

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Soft grippery a jejich možné ovládání pomocí
TCPA vláken

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Tomášek** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **491190**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Soft gripperů a jejich možné ovládní pomocí TCPA vláken

Název bakalářské práce anglicky:

Soft grippers and their possible control using TCPA fibers

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši v oblasti soft gripperů.
- 2) Seznamte se s tvorbou a modelováním umělých TCPA vláken.
- 3) Navrhněte tvar a rozměr soft gripperu a vytvořte jeho simulační model.
- 4) Vytvořte laboratorní model soft gripperu řízený vlákny.

Seznam doporučené literatury:

Suzuki, M.; Kamamichi, N. Simple Controller Design Based on Internal Model Control for Twisted and Coiled Polymer Actuator. Actuators 2018, 7, 33. <https://doi.org/10.3390/act7030033>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Zavřel, Ph.D. odbor mechaniky a mechatroniky FS

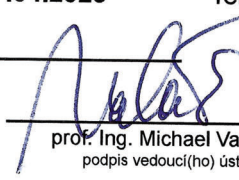
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:


Datum zadání bakalářské práce: **27.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **14.08.2023**

Platnost zadání bakalářské práce:


Ing. Jan Zavřel, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

29.5.2023
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Anotační list

Jméno autora:	Petr Tomášek
Název bakalářské práce:	Soft grippery a jejich možné ovládání pomocí TCPA vláken
Anglický název:	Soft grippers and their possible control using TCPA fibers
Akademický rok:	2022/2023
Studijní obor:	Teoretický základ strojního inženýrství
Ústav, obor:	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky Odbor mechaniky a mechatroniky
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Jan Zavřel, Ph.D
Bibliografické údaje:	43 stran 30 obrázků 6 tabulek 0 příloh
Klíčová slova:	Soft grippery, TCPA, Měkká robotika
Key words:	Soft grippers, TCPA, Soft robotics

Abstrakt: Tato práce se věnuje existujícím řešením soft gripperů a jejich rozdělení. Dále se zabývá návrhem soft gripperu řízeného TCPA vláknem. Konec práce je věnován tvorbě laboratorního modelu soft gripperu řízeného stahováním lanek.

Abstract: This work deals with existing soft gripper solutions and their distribution. It also deals with the design of a soft gripper controlled by TCPA fibers. The end of the work is the creation of a laboratory model of a soft gripper controlled by pulling the cables.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil pouze podklady uvedené v příloženém seznamu literatury.

V Praze dne _____

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své bakalářské práce Ing. Janu Zavřelovi, Ph.D. za trpělivost, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování bakalářské práce.

Význam použitých symbolů

U	napětí	[V]
m	hmotnost	[g]
l_0	konstantní parametr modelu	[mm]
j	konstantní parametr modelu	[mm]
e	konstantní parametr modelu	[mm]
a	konstantní parametr modelu	[mm]
b	konstantní parametr modelu	[mm]
c	konstantní parametr modelu	[mm]
n	konstantní parametr modelu	[-]
f	parametr modelu	[mm]
k	parametr modelu	[mm]
z	parametr modelu	[mm]
f	parametr modelu	[mm]
Δy	průhyb do osy y	[mm]
Δz	průhyb do osy z	[mm]
h	počet hodnot	[-]
ν	Poissonova konstanta	[-]
E	Youngův modul pružnosti v tahu a tlaku	[MPa]
u	hustota energie	[MJ/m ³]
E	intenzita elektrického pole	[V/ μ m]
α'	fiktivní teplotní součinitel délkové roztažnosti	[K ⁻¹]
t	čas	[s]
Δl	kontrakce délky	[mm]
r	poloměr rotoru	[mm]
R	poloměr navijáku	[mm]

Obsah

1	Úvod	11
1.1	Cíle práce	11
2	Teoretická část	12
2.1	Soft Grippers	13
2.1.1	Uchopení aktivací	13
2.1.2	Uchopení řízením tuhosti	16
2.1.3	Uchopení řízenou adhezí	17
2.2	TCPA	19
2.2.1	Příprava TCPA	19
3	Praktická část	21
3.1	Numerická studie	21
3.2	Návrh modelu	22
3.2.1	Postup návrhu v programu Abaqus	22
3.3	Optimalizace	24
3.3.1	Optimalizace podle parametru k	25
3.3.2	Optimalizace podle parametru z	26
3.3.3	Optimalizace podle parametru f	27
3.4	Experimentální ověření optimalizace	27
3.4.1	Tvorba TCPA prstu	28
3.4.2	Testování	30
3.4.3	Závěr testování	32
3.5	Laboratorní model	32
3.5.1	Popis návrhu	33
4	Diskuze	38
5	Závěr	40

Seznam obrázků

2.1	SMA gripper sloužící k jemné manipulaci s polovodičovými součástkami [1] (© 1991 Published by Elsevier Ltd.)	14
2.2	Princip pneumatického ovládnání [2]	15
2.3	Mechanismus ovládnání lanky [2]	15
2.4	Mechanismus VSDEA [3], (© 2015 IEEE)	17
2.5	Pneumatický ovládný gripper s geckoadhezí, (hmotnost hrnku = 400g) [4],(© 2018, IEEE)	18
2.6	Gripper ovládný DEA s elektroadhezí, ukázka jemnosti sevření a maximálního zdvihu [5], (© 2019, IEEE)	19
3.1	Počáteční kótovaný návrh tvaru silikonového prstu gripperu [mm]	21
3.2	Model materiálů. Žlutá barva symbolizuje Nylon, zelená Silcone	22
3.3	Kótovaný postup návrhu <i>part-1</i> a <i>part-2</i> , [mm]	23
3.4	Diskretizovaný model	24
3.5	Parametrický popis obecného modelu	24
3.6	Graf závislosti ohybu Δy na změně parametru \mathbf{k} [mm]	25
3.7	Graf závislosti ohybu Δy [mm] a Δz [mm] na změně parametru \mathbf{k} [mm], při $\mathbf{z} = -2$ mm	26
3.8	Graf závislosti ohybu Δy na změně hodnoty parametru \mathbf{f} [mm]	27
3.9	Láhve se silikonem a katalyzátorem, nástroje pro jejich smíchání	28
3.10	Kótované 3D modely forem [mm], vlevo pro <i>K5</i> a <i>K10</i> , vpravo pro <i>ZM</i>	29
3.11	Předepnutá TCPA v přípravku	29
3.12	Foto všech forem (použitých i nepoužitých)	30
3.13	Kótovaný 3D model uchyceného prstu gripperu [mm]	30
3.14	TCPA gripper napájený laboratorním zdrojem	31
3.15	Kótovaný model <i>ZM</i> [mm]	31
3.16	Snímek zkrouceného modelu <i>ZM</i> po vyjmutí z formy	32
3.17	Snímek navrženého gripperu v rozevřeném 3.17a a sevřeném stavu 3.17b	32
3.18	Schématické označení komponent 3D modelu gripperu v 3/4 řezu, (i) stator, (ii) díl rotoru (1/2), (iii) díl rotoru (2/2), (iv) objímka servomotoru, (v) servomotor, (vi) základna, (vii) párová spojka, (viii) objímka prstu, (ix) dvoudílná spona	33

3.19	Forma prstu gripperu řízeného vlákny	34
3.20	Schéma mechanismu aktivace lankem	35
3.21	Forma prvotního návrhu	36
3.22	Ovládání jednoho prstu	36
4.1	Snímek gripperu držícího rajče ($m = 77,3$ g)	39

Seznam tabulek

3.1	Vybrané materiálové vlastnosti pro numerickou studii	23
3.2	Hodnoty konstantních parametrů	25
3.3	Hodnoty nezávislých parametrů při optimalizaci parametru \mathbf{k}	25
3.4	Hodnoty nezávislých parametrů při optimalizaci parametru \mathbf{z}	26
3.5	Hodnoty nezávislých parametrů při optimalizaci parametru \mathbf{f}	27
4.1	Hodnoty parametrů optimálního modelu [mm]	38

Kapitola 1

Úvod

Uchopit a manipulovat s předměty patří k základním schopnostem jak ve světě zvířat a lidí tak i ve světě robotů. Gripper, česky uchopovadlo, je označení součásti robotického zařízení umožňující dosažení výše zmíněné schopnosti¹. V případě tradičních gripperů se jedná o tuhé součásti spojené kloubovými či čepovými vazbami, řízené různými druhy aktuátorů, nejčastěji v podobě elektromagnetických motorů. Při kontaktu takového gripperu s křehkou součástí je potřeba vysoká přesnost, aby nedošlo k poškození a zároveň dostatečně pevnému úchopu. Pro takové aplikace se nabízí daleko vhodnější varianta, a to v podobě gripperu vyrobeného z měkkých a pružných materiálů, tzv. soft gripperu.

Na následujících stránkách je nejprve uvedení do problematiky soft gripperů, jejich výhody, využití a nakonec i rozdělení do jednotlivých skupin podle použité technologie. Další kapitola se věnuje numerickému modelu jednoho prstu soft gripperu řízeného TCPA², jeho optimalizaci a jejímu laboratornímu ověření. Nakonec je popsán návrh gripperu řízeného stahováním lanek a ukázka jeho použití. Poslední dvě kapitoly se týkají diskuze výsledků a závěru.

1.1 Cíle práce

Cílem této práce je nejprve provedení rešerše v oblasti soft gripperů. Poté seznámení se s tvorbou a modelováním umělých TCPA vláken. Dále pak návrh tvaru a rozměrů soft gripperu a vytvoření jeho simulačního modelu. Nakonec vytvoření laboratorního modelu soft gripperu řízeného vláknem.

¹Dále použít už jen termín "gripper".

²Twisted and coiled polymer actuator (TCPA).

Kapitola 2

Teoretická část

Robotické grippery jsou jednou z nejdůležitějších součástí v průmyslu díky jejich schopnosti manipulovat s předměty. Nejenže realizují přepravní úkoly, ale také provádějí kontrolu kvality pro optimalizaci robotických pracovních buněk. [6] Dále jsou schopny fungovat na nejrůznějších místech, od dopravní linky v továrně až po radiační zóny, či na povrchu Měsíce při objevování vesmíru. A to vše dokáží provádět přesněji, rychleji, opakovatelně a hlavně levněji než člověk. [7] Díky tomu nacházejí uplatnění nejen napříč těžkým a lehkým průmyslem, ale třeba i ve vědecké sféře nebo ve zdravotnictví.

Konstrukcí tradičního robotického gripperu je systém tuhých prvků spojených pevnými kloubovými či rotačními vazbami s aktuátory uloženými uvnitř jednotlivých prstů nebo v základně, tedy v místě, kde jsou jednotlivé prsty pevně spojeny a upevněny. Pro dosažení úrovně potřebné k plnění nejrůznějších úkolů a svůj plynulý chod mohou být grippery vybaveny celou řadou senzorů. Proprioceptivními senzory sloužící pro odhad polohy a rychlosti prvků gripperu (např. Hallův senzor, senzory točivého momentu, senzory mechanického napětí). Dále pak senzory ke sběru informací o okolních předmětech a prostředí (např. tlakový nebo optický senzor). Design gripperů sahá od dvouprstých až po antropomorfní grippery jakožto ruce s kloubovými prsty a dlaní. Volba antropomorfních gripperů je často motivována snahou o flexibilitu a obratnost lidských rukou, potřebou být kompatibilní s lidským prostředím, nebo umožnit dálkovou operaci pomocí chytrých rukavic. [8][9]

Speciálním případem robotických gripperů, kterým je tato kapitola věnována, jsou grippery vyrobené z měkkých a pružných materiálů řízené soft aktuátory bez a nebo s minimálním počtem tuhých komponent. Tyto grippery patří do kategorie tzv. soft robotics (SR). SR se v posledních letech stala velice atraktivní a to zejména díky svému potenciálu zlepšit schopnosti tradičních tuhých robotických systémů. [9] To například bezpečnou interakcí mezi robotem a člověkem, tvarové adaptaci či snadnější a levnější výrobě.

