

Návrh adaptivního úchopu průmyslového robotu

Bc. Lukáš Miškařík

Diplomová práce
2024

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav automatizace a řídicí techniky

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Bc. Lukáš Miškařík
Osobní číslo: A22331
Studijní program: N0714A150006 Automatické řízení a informatika v průmyslu 4.0
Forma studia: Prezenční
Téma práce: Návrh adaptivního úchopu průmyslového robotu
Téma práce anglicky: Adaptive gripper design of an industrial robot

Zásady pro vypracování

- Vypracujte literární rešerši na téma robotické systémy a úchopy průmyslových robotů.
- Navrhněte koncept adaptivního úchopu.
- Porovnejte navržený koncept s komerčně využívaným řešením.
- Ověřte funkčnost navrženého adaptivního úchopu.
- Diskutujte navržené řešení.

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Ian GIBSON, David ROSEN a Brent STUCKER. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. New York: Springer, 2015. ISBN 978-1-4939-2112-6.
2. Andreas GEBHARDT a Jan-Steffen HÖTTER. Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing. Munich: Carl Hanser Verlag, 2016. ISBN 978-1-56990-582-1.
3. Vishu SHAH. Handbook of Plastics Testing Technology. New York: John Wiley & Sons, 1998. ISBN 0-471-18202-8.
4. John J. CRAIG. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. Edinburgh: Pearson Education, 2014. ISBN 978-1-292-04004-2.
5. Jana KUBANOVÁ. Statistické metody pro ekonomickou a technickou praxi. Bratislava: STATIS, 2004. ISBN 80-85659-37-9.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Aleš Mizera, Ph.D.**
Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání diplomové práce: **8. prosince 2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2024**

doc. Ing. Jiří Vojtěšek, Ph.D. v.r.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 8. prosince 2023

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne

Lukáš Miškařík v.r.
.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem adaptivního úchopového systému průmyslového robotu, který flexibilně reaguje na různé tvary a velikosti dílů během manipulace. Adaptivní úchopový systém je schopen optimálně uchopovat různé předměty bez nutnosti pevně definovaných předprogramovaných sekvencí. Tento způsob odebrání různorodých dílů nabízí zvýšenou efektivitu v průmyslových aplikacích, zároveň snižuje náklady a zvyšuje produktivitu výrobního procesu. Diplomová práce obsahuje návrh, implementaci a testování adaptivního úchopu. Na závěr je ověřena schopnost úchopového systému přizpůsobit se různým podmínkám a porovnání s komerčně dostupným řešením.

Klíčová slova: adaptivní koncové efekторы, průmyslové roboty, měkká robotika, jamming gripper, robotické manipulační systémy.

ABSTRACT

The master thesis deals with the design of an adaptive gripping system for an industrial robot that flexibly responds to different shapes and sizes of parts during handling. The adaptive gripping system is able to optimally grasp different objects without the need for fixed preprogrammed sequences. This method of handling of different parts offers increased efficiency in industrial applications while reducing costs and increasing the productivity of the production process. The master thesis includes the design, implementation and testing of the adaptive gripper. Finally, the ability of the gripper system to adapt to different conditions is verified and compared with commercially available solutions.

Keywords: Adaptive end effectors, industrial robots, soft robotics, jamming grippers, robotic handling systems.

Poděkování

Rád bych vyjádřil své upřímné poděkování všem, kteří mi pomáhali a podporovali mě během psaní této diplomové práce. Speciální dík patří vedoucímu mé diplomové práce, doc. Ing. Alešovi Mizerovi, Ph.D., za jeho odborné vedení, cenné rady a neustálou podporu při vytváření práce.

Motto

"I'm a great believer in luck, and I find the harder I work the more I have of it."

--Thomas Jefferson--

Prohlášení

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 ROBOTICKÉ SYSTÉMY	11
1.1 AKČNÍ SYSTÉM PRŮMYSLVÝCH ROBOTŮ A MANIPULÁTORŮ	11
1.2 PRŮMYSLVÉ ROBOTY	13
1.2.1 Antropomorfní uspořádání	13
1.2.2 SCARA uspořádání	14
1.2.3 Kartézské uspořádání	14
1.2.4 Delta uspořádání.....	15
1.3 SERVISNÍ ROBOTY	16
1.4 KONCOVÉ EFEKTORY	16
1.4.1 Technologické výstupní efekty	17
1.4.2 Manipulační koncové efekty – chapadla.....	18
1.4.2.1 Mechanické úchopové prvky	18
1.4.2.2 Magnetické úchopové prvky.....	19
1.4.2.3 Podtlakové úchopové prvky.....	20
1.4.2.4 Speciální úchopové prvky.....	21
2 ADAPTIVNÍ KONCOVÉ EFEKTORY	22
2.1 BEZPRSTÁ MĚKKÁ CHAPADLA (JAMMING GRIPPER).....	22
2.1.1 Základní části	23
2.1.1.1 Membrána	23
2.1.1.2 Náplň.....	23
2.1.1.3 Zdroj podtlaku.....	24
2.1.2 Techniky výroby membrány	24
2.1.3 Aplikace a použití	25
2.1.4 Výhody bezprstých měkkých chapadel.....	26
2.1.5 Limitace bezprstých měkkých chapadel	26
2.2 DALŠÍ TYPY MĚKKÝCH CHAPADEL	27
2.2.1 Dvouprstá měkká chapadla	27
2.2.2 Víceprstá měkká chapadla.....	27
2.2.3 Mnoho článková měkká chapadla	28
II PRAKTICKÁ ČÁST	29
3 CÍLE PRÁCE	30
4 NÁVRH ADAPTIVNÍHO KONCOVÉHO EFEKTORU	31
4.1 VOLBA KONSTRUKCE KONCOVÉHO EFEKTORU	31
4.2 PROTOTYP	31
4.3 FINÁLNÍ NÁVRH KONCOVÉHO EFEKTORU.....	33
4.3.1 Pevné prvky.....	33
4.3.2 Membrána	34
4.3.3 Filtrační kapsle	35
4.3.4 Ovládání gripperu.....	36
4.3.5 Náplň membrány	37

4.4	FORMA PRO VÝROBU MEMBRÁNY	38
5	VÝROBA KONCOVÉHO EFEKTORU	39
5.1	VÝROBA PEVNÝCH ČÁSTÍ	39
5.2	VÝROBA MEMBRÁNY	40
5.2.1	Příprava formy	40
5.2.2	Příprava silikonu	41
5.2.3	Odlévání silikonu	41
5.2.4	Zesíťování silikonu	42
5.3	SESTAVENÍ KONCOVÉHO EFEKTORU	43
6	OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI NAVRŽENÉHO KONCOVÉHO EFEKTORU	44
6.1	MĚŘENÍ MAXIMÁLNÍ SÍLY UCHOPENÍ	44
6.1.1	Testovací díly	45
6.1.2	Výsledky z testování	46
6.1.3	Charakteristiky působení síly na testovaný díl.....	46
6.2	HMOTNOST ADAPTIVNÍHO GRIPPERU	50
7	TESTOVÁNÍ NA PRŮMYSLOVÉM ROBOTU	51
7.1	MECHANISMUS RYCHLÉ VÝMĚNY NÁSTROJE	51
7.2	OVLÁDÁNÍ KONCOVÉHO EFEKTORU	52
7.3	DEMONSTRACE ADAPTABILITY KONCOVÉHO EFEKTORU	53
7.4	PŘESNÉ UCHOPENÍ A POLOŽENÍ DÍLŮ	55
7.4.1	Tvorba programu robotu	56
7.4.2	Testování na reálném robotu	59
7.5	ŽIVOTNOST MEMBRÁNY	60
8	POROVNÁNÍ S KOMERČNĚ DOSTUPNÝM ŘEŠENÍM.....	61
8.1	FESTO FLEXSHAPEGRIPPER	61
8.2	EMPIRE ROBOTICS VERSABALL.....	63
8.3	FORMHAND FH-R150.....	64
9	SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ.....	65
9.1	FLEXIBILITA A ADAPTIBILITA	65
9.2	POUŽITÉ MATERIÁLY	65
9.2.1	Materiály pro náplň membrány	65
9.3	POUŽITÍ V PRŮMYSLU	65
	ZÁVĚR	66
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	67
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	71
	SEZNAM OBRÁZKŮ	72
	SEZNAM TABULEK.....	74
	SEZNAM GRAFŮ	75
	SEZNAM PŘÍLOH.....	76

