



Bakalářská práce

SOFT chapadla pro nestrojírenské aplikace

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Autor práce:

Martin Mařík

Vedoucí práce:

doc. Ing. Marcel Horák, Ph.D.

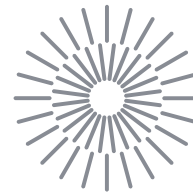
Katedra sklářských strojů a robotiky

Konzultant práce:

Ing. Michal Starý, Ph.D.

Katedra sklářských strojů a robotiky

Liberec 2023



Zadání bakalářské práce

SOFT chapadla pro nestrojírenské aplikace

<i>Jméno a příjmení:</i>	Martin Mařík
<i>Osobní číslo:</i>	S20000300
<i>Studijní program:</i>	B0715A270008 Strojírenství
<i>Zadávající katedra:</i>	Katedra sklářských strojů a robotiky
<i>Akademický rok:</i>	2021/2022

Zásady pro vypracování:

Soft robotika a zejména Soft chapadla jsou současným trendem vývoje robotiky. Měkké šetrné uchopení vyžaduje široká škála aplikací, nejen ve strojírenství, ale zejména v nestrojírenských oborech, v potravinářství, spotřebním průmyslu, zdravotně rehabilitačních aplikacích atd. Nová řešení jsou založena na využívání nových kompozitních a elastomerových materiálů a generování jejich funkcionalit prostřednictvím pokročilých technologií jejich zpracování. Cílem práce bude provést rešerši problematiky, vyhodnotit jeden z perspektivních směrů a v jeho rámci navrhnout nové koncepční řešení chapadla, resp. úchopného prvku.

Úkolem Vaší BP bude:

1. Provést rešerši současného stavu v oblasti tzv. Soft chapadel.
2. Ve variantách navrhnout princip řešení chapadla, resp. úchopného prvku.
3. Pro vybraný princip zpracovat formou 3D modelu konstrukční řešení s podporou počítačového modelování.
4. Vytvořit funkční vzorek, experimentálně zhodnotit funkční vlastnosti a přínosy navrženého řešení.

Rozsah grafických prací: výkresová dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: 30 – 40 stran textu
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština

Seznam odborné literatury:

1. Novotný, F., Horák, M. Efektory průmyslových robotů. TU v Liberci, 2015, 116 s., ISBN 978-80-7494-195-5.
2. Úvod do pneumatiky. Učebnice FESTO Didactic, Praha 1994, 197 s.
3. SHINTAKE, Jun, Vito CACUCCILO, Dario FLOREANO a Herbert SHEA. Soft Robotic Grippers. *Advanced Materials*. 2018, **30**(29). ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201707035.
4. HUGHES, Josie, Utku CULHA, Fabio GIARDINA, Fabian GUENTHER, Andre ROSENDO a Fumiya IIDA. Soft Manipulators and Grippers: A Review. *Frontiers in Robotics and AI*. 2016, **3**. ISSN 2296-9144. Dostupné z: doi:10.3389/frobt.2016.00069.
5. WANG, Zhongkui, Mingzhu ZHU, Sadao KAWAMURA a Shinichi HIRAI. Comparison of different soft grippers for lunch box packaging. *Robotics and Biomimetics*. 2017, **4**(1). ISSN 2197-3768. Dostupné z: doi:10.1186/s40638-017-0067-1

Vedoucí práce: doc. Ing. Marcel Horák, Ph.D.
Katedra sklářských strojů a robotiky

Konzultant práce: Ing. Michal Starý, Ph.D.
Katedra sklářských strojů a robotiky

Datum zadání práce: 22. listopadu 2021

Předpokládaný termín odevzdání: 22. května 2023

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

doc. Ing. Vlastimil Hotař, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 22. listopadu 2021

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Soft chapadlo pro nestrojírenské aplikace

Anotace

Práce je zaměřena na chapadla s měkkým úchopem, která jsou použita při manipulaci s křehkými nebo tvarově nestálými předměty. Teoretická část se zaměřuje na nejrozšířenější Soft chapadla v různých odvětvích průmyslu. Na jejich konstrukci, použití a budoucí projekty. V druhé části práce jsou uvedeny principy řešení chapadla. V praktické části je jeden z navrhovaných principů vybrán ke zpracování pomocí počítačového modelování. Následně je chapadlo vytvořeno a jsou otestovány funkční vlastnosti.

Klíčová slova

Soft chapadlo, efektor, flexibilita úchopu, šetrné uchopení, manipulace, aktivní a pasivní chapadla, kuličkové chapadlo

Soft gripper for non-engineering applications

Annotation

The thesis is focused on grippers with a Soft grip, which are used when handling fragile or unstable objects. The theoretical part focuses on the most used Soft grippers in various industry sectors. On their construction, use in practice and future projects. The second part of the thesis contains the principles of the grippers solution. In the practical part, one of the proposed principles is selected for processing using computer modeling. Subsequently, one finger of the gripper is created and the functional properties are tested.

Keywords

Soft gripper, effector, grip flexibility, gentle grip, handling, active and passive grippers, ball gripper

Poděkování

Především bych rád poděkoval svému vedoucímu práce doc. Ing. Marcelu Horákovi, Ph.D. za jeho vedení, rady a připomínky, ale především za jeho zkušenosti a čas.

Chtěl bych také poděkovat své rodině, a hlavně mým rodičům, kteří mě motivovali a podporovali po celou dobu mého studia. Dále zaslouží poděkování má přítelkyně Lucie Němečková za její trpělivost a víru ve mě. Dodala mi odhodlání v těžkých situacích studia a pomohla mi je zvládnout. V neposlední řadě děkuji svým přátelům, za jejich sdílené zkušenosti z praxe či z dob jejich studia.

Všem těmto lidem děkuji za jejich přístup a podporu v mém snažení.

Obsah

Úvod	11
1 Základní pojmy.....	12
2 Popis vybraných zástupců aktivních a pasivních chapadel	12
2.1 Aktivní chapadla.....	15
2.1.1 Měkká fluidní chapadla	15
2.1.2 Chapadla využívající změnu tuhosti struktury chapadla	17
2.2 Pasivní chapadla	20
a) Pasivní chapadlo Fin-Ray.....	20
b) Měkké chapadlo ovládané pomocí šlach.....	21
2.3. Funkční vlastnosti Soft chapadel.....	25
3 Praktická část.....	27
3.1 Popis variant principů řešení chapadla	33
3.1.1 Chapadlo s horizontálním pohonem.....	34
3.1.2 Chapadlo s vertikálním pohonem.....	35
3.1.3 Chapadlo s kyvným pohonem	36
3.1.4 Oblasti využití	37
3.2 Výběrová analýza	38
3.3 Chapadlo s vertikálním pohonem	38
4 Návrh konstrukce vlastního funkčního vzorku.....	44
4.1 Části vlastního KSCH.....	44
4.2 Funkčnost zvoleného mechanismu.....	46
4.3 Měření.....	47
4.3.1 Měření síly úchopu ÚP	47
4.3.2 Měření úhlu natočení konce ÚP	49

4.4 Výsledky.....	48
4.4.1 Naměřené hodnoty síly úchopu ÚP	48
4.4.2 Naměřené hodnoty úhlu natočení konce ÚP	49
4.4.3 Grafické znázornění výsledků	50
4.4.4 Grafické znázornění úhlu natočení konce ÚP	51
Závěr.....	52
Seznam použité literatury	54
Seznam obrázků.....	56
Seznam grafů	58
Seznam tabulek.....	58
Seznam příloh.....	58

Seznam vybraných zkratek a symbolů

BP		bakalářská práce
FEA		měkká fluidní chapadla - Fluid Elastomer Actuators
KSCH		kuličkové soft chapadlo
ÚP		úchopový prvek
a_x	$[m.s^{-2}]$	zrychlení ve směru osy x
a_y	$[m.s^{-2}]$	zrychlení ve směru osy y
a_z	$[m.s^{-2}]$	zrychlení ve směru osy z
C	[m]	integrační konstanta
d	[m]	průměr pístu pneumotoru
dl_L	[m]	diferenciál změny délky lanka
$d\varphi$	[°]	diferenciál změny úhlu natočení konce ÚP
e	[m]	excentricita
F	[N]	síla v lanku
F_u	[N]	úchopová síla
F_x	[N]	síla ve směru osy x
F_y	[N]	síla ve směru osy y
F_z	[N]	síla ve směru osy z
g	$[m.s^{-2}]$	tíhové zrychlení
k	[1]	bezpečnost
l	[m]	výchozí délka ÚP
l_L	[m]	délka lanka
l_o	[m]	délka osy sloupce kuliček
M	[Nm]	ohybový moment
m	[kg]	hmotnost
p	[Pa]	tlak stlačeného vzduchu
R	[m]	poloměr křivosti osy sloupce kuliček
r	[m]	poloměr křivosti zdeformovaného lanka
S	$[m^2]$	funkční plocha pístu pneumotoru
Δl_L	[m]	změna délky lanka
φ	[°]	úhel natočení konce ÚP

Úvod

Bakalářská práce (BP) je zaměřena na oblast robotiky zejména na problematiku Soft chapadel, která patří do skupiny úchopových hlavic. Za ideální Soft chapadlo je považována lidská ruka. Cílem vývoje Soft chapadel je napodobení nebo přiblížení úchopu předmětů způsobem lidské ruky. Chapadla umožňují přesnou manipulaci s různými předměty rozličných tvarů a materiálů. Jsou základním předpokladem pro rychlejší rozvoj automatizace v průmyslovém odvětví, ale také v lékařství, kosmetickém průmyslu, laboratorním výzkumu atd. Díky novým typům chapadel se stále rozšiřuje jejich aplikační potenciál, což umožňuje realizovat automatickou manipulaci s relativně širokým spektrem objektů.

Toto téma je v současnosti a blízké budoucnosti velmi aktuální, neboť lidská populace stárne a pracovních sil na trhu práce bude ubývat. Lze využít robotizace nejen v průmyslu výrobním, kde s kombinací vysokého výkonu a jednostranného zatížení roste riziko trvalého poškození lidského zdraví, ale i v jiných segmentech výroby a v dalších hospodářských oblastech.

Otázka Soft chapadel prošla dynamickým vývojem, kterému napomohl vývoj nových materiálů, a to především plastů. Rozšířením umělé inteligence, jako náhrady za lidskou práci, bude jednou z nutných podmínek provedení úchopu předmětů robotickým ramenem vybaveným Soft chapadlem, které bude minimálně srovnatelné s úchopem lidské ruky.

Pozornost BP je věnována kuličkovému Soft chapadlu (KSCH). Návrh konstrukce napodobuje simulaci úchopu prstů lidské ruky. Práce se zabývá třemi provedeními konstrukčních návrhů KSCH a výrobou jednoho vzorku KSCH, na kterém byly ověřeny funkční vlastnosti chapadla pro využití v různých segmentech průmyslu.

Funkční ověření KSCH bylo provedeno na několika předmětech rozličných tvarů, povrchů, hmotnosti a struktury.

1 Základní pojmy

Efektor je koncový člen průmyslového robotu, který s jeho pomocí může komunikovat s okolím. Jeho vlastnosti závisí na druhu vykonávané činnosti.[1]

Chapadlo neboli úchopová hlavice je skupina efektorů sloužících k uchopení objektů před následnou manipulací prostřednictvím průmyslového robota.[1]

Úchopný prvek je součástí chapadla. Je v přímém kontaktu s manipulačním předmětem. Dává chapadlu možnost uchopovat předměty.

Průmyslový robot je automaticky řízený, re-programovatelný, víceúčelový manipulátor. Jeho využití závisí na pohybovém mechanismu a druhu efektoru umístěném na konci ramena.

Univerzálnost úchopu je vlastnost, kterou disponuje Soft chapadlo, a tím může uchopovat předměty odlišných tvarů.

Tvarová stálost, tj. schopnost předmětu uchovávat si svůj tvar i po dobu působení vnějších silových účinků.

2 Popis vybraných zástupců aktivních a pasivních chapadel

V dnešní době, ve které je trendem automatizace pracovních provozů, tudíž nahrazování lidské pracovní síly roboty, které jsou schopny odvést podstatně větší výkon na pracovišti a tím zefektivnit pracovní proces. Největšího přínosu robotiky se dosahuje v oblasti sériové výroby. Nahrazení lidské pracovní síly robotem na pracovišti s monotónními úkony a jednostranným zatížením pohybového aparátu, eliminuje výskyt nemocí z povolání.

Ramena pracovního robota je na jejím konci vybavena efektozem obsahující chapadlo manipulující s předměty. Jsou ale takové pracovní pozice, kde je vyžadováno manipulovat například s měkkým ovocem, u kterého nechce mít zákazník v obchodě vtlačené otisky od příliš tvrdého stisku uchopovacího prvku chapadla. Proto u těchto typů aplikací, aby se vyplatila jejich automatizace, je nutností použít chapadlo, které bude dostatečně flexibilní k různorodosti tvaru předmětu a konstrukce, obratný v malých prostorech a jemný k měkkému nebo křehkému povrchu zboží. Použijeme tzv. měkké chapadlo z anglického Soft gripper.

Během posledních let došlo k rozvoji těchto chapadel, kterému napomohl vývoj nových materiálů, a to především plastů. Lidská ruka je považována za ideální úchopové měkké zařízení. Proto je cílem rozvoje přiblížit vlastnosti robotického chapadla co nejvíce vlastnostem lidské ruky především citlivosti a flexibilitě úchopu.

Problematická je rozměrová nestálost předmětů určených k manipulaci. Například, kdo zaručí, že budou všechna vajíčka stejného rozměru a chapadlo pak bude schopno je ukládat do zásobníků? Chapadlo z tvrdého materiálu, které by se nedokázalo přizpůsobit rozměrovým změnám, by nebylo schopno uchopit vajíčka s různým tvarem a velikostmi. Mnoho vajíček s větším rozměrem by při stisku tvrdého chapadla praskla a malá vajíčka by se nepovedlo bezpečně uchopit.

Pozornost BP je soustředěna na technologie uchopení, které mají v budoucnu potenciál se přiblížit vlastnostem lidské ruky. Z tohoto důvodu je zkoumání BP zaměřeno na „měkká chapadla“.

Měkká chapadla lze rozdělit podle způsobu, jakým je uchopení realizováno. Chapadla, která potřebují k udržení úchopu předmětu ovládací médium (tlakový vzduch, vakuum el. proud), řadíme do skupiny aktivních chapadel. Chapadla, která se bez ovládacích médií obejdou, řadíme do skupiny pasivních chapadel. Pasivní chapadla nepotřebují přívod ovládacího média k udržení úchopu předmětu. Ovládací médium se využívá jen k polohování ÚP. Úchop je zajištěn využitím deformační energie, která je vnesena do ÚP.[1]

Aktivní chapadla – potřebují energii pro všechny tři fáze.

Pasivní chapadla – potřebují energii jen při polohování ÚP, tj. při fázi první a třetí. Pro udržení stisku ÚP není potřeba již žádná energie.

Následující text se zabývá těmito druhy uchopení:

1. Aktivní chapadla

- a. Měkká fluidní
- b. Využívající změnu tuhosti struktury použitého materiálu

2. Pasivní chapadla

- a. Fin-Ray
- b. Ovládání pomocí šlach

Proces použití chapadel lze rozdělit do několika fází.

