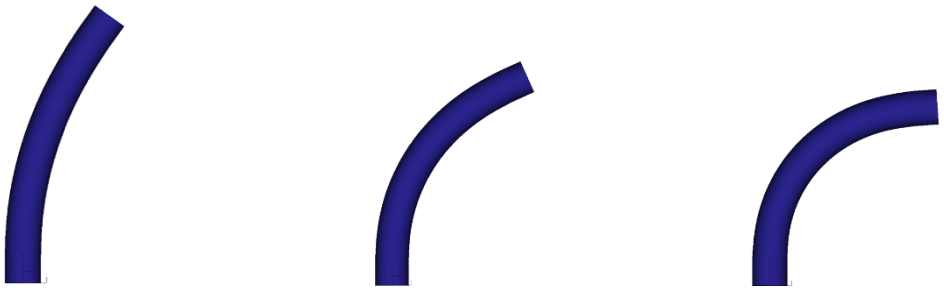
Obrázek 38 – Rozložení bodu na evolventě

5.4. Výsledky FEA analýzy

Výsledkem FEA analýzy jsou tři výstupy. Tvar deformace segmentu, posunutí koncového bodu segmentu a rozložení ekvivalentního napětí s určením jeho maxima. Níže jsou výstupy popsány pro představené dva způsoby ohybu segmentu.

Pro 2D ohyb do pravidelného oblouku

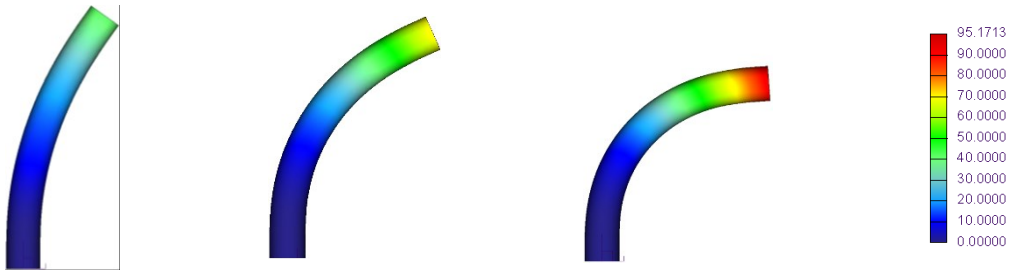
Na Obrázek 39 je prezentován vzniklý tvar segmentu při ohybu segmentu do pravidelného bodu ve všech třech pozicích koncového bodu.



(a) (b) (c)

Obrázek 39 – Výsledný tvar segmentu při ohybu do pravidelného oblouku (a) pozice I, (b) pozice II, (c) pozice III

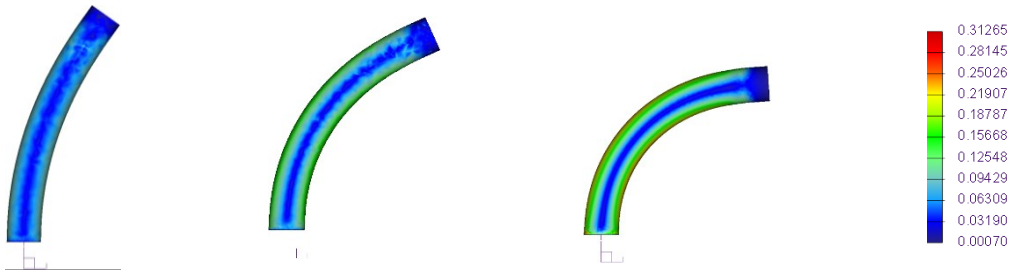
Na Obrázek 40 je znázorněna velikost posunutí v milimetrech při ohybu segmentu do koncových pozic.



(a) (b) (c) [mm]

Obrázek 40 – Výsledné posunutí segmentu při ohybu do pravidelného oblouku z původní pozice (a) pozice I, (b) pozice II, (c) pozice III

Na Obrázek 41 je vyobrazena velikost a rozložení ekvivalentního napětí ve struktuře. Z Obrázek 41 (a ÷ c) je patrné, že s rostoucí deformací vzniká větší ekvivalentní napětí ve struktuře. Díky tvaru deformace je ekvivalentní napětí rozloženo po celé délce deformovatelné části segmentu. Velikosti maximálního vzniklého ekvivalentního napětí pro jednotlivé deformace jsou uvedeny v Tabulka 12.



(a) (b) (c) [MPa]

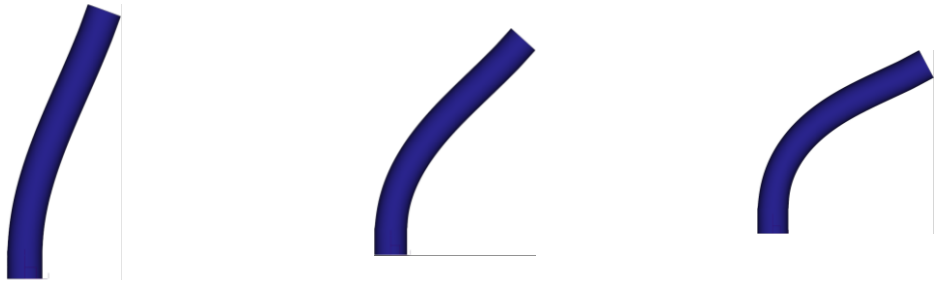
Obrázek 41 – Výsledná velikost a rozložení ekvivalentního napětí při ohybu do pravidelného oblouku (a) pozice I, (b) pozice II, (c) pozice III

Tabulka 12. FEA velikosti ekvivalentního napětí pro pozice I ÷ III

Pozice	Ekvivalentní napětí σ [MPa]
I	0,115
II	0,198
III	0,313

Pro 2D ohyb po evolventě

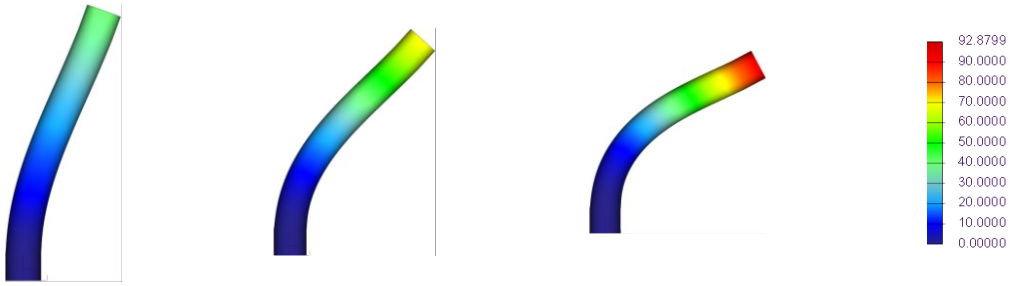
Na Obrázek 42 je prezentován vzniklý tvar segmentu při ohybu segmentu do pravidelného bodu ve všech třech pozicích koncového bodu.



(a) (b) (c)

Obrázek 42 – Výsledný tvar segmentu při ohybu po evolventě (a) pozice I, (b) pozice II, (c) pozice III

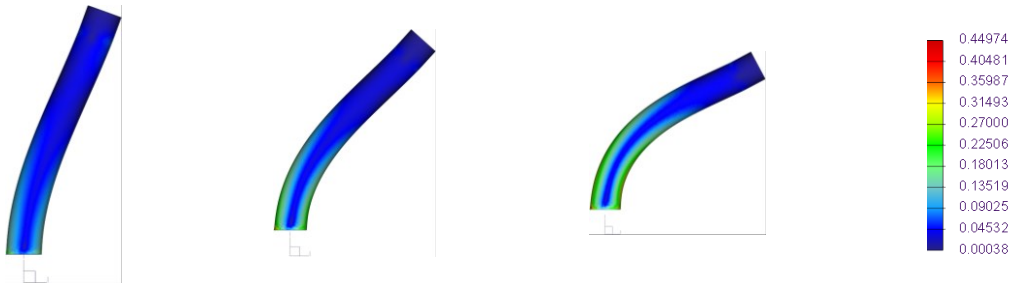
Na Obrázek 43 je znázorněna velikost posunutí v milimetrech při ohybu segmentu do koncových pozic.



(a) (b) (c) [mm]

Obrázek 43 – Výsledné posunutí segmentu při ohybu po evolventě z původní pozice (a) pozice I, (b) pozice II, (c) pozice III

Na Obrázek 44 je vyobrazena velikost a rozložení ekvivalentního napětí ve struktuře. Z Obrázek 44 (a ÷ c) je patrné, že s rostoucí deformací vzniká větší ekvivalentní napětí ve struktuře. Díky tvaru deformace je ekvivalentní napětí kumulováno v místě, kde dochází k deformaci segmentu. Nedeformovaná část, která je v matematickém popisu definovaná jako odvinutá přímka viz. kap.3.2 je napětím ovlivněna minimálně. Velikosti maximálního vzniklého ekvivalentního napětí pro jednotlivé deformace jsou uvedeny v Tabulka 13.



(a) (b) (c) [MPa]

Obrázek 44 – Výsledná velikost a rozložení ekvivalentního napětí při ohybu po evolventě (a) pozice I, (b) pozice II, (c) pozice III

Tabulka 13. FEA velikosti ekvivalentního napětí pro pozice I ÷ III

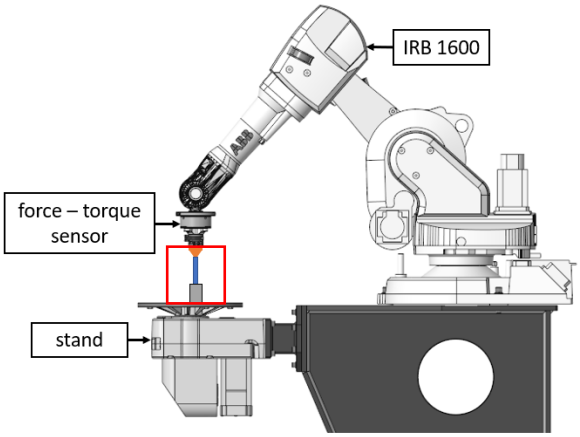
Pozice	Ekvivalentní napětí σ [MPa]
I	0,272
II	0,440
III	0,450

6. Experiment – Měření vznikajících sil a momentů s force – torque senzorem

Pro zjištění, jak se chová reálný obal segmentu při jeho deformaci byl navržen experiment pro jeho ohýbání. Motivací bylo zjistit reálné síly, které vznikají při ohybu segmentu v koncovém bodě E.

6.1. Popis experimentu

Pro měření vznikajících sil v koncovém bodě obalu E segmentu byl vytvořen měřící stand. Stand využívá pracoviště s robotem ABB IRB 1600 [34] Obrázek 45. Pracoviště je dále osazeno polohovacím stolem s 1 DoF a na robotu se nachází silově momentový senzor ABB Force Control ve velikosti small [35] Tabulka 14.



Obrázek 45 – Měřící stand

Tabulka 14. Parametry silově momentového senzoru ABB Force Control small [35]

DOF	Rozsah měřené síly [N]	Rozlišení měřené síly [N]	Rozsah měřeného momentu [Nm]	Rozlišení měřeného momentu [Nm]
6	Fx/Fy: 165 Fz: 495	Fx/Fy: 0,03 Fz: 0,11	Mx/My/Mz:15	Mx/My/Mz:0,003

V prostředí RobotStudio Obrázek 46 byl nasimulován pohyb robotu do koordinátu bodu E uvedených v Tabulka 10 a Tabulka 11. Manipulátor vychází z výchozího bodu, kdy je segment v nedeformovaném stavu.

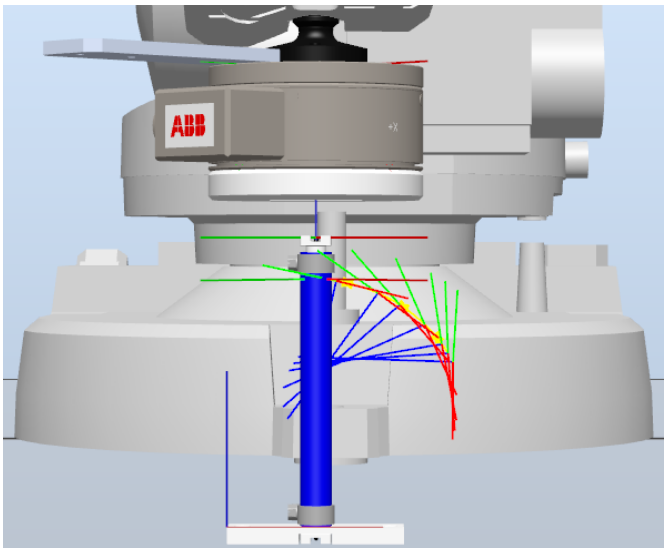
Z důvodu, že Robot studio neumožňuje simulovat deformaci segmentu, je simulován pouze pohyb manipulátoru. Algoritmus 5 (viz. Seznam příloh) pak popisuje průběh ohýbání segmentu do jednotlivých pozic. Pomocí funkce FOR a FROM je definovaný počet cyklů měření.

Robot se přesouvá do měřících pozic pomocí funkce MoveC. Kde proměnná Target_P1P představuje mezi bod mezi bodem Target_Start a Target_P1 ÷ Target_P3. Target_Start odpovídá bodům 0 a Target_P1 ÷ Target_P3 odpovídají bodů I ÷ III uvedených v Tabulka 10

a Tabulka 11. Další parametry ve funkci jsou systémové parametry robotu. Rychlost, zóna, data o nástroji a pracovní objekt.

Příkaz WaitTime je použit pro pěti vteřinovou prodlevu před přesunem do další měřené pozice. Toto je provedeno s ohledem na nutnost ustálení systému po přesunu do naměřené pozice a naměření ustálených hodnot sil a momentů.

Výsledné připravené body trajektorie pro měření deformace segmentu jsou prezentovány na Obrázek 46. Na obrázku jsou zobrazeny měřící body pro oba typy deformace. To znamená jak pro deformaci do pravidelného oblouku, tak pro deformaci po evolventě.



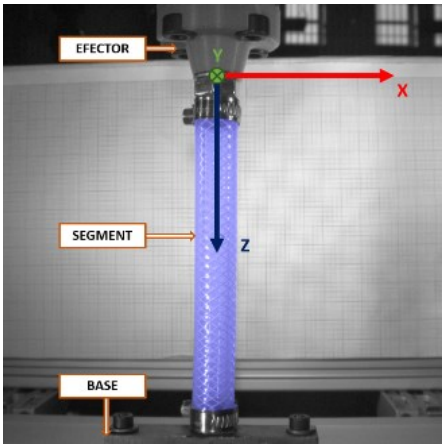
Obrázek 46 – Příklad připravených bodů v prostředí Robot Studio

Takto připravený program byl přenes na reálný systém. Připravený Algoritmus 6 (viz. Seznam příloh) načítal hodnoty pomocí funkce FCGetForce() a nastavuje hodnotu složky funkce na analogový výstup AO.

Kromě snímání velikosti sil momentů je pomocí Algoritmu 7 snímaná za pomocí funkce GetJointData pozice čtvrtého kloubu robotu n_j4. To je provedeno z důvodu určení, kdy došlo k ustálení pohybu robotu.

Výstup ze silově momentového senzoru byl během měření zaznamenáván a následně zobrazován v prostředí RobotStudio pomocí nástroje Signal Analyzer Online.

Souřadnicový systém, ve kterém byly snímány síly a momenty je zobrazen na Obrázek 47.



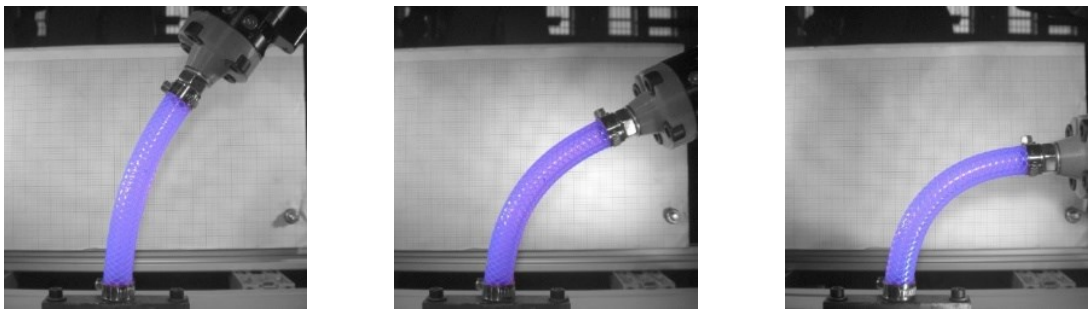
Obrázek 47 – Souřadnicový systém, ve které byly snímány síly a momenty

6.2. Výsledky experimentu

Výsledkem experimentu jsou dva výstupy. Tvar deformace segmentu a velikost sil a momentů vznikajícím v koncovém bodě segmentů pro oba typy deformací zmíněných v kap. 3.1 a 3.2.