ÚVOD

V dnešní době se průmyslové aplikace neustále vyvíjejí směrem k vyšší efektivitě a adaptabilitě. S tímto trendem roste i poptávka po sofistikovanějších technologiích, které mohou zvládat komplexní úkoly v dynamických a neustále se měnících podmínkách. Tato práce se zaměřuje na návrh a implementaci adaptivního úchopového systému pro průmyslové roboty, který je schopen flexibilně reagovat na různé tvary a velikosti objektů, a to bez potřeby pevně definovaných předprogramovaných sekvencí. Adaptivní systém úchopu nabízí potenciál nejen pro zvýšení efektivity a snížení nákladů v průmyslových aplikacích, ale také pro rozšíření možností robotických systémů v oblastech, kde tradiční úchopové systémy selhávají.

Základem úchopového systému je bezprsté chapadlo, které umožňuje úchop různě tvarovaných předmětů prostřednictvím adaptace svého tvaru. To je dosaženo využitím deformovatelné membrány naplněné materiálem jako jsou mletá káva, plastový granulát nebo kuličky z expandovaného polystyrenu (EPS), kdy adaptivní prvek změni svou tuhost při působení podtlaku. Systém dále obsahuje pneumatický řídicí mechanismus umožňující rychlou změnu mezi sáním a vypouštěním vzduchu, což zajišťuje efektivní a rychlé uchopení nebo uvolnění objektů.

Práce je strukturována do několika částí. V teoretické části jsou představeny základní principy robotiky, současné typy koncových efektorů a jejich omezení. Následuje popis bezprstého chapadla jako typ adaptivního efektoru, včetně návrhu, výběru materiálů a metod výroby. Praktická část práce se zaměřuje na návrh, výrobu a testování navrženého adaptivního úchopu. V rámci práce byla také vytvořena silikonová membrána, která slouží jako adaptivní prvek úchopu. Dále byly realizovány série testů zaměřených na hodnocení uchopovací síly, přesnosti a opakovatelnosti úchopu. Na závěr byl navržený adaptivní úchop porovnán s komerčním řešením.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ROBOTICKÉ SYSTÉMY

Robotické systémy lze definovat z několika úhlů pohledu. Obecně je robotika věda zabývající se návrhem, výrobou a aplikacemi robotů, kde roboty mohou vykonávat lidskou práci nebo ji podporovat a zvyšovat komfort a ergonomii. Robotika úzce souvisí s elektronikou, mechanikou a softwarem [1].

Robotický systém se dá obecně definovat jako:

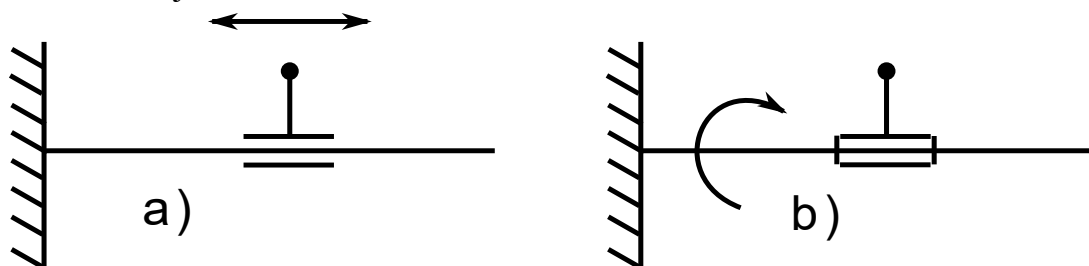
Soustava **ideálně tuhých** (nebo pružných) mechanických těles vázaných mezi sebou navzájem **kinematickými dvojicemi** umožňujícími jejich vzájemný přímo řízený nebo vazbami vyvolaný **cílevědomý pohyb** za účelem jejich přemístění v prostoru na definované místo případně definovanou rychlostí nebo s definovaným zrychlením [2].

1.1 Akční systém průmyslových robotů a manipulátorů

Akční systém stacionárních průmyslových robotů a manipulátorů se sériovou kinematikou funguje na principu spojení více pohyblivých částí, tzv. binárních členů, které jsou propojeny pomocí kinematických dvojic (KD), což jsou spoje umožňující pohyb [3].

Každá taková kinematická dvojice obvykle přináší jednu možnost pohybu neboli jeden stupeň volnosti. Konstrukce těchto robotů obvykle nezahrnuje kinematické dvojice s více stupni volnosti, jako jsou válcové nebo rovinné dvojice, ani nejsou časté spojení dvou otočných dvojic v jediný kloub (sférická KD), jelikož instalace pohonů a měřicích systémů v takových konfiguracích bývá komplikovaná. Tento problém se obvykle řeší umístěním rotačních kinematických dvojic za sebe s určitým pootočením, často 90°, což usnadňuje připojení pohonů, ale zároveň zvyšuje délku a hmotnost celého systému [3].

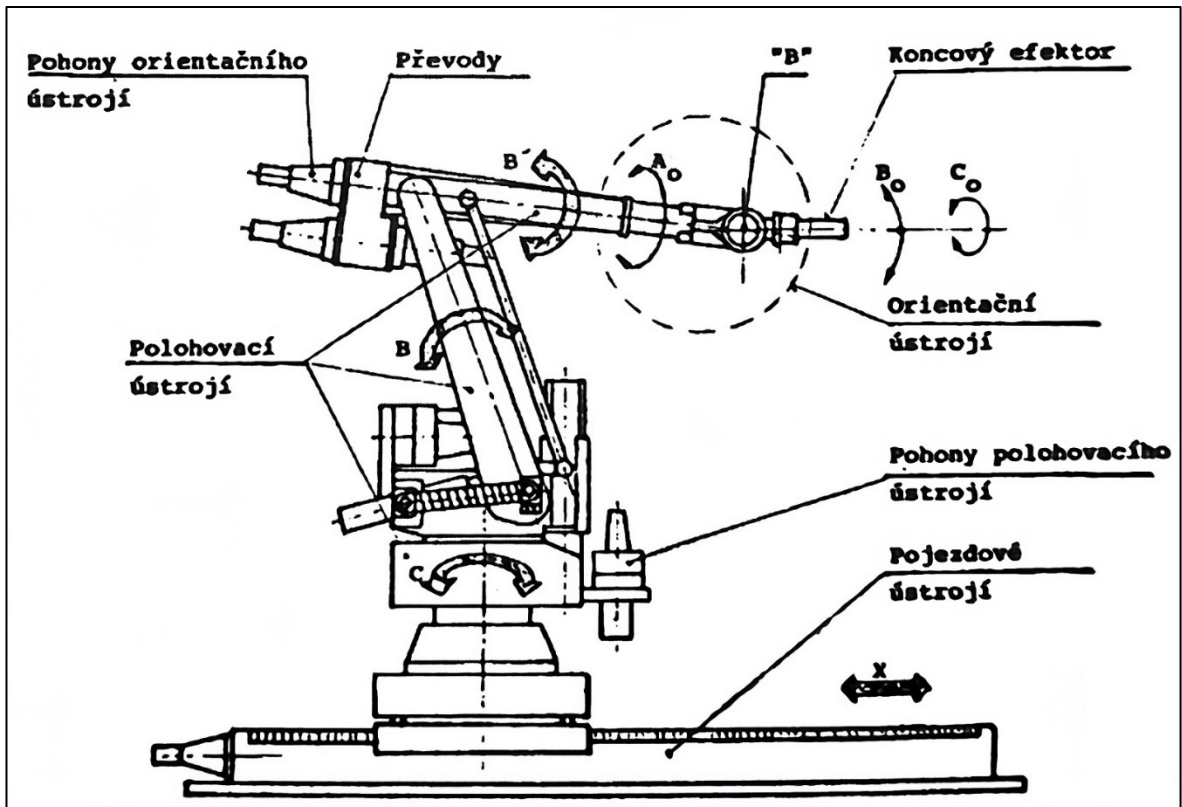
V konstrukci těchto robotů se tedy typicky využívají posuvné (translační) a otočné (rotační) kinematické dvojice.