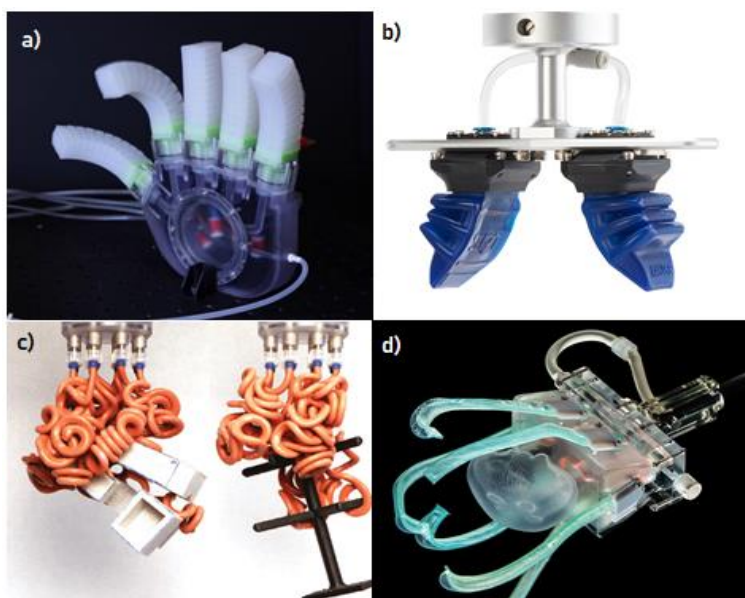
1. Přiblížení – ÚP je otevřený a robotickým systémem je přiblížen k předmětu.
2. Uchopení předmětu – ÚP je v činnosti a jeho povrch se dotýká povrchu předmětu.
3. Stabilizace uchopení – působením uchopovací síly je dosažena stabilita úchopu předmětu. Uchopovací síla se nemění, pokud je předmět v ÚP nehybný.
4. Zabezpečení předmětu – ÚP je nastaven tak, aby mohl bezpečně s předmětem manipulovat, a aby nedošlo ke změně pozice anebo uvolnění z ÚP.
5. Manipulace – přemístění předmětu z bodu A do bodu B. Pohyb předmětu je sledován řídicím systémem, který zajistí uložení předmětu na danou pozici.[2]

2.1 Aktivní chapadla

2.1.1 Měkká fluidní chapadla

Měkká fluidní chapadla – FEA (z anglického jazyka Fluid Elastomer Actuators) patří k nejstarším, ale stále k nejrozšířenějším měkkým chapadlům díky řadě výhod, včetně snadné výroby, robustnosti a levných elastomerových materiálů. Aktivace je dosažena nárůstem tlaku tekutiny v dutině ÚP chapadla, které jsou vyrobeny z vysoce deformovatelných materiálů. Zpravidla asymetrickou geometrií nebo z anizotropního materiálu, aby při přivedení tlakového vzduchu do komory ÚP docházelo k jeho ohybu. Mohou generovat velké síly, které jsou úměrné tlaku tekutiny a ploše, na kterou působí tlak v komoře ÚP. Například při tlaku tekutiny 300 kPa byly naměřeny síly dosahující meze 80 N.[1] Fluidní chapadla mohou dosahovat velkých zdvihů. Jsou omezeny pevností a koeficientem bezpečnosti porušením materiálu, ze kterého jsou ÚP vyrobeny. Ohyby chapadel mohou dosahovat úhlů kolem 300° za reakční dobu 0,05–1 s. Reakční doba je závislá na charakteristice tlaku, průtoku čerpadla nebo kompresoru a také na vnitřním objemu komory.[3, 4]

Existuje mnoho způsobů, jak zkonstruovat měkké fluidní chapadlo. Mezi nejběžnější patří: Podlouhlé elastomerové komory s přidavkem vrstev s výstužnými vlákny (obr. 1 a), měchovitě struktury a trubkovité struktury.

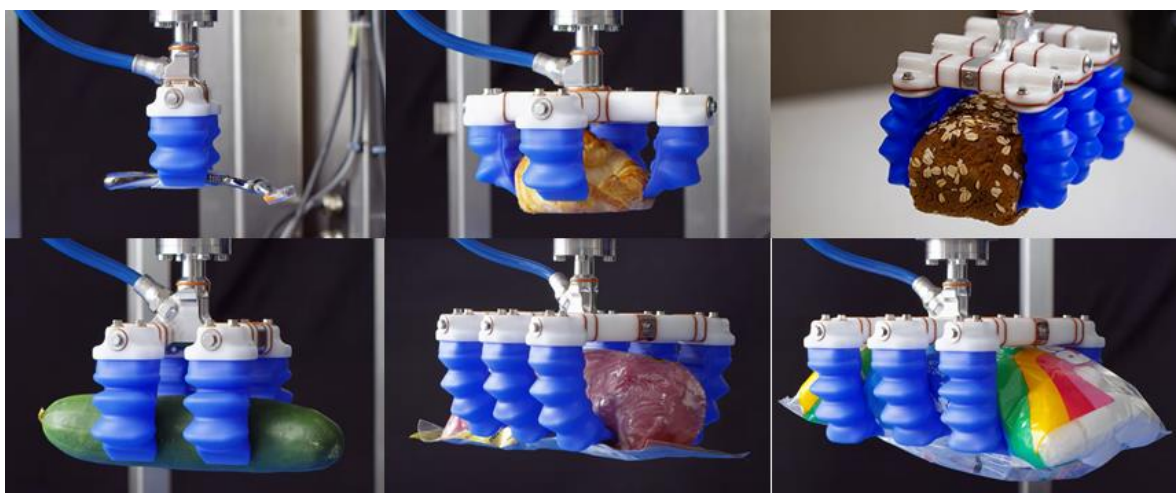


Obr. 1 Fluidní Soft chapadla

- a) Imitace lidské ruky, jejíž prsty tvoří Soft chapadlo; b) Fluidní chapadlo měchovité struktury[2]; c) měkké úchopové zařízení mající uchopovací prsty trubkovité struktury[3]; d) úchopové zařízení kombinující technologie znázornění

Výroba měkkých fluidních chapadel využívá kapalné formy materiálu při vstřikolísovacím procesu. Kapalná fáze elastomeru umožňuje zabudování funkčních prvků do struktury, jako jsou vlákna, vrstvy s vyšší tuhostí, a dokonce i snímače deformace.

Chapadlo si dokáže poradit s tvarovou proměnlivostí předmětů, proto je jeho využití velice široké. Příklad o použití chapadla pochází také z potravinářského průmyslu. Chapadlo si musí poradit s uchopením nepravidelně uskladněného pečiva, které je buď v přeprávkách, nebo různých přihrádkách, ale i v samostatných taškách. Pro běžná tvrdá robotická chapadla by byla adaptace pro tuto činnost velice náročná. Často obsahují objemné součásti vyčnívající bočně z těla robotické paže, což by stěžovalo navigaci ve stísněných pracovních prostorech. Z toho důvodu řeší daný problém použití Soft chapadla pro svoji jednoduchou konstrukci, která nemá problémy s pohybem a uchopením předmětu v tomto pracovním prostředí. Další výhodou pro použití měkkého chapadla je zvládnutí manipulace s relativně choulostivými potravinami, jako jsou například rohlíky, koblihy, donuty, chléb atd. Některé potraviny mohou mít navíc na sobě polevu nebo ozdobné sypaní a hrubou manipulací by se mohlo poškodit. Měkké provedení chapadla, které se přizpůsobí potravině, eliminuje vznik škod.[5]



Obr. 2 Příklad aplikací měkkého fluidního chapadla[6, 7]

Technologie měkkých chapadel našla značné využití v průmyslu. Proto je na špici rozvoje využívající nové materiály, konstrukce mechanismu a řídicích prvků. Většina stávajících aplikací chapadel je určena pro zacházení pouze s několika centimetrovými předměty. Potenciál pro rozšíření této technologie spočívá v rozdělení manipulace s objekty různých velikostí a vlastností.

Do budoucna je výzvou pro FEA zakomponování externích čerpadel nebo kompresorů, které slouží k výrobě stlačeného média potřebného k ovládní ÚP chapadla. Takové části zařízení jsou často objemné, těžké a mohou být příčinou komplikací s manipulací celého zařízení. Další potenciál pro vylepšení je ve zkrácení doby odezvy chapadla. Zatím je obtížné dosáhnout u FEA chapadel vyšší frekvence než 1 Hz při plné aktivaci chapadla. Proto je vývoj v této oblasti zaměřen na zlepšení ovladatelnosti ÚP chapadla, snížení hmotnosti a setrvačných sil, zjemnění úchopu a zrychlení manipulace s předměty. To vše má vliv na efektivitu výrobních procesů.[3]

2.1.2 Chapadla využívající změnu tuhosti struktury chapadla

Chapadla založená na materiálech a strukturách s proměnlivou tuhostí používají odlišný mechanismus úchopu než dříve zmíněná chapadla. Obecná metoda spočívá v nastavení struktury chapadla do její „měkké“ konfigurace, přiblížení a obalení předmětu, který má být uchopován, a nakonec vyztužení struktury, aby ji udržela v sevření. Tato metoda může vést k vysokým přídržným silám s minimální kompresí aplikovanou na předmět. Do této kategorie lze zahrnout technologie měkkých chapadel využívající vakuový polštář naplněný granulovaným materiálem, slitiny s nízkou teplotou tání nebo materiály s tvarovou pamětí.[3]

Chapadla s vakuovým polštářem

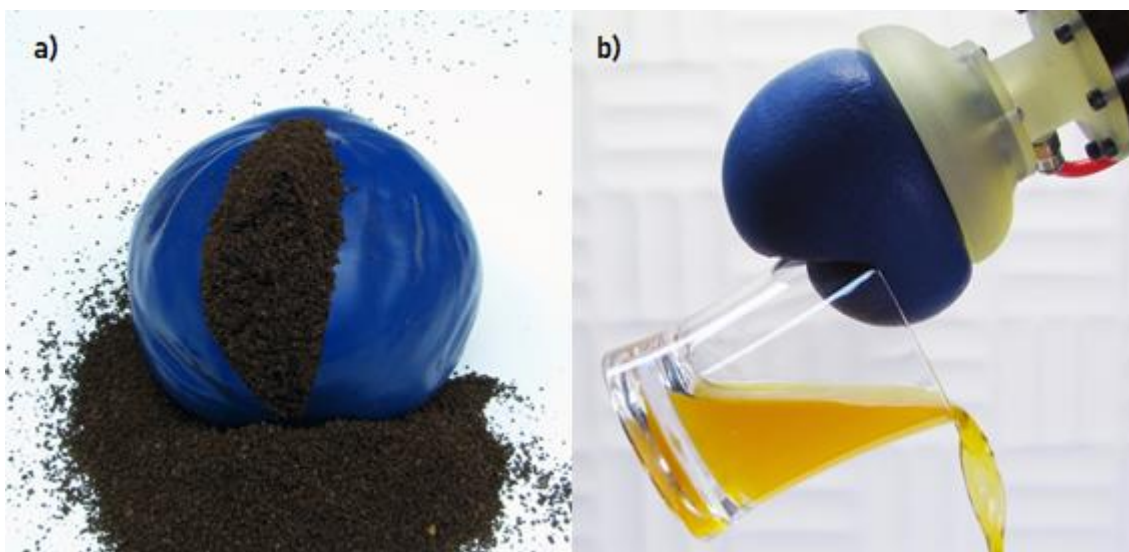
Pro přiblížení principu je využito chapadlo s vakuovým polštářem.

Mechanismus daného chapadla se nazývá granulární přechod. Jev lze spatřit například u vakuově uzavřeného balení mleté kávy, které je tvrdé, ale po otevření změkne. Změna tuhosti je důsledkem změny tlaku mezi granulemi. Vytvořením podtlaku v sáčku s granulátem začne na sáček z vnější strany působit atmosférický tlak, který se snaží sáček stlačit i s jeho obsahem. To vyvolá silové účinky mezi granulemi, zamezí jejich vzájemnému pohybu a způsobí, že se celý sáček chová jako jeden celek. Otevřením sáčku dojde k vyrovnání tlaku a vzájemné silové účinky mezi granulemi vymizí. Granulát v sáčku se začne chovat jako tekutina.[3]

Mletá káva je nejrozšířenějším typem granulátu pro jeho jemnou zrnitost. Využívají se také skleněné, plastové, kovové kuličky a v některých případech i obilná zrna. Chapadla se vyznačují jednoduchou konstrukcí. Jsou složena pouze z granulátu a elastické

membrány tvořící povrch polštáře. Ten obaluje granulovaný materiál a uzavírá jej do prostoru, který je oddělen od okolního tlaku atmosféry.[3]

V raném vývoji, v roce 1988 byla prokázána tvarově adaptivní uchopovací schopnost. Vědec Reinmüller ukázal, že granulovaná chapadla představují do budoucna velký potenciál v oblasti měkké robotiky. Názorným příkladem je zařízení nazvané „univerzální měkké chapadlo“ („universal Soft gripper“) vyvinutý výzkumným týmem vynálezce Browna (viz obr. 3 b).



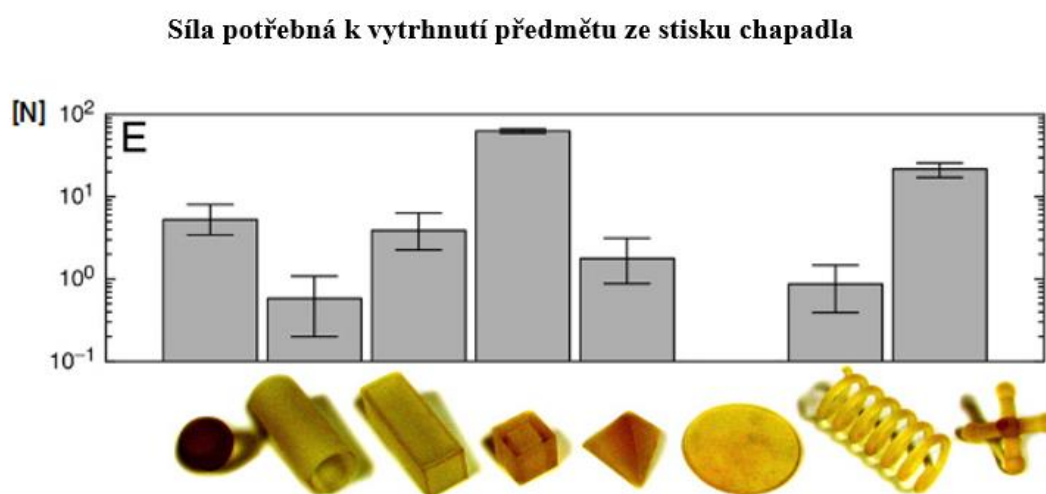
Obr. 3 Granulové chapadlo[8] –

a) Roztrhnutý sáček manipulátoru s granulátem z mleté kávy; b) Univerzální měkké chapadlo svírající sklenici

Uchopení a držení předmětů jsou klíčové úkoly pro robotické manipulátory. Vývoj univerzálních chapadel, schopných uchopit neznámé předměty různých tvarů a povrchových vlastností, zůstává náročný. Většina současných chapadel obsahuje více než jeden ÚP, a tak jsou kladeny vyšší nároky na hardwarové a softwarové komplikace. Patří mezi ně velký počet ovladatelných kloubů. Potřeba snímání síly, pokud se má s předměty manipulovat bezpečně, aniž by došlo k jejich poškození. A také výpočetní hledisko při rozhodování o tom, jak velký tlak by měl každý ÚP aplikovat a na jaký bod. Toto chapadlo má zcela odlišnou konstrukci. Jednotlivé ÚP jsou nahrazeny granulovaným materiálem, který je obalený elastickou membránou. Po přitlačení chapadla na předmět se granulovaný materiál přizpůsobuje jeho tvaru pomocí obtékání. Po odsátí přebytečného vzduchu ze sáčku vznikne uvnitř vakuum, které způsobí smrštění a ztvrdnutí chapadla. Tím je předmět sevřen a připraven k manipulaci. Je prokázáno, že objemová změna menší než 0,5 % stačí ke spolehlivému uchopení

předmětů a jejich držení silami, které mnohonásobně převyšují jejich vlastní hmotnost. [3, 8, 9]

Jedinou slabinou jsou pro něj plochá tělesa s rozlehlými plochami. Při uchopování těchto předmětů nedokáže dostatečně obtéct těleso, aby jej v následném kroku zafixovalo a těleso z úchopu nevyklouzlo. To je však jediný nedostatek, který tento typ chapadla má. Granulová chapadla mají široký rozsah použití v mnoha průmyslových odvětvích, díky své univerzální tvarové přizpůsobivosti. Dokáže si poradit se širokou škálou tvarů, jak je znázorněno na *obr. č. 4*.