2D ohyb do pravidelného oblouku

Na Obrázek 48 je znázorněna postupná deformace od pozice I Obrázek 48 (a) až po pozici III Obrázek 48 (c). Deformace byla snímaná pomocí průmyslové kamery v černobílém zobrazení. Pomocí grafického programu byl tvar deformace zvýrazněn pomocí modré barvy. Z Obrázek 48 (a ÷ c) je patrné, že deformace má tvar pravidelného oblouku. Kdy se zvětšující se deformací se zmenšuje poloměr tohoto oblouku.



(a) (b) (c)

Obrázek 48 – Výsledné tvary deformace segmentu při 2D ohybu do pravidelného oblouku (a) pro pozici I (b) pro pozici II (c) pro pozici III

Síly a momenty, které při takovéto deformaci vznikají jsou uvedeny v Tabulka 15. V tabulce jsou uvedeny průměry naměřených hodnot. Hodnoty reprezentují síly a momenty, které segment po deformaci vyvíjel na silově momentový sensor. Z tabulky je patrné, že při rostoucí deformaci se postupně snižuje síla působící v ose Z a narůstá v ose X.

Dále je patrné, že nedochází ke změně momentu v osách X, Z a narůstá moment kolem osy Y. To je jednoznačné vzhledem k souřadnicovému systému při deformaci segmentu Obrázek 47, kdy dochází pouze k natočení kolem osy Y.

Tabulka 15. Síly a momenty naměřené na FC při reálném měření 2D ohybu do pravidelného oblouku

Pozice	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]
I	2,64	0,05	5,66	0,05	0,06	0
II	3,71	0,09	2,68	0,05	0,11	0
III	3,15	0,14	0,29	0,06	0,22	0

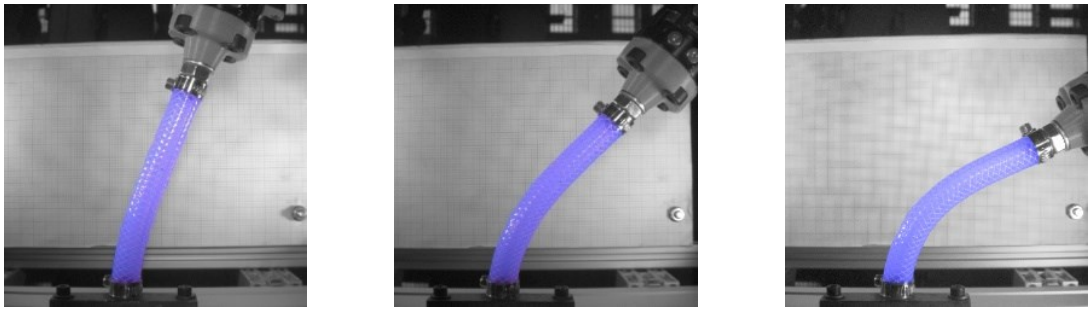
Rozptyl naměřených dat je vyobrazen na grafech Obrázek 49 (a, b).

(a) (b)

Obrázek 49 – Zobrazení rozptylu hodnot měření v pozicích I, II a III pomocí boxplotů (a) síly v osách X, Y, Z (b) momenty kolem os X, Y, Z

Pro 2D ohyb po evolventě

Na Obrázek 50 je znázorněna postupná deformace od pozice I Obrázek 50 (a) až po pozici III Obrázek 50 (c). Deformace byla snímaná pomocí průmyslové kamery v černobílém zobrazení. Pomocí grafického programu byl tvar deformace zvýrazněn pomocí modré barvy.



(a) (b) (c)

Obrázek 50 – Výsledné tvary deformace segmentu při 2D ohybu po evolventě (a) pro pozici I (b) pro pozici II (c) pro pozici III

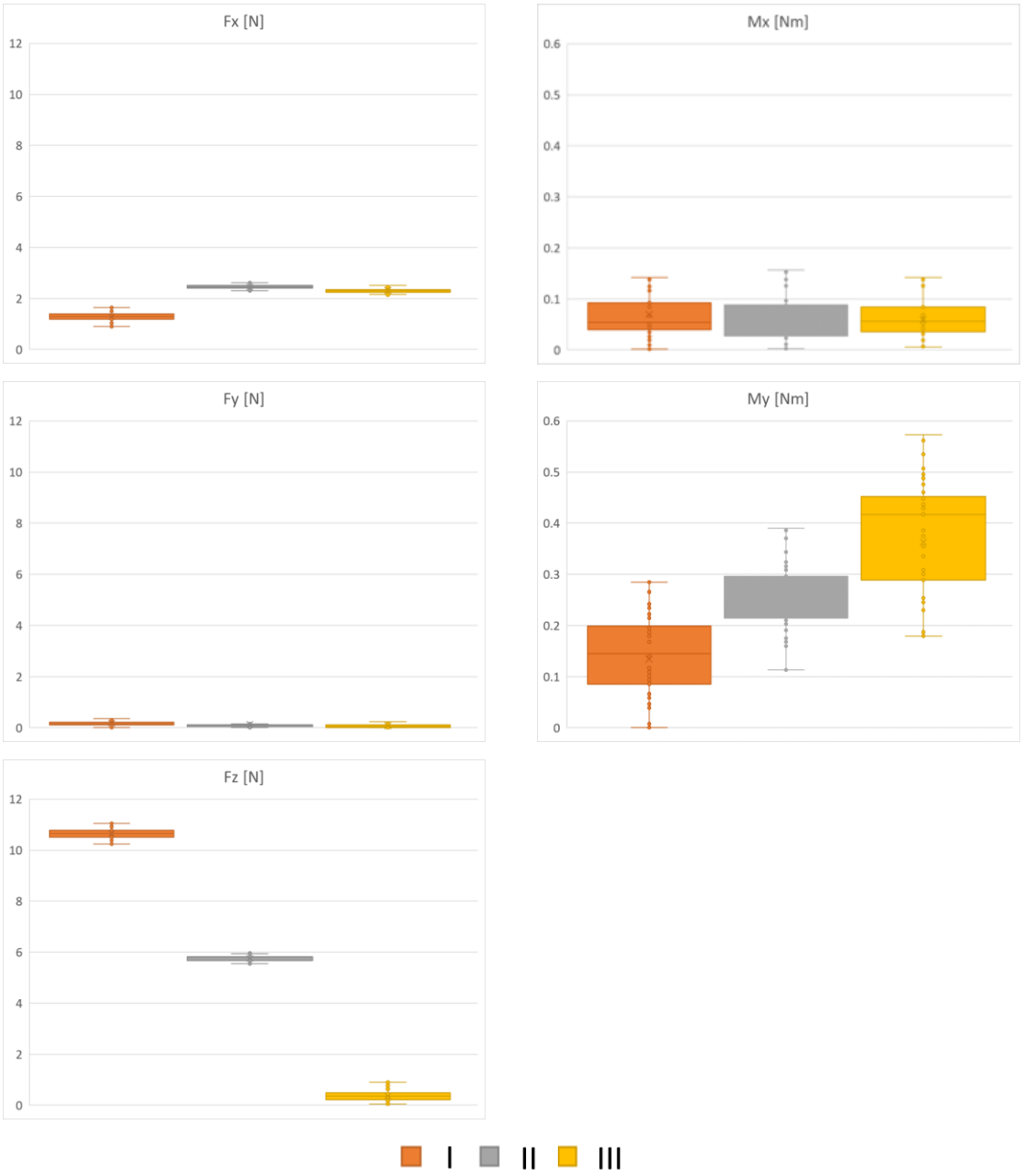
Síly a momenty, které při takovéto deformaci vznikají jsou uvedeny v Tabulka 16. V tabulce jsou uvedeny průměry naměřených hodnot. Hodnoty reprezentují síly a momenty, které segment po deformaci vyvíjel na silově momentový sensor. Z tabulky je patrné, že při rostoucí deformaci se postupně snižují síly působící v ose X a Z.

Dále je patrné, že nedochází ke změně momentu v osách X, Z a narůstá moment kolem osy Y. To je jednoznačné vzhledem k souřadnicovému systému při deformaci segmentu Obrázek 47, kdy dochází pouze k natočení kolem osy Y.

Tabulka 16. Síly a momenty naměřené na FC při reálném měření 2D ohybu segmentu po evolventě

Pozice	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]
I	1,29	0,17	10,64	0,07	0,14	0
II	2,45	0,13	5,75	0,06	0,24	0
III	2,31	0,08	0,36	0,06	0,36	0

Rozptyl naměřených dat je vyobrazen na grafech Obrázek 51 (a, b).



(a) (b)

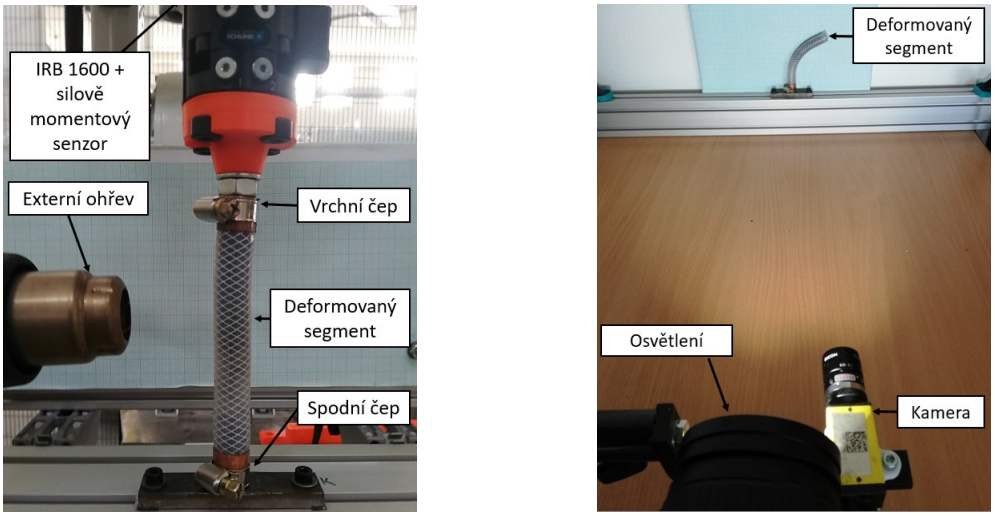
Obrázek 51 – Zobrazení rozptylu hodnot měření v pozicích I, II a III pomocí boxplotů (a) síly v osách X, Y, Z (b) momenty kolem os X, Y, Z

7. Experiment – Vliv ekvivalentního napětí na Fieldovou slitinou

Po provedení FEA analýzy a experimentálním ohýbání obalu segmentu, byl vytvořen segment, který již obsahoval Fieldovu slitinu. Při prvotních testech, byl ohnutý segment použit ve struktuře experimentálního manipulátoru. Po sestavení manipulátoru byl pozorován jev „narovnávání“ segmentu. Z tohoto důvodu byl navržen další experiment, který prezentuje vliv vzniklého ekvivalentního napětí na reálný segment.

7.1. Popis experimentu

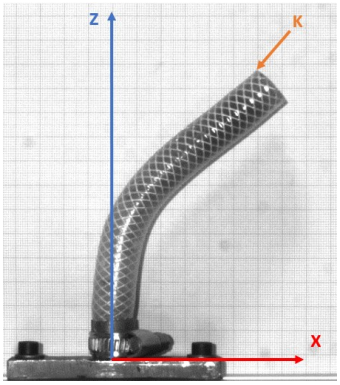
Pro první část experimentu byl segment nejprve deformován pomocí metody uvedené v kapitole 6 Obrázek 52 (a). Segment byl deformován v obou možných konfiguracích deformace dle kapitoly 5 do pozice III. Po deformaci byl upnut do měřícího místa. Pomocí průmyslové kamery je sledována změna deformace v čase. Měřící místo je popsáno na Obrázek 52 (b).



(a) (b)

Obrázek 52 – (a) deformační stand pro deformování segmentu do požadovaného bodu (b)měřící místo pro pozorování vlivu obalu segmentu na jeho jádro

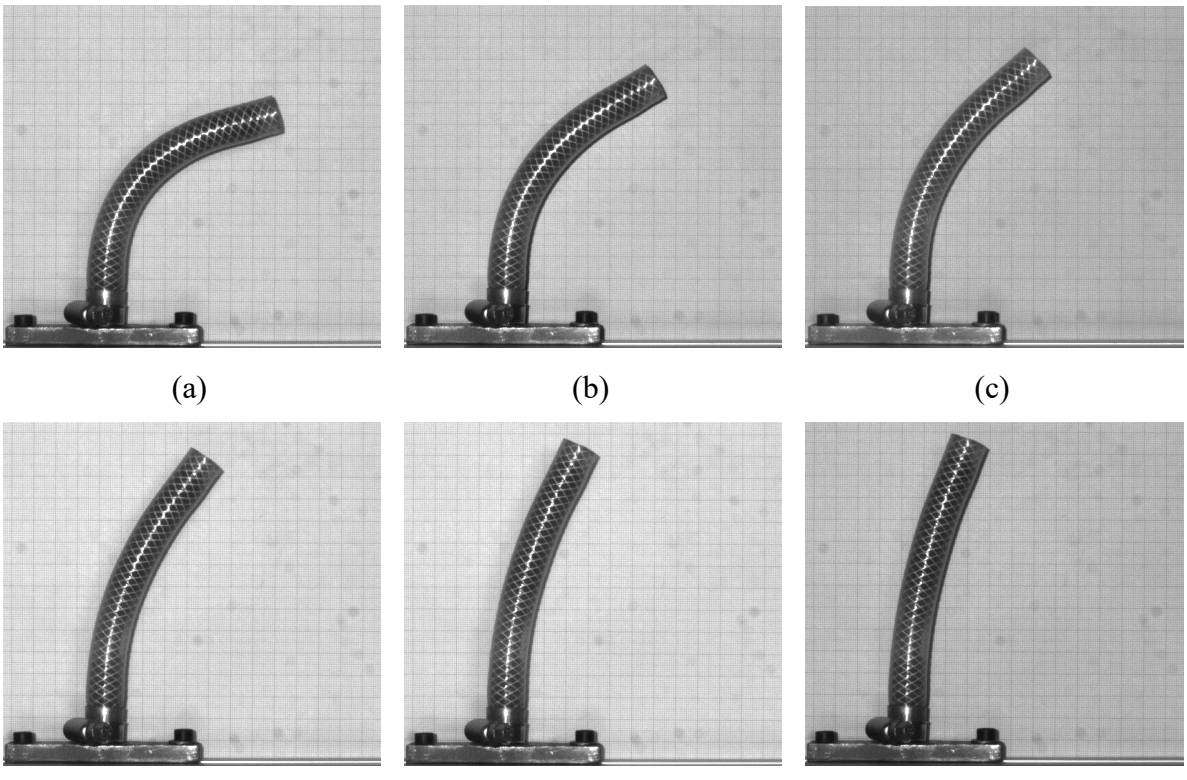
Kamera po dobu 72 hodin s frekvencí 6 snímku za minutu snímala změnu tvaru segmentu. Konec pozorování byl stanoven tak, že po této době se tvar ustáli a nedocházelo k další změně. Jako pozorovaný bod byl vybrán vnější bod na volném konci segmentu. Bod je označen písmenem K a jeho pozice na segmentu je zobrazena na Obrázek 53.



Obrázek 53 – Koncový bod K a souřadnicový systém

7.2. Výsledky experimentu

Výsledkem experimentu je pozorovaná změna tvaru. V prvním případě je pozorován vliv ekvivalentního napětí na strukturu deformovanou do 2D ohybu pravidelného oblouku. Výchozí stav měření je stav po hodině od deformace. Tento stav je vyobrazen na Obrázek 54 (a). Následně je na Obrázek 54 (b ÷ f) zobrazen stav segmentu po 6, 12, 24, 48 a 72 hodinách.