Obrázek 1: Schématické znázornění translační KD (a) a rotační KD (b) [vlastní zdroj]

Akční systém robotu se z konstrukčního hlediska rozděluje na:

- pojezdové ústrojí,
- polohovací ústrojí,
- orientační ústrojí,
- koncové efekty (výstupní hlavice).



Obrázek 2: Rozdělení akčního systému průmyslového robotu [3]

Podle typu aplikace se roboty dělí do dvou hlavních kategorií: průmyslové roboty a servisní roboty.

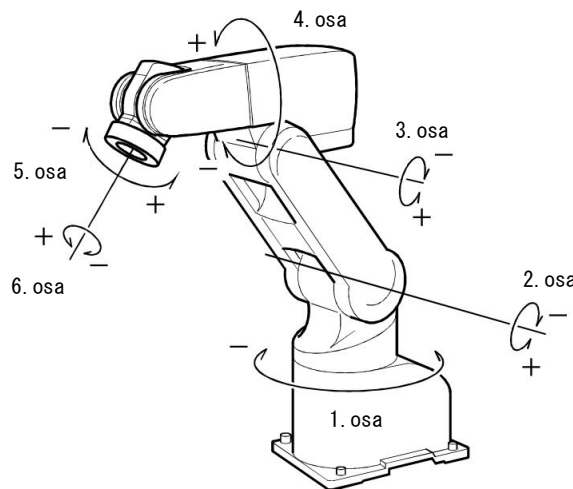
1.2 Průmyslové roboty

Průmyslové roboty jsou navrženy a používány převážně pro automatizaci výrobních procesů. Charakterizují je manipulační schopnosti, automatická činnost, snadná změna programu, univerzálnost použití a zpětná vazba [3].

Podle konstrukce dělíme průmyslové roboty do několika skupin.

1.2.1 Antropomorfní uspořádání

Roboty s antropomorfním uspořádáním jsou navrženy tak, aby připomínaly lidskou paži. Tyto roboty mají obvykle šest os, ale v závislosti na výrobci a zamýšleném použití může být počet os vyšší nebo nižší. S narůstajícím počtem os se zvyšuje přirozenost pohybu robota, čímž se snižuje jeho "robotický" charakter. Například lidská paže bez započítání prstů disponuje sedmi stupni volnosti. Replikace všech jemných pohybů, které může lidská ruka provést, by byla pro průmyslového robota příliš náročná a drahá. V praxi se ukazuje, že šest stupňů volnosti v robotickém rameni obvykle postačuje pro vykonání většiny úkolů [4].



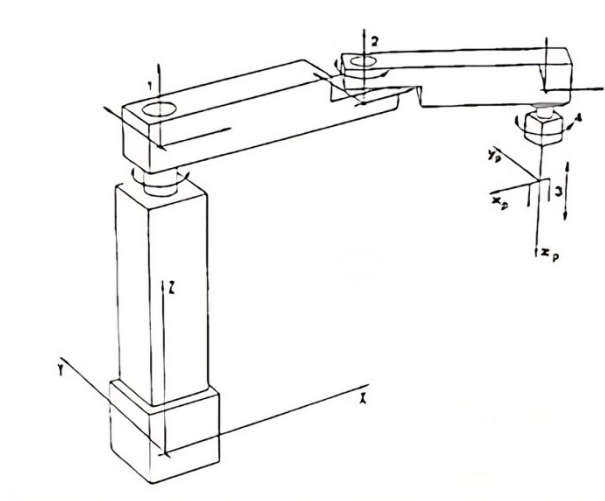
Obrázek 3: Šestiosý robot [5]

1.2.2 SCARA uspořádání

Roboty typu SCARA (Selective Compliance Articulated Robot Arm), jsou populární díky své schopnosti kombinovat volný pohyb a udržovat tuhost ve třech osách při současném dodržování pružnosti v poslední ose. Tato specifická flexibilita je ideální pro úlohy jako jsou pick and place, třídění a montáž [6].

SCARA roboty jsou navrženy s dvěma paralelními rameny, která se pohybují v jedné rovině, s poslední osou kolmou na ostatní [6].

Na rozdíl od jiných průmyslových robotů nabízí SCARA roboty cenově výhodnější řešení, díky čemuž se staly jednou z nejoblíbenějších pro automatizaci montážních procesů [6].



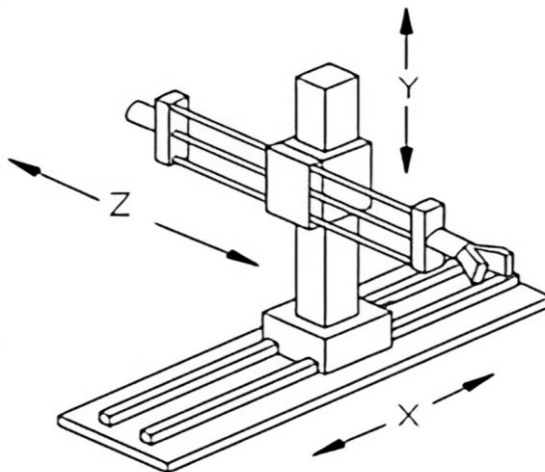
Obrázek 4: SCARA robot [7]

1.2.3 Kartézské uspořádání

Kartézské roboty jsou charakteristické svým uspořádáním s minimálně třemi lineárními osami, které jsou vzájemně kolmé. Tato specifická konfigurace zajišťuje robotům vysokou míru tuhosti, což přispívá k jejich vynikající přesnosti a schopnosti opakovat stejné pohyby s vysokou precizností [8].

Díky těmto vlastnostem jsou kartézské roboty ideální pro širokou škálu aplikací, včetně CNC obrábění, 3D tisku, plazmového a laserového řezání, obrábění dřeva, montáže tištěných obvodových desek, inspekčních úkonů a manipulačních operací typu pick and place [9].

Navíc, tyto roboty často disponují koncovým efektozem, které umožňuje přidání rotačního pohybu, což rozšiřuje jejich flexibilitu a uplatnění v praxi [9].



Obrázek 5: Kartézský robot [4]

1.2.4 Delta uspořádání

Manipulátory s delta uspořádáním jsou známé svým jedinečným designem, který připomíná vzhled pavouka. Na rozdíl od tradičních robotů s osami uspořádanými v sérii, mají delta roboty paralelně uspořádané osy. Toto uspořádání se skládá z několika propojených paralelogramů, které jsou připojeny k společné základně, často umístěné nad dopravníkem. Díky koncentraci všech motorů v základně robota jsou jeho ramena mimořádně lehká, což umožňuje vysoce jemné, přesné a rychlé pohyby [4].

Tyto charakteristiky činí roboty s delta uspořádáním ideálními pro aplikace vyžadující rychlou a přesnou manipulaci, jako je umístování předmětů (pick and place), dávkování lepidla, pájení, balení, nebo použití v čistých prostorech bez prachu [8].