Obr. 4 Síla úchopu granulového chapadla pro různé tvary [10]

Budoucí výzkum týkající se granulárního řešení by se mohl zaměřit na další zvýšení všestrannosti na typech objektů. Například granulová chapadla by mohla být vybavena technologií adheze. Ta by umožnila manipulaci s plochými a deformovatelnými předměty, se kterými je v současné době obtížné manipulovat. Dalším potenciálním přístupem je modifikace geometrie granulemi plněného elastického polštáře.

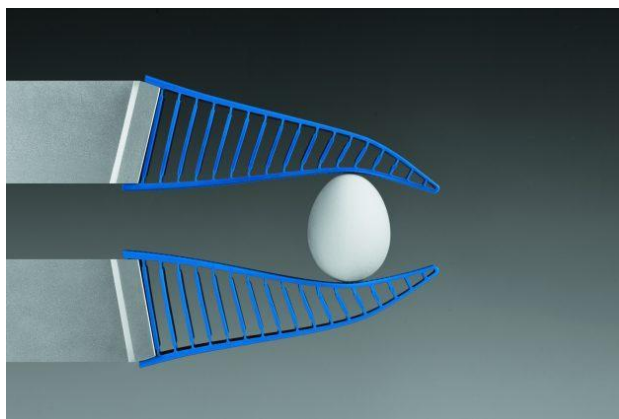
2.2 Pasivní chapadla

U pasivních chapadel není zapotřebí energie k udržení úchopu, ale jen k otevření a zavření ÚP chapadla. To může být výhoda v aplikacích v prostředích s nárokem na úsporu energie.

a) Pasivní chapadlo Fin-Ray

Toto chapadlo využívá Fin-Ray efekt, který se vyskytuje u rybích ploutví. Rybí ploutev má zajímavé mechanické vlastnosti. Když na rybí ploutev z boku začneme působit silou, její konec se vychýlí proti směru vektoru působící síly. Efekt je uskutečněn strukturou ploutevních kostí. Kostí ploutve se skládají ze dvou chrupavčitých paprsků, které jsou spojené elastickou tkání a ta při zatížení umožňuje chrupavčitém paprskům vzájemné přiblížení a oddálení. Základním prvkem technického napodobení je ostroúhlý trojúhelník, jehož dvě pružné strany jsou spojeny pomocí žeber. [11]

Chapadlo dokáže manipulovat se širokou škálou předmětů s různými tvary. Díky měkkému úchopu zvládá zacházet i s předměty, které nemají stálý tvar. Výhoda je uplatňována např. v potravinářském průmyslu, a to z jednoho prostého důvodu. Příroda nevyrobí potraviny podle rozměrových norem nebo výkresů. Například zelenina a ovoce, byť stejného druhu, může nabývat různých tvarů. Můžou se odlišovat velikostí, tvarem, počtem výrůstků atd. S touto komplikací si chapadlo z tvrdého a nepoddajného materiálu neporadí. V mnoha pokusech uchopit kus zeleniny nebo ovoce dojde vlivem tlaku v stisku k otlacení chapadla nebo ke skluzu a vysmeknutí předmětu z chapadla na malé kontaktní ploše, z důvodu tvarové nepřizpůsobivosti.[12]



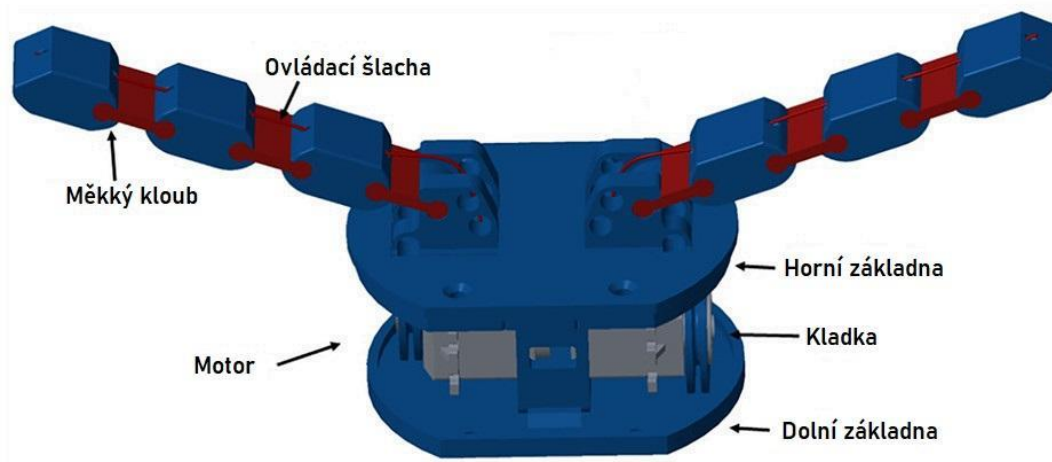
Obr. 5 Fin-Ray gripper [13]

Příklad o aplikaci v potravinářském průmyslu je chapadlo určené pro sklizeň hub, uvedené v patentu CA3124953. Pěstitelé se snaží zautomatizovat houbovou sklizeň, aby ušetřili finanční prostředky, protože 30 % příjmů houbové farmy pokryjí jen samotné výdaje pro sklizeň hub. Dalším faktorem je nedostatek pracovních sil určených pro sklizeň. Pokud by se ke sběru použila chapadla z tvrdého nepoddajného materiálu, vzniká riziko, že vlivem úchopu houby chapadlem vznikne v struktuře houby poškození a na povrchu houby se mohou vytvořit nežádoucí stopy. Kromě toho houby pěstované na farmách rostou v trsech, a proto je důležité, aby chapadlo nebylo prostorově náročné a dokázalo houby z trsu vyjmout bez poškození okolních hub. Řešení problému přináší právě Fin-Ray chapadlo, které svou jednoduchou konstrukcí uspoří zabraný prostor chapadlem a může vyjmout houby z trsů, aniž by bylo poškozeno jejich okolí. Navíc díky pružnému materiálu se ÚP chapadla přizpůsobí tvaru houby, tím se zvětší kontaktní plocha, na které se může působící síla lépe rozložit a nezanechá ve struktuře houby poškození. [14]

Do budoucna budou tímto typem chapadla pro svoji univerzalitu vybavení roboti v domácnosti, kteří budou lidem pomáhat s domácími pracemi. Jako jsou například práce v kuchyni: manipulace s nádobím, pomoc člověku se sníženou tělesnou hybností.

b) Měkké chapadlo ovládané pomocí šlach

Chapadla jsou inspirována lidskými prsty. Obvykle se skládají z více stupňového kloubového tělesa, které prostupuje ovládací šlacha. Jsou dva způsoby konstrukce těchto chapadel. Starší typ ovládaní se skládal z tuhých článků spojenými klouby a pružinami. Síly v pružinách sloužily jako vratné, které vracely ÚP do výchozí polohy. Druhý způsob se vyvinul později, díky vývoji nových materiálů. ÚP chapadla je tvořeno z částí, které jsou zhotoveny ze dvou typů materiálů. Články ÚP chapadla jsou vyrobeny z tuhého materiálu, které jsou propojeny elastickými členy. Spoje využívají uložené deformační energie v pantech k návratu aktivovaných ÚP do výchozí polohy. Způsob vede k jednodušší konstrukci, protože již nejsou zapotřebí vratné pružiny. [3, 4]



Obr. 6 Schéma chapadla ovládaného šlachami [15]

Nezatížená konfigurace ÚP závisí především na konstrukci jejich měkkých a tuhých částí. Počáteční konfigurace ÚP je nastavena zcela otevřená nebo zavřená. V prvním případě musí ovládací člen vyvinout krouticí moment, když chceme sevřít úchop a následně uvolnit krouticí moment, když chceme chapadlo otevřít. V druhém případě potřebujeme k otevření chapadla opět vyvinout krouticí moment, přičemž ve fázi uchopení můžeme krouticí moment uvolnit a síla úchopu je závislá pouze na tuhosti konstrukce chapadla.

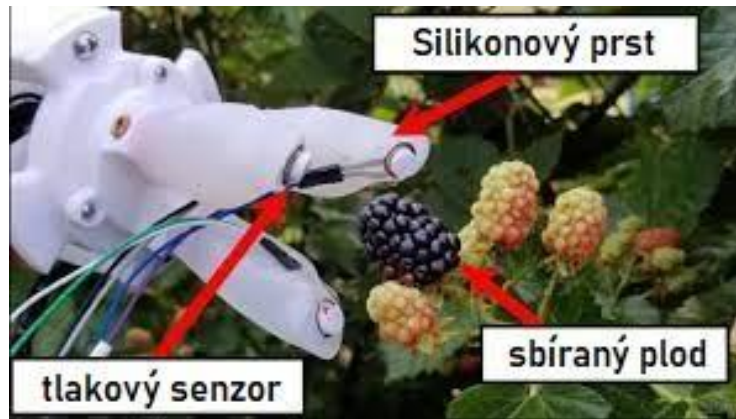


Obr. 7 Robotická ruka [16]

V současné době je tímto principem ovládní napodobena lidská ruka s minimálními funkčními rozdíly. U tohoto chapadla představují tuhé části kosti, elastické části pružné tkáně a ovládací lanka mají funkci šlach a vazů. Aby bylo napodobení co nejdokonalejší, vědci zdokumentovali lidskou ruku laserovým skenerem, čímž získali 3D modely kostí, které byly následovně vytištěny na 3D tiskárně. Kloubní vazy jsou vyrobeny ze super odolného vlákna – zvaného Spectra. Pryžové pláty, které byly řezány laserem, fungují jako měkké tkáně. Cílem konceptu bylo dosáhnout vysoké obratnosti, kterou poskytuje biomechanika lidské ruky. *Obr.7* zobrazuje robotickou ruku vyvinutou vědci Xu a Todorovem, která věrně napodobuje geometrii kostí a umístění svalů a šlach. Proto obratnost výchozího prototypu je téměř shodná s obratností lidské ruky. Na konci ÚP je chapadlo vybaveno polštářky z materiálu s podobnými mechanickými vlastnostmi jako má lidská kůže. Tím je zvýšeno tření v úchopu chapadla, a to přispívá k lepší manipulaci s předměty. Další výhodou materiálu imitující kůži na konci prstů je, že může být senzORIZOVÁN. Ovládní ruky může dostávat zpětnou vazbu o kontaktu a silách v úchopu a tím získává robotická ruka vlastnost napodobující lidský smysl, hmat. [3, 16]

U tohoto typu ovládní je nevýhodou externí umístění ovládacích motorů, které ztěžuje miniaturizaci celého chapadla. Do budoucna je snahou nahrazení elektromagnetických motorů kompaktnějšími akčními členy, které budou využívat vlastnosti chytrých materiálů například tvarovou paměť. [3]

Robotická chapadla poháněná šlachou se mohou používat při sklizni bobulovin, jak je popsáno v patentu US20220142050. Vynálezci vynalezli toto chapadlo z důvodu nedostatku lidské pracovní síly při sklizni bobulí a nedostatku šetrnosti tuhých robotických chapadel, které znehodnocují tvrdým úchopem sklizené bobuloviny. Chapadlo je schopno zaručit sklizení bobulí beze ztrát, tím je umožněn proces sklizení automatizovat. Automatizací procesu firma ušetří až 50 % nákladů a lidskou pracovní sílu, kterou může přesměrovat do jiných procesů. [17]



Obr. 8 Proces sklizení choulostivých bobulovin [18]

Robotický model lidské ruky, který má téměř totožné vlastnosti už vědci vynalezli, nyní by rádi posunuli model na další úroveň. Vědci by rádi docílili toho, že by na modelu ruky narostly lidské šlachy a tkáně, tím by vyvinuli regenerovanou končetinu a lidé by se dočkali prvních „náhradních dílů“ pro své tělo. To by znamenalo, že by lidé například po nehodě, při které přišli o končetinu, mohli mít zcela novou ruku s lidskou kůží i šlachami a v budoucnu nebyli nijak omezeni. Další uplatnění bude mít robotická ruka, jako nástroj astronautů, kterým bude nápomocna při opravě kosmické lodi z vnější strany, aniž by astronauti fyzicky opustili bezpečné prostředí své lodi. [16]

2.3. Funkční vlastnosti Soft chapadel

Při porovnání měkkých chapadel s tuhými chapadly mohou koncové ÚP vyrobené z pružných a měkkých součástí často uchopit nebo manipulovat s větším množstvím předmětů. Např. měkký ÚP chapadla je nezbytný pro lékařské inteligentní roboty, využívající se při operacích, kde je vyžadován měkký úchop a jemný pohyb s manipulujícím předmětem.

V této části je práce zaměřena na rozdělení podle funkčních vlastností Soft chapadel.

V tab. 1 jsou uvedeny hodnoty funkčních vlastností výše zmíněných chapadel. Hodnoty neznázorňují přesné limity jednotlivých technologií, ale spíše dosud nejlepší publikované výsledky.

Tab. 1 Funkční vlastnosti výše uvedených Soft chapadel.

*Poměr hmotnosti předmětu a chapadla; **charakteristický rozměr ÚP chapadla [3]

Technologie	Poměr hmotnosti *	Velikost chapadla **	Velikost objektu	Doba odezvy
	[-]	[mm]	[mm]	[s]
Poháněné šlachou	4,5 až 16,3	1,2 až 15,8	0,01 až 60	N/A
Fin-Ray				
FEA	2 až 68	0,5 až 120	0,1 až 100	0,1 až 6
Vakuový polštář	7,6 až 15,1	4,3 až 35,5	0,43 až 30	0,1 až 1,1

Z výše uvedených hodnot můžeme vyčíst, že nejširší zastoupení, s ohledem na hmotnost uchopovaného předmětu, mají chapadla FEA. Jelikož mohou nabývat velkých rozměrů, mohou manipulovat s rozměrnými a těžšími předměty, než je samotné chapadlo. Oproti ostatním zastupitelům mají však nejdéle dobu odezvy. Téměř nulovou dobu odezvy mají chapadla s mechanickou vazbou (poháněné šlachou a Fin-Ray), u kterých je doba odezvy ovlivněna pouze tuhostí konstrukce.

Při současném stavu vývoje Soft chapadel lze stále navrhnout vhodné úpravy k eliminaci jejich nevýhod.

Návrh Soft chapadla upravuje variantu ovládanou pomocí šlach. Nevýhodou takových chapadel je neschopnost ohybu uprostřed tuhé části představující kost. ÚP chapadla se může ohnout pouze v místě spoje tuhých částí. Návrh nahrazuje tuhé části chapadla za kuličky. Tím je získáno více bodů, ve kterých může docházet k ohybu ÚP chapadla. Chapadlo se díky této úpravě může lépe přizpůsobit tvaru součásti, rozložit sílu sevření na větší plochu, snížit kontaktní tlak a tím zabránit vzniku otlačení.

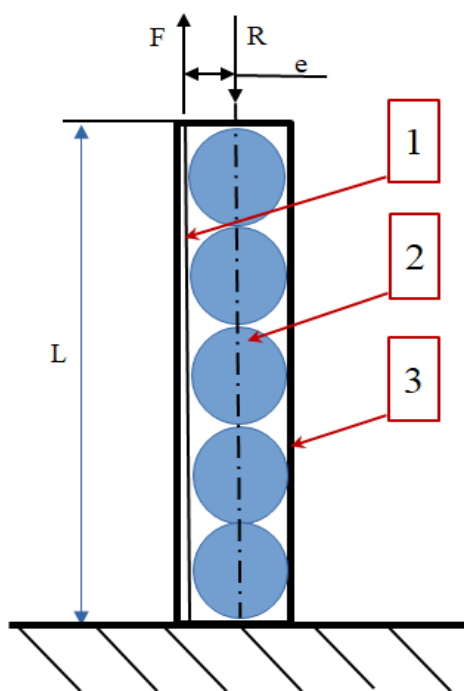
Pro zajištění vzájemné polohy kuliček slouží tlačná pružina, která drží kuličky ve sloupci. Průměr kuliček je menší než vnitřní průměr pružiny o průměr tažného lanka. Tažné lanko má funkci šlachy a je umístěno excentricky. Tím vymezuje vůli mezi kuličkou a pružinou, na jejímž konci je upevněno. Vlivem excentricity je při tažení za lanko vyvinuta na konci pružiny silová dvojice, která vyvodí ohyb pružiny.