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Obrázek 54 – Výsledné tvary deformace segmentu při 2D ohybu do pravidelného oblouku (a) 1 hodina od deformace (b) 6 hodin od deformace (c) 12 hodin od deformace (d) 24 hodin od deformace (e) 48 hodin od deformace (f) 72 hodin od deformace

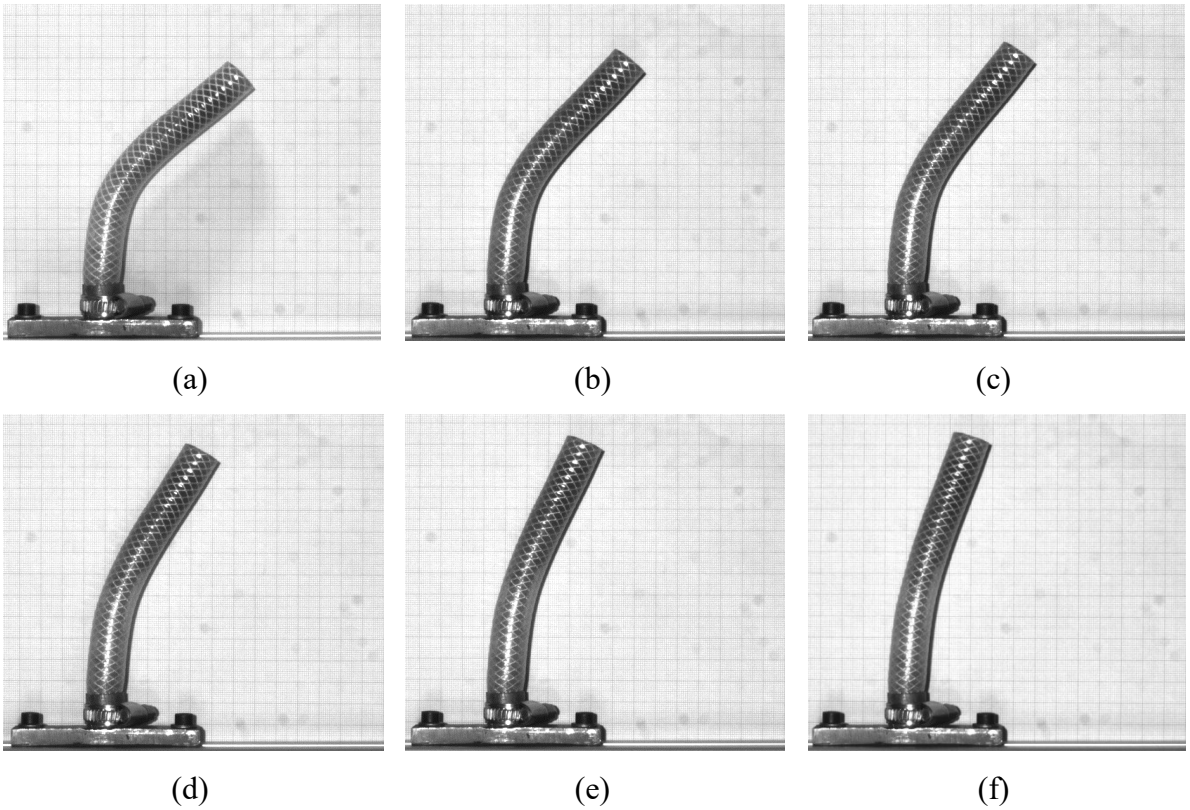
Souřadnice pozorovaného bodu K jsou pro jednotlivé časové body pozorování uvedeny v tabulce Tabulka 17.

Tabulka 17. Souřadnice koncového bodu K v čase – 2D ohyb do pravidelného oblouku

Čas [h]	X [mm]	Z [mm]
1	88	104
6	66	118
12	55	126
24	41	133
48	28	138
72	22	139

Z Obrázek 54 (a ÷ f) a Tabulka 17 je patrné, že ekvivalentní napětí (Tabulka 12) vzniklé při deformaci do 2D ohybu pravidelného oblouku je pro Fieldovu slitinu natolik veliké, že dochází k velmi výrazné změně deformace. Mezi první a šestou hodinou od deformace je působení natolik výrazné, že posune koncový bod K ze souřadnice [88, 104] do souřadnice [66, 118]. Tento jev je způsoben tečením materiálu [36]. Materiál se poddává vlivem působení vnější sil a svůj tvar mění v závislosti na působení ekvivalentního napětí.

V druhém případě je pozorován vliv ekvivalentního napětí na strukturu deformovanou do 2D ohybu po evolventě deformace – bod se při deformaci pohybuje po evolventní křivce. Výchozí stav měření je stav po hodině od deformace. Tento stav je vyobrazen na Obrázek 55 (a). Následně je na Obrázek 55 (b ÷ f) zobrazen stav segmentu po 6, 12, 24, 48 a 72 hodinách.



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Obrázek 55 – Výsledné tvary deformace segmentu při 2D ohyb po evolventě (a) 1 hodina od deformace (b) 6 hodin od deformace (c) 12 hodin od deformace (d) 24 hodin od deformace (e) 48 hodin od deformace (f) 72 hodin od deformace

Souřadnice pozorovaného bodu K jsou pro jednotlivé časové body pozorování uvedeny v tabulce Tabulka 18.

Tabulka 18. Souřadnice koncového bodu K v čase – 2D ohyb po evolventě

Čas [h]	X [mm]	Z [mm]
1	58	118
6	51	124
12	45	127
24	37	131
48	29	134
72	21	136

Z Obrázek 55 (a ÷ f) a Tabulka 18 je patrné, že ekvivalentní napětí vzniklé při deformaci do 2D ohybu po evolventě je pro Fieldovu slitinu natolik veliké, že dochází k velmi výrazné změně deformace. Mezi první a šestou hodinou od deformace je působení natolik výrazné, že posune koncový bod K ze souřadnice [88, 104] do souřadnice [66, 118]. Stejně jako v případě s deformací do pravidelného oblouku se materiál poddává vnější síle a svůj tvar mění v závislosti na působení ekvivalentního napětí.

Závěrem této kapitoly lze proto tvrdit, že pro zamýšlený účel využití Fieldovy slitiny pro tvarově měnitelné segmenty není na základě předběžných testů vhodné. Toto tvrzení vychází

z výsledků prezentovaných na Obrázek 54 a Obrázek 55. Tvarová nestálost deformace je natolik veliká, že nelze v případě manipulátoru vytvořeném z těchto segmentů uvažovat o řízení [37], kalibraci a opakovatelnosti polohování [38]. Z takto velikou tvarovou nestálostí by téměř neustále docházelo ke změně kinematické struktury.

Z tohoto důvodu muselo být upuštěno od použití Fieldovy slitiny jako hlavního komponentu zajišťující variabilitu tuhosti v tvarově měnitelném segmentu. Následující kapitola 8 se proto zabývá modifikací tvarově měnitelného segmentu na jiný materiál zajišťující variabilitu tuhosti systému.

8. Modifikace a efektivní změna skupenství segmentu

Ze zjištění v kapitole 7 krom zajištění efektivní změny skupenství materiálu s nízkou teplotou tání, vyplynula nutnost i modifikovat materiál. Modifikace materiálu může být provedena dvěma možnými způsoby.

Za prvé může být modifikována Fieldova slitina o další příměsi. Modifikací Fieldova kovu pomocí epoxidu nebo silikonového elastomeru [39].

Za druhé je modifikaci možné provést záměnou základního materiálu. Jako alternativa k Fieldově slitině lze místo kovového materiálu využít termoplasty. Prvním z možných zástupců je Polykaprolakton PCL [40]. Jedná se o biologicky rozložitelný materiál s teplotou tání velmi blízkou Fieldově slitině. Základní vlastnosti jsou uvedeny v Tabulka 19.

Tabulka 19. Parametry PCL materiálu [40]

Hustota [kg/m^3]	Pevnost v tahu [MPa]	Teplota tání [°C]
1 145	14	60

Jeho směsi se využívají pro kostní tkáňové inženýrství. Příkladem těchto směsí je PCL s karbonovými vlákny [41], PCL/HA [42] [43] [44] a PCL/PVPA [45]. PCL/HA je směs PCL a minerálu hydroxylaptitu [46]. Teplota tání čistého materiálu není příměsí ovlivněna naopak pevnost v tahu je příměsí snížena až o 86 % [43]. U směsi PCL/PVPA je směs PCL s kyselinou vinylfosfonovou akrylovou [47]. Teplota tání čistého materiálu není příměsí ovlivněna naopak pevnost v tahu je příměsí je navýšena o 500 % [45].

Další alternativou v kategorii termoplastů je materiál Glykolem modifikovaný Polyethylene Terephthalate PETG. Materiál má dobré mechanické vlastnosti, je houževnatý a běžně se z něj vyrábějí mechanicky namáhané díly [48] [49]. Teplota tání je okolo 260°C. Teplota, kdy je již možné materiál formovat je 68°C. Další výhodou tohoto materiálu je, že je běžně využíván v oblasti rapid prototapingu [50]. Díky možnosti 3D tisku je možné materiál modifikovat pomocí karbonového vlákna. Vlákno lze do materiálu vkládat kontinuálně nebo jako jednotlivé elementy [51].

8.1. Modifikace segmentu – změna typu nízkotavitelného materiálu

Z uvedených termoplastů byl vybrán materiál PETG. Hlavní výhodou tohoto plastu je jeho rozšíření v oblasti FFF 3D tisku [52]. Materiál má dvě významné teploty. Teplotu formování, kdy je již možné materiál deformovat a teplotu skelného přechodu. Skelný přechod je stav, kdy dochází k prudké změně vlastností. Po tomto přechodu se z formovatelného stavu stává stav elastický. [53] Materiálové vlastnosti PETG jsou uvedeny v Tabulka 20.

Tabulka 20. Vlastnosti PETG [54]

Parametr	Hustota [g/cm^3]	Pevnost v tahu [MPa]	Tvrdost dle Rockwella	Lineární koeficient tepelné expanze α (CTE) [K^{-1}]	Teplota skelného přechodu [°C]	Teplota formování [°C]
	1,27	51,4	110	64,6·10^{-6}	81	68

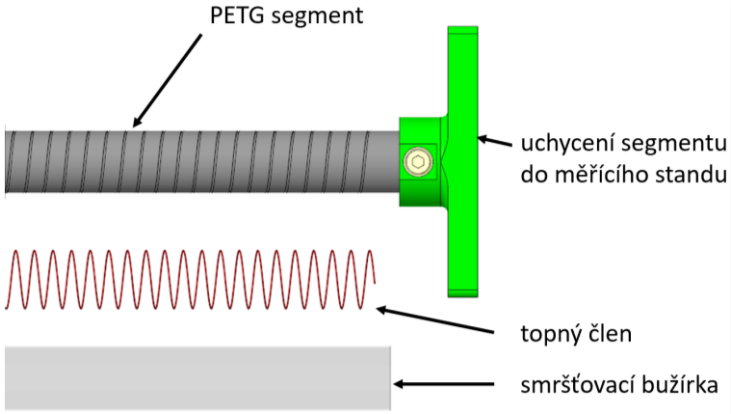
Stejně jako v kapitole 1.3 bylo jako první pro PETG určena její objemová roztažnost po jejím zahřátí. Roztažnost je prezentována na stejném vzorku jako u Fieldovy slitiny.Pro výpočet objemové roztažnosti je využit vztah (4). Výsledná hodnota teplotní roztažnosti PETG je uvedena v Tabulka 21. V Tabulka 21 jsou pak uvedeny výsledky pro vztahy (1)(2)(4)(6).

Tabulka 21. Výsledky výpočtu pro určení tepelné objemové roztažnosti pro PETG

Parametr	V_0 [mm^3]	β [K^{-1}]	t_x [C°]	V [mm^3]	ΔV [mm^3]	ΔV [%]
Hodnota	7513,5	19,4·10^{-5}	70	7615,5	102	1,4
			80	7630,1	116,6	1,6
			90	7644,7	131,2	1,8

Z výsledku je patrné, že objemová tepelná roztažnost je řádově vyšší než u Fieldovy slitiny. Přesto jsou hodnoty roztažnosti minimální v jednotkách procent. Roztažnost bude mít minimální vliv na strukturu segmentu.

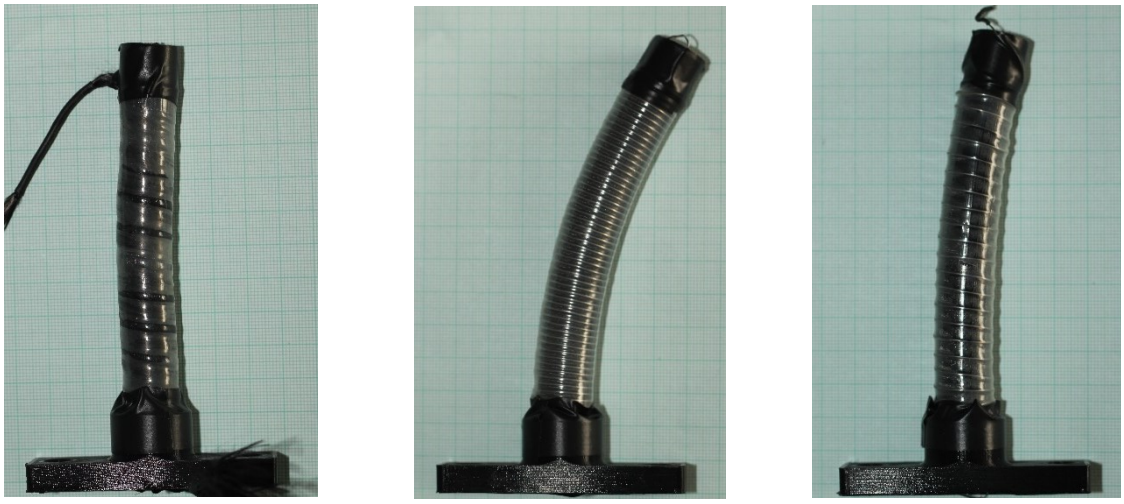
Segment z PETG viz. Obrázek 56 má stejnou délku a vnější průměr jako segment s Fieldovou slitinou viz. kapitola 5.1. Segment je celý tvořen materiálem s nízkou teplotou tání PETG a je vyroben pomocí metody 3D tisku FFF. Uchycení segmentu do měřícího standu je realizováno pomocí svěrného spoje v místě tepelně nezatížené konce segmentu. V segmentu jsou vytištěny drážky pro umístění topného členu pro jeho zahřátí viz. kapitola 8.2. Z důvodu toho, že zahřívání je realizováno pomocí elektrického tepla bylo nutné člen odizolovat. Odizolování topného členu od okolí bylo realizováno pomocí smršťovací bužírky.



Obrázek 56 – Segment z PETG

8.2. Efektivní změna skupenství segmentu z PETG

Efektivní změna skupenství byla zkoumána na upraveném experimentální segmentu uvedené v kapitole 8.1. Efektivní změna skupenství byla měřena celkem pro tři typy segmentů s dvěma typy topných elementů. Segmenty jsou zobrazeny na Obrázek 57 (a ÷ c).



(a) (b) (c)

Obrázek 57 – Segment z PETG (a) s uhlíkovým vláknem (b) s odporovým drátem, stoupání vinutí 2 mm (c) s odporovým drátem, stoupání vinutí 5 mm

Segment Obrázek 57 (a) využívá jako topný element uhlíkové vlákna [55]. Vlákna jsou navinuta v drážce o hloubce 0,5 mm a šířce drážky 8 mm. Vlákna jsou navinuta se stoupáním 10 mm. Navinuté vlákno na segmentu má celkový odpor 14,2 Ω.

Segment Obrázek 57 (b, c) vyžívají jako topný element odporový drát. Jedná se o kanthalový drát s odporem 6,9 Ω/m. Průměr drátu je 0,5 mm. Drát je navinut ve vytvořené drážce segmentu. Stoupání drátu je pro segment Obrázek 57 (b) 2 mm a Obrázek 57 (c) 5 mm.

Při experimentu byl měřen čas, kdy se teplota na vnějšku segmentu Ot dostala na teplotu formování viz. Tabulka 20. Zahřívání probíhalo tak dlouho, dokud se segment neprohřál ve své střední části It na teplotu formování. Pokud při tomto procesu dosáhla teplota vnější části segmentu teplotu skelného přechodu, zahřívání bylo v této teplotě regulováno v rozsahu +- 4 °C. Segment byl zahříván pro dvě hodnoty napětí (12 V a 24 V) a tři hodnoty proudy (1 A; 1,5 A; 2 A). Dolní hranice proudu byla volena z hlediska efektivního času zahřátí. Při hodnotách nižších, než 1 A se segment zahříval v řádech vyšších desítek minut. Horní hranice pak byla volena vzhledem k tomu, že při hodnotách vyšších než 2 A nebyl rozdíl času pro dosáhnutí požadované vnější teploty natolik výrazný než při 2 A. Měření teploty probíhalo na vnějšku segmentu a v jeho středu. Vnější a vnitřní měření teploty probíhalo pomocí kalibrované teplotní sondy.

Výsledky pro uhlíkové vlákno jsou uvedeny v Tabulka 22. Nejrychlejší prohřátí segmentu proběhlo při 24 V a 2 A. Teplota povrchu při dosažení požadované teploty středu činila 84 °C. Nejlepší poměr dob od dosažení požadované teploty na povrchu a ve středu segmentu je při 12 V a 2 A. Poměr dob činí 1,6 : 1 a teplota povrchu při dosažení požadované teploty vnější části segmentu činila 73 °C.

Tabulka 22. Výsledky měření zahřívání pro uhlíkové vlákno

Proud [A]	**12 V**		**24 V**	
	It [s]	**Ot [s]**	**It [s]**	**Ot [s]**
1	1159	535	544	303
1,5	757	458	256	95
2	705	442	208	54

Výsledky odporového drátu navinutého na segment se stoupáním 2 mm je uvedeno v Tabulka 23. Nejrychlejší prohřátí segmentu proběhlo při 24 V a 2 A. Teplota povrchu při dosažení požadované teploty středu činila 85°C. Nejlepší poměr dob od dosažení požadované teploty na povrchu a ve středu segmentu je při 12 V a 2 A. Poměr dob činí 1,2 : 1 a teplota povrchu při dosažení požadované teploty vnější části segmentu činila 70 °C.