2.1 Soft Grippery

Soft Grippery jsou univerzální především díky schopnosti uchopovat předměty různého tvaru, velikosti a pevnosti a to bez poškození těchto předmětů. Rozdělit je můžeme do tří skupin a to podle technologie, na základě které realizují úchop. Toto rozdělení ovšem není jednoznačně exaktní, existují grippery kombinující více technologií úchopu, ty se pak zařadí podle té technologie, která je uplatněna více při držení předmětu. [9]

2.1.1 Uchopení aktivací

Grippers patří do této skupiny se skládají z jednotlivých měkkých a ohebných prstů či článků. Úchop realizují jejich řízeným obejmutím kolem předmětu a následným sevřením, podobně jako lidské prsty. Charakteristickou vlastností je, že k procesu obejmutí předmětu a jeho držení je využit pouze aktuátor. [2]

Electroactive polymers (EAP) tvoří důležitou podskupinu aktuátorů reagujících na vnější elektrické pole a to buď změnou velikosti či tvaru. Podle mechanismu aktivace je lze rozdělit na typ iontové EAP a elektrické EAP. Iontové EAP jsou poháněny na základě difuze a přesunu iontů uvnitř materiálu. U elektrických EAP je mechanická odezva buzena změnou vnějších elektrických polí nebo Coulombickými silami. [10]

Shape memory alloys (SMA) nebo česky také slitiny s tvarovou pamětí, to je další podskupina materiálů používaných k aktivaci. Vlastnost tvarové paměti se u SMA projevuje krystalografickým přeskupením slitiny mezi martenzitickou fází a fází austenitu. Toto přeskupení je důsledkem snahy SMA udržet se v energeticky nejvýhodnějším stavu, a proto se vždy přeorientuje do krystalické mřížky, která je za daných podmínek energeticky nejušpornější. [11] Při nižší teplotě ve fázi martenzitu může být slitina vnější silou plasticky zdeformována, při zahřátí nad přechodovou teplotu dochází však k návratu do původního tvaru. [12] Tato vlastnost byla vědci poprvé objevena u slitiny Ni-Ti (*nitinol*). Podrobněji se problematice SMA věnuje [13]. Tvarovou paměť vykazují i některé polymery - shape memory polymers (SMP), oproti SMA jsou levnější, biologicky odbouratelné, prakticky všechny jsou biokompatibilní a vykazují daleko vyšší stupeň vratné deformace. Jako aktuátory v soft gripperech se ovšem oproti SMA využívají zatím zřídka, příčinou mohou být daleko nižší síly při stisku a nutnost použití přídavného zdroje tepla pro navrácení do původního tvaru. [14]

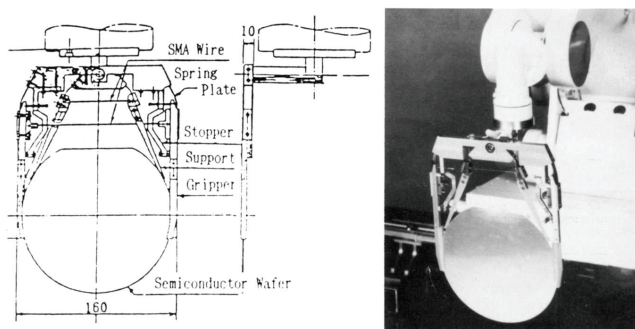
Poslední podskupinu gripperů spoléhajících se pouze na aktuátor lze obecně popsat jako články s pasivní strukturou, reagující na pokyny připojeného motoru a to tak, aby nedošlo ke ztrátě klíčových vlastností soft gripperu. Patří sem grippery s pneumatickým ovládním, vakuovým ovládním a nakonec i ovládním pomocí lanek. [9][2]

Dielectric actuator - DEA

Příklad ze skupiny elektrických EAP je aktuátor v podobě dielektrického elastomeru (DEA). Vlivem přivedeného napětí na elektrody, mezi kterými je EAP, dochází k uspořádanému přenosu některých iontů a molekul vody. Jedna strana vrstvy EAP se poté roztahuje, zatímco druhá strana se smršťuje a to vede k ohybové deformaci struktury. [11] Dielektrické elastomery (DE) jsou schopné se ohybově deformovat na škále od 10 % až do 300 % ovšem za potřebu silného elektrického pole, obvykle kolem $100 \text{ V}/\mu\text{m}$. [10] Dále jsou DE relativně levné, lehké, mechanicky robustní a mají vysokou energetickou hustotu ($> 8 \text{ MJ}/\text{m}^3$). [15]

SMA gripper

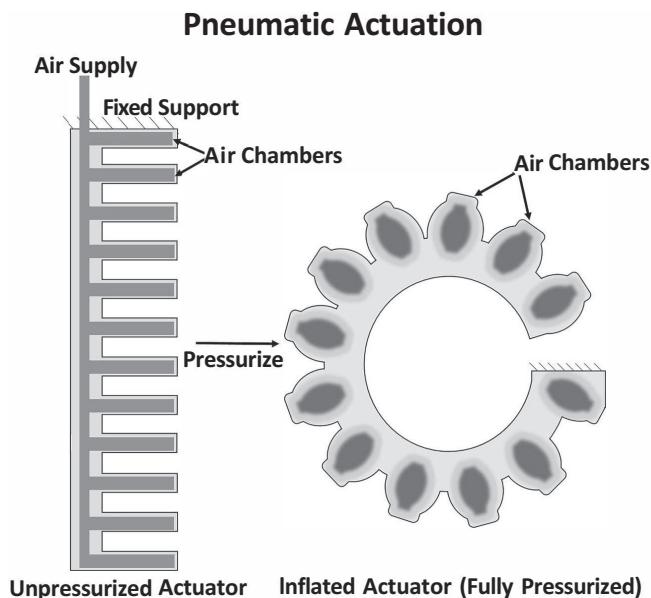
Jedna z možností uplatnění SMA k ovládání gripperu je v podobě Ni-Ti drátku. Kontrakce délky takových drátů je pouze okolo 3 % až 5 %. Pro zpětné rozevření gripperu jsou použity jednoduché listové pružinky (obrázek 2.1). [16]



Obrázek 2.1: SMA gripper sloužící k jemné manipulaci s polovodičovými součástkami [1]
(© 1991 Published by Elsevier Ltd.)

Pneumatické ovládání

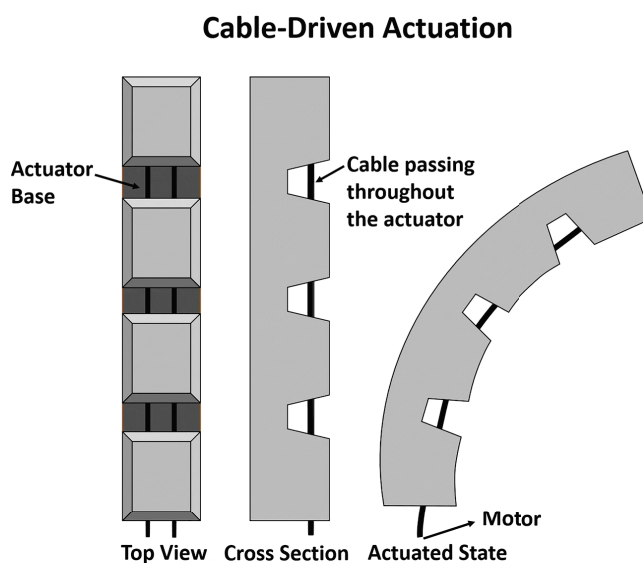
Jedná se o nejpopulárnější způsob ze skupiny gripperů spoléhajících se pouze na aktuátor. Klíčem k funkci tohoto gripperu jsou pružné, měkké prsty, složené z propojených dutých komor ústících otvorem pro přívod vzduchu (obrázek 2.2). [2] Místo vzduchu může být použito i kapalné médium. [17] Podobně funguje vakuové ovládání, jen využívá na místo přetlaku podtlak. [2] Reakční čas uchopení pneumaticky ovládaného gripperu se pohybuje od 0.05 s až 1 s. Ovlivňuje to několik parametrů, výkon kompresoru, počáteční objem komor, tuhost materiálu, ze kterého jsou prsty gripperu vyrobeny. [18]



Obrázek 2.2: Princip pneumatického ovládání [2]

Ovládání lanky

Princip je opět graficky představen na obrázku 2.3. Lanko je uloženo v pružném, měkkém prstu a to tak, že je do něj podélně nasunuto a až ve špičce (volný konec) je pevně připojeno k materiálu prstu. Při navinutím lanka dochází k přitahování volného konce a tím k ohybu celého prstu. Navinutí lanka je řízeno pomocí elektromotoru, což zajišťuje velice dobrou ovladatelnost a kontrolu síly, kterou dochází k uchopení. Další výhodou plynoucí z použití lanek je možnost jejich tažení skrz manipulátor ke vzdáleně umístěnému navijáku, čehož je využito například u gripperu použitého při operaci srdce. [19]



Obrázek 2.3: Mechanismus ovládání lanky [2]

2.1.2 Uchopení řízením tuhosti

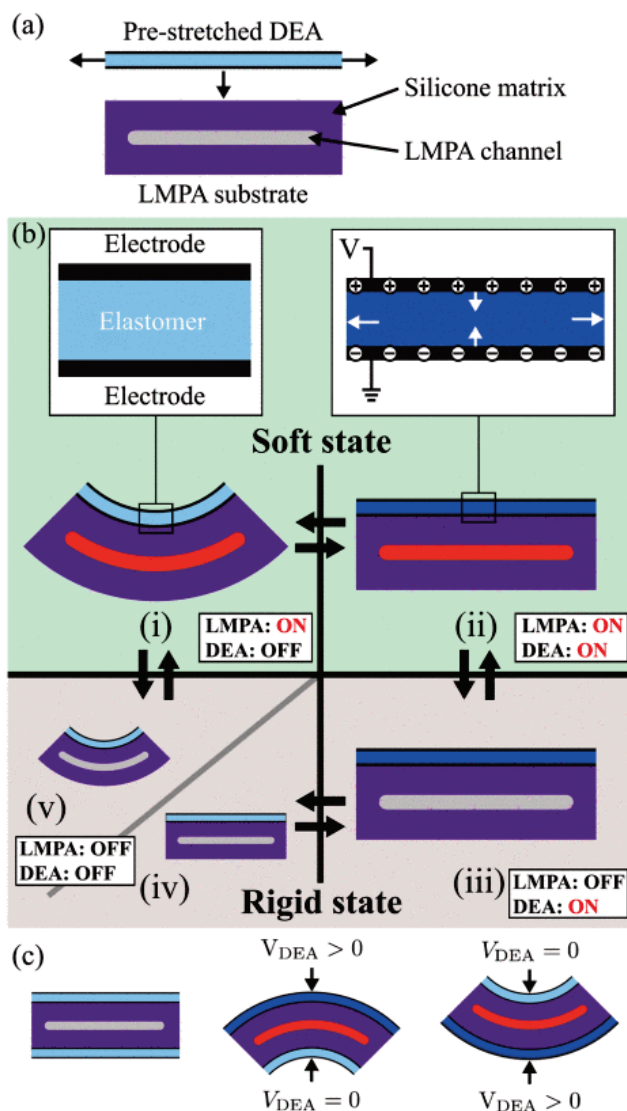
Do této skupiny lze zařadit gripperové tvořené materiály nebo kombinací materiálů s možností řízení jejich tuhosti. Pro obejmutí předmětu tímto gripperem je využit aktuátor, ale držení už je způsobeno řízeným ztuhnutím materiálu, jímž mohou být prsty gripperu částečně tvořeny. Jedná se například o magnetoreologické a elektroeologické kapaliny, jejichž reologické vlastnosti, jako je smyková viskozita, smykové napětí a prahové napětí, se mění v reakci na proměnné magnetické a elektrické pole. Dále to jsou polymery s tvarovou pamětí, které podobně jako SMA stačí po deformaci zahřát, aby se navrátily do původního tvaru a nakonec slitiny s nízkým bodem tání - LMPA¹. Tyto gripperové mají uplatnění na místech, kde je vyžadován velice jemný úchop, ale záleží na použitém aktuátoru. [3][20]

Variable stiffness dielectric actuator - VSDEA

V této podkapitole si vysvětlíme mechanismus uchopení řízením tuhosti na příkladu. Jako aktuátor byl využit výše zmíněný DEA a materiálem, s možností měnit svou tuhost, je LMPA zapuštěné do silikonového obalu.