3 Praktická část

Pro praktickou část práce bylo vybráno k rozpracování KSCH, které se skládá z tlačné ocelové pružiny, ve které jsou uvnitř umístěny ocelové kuličky a ocelové lanko. Lanko je vedeno rovnoběžně s osou pružiny po vnitřní straně závitů, viz *obr. 17*.

Kuličky jsou naskládány do pružiny, kde tvoří sloupec. Vzájemnou polohu kuliček zajišťuje pružina opatřena na volném konci záslepkou, ve které je fixován jeden z konců lanka. Sloupec kuliček má díky záslepce na konci pružiny zamezený pohyb ve směru osy pružiny, tím je zabráněno zkrácení délky pružiny. Díky excentrickému umístění lanka v těle pružiny vzniká po tahovém zatížení na konci pružiny silová dvojice akční síly F a reakční síly R , tvořící ohybový moment, který způsobí požadovanou deformaci pružiny.

Pružina se záslepkou tvoří pro kuličky s lankem obal, který těmto prvkům nedovoluje posun z osové roviny ÚP.



Obr. 9 Silová dvojice na konci ÚP

1 – Lanko, 2 – Ložiskové kuličky, 3 – Pružina

Z obr. 10 můžeme zjistit hodnotu ohybového momentu M tvořeného silovou dvojicí.

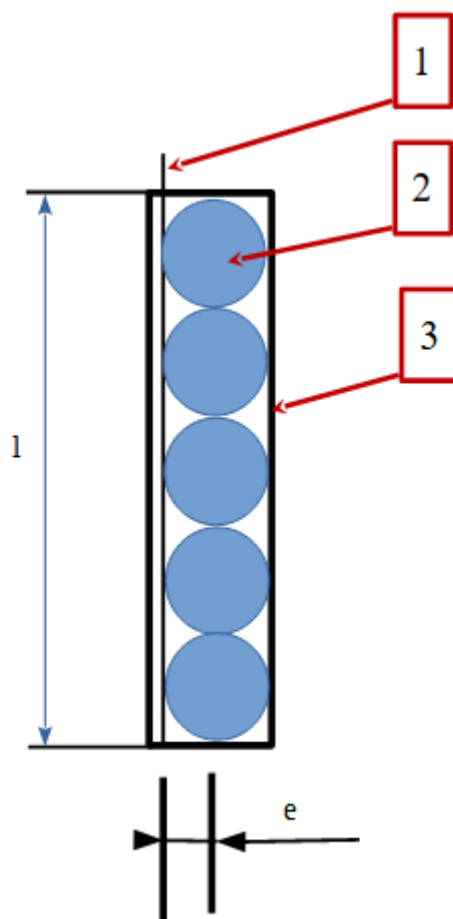
$$M = F \cdot e \quad (3.1)$$

Při pohánění lanka pneumotorem, kde je síla pístnice přímo přenášena na lanko a je rovna součinu tlaku média ve válci „p“ a funkční plochy pístu S .

$$F = p \cdot S; \text{ kde } S = \frac{\pi d^2}{4} \quad (3.2)$$

Závislost zkrácení lanka na úhlu deformace

Na obrázku je vyzobrazen zjednodušený model ÚP. Obr. 11 znázorňuje nezatížený stav.

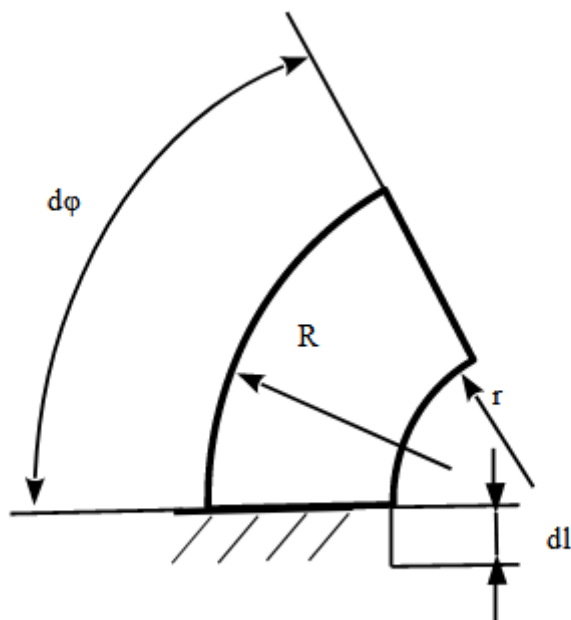


Obr. 10 Zjednodušený model ÚP

1 – Lanko, 2 – Ložiskové kuličky, 3 – Pružina

Svislé čáry znázorňují osu sloupce kuliček (dále jen osy) o délce l_0 a ovládací lanko o délce l_L , které mají shodnou délku l . Jsou rovnoběžné a vzdáleny excentricitou e , která je rovna poloměru kuličky.

Po vzájemném posunutí lanka vůči ose o dl_L se konec ÚP natočí o úhel $d\varphi$, viz obr. 12, který znázorňuje princip deformace ÚP při změně délky lanka.



Obr. 11 Princip deformace ÚP

Předpokládá se, že tvar zdeformovaného ÚP bude opisovat výseč kružnice. S tímto předpokladem můžeme popsat závislost délky opsané výseče kružnice na úhlu natočení φ :

$$l_0 = R \cdot d\varphi \quad (3.3)$$

$$l_L = r \cdot d\varphi \quad (3.4)$$

R a r představují poloměry křivosti opisované osami sloupce a lanka ve tvaru kružnicové výseče.

Pro získání závislosti úhlu natočení konce pružiny na změně délky lanka. Vztah lze odvodit ze vztahu pro změnu délky lanka.

$$dl_L = l_0 - l_L \quad (3.5)$$

Změna délky lanka je rovna rozdílu délek osy a lanka. Po dosazení vztahů (3.3), (3.4) do vztahu (3.5), vzniká:

$$dl_L = R \cdot d\varphi - r \cdot d\varphi \quad (3.6)$$

$$dl_L = (R - r) \cdot d\varphi \quad (3.7)$$

Za oba poloměry jsou dosazeny jejich závislosti na úhlu φ .

$$R(\varphi) = \frac{l_0}{\varphi} \quad (3.8)$$

$$r(\varphi) = \frac{l_0}{\varphi} - e \quad (3.9)$$

Po dosazení a upravení lze vztah integrovat.

$$dl_L = \int \left(\frac{l_0}{\varphi} - \left(\frac{l_0}{\varphi} - e \right) \right) d\varphi \quad (3.10)$$

$$dl_L = \int e d\varphi \quad (3.11)$$

$$\Delta l_L = e \cdot \varphi + C \quad (3.12)$$

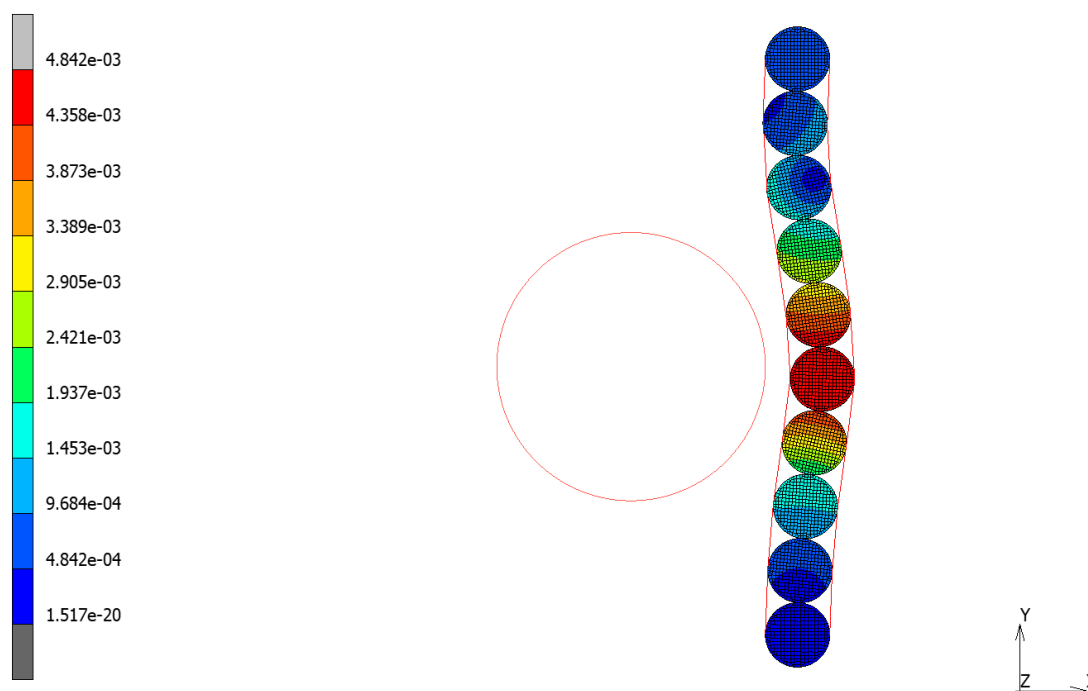
Integrační konstantu C lze určit z počátečních podmínek, kde je při nulové změně délky lanka nulový i úhel natočení, tudíž aby byla zachována rovnost obou stran rovnice, tak i konstanta C musí být rovna 0.

ÚP se deformuje dle rovnice:

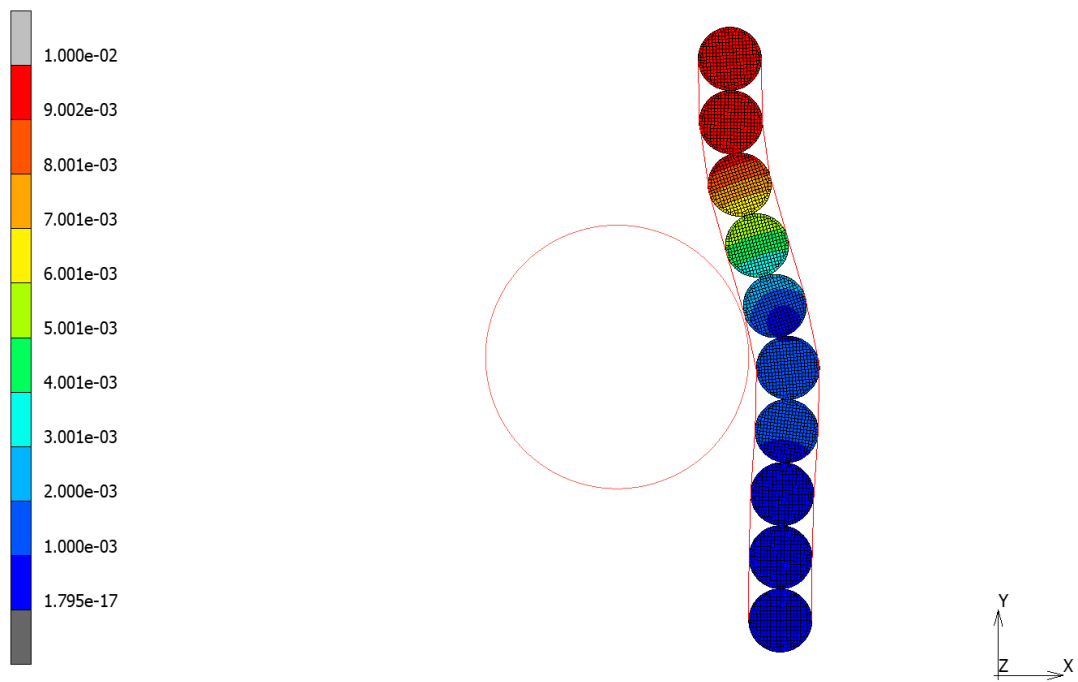
$$\Delta l_L = e \cdot \varphi \quad (3.13)$$

Počítačová simulace funkce úchopného prvku

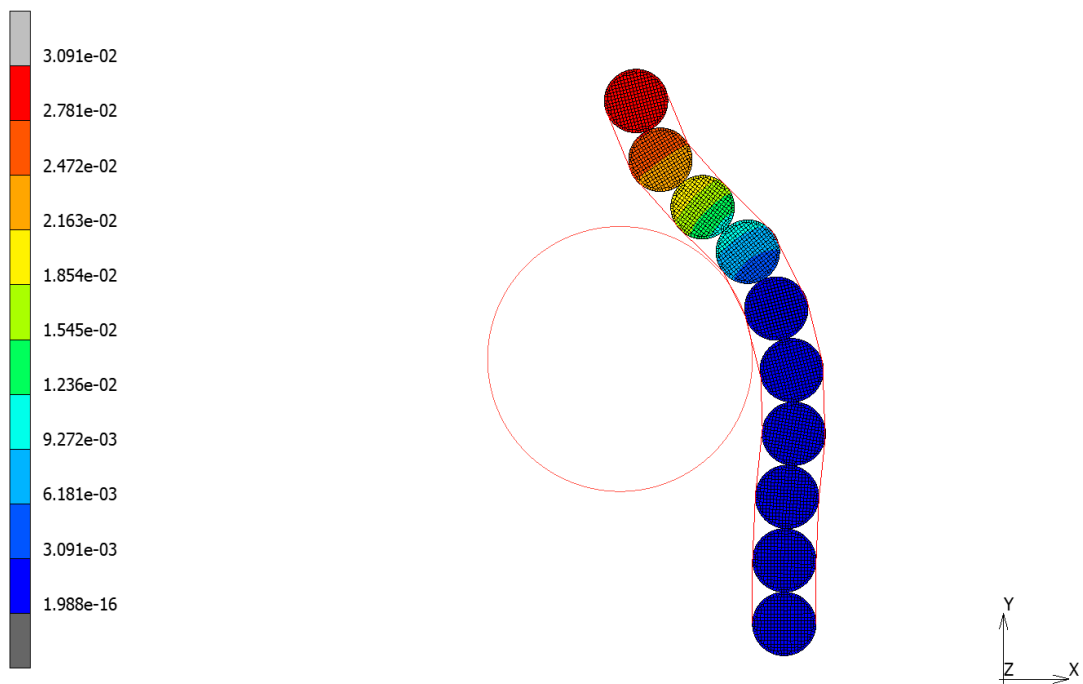
Základní funkce navrženého principu řešení ÚP byla v rámci řešené BP rovněž otestována s podporou počítačového modelování. V dostupném softwarovém produktu MSC.Marc byl vytvořen zjednodušený 2D model prvku kontaktní úlohy s charakteristickým volným uspořádáním kontaktních elementů (ocelových kuliček) s průměrem 12 mm uvnitř tlačné pružiny, která byla nahrazena virtuálním modelem pružiny s definovanou tuhostí. Objekt manipulace, resp. kontaktní profil objektu manipulace byl nahrazen absolutně tuhým kruhovým profilem, který simuluje reálný kontakt s válcem. Po nastavení okrajových a počátečních podmínek, specifikaci materiálového modelu a třecích poměrů na rozhraní kontaktů bylo možné analyzovat chování mechanické soustavy. Vybrané výstupy počítačové simulace, které ukazují jednotlivé fáze pohybu, jsou k dispozici na *obr. 13 až 16*.