Tabulka 23. Výsledky měření zahřívání pro odporový drát se stoupáním 2 mm

Proud [A]	**12 V**		**24 V**	
	It [s]	**Ot [s]**	**It [s]**	**Ot [s]**
1	770	567	195	80
1,5	605	462	183	55
2	565	458	158	51

Výsledky odporového drátu navinutého na segment se stoupáním 5 mm je uvedeno v Tabulka 24. Nejrychlejší prohřátí segmentu proběhlo při 24 V a 2 A. Teplota povrchu při dosažení požadované teploty středu činila 83°C. Nejlepší poměr dob od dosažení požadované teploty na povrchu a ve středu segmentu je při 12 V a 1 A. Poměr dob činí 1,2 : 1 a teplota povrchu při dosažení požadované teploty středu činila 70 °C.

Tabulka 24. Výsledky měření zahřívání pro odporový drát se stoupáním 5 mm

Proud [A]	**12 V**		**24 V**	
	It [s]	**Ot [s]**	**It [s]**	**Ot [s]**
1	393	328	390	323
1,5	267	168	198	99
2	266	161	160	52

9. Shrnutí výsledků

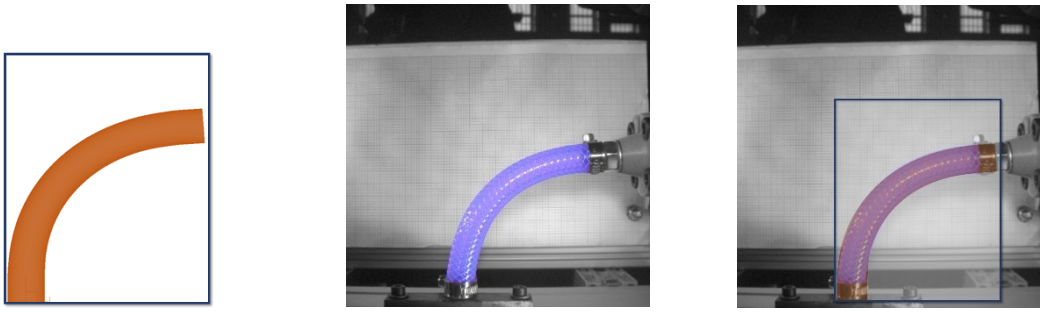
V kapitole jsou shrnuty dosažené výsledky a dochází k jejich porovnání. Porovnávají se výsledky dosažené pomocí FEA analýzy mezi sebou Obrázek 58 a Obrázek 61. Dále se porovnávají dosažené výsledky z FEA analýzy a reálného měření segmentu Obrázek 59 a Obrázek 60. Dále jsou porovnány výsledky z reálných měření Obrázek 62 a Obrázek 63. Na závěr kapitoly jsou prezentovány průběhy zahřívání segmentu z PETG.

Prvním z porovnaných výsledků je výsledek rozložení ekvivalentního napětí při 2D ohyb po evolventě a 2D ohyb do pravidelného oblouku Obrázek 58 (a, b). Z porovnání je patrné, že při deformaci do pravidelného oblouku se ekvivalentní napětí rovnoměrně rozloží po celé deformované délce. Naopak při 2D ohyb po evolventě dochází k jeho kumulaci v deformované oblasti a pouze minimálně zasahuje do oblasti která na deformovanou část tečně navazuje.

(a) (b)

Obrázek 58 – Porovnání rozložení ekvivalentního napětí při deformaci segmentu do III (a) 2D ohyb do pravidelného oblouku, (b) 2D ohyb po evolventě

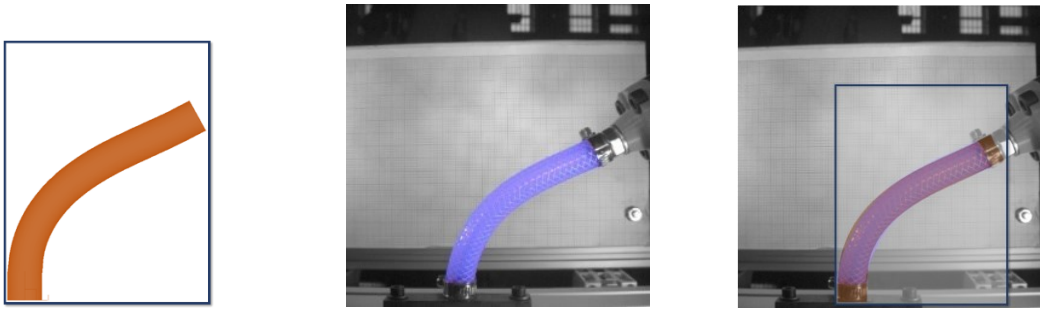
Na Obrázek 59 je zobrazeno porovnání výsledků deformace segmentu do pozice III pomocí 2D ohybu do pravidelného oblouku. Obrázek 59 (a) vyobrazuje matematicky popsaný segment deformovaný do pozice III za využití FEA analýzy. Výsledný tvar vzniklý při reálném měření deformace segmentu je vyobrazen na Obrázek 59 (b). Pro porovnání výsledného tvaru je na Obrázek 59 (c) průnik matematického a reálného deformovaného tvaru. Z tohoto průniku je patrné, že matematicky provedený ohyb svým tvarem odpovídá ohybu vytvořeném při reálné deformaci segmentu.



(a) (b) (c)

Obrázek 59 – Porovnání výsledného matematického tvaru ohybu segmentu s reálným ohybem – 2D ohyb do pravidelného oblouku (a) matematicky tvar, (b) reálný tvar, (c)vizuální porovnání (sloučení) matematického a reálného tvaru

Na Obrázek 60 je zobrazeno porovnání výsledků deformace segmentu do pozice III pomocí 2D ohybu po evolventě. Obrázek 60 (a) vyobrazuje matematicky popsaný segment deformovaný do pozice III za využití FEA analýzy. Výsledný tvar vzniklý při reálném měření deformace segmentu je vyobrazen na Obrázek 60 (b). Pro porovnání výsledného tvaru je na Obrázek 60 (c) průnik matematického a reálného deformovaného tvaru. Z tohoto průniku je patrné, že matematicky provedený ohyb svým tvarem odpovídá ohybu vytvořeném při reálné deformaci segmentu.



(a) (b) (c)

Obrázek 60 – Porovnání výsledného matematického tvaru ohybu segmentu s reálným ohybem – 2D ohyb po evolventě (a) matematicky tvar, (b) reálný tvar, (c)vizuální porovnání (sloučení) matematického a reálného tvaru

Tabulka 25 pak ukazuje souhrn naměřených parametrů matematické a reálné deformace segmentu. Tabulka obsahuje velikost deformační oblasti a velikost ekvivalentního napětí v bodech I ÷ III definovaných pomocí vyšetření pracovní oblasti a FEA analýzy. Dále pak tabulka obsahuje naměřené hodnoty z reálné deformace segmentu. V tabulce jsou vyobrazeny pouze síly a momenty, ve kterých došlo k změně velikosti nad rozlišovací úroveň senzoru. Dále je v tabulce vyobrazena výslednice sil X a Z.

Tabulka 25. Výsledky FEA analýzy a reálného měření pro 2D ohyb do pravidelného oblouku

Deformační oblast [mm^2]	σ I [MPa]	σ II [MPa]	σ III [MPa]		P I	P II	P III
0	0,12	0,20	0,31	Fx [N]	2,64	3,71	3,15
				Fz [N]	5,66	5,68	0,29
				Fxz [N]	6,25	4,58	3,16
				My [Nm]	0,06	0,11	0,22

Tabulka 26 pak zobrazuje souhrn naměřených parametrů matematické a reálné deformace segmentu. Tabulka obsahuje velikost deformační oblasti a velikost ekvivalentního napětí v bodech I ÷ III definovaných pomocí vyšetření pracovní oblasti a FEA analýzy. Dále pak tabulka obsahuje naměřené hodnoty z reálné deformace segmentu. V tabulce jsou vyobrazeny pouze síly a momenty, ve kterých došlo k změně velikosti nad rozlišovací úroveň senzoru. Dále je v tabulce vyobrazena výslednice sil X a Z.

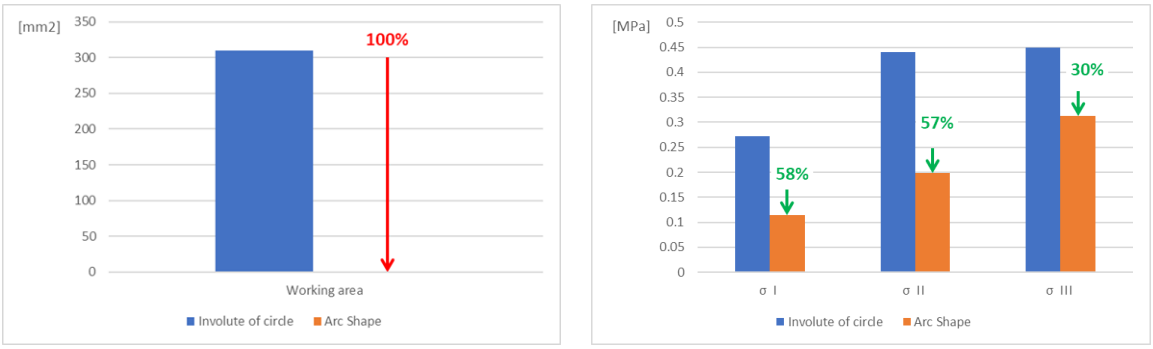
Tabulka 26. Výsledky FEA analýzy a reálného měření pro 2D ohyb po evolventě

Deformační oblast [mm^2]	σ I [MPa]	σ II [MPa]	σ III [MPa]		P I	P II	P III
309,417	0,272	0,440	0,450	Fx [N]	1,29	2,45	2,31
				Fz [N]	10,64	5,75	0,36
				Fxz [N]	10,72	6,25	2,34
				My [Nm]	0,14	0,24	0,36

Porovnání výsledků z Tabulka 25 a Tabulka 26 jsou vyobrazeny formou grafů na Obrázek 61 až Obrázek 63.

Obrázek 61 (a) porovnává velikost pracovní oblasti, která vzniká při deformaci segmentu metodou 2D ohyb po evolventě a 2D ohyb do pravidelného oblouku. Z definice ohybu je patrné, že pokles velikosti deformační oblast je 100% neboť při deformaci 2D ohyb do pravidelného oblouku žádná pracovní oblast nevzniká. Toto lze brát jako negativní jev.

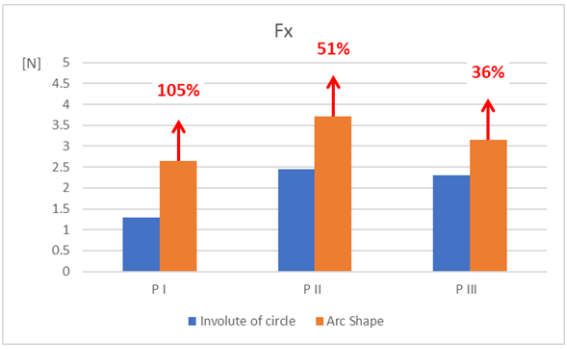
Na Obrázek 61 (b) je pak vyobrazen rozdíl velikosti vzniklého ekvivalentního napětí pro oba typy deformace. Při 2D ohybu do pravidelného oblouku je pokles velikosti ekvivalentního napětí v deformačním bodě I 58%. S narůstající deformací rozdíl mezi ekvivalentním napětím vzniklým při 2D ohybu po evolventě a 2D ohybu do pravidelného oblouku klesá. V bodě II je pokles napětí 57% a v bodě III je pokles napětí 30%. Na základě rozložení ekvivalentního napětí Obrázek 58 (a) a jeho velikosti Obrázek 61 (b) lze říct, že při 2D ohybu do pravidelného oblouku dochází k menšímu zatížení struktury segmentu ekvivalentním napětím při jeho deformaci. Toto může převážit eliminaci deformační oblasti na pouhou křivku.



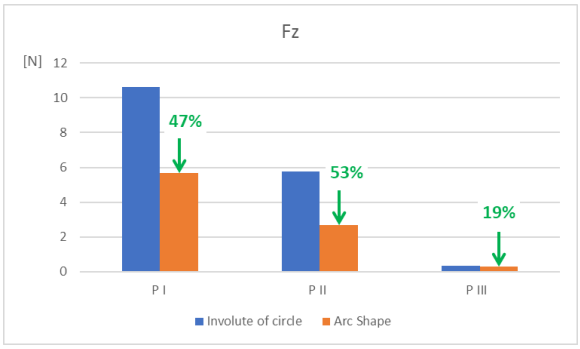
(a) (b)

Obrázek 61 – Porovnání výsledků pro 2D ohyb do pravidelného oblouku a 2D ohyb po evolventě (a) velikost deformační oblasti, (b) velikost ekvivalentního napětí v jednotlivých deformačních bodech I ÷ III

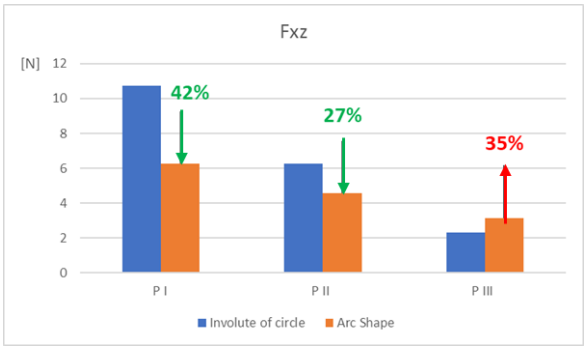
Porovnání velikosti sil a momentů naměřených pomocí silově momentového senzoru při reálných měřeních jsou vyobrazeny na Obrázek 62 (a ÷ c). Je patrné, že síla v ose X Obrázek 62 (a) má své maximum při obou typech ohybu v bodě II. Dále je možné pozorovat, že velikost síly v ose X při deformaci 2D ohyb do pravidelného oblouku je vyšší než při deformaci 2D ohyb po evolventě. Konkrétně v bodě I je velikost vyšší o 105 %, v bodě II o 51% a v bodě III o 36%. Naopak v ose Y Obrázek 62 (b) je trend opačný. Velikost vznikající síly při deformaci 2D ohyb do pravidelného oblouku je nižší než při deformaci 2D ohyb po evolventě. Konkrétně v bodě I je velikost nižší o 47%, v bodě II o 53% a v bodě III o 19%. Z tohoto důvodu byla ještě vyjádřena výslednice těchto dvou sil XZ. V prvních dvou deformačních bodech I a II dochází k poklesu síly o 42% respektive o 27% při deformaci 2D ohyb do pravidelného oblouku. K opačnému jevu došlo v bodě III kdy došlo k nárustu síly o 35%. To je dané dosaženým tvarem segmentu v koncovém bodě III při deformaci 2D ohyb do pravidelného oblouku a jeho tendencí navrátit se do nedeformovaného stavu. Je evidentní, že tato snaha je v bodě III pro 2D ohyb po evolventě nižší.