Na obrázku 2.4 (a) je schématicky popsána stavba jednoho prstu gripperu, předejatý DEA je přilepen na silikonový model se zapuštěným LMPA. Jak je vidět na obrázku 2.4 (b)(i) přivedením napětí nejdříve na LMPA se odporovým teplem slitina zahřeje a změkne. Souběžně dojde k deformaci vlivem předpětí DEA. Můžeme si tedy představit, že nyní jsou prsty gripperu nejdále od sebe. Obejmutí je provedeno přivedením napětí na DEA, které se důsledkem toho ohybově zdeformuje, což zapříčiní narovnání profilu (obrázek 2.4 (b)(ii)). Tím dojde i k teoretickému obejmutí a jemnému sevření předmětu. Odpojení LMPA od zdroje napětí dojde k jeho ztuhnutí a tím i k fixaci předmětu v gripperu (obrázek 2.4 (b)(iii)). V poslední části schématu (obrázek 2.4 (b)(iv,v)) je naznačeno, že pokračování v přívodu napětí na DEA již není nutné a také, že do tuhého stavu lze přivést gripper v libovolné fázi úchopu. [3]

¹Low melting point alloy - (LMPA)



Obrázek 2.4: Mechanismus VSDEA [3], (© 2015 IEEE)

Nakonec je na obrázku 2.4 (c), popsána aktivace řešení s předepjatým DEA po obou stranách gripperu, díky čemuž je gripper schopen stisknout předmět silou zvětšenou o předpětí v jednom z DEA. [3]

2.1.3 Uchopení řízenou adhezí

Některé gripperu složené z elektricky řízených aktuátorů, jsou schopny vyvinout pouze nízké síly při sevření, s čímž se také pojí nízká síla při zvedání. To lze zlepšit zvýšením adheze na kontaktních plochách gripperu s předmětem. Adheze, neboli přilnavost mezi dvěma povrchy, vede ke smykovému napětí úměrnému generovanému normálovému tlaku. [21] Existují dva hlavní typy využívané u soft gripperů, geckoadheze (obrázek 2.5) a elektroadheze (obrázek 2.6). [22]

Geckoadheze

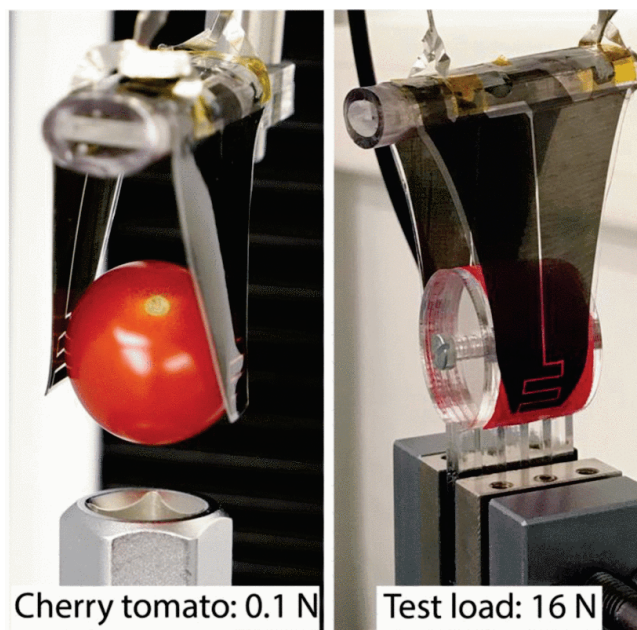
Mikrostruktura povrchu kontaktních ploch u gripperů s geckoadhezí je podobně jako u gekonů tvořena z velkých polí v podobě vláken, sloupků nebo klínů, které přilnou k povrchům manipulovaných předmětů prostřednictvím van der Waalsových sil. [23] Vznik a velikost geckoadheze nemusí být vždy závislí na směru zatížení, ale je přerušen jeho odstraněním. [24]



Obrázek 2.5: Pneumatický ovládaný gripper s geckoadhezí, (hmotnost hrnku = 400g) [4],(© 2018, IEEE)

Elektroadheze

V kontaktním povrchu gripperu jsou integrované elektrody, které za vysokého napětí generují silné elektrostatické pole. Při kontaktu s manipulovaným předmětem dojde důsledkem tohoto pole buď k nabití nebo polarizaci povrchu předmětu, záleží zda se jedná o vodivý či nevodivý materiál. Výsledkem je elektrostatická přitažlivá síla mezi prsty gripperu a povrchem předmětu. [25][26] Dokud je generováno elektrické pole, tak je možno aplikovat zatížení v libovolném směru na manipulovaný předmět bez změny přilnavosti. [26]



Obrázek 2.6: Gripper ovládaný DEA s elektroadhezí, ukázka jemnosti sevření a maximálního zdvihu [5], (© 2019, IEEE)

2.2 TCPA

Pokud by se z výše zmíněných ovládacích metod měly vybrat ty, co krom sebe sama nevyžadují více dalších komponent, jako jsou řídicí motory či přídavné ohřívací prvky, zbývají dvě metody - SMA a EAP. Oběma metodám ke své funkci stačí přivedení napětí, nevýhodou je, že toto napětí musí být poměrně dost vysoké a v případě SMA je navíc dlouhý reakční čas. [11] Proto se nabízí, jako zajímavá alternativa aktuátoru v podobě zkroucených polymerových vláken - TCPA. TCPA je tepelně řízený aktuátor, u kterého zahřátím dochází ke značné kontrakci délky. TCPA skládající se z postříbřených nylonových vláken, lze řídit regulací nízkého napětí. Kontrakce může být až 21 %, na její velikost má vliv jednak teplota (napětí), ale také počet vrstev při nakroucení. [27] O využití v SF existuje již několik záznamů, humanoidní robotická ruka [28] [29], silikonová robotická kůže [27], robotický silikonový prst [30] ale žádný o soft gripperu.

2.2.1 Příprava TCPA

TCPA je zkroucen z postříbřených nylonových vláken, zkroucení probíhá na přípravku složeného z DC motoru a předepínacího závaží. Jeden konec vlákna je připevněn k motoru a druhý zatížen, tak aby pokaždé byla použita stejná délka vlákna. Po napnutí vlákna do přípravku probíhá jeho zkroucení, motor otáčí jedním koncem proti směru hodinových ručiček. Otáčení probíhá, dokud vlákno není zkroucené po celé délce, což je potvrzeno vizuální kontrolou. Tak

vznikne jednovrstvé nakroucené vlákno. Pro vytvoření dvouvrstvého je třeba nakroucené vlákno přeložit, v tomto stavu upnout a celý proces zopakovat stejně jako pro nenakroucené vlákno. Po dokončení tohoto procesu jsou konce vlákna sepnuty kovovými sponami kvůli napájení, a uchycena do přípravku (Obrázek 3.11) tak, aby nedocházelo k samovolnému rozmotávání. [27][31]

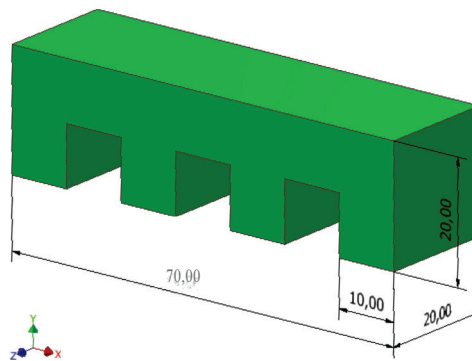
Kapitola 3

Praktická část

Prvním bodem praktické části bylo vytvoření numerické studie v podobě matematického modelu prstu gripperu řízeného TCPA vláknem. Dále byly výsledky numerické studie podrobeny laboratorním testům pro ověření správnosti matematického modelu. Nakonec byl popsán postup návrhu soft gripperu řízeného stahováním lanek a bylo provedeno jeho zkonstruování.

3.1 Numerická studie

Nejprve byl proveden jednoduchý návrh tvaru jednoho prstu gripperu řízeného TCPA (obrázek 3.1). Předpokladem při kontrakci TCPA byla ohybová deformace prstu (obrázek 3.5). Za účelem získání nejlepších možných výsledků, největší ohyb při co nejmenší kontrakci vlákna, bylo potřeba optimalizovat tvar a velikost gripperu, ale také uložení vlákna. Optimalizací velikosti a tvaru je myšlena nejprve volba základních rozměrů navrženého tvaru. Poté souběžná úprava vybraných rozměrů s prováděním simulací kontrakce (aktivace TCPA) pro každou úpravu. Na základě výsledků této studie bylo možné zvolit optimální kombinaci rozměrů.



Obrázek 3.1: Počáteční kótovaný návrh tvaru silikonového prstu gripperu [mm]

Návrh a simulace byly provedeny v programu Abaqus. Jedná se o univerzální, komerční

software založený na metodě konečných prvků. Tvůrcem a vlastníkem programu je společnost Dassault Systems. [32] V této práci byla využita verze pro akademické účely.

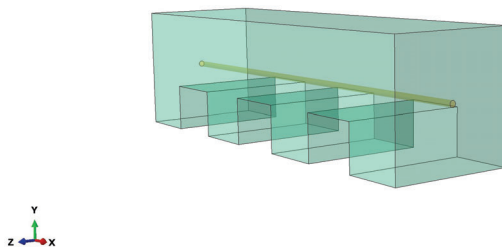
3.2 Návrh modelu

V této podkapitole je rozebrán postup tvorby numerického modelu v prostředí programu Abaqus, nejedná se ovšem o postup vhodný pro uživatele bez předchozích zkušeností s tímto softwarem.