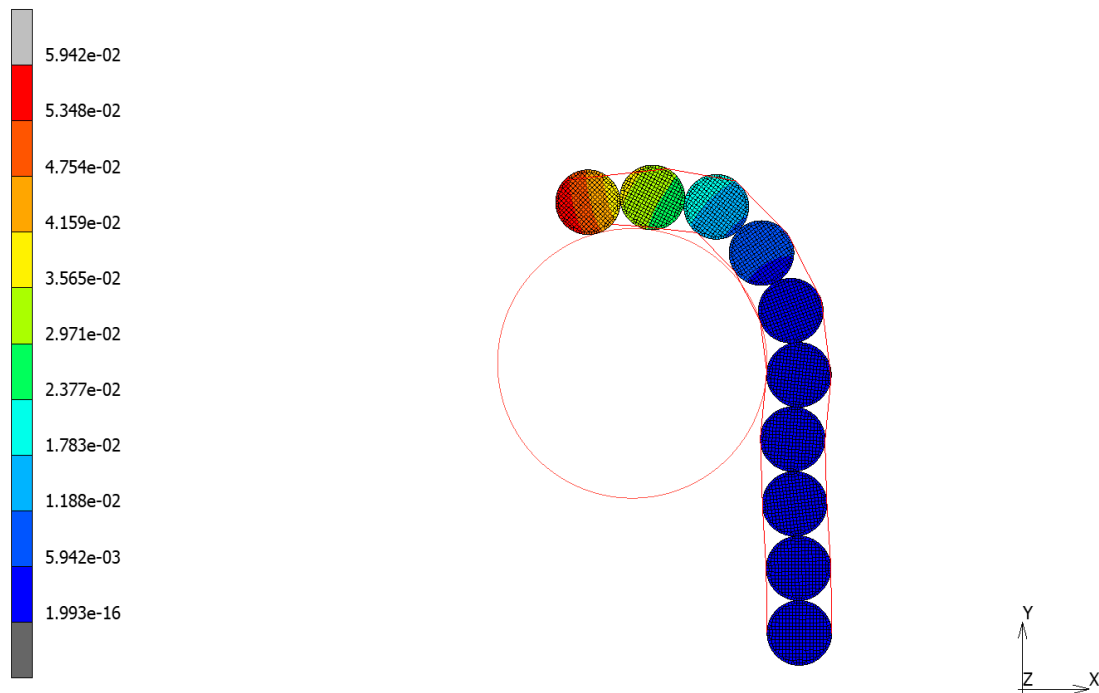
Obr. 12 Fáze 1 – Postupné přibližování ÚP k objektu (legenda odpovídá celkovému posunutí v m)



Obr. 13 Fáze 2 – Prvotní kontakt ÚP s objektem (legenda odpovídá celkovému posunutí v m)



Obr. 14 Fáze 3 – Postupné uchopování objektu (legenda odpovídá celkovému posunutí v m)



Obr. 15 Fáze 4 – Finální uchopení objektu (legenda odpovídá celkovému posunutí v m)

Navržený počítačový model prokázal předpokládanou funkci navrženého úchopného prvku a umožňuje predikci průběhu posunutí, přesnosti uchopení a úrovně úchopných kontaktních ploch v závislosti na definované geometrii a tuhosti pružiny. Zároveň lze model využít během koncipování finálního konstrukčního řešení ve fázi dimenzování pohonu a následně také pro simulace zatěžovacích stavů souvisejících s průběhem manipulační úlohy a bezpečnosti (stabilitě) držení objektu s ohledem na jeho materiálové vlastnosti a geometrii.

3.1 Popis variant principů řešení chapadla

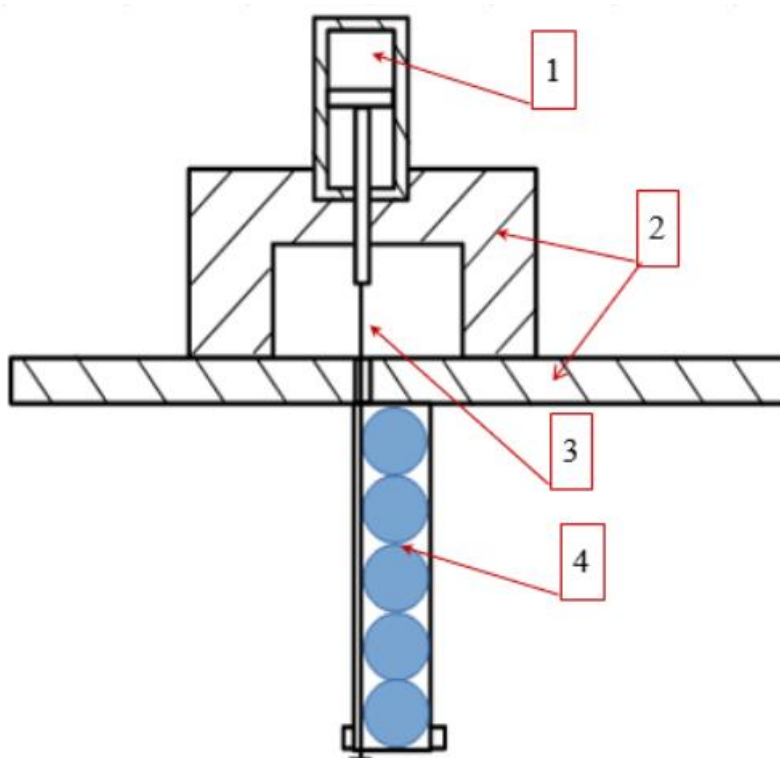
Chapadla ovládaná lankem/šlachou je možno ovládat rozdílnými způsoby, např. pneumaticky, hydraulicky a elektricky.

Pro funkční návrh chapadla bylo zvoleno v rámci praktické části BP pneumatické ovládání KSCH.

Úkolem BP bylo ve variantách navrhnout princip řešení chapadla.

3.1.1 Chapadlo s horizontálním pohonem

Na dolní straně základové desky je v kolmé rovině upevněn pneumotor. Na horní straně základové desky je v kolmé rovině upevněna pružina. Vnitřní část pružiny je vyplněn kulovými ložiskovými elementy (dále jen kuličky) a po vnitřní straně pružiny vede ocelové lanko. Volný konec pružiny je uzavřen zátkou s otvorem pro lanko. Zátka má pevnou polohu, kterou zajišťuje vhodně tvarovaný konec pružinového drátu. Lanko prochází zátkou, dotýká se závitů pružiny po vnitřní straně, prochází základovou deskou v místě osy pneumotoru. Lanko je na pozici zátky jištěno kovovou koncovkou a druhý konec je zajištěn šroubovací sponou. Před funkční zkouškou musí dojít k vymezení nežádoucích vůlí pomocí napínacího mechanismu. Po přivedení stlačeného vzduchu do pneumotoru vznikne tahová síla, která se přenesse pomocí lanka na pružinu a kuličky. Díky excentrickému umístění lanka v těle pružiny vzniká po tahovém zatížení na konci pružiny silová dvojice akční síly F a reakční síly R , tvořící ohybový moment, který způsobí požadovanou deformaci pružiny.



Obr. 16 Schéma principu ovládání ÚP vertikálně umístěným pneumotorem

1 – Pneumotor, 2 – Rám, 3 – Lanko, 4 – ÚP

Výhody řešení:

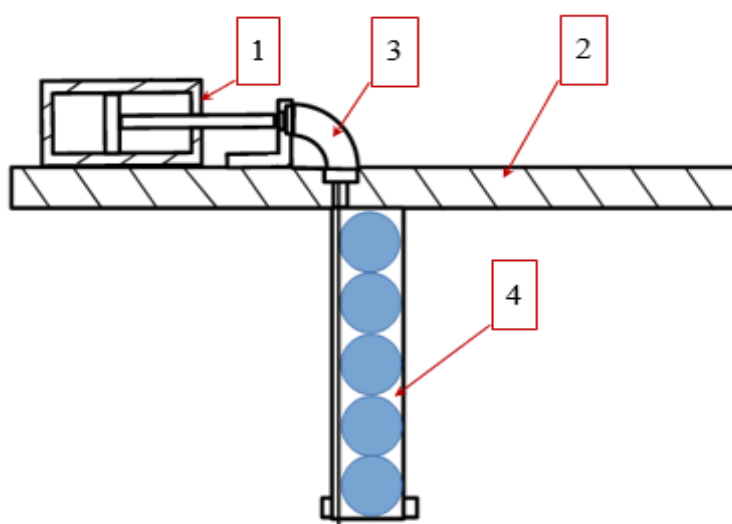
1. Nízké pasivní odpory vznikající pouze třením lanka po vnitřních závitech pružiny.
2. ÚP plynule přilne k povrchu objektu manipulace (prakticky ověřeno na skleničce a ovoci – grapefruitu).
3. Po uvolnění tahové síly dojde vlivem tuhosti pružiny k samovolnému návratu ÚP do výchozí polohy.
4. Řešení lze vyrobit s relativně nízkým počtem součástí.

Nevýhody řešení:

1. Zástavbové rozměry zejména celková délka chapadla není vhodná pro připojení na rameno ovládacího robota.

3.1.2 Chapadlo s vertikálním pohonem

Princip ÚP popsany v předešlé kapitole 3.1.1. zůstává nezměněn. Změna se týká umístění pneumotoru do roviny základové desky. Ohyb lanka o úhel 90° je zajištěn pomocí bowdenu, který je umístěn mezi základovou deskou a pneumotorem, viz *obr. 18*.



Obr. 17 Schéma principu ovládní ÚP horizontálně umístěným pneumotorem

1 – Pneumotor, 2 – Rám, 3 – Bowden s lankem, 4 – ÚP

Výhody řešení:

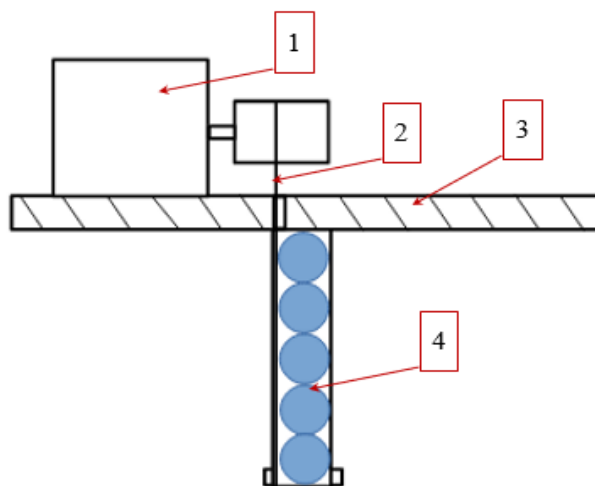
1. ÚP plynule přilne k povrchu součástky (prakticky ověřeno na skleničce a ovoci – grapefruitu).
2. Po uvolnění tahové síly dojde vlivem tuhosti pružiny k samovolnému návratu ÚP do výchozí polohy.
3. V důsledku zvolené dispozice pneumotoru/ů došlo ke zkrácení celkové délky chapadla, která lépe vyhovuje pro připojení na rameno robota.

Nevýhody řešení:

1. Nárůst pasivních odporů způsobeným třením lanka o stěny bowdenu a rozšíření součástkové základny s porovnáním řešení uvedeném v kapitole 3.1.1.
2. Nutnost použití mazacího tuku pro bowden, kde se tím zvyšuje riziko kontaminace procesu mazacím tukem.

3.1.3 Chapadlo s kyvným pohonem

Princip ÚP popsany v předešlé kapitole 3.1.2 zůstává nezměněn. Změna se týká záměny pneumotoru za kyvný pneumatický pohon, který provádí rotační pohyb v intervalu $0^\circ - 180^\circ$.



Obr. 18 Schéma principu ovládní ÚP kyvným pohonem

1 – Kyvný pohon, 2 – Lanko, 3 – Rám, 4 – ÚP

Výhody řešení:

1. ÚP plynule přilne k povrchu součástky (prakticky ověřeno na skleničce a ovoci – grapefruitu).
2. Po uvolnění tahové síly dojde vlivem tuhosti pružiny k samovolnému návratu ÚP do výchozí polohy.
3. Nahrazením pneumotoru za kyvný pohon již nemusí být použito bowdenového vedení.

Nevýhody řešení:

1. Porovnáním řešení pneumotoru a kyvného pneumatického pohonu pro stejné výkonové uchopení vychází kyvný pneumatický pohon, z důvodu vyšších pasivních odporů, hůře, a to s vyššími nároky na zástavbové rozměry.
2. Vyšší nároky na seřízení funkce ÚP.

3.1.4 Oblasti využití

Navržený princip KSCH splňuje podmínku šetrného úchopu unikátních předmětů, vč. křehkých. Praktickou zkouškou bylo ověřeno, že lze šetrně uchopit i měkké ovoce, např. grapefruit.

3.2 Výběrová analýza

Z výsledku provedené analýzy, viz *tab. 2*, vyplývá výhoda nejnižších nároků na zástavbový prostor u řešení chapadla s vertikálním pohonem.

Tab. 2 Výhody a nevýhody vybraných principů

Princip	výhody	nevýhody
Chapadlo s horizontálním pohonem	jednoduchost konstrukce	příliš dlouhé rozměry
Chapadlo s vertikálním pohonem	kompaktní celek	nutnost použití vodících prvků lanka
Chapadlo s kyvným pohonem	jednoduchost konstrukce	velké pasivní odpory, příliš velké rozměry pohonu

Vzhledem k dnešním trendům, kde jsou chapadla navrhována co možná nejkompaktněji, je zvoleno chapadlo s vertikálním pohonem pro nadcházející vlastní návrh konstrukčního řešení.

Chapadlo s horizontálním pohonem bylo zvoleno pro praktickou část BP, z důvodu jednoduché konstrukce.

3.3 Chapadlo s vertikálním pohonem

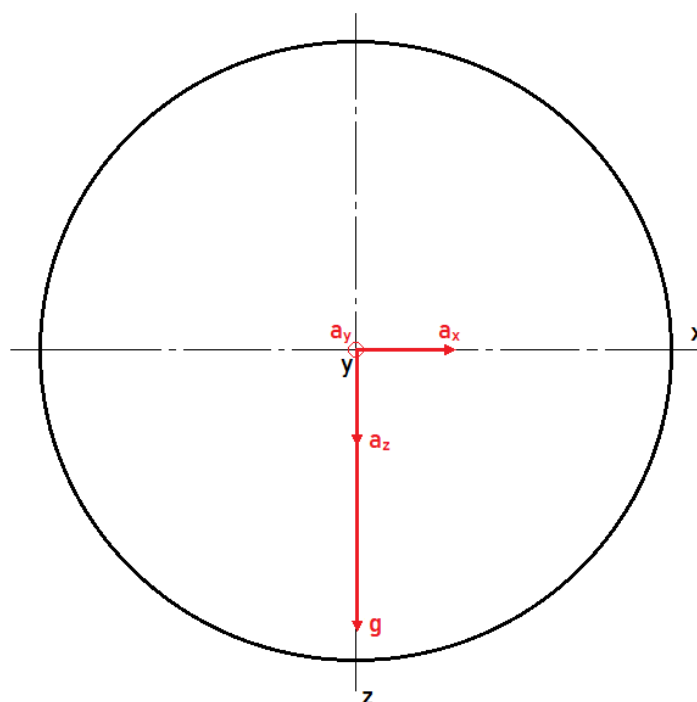
Pro příklad použití KSCH byla vybrána aplikace na citrusové farmě, kde má funkci třídění citrusových plodů.

Chapadlo je umístěno u pásového dopravníku, který nejprve vede skrz optickou kontrolu a dále kolem kolaborativního robota vybaveného KSCH.

Tato funkce nevyžaduje velké uchopovací frekvence, proto není nutné povolení úchopu ÚP řídit pneumotorem. Z toho důvodu je vybrán jednočinný pneumotor. Návrat ÚP do výchozí pozice je realizován uvolněním deformační energií, která je uložena do pružiny ÚP a do vratné pružiny pneumotoru.

Pro manipulaci s citrusovými plody s hmotností do 0,4 kg bylo zvoleno chapadlo se třemi kuličkovými ÚP, manipulačním zrychlením $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ a deformačním úhlem ÚP 90° .