(a)



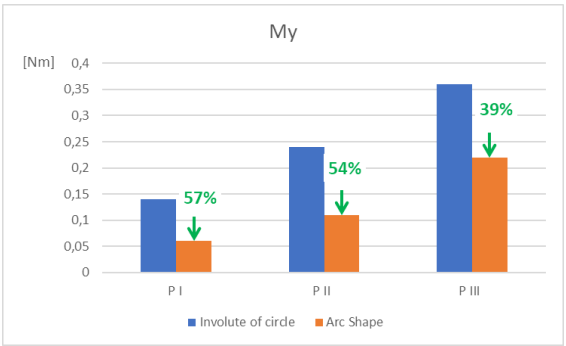
(b)



(c)

Obrázek 62 – Porovnání výsledků pro 2D ohyb do pravidelného oblouku a 2D ohyb po evolventě (a) velikost vzniklých sil v ose X při reálném měření, (b) velikost vzniklých sil v ose Z při reálném měření, (c) velikost výslednice sil os X a Z při reálném měření

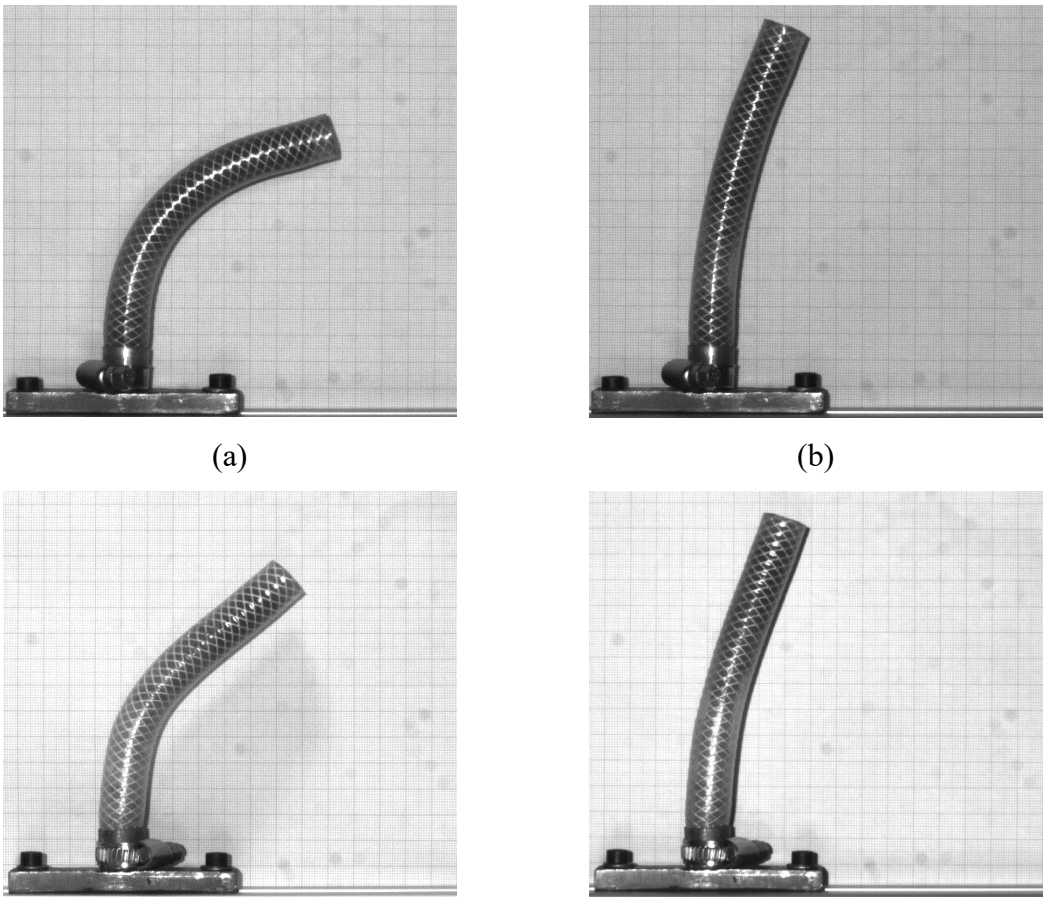
Na Obrázek 63 je vyobrazen moment kolem osy Y, u kterého jako jediného docházelo ke změně což je vzhledem k deformaci žádoucí. Pokud by docházelo k ovlivnění i jiných os znamenalo by to nerovinný ohyb segmentu při reálném měření. Zde je patrné, že při deformaci 2D ohyb do pravidelného oblouku je vzniklý moment kolem osy Y v bodě I nižší o 57 %, v bodě II o 54 % a v bodě III o 39 %.



Obrázek 63 – Porovnání výsledků vzniklých momentů v ose Y při reálném měření pro 2D ohyb do pravidelného oblouku a 2D ohyb po evolventě

Pro prezentaci vlivu ekvivalentního napětí na jádro z materiálu s nízkou teplotou tání byl segment deformován do bodu III. Deformace proběhla oběma přístupy. 2D ohyb do pravidelného oblouku je zobrazen na Obrázek 64. Je patrné, že z původního počátečního

deformovaného tvaru Obrázek 64 (a) se po 72 hodinách, vlivem ekvivalentního napětí, segment téměř vrátil do nedeformovaného tvaru Obrázek 64 (b). Stejně tak se choval i segment deformovaný pomocí přístupu 2D ohyb po evolventě Obrázek 64 (c, d). I přes rozložení ekvivalentního napětí po celé délce segmentu Obrázek 58 a jeho redukce v maximu o 58 % Obrázek 61 (b) při 2D ohyb do pravidelného oblouku nedošlo k poklesu tendence samovolného narovnávání deformovaného segmentu.



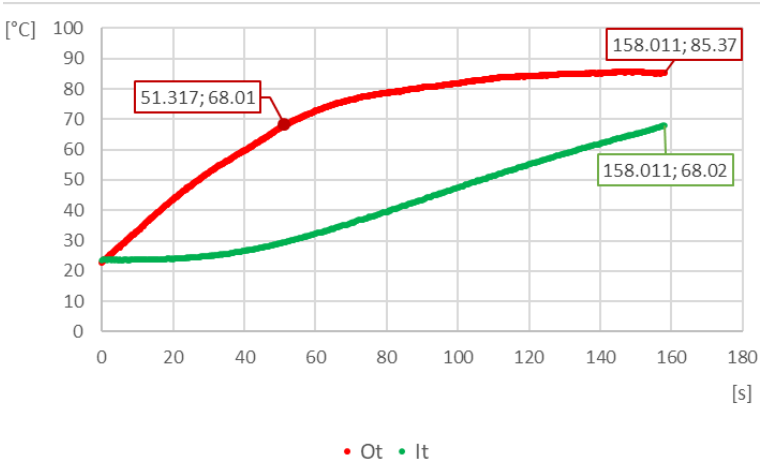
(a) (b)

(c) (d)

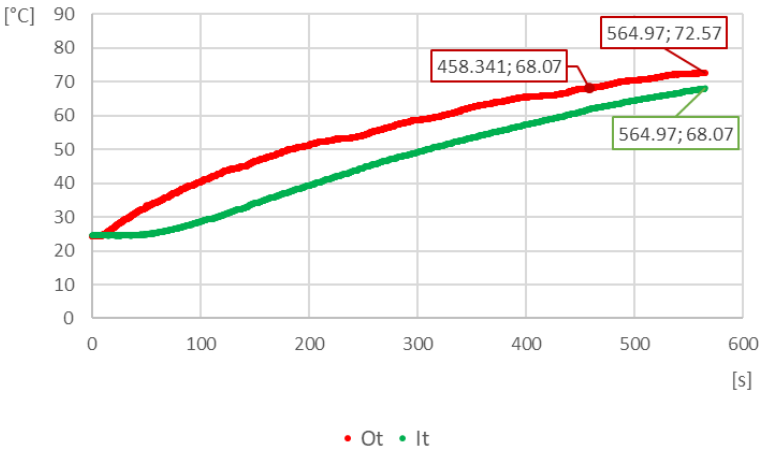
Obrázek 64 – 2D ohyb do pravidelného oblouku (a) tvar deformace na začátku měření (b)tvar deformace po 72 hodinách; 2D ohyb po evolventě (c) tvar deformace na začátku měření (d)tvar deformace po 72 hodinách

Při zahřívání segmentu z PETG materiálu se nejlépe zahříval segment s odporovým drátem. Drát byl na segment navinut se stoupáním 2 mm. Segment se v této konfiguraci nejrychleji zahřál na požadovanou teplotu při 24V a 2A. Vnější požadované teploty Ot bylo dosaženo za 51 sekund. Vnitřní požadovaná teplota byla dosažena za 158 s Obrázek 65 (a). Při stejné konfiguraci došlo i k nejmenšímu poměru času od dosažení požadované teploty Ot a It. Poměr je 1,2 : 1 při 12V a 2A Obrázek 65 (b). Tento poměr může být důležitý pro případnou teplotní degradaci materiálu. Zda při působení zvýšené teploty na vnější část materiálu dochází ke zhoršení fyzikálních nebo mechanických vlastností celého segmentu [56]. Při pozvolném

prohřátí, kdy jsou teploty Ot a It při zahřívání velmi blízko sobě, nedochází k výraznému teplotnímu rozdílu v objemu materiálu.



(a)



(b)

Obrázek 65 – Průběh zahřívání pro odporový drát navinutý se stoupáním 2 mm (a) nejrychlejší 24V a 2A (b) nejmenším poměrem času od dosáhnutí požadovaných teplot Ot a It – 12V a 2A

10. Závěry

V úvodní části je prezentován aktuální stav řešené problematiky. Rešerše popisuje existující moduly a jejich uzamykací systémy. Následně jsou uvedeny systémy, které pro svou modularitu využívají změnu svého tvaru. Dále jsou popsány principy, jak segmenty dosahují variabilitu své tuhosti. Nakonec je blíže popsán princip změny tuhosti pomocí změny teploty materiálu s nízkou teplotou tání, kterou se zabývá tato práce. Na základě provedené rešerše byl definován hlavní cíl a dílčí cíle pro jeho dosažení.

Prvním cílem bylo definovat pracovní prostor tvarově měnitelného segmentu. Definice deformačního prostoru popisuje kapitola 3. Při definování cíle byl tento prostor nazván jako pracovní, vhodnější název je ale deformační prostor. Jedná se o prostor, kam je možné deformovat koncový bod segmentu. Prostor ovlivňují dvě okrajové podmínky, délka segmentu a minimální poloměr ohybu segmentu. Tvarově měnitelný segment pak lze deformovat pomocí dvou přístupů. Prvním způsobem je deformace segmentu do definovaného tvaru, pravidelného oblouku. Pomocí této deformace nevzniká deformační prostor ale pouze křivka. Druhým způsobem je deformace, kde není okrajovou podmínkou žádaný tvar ale pouze délka segmentu a minimální poloměr ohybu. Při této deformaci vzniká 2D deformační prostor. Hraniční křivky tohoto prostoru tvoří evolventa a kardioida. Pro oba typy deformace je jedna z okrajových podmínek délka segmentu. Z tohoto důvodu došlo k navržení metody, jak určit její optimální velikost. Metoda pracuje s významností napětí, které vznikne při zatížení vetknutého segmentu osamělou silou na jeho konci. Významnosti průhybu při stejném případu zatížení jako u významnosti napětí. Jako poslední do metody vstupuje významnost velikosti deformační plochy, která vznikne při dané vyšetřované délce segmentu.

V kapitole 4 je představen vliv deformace segmentu na strukturu 3DoF manipulátoru. Zkoumány byly tři struktury. Struktura s nedeformovanými segmenty, struktura s kombinací nedeformovaného a deformovaného segmentu. Třetí struktura pak má všechny segmenty deformované. Segmenty byli deformovány podle navržené metody v kapitole 3. V simulační prostředí CoppeliaSim byl zkoumán vliv zakřivení na velikost a prostorové umístění pracovní oblasti manipulátoru, ovlivnění pracovní oblasti při vložení překážky a schopnost struktur vykonat kruhovou dráhu. Z výsledků vyplynulo, že s rostoucí deformací dochází k přesunu pracovní oblasti manipulátoru blíže k jeho základně. Dále mají deformované struktury vyšší schopnost dosáhnout oblastí v těsné blízkosti překážky. To samé lze tvrdit o schopnosti vykonávat dráhy blíže k základně manipulátoru. Naopak při vykonávání dráhy, která je společná pro všechny struktury manipulátorů ze simulace vyplynulo, že není vhodné manipulátor deformovat. Při pohybu po dráze je celkový součin momentové zátěže všech tří

kloubů manipulátoru nejnižší v případě, kdy nejsou segmenty deformované. Z tohoto lze vyvodit tyto závěry. Při deformaci segmentů manipulátoru je možné významně rozšířit pracovní prostor a dosah manipulátoru. Dále navýšit schopnost manipulátoru pracovat kolem překážky vložené do jeho pracovního prostoru. Naopak pokud chceme vykonat dráhu, kterou je možné vykonat s nedeformovanými i deformovanými segmenty je výhodnější využít nedeformovaný manipulátor.

Konstrukční návrh segmentu pro experimentální měření je představen v kapitole 5. Jedná se o pružný silikonový obal schopen odolat teplotě tání vnitřního jádra z materiálu s nízkou teplotou tání. Obal s jádrem je uzavřen dvěma čepy a spojkami. Matematický model, který neobsahoval jádro z materiálu s nízkou teplotou tání byl zkoumán pomocí FEA analýzy popsané v kapitole 5.2. Pro analýzu byly definovány tři deformační body na křivce vzniklé pohybem koncového bodu segmentu ohýbaného do pravidelného oblouku. Při ohybu pro vytvoření deformační oblasti byla pro definici bodů vybrána vnější hraniční křivka evolventa a to ze dvou důvodů. Zaprvé je to maximální dosah segmentu a za druhé v každém bodě na této křivce má segment právě jediný tvar deformace. Pro definici tří bodů na křivce byla stanovena okrajová podmínka, že bod segmentu leží na imaginární přímce. Přímka je definována jako tečna k segmentu deformovaném do pravidelného oblouku v odpovídajícím bodě. Výsledkem FEA analýzy je velikost vzniklého ekvivalentního napětí při deformaci segmentu do požadovaného bodu a jeho rozložení v segmentu. Při deformaci do tvaru pravidelného oblouku dochází k rovnoměrnému rozložení ekvivalentního napětí a nižším hodnotám. V maximu je velikost napětí redukována o 58 % oproti lokální kumulaci při deformaci po evolventě.

Reálný experimentální segment bez jádra z materiálu s nízkou teplotou tání, na kterém bylo provedeno prvotní experimentální měření je popsán v kapitole 6. Pomocí robotického pracoviště se silově momentovým senzorem bylo dosaženo deformace segmentu. Segment byl deformován pomocí obou typů ohybu do stejných bodů jako byli definovány pro FEA analýzu. Výstupem tohoto měření byly tvary segmentu po deformaci. Při vizuálním porovnání tvaru vzniklého při FEA analýze a při reálném měření bylo zjištěno, že tvary jsou shodné pro oba typy ohybu. Tím můžeme říci, že se matematický model deformuje shodně s reálnou deformací. Dalším výstupem jsou vzniklé síly a momenty v koncovém bodě segmentu. Při deformaci dochází pouze k ovlivnění momentu vznikajícím kolem osy Y. Zároveň je z hodnot patrné, že při deformaci do pravidelného oblouku jsou vzniklé momenty v maximu nižší o 57 % oproti deformaci po evolventě. Dále při deformaci vznikají pouze síly v osách X a Z. Při deformaci do pravidelného oblouku je síla v ose X v maximu větší o 105 % oproti deformaci po evolventě.

Naopak síla v ose Z je v maximu o 53 % nižší než při deformaci po evolventě. Výslednice těchto dvou sil je v deformačním bodě I a II nižší o 42 % respektive 27 % při deformaci do pravidelného oblouku než při deformaci po evolventě. Naopak v krajním bodě III je výslednice sil větší o 35 %. Z celkových výsledků je patrné, že z hlediska zatížení je vhodnější segment deformovat do pravidelného oblouku. Nevýhodou této deformace je ztráta deformační oblasti. Řešením této situace může být dvojí. Zaprvé deformovat segment ve více na sebe navazujících místech, pokud nám to umožňuje jeho délka. Zadruhé je možné segmenty škálovat za sebe pomocí spojovacích přírub.

Následně byl reálný experimentální segment rozšířen o Fieldovu slitinu a byl proveden experiment, který zkoumal vliv vzniklého ekvivalentního napětí v obalu segmentu na jádro z materiálu s nízkou teplotou tání při deformaci. Experiment je popsán v kapitole 7. Z výsledků experimentu je patrné, že přes snížení napětí až o 58 % při deformaci do pravidelného oblouku je výsledný tvar po 72 hodinách od deformace segmentu téměř totožný jako při deformaci po evolventě. Segment se téměř navrátil do nedeformovaného tvaru.

Modifikace materiálu s nízkou teplotou tání proběhla na základě výsledků z kapitoly 7 a rešerše uvedené v kapitole 8. Původně zamýšlená Fieldova slitina je kompletně nahrazena termoplastem PETG. Materiál má deformovatelnou teplotu okolo 68 °C. Výhodou termoplastu je, že může tvořit celý segment a jeho jednoduchá výroba pomocí FFF 3D tisku. Tisk lze dále využít pro modifikaci materiálu během tisku, například uhlíkovými vlákny. Metoda FFF 3D tisku byla využita při porovnávání optimálního zahřívání segmentu. Na povrchu segmentu byly vytvořeny spirálové drážky pro vedení uhlíkového vlákna nebo odporového drátu jako topného prvku. Dále byli zvoleny napětí 12 V a 24 V a proudy 1 A, 1,5 A a 2 A. Uhlíkové vlákno bylo navinuto v drážce obdélníkového průřezu o rozměrech 0,5 x 8 mm se stoupáním 10 mm. Odporový drát byl navinut v půlkruhové drážce o poloměru 0,25 mm se stoupáním 2 a 5 mm. Všechny topné členy při maximálním napětí a proudu zahřály segment na jeho vnějšku do 60 vteřin. Následně byla zkoumána doba do prohřátí středu segmentu, zde opět k nejrychlejšímu prohřátí došlo pro 24 V a 2 A pro segment s odporovým drátem navinutým se stoupáním 2 mm. Čas prohřátí byl 158 vteřin. Nejmenší poměr času od prohřátí vnějšího povrchu do jeho středu byl 1,2 : 1 pro segment s odporovým drátem navinutým se stoupáním 2 mm při 12 V a 2 A.

10.1. Přínos pro vědní obor a praxi

Přínosem pro vědní obor je určení deformační oblasti segmentu, přesněji jeho okrajových křivek. V aktuálním stavu se další výzkumy zabývají nejprve konstrukcí segmentu a až následně jeho dosažitelnými mechanickými parametry. Dále bylo definováno, že pokud by měl deformovatelný manipulátor provádět pohyb po dráze, kterou zvládne i v nedeformovaném

tvaru je vhodnější manipulátor nedeformovat. Dalším přínosem je zjištění, že Fieldova slitina v nemodifikovaném stavu není vhodná pro tvarově měnitelné segmenty. A to ani při výhodnější deformaci segmentu do tvaru pravidelného oblouku. Z tohoto důvodu bylo představeno použití termoplastu místo kovové slitiny s nízkou teplotou tání. Dále pak je uveden návrh zahřívání termoplastu. Přínosy dokládají i příspěvky na mezinárodních konferencích.