Obrázek 6: Delta robot [10]

1.3 Servisní roboty

Globální trendy v robotice ukazují na rozvoj robotů nejen v tradičních průmyslových aplikacích, ale i výrazný růst v neprůmyslových sektorech. Nové kategorie robotů, zejména servisní roboty, jsou využívány pro široké spektrum služeb mimo výrobní procesy, například v extrémních podmínkách, kde je činnost pro člověka nebezpečná nebo nedostupná. Technologický pokrok umožňuje vývoj robotů s pokročilými funkcemi, včetně umělé inteligence a autonomního chování, což rozšiřuje možnosti jejich uplatnění [3].



Obrázek 7: Vlevo taktický robot [11], vpravo univerzální servisní robot [12]

I přes vysoké počáteční náklady a určitou nedůvěru veřejnosti, servisní roboty nacházejí stále širší uplatnění díky své schopnosti nahradit lidskou práci v nebezpečných nebo specifických prostředích. Každý servisní robot je obvykle navržen pro konkrétní úlohu, což z nich činí unikátní řešení pro různé aplikace. S rostoucím technologickým pokrokem a snižováním nákladů se očekává další expanze robotů do nových oblastí a aplikací [3].

1.4 Koncové efekty

Otevřený kinematický řetězec průmyslových robotů a manipulátorů končí specifickým pracovním ústrojím, známým jako koncový efektor nebo výstupní hlavice, jehož design a funkcionality jsou přizpůsobeny konkrétnímu účelu použití. Koncové efekty umožňují robotům vykonávat širokou škálu činností, mezi ně patří například:

- vkládání objektů do pracovního prostoru výrobních zařízení a jejich vyjímání,
- mezioperační manipulace,
- technologické operace,
- kontrolní operace,
- speciální práce.

Přestože termín "chapadlo" se běžně používá pro označení koncového efektoru, neodráží plně jeho rozmanitost a schopnosti, neboť koncové efekty mohou zahrnovat různé typy výstupních hlavic určených pro specifické úlohy. Výběr a aplikace koncového efektoru nijak významně neovlivňuje základní konstrukci robotu, stejně jako jeho orientační systémy, což umožňuje flexibilní přizpůsobení robotů různým aplikacím [3].

Z konstrukčního hlediska lze koncové efekty rozdělit na výstupní hlavice:

- technologické,
- manipulační,
- kombinované,
- speciální.

1.4.1 Technologické výstupní efekty

Mezi typické technologické operace, které průmyslové roboty a manipulátory vykonávají, patří elektrické svařování a aplikace ochranných materiálů či nátěrových hmot. Kromě těchto činností roboty často provádějí i další technologické operace, při kterých přímo zasahují do výrobního procesu s použitím speciálně upravených nástrojů nebo přímo strojů, jako jsou elektrické ruční brusky. Tyto operace umožňují robotům převzít činnosti vyžadující vysokou přesnost, opakovatelnost nebo operace v prostředích, která mohou být pro člověka nebezpečná či zdraví škodlivá [3].



Obrázek 8: Hlavice pro obloukové svařování [13]



Obrázek 9: Hlavice pro bodové svařování [14]

1.4.2 Manipulační koncové efekty – chapadla

Manipulační (úchopné) koncové efekty jsou klíčové pro průmyslové roboty a manipulátory, umožňují uchopování a manipulaci s objekty. Tyto efekty jsou navrženy specificky pro dané aplikace, často přímo koncovými uživateli. Důležitou součástí jsou úchopné prvky, které jsou přímo v kontaktu s objekty, a musí být přizpůsobeny jejich vlastnostem pro bezpečný a spolehlivý úchop [3].

Podle charakteru styku s objekty se úchopové prvky dělí podle následujícího klasifikačního schématu:

Úchopové prvky:	<u>mechanické:</u>	- pasivní:	- pevné a stavitelné prvky, - pružné a odpružené čelisti,
		- aktivní:	- s hydromotorem, - s pneumotorem, - s elektromotorem, - s elektromagnetem,
	<u>magnetické:</u>	- pasivní:	- permanentní magnety,
		- aktivní:	- elektromagnety,
	<u>podtlakové:</u>	- pasivní:	- deformační přísavky
		- aktivní:	- s vývěvou, - s ejektorem,
	<u>speciální</u>		

1.4.2.1 Mechanické úchopové prvky

Jsou to nejčastěji používané úchopové prvky v průmyslové automatizaci. Na trhu je dostupné široké spektrum pneumatických a elektrických komponent, které lze snadno doplnit o čelisti tak, aby vyhovovaly konkrétní aplikaci. Toto řešení je cenově dostupné a efektivní. V důsledku toho aktivní prvky v současnosti téměř úplně nahradily dříve používané pasivní prvky [15].

Pasivní mechanické prvky

Mezi základní mechanické prvky a podpěry patří různá lůžka, čepy a háky, které slouží k manipulaci, přenosu a uložení součástí. Pokročilejší konstrukce zahrnují například mechanismy s pružnými nebo tlumenými čelistmi. Uchopení se obvykle provádí pohybem robotu směrem k povrchu součásti. Pro odstranění lze využít zpětného pohybu ramene robotu po uchopení součásti jiným manipulátorem nebo například mechanismem pro rozpojení čelistí, který se aktivuje pohybem robotu [15].

Aktivní mechanické prvky

Aktivní prvky používají vnější zdroje energie, jako jsou pneumatické, elektrické nebo hydraulické systémy, k pohybu uchopovacích prvků. Nabízejí vysoký stupeň kontroly nad silou úchopu, polohou a rychlostí, což umožňuje přesnou manipulaci s objekty různých tvarů a velikostí. Vyžadují složitější řídicí systémy a jsou náročnější na údržbu [15].



Obrázek 10: Různé typy konstrukcí aktivních mechanických úchopů [16]

1.4.2.2 Magnetické úchopové prvky

Magnetické úchopové prvky představují specifický typ manipulačních zařízení v robotice, které využívají magnetické síly pro uchopení a manipulaci s objekty. Tyto prvky mohou být pasivní nebo aktivní, a to podle toho, zda vyžadují externí zdroj energie k jejich provozu. Magnetické úchopové prvky mají své omezení v tom, že mohou manipulovat pouze s objekty z feromagnetických materiálů [15].

Pasivní magnetické prvky

Pasivní magnetické úchopové prvky využívají magnetické síly k uchopení a udržení objektů bez nutnosti externího napájení. Tyto prvky využívají permanentní magnety k vytvoření magnetického pole, které přitahuje objekty z feromagnetických materiálů. K odpojení manipulovaného objektu lze použít různé dorazy nebo speciální strhávací pohyb manipulatoru. Pasivní magnetické prvky jsou obvykle jednodušší na konstrukci a provoz a poskytují spolehlivý úchop bez potřeby složitých řídicích systémů [15].

Aktivní magnetické prvky

Aktivní magnetické úchopné hlavice využívají elektromagnetů, typicky napájených stejnosměrným elektrickým proudem. Na rozdíl od pasivních úchopných hlavice se nevyužívá strhávacího pohybu. Součást lze uvolnit jednoduše vypnutím el. proudu, avšak to může vést k magnetizaci samotné součásti, způsobené stejnosměrným proudem. K odstranění této magnetizace po vypnutí proudu je do magnetických cívek dočasně přiveden proud opačného směru, což eliminuje zbytkový magnetismus v součásti. Existují také tzv. pneumagnety, které se stávají magnetickými v závislosti na přivedeném tlaku vzduchu [15].