Pro úchop citrusu je nutné, aby se všechny tři ÚP chapadla zdeformovaly o úhel 90° a následně vyvinuly dostatečnou sílu úchopu, aby překonaly vliv dynamických sil vázaných na nejméně příznivý okamžik tzn., že ve všech osách kartézského souřadnicového systému (s počátkem v těžišti plodu) bude na plod působit zrychlení $a_{x,y,z} = 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ a navíc v ose z bude působit gravitační zrychlení Země $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.



Obr. 19 Působení zrychlení v nejméně příznivém okamžiku

Pro tuto aplikaci byla zvolena bezpečnost procesu $k = 2$.

Pro zatěžující síly v jednotlivých osách platí vztahy:

$$F_x = k \cdot m \cdot a_x \quad (3.14)$$

$$F_y = k \cdot m \cdot a_y \quad (3.15)$$

$$F_z = k \cdot m \cdot (a_z + g) \quad (3.16)$$

Superpozicí všech tří silových účinků (3.14), (3.15), (3.16) vznikne vztah pro výpočet úchopné síly. Po úpravě vztah nabyde podoby:

$$F_U = k \cdot m \cdot (a_x + a_y + a_z + g) \quad (3.17)$$

Pro zjištění potřebné síly v lanku ÚP k vyvinutí dostatečné úchopné síly, byl použit zjištěný vztah (4.1) z měření úchopné síly. Po vyjádření síly v lanku F ze vztahu:

$$F = \frac{F_U - 0,036}{0,104} \quad (3.18)$$

a po následném dosazení do vztahu (3.17) nabývá vztah podoby:

$$F = \frac{k \cdot m \cdot (a_x + a_y + a_z + g) - 0,036}{0,104} \quad (3.19)$$

Po dosazení daných parametrů vychází síla v lanku o velikosti $F = 224,97 \text{ N}$.

Výběr vhodného pneumotoru

Pro vyvození síly v lanku pro tři ÚP byly použity dva jednočinné pneumotory AEN-25 firmy FESTO.

https://www.festo.com/cz/cs/a/536417/?q=jedno%C4%8Dinny~:sortByCoreRangeAndSp2020~:CC_Piston_diameter_mm_C_FP_GLOBAL~:25.0



Obr. 20 Jednočinný pneumotor AEN-25

Jsou schopny vyvinout sílu v lanku při teoretickém tlaku:

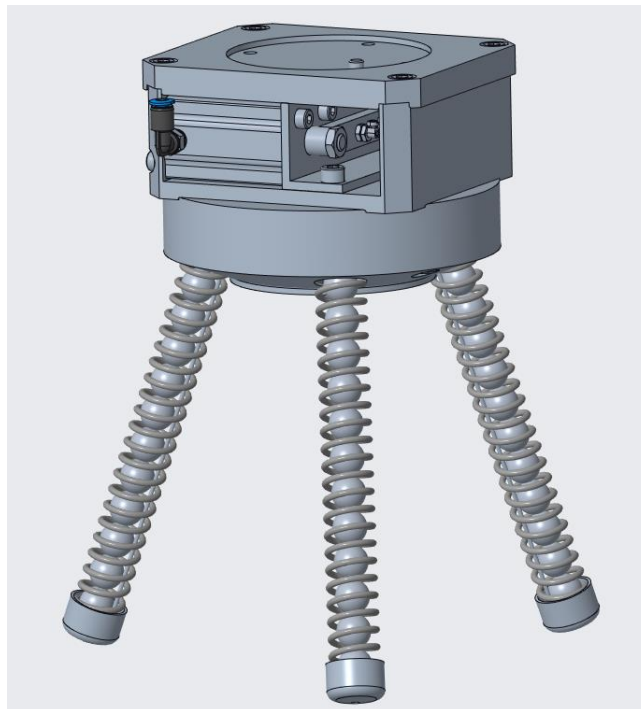
$$p_t = \frac{3 \cdot F}{2 \cdot S} \quad (3.20)$$

Po dosazení do vztahu vychází teoretický tlak $0,69 \text{ MPa}$.

Pneumotory jsou schopny pracovat do tlaku 10 barů (tzn. 1 MPa), tzn. mají dostatečně velkou rezervu pro překonání pasivních odporů samotného pneumotoru a odporů ve vedení lanka.

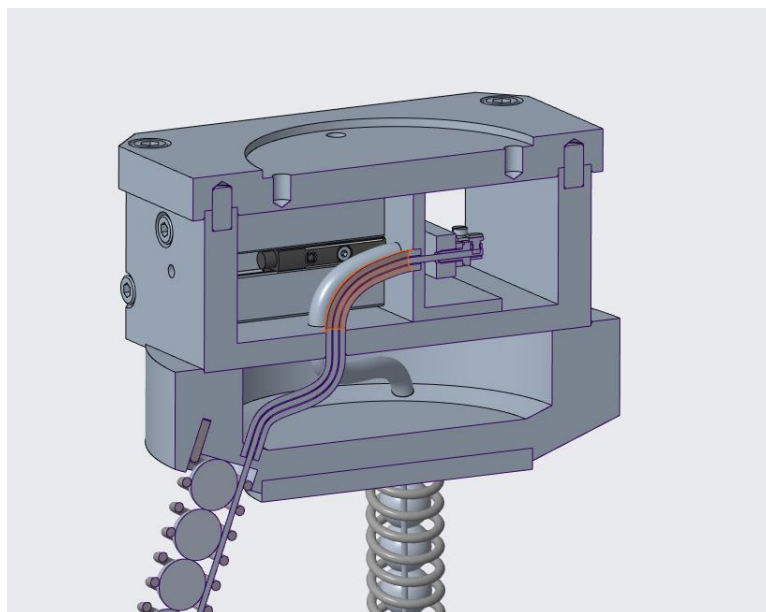
Konstrukční návrh chapadla

Chapadlo je složeno z hlavice vyrobené z kruhové tyče hliníkové slitiny CSN 424400, rámu pro pneumotory hliníkové slitiny CSN 424401.



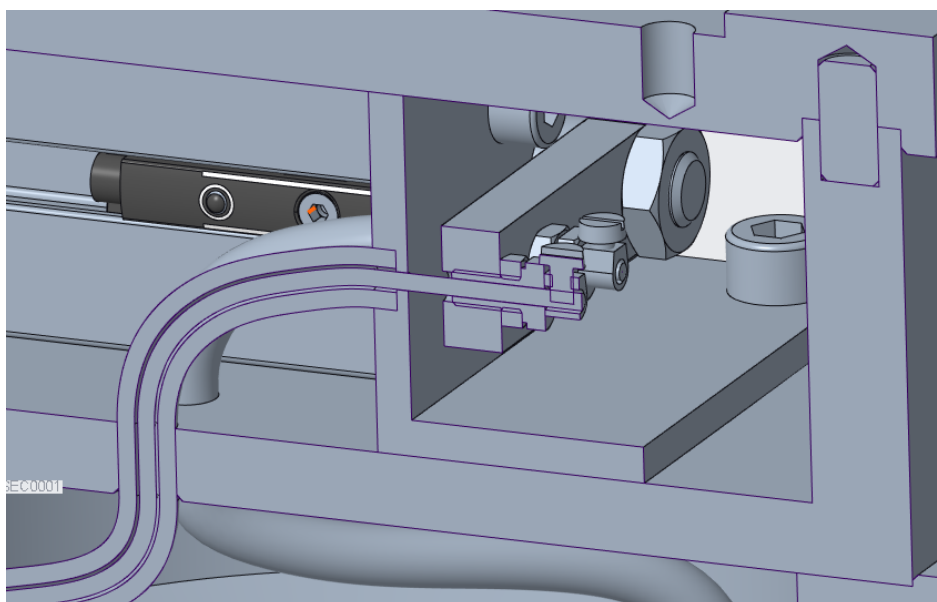
Obr. 21 KSCH bez krytu

Konstrukce je složena z hlavice, která v místech umístění ÚP je zkosená. Tím způsobí naklonění výchozí polohy ÚP a zajistí větší kontaktní úhel při úchopu plodu. Pružiny ÚP jsou do hlavice zasunuty a přilepeny.



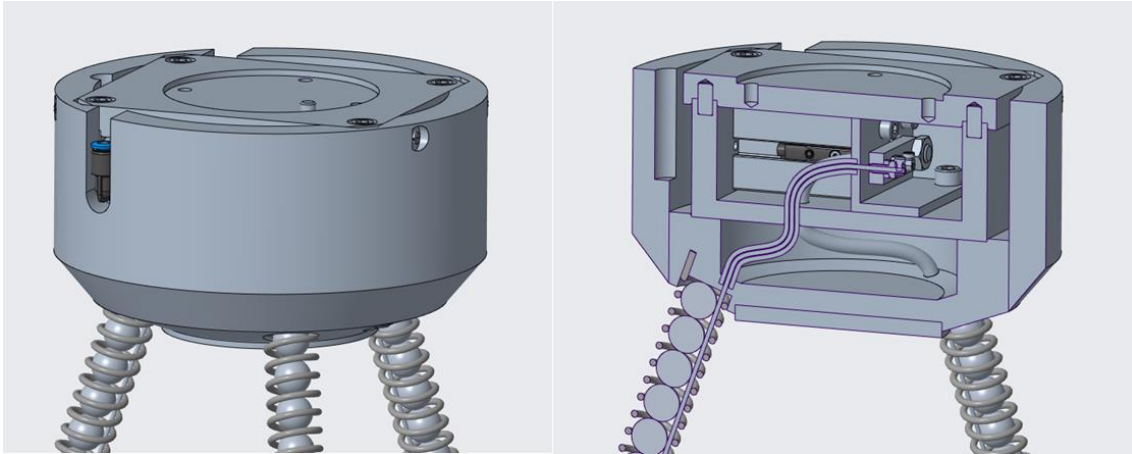
Obr. 22 KSCH v řezu

Hlavice je připevněna šrouby k rámu pro pneumatiky. Skrz dno rámu pro pneumatiky je provedeno vedení lanka ve formě bowdenu a je zakončené v L profilu. Lanko prostupuje skrz příčník s napínákem a poté je zajištěno sponou v podobě oka se šroubem, viz *obr. 24*.



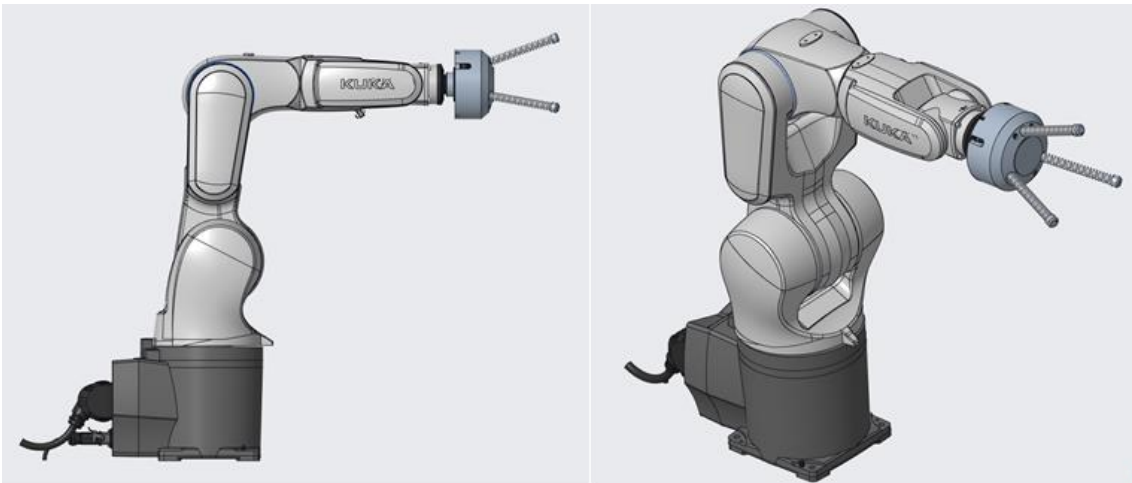
Obr. 23 Zajištění konce lanka

Shora je rám pro pneumatiky zakrytován hliníkovou deskou na níž je připevněna příruba spojující chapadlo s robotem. Vše je zakrytované krytem, vyrobeným technologií 3D tisku, viz *obr. 25*.



Obr. 24 Zakrytované chapadlo

Na *obr. 26* je vidět rozměrový poměr mezi navrženým KSCH a robotem od firmy KUKA KR 4 AGILUS.



Obr. 25 KSCH připojené robotu KUKA KR 4 AGILUS

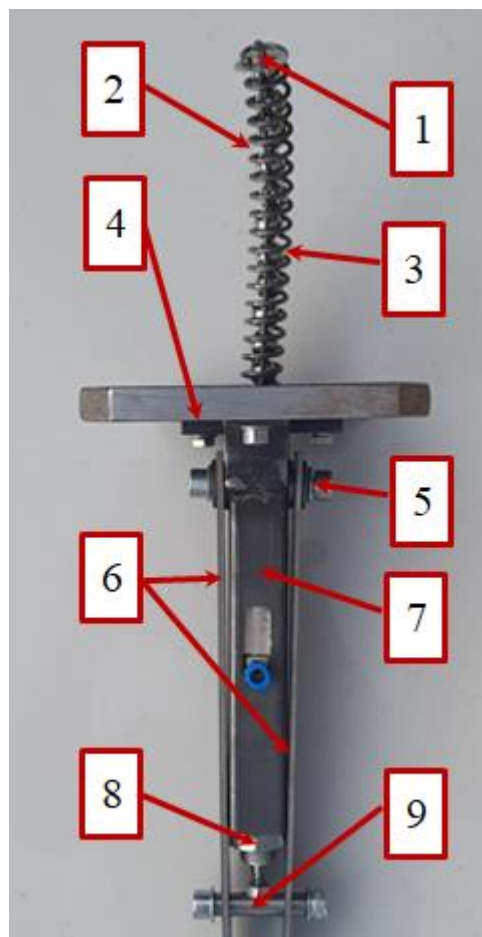
Všechny vyráběné díly jsou popsány výkresovou dokumentací, která je k práci přiložena.

4 Návrh konstrukce vlastního funkčního vzorku

Z důvodu zajištění bezpečnosti provozu je konstrukční řešení koncipováno tak, aby byl jednočinný přímočarý pneumotor zabudován do uzavřeného čtvercového ocelového profilu, a tím se snižuje riziko možnosti poranění formou stlačení nebo zhmoždění.

Další výhodou zvoleného konstrukčního řešení je fixace těla pneumotoru, která stabilizuje chod pístnice v těle ocelového profilu při samotném zdvihu. Dalšími aspekty pro zvolení daného řešení byla materiálová dostupnost, možnost výroby a montáže jednotlivých dílů v domácí dílně a v neposlední řadě to byla jednoduchost obsluhy funkčního vzorku, viz Výkresová dokumentace.