10.2. Přínos pro praxi

Přínosem pro praxi je, jako pro vědní obor, znalost deformační oblasti. Dále je prezentován nárust pracovního prostoru manipulátoru s takto deformovatelnými segmenty. Toto může být zajímavé vzhledem k flexibilitě vykonávaných úloh. Převážně u mobilních platforem. Krom nárustu pracovního prostoru má deformovatelná struktura možný přínos v minimalizaci rozměrů těchto systému při jejich transportu.

10.3. Doporučení pro další výzkum

První z oblastí pokračujícího výzkumu je mechanický princip pro dosažení popsané deformace segmentu. Vytvořit matematické modely pro rychlejší nalezení optimálního tvaru deformace. Definovat a následně optimalizovat výrobní proces tvarově měnitelných segmentů.

Dalším doporučením je výzkum materiálu s nízkou teplotu tání. Zde je možné modifikovat Fieldovu slitinu prvky pro eliminaci tečení materiálu se zachováním teploty tání. V oblasti termoplastů, konkrétně PETG je slibná modifikace pomocí uhlíkového vlákna. Ty mohou být umístěny v materiálu volně v podobě krátkých úseků uhlíkového vlákna nebo jako kontinuální vlákno. To by při vhodném použitý mohlo sloužit i jako topný element. Tato oblast je vhodná pro oblast výzkumu materiálového inženýrství.

Výzkum teplotní změny materiálu. Zde navrhuji dva možné směry výzkumu. Prvním směrem je aktivní ochlazení segmentu. Dle testů lze zahřátí segmentu dosáhnout rychle, v řádu desítek vteřin. Samovolné ochlazení segmentu je ale v řádu desítek minut. Další oblastí výzkumu je teplotní degradace termoplastického materiálu při opakovaném zahřívání.

Na téma mechanického principu pro dosažení deformace je již na Katedra robotiky – Fakulta strojní – VŠB TUO veden další výzkum v podobě PhD práce.

11. Conclusions

In the introductory part, the current state of the problem is presented. The research describes existing modules and their locking systems. Subsequently, systems that use shape changing for their modularity are presented. It describes the principles of how the segments achieve the variability of their stiffness. Finally, the principle of stiffness variation by changing the temperature of the low melting point material, which is addressed in this thesis, is described in more detail. Based on the research carried out, the main objective and sub-objectives to achieve it have been defined.

The first objective was to define the workspace of the shape-changing segment. The definition of the deformation space is described in Chapter 3. In defining the objective, this space was called the workspace, but a more appropriate name is the deformation space. It is the space where the end point of the segment can be deformed. The space is affected by two boundary conditions, the length of the segment and the minimum bending radius of the segment. The first method is then to deform the segment into a defined shape, a regular arc, which is another boundary condition. This deformation does not create a deformation space but only a curve. The second way is deformation where the desired shape is not a boundary condition but only the length of the segment and the minimum bend radius. This deformation produces a 2D deformation space. The boundary curves of this space are the involute of circle and the cardioid. Since one of the boundary conditions is the segment length, a method to determine the optimal segment length was proposed. The method works with the significance of the stress that will be generated when a lone force is applied to the end of the embedded segment. The deflection significance for the same load case as for the stress significance. The area significance enters the method last. By area is meant the size of the deformation area that will be created for a given length of the segment under investigation.

In Chapter 4, the effect of segment deformation on the structure of the 3DoF manipulator is presented. Three structures were investigated. A structure with undeformed segments, a structure with a combination of undeformed and deformed segments. The third structure then has all segments deformed. The segments were deformed according to the proposed method in Chapter 3. In the CoppeliaSim simulation environment, the effect of curvature on the size and spatial location of the manipulator working envelope, the effect of the working envelope on the insertion of an obstacle, and the ability of the structures to perform a circular path were investigated. The results showed that as the curvature increases, the manipulator's working area moves closer to its base. Furthermore, the deformed structures have a higher ability to reach the area near the obstacle in the working area. The same can be said for the ability to perform

trajectories closer to the base of the manipulator. Conversely, when executing a path that is common to all manipulator structures, the simulation showed that it is not appropriate to deform the manipulator. When moving along the path, the total product of the moment load on all three joints of the manipulator is lowest when the segments are not deformed. From this, the following conclusions can be drawn. With the ability to deform the manipulator segments, the working space and reach of the manipulator can be significantly extended. Increase the ability of the manipulator to work around an obstacle inserted into its working space. On the other hand, if we want to perform a path that can be performed with both undeformed and deformed segments, it is more advantageous to use an undeformed manipulator.

The structural design of the segment for experimental measurements is presented in Chapter 5. It is a flexible silicone shell capable of resisting the melting temperature of an inner core made of low melting temperature material. The core shell is closed with two pins and couplings. The mathematical model that did not contain a core of low melting temperature material was investigated using the FEA analysis described in Chapter 5.2. For the analysis, three deformation points on the curve resulting from the movement of the end point of the segment bent into a regular arc were defined. When bending to create the deformation region, the outer boundary curve of the involute of circle was chosen to define the points for two reasons. Firstly, it is the maximum range of the segment and secondly, at each point on this curve the segment has just one deformation shape. For the definition of the three points on the curve, the boundary condition that the segment point lies on an imaginary line was set. The straight line is defined as the tangent to the arc formed when the segment is bent into a regular arc at the corresponding point. The result of the FEA analysis is the magnitude of the equivalent stress generated when the segment is deformed to the desired point and its distribution in the segment. The deformation into a regular arc result in a uniform distribution of the equivalent stress and lower values, compared to the local accumulation during deformation after involute deformation, up to 58% at the maximum.

The real experimental segment without core made of low melting temperature material on which the initial experimental measurements were performed is described in Chapter 6. The segment was deformed using both types of deformation to the same points as were defined for the FEA analysis. The output of this measurement was the shapes of the segment after deformation. By visually comparing the shapes produced by the FEA analysis and the real measurements, it was found that the shapes were identical for both types of deformation. Thus, we can say that the mathematical model deforms identically to the real deformation. The next output is the resultant forces and moments at the end point of the segment. During deformation,

only the moment generated about the Y-axis is affected. At the same time, the values show that when deforming to a regular arc, the moments generated at the maximum are 57% lower compared to the deformation after the involute of circle. Furthermore, only the forces in the X and Z axes are generated during deformation. In regular arc deformation, the force in the X-axis is 105 % greater at the maximum compared to the deformation after the involute of circle. Conversely, the force in the Z-axis is 53 % less at the maximum than in the deformation after the involute of circle. The resultant of these two forces is 42 % and 27 % lower at deformation points I and II, respectively, in regular arc deformation than in post-evolution deformation. On the other hand, at the extreme point III, the resultant of the forces is higher by 35 %. The overall results show that it is preferable to deform the segment into a regular arc from the loading point of view. The disadvantage of this deformation is the loss of the deformation region. The solution to this situation can be twofold. Firstly, deform the segment in several contiguous places if its length allows us to do so. Secondly, it is possible to scale the segments behind each other using connecting flanges.

Subsequently, the real experimental segment was extended with a Field's alloy and an experiment was performed to investigate the effect of the resulting equivalent stress in the segment shell on the low melting point core material during deformation. The experiment is described in Chapter 7. The experimental results show that despite a reduction in stress of up to 58% when deformed into a regular arc, the resulting shape at 72 hours after deformation of the segment is almost identical to that of the deformed segment after involute of circle deformation. The segment has almost returned to a non-deformable shape.

The modification of the low melting point material was carried out as a complete replacement of the low melting point material based on the results of Chapter 7 and the research presented in Chapter 8. PETG thermoplastic is used, which has a deformable temperature of about 68 °C. The advantage of the thermoplastic is that it can form a whole segment and its simple production by FFF 3D printing. Furthermore, the printing can be used to modify the material during printing, for example with carbon fibers. The FFF 3D printing method was used to compare the optimal heating of the segment. Spiral grooves were created on the surface of the segment to guide the carbon filament or resistance wire as a heating element. In addition, the voltages of 12 V and 24 V and currents of 1 A, 1.5 A and 2 A were selected. The carbon fiber was wound in a rectangular groove of 0.5 x 8 mm with a pitch of 10 mm. The resistance wire was wound in a semicircular groove with a radius of 0.25 mm with pitches of 2 and 5 mm. All heating elements at maximum voltage and current heated the segment at its outside within 60 seconds. The time to warm up of the centre of the segment was then investigated, here again

the fastest warm up occurred for 24 V and 2 A for the segment with the resistance wire wound with a pitch of 2 mm. The warm up time was 158 seconds. The smallest ratio of time from the outer surface to its centre was 1.2 : 1 for the segment with a resistance wire wound with a 2 mm pitch at 12 V and 2 A.

11.1. Contribution for scientific discipline and for practice

The contribution to the field of science is the determination of the deformation region of the segment, more precisely its boundary curves. In the current state of the art, further research deals first with the construction of the segment and only then with its achievable mechanical parameters. It has been further defined that if a deformable manipulator should perform a motion along a path that it can handle in an undeformed form, it is preferable not to deform the manipulator. Another contribution is the finding that Field's alloy in the unmodified state is not suitable for shape changing segments. This is not the case even when it is preferable to deform the segment into a regular arc shape. For this reason, the use of a thermoplastic instead of a low melting point metal alloy was introduced. Next, a proposal for heating the thermoplastic is presented. Contributions at international conferences also illustrate the benefits.

11.2. Contribution for practice

As a scientific discipline, the knowledge of the deformation area is an asset for practice. Furthermore, the increase of the working area of the manipulator with such deformable segments is presented. This may be of interest due to the flexibility of the tasks performed. Mainly for mobile platforms. Besides the increase in working envelope, the deformable structure has a possible benefit in minimizing the dimensions of these systems during their transport.

11.3. Recommendations for further research

The first area of continuing research is the mechanical principle of achieving the described segment deformation. Develop mathematical models to find the optimal deformation shape faster. Define, optimize the manufacturing process of shape changeable segments.

Another recommendation is to research low melting point material. Here, it is possible to modify Field's alloy elements to eliminate the creep of the material while maintaining its melting temperature. In the field of thermoplastics, specifically PETG, improvement by carbon fibre is promising. These can be placed loosely in the material in the form of short sections of carbon fibre

or as a continuous fibre. This could also serve as a heating element if used appropriately. This area is suitable for materials engineering research.

Research on temperature change of the material. Here I suggest two possible research directions. The first direction is active cooling of the segment. According to tests, heating of the segment can be achieved quickly, in the order of tens of seconds. However, spontaneous cooling of the segment is on the order of tens of minutes. Here is an opportunity to research the most suitable cooling principle for the material. Another area of research is in the thermal degradation of thermoplastic material during repeated heating.

Further research on the mechanical principle of achieving deformation is already being conducted at the Department of Robotics - Faculty of Mechanical Engineering - VŠB TUO in the form of a PhD thesis.

Vlastní publikace

1. Pastor, R., Huczala, D., Vysocký, A., Oščádal, P., **Mlotek, J.**, Heczko, D., Zeman, Z., Široký, P. Modular Rover Design for Exploration and Analytical Tasks. In Lecture Notes in Computer Science. 2020. pp. 203-215. ISBN 9783030438890. ISSN 0302-2974. – **podíl v OBD 2%**
2. Oščádal, P., Heczko, D., Vysocký, A., **Mlotek, J.**, Novák, P., Virgala, I., Sukop, M., Bobovský, Z. Improved Pose Estimation of Aruco Tags Using a Novel 3D Placement Strategy. Sensors. 2020. 20(17), 4825. – **podíl v OBD 10%**
3. Suder, J., Bobovský, Z., Zeman, Z., **Mlotek, J.**, Vocetka, M. The Influence of Annealing Temperature on Tensile Strength of Polylactic Acid. MM Science Journal. 2020, issue November, pp. 4132-4137. – **podíl v OBD 10%**
4. Jha, V., Grushko, S., **Mlotek, J.**, Kot, T., Krys, V., Oščádal, P., Bobovský, Z. A Depth Image Quality Benchmark of Three Popular Low-Cost Depth Cameras. MM Science Journal. 2020, issue December, pp. 4194-4200. – **podíl v OBD 30%**
5. Huňady, R., Lengvarský, P., Pavelka, P., Kaľavský, A., **Mlotek, J.** Stiffness Estimation and Equivalence of Boundary Conditions in FEM Models. Applied sciences. 2021. 11(4), 1482. – **není v interním systému OBD**
6. Suder, J., Bobovský, Z., **Mlotek, J.**, Vocetka, M., Oščádal, P., Zeman, Z. Structural Optimization Method of a FinRay Finger for the Best Wrapping of Object. Applied sciences. 2021. 11(9), 3858. – **podíl v OBD 5%**
7. Vocetka, M., Bobovský, Z., Babjak, J., Suder, J., Grushko, S., **Mlotek, J.**, Krys, V., Hagara, M. Influence of Drift on Robot Repeatability and Its Compensation. Applied sciences. 2021. – **podíl v OBD 30%**
8. Suder, J., Bobovský, Z., **Mlotek, J.**, Vocetka, M., Zeman, Z., Šafář, M. Experimental Analysis of Temperature Resistance of 3D Printed PLA Components. MM Science Journal. 2021, issue March, pp. 4322-4327. ISSN 1803-3126. – **podíl v OBD 5%**
9. **Mlotek, J.**, Bobovský, Z., Suder, J., Oščádal, P., Vocetka, M., Krys, V. Shape-Changing Manipulator Possibilities and the Effect of the Deformable Segment on the Size of the Working Area. In Mechanisms and Machine Science. 2022. pp. 272-280. ISBN 9783031048692. ISSN 2211-1098. e-ISSN 2211-1099. – **podíl v OBD 30%**
10. Huczala, D., Kot, T., **Mlotek, J.**, Suder, J., Pfurner, M. An Automated Conversion Between Selected Robot Kinematic Representations. In 10th International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA, Luxembourg). 2022. ISBN 978-1-6654-9048-1. **podíl v OBD 15%**

11. **Mlotek, J.**, Bobovský, Z., Suder, J., Krys, V. The effect of deformation on robot shape - changing link. 32nd International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region – **přijato, v době odevzdání disertační práce ještě nevydáno**

Reference

[1] M. BRANDSTÖTTER, A. ANGERER, a M. HOFBAUR, 2015. The Curved Manipulator (Cuma-Type Arm): Realization of a Serial Manipulator with General Structure in Modular Design. Proceedings of the 14th IFToMM World Congress [online]. Dostupné z: doi:10.6567/IFToMM.14TH.WC.OS2.037

[2] LIU, Yiming, Hui XU, Changxing GENG a Guodong CHEN, 2017. A modular manipulator for industrial applications: Design and implement [online]. prosinec 2017. B.m.: IEEE. Dostupné z: doi:10.1109/icrae.2017.8291405

[3] HONG, Seonghun, Woosub LEE, Kanggyun KIM, Hyeongcheol LEE a Sungchul KANG, 2017. Connection mechanism capable of genderless coupling for modular manipulator system [online]. červen 2017. B.m.: IEEE. Dostupné z: doi:10.1109/urai.2017.7992707

[4] ZHU, Yanhe, Jie ZHAO, Xindan CUI, Xiaolu WANG, Shufeng TANG, Xueyuan ZHANG a Jingchun YIN, 2013. Design and implementation of UBot: A modular Self-Reconfigurable Robot [online]. srpen 2013. B.m.: IEEE. Dostupné z: doi:10.1109/icma.2013.6618087

[5] MURATA, S., E. YOSHIDA, A. KAMIMURA, H. KUROKAWA, K. TOMITA a S. KOKAJI, 2002. M-TRAN: self-reconfigurable modular robotic system [online]. prosinec 2002. B.m.: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Dostupné z: doi:10.1109/tmech.2002.806220

[6] OKAZAWA, S., R. EBRAHIMI, J. CHUANG, S.E. SALCUDEAN a R. ROHLING, 2005. Hand-Held Steerable Needle Device [online]. červen 2005. B.m.: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Dostupné z: doi:10.1109/tmech.2005.848300

[7] SEARS, Patrick a Pierre DUPONT, 2006. A Steerable Needle Technology Using Curved Concentric Tubes [online]. říjen 2006. B.m.: IEEE. Dostupné z: doi:10.1109/iros.2006.282072

[8] DUPONT, P.E., J. LOCK, B. ITKOWITZ a E. BUTLER, 2010. Design and Control of Concentric-Tube Robots [online]. duben 2010. B.m.: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Dostupné z: doi:10.1109/tro.2009.2035740