Obrázek 11: Ukázka aktivních úchopů s pneumagnety [17]

1.4.2.3 Podtlakové úchopové prvky

Podtlakové úchopové prvky představují efektivní zařízení v robotice pro uchopení a manipulaci s objekty pomocí vytvoření podtlakového prostoru mezi chapadlem a povrchem objektu.

Pasivní podtlakové prvky

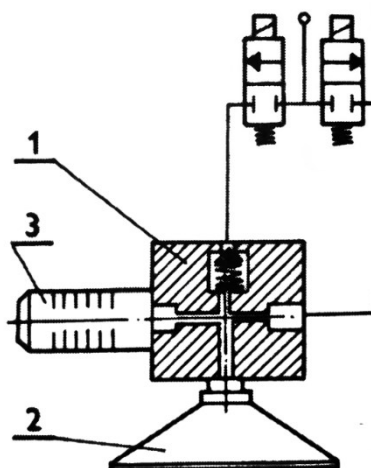
Pasivní podtlakové úchopné prvky, jako jsou pružně deformovatelné přísavky, fungují tak, že se přísavka přitlačí na povrch předmětu, čímž se deformují její pružné stěny a vytváří se podtlak. Úchopná síla závisí na styčné ploše přísavky a předmětu, a také na tuhosti přísavky. Pro větší síly jsou potřeba tužší přísavky, což může způsobit riziko poškození předmětu. Důležitou podmínkou je také těsný styk s povrchem, což často vyžaduje použití viskózních tekutin [3].

Aktivní podtlakové prvky

Mezi aktivní podtlakové úchopné prvky patří podtlakové systémy, známé jako podtlakové komory, které využívají vývěvy nebo ejektory. Ejektor je zařízení poháněné proudem vody, plynu nebo páry, sloužící k odsávání nebo čerpání. Při použití vývěvy se více podtlakových komor připojuje na společné odsávací vedení. Hodnota podtlaku závisí na typu vývěvy, obvykle v rozsahu 30 až 80 kPa. Úchopné hlavice s ejektorem mohou mít několik podtlakových komor připojených k jednomu ejektoru, nebo každá komora může mít svůj vlastní ejektor [3].

Ejektory jsou levnější než vývěvy, ale mají vyšší spotřebu stlačeného vzduchu, což je vhodné pro menší úchopné hlavice. Na *obrázku 12* je ukázáno ovládání ejektorové podtlakové hlavice, vybavené tlumičem hluku. Ejektorový blok může být doplněn dalším vstupem pro přívod tlakového vzduchu do podtlakové komory pro rychlé uvolňování uchopených objektů [3].

- 1) Ejektorová hlavice
- 2) Uchopovací manžeta
- 3) Tlumič hluku



Obrázek 12: Příklad ovládání ejektorové přísavky [3]

1.4.2.4 Speciální úchopové prvky

Mezi typické speciální úchopné prvky patří ty, které využívají princip deformace tvarových dutých těles. Tato tělesa jsou vyrobená z elastického materiálu s nesymetrickým průřezovým profilem, asymetricky rozloženými výztuhami, asymetrickým vlnovcovitým tvarem a podobně. Tyto speciálně navržené koncové prvky, když jsou naplněny tlakovým médiem, provádějí prostorový pohyb směrem k povrchu uchopovaného předmětu. Přizpůsobují se jeho vnějšímu tvaru a v konečné fázi pohybu vytvářejí úchopovou sílu [3].

2 ADAPTIVNÍ KONCOVÉ EFEKTORY

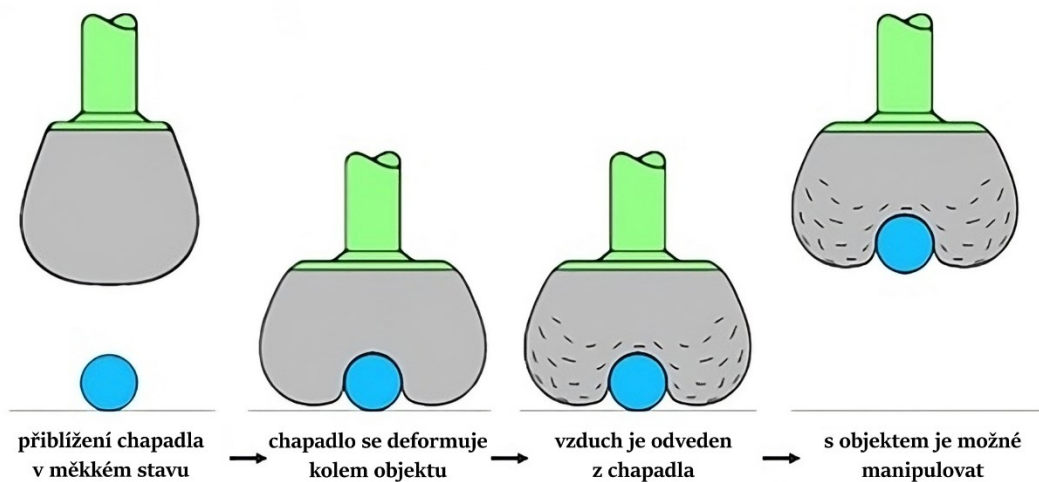
Adaptivní koncové efekty využívají speciálních úchopových prvků pro interakci s objektem. Adaptivita je proces, při němž se systém přizpůsobuje změnám, které probíhají uvnitř, popřípadě mimo něj. Adaptivní koncový efektor je zařízení používané na konci robotického ramene, které má schopnost se přizpůsobit různým tvarům, velikostem a povrchům objektů, kterými má manipulovat. Na rozdíl od pevného koncového efektoru, který má statickou geometrii a funkci, adaptivní koncový efektor má flexibilní konstrukci, která mu umožňuje se měnit podle potřeby [3].

Pro popis adaptivních koncových efektorů se také používá termín „soft gripper“ zejména kvůli jejich charakteristické měkké konstrukci a schopnosti se přizpůsobit různým tvarům a velikostem objektů [3].

Existuje několik různých typů adaptivních koncových efektorů, které se liší podle jejich konstrukce a způsobu, jakým se přizpůsobují různým objektům.

2.1 Bezprstá měkká chapadla (Jamming gripper)

Charakteristickým rysem bezprstých měkkých úchopů je dokončení úchopu přímo prostřednictvím uchopení a přizpůsobení se tvaru. Typickým příkladem bezprstého chapadla je takzvaný "jamming gripper", který využívá deformace měkkého materiálu, kde dojde ke změně tuhosti chapadla, aby bylo umožněno uchopení a uvolnění předmětů. Ve srovnání s jinými měkkými grippery se složitou strukturou, jsou bezprstá měkká chapadla zvláště vhodná do prostředí, kde není kladen velký důraz na kvalitu úchopu [18] [19].



Obrázek 13: Princip činnosti bezprstého měkkého chapadla [20]

2.1.1 Základní části

Zde jsou vypsány základní části, ze kterých se skládá jamming gripper.

2.1.1.1 Membrána

Elastická membrána se vyrábí z pružného materiálu jako je silikon či latex. Pro zvýšení odolnosti membrány může být využit také polychloropren, jehož vlastnosti jsou na míru upraveny dané aplikaci. Silikon je pro chirurgické aplikace upřednostňován před latexem kvůli možným alergickým reakcím. Objevují se různé geometrie membrány uzpůsobené konkrétní aplikaci [19].

2.1.1.2 Náplň

Pro náplň membrány je možné použít celou řadu materiálů s různými vlastnostmi. Používají se dva hlavní typy částic:

přírodní – káva, kukuřice, šterk, rýže, pepř, sůl, cukr,

umělá – plastové, skleněné nebo pryžové materiály kulovitého, krychlového nebo válcového tvaru.