4.1 Části vlastního KSCH



Obr. 26 Zkušební prototyp KSCH

KSCH je složeno, viz *tab. 3*:

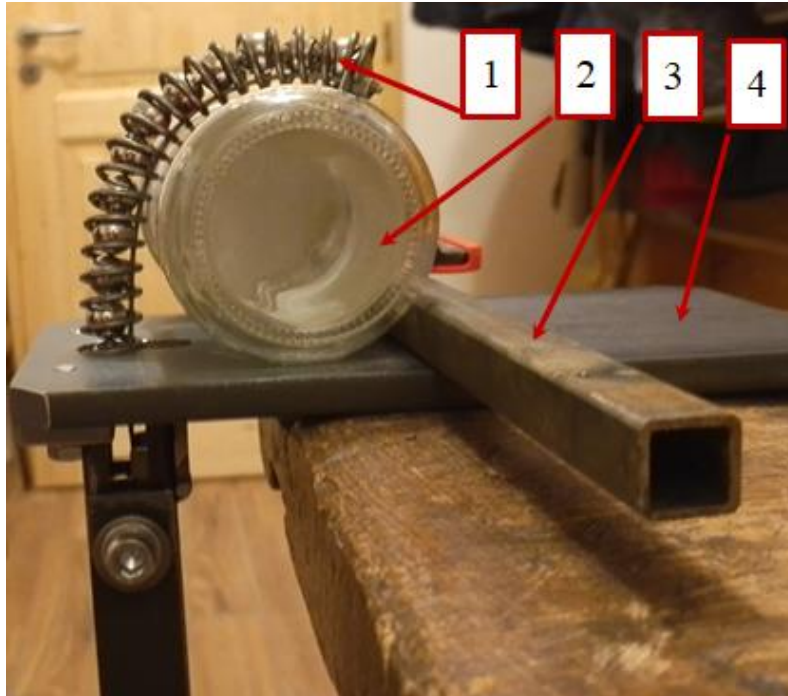
Tab. 3 Seznam součástí vlastního KSCH

Pozice č.	Název součásti
1	Koncovka ocelového lanka
2	Ocelová pružina
3	Kolový ložiskový element
4	Základová deska
5	Horní čep
6	Táhla
7	Ocelový profil
8	Pneumotor
9	Dolní čep

Na horní straně základové desky je v kolmé rovině upevněna pružina (2). Vnitřní část pružiny je vyplněna kulovými elementy (3) a po vnitřní straně pružiny vede ocelové lanko (1). Lanko je vedeno po vnitřní straně pružiny a prochází základovou deskou (4) a vystupuje na druhé straně v místě osy pneumotoru (8). Lanko je upevněno v horním čepu (5) pomocí svěrné spojky (není zobrazeno). Horní čep je spojen táhly (6) s dolním čepem (9), který je spojen s pístnicí pneumotoru (8).

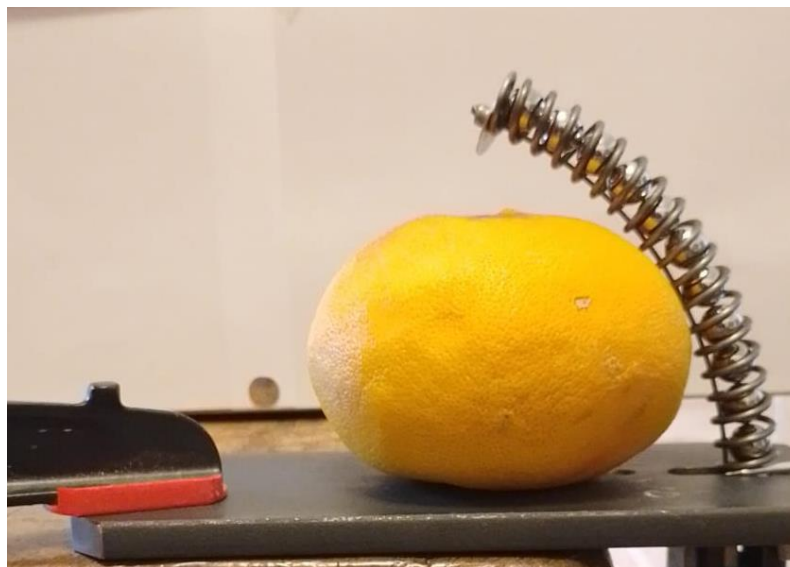
4.2 Funkčnost zvoleného mechanismu

Funkčnost prototypu KSCH byla úspěšně odzkoušena na sklenici, viz *obr. 21* a ovoci – grapefruitu, viz *obr. 22*. V obou případech se chapadlo přizpůsobilo tvaru předmětu.



Obr. 27 Funkční zkouška upnutí sklenice

1 – ÚP, 2 – Sklenice, 3 – Zarážka, 4 – Základová deska



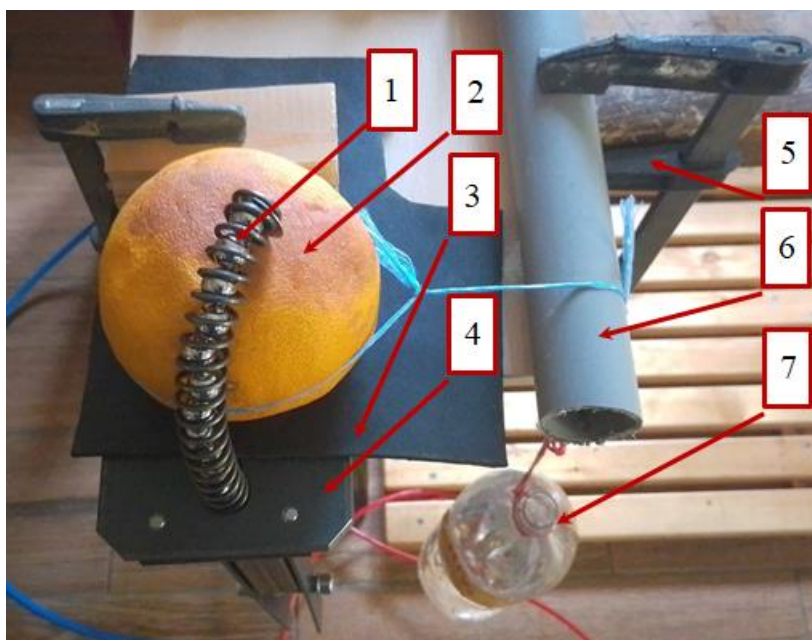
Obr. 28 Funkční zkouška upnutí grapefruitu

4.3 Měření

4.3.1 Měření síly úchopu ÚP

Cílem měření je získat z naměřených dat regresní funkci, která by popisovala závislost síly úchopu na síle v lanku.

Na obr. 23 je vidět způsob měření. Grapefruit je upevněn ÚP a zároveň je spojen provázkem se závažím přes novodurovou trubku. Novodurová trubka slouží jako plynulý přechod provázku z vodorovného do svislého směru. Jako závaží slouží plastová lahev, do které se postupně přilévá voda. Postupným přiléváním je zvyšována vytrhovací síla až do momentu, kdy dojde k uvolnění grapefruitu.



Obr. 29 Funkční zkouška upnutí ovoce grapefruitu

1 – ÚP, 2 – Ovoce grapefruit, 3 – Pryž, 4 – Základová deska, 5 – Ruční svěrka, 6 – Novodurová trubka,
7 – PET lahev jako variabilní závaží

Postup měření

- 1) Grapefruit je ovázán provázkem tak, aby byla smyčka umístěna ve stejné rovině jako těžiště předmětu.
- 2) Grapefruit je upnut natlakováním pneumotoru, který skrz lanko aktivuje ÚP.
- 3) Na druhý konec provázku je připevněna prázdná lahev.
- 4) Do lahve je postupně přilévána voda, až do chvíle, kdy dojde k prokluzu grapefruitu.

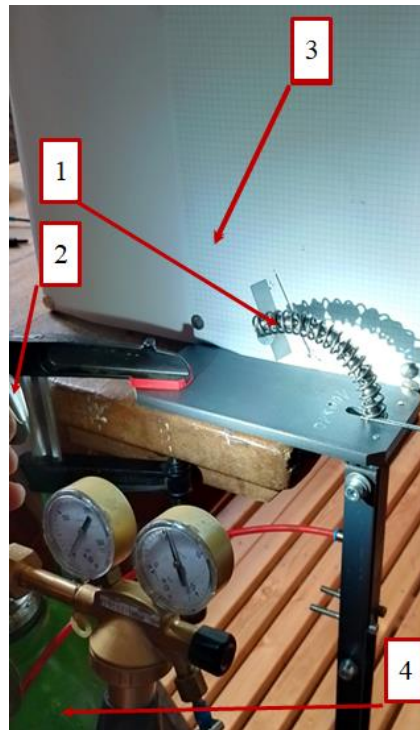
- 5) Lahev vody je zvážena.
- 6) Pro zjištění síly úchopu je změřená hmotnost vynásobena gravitačním zrychlením Země.
- 7) Hodnota síly úchopu je zaznamenána do tabulky.

Postup je opakován desetkrát pro různé hodnoty tlaků v pneumotoru (6 bar, 7 bar, 8 bar, 9 bar, 10 bar).

Z naměřených hodnot u určitého tlaku je vypočtena průměrná hodnota, která je zaznamenána do grafu. Zaznamenanými body je proložena regresní přímka a zjištěn její popis.

4.3.2 Měření úhlu natočení konce ÚP

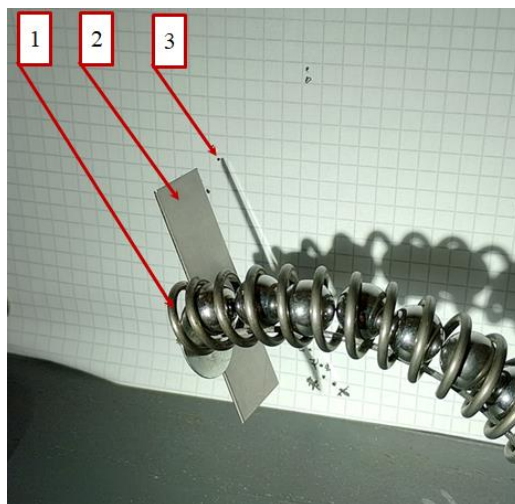
Cílem měření je získat z naměřených dat regresní funkci, která bude popisovat závislost úhlu natočení na síle v lanku.



Obr. 30 Záznam bodů při změně tlaku

1 – ÚP, 2 – LED svítidla, 3 – Projekční plocha, 4 – Tlaková lahev

Pro provedení měření byla k chapadlu přisunuta projekční plocha a kolmo k ní byl umístěn zdroj světla. Při zapnutí zdroje světla vrhá ÚP stín na projekční plochu. Projekční plocha je opatřena čtverečkovým záznamovým papírem. Na konci ÚP je připevněna plechová destička, která vrhá stín v podobě úsečky. Po zaznamenání a propojení krajních bodů úsečky je možné změřit úhel natočení.



Obr. 31 Záznam polohy ÚP při změně tlaku

1 – ÚP, 2 – Plechová destička, 3 – Záznam polohy

Postup měření

- 1) Zaznamenání bodů výchozí polohy.
 - a. Tlak v jednočinném pneumotoru je nastaven na 0 barů
 - b. Zapnout zdroj světla
 - c. Zdroj světla se musí napolohovat tak, aby byl stín co nejvíce ostrý, viz obr. 26
 - d. Na milimetrový papír jsou zaznamenány krajní body stínu plechové destičky.
- 2) Zaznamenání ostatních poloh

Tlak v pneumotoru je zvýšen o 1 bar. Po ustálení polohy chapadla je provedeno zaznamenání polohy stejným způsobem jako v bodě 1)

Postup je opakován až do tlaku o hodnotě 10 barů.
- 3) Dvojice bodů odpovídajícím příslušnému tlaku jsou propojeny úsečkou. Následně je změřen úhel natočení ÚP a zaznamenán do tabulky.
- 4) Pro regresní funkci, kterou se proloží naměřená data, se dá předpokládat lineární závislost.

4.4 Výsledky

Naměřená data a další úprava hodnot proběhla v softwaru Microsoft Excel.

4.4.1 Naměřené hodnoty síly úchopu ÚP

Tab. 4 Analýza dat síly úchopu v závislosti na síle v lanku

číslo měření	Tlak v pneumotoru [MPa]		Tlak v pneumotoru [MPa]		Tlak v pneumotoru [MPa]		Tlak v pneumotoru [MPa]		Tlak v pneumotoru [MPa]	
	0,6		0,7		0,8		0,9		1	
	Síla v lanku [N]		Síla v lanku [N]		Síla v lanku [N]		Síla v lanku [N]		Síla v lanku [N]	
	67,858		79,168		90,478		101,788		113,097	
	m [g]	Fu [N]	m [g]	Fu [N]	m [g]	Fu [N]	m [g]	Fu [N]	m [g]	Fu [N]
1	705	6,916	832	8,162	986	9,673	1080	10,595	1219	11,958
2	697	6,838	867	8,505	1054	10,34	1108	10,869	1166	11,438
3	723	7,093	816	8,005	1009	9,898	1097	10,762	1231	12,076
4	719	7,053	842	8,26	1011	9,918	1086	10,654	1098	10,771
5	669	6,563	895	8,78	945	9,27	1101	10,801	1150	11,282
6	650	6,377	840	8,24	987	9,682	1075	10,546	1196	11,733
7	737	7,23	792	7,77	965	9,467	1032	10,124	1143	11,213
8	724	7,102	809	7,936	1020	10,006	1105	10,84	1189	11,664
9	743	7,289	869	8,525	994	9,751	1090	10,693	1182	11,595
10	686	6,73	873	8,564	1002	9,83	1054	10,34	1168	11,458
průměr. hod.	705,3	6,919	843,5	8,275	997,3	9,784	1082,8	10,622	1174,2	11,519

4.4.2 Naměřené hodnoty úhlu natočení konce ÚP

Tab. 5 Hodnoty úhlu natočení konce ÚP

č. měření	1	2	3	4	5
p [bar]	φ [°]	φ [°]	φ [°]	φ [°]	φ [°]
0	0	0	0	0	0
1	0,5	1,5	1,5	1	1
1,5	6,5	6	7,5	7	6
2	12,5	15	16	17	16
2,5	17,5	23	24	23,5	23,5
3	22,5	33	33	32	31
3,5	34	43	45	44	43
4	49	57	57	57	58
4,5	58	66	70	66,5	69
5	67	82	81	83,5	79
6	88	84	85,5	87	88
7	95,5	95	91,5	95	93
8	100	97	94	98	96
10	105	101	97	101	99

V úseku od 1 – 5 barů byla změna nejvýraznější, proto byl zvolen menší přírůstek tlaku mezi zaznamenáváním polohy bodů destičky.

Hodnoty úhlu φ při hodnotách tlaku 8–10 barů se příliš neliší. Mezi těmito hodnotami došlo k vyčerpání zdvihu pneumotoru, a proto nedocházelo k dalším změnám.

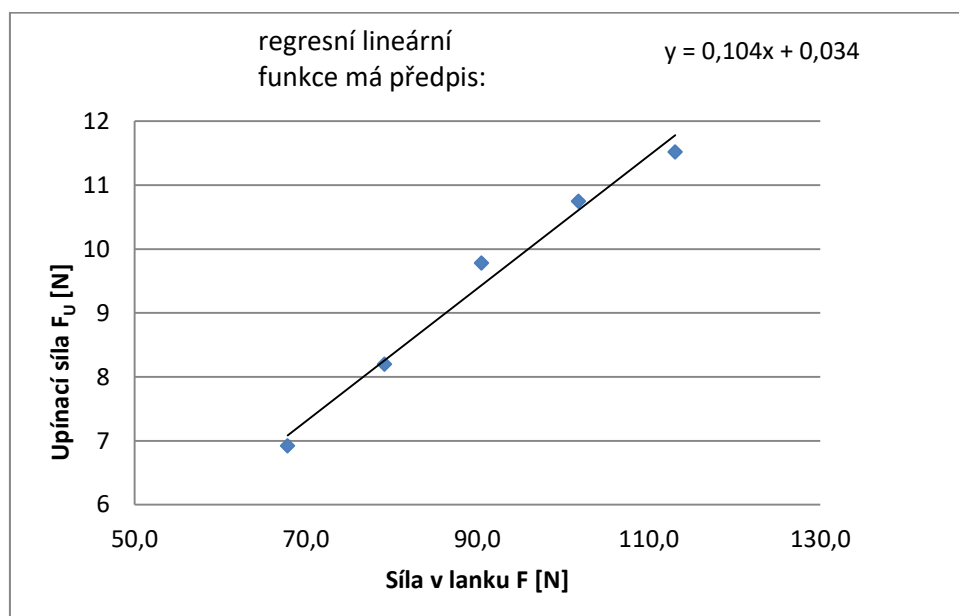
Z daného zjištění vyplývá i skutečnost, že úhel ohybu KSCH se nemění závislostí (4.1).