[9] LI, Zheng a Ruxu DU, 2013. Design and Analysis of a Bio-Inspired Wire-Driven Multi-Section Flexible Robot [online]. 1. leden 2013. B.m.: SAGE Publications. Dostupné z: doi:10.5772/56025

[10] LIU, Zhipeng, Linsen XU, Xingcan LIANG a Jinfu LIU. Stiffness-Tuneable Segment for Continuum Soft Robots with Vertebrae. Machines [online]. 2022, 10(7) [cit. 2023-03-20]. ISSN 2075-1702. Dostupné z: doi:10.3390/machines10070581

[11] YESHMUKHAMETOV, KOGANEZAWA a YAMAMOTO. A Novel Discrete Wire-Driven Continuum Robot Arm with Passive Sliding Disc: Design, Kinematics and Passive Tension Control. Robotics [online]. 2019, 8(3) [cit. 2023-03-20]. ISSN 2218-6581. Dostupné z: doi:10.3390/robotics8030051

[12] CLARK, Angus B. a Nicolas ROJAS, 2020. Design and Workspace Characterisation of Malleable Robots [online]. květen 2020. B.m.: IEEE. Dostupné z: doi:10.1109/icra40945.2020.9197439

[13] HAO, Yangtai, Jianye GAO, Yonggang LV a Jing LIU. Low Melting Point Alloys Enabled Stiffness Tunable Advanced Materials. Advanced Functional Materials [online]. 2022, 32(25) [cit. 2023-03-20]. ISSN 1616-301X. Dostupné z: doi:10.1002/adfm.202201942

[14] ALLEN, Emily a John SWENSEN. Directional Stiffness Control Through Geometric Patterning and Localized Heating of Field's Metal Lattice Embedded in Silicone. Actuators [online]. 2018, 7(4) [cit. 2023-03-20]. ISSN 2076-0825. Dostupné z: doi:10.3390/act7040080

[15] NAKAI, H., Y. KUNIYOSHI, M. INABA a H. INOUE. Metamorphic robot made of low melting point alloy. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System [online]. IEEE, 2002, s. 2025-2030 [cit. 2023-03-20]. ISBN 0-7803-7398-7. Dostupné z: doi:10.1109/IRDS.2002.1044053

[16] BRANDSTÖTTER, Mathias, Paolo GALLINA, Stefano SERIANI a Michael HOFBAUR. Task-Dependent Structural Modifications on Reconfigurable General Serial Manipulators. In: ASPRAGATHOS, Nikos A., Panagiotis N. KOUSTOUMPARDIS a Vassilis C. MOULIANITIS, ed. Advances in Service and Industrial Robotics [online]. Cham: Springer International Publishing, 2019, 2019-09-29, s. 316-324 [cit. 2023-03-20]. Mechanisms and Machine Science. ISBN 978-3-030-00231-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-00232-9_33

[17] ACTON, Q.A. Heavy Metals—Advances in Research and Application: 2013 Edition. ScholarlyEditions, 2013. ISBN 978-1-4816-8855-0.

[18] Field's Metal Low Melting Alloy. MatWeb [online]. 2023 [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=539fb73c246f49b3975622eacc0ec956&ckck=1

[19] University Physics Volume 2 [online]. OpenStax, 2016 [cit. 2023-03-22]. ISBN 978-1-947172-21-0. Dostupné z: https://openstax.org/details/books/university-physics-volume-2?Book%20details

[20] MARCHESE, Andrew D., Konrad KOMOROWSKI, Cagdas D. ONAL a Daniela RUS. Design and control of a soft and continuously deformable 2D robotic manipulation system. In: 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) [online]. IEEE, 2014, 2014, s. 2189-2196 [cit. 2023-03-23]. ISBN 978-1-4799-3685-4. Dostupné z: doi:10.1109/ICRA.2014.6907161

[21] YUAN, Han, Philip Wai Yan CHIU a Zheng LI. Shape-Reconstruction-Based Force Sensing Method for Continuum Surgical Robots With Large Deformation. IEEE Robotics and Automation Letters [online]. 2017, 2(4), 1972-1979 [cit. 2023-03-23]. ISSN 2377-3766. Dostupné z: doi:10.1109/LRA.2017.2716444

[22] POGUE, Chloe, Priyanka RAO, Quentin PEYRON, Jongwoo KIM, Jessica BURGNER-KAHRS a Eric DILLER. Multiple Curvatures in a Tendon-Driven Continuum Robot Using a Novel Magnetic Locking Mechanism. In: 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) [online]. IEEE, 2022, 2022-10-23, s. 472-479 [cit. 2023-03-23]. ISBN 978-1-6654-7927-1. Dostupné z: doi:10.1109/IROS47612.2022.9982193

[23] SONG, Shuang, Zheng LI, Max Q.- H. MENG, Haoyong YU a Hongliang REN. Real-Time Shape Estimation for Wire-Driven Flexible Robots with Multiple Bending Sections Based on Quadratic Bezier Curves. IEEE Sensors Journal [online]. 2015, 9 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: doi:10.1109/JSEN.2015.24561811

[24] RANNE, Alex, Angus B. CLARK a Nicolas ROJAS. Augmented Reality-Assisted Reconfiguration and Workspace Visualization of Malleable Robots: Workspace Modification Through Holographic Guidance. IEEE Robotics & Automation Magazine [online]. 2022, 29(1), 10-21 [cit. 2023-03-24]. ISSN 1070-9932. Dostupné z: doi:10.1109/MRA.2022.3141973

[25] Lawrence, J.D. 7.5. Involute of a Circle. In A Catalog Of Special Plane Curves; Dover Publications, Inc.: New York, 1972; pp. 190–191.

[26] Lawrence, J.D. 5.2. Cardioid. In A Catalog Of Special Plane Curves; Dover Publications, Inc.: New York, 1972; pp. 118–121.

[27] CoppeliaSim User Manual. Coppelia Robotics [online]. Zürich: Coppelia Robotics [cit. 2023-03-31]. Dostupné z: https://www.coppeliarobotics.com/helpFiles/en/pointCloudPropertiesDialog.htm

[28] OKROUHLÍK, Miloslav. MECHANICS OF DEFORMABLE BODIES. Studentská 1402/2, Liberec: Technical University of Liberec, 2018. ISBN 978-80-7494-453-6.

[29] XU, Shan, Gaofeng LI, Dezhen SONG, Lei SUN a Jingtai LIU. Real-time Shape Recognition of a Deformable Link by Using Self-Organizing Map. In: 2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE) [online]. IEEE, 2018, 2018, s. 586-591 [cit. 2023-03-30]. ISBN 978-1-5386-3593-3. Dostupné z: doi:10.1109/COASE.2018.8560514

[30] OLSON, Gina, Ross L. HATTON, Julie A. ADAMS a Yiğit MENGÜÇ. An Euler–Bernoulli beam model for soft robot arms bent through self-stress and external loads. International Journal of Solids and Structures [online]. 2020, 207, 113-131 [cit. 2023-03-30]. ISSN 00207683. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijsolstr.2020.09.015

[31] Large elastic deformations of isotropic materials IV. further developments of the general theory. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences [online]. 1948, 241(835), 379-397 [cit. 2023-03-30]. ISSN 0080-4614. Dostupné z: doi:10.1098/rsta.1948.0024

[32] Creo Simulation Software. PTC [online]. [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: https://www.ptc.com/en/products/creo/simulation

[33] NAGY, Oliver. Newton Dynamics Engine Documentation: Release 3 [online]. 3. 2016 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: https://buildmedia.readthedocs.org/media/pdf/newton-dynamics/apidoc/newton-dynamics.pdf

[34] Product manual IRB 1600/1660 [online]. 3HAC026660-001 Revision: AJ. ABB ROBOTICS, 2022 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC026660-001&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch

[35] Product manual Integrated Force Control. SHANGHAI, CHINA: ABB Engineering (Shanghai) Ltd. Robotics and Motion, 2018.

[36] KASSNER, M. E., K. K. SMITH a C. S. CAMPBELL. Low-temperature creep in pure metals and alloys. Journal of Materials Science [online]. 2015, 50(20), 6539-6551 [cit. 2023-03-27]. ISSN 0022-2461. Dostupné z: doi:10.1007/s10853-015-9219-2

[37] GRUBE, Malte, Jan Christian WIECK a Robert SEIFRIED. Comparison of Modern Control Methods for Soft Robots. Sensors [online]. 2022, 22(23) [cit. 2023-03-27]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s22239464

[38] VOCETKA, Michal, Zdenko BOBOVSKÝ, Jan BABJAK, Jiří SUDER, Stefan GRUSHKO, Jakub MLOTEK, Václav KRYS a Martin HAGARA. Influence of Drift on Robot Repeatability and Its Compensation. Applied Sciences [online]. 2021, 11(22) [cit. 2023-03-27]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app112210813

[39] BUCKNER, Trevor L., Michelle C. YUEN, Sang Yup KIM a Rebecca KRAMER‐BOTTIGLIO. Enhanced Variable Stiffness and Variable Stretchability Enabled by Phase‐Changing Particulate Additives. Advanced Functional Materials [online]. 2019, 29(50) [cit. 2023-04-21]. ISSN 1616-301X. Dostupné z: doi:10.1002/adfm.201903368

[40] Polycaprolactone. MERC [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: https://www.sigmaaldrich.com/CZ/en/product/aldrich/440752?%C2%AEion=CZ

[41] HO, Chee Meng Benjamin, Abhinay MISHRA, Pearlyn Teo Pei LIN, Sum Huan NG, Wai Yee YEONG, Young-Jin KIM a Yong-Jin YOON. 3D Printed Polycaprolactone Carbon Nanotube Composite Scaffolds for Cardiac Tissue Engineering. Macromolecular Bioscience [online]. 2017, 17(4) [cit. 2023-04-21]. ISSN 16165187. Dostupné z: doi:10.1002/mabi.201600250

[42] AKHBAR, Suffiyana, Rahida Wati SHARUDIN a Muhammad Hussain ISMAIL. Performance of Polycaprolactone/Hydroxyapatite (PCL/HA) Composite Blended by Ultrasound Assisted Melt Blending. In: Journal of Mechanical Engineering [online]. Malaysia: Universiti Teknologi MARA (UiTM), 2016, s. 235 - 250 [cit. 2023-04-21]. ISBN 823- 5514. Dostupné z: https://jmeche.uitm.edu.my/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/19_SI_5_5_ID_207_405.pdf

[43] LU, Lin, Qingwei ZHANG, David M. WOOTTON, Richard CHIOU, Dichen LI, Bingheng LU, Peter I. LELKES a Jack ZHOU. Mechanical Study of Polycaprolactone-hydroxyapatite Porous Scaffolds Created by Porogen-based Solid Freeform Fabrication Method. Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials [online]. 2014, 12(3), 145-154 [cit. 2023-04-21]. ISSN 2280-8000. Dostupné z: doi:10.5301/jabfm.5000163

[44] BAJI, Avinash, Shing-Chung WONG, T. S. SRIVATSAN, Glen NJUS a Garima MATHUR. Processing Methodologies for Polycaprolactone-Hydroxyapatite Composites: A Review. Materials and Manufacturing Processes [online]. 2006, 21(2), 211-218 [cit. 2023-04-21]. ISSN 1042-6914. Dostupné z: doi:10.1081/AMP-200068681

[45] BASSI, A. K., J. E. GOUGH, M. ZAKIKHANI a S. DOWNES. The Chemical and Physical Properties of Poly(-Caprolactone) Scaffolds Functionalised with Poly(Vinyl Phosphonic Acid-Co-Acrylic Acid). Journal of Tissue Engineering [online]. [cit. 2023-04-21]. ISSN 2041-7314. Dostupné z: doi:10.4061/2011/615328

[46] LEGEROS, R Z a J P LEGEROS. Hydroxyapatite. In: Bioceramics and their Clinical Applications [online]. Elsevier, 2008, 2008, s. 367-394 [cit. 2023-04-21]. ISBN 9781845692049. Dostupné z: doi:10.1533/9781845694227.2.367

[47] DEY, Rebecca E., Xia ZHONG, Peter J. YOULE, et al. Synthesis and Characterization of Poly(vinylphosphonic acid- co -acrylic acid) Copolymers for Application in Bone Tissue Scaffolds. Macromolecules [online]. 2016, 49(7), 2656-2662 [cit. 2023-04-21]. ISSN 0024-9297. Dostupné z: doi:10.1021/acs.macromol.5b02594

[48] SZYKIEDANS, Ksawery, Wojciech CREDO a Dymitr OSIŃSKI. Selected Mechanical Properties of PETG 3-D Prints. Procedia Engineering [online]. 2017, 177, 455-461 [cit. 2023-04-21]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2017.02.245

[49] LATKO-DURAŁEK, Paulina, Kamil DYDEK a Anna BOCZKOWSKA. Thermal, Rheological and Mechanical Properties of PETG/rPETG Blends. Journal of Polymers and the Environment [online]. 2019, 27(11), 2600-2606 [cit. 2023-04-21]. ISSN 1566-2543. Dostupné z: doi:10.1007/s10924-019-01544-6

[50] CHANG, Kuang-Hua. Rapid Prototyping. In: E-Design [online]. Elsevier, 2015, 2015, s. 743-786 [cit. 2023-04-21]. ISBN 9780123820389. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-382038-9.00014-4

[51] ALARIFI, Ibrahim M. PETG/carbon fiber composites with different structures produced by 3D printing. Polymer Testing [online]. 2023, 120 [cit. 2023-04-25]. ISSN 01429418. Dostupné z: doi:10.1016/j.polymertesting.2023.107949

[52] FICO, Daniela, Daniela RIZZO, Raffaele CASCIARO a Carola ESPOSITO CORCIONE. A Review of Polymer-Based Materials for Fused Filament Fabrication (FFF): Focus on Sustainability and Recycled Materials. Polymers [online]. 2022, 14(3) [cit. 2023-04-17]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym14030465

[53] PROKOPOVÁ, Irena. Makromolekulární chemie. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2007. ISBN 978-80-7080-662-3.

[54] PETG Copolyester. MatWeb [online]. [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=4de1c85bb946406a86c52b688e3810d0

[55] Uhlíková vlákna ZOLTEK PX35 50K, 200g/m2, jednosměrná. ELEMENT [online]. [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: https://www.element-shop.cz/uhlikove-tkaniny-jednosmerne/uhlikova-vlakna-zoltek--px35-50k--200-g-m2--jednosmerna--s--50-cm/

[56] ČSN EN ISO 13943 - tepelná degradace [online]. In: . 2011 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: https://www.nlfnorm.cz/terminologicky-slovnik/62835

Seznam obrázků

Obrázek 1 – (a) manipulátor CUMA v jedné z konfigurací (b) zakřivený segment s pohybovými jednotkami [1] 13
Obrázek 2 – (a) DoF manipulátor (b) kloub manipulátoru [2] 13
Obrázek 3 – Ukázka spojení disku [3] 14
Obrázek 4 – UBot mechanismus (a) odemčená (b) uzamčená pozice [4] 14
Obrázek 5 – Princip spojení a odpojení MTran modulu [5] 15
Obrázek 6 – Příklad trubic s vysokým poměrem tuhosti [8] 15
Obrázek 7 – Příklad trubic s poměrem tuhostí blízký 1 [8] 15
Obrázek 8 – Systém inspirovaný biologickým modelem páteře [9] 16
Obrázek 9 – Systém využívající jako pružné prvky pružiny [11] 16
Obrázek 10 – Konstrukce systému na principu páteř – podtlak [12] 17
Obrázek 11 – (a) deska – kompozit mřížka z Fieldovy slitiny + silikonový obal (b)deska v tuhém deformovaném stavu [14] 18
Obrázek 12 – Příklad změny tvaru nohou mobilního robotu pro uchopení předmětu [15] 18
Obrázek 13 – Příklad pořadí kroků metodiky pro změnu tvaru deformovatelného segmentu (a) výchozí stav, (b) manipulátor je uzamknut v uzamykacím bodě (c) rozvolněný segment ve změněném tvaru (d) segment ve změněném tvaru po ochlazení (e) odemčení manipulátoru [16] 19
Obrázek 14 – (a) popis ohýbání segmentu do pravidelného oblouku s křivkou ohybu (b) tvar deformovaného segmentu do pravidelného oblouku 23
Obrázek 15 – (a) popis deformační oblasti (b) příklad vzniklého matematického tvar segmentu při ohýbání po evolventě do definovaného bodu 24
Obrázek 16 – Schéma zatíženého segmentu pro výběr optimální délky segmentu 26
Obrázek 17 – Segment manipulátoru v (a) rovné pozici 0 (b) zakřivené pozici I (c) zakřivené pozici II 27
Obrázek 18 – Struktury manipulátorů s (a) rovnými segmenty (b) segmentem deformovaným do 1. pozice I a 2. pozice II (c) 1. rovným segmentem a 2. deformovaným segmentem do pozice II 28
Obrázek 19 – Sestavená kinematická struktura manipulátoru s jednotlivými členy v prostředí CoppeliaSim 28
Obrázek 20 – (a) sestavená část modelu manipulátoru v PTC Creo (b) parametry modelu 29
Obrázek 21 – (a) kinematická struktura manipulátoru s klouby + hmotné prvky (zelené krychle) v prostředí CoppeliaSim (b) modelový strom prvků 29