Přírodní částice mají velké rozdíly ve tvaru a velikosti, což může vést k nehomogennímu rozložení v membráně, zatímco uměle vyrobené částice nabízejí možnost přesného určení velikosti a rozměru. Mletá káva je nejrozšířenějším typem přírodních částic. Nejběžnějšími umělými částicemi jsou skleněné kuličky. Obvykle se používají díky jejich snadné dostupnosti a odbourání komplikací s tvarem částic. Často se používají také pryžové kostky, u nichž byly zjištěny výhody z hlediska ovladatelnosti a rozptylu síly [19].

Většina publikací se omezuje na komerčně dostupné velikosti běžných jednoduchých tvarů, např. krychle a koule v rozmezí od 1,5 mm do 8 mm [19].



Obrázek 14: Mletá káva jako náplň membrány [20]

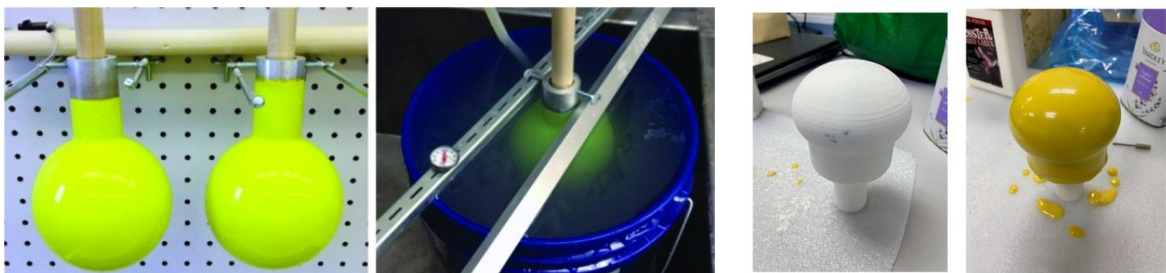
2.1.1.3 Zdroj podtlaku

Pro generování podtlaku v membráně, což je nezbytné pro uchycení objektu, je vyžadováno odstranění vzduchu z prostoru membrány. Nejčastějším mechanismem pro vytváření tohoto podtlaku je využití vakuového ejektoru, přičemž je kritické zajistit oddělení materiálu od vzduchového proudu, aby nedošlo k poškození ejektoru. Alternativně lze použít pneumatický píst, který, díky svému designu s pevně definovaným objemem vzduchu, při expanzi generuje potřebný podtlak. V tomto případě není zapotřebí mít zdroj stlačeného vzduchu [19].

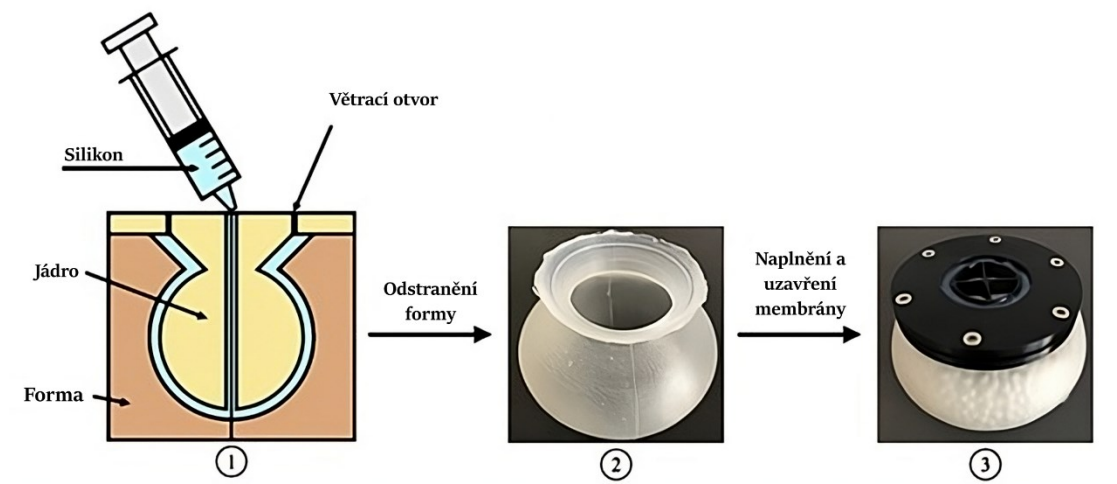
2.1.2 Techniky výroby membrány

Kromě nákupu komerčně dostupných membrán (např. latexových balónek) je nejběžnějším způsobem výroby membrán odlévání. Odlévání spočívá v naplnění předem připravené formy materiálem například ve formě tekutého silikonu (populární značky jsou ecoflex a dragonskin). Po uplynutí definovaného času vznikne membrána s požadovanými vlastnostmi. Téměř u všech úchopů složitých tvarů byly použity formy vytištěné na 3D tiskárně, přičemž tyto metody se stále více stávají normou [19].

Přímý tisk membrány je vzácný, ale jeho obliba roste, protože lití do forem je ve srovnání s ním složitý, vícestupňový a pomalý proces. Přímý 3D tisk umožňuje relativně větší variabilitu tuhosti díky širšímu spektru potenciálních materiálů, vyšší kontrolu nad věrností finálního návrhu, rychlé prototypování a menší rozdíly mezi jednotlivými membránami [19].



Obrázek 15: Výroba membrány pomocí namáčení [19] [21]

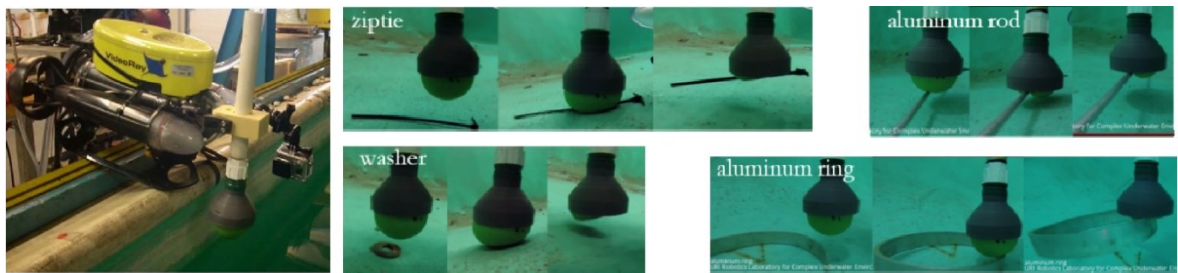


Obrázek 16: Výroba membrány odléváním silikonu [22]

2.1.3 Aplikace a použití

Jamming grippery představují inovativní technologii v měkké robotice, která nachází uplatnění v širokém spektru oblastí díky své adaptabilitě a schopnosti manipulace s různými objekty. Mezi případy použití patří:

Hlubokomořské mise: Jamming grippery jsou nasazeny na dálkově ovládaná podvodní vozidla pro sběr různých předmětů z hlubin moře. Díky schopnosti gripperů adaptovat se na různé geometrie a minimalizovat poškození zachycovaných objektů jsou ideální pro tyto citlivé úkoly [23].



Obrázek 17: Bezprsté chapadlo uchopující předměty ležící na dně nádrže [23]

Dynamické aplikace: Byla prokázána schopnost jamming gripperů udržet vysokou tuhost a úspěšně manipulovat s objekty i při různých zrychleních, což otevírá dveře pro jejich využití v dynamických aplikacích, jako je rychlá robotická manipulace [19].

Průmyslové aplikace: V průmyslu byly jamming grippery zavedeny na robotické ramena pro úkoly pick and place, přičemž našly uplatnění v různých odvětvích, včetně plastů, spotřebního zboží, automobilového průmyslu, balení, kolaborativní robotiky, potravinářství a spotřební elektroniky.