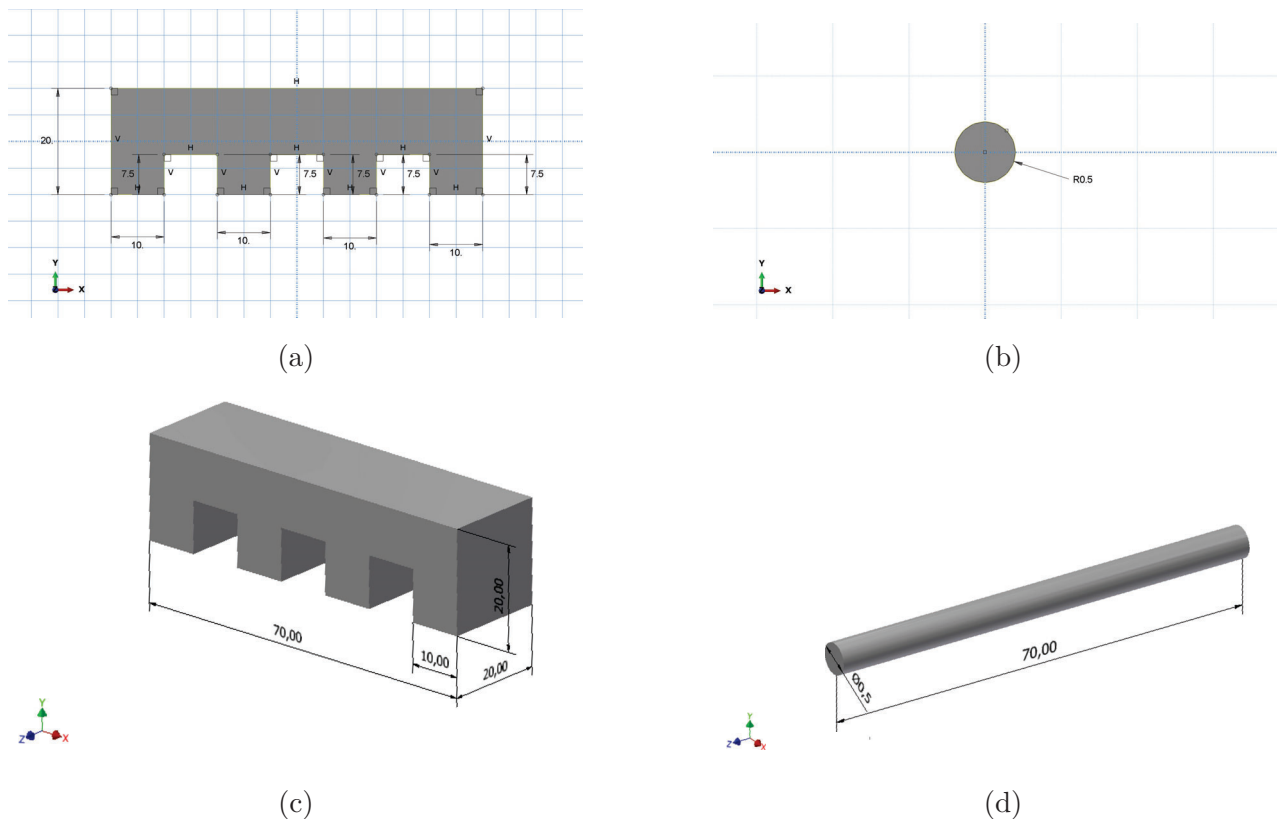
Model byl koncipován tak, že je složen ze dvou částí spojených do jednoho celku. První část je tvořena silikonovým tělem gripperu a druhá nylonovým vláknem. Během simulace dojde k ohřátí celého modelu a tím ke kontrakci nylonového vlákna, což zapříčiňuje ohybovou deformaci celého modelu. Při praktickém pokusu ovšem dochází navíc i k ohřátí silikonu v místech kontaktu s vláknem. Toto ohřátí je v této studii zanedbáno, koeficient teplotní roztažnosti je uvažován pouze pro nylon, tedy pro silikon je nulový.

3.2.1 Postup návrhu v programu Abaqus

Po otevření programu Abaqus v modulu **Part**, byla vytvořena geometrie ve 2D a následně přidán třetí rozměr extruzí. Tento postup byl aplikován jak pro *part-1* viz Obrázek 3.3(a),(c) tak pro *part-2* viz Obrázek 3.3(b),(d). V dalším kroku byla vytvořena *part-3* a to sloučením v modulu **Assembly** pomocí nástroje **Merge/Cut Instances**. V modulu **Property** byly přidány dva materiály *Silicone*, *Nylon* a k nim moduly pružnosti E , Poissonovy konstanty ν a fiktivní konstanty teplotní roztažnosti α viz Tabulka 3.1. V sekci **Section** byly materiály přiřazeny k vybraným částem podle obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: Model materiálů. Žlutá barva symbolizuje Nylon, zelená Silicone

Obrázek 3.3: Kótovaný postup návrhu *part-1* a *part-2*, [mm]

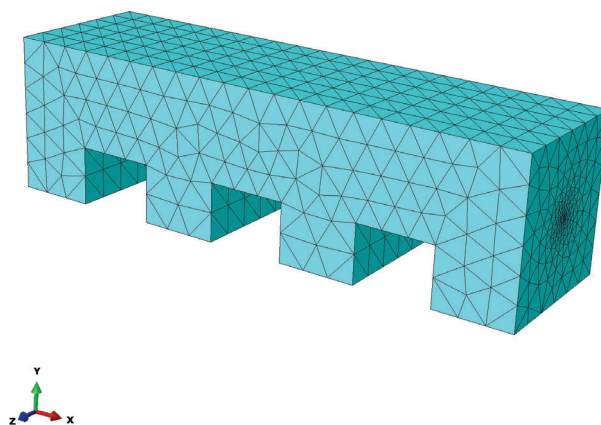
Materiál	E [MPa]	ν [-]	α' [K^{-1}]
Silicone	9	0.48	0
Nylon	3e3	0.42	-1

Tabulka 3.1: Vybrané materiálové vlastnosti pro numerickou studii

V následujícím modulu **Load** byly přidány počáteční podmínky. Vetknutí jedné z čelních ploch nástrojem *Create Boundary Condition* a vložení modelu *part-3* nástrojem *Predefined Fields* do homogenního teplotního pole. V modulu **Steps** byly vytvořeny dva kroky *Initial* a *T-step*. V kroku *T-step* došlo ke změně teploty Δt homogenního teplotního pole a to tak, aby došlo ke kontrakci vlákna Δl cca o 5 mm (cca 7 %), viz rovnice (3.1).

$$\begin{aligned} \Delta l &= l_0 \cdot \Delta t \cdot \alpha \\ \Delta t &= \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \alpha} \\ \Delta t &= \frac{-5}{70 \cdot (-1)} \\ \Delta t &= 0.071 K \end{aligned} \tag{3.1}$$

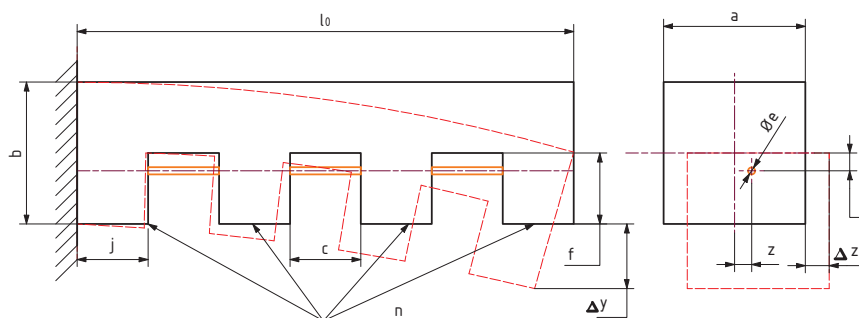
V modulu *Mesh* byla *part-3* transformována z geometrického modelu na diskretizovanou síť, jako základní síťový prvek byl zvolen trojúhelník (obrázek 3.4). Nakonec v modulu *Job* byla inicializována simulace a výpočet. Výstupem je sada dat popisující stav modelu před a po deformaci v diskretizovaných bodech (ohyby, posuvy, rozložení napětí atd.).



Obrázek 3.4: Diskretizovaný model

3.3 Optimalizace

Optimalizace spočívá ve výběru parametru (obrázek 3.5), který má být optimalizován např. \mathbf{k} . Za tento parametr jsou pak dosazovány vybrané hodnoty (0 mm; 1,25 mm; 2,5 mm; ...8,75 mm), počtu hodnot - h odpovídá počet modelů (pro \mathbf{k} - $K1; K2 \dots Kh$). Vznik každého modelu spočívá v zopakování výše popsaného postupu (kapitola 3.2.1), jednotlivé modely se liší právě v hodnotě optimalizovaného parametru (např. \mathbf{k}). Z výstupu každého modelu je vybrána hodnota ohybu Δy a nebo Δz (obrázek 3.5). V tabulce 3.2 jsou hodnoty parametrů, které se v žádné z optimalizací nemění.



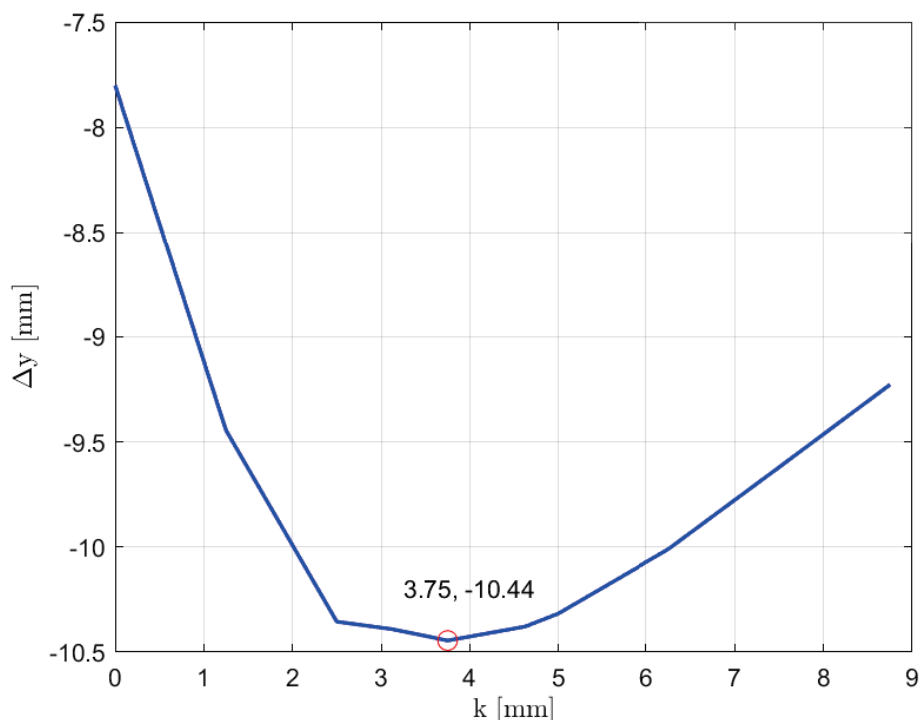
Obrázek 3.5: Parametrický popis obecného modelu

l_0 [mm]	a [mm]	b [mm]	e [mm]	n [-]	c [mm]	j [mm]
70	20	20	0,5	4	10	10

Tabulka 3.2: Hodnoty konstantních parametrů

3.3.1 Optimalizace podle parametru k

Postup této optimalizace je již názorně uveden výše (kapitola 3.3). Hodnoty k jsou (0 mm; 1,25 mm; 2,5 mm;...8,75 mm). Počet hodnot k je h ($h = 10$), stejně tak i počet modelů ($K1; K2...K10$). Z výstupu každého modelu byla vybrána hodnota ohybu Δy , podle obrázku 3.5. Jednotlivé modely jsou pak reprezentovány dvěma hodnotami ($k, \Delta y$). Na základě tohoto postupu bylo možné vynést závislost ohybu Δy na parametru k (obrázek 3.6) a určit model $K5$ s optimální hodnotou parametru k ($k = 3,75$ mm) při maximálním ohybu Δy ($\Delta y = -10.4448$ mm). Zbylé nezávislé parametry pro tuto optimalizaci byly zvoleny podle tabulky 3.3.