Obrázek 22 – (a) dynamické parametry hmotných prvků (b) parametry kloubů 30
Obrázek 23 – (a) příklad průřezu vygenerované pracovní obálky (b) příklad nastavení geometrické reprezentace prvků 31
Obrázek 24 – umístění, velikost a velikost kroku mřížky do které byla vložena překážka.....31
Obrázek 25 – (a) manipulátor s vyobrazením konfigurace dráhy Path I, II (b) umístění, velikost a velikost kroku mřížky 32
Obrázek 26 – Upravená simulační scéna pro měření momentové zátěže jednotlivých kloubů manipulátorů 33
Obrázek 27 – nastavení prostředí graph v prostředí CoppeliaSim 33
Obrázek 28 – Tvar a velikost průřezu pracovní obálky manipulátoru s (a) rovnými segmenty (b) deformovanými segmenty (c) kombinací rovných a deformovaných segmentů (d) sloučená pracovní obálka.....34
Obrázek 29 – Změna velikosti pracovní obálky při vložení překážky v dosažitelné oblasti struktury manipulátoru s (a) rovnými segmenty (b) deformovanými segmenty (c) kombinací rovných a deformovaných segmentů 34
Obrázek 30 – Ovlivnění tvaru a velikosti pracovní obálky při vložení při vložení překážky do vybraných bodů O1 a O2 manipulátoru s (a) rovnými segmenty (b) deformovanými segmenty (c) kombinací rovných a deformovaných segmentů (d) sloučená pracovní obálka.....35
Obrázek 31 – Procentuální vyjádření úspěšného projetí kruhové dráhy manipulátorem s (a) rovnými segmenty (b) deformovanými segmenty (c) kombinací rovných a deformovaných segmentů 35
Obrázek 32 – Návrh struktury experimentálního segmentu 37
Obrázek 33 – Segment s LMPA v měřícím standu 38
Obrázek 34 – FEA nastavení modelu segmentu (a) okrajové podmínky vazby a posunutí (b)nastavení rigid linku (c) popis sítě 39
Obrázek 35 – (a) příklad nastavení pozice pro koncový bod segmentu (b) nastavení simulace 40
Obrázek 36 – Rozložení bodu na křivce vytvořené koncovým bodem segmentu při jeho deformaci 41
Obrázek 37 – Popis definování koncového bodu pro 2D ohyb po evolventě.....41
Obrázek 38 – Rozložení bodu na evolventě 42
Obrázek 39 – Výsledný tvar segmentu při ohybu do pravidelného oblouku (a) pozice I, (b) pozice II, (c) pozice III.....42

Obrázek 40 – Výsledné posunutí segmentu při ohybu do pravidelného oblouku z původní pozice (a) pozice I, (b) pozice II, (c) pozice III 43
Obrázek 41 – Výsledná velikost a rozložení ekvivalentního napětí při ohybu do pravidelného oblouku (a) pozice I, (b) pozice II, (c) pozice III....43
Obrázek 42 – Výsledný tvar segmentu při ohybu po evolventě (a) pozice I, (b) pozice II, (c) pozice III 44
Obrázek 43 – Výsledné posunutí segmentu při ohybu po evolventě z původní pozice (a) pozice I, (b) pozice II, (c) pozice III....44
Obrázek 44 – Výsledná velikost a rozložení ekvivalentního napětí při ohybu po evolventě (a) pozice I, (b) pozice II, (c) pozice III 44
Obrázek 45 – Měřící stand....46
Obrázek 46 – Příklad připravených bodů v prostředí Robot Studio....47
Obrázek 47 – Souřadnicový systém, ve které byly snímány síly a momenty....48
Obrázek 48 – Výsledné tvary deformace segmentu při 2D ohybu do pravidelného oblouku (a) pro pozici I (b) pro pozici II (c) pro pozici III 48
Obrázek 49 – Zobrazení rozptylu hodnot měření v pozicích I, II a III pomocí boxplotů (a) síly v osách X, Y, Z (b) momenty kolem os X, Y, Z 50
Obrázek 50 – Výsledné tvary deformace segmentu při 2D ohybu po evolventě (a) pro pozici I (b) pro pozici II (c) pro pozici III....51
Obrázek 51 – Zobrazení rozptylu hodnot měření v pozicích I, II a III pomocí boxplotů (a) síly v osách X, Y, Z (b) momenty kolem os X, Y, Z 52
Obrázek 52 – (a) deformační stand pro deformování segmentu do požadovaného bodu (b)měřící místo pro pozorování vlivu obalu segmentu na jeho jádro 53
Obrázek 53 – Koncový bod K a souřadnicový systém 54
Obrázek 54 – Výsledné tvary deformace segmentu při 2D ohybu do pravidelného oblouku (a) 1 hodina od deformace (b) 6 hodin od deformace (c) 12 hodin od deformace (d) 24 hodin od deformace (e) 48 hodin od deformace (f) 72 hodin od deformace 54
Obrázek 55 – Výsledné tvary deformace segmentu při 2D ohyb po evolventě (a) 1 hodina od deformace (b) 6 hodin od deformace (c) 12 hodin od deformace (d) 24 hodin od deformace (e) 48 hodin od deformace (f) 72 hodin od deformace....56
Obrázek 56 – Segment z PETG 59
Obrázek 57 – Segment z PETG (a) s uhlíkovým vláknem (b) s odporovým drátem, stoupání vinutí 2 mm (c) s odporovým drátem, stoupání vinutí 5 mm 60

Obrázek 58 – Porovnání rozložení ekvivalentního napětí při deformaci segmentu do III (a) 2D ohyb do pravidelného oblouku, (b) 2D ohyb po evolventě 62
Obrázek 59 – Porovnání výsledného matematického tvaru ohybu segmentu s reálným ohybem – 2D ohyb do pravidelného oblouku (a) matematicky tvar, (b) reálný tvar, (c)vizuální porovnání (sloučení) matematického a reálného tvaru 63
Obrázek 60 – Porovnání výsledného matematického tvaru ohybu segmentu s reálným ohybem – 2D ohyb po evolventě (a) matematicky tvar, (b) reálný tvar, (c)vizuální porovnání (sloučení) matematického a reálného tvaru 63
Obrázek 61 – Porovnání výsledků pro 2D ohyb do pravidelného oblouku a 2D ohyb po evolventě (a) velikost deformační oblasti, (b) velikost ekvivalentního napětí v jednotlivých deformačních bodech I ÷ III 65
Obrázek 62 – Porovnání výsledků pro 2D ohyb do pravidelného oblouku a 2D ohyb po evolventě (a) velikost vzniklých sil v ose X při reálném měření, (b) velikost vzniklých sil v ose Z při reálném měření, (c) velikost výslednice sil os X a Z při reálném měření.....66
Obrázek 63 – Porovnání výsledků vzniklých momentů v ose Y při reálném měření pro 2D ohyb do pravidelného oblouku a 2D ohyb po evolventě 66
Obrázek 64 – 2D ohyb do pravidelného oblouku (a) tvar deformace na začátku měření (b)tvar deformace po 72 hodinách; 2D ohyb po evolventě (c) tvar deformace na začátku měření (d)tvar deformace po 72 hodinách.....67
Obrázek 65 – Průběh zahřívání pro odporový drát navinutý se stoupáním 2 mm (a) nejrychlejší 24V a 2A (b) nejmenším poměrem času od dosáhnutí požadovaných teplot Ot a It – 12V a 2A 68

Seznam tabulek

Tabulka 1. Vlastnosti Fieldovy slitiny [18].....19
Tabulka 2. Chemické složení Fieldovy slitiny [18] 20
Tabulka 3. Výsledky výpočtu pro určení tepelné objemové roztažnosti 20
Tabulka 4. Koordináty bodu E pro pozice 27
Tabulka 5. Koordináty bodu P1 a P2 pro měření vyvinutého momentu.....36
Tabulka 6. Souhrn momentů vyvinutých motory manipulátoru při vykonávání dané dráhy ..36
Tabulka 7. Parametry obalu segmentu 37
Tabulka 8. Parametry materiálu upínacích pinů (ocel) [32].....38
Tabulka 9. Parametry materiálu obalu dle Mooney - Rivlin (silikonová guma) [32].....38
Tabulka 10. Koordináty bodu E pro pozice 41
Tabulka 11. Koordináty bodu E pro pozice 42
Tabulka 12. FEA velikosti ekvivalentního napětí pro pozice I ÷ III.....43
Tabulka 13. FEA velikosti ekvivalentního napětí pro pozice I ÷ III.....45
Tabulka 14. Parametry silově momentového senzoru ABB Force Control small [35].....46
Tabulka 15. Síly a momenty naměřené na FC při reálném měření 2D ohybu do pravidelného oblouku 49
Tabulka 16. Síly a momenty naměřené na FC při reálném měření 2D ohybu segmentu po evolventě.....51
Tabulka 17. Souřadnice koncového bodu K v čase – 2D ohyb do pravidelného oblouku 55
Tabulka 18. Souřadnice koncového bodu K v čase – 2D ohyb po evolventě.....56
Tabulka 19. Parametry PCL materiálu [40] 58
Tabulka 20. Vlastnosti PETG [54].....59
Tabulka 21. Výsledky výpočtu pro určení tepelné objemové roztažnosti pro PETG.....59
Tabulka 22. Výsledky měření zahřívání pro uhlíkové vlákno 61
Tabulka 23. Výsledky měření zahřívání pro odporový drát se stoupáním 2 mm 61
Tabulka 24. Výsledky měření zahřívání pro odporový drát se stoupáním 5 mm 61
Tabulka 25. Výsledky FEA analýzy a reálného měření pro 2D ohyb do pravidelného oblouku 64
Tabulka 26. Výsledky FEA analýzy a reálného měření pro 2D ohyb po evolventě 64

Seznam příloh

Příloha A: Seznam algoritmů

Algoritmus 1 - Výpočet a vyobrazení průřezu pracovní oblasti

```
randomSteps=46000 // počet náhodných pozic jednotlivých kloubů pro výpočet pracovní obálky
  for cnt=1,randomSteps,1 do
   j1=jointLimitLows[1]+math.random()*jointLimitRanges[1]
   sim.setJointPosition(jointHandles[1],p1) //nastavení pozice kloubu
   j2=jointLimitLows[2]+math.random()*jointLimitRanges[2]
   sim.setJointPosition(jointHandles[2],p2)
   j3=jointLimitLows[3]+math.random()*jointLimitRanges[3]
   sim.setJointPosition(jointHandles[3],p3)
      if checkCollision then // kontrola kolize
        if sim.checkCollision(robotCollection,sim.handle_all)~=0 then
            colliding=true
        end
      end
      if not colliding then
        if usePointCloud then
            normals[#normals+1]=matrix[3]
            normals[#normals+1]=matrix[7]
            normals[#normals+1]=matrix[11
          end
        end
  if usePointCloud then
     sim.addPointCloud(normals) //uložení bodů do pointcloudu
  end
end
```

Algoritmus 2 - Výpočet a vyobrazení průřezu pracovní oblasti ovlivněné vloženou překážkou

```
function sysCall_init()
    x = -0.45 //výchozí pozice
    x_max = 0.45 //koncová pozice
    z = -0.45 //výchozí pozice
    z_max = 0.45 //koncová pozice
    step = 0.01 //krok
doCalculation=function()
if usePointCloud then
      if  points > 0 then
        sim.addPointCloud(normals)
        if stopsim == false then
          f = io.open("data"..x.."_"..z..".txt", "w")  //pojmenování souborů
            for i=1, table.getn(points),3 do
              text = tostring(round(points[i]*1000)) .. "\t" .. tostring(round(points[i+1]*1000)) .. "\t" ..
tostring(round(points[i+2]*1000)) .. "\n"
 // do souboru jsou uloženy souřadnice x,y,z bodů pontaclaudu. Y je konstatnta. Soubor obsahuje i počet
vygenerovaných bodů. Tím je určena velikost úracovní obálky
        end
      end
    end
end
function sysCall_actuation()
    if x > x_max then //po dosažení maxima v ose x, posun v ose y
      z = z + step
      if z > z_max then
        sim.stopSimulation()
        stopsim = true
      end
    end
    sim.removePointsFromPointCloud()
    sim.setObjectPosition(obsticle,{x,0,z})
```

Algoritmus 3 – Pohyb kruhové dráhy v mřížce a výpočet úspěšnosti průjezdu

```
function sysCall_init()
    path_lenght = sim.getPathLength(path)
    pocU_s = 0
    pocN_s = 0
    celkove_s = 0
    step = 0.01
    x = 0.14 //výchozí pozice
    x_max = 0.41 //koncová pozice
    z = 0 //výchozí pozice
    z_max = 0.26 //koncová pozice
    number_cyklus = 10 //počet průjezdů jedné konfigurace dráhy
    aktual_cyklus = 1
    actual_position = 0
    step_on_path = 0.001
end
function sysCall_actuation()
    actual_position = actual_position + step_on_path
    if actual_position > path_lenght then //kontrola počtu průjezdů jedné konfigurace dráhy
    aktual_cyklus = aktual_cyklus + 1
    actual_position = 0
    end
    if aktual_cyklus == number_cyklus then //výpočet celkové úspěšnosti průjezdu dráhy
        vysU = pocU_s / celkove_s
        vysN = pocN_s / celkove_s
        text_s = "x".. tostring(x) .. "\t" .. "z"..tostring(z) .."\t" .. "\t" ..  tostring(vysU) .. "\t" .. tostring(vysN) .. "\n"
        x = x + step
        if x > x_max then //po dosažení maxima v ose x, posun v ose y
            z = z + step
            if z > z_max then
            sim.stopSimulation()
            end
        end
```

```
  end
-- kontrola průjezdu drahý  --
    resIk_s = sim.handleIkGroup(ik_s)
    celkove_s = celkove_s + 1
    poc_s = 0
    if sim.ikresult_fail == resIk_s then
    poc_s = -1
    pocN_s = pocN_s +1
    elseif sim.ikresult_not_performed == resIk_s then
    poc_s = 0
    pocN_s = pocN_s +1
    else
    poc_s = 1
    pocU_s = pocU_s + 1
    end
```

Algoritmus 4 – Získávání údajů o momentové zátěži jednotlivých kloubů manipulátoru

```
function sysCall_init()
  j1 = sim.getObjectHandle("J1")
  j1_dyn = sim.getObjectHandle("J1_0")
  j2 = sim.getObjectHandle("J2")
  j2_dyn = sim.getObjectHandle("J2_0")
  j3 = sim.getObjectHandle("J3")
  j3_dyn = sim.getObjectHandle("J3_0")
end
function sysCall_actuation()
  value_j1 = sim.getJointPosition(j1)
  sim.setJointTargetPosition(j1_dyn, value_j1)
  value_j2 = sim.getJointPosition(j2)
  sim.setJointTargetPosition(j2_dyn, value_j2)
  value_j3 = sim.getJointPosition(j3)
  sim.setJointTargetPosition(j3_dyn, value_j3)
end
```

Algoritmus 5 – Algoritmus pro snímání sil a momentů ze silově momentového senzoru

```
PROC FC_ READER
    WHILE TRUE DO
    forceTorqueVector := FCGetForce();
    SETAO f_FCX, forceTorqueVector.xforce;
    SETAO f_FCY, forceTorqueVector.yforce;
    SETAO f_FCZ, forceTorqueVector.zforce;
    SETAO mk_FCX, forceTorqueVector.xtorque;
    SETAO mk_FCX, forceTorqueVector.ytorque;
    SETAO mk_FCX, forceTorqueVector.ztorque;
    GetJointData\MechUnit:=Rob_1, 4\Position:=n_j4;
    SETAO p_j4, n_j4;
    ENDWHILE
ENDPROC
```

Algoritmus 6 – Simulace ohybu v prostředí RobotStudio

```
PROC EVOLVENTA/ REGULARARC
    FOR i FROM 1 TO nCyklu DO    // nCyklu je nastavený počet opakování měření v bodech
    MoveL Target_Start, v40, z0, Tooldata_FC\WObj:=Workobject_FC;
    MoveC Target_P1P, Target_P1, v60, z0, Tooldata_FC\WObj:=Workobject_FC;
    WaitTime 5;    //časová prodleva pro ustálení po přesunu do měřené pozice
    MoveC Target_P2P, Target_P2, v60, z0, Tooldata_FC\WObj:=Workobject_FC;
    WaitTime 5;
    MoveC Target_P3P, Target_P3, v60, z0, Tooldata_FC\WObj:=Workobject_FC;
    WaitTime 5;
    MoveC Target_StartP, Target_Start, v60, z0, Tooldata_FC\WObj:=Workobject_FC;
    WaitTime 5;
    ENDFOR
ENDPROC
```

Příloha B: Simulační scény s manipulátory se zakřivenými segmenty (použité v kapitole 4).

Příloha C: CAD model s nastaven9m pro FEA analýzy (použité v kapitole 5).