2.1.4 Výhody bezprstých měkkých chapadel

Jamming grippery reprezentují pokročilou technologii v měkké robotice, která se vyznačuje následujícími klíčovými výhodami:

Vysoká adaptabilita a univerzálnost: Jednou z nejvýznamnějších výhod jamming gripperů je jejich schopnost adaptovat se a efektivně manipulovat s širokým spektrem objektů různých tvarů, velikostí a materiálů. Tato flexibilita umožňuje jejich využití v různorodých aplikacích bez potřeby specifického programování pro každý typ objektu [19].

Jemné a bezpečné uchopení: Měkká povaha těchto gripperů zajišťuje možnost jemné manipulace s křehkými předměty bez rizika jejich poškození, což je klíčové pro aplikace v zdravotnictví nebo při manipulaci s delikátními materiály [19].

Ekonomická výhodnost a jednoduchost: Ve srovnání s komplexnějšími robotickými systémy mohou být jamming grippery vyrobeny s menšími náklady a jejich design a výroba jsou méně komplikované. To přispívá k jejich širší dostupnosti a aplikaci [19].

2.1.5 Limitace bezprstých měkkých chapadel

Přestože jamming grippery nabízejí řadu výhod, existují také určité limitace, které je třeba vzít v úvahu:

Omezená nosnost: V porovnání s tradičními pevnými grippery mohou jamming grippery nabízet nižší nosnost, což může omezovat jejich využití v určitých průmyslových nebo manipulačních úlohách [19].

Rychlost a efektivita uchopení: Doba pevného uchopení kvůli změně tuhosti materiálu může být větší než u konvenčních gripperů, což může být limitující faktor v aplikacích vyžadujících rychlou manipulaci [19].

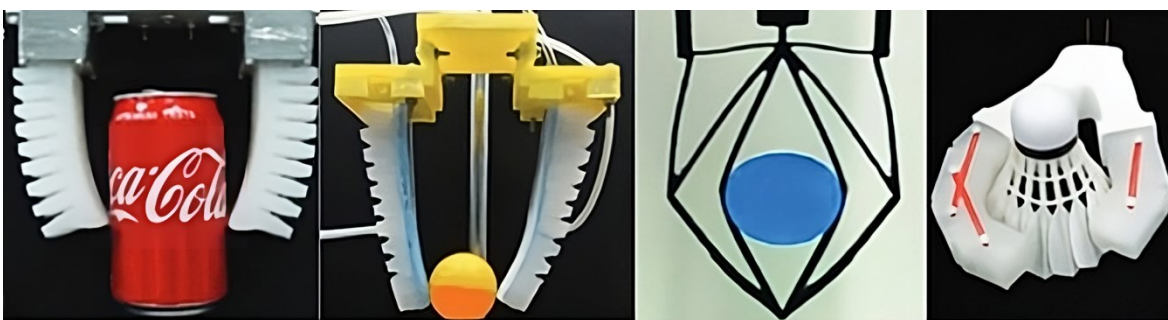
Potřeba údržby a odolnost: Měkké komponenty jamming gripperů mohou vyžadovat častější údržbu a mohou být méně odolné vůči fyzickému opotřebení a vnějším vlivům. Toto může vést k vyšším dlouhodobým nákladům na údržbu a nutnosti častější výměny [19].

2.2 Další typy měkkých chapadel

Měkké úchopy jsou typicky klasifikovány podle své konstrukce do různých kategorií. S přibývajícím množstvím článků roste komplexita a tím i cena výsledného koncového efektoru.

2.2.1 Dvouprstá měkká chapadla

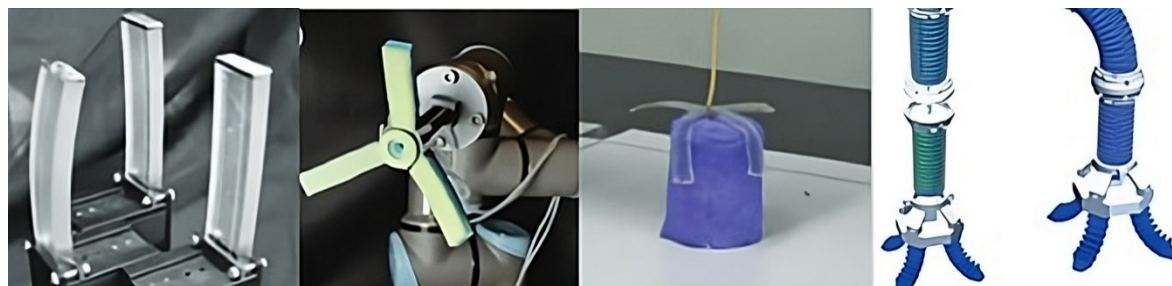
Nejzákladnější a typickou konstrukcí měkkých chapadel je úchop dvěma prsty. Dva prsty mohou splnit mnoho lidských činností, jako je uchopení běžných předmětů. Tato struktura je také široce využívána v průmyslových aplikacích díky svým nízkým výrobním nákladům [18].



Obrázek 18: Dvouprstá měkká chapadla [18]

2.2.2 Víceprstá měkká chapadla

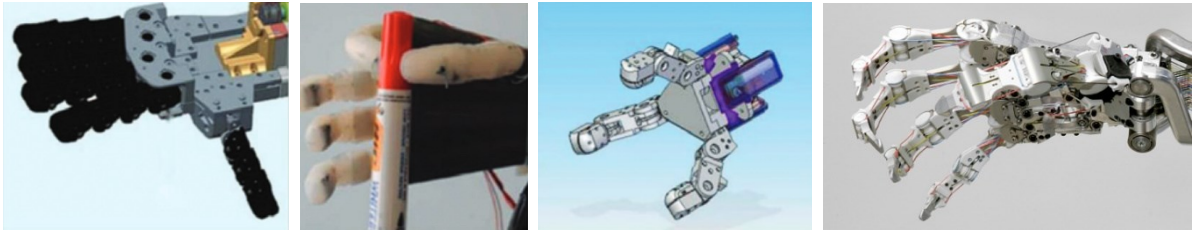
Víceprstá chapadla se často používají v různých náročných aplikacích pro zlepšení bezpečnosti a přesnosti uchopení. Technika ovládání vyžadovaná u víceprstých chapadel je však podstatně sofistikovanější než ta, která je vyžadována u dvouprstých chapadel. Tříprstý lepkavý měkký gripper může také dosáhnout uchopovací funkce kombinací přilnavosti díky sání a smykové stability díky tření [18].



Obrázek 19: Víceprstá měkká chapadla [18]

2.2.3 Mnoho článková měkká chapadla

Chapadlo s několika klouby tvarově vychází z konvenčního tvaru lidského prstu. Z pohledu základní struktury se změny v kloubech projeví změnami v celkové funkci a omezeních. Jednoduché struktury bývají přizpůsobivější tvaru objektu. Je však nesporné, že složitější a pružnější struktury měkkých chapadel jsou směrem budoucího výzkumu [18].



Obrázek 20: Mnoho článková měkká chapadla [18] [24]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 CÍLE PRÁCE

Z průmyslu vyplynul požadavek na sestavení takového koncového efektoru, který by dokázal uchopit předměty v předem nedefinované poloze. Takové předměty lze jen těžko uchopit spolehlivě konvenčním způsobem bez použití různých senzorů či kamer.

Hlavním cílem práce je navrhnout adaptivní koncový efektor se schopností efektivně manipulovat s různorodými objekty různých tvarů a velikostí.

Dílčí cíle práce:

- Použitelnost u různých typů průmyslových robotů
- Navrhnout a vymodelovat efektor v CAD softwaru
- Vyrobit a sestavit koncový efektor
- Navrhnout ovládání koncového efektoru
- Ověřit funkčnost koncového efektoru

4 NÁVRH ADAPTIVNÍHO KONCOVÉHO EFEKTORU

Z průmyslu vyplynul požadavek na sestavení takového koncového efektoru, který by dokázal uchopit předměty v předem nedefinované poloze. Takové předměty lze jen těžko uchopit spolehlivě konvenčním způsobem bez použití různých senzorů či kamery. Cílem práce je vytvořit takovýto koncový efektor, a ověřit, zdali je vhodný pro tyto aplikace.