Obrázek 3.6: Graf závislosti ohybu Δy na změně parametru k [mm]

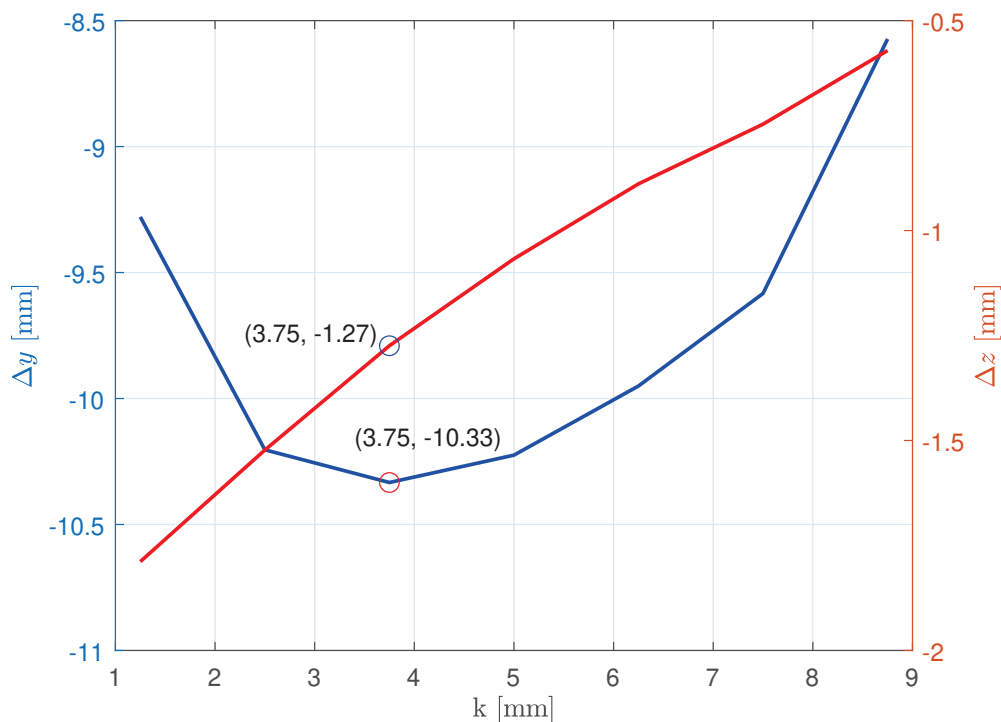
f [mm]	z [mm]
10	0

Tabulka 3.3: Hodnoty nezávislých parametrů při optimalizaci parametru k

3.3.2 Optimalizace podle parametru z

V této optimalizaci byl aplikován téměř stejný postup jako v kapitole 3.3.1. Změněn byl jeden z nezávislých parametrů (tabulka 3.3) a to parametr z (tabulka 3.4). Takto upravené modely ($Z1; Z2...Z10$) byly ze svých výstupů doplněny o další hodnotu a to o ohyb Δz . Jednotlivé modely jsou pak reprezentovány třemi hodnotami ($\mathbf{k}, \Delta y, \Delta z$). Podobně jako v předchozí kapitole 3.3.1, bylo možné vynést závislost ohybu Δy na parametru \mathbf{k} , ale také závislost ohybu Δz na parametru \mathbf{k} (obrázek 3.7).

Cílem této optimalizace nebylo získat novou hodnotu parametru \mathbf{k} , ale vizuální srovnání modelů K (obrázek 3.6) s modely Z (obrázek 3.7). Při porovnání modelu $K5$ a modelu $Z5$ je absolutní rozdíl hodnot Δy roven pouze 0,11 mm.



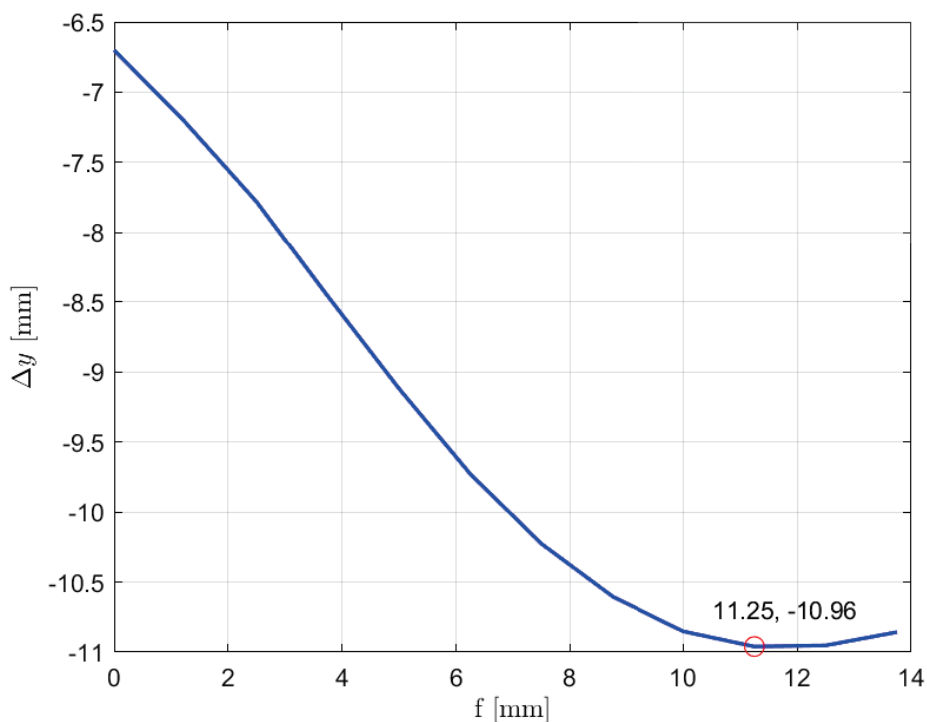
Obrázek 3.7: Graf závislosti ohybu Δy [mm] a Δz [mm] na změně parametru \mathbf{k} [mm], při $\mathbf{z} = -2$ mm

f [mm]	z [mm]
10	-2

Tabulka 3.4: Hodnoty nezávislých parametrů při optimalizaci parametru z

3.3.3 Optimalizace podle parametru f

V této optimalizaci probíhá variace hodnot parametru f (0 mm; 1,25 mm;...13.75 mm), počtu hodnot h ($h = 12$) odpovídá počet modelů ($F1;F2...F12$). Ostatní parametry jsou pro všechny modely F zvoleny podle tabulky 3.5. Z výstupu každého modelu byla vybrána hodnota ohybu Δy , podle obrázku 3.5. Jednotlivé modely jsou pak reprezentovány dvěma hodnotami ($f, \Delta y$). Na základě tohoto postupu bylo možné vynést závislost ohybu Δy na parametru f (obrázek 3.8) a určit model $F10$ s optimální hodnotou parametru f ($f = 11,25$ mm) při maximálním ohybu Δy ($\Delta y = -10.96$).



Obrázek 3.8: Graf závislosti ohybu Δy na změně hodnoty parametru f [mm]

k [mm]	z [mm]
3,75	0

Tabulka 3.5: Hodnoty nezávislých parametrů při optimalizaci parametru f

3.4 Experimentální ověření optimalizace

Ověřením optimalizace je myšleno vytvoření a aktivace laboratorních modelů s parametry použitými v numerické studii a následným srovnáním výsledků po aktivaci s výsledky optimalizace.

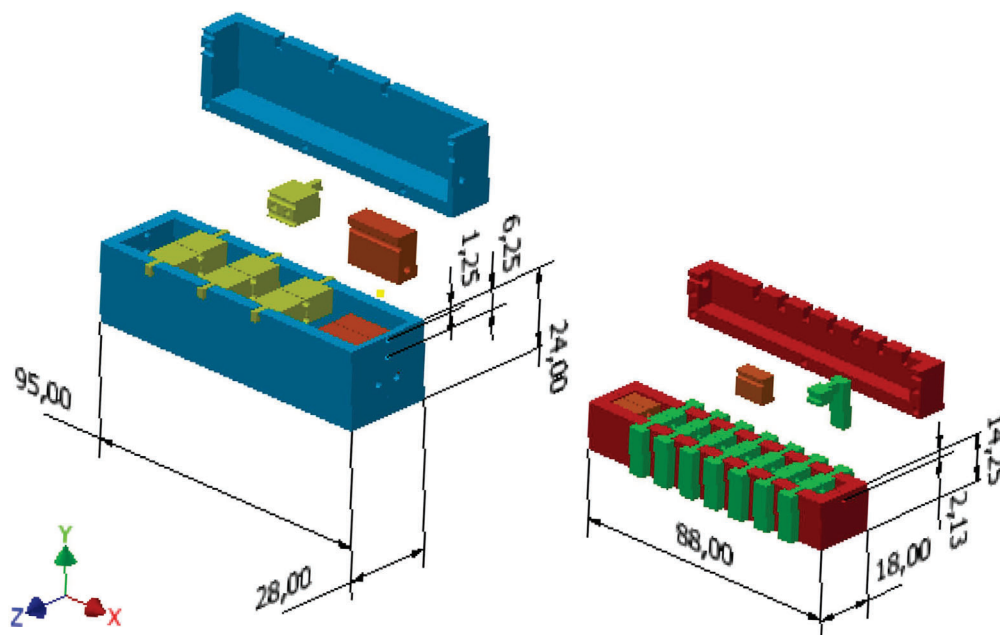
První ověření bylo provedeno pro výsledky optimalizace parametru k (sekce 3.3.1), vytvořením dvou modelů pro $k = 3,75$ mm ($K5$) a pro $k = 8,75$ mm ($K10$), ostatní parametry byly zvoleny podle tabulky 3.3 a tabulky 3.2. Tyto modely byly vybrány, aby se prokázal průběh grafu (obrázek 3.6), tedy že ohyb Δy pro ($K5$) by měl být větší než pro ($K10$).

3.4.1 Tvorba TCPA prstu

Před tvorbou finálních forem bylo za účelem hlubšího porozumění 3D tisku, odlévání silikonu a jeho vyjmutí z forem, vytvořeno několik prototypů (obrázek 3.12-i,ii). K odlévání byl použit silikon *ZA 13* smíchaný spolu s katalyzátorem v poměru 1:1 (obrázek 3.9). Navržení všech 3D modelů proběhlo v programu Autodesk Inventor Professional 2023 a jejich následný 3D tisk (PLA) byl proveden na 3D tiskárně Original Prusa i3 MK3. Použité TCPA vlákna byla jednovrstvá a pro přípravu bylo použito závaží o hmotnosti 450 g, potup přípravy je popsán v kapitole 2.2.1.



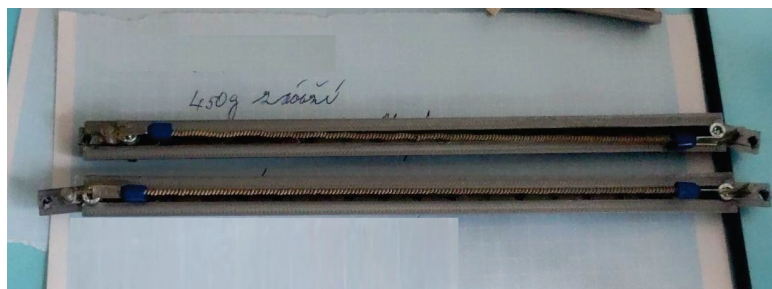
Obrázek 3.9: Láhve se silikonem a katalyzátorem, nástroje pro jejich smíchání



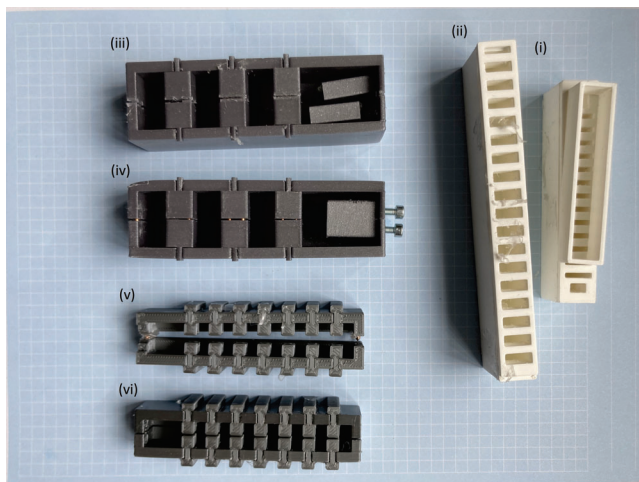
Obrázek 3.10: Kótované 3D modely forem [mm], vlevo pro *K5* a *K10*, vpravo pro *ZM*

Forma pro odlití musela být modulární především kvůli vloženým TCPA (obrázek 3.11) a následnému vyjmutí prstu z formy. Dále musela forma být z jedné strany prodloužená o prvek k vytvoření převisu materiálu pro jednostrannou fixaci prstu (obrázek 3.10 - oranžová část), stejně jak je tomu u modelů v numerické studii. Jako spojovací součásti byly použity šroubové spoje a nastříhané kolíky z měděného drátu $\varnothing 2$ mm.