Tato chyba je způsobená vůlí kuliček uvnitř pružiny a jejich vzájemnému posunu z osově roviny chapadla. Ze sloupce kuliček, kde jsou kuličky umístěny přesně v osově rovině chapadla, se stává sloupec, ve kterém kuličky střídavě vybočují do obou směrů kolmých na osovou rovinu. Tím je zkrácena délka sloupce kuliček, který již nedefinuje počáteční délku pružiny. Před začátkem deformačního procesu ÚP musí dojít k vymezení vůlí. Proto je výsledný matematický popis úhlu deformace závislého na tahové síle v lanku nepřesný.

4.4.3 Grafické znázornění výsledků

Měření síly úchopu

Naměřená data jsou zaznamenána do grafu a proložena regresní funkcí.

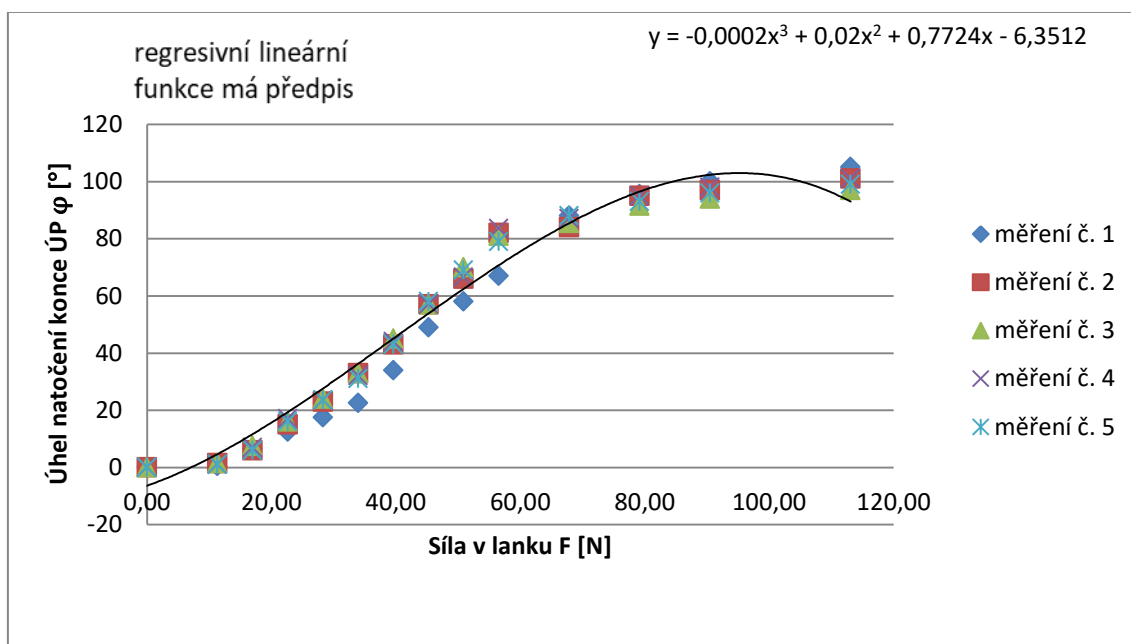


Graf 1 Regresní lineární funkce proložená naměřenými hodnotami síly úchopu ÚP

Závislost síly úchopu na síle v lanku je popsána vztahem:

$$F_U = 0,104F + 0,034 \quad (4.1)$$

4.4.4 Grafické znázornění úhlu natočení konce ÚP



Graf 2 Závislost úhlu natočení na síle v lanku

Z grafu 2 je zřejmé, že lineární regresní funkce by nebyla dostatečně přesná pro popsání souboru naměřených dat. Vhodnější je proložit hodnoty funkcí polynomu 3. stupně.

Proložením naměřených hodnot polynomem třetího stupně vychází závislost úhlu natočení ÚP na síle v lanku uvedené ve vztahu:

$$\varphi = -0,0002F^3 + 0,02F^2 + 0,7724F - 6,3512 \quad (4.2)$$

Z grafu je vidět, že největší změna deformace byla při použití tlaku 3–6 barů. Z toho vyplývá, že je nejvýhodnější používat KSCH v tomto rozmezí.

Zhodnocení výsledků měření:

Z prvních měření nového typu Soft chapadla je zřejmé, že KSCH je schopno přizpůsobovat svůj tvar ke kulovým předmětům. Pro předměty se složitějšími tvary musí být u KSCH vyměněna pružina za pružinu s menší tuhostí (s menším průměrem drátu). Po této úpravě by KSCH mohlo svůj tvar přizpůsobovat lépe.

Závěr

Cílem BP bylo provést rešerši současného stavu problematiky Soft chapadel, ve variantách navrhnout řešení ÚP a pro vybraný princip zpracovat 3D model konstrukčního řešení s podporou počítačového modelování. Nedílnou součástí práce bylo zhotovení funkčního vzorku ÚP a za pomoci experimentu zhodnotit funkční vlastnosti a přínosy navrženého řešení.

Teoretická část práce se nejprve věnuje obecnému přehledu vybraných Soft chapadel. Ta se rozdělují podle způsobu, jakým je uchopení realizováno. BP se zaměřuje na rozdělení Soft chapadel na aktivní a pasivní. Dále se zabývá průzkumem nejčastějších typů Soft chapadel, jimiž jsou FEA, chapadla s vakuovým polštářem, Fin-Ray chapadla a Soft chapadla ovládaná šlachami. Důraz byl kladen na popis funkce chapadel a možný budoucí vývoj daného typu chapadla. V závěru teoretické části je shrnutí funkčních vlastností chapadel, na které se daná část práce zaměřuje.

Praktická část se věnuje vlastnímu návrhu KSCH. Nejprve se zaměřuje na výběr vhodného pohonu ÚP chapadla. Pohonem ÚP byl zvolen jednočinný pneumotor s horizontálním umístěním. Výkresová dokumentace byla zpracována pomocí modelovacího softwaru Creo parametric, a to ve 2D i 3D formě návrhu.

Součástí práce byla konstrukce vlastního funkčního vzorku KSCH s vertikální pneumotorem, která se nejprve zabývá popisem jednotlivých částí, popisem testů a jednotlivých experimentů k otestování funkčních vlastností chapadla.

Důvodem výběru vlastního návrhu ÚP byl malý počet konstrukčních prvků, potenciál šetrného úchopu a snadné ovládání ÚP při ověření samotné upínací funkce jednotlivých předmětů.

První experiment byl zaměřen na přizpůsobení tvaru ÚP k tvaru testovacího vzorku. Dalším experimentem bylo zjištění velikosti síly potřebné k uvolnění předmětu z úchopu při maximálním tlaku vzduchu v pneumotoru 1 MPa a zároveň bylo provedeno měření pro zjištění závislosti funkčních vlastností na tahové síle v lanku KSCH. Jednalo se o síly úchopu ÚP a úhlu natočení konce ÚP.

Experiment byl proveden s pozitivním závěrem a z výsledku měření síly úchopu vyšla lineární závislost na tahové síle v lanku, jak bylo predikováno. Měření bylo dostatečné k určení matematických závislostí sledované veličiny (viz rovnice 4.1).

Do budoucna by bylo vhodné otestovat funkční vlastnosti KSCH s tlačnými pružinami odlišných parametrů, tj. s rozdílnými tuhostmi, průměry a tvary pružin a také velikostmi a tvary valivých elementů uvnitř pružiny, a to k získání dalších mezních hodnot pro použití KSCH v praxi.

Výzvou by byla optimalizace upevnění lanka v pružině pro snížení pasivních odporů a možnost využití elastického materiálu odolného proti opotřebení pro vnější obal ÚP.

Seznam použité literatury

- [1] NOVOTNÝ, F a M HORÁK. Efektory průmyslových robotů, skripta TU. *Liberec, TUL*. 2015, (s 28).
- [2] FANTONI, G, D GABELLONI a J TILLI. How to design new grippers by analogy. *Department of Mechanical, Nuclear and Production Engineering, University of Pisa, Report*. 2012.
- [3] SHINTAKE, Jun, Vito CACUCCILO, Dario FLOREANO a Herbert SHEA. Soft robotic grippers. *Advanced materials*. 2018, **30**(29), 1707035. ISSN 0935-9648.
- [4] ZAIDI, Shadab, Martina MASELLI, Cecilia LASCHI a Matteo CIANCHETTI. Actuation Technologies for Soft Robot Grippers and Manipulators: A Review. *Current Robotics Reports* [online]. 2021, **2**(3), 355–369. ISSN 2662-4087. Dostupné z: doi:10.1007/s43154-021-00054-5
- [5] JOSHUA AARON LESSING, RYAN KNOPF, KEVIN ALCEDO, DANIEL VINCENT HARBURG, a SARV PARTEEK SINGH. US20190217481 – MĚKKÁ ROBOTICKÁ CHAPADLA PRO NEPŘEHLEDNÁ UCHOPOVACÍ PROSTŘEDÍ, POHYBY S VYSOKÝM ZRYCHLENÍM, MANIPULACI S POTRAVINAMI A AUTOMATIZOVANÉ SYSTÉMY SKLADOVÁNÍ A VYHLEDÁVÁNÍ [online]. 20190217481. 18. červenec 2019. [vid. 2023-03-05]. Dostupné z: https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=US248873953&_fid=US200946502
- [6] STAFF, Robotics 24/7. Soft Robotics Adds Features to mGrip Modular Gripping System for Food Handling. *Robotics 24/7* [online]. [vid. 2023-03-06]. Dostupné z: https://www.robotics247.com/article/soft_robotics_adds_features_to_mgrip_modular_gripping_system_for_food_handling
- [7] *mGrip Modular Gripping System* [online]. 2021 [vid. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=qhxvRWmSTRg>
- [8] Jamming Gripper. *Creative Machines Lab - Columbia University* [online]. [vid. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://www.creativemachineslab.com/jamming-gripper.html>
- [9] [HTTPS://KURZWEILAI.NET](https://www.kurzweilai.net). *Chapadlo využívající měkkou robotiku « Kurzweil* [online]. [vid. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://www.kurzweilai.net/a-gripper-using-soft-robotics>
- [10] BROWN, Eric, Nicholas RODENBERG, John AMEND, Annan MOZEIKA, Erik STELTZ, Mitchell R. ZAKIN, Hod LIPSON a Heinrich M. JAEGER. Universal robotic gripper based on the jamming of granular material. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [online]. 2010, **107**(44), 18809–18814. Dostupné z: doi:10.1073/pnas.1003250107

- [11] Bionic Fish - Biological Background Information. *Festo Bionics4Education* [online]. [vid. 2023-03-03]. Dostupné z: <https://www.bionics4education.com/startseite/bionic-fish-assembly-instructions/bionic-fish-biological-background-information>
- [12] PFAFF, Ondřej. Aplikace Fin Ray principu pro automatizaci výrobních procesů. 2010.
- [13] CROOKS, Whitney, Shane ROZEN-LEVY, Barry TRIMMER, Chris ROGERS a William MESSNER. Passive gripper inspired by *Manduca sexta* and the Fin Ray® Effect. *International Journal of Advanced Robotic Systems* [online]. 2017, **14**(4), 1729881417721155. ISSN 1729-8806. Dostupné z: doi:10.1177/1729881417721155
- [14] DEEP SINGH DHILLON a ARUN MARSONIA. CA3124953 ZAŘÍZENÍ DRPAČE NA HOUBY A ZAŘÍZENÍ NA SKLIZENÍ HOUB [online]. 3124953. 17. leden 2022. Kanada. [vid. 2023-03-05]. Dostupné z: https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CA348242583&_cid=P20-LEV801-70577-1
- [15] HUSSAIN, Irfan, Oraib AL-KETAN, Federico RENDA, Monica MALVEZZI, Domenico PRATTICIZZO, Lakmal SENEVIRATNE, Rashid K ABU AL-RUB a Dongming GAN. Design and prototyping soft-rigid tendon-driven modular grippers using interpenetrating phase composites materials. *The International Journal of Robotics Research* [online]. 2020, **39**(14), 1635–1646. ISSN 0278-3649. Dostupné z: doi:10.1177/0278364920907697
- [16] MUOIO, Danielle. Researchers want to grow human tendons on an incredibly advanced robotic hand. *Business Insider* [online]. [vid. 2023-03-31]. Dostupné z: <https://www.businessinsider.com/researchers-to-grow-tendon-on-robot-hand-2016-2>
- [17] YUE CHEN, ANTHONY L. GUNDERMAN, a JEREMY A. COLLINS. US20220142050 Měkký robotický uchopovač pro sběr bobulí [online]. 20220142050. 12. květen 2022. Spojené státy americké. [vid. 2023-04-01]. Dostupné z: https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=US360586716&_cid=P12-LFXQOD-68957-1
- [18] *Soft gripper picks berries with little damage - ASME* [online]. [vid. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://www.asme.org/topics-resources/content/berry-picking-today,-robotic-surgery-tomorrow>

Seznam obrázků

Obr. 1 Fluidní Soft chapadla.....	15
Obr. 2 Příklad aplikací měkkého fluidního chapadla[6, 7].....	16
Obr. 3 Granulové chapadlo[8] –.....	18
Obr. 4 Síla úchopu granulového chapadla pro různé tvary [10].....	19
Obr. 5 Fin-Ray gripper [13].....	20
Obr. 6 Schéma chapadla ovládaného šlachami [15].....	22
Obr. 7 Robotická ruka [16].....	22
Obr. 8 Proces sklizení choulolistivých bobulovin [18]	24
Obr. 10 Silová dvojice na konci ÚP	27
Obr. 11 Zjednodušený model ÚP	28
Obr. 12 Princip deformace ÚP	29
Obr. 13 Fáze 1 – Postupné přibližování ÚP k objektu (legenda odpovídá celkovému posunutí v m).....	31
Obr. 14 Fáze 2 – Prvotní kontakt ÚP s objektem (legenda odpovídá celkovému posunutí v m).....	32
Obr. 15 Fáze 3 – Postupné uchopování objektu (legenda odpovídá celkovému posunutí v m).....	32
Obr. 16 Fáze 4 – Finální uchopení objektu (legenda odpovídá celkovému posunutí v m)	33
Obr. 17 Schéma principu ovládnání ÚP vertikálně umístěným pneumotorem	34
Obr. 18 Schéma principu ovládnání ÚP horizontálně umístěným pneumotorem	35
Obr. 19 Schéma principu ovládnání ÚP kyvným pohonem	36
Obr. 20 Působení zrychlení v nejméně příznivém okamžiku.....	39
Obr. 21 Jednočinný pneumotor AEN–25	40
Obr. 22 KSCH bez krytu	41
Obr. 23 KSCH v řezu	42
Obr. 24 Zajištění konce lanka.....	42
Obr. 25 Zakrytované chapadlo	43
Obr. 26 KSCH připojené robotu KUKA KR 4 AGILUS	43
Obr. 27 Zkušební prototyp KSCH.....	44
Obr. 28 Funkční zkouška upnutí sklenice	46
Obr. 29 Funkční zkouška upnutí grapefruitu.....	46

Obr. 30 Funkční zkouška upnutí ovoce grapefruitu	47
Obr. 31 Záznam bodů při změně tlaku	49
Obr. 32 Záznam polohy ÚP při změně tlaku	50

Seznam grafů

Graf 1 Regresní lineární funkce proložená naměřenými hodnotami síly úchopu ÚP	50
Graf 2 Závislost úhlu natočení na síle v lanku	51

Seznam tabulek

Tab. 1 Funkční vlastnosti výše uvedených Soft chapadel.	25
Tab. 2 Výhody a nevýhody vybraných principů	38
Tab. 3 Seznam součástí vlastního KSCH	45
Tab. 4 Analýza dat síly úchopu v závislosti na síle v lanku	48
Tab. 5 Hodnoty úhlu natočení konce ÚP	49

Seznam příloh

Příloha č. 1 Výkresová dokumentace	
------------------------------------	--