Samotné odlití probíhalo ve dvou krocích, v prvním byla sestavena forma se zafixovaným TCPA pomocí drážek ve formě a předepínacího přípravku (obrázek 3.11), poté byl smíchaný silikon s katalyzátorem nalit do formy. V druhém kroku po ztuhnutí byl TCPA z přípravku uvolněn a následně byl prstu gripperu vyjmut z formy. V tomto stavu byl prst gripperu zbaven přebytečného silikonu, který vznikl jeho zatečením do mezer způsobených nepřesnostmi formy.



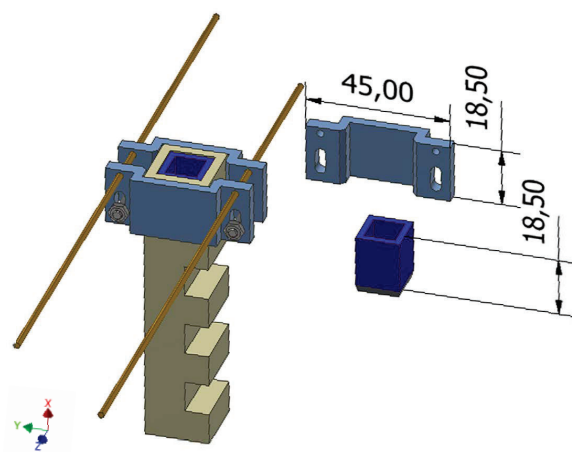
Obrázek 3.11: Předepnutá TCPA v přípravku



Obrázek 3.12: Foto všech forem (použitých i nepoužitých)

3.4.2 Testování

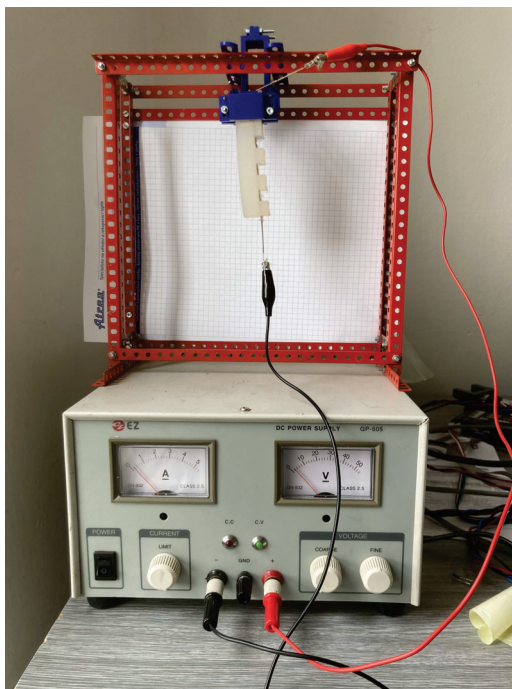
Před zahájením testování byla do převislého otvoru prstu gripperu vložena kvádrová dutá vložka, která byla následně zajištěna dvoudílnou objímkou (obrázek 3.13). Nakonec byl zajištěný prst gripperu připevněn na podstavec složený z dílů stavebnice Merkur (obrázek 3.14).



Obrázek 3.13: Kótovaný 3D model uchycení prstu gripperu [mm]

Test K5

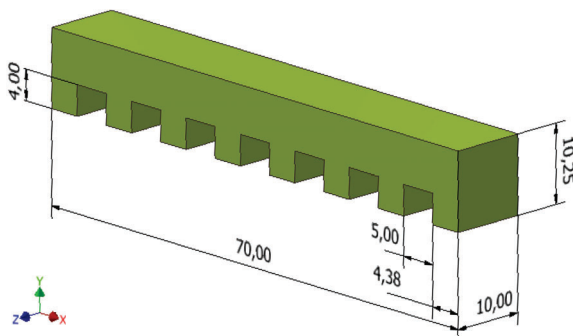
Konce TCPA byly za spony připojeny k laboratornímu zdroji (obrázek 3.11), proud byl nastaven na maximum a napětí bylo pozvolna navyšováno (po 0,5 V). Během navyšování došlo k částečné délkové kontrakci pouze u částí TCPA vystupující z prstu a vstupující do prstu. Při dalším navyšování došlo k přetavení TCPA (13 V). Pokus byl několikrát opakován se stejným výsledkem, ohybová deformace nebyla pozorována u žádného z pokusů.



Obrázek 3.14: TCPA gripper napájený laboratorním zdrojem

Test ZM

V reakci na výsledky z předchozích pokusů byl nezávisle na optimalizaci vytvořen zmenšený model *ZM* (obrázek 3.15). Tento model nevychází z numerické studie, jedná se pouze o snahu zmenšit všechny rozměry a to proto, aby se tak zmenšil odpor silikonového těla proti ohybu způsobeným TCPA.

Obrázek 3.15: Kótovaný model *ZM* [mm]

Po vyjmutí modelu *ZM* z formy (obrázek 3.10) došlo k jeho částečnému zkroucení (obrázek 3.16). I v tomto zkrouceném stavu byl model uchycen a testován stejně jako *K5*. A výsledky byly taky stejné, jako v případě *K5*, ohybová deformace se neprojevila.

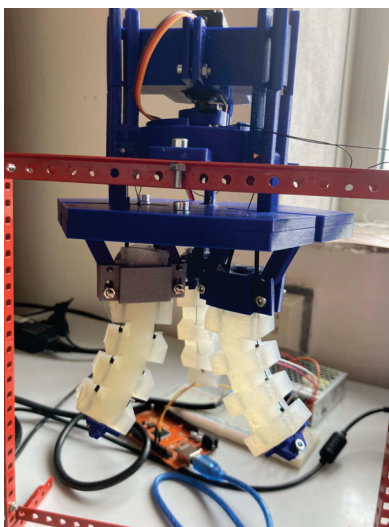
Obrázek 3.16: Snímek zkrouceného modelu *ZM* po vyjmutí z formy

3.4.3 Závěr testování

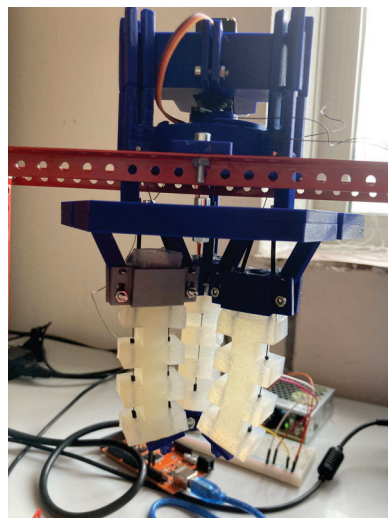
Na základě testu *K5* a testu *ZM* lze konstatovat, že takto zapuštěná TCPA do prstů grip-
peru nelze použít k jeho řízení. Důvodem se zdá být nepředejzatý stav, do kterého se TCPA
dostanou po odepnutí z přípravku a vyjmutí z formy. Nepomohla ani minimalizace rozměrů
(kapitola 3.4.2), která způsobila snížení torzní tuhosti silikonové části prstu. Důsledkem toho
došlo k částečnému zkroucení celého prstu (obrázek 3.16).

3.5 Laboratorní model

Protože se výše popisovaný návrh prstů gripperu, ovládaný zapuštěným TCPA, ukázal být
jako nevhodný, byl navržen gripper řízený pomocí stahování lanek (obrázek 3.17). Gripper
byl navržen jako tříprstý, poháněný jedním servomotorem MG996R. Řízení bylo realizováno v
prostředí Matlabu pomocí Arduino Mega 2560.



(a)

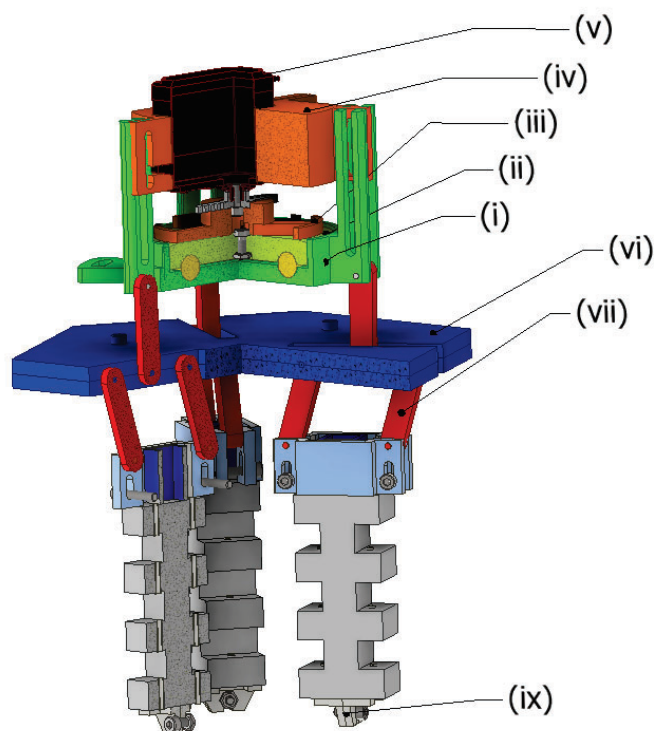


(b)

Obrázek 3.17: Snímek navrženého gripperu v rozevřeném 3.17a a sevřeném stavu 3.17b

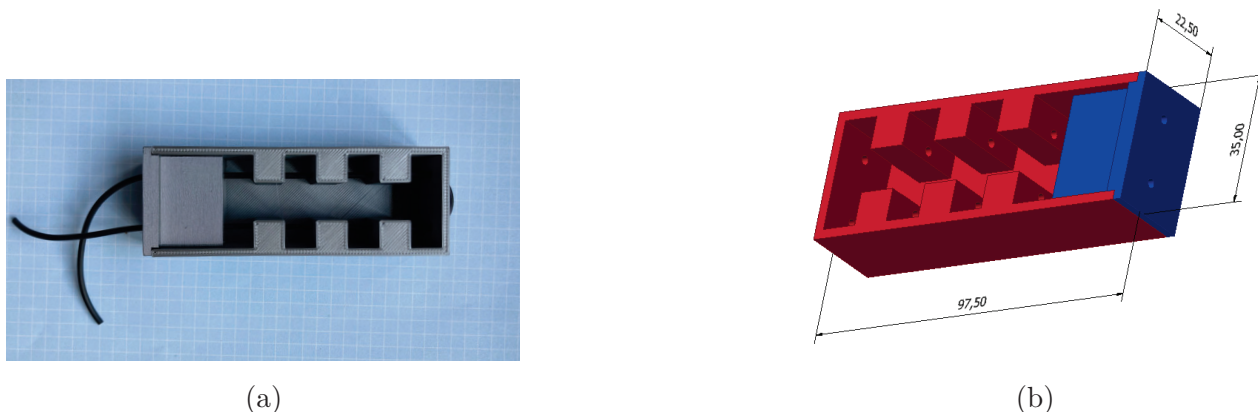
3.5.1 Popis návrhu

V této části jsou popsány jednotlivé komponenty gripperu a jejich funkce. Většina technologických postupů a zařízení použitých k návrhu a výrobě gripperu již byla zmíněna v kapitole 3.4, proto v této kapitole nejsou uvedeny vůbec, nebo jen okrajově.



Obrázek 3.18: Schématické označení komponent 3D modelu gripperu v 3/4 řezu, (i) stator, (ii) díl rotoru (1/2), (iii) díl rotoru (2/2), (iv) objímka servomotoru, (v) servomotor, (vi) základna, (vii) párová spojka, (viii) objímka prstu, (ix) dvoudílná spona

Profil prstu byl navržen tak aby bylo možné pomocí gripperu realizovat uchopení ve dvou krocích, roztažení prstů a poté jejich sevření (obrázek 3.17). K odlití byla použita dvoudílná forma (obrázek 3.19), která se ve skutečnosti skládá ještě z $\varnothing 1$ mm hadičky z PVC. Tato hadička byla po ztuhnutí silikonu z formy vytažena kvůli snadnější extrakci modelu z formy. Při sestavování gripperu byla však hadička rozstříhána na menší trubičky, které byly vsunuty zpět do vytvořených otvorů v silikonu. Důvodem bylo zmenšení tření při protahování lanka a zabránění poškození silikonových prstů gripperu (obrázek 4.1). Na konci každého prstu byla pro sevření protaženého lanka použita dvoudílná spona spojena šroubovým spojem (obrázek 3.18 (ix)). Zajištění druhého konce prstu je realizováno pomocí již použité vložky a objímky (obrázek 3.13).

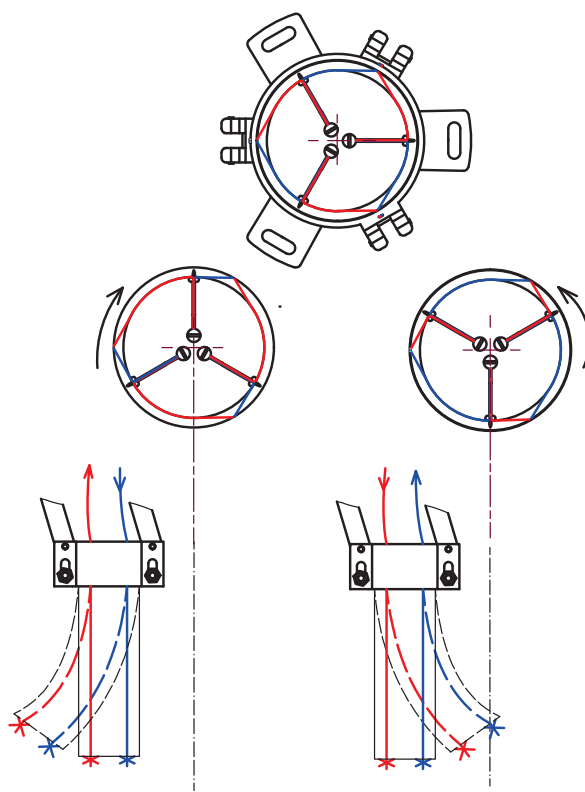


Obrázek 3.19: Forma prstu gripperu řízeného vlákny

Spojení všech tří prstů je realizováno pomocí základny (obrázek 3.18 (vi)). Tato základna je složena ze dvou dílů spojených 3 šroubovými spoji, základna obsahuje 3 drážky. V každé drážce jsou rotačně uloženy 3 párové spojky (obrázek 3.18 (vii)), dvě krajní slouží k uchycení prstu gripperu a prostřední slouží ke spojení se státorem.

Stator tohoto gripperu (obrázek 3.18 (i)) lze podle funkcí rozdělit na 4 části. První částí jsou 3 oka pro fixaci celého gripperu k nosné konstrukci. Druhá část jsou 3 otvory umístěné nad jednotlivými prsty gripperu sloužící pro vedení ovládacích lanek. Třetí část je drážka, která společně s kruhovou stěnou vytváří polovinu axiálního kuličkového ložiska. Čtvrtou část tvoří 3 vidlice pro nasunutí objímky servomotoru.

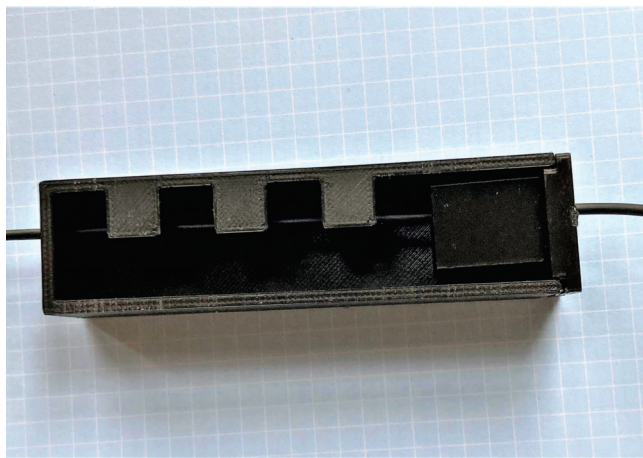
Druhou polovinu axiálního kuličkového ložiska tvoří jeden ze dvou dílů rotoru (obrázek 3.18 (ii)). Tento díl je volně vložený do statoru, slouží ke zkracování lanek v prstech gripperu a jejich druhé fixaci pomocí šroubových spojů. Podrobněji je princip tohoto dílu popsán na obrázku 3.20. Druhý díl rotoru (obrázek 3.18 (iii)) je pevně spojen s rotorem servomotoru uchyceného v objímce. Tento díl je tvořen přitlačnými prvky, které slouží jednak k přidržování lanek, ale také dohromady utváří tvarovou drážku. Díky této drážce dojde při nasunutí objímky se servomotorem (obrázek 3.18 (v),(iv)) do vidlic statoru, k zapadnutí prvního a druhého dílu statoru do sebe.



Obrázek 3.20: Schéma mechanismu aktivace lankem

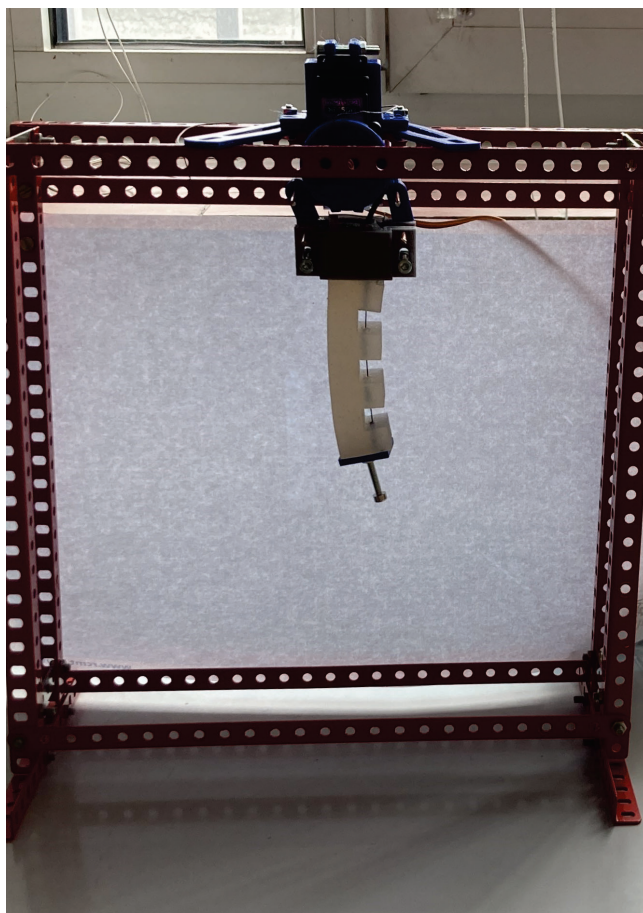
Návrh rotoru

Při návrhu rotoru tříprstého gripperu bylo nutné správně zvolit jeho poloměr (obrázek 3.20), parametr se zásadním vlivem na výsledné ovládání gripperu. Pro tyto účely byl využit prvotní návrh prstu gripperu, vycházející z modelu *K5*. Prst gripperu řízený lanky, s parametry modelu *K5*, byl odlit v dvoudílné formě (obrázek 3.21) s vsunutou hadičkou. Postup odlití je stejný jako u formy na obrázku 3.19 a je popsán v kapitole 3.5.1.



Obrázek 3.21: Forma prvotního návrhu

Byla sestavena aparatura (obrázek 3.22) pro ovládání ohybu jednoho prstu servomotorem MG996R s navijákem o poloměru $r = 30$ mm. Popis ostatních součástí aparatury není pro tuto práci podstatný, nebo již byl zmíněn.



Obrázek 3.22: Ovládání jednoho prstu

Servomotor byl nastaven do polohy 0 rad (rozsah je 0 až π rad), v této poloze byl prst zaaretován (bez ohybu). Po malých pootočeních byl prst ohýbán až do maximální polohy (0.3144π rad), ohyb prstu při dalším pootočení způsoboval protáčení navijáku nebo uvolňování lanek. Na základě tohoto pokusu bylo možné spočítat maximální kontrakci lanka Δl [mm] (3.2).

$$\begin{aligned}\Delta l &= 0,3144 \cdot \pi \cdot r \\ \Delta l &= 0,3144 \cdot \pi \cdot 30 \\ \Delta l &= 29,631 \text{ mm}\end{aligned}\tag{3.2}$$

Na základě znalosti geometrie návrhu rotoru (obrázek 3.20) bylo možné jednoduše dopočítat potřebné R [mm] (3.3), které bylo nakonec zvoleno $\mathbf{R} = 29$ mm.

$$\begin{aligned}\Delta l &= \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot R \\ R &= \frac{3 \cdot \Delta l}{\pi} \\ R &= 28,3 \text{ mm}\end{aligned}\tag{3.3}$$

Kapitola 4

Diskuze

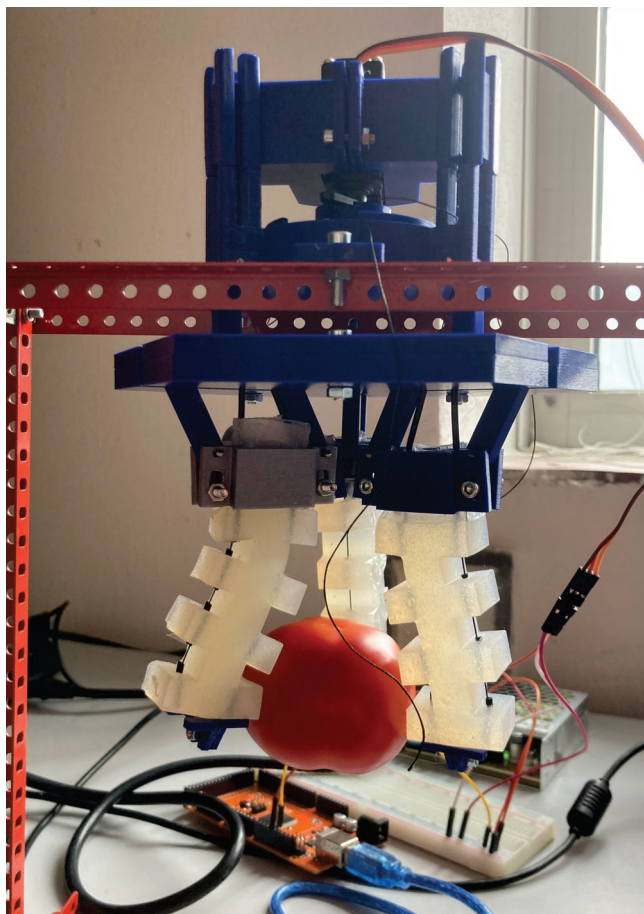
Cílem optimalizace bylo porovnat několik možných hodnot vybraných parametrů (\mathbf{k} a \mathbf{f}) obecného modelu (obrázek 3.5) a nalézt mezi nimi takové hodnoty, pro které bude daný model vykazovat největší průhyb Δy (tabulka 4.1). Nejdříve byla nalezena optimální hodnota parametru \mathbf{k} ($\mathbf{k} = 3,75$ mm) a poté parametru \mathbf{f} ($\mathbf{f} = 11,25$ mm). Záměrně je napsáno pořadí, jelikož by se mohlo stát, že při hledání nejprve optimálního parametru \mathbf{f} a poté \mathbf{k} vyjdou jejich optimální hodnoty jiné. Z optimalizace parametru \mathbf{z} (kapitola 3.3.2) lze usoudit, že poměrně nemalá nepřesnost v uložení TCPA do prstu navrženého tvaru (obrázek 3.5) se projeví minimálně.

Z výsledky testů *K5* a testů *ZM* (kapitola 3.4.2) vyplývá, že TCPA zapuštěná do silikonového prstu gripperu jsou k jeho řízení nevhodná. TCPA nebyla schopna ani v jednom z testů svou kontrakcí viditelně ohnout prst gripperu. Důvodem byl patrně nepředepjatý stav, do kterého se dostala po odepnutí z přípravku a vyjmutí z formy. Řešením by mohlo být zajištění předpětí TCPA prostřednictvím pružinek.

Jelikož se řízení prstů gripperu pomocí zapuštěných TCPA ukázalo být jako nevhodné řešení, byl navržen gripper řízený stahováním lanek. Toto řešení bylo zvoleno z důvodu podobnosti s řízením pomocí TCPA. Navržený gripper je tříprstý a byl navržen tak, aby se dal řídit pomocí jednoho servomotoru. Gripper je funkční a je schopen uchopit a držet (bez poškození) uzrálé rajče (obrázek 4.1).

\mathbf{l}_0 [mm]	\mathbf{a} [mm]	\mathbf{b} [mm]	\mathbf{e} [mm]	\mathbf{n} [–]	\mathbf{c} [mm]	\mathbf{j} [mm]	\mathbf{k} [mm]	\mathbf{f} [mm]
70	20	20	0,5	4	10	10	3,75	11.25

Tabulka 4.1: Hodnoty parametrů optimálního modelu [mm]



Obrázek 4.1: Snímek gripperu držícího rajče ($m = 77,3 \text{ g}$)

Kapitola 5

Závěr

Na začátku byla provedena důkladná rešerše existující literatury a výzkumů týkajících se soft gripperů. Soft gripperů byly rozděleny do tří skupin podle použité technologie úchopu a pro každou skupinu byl uveden příklad, na kterém byla použitá technologie lépe vysvětlena. Tato fáze umožnila získat hlubší porozumění principům, konstrukci a aplikačním možnostem soft gripperů v různých oblastech.

Následně bylo provedeno seznámení se s tvorbou a modelováním umělých TCPA vláken. To bylo klíčové pro pochopení základních vlastností vláken a k jejich návrhu jakožto aktuátoru pro soft gripper.

Dále byl navržen jednoduchý tvar a rozměry jednoho prstu soft gripperu se zapuštěným TCPA. Pro získání lepších vlastností, byl navržený tvar popsán obecnými parametry a převeden do numerické studie. Poté byly vybrány dva parametry pro které byly v numerické studii získány jejich optimální hodnoty.

V další části byly provedeny praktické testy, za účelem potvrzení nebo vyvrácení výsledků z numerické studie. Testy ovšem ukázaly, že výše popsáný koncept, soft gripperu řízeného TCPA, není proveditelný. V důsledku toho byl poslední cíl této práce, tedy vytvoření laboratorního modelu soft gripperu řízeného vláknem, upraven. Úprava spočívala v aktuátoru vytvořeného soft gripperu, byl vytvořen soft gripper řízený stahováním lanek pomocí servomotoru.

Největším přínos této práce spočívá v získání nových poznatků o chování TCPA vláken. Z testů vyplynulo, že důvodem, žádné nebo slabé kontrakce TCPA, je jejich nepředepjatý stav, ve kterém jsou v prstech soft gripperu uložena. Řešením této překážky může spočívat v sofistikovanějším tvaru prstu v kombinaci s pružinkami pro zajištění předpětí v TCPA vláknech. Jelikož autor nenašel o aplikaci TCPA vláken v řízení soft gripperů žádné záznamy, může tato práce sloužit jako základní kámen pro další studie, experimenty při hledání takového řešení.

Literatura

- [1] Y. Furuya and H. Shimada, “Shape memory actuators for robotic applications,” *Materials Design*, vol. 12, no. 1, pp. 21–28, 1991.
- [2] L. C. C. M. Zaidi Shadab, Maselli Martina, “Actuation technologies for soft robot grippers and manipulators: A review,” *Current Robotics Reports*, pp. 355–369, oct 2021.
- [3] J. Shintake, B. Schubert, S. Rosset, H. Shea, and D. Floreano, “Variable stiffness actuator for soft robotics using dielectric elastomer and low-melting-point alloy,” in *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 1097–1102, Sep. 2015.
- [4] P. Glick, S. A. Suresh, D. Ruffatto, M. Cutkosky, M. T. Tolley, and A. Parness, “A soft robotic gripper with gecko-inspired adhesive,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 2, pp. 903–910, 2018.
- [5] V. Cacucciolo, J. Shintake, and H. Shea, “Delicate yet strong: Characterizing the electro-adhesion lifting force with a soft gripper,” in *2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, pp. 108–113, 2019.
- [6] M. Foumani, I. Gunawan, K. Smith-Miles, and M. Y. Ibrahim, “Notes on feasibility and optimality conditions of small-scale multifunction robotic cell scheduling problems with pickup restrictions,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 11, no. 3, pp. 821–829, 2015.
- [7] B. Siciliano, O. Khatib, and T. Kröger, *Springer handbook of robotics*, vol. 200. Springer, 2008.
- [8] M. Controzzi, C. Cipriani, and M. Carrozza, “The human hand as an inspiration for robot hand development,” 2014.
- [9] J. Shintake, V. Cacucciolo, D. Floreano, and H. Shea, “Soft robotic grippers,” *Advanced Materials*, vol. 30, no. 29, p. 1707035, 2018.
- [10] Y. Bar-Cohen, “Eap history, current status, and infrastructure,” *Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles*, pp. 3–44, 2001.

- [11] A. Hradil, *Návrh mikroaktuátoru s využitím SMART materiálů*. PhD thesis, Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství., 2011.
- [12] J. M. Jani, M. Leary, A. Subic, and M. A. Gibson, “A review of shape memory alloy research, applications and opportunities,” *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 56, pp. 1078–1113, 2014.
- [13] M. Odstreil and T. Odstreil, “Slitiny s tvarovou pametí,”
- [14] J. Mohd Jani, M. Leary, A. Subic, and M. A. Gibson, “A review of shape memory alloy research, applications and opportunities,” *Materials Design (1980-2015)*, vol. 56, pp. 1078–1113, 2014.
- [15] R. Shankar, T. K. Ghosh, and R. J. Spontak, “Dielectric elastomers as next-generation polymeric actuators,” *Soft matter*, vol. 3, no. 9, pp. 1116–1129, 2007.
- [16] F. Morra, R. Molino, and F. Cepolina, “Miniature gripping device,” in *Proc. Int. Conf. Intell. Manipulation Grasping*, pp. 363–368, 2004.
- [17] H. Shi, K. Tan, B. Zhang, and W. Liu, “Review on research progress of hydraulic powered soft actuators,” *Energies*, vol. 15, no. 23, 2022.
- [18] B. Mosadegh, P. Polygerinos, C. Keplinger, S. Wennstedt, R. F. Shepherd, U. Gupta, J. Shim, K. Bertoldi, C. J. Walsh, and G. M. Whitesides, “Pneumatic networks for soft robotics that actuate rapidly,” *Advanced functional materials*, vol. 24, no. 15, pp. 2163–2170, 2014.
- [19] H. Wang, R. Zhang, W. Chen, X. Wang, and R. Pfeifer, “A cable-driven soft robot surgical system for cardiothoracic endoscopic surgery: preclinical tests in animals,” *Surgical endoscopy*, vol. 31, pp. 3152–3158, 2017.
- [20] M. Yalcintas and H. Dai, “Magnetorheological and electrorheological materials in adaptive structures and their performance comparison,” *Smart Materials and Structures*, vol. 8, p. 560, oct 1999.
- [21] S. J. Marshall, S. C. Bayne, R. Baier, A. P. Tomsia, and G. W. Marshall, “A review of adhesion science,” *Dental Materials*, vol. 26, no. 2, pp. e11–e16, 2010.
- [22] M. R. Cutkosky, “Climbing with adhesion: from bioinspiration to biounderstanding,” *Interface Focus*, vol. 5, no. 4, p. 20150015, 2015.
- [23] K. Autumn, M. Sitti, Y. A. Liang, A. M. Peattie, W. R. Hansen, S. Sponberg, T. W. Kenny, R. Fearing, J. N. Israelachvili, and R. J. Full, “Evidence for van der waals adhesion in gecko

- setae,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 99, no. 19, pp. 12252–12256, 2002.
- [24] K. Autumn, A. Dittmore, D. Santos, M. Spenko, and M. Cutkosky, “Frictional adhesion: a new angle on gecko attachment,” *Journal of Experimental Biology*, vol. 209, no. 18, pp. 3569–3579, 2006.
- [25] H. Prahlad, R. Pelrine, S. Stanford, J. Marlow, and R. Kornbluh, “Electroadhesive robots—wall climbing robots enabled by a novel, robust, and electrically controllable adhesion technology,” in *2008 IEEE international conference on robotics and automation*, pp. 3028–3033, IEEE, 2008.
- [26] G. J. Monkman, “An analysis of astrictive prehension,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 16, no. 1, pp. 1–10, 1997.
- [27] Y. Almubarak and Y. Tadesse, “Twisted and coiled polymer (tcp) muscles embedded in silicone elastomer for use in soft robot,” *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, vol. 1, pp. 352–368, 2017.
- [28] L. Saharan and Y. Tadesse, “Robotic hand with locking mechanism using tcp muscles for applications in prosthetic hand and humanoids,” in *Bioinspiration, Biomimetics, and Bioreplication 2016*, vol. 9797, pp. 178–186, Spie, 2016.
- [29] L. Wu, M. J. de Andrade, L. K. Saharan, R. S. Rome, R. H. Baughman, and Y. Tadesse, “Compact and low-cost humanoid hand powered by nylon artificial muscles,” *Bioinspiration & biomimetics*, vol. 12, no. 2, p. 026004, 2017.
- [30] L. Wu, M. J. de Andrade, R. S. Rome, C. Haines, M. D. Lima, R. H. Baughman, and Y. Tadesse, “Nylon-muscle-actuated robotic finger,” in *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2015*, vol. 9431, pp. 154–165, SPIE, 2015.
- [31] C. S. Haines, M. D. Lima, N. Li, G. M. Spinks, J. Foroughi, J. D. Madden, S. H. Kim, S. Fang, M. Jung de Andrade, F. Göktepe, *et al.*, “Artificial muscles from fishing line and sewing thread,” *science*, vol. 343, no. 6173, pp. 868–872, 2014.
- [32] A. Khennane, *Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB and Abaqus*. CRC Press, 2013.