4.1 Volba konstrukce koncového efektoru

Pro návrh adaptivního gripperu byla zvolena konstrukce měkkého bezprstého chapadla neboli jamming gripper. Tato konstrukce umožňuje velkou flexibilitu ve tvaru a velikosti uchopovaného předmětu.

Hlavní metody, jakými jamming gripper uchopuje objekty, zahrnují tři klíčové mechanismy:

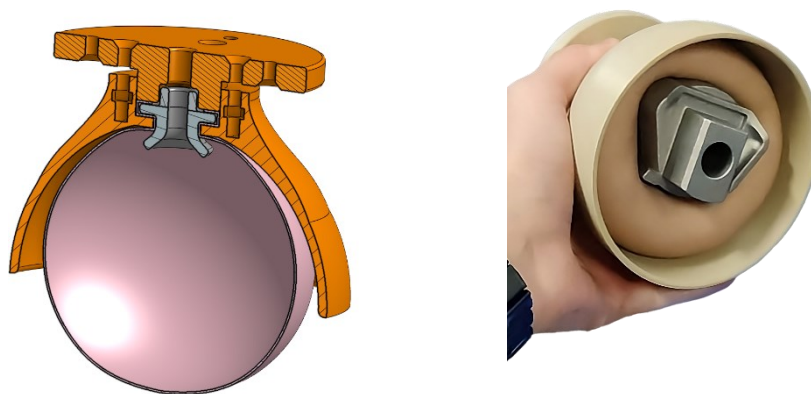
- Tvarový styk, který vzniká díky vztahu mezi povrchy gripperu a objektu;
- Statické tření, které se projevuje normálovými silami v místě kontaktu;
- Přídavný sací efekt, který může nastat, pokud membrána gripperu vytvoří utěsnění.

Je však nepravděpodobné, že by gripperu fungující na tomto principu byly schopny spolehlivě realizovat uchopení založené na tvarovém styku nebo utěsnění. Proto mezi hlavní mechanismus úchopu patří statické tření [19].

4.2 Prototyp

Návrh je iterativní proces, při kterém je potřeba ověřit správnost navrženého řešení a případně upravovat podle potřeby. K testování návrhu se vyrábějí prototypy. V ideálním případě jsou vytvořeny tak, aby obsahovaly pouze ty charakteristiky, které jsou pro hodnocení nezbytně nutné, a měly by být tedy co nejjednodušší [25].

Pro ověření konceptu bezprstého gripperu byl sestaven prototyp s využitím široce dostupných komponent, aby se demonstrovala funkčnost a proveditelnost návrhu. U tohoto prototypu byla použita membrána ve tvaru koule, která se však ukázala jako problematická pro pevné uchycení k ostatním částem konstrukce. Řešení tohoto problému spočívalo ve vytvoření specificky tvarované membrány, která lépe vyhovovala požadavkům designu. Dalším problémem bylo umístění filtru nečistot přímo v membráně, což při maximálním stlačení membrány mohlo omezovat schopnost gripperu účinně zachytit objekty. Jako náplň membrány byl zvolen třtinový cukr, díky jeho zrnité konzistenci a snadné dostupnosti, což umožňovalo efektivně testovat funkčnost prototypu.



Obrázek 21: Vlevo 3D návrh prototypu, vpravo testování prototypu

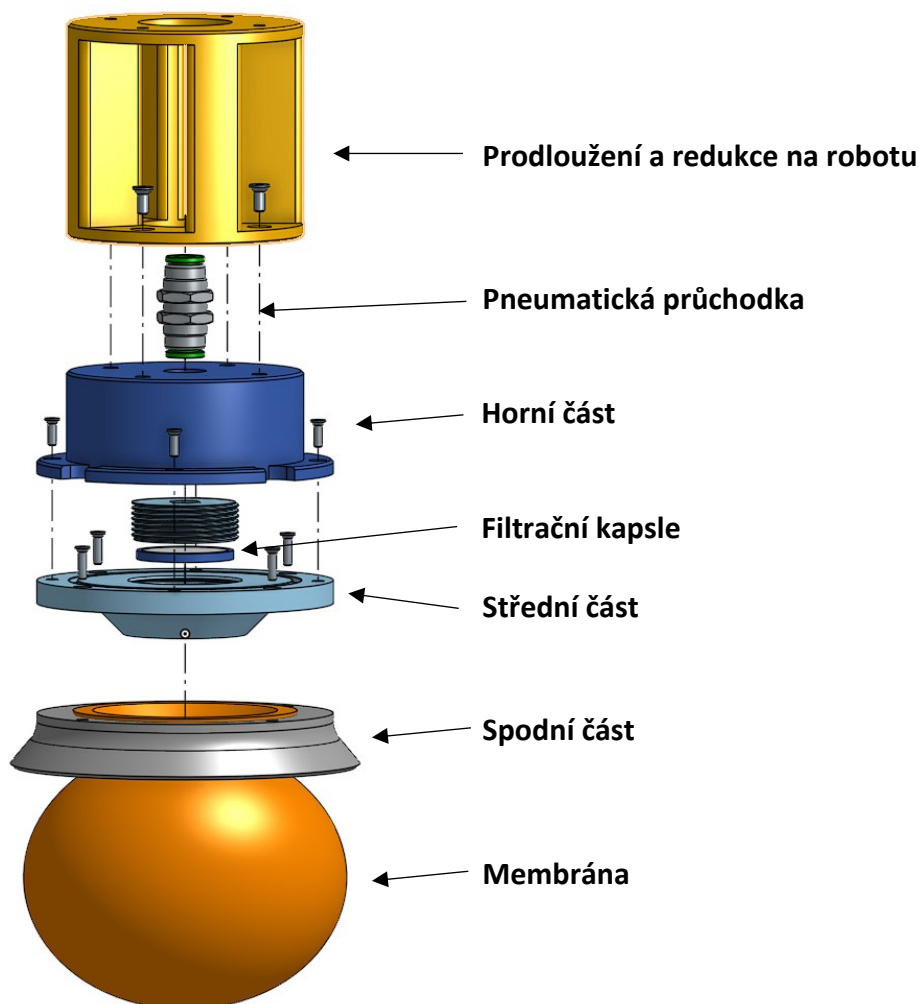
Z testování prototypu adaptivního koncového efektoru vyplývá, že jeho princip je efektivní pro uchopování objektů stlačením membrány. Přesto se objevily určité nedostatky, na které finální návrh reaguje s cílem zlepšení funkčnosti a praktičnosti použití. Mezi hlavní zjištěné nedostatky patří:

- **Malá velikost membrány** – Finální návrh zahrnuje zvětšení rozměrů membrány, aby bylo možné uchopovat větší nebo různorodější objekty.
- **Nemožnost snadného uchycení membrány** – Byly provedeny úpravy v designu, aby se membrána dala jednodušeji a bezpečněji připevnit k zbytku konstrukce, což usnadňuje montáž a údržbu.
- **Nepraktické plnění membrány náplní přes hadičku** – Finální návrh představuje efektivnější metodu plnění membrány, která eliminuje potřebu použití hadičky a umožňuje rychlejší a snadnější manipulaci s náplní.
- **Omezení velikosti gripperu kvůli rozložení upevňovacích šroubů na přírubě robotu** – Bylo přepracováno uchycení na přírubu robotu tak, aby poskytovalo větší flexibilitu v rozměrech gripperu a příruby robotu.

Tyto úpravy vycházejí z praktických testů a mají za cíl vylepšit celkovou efektivitu a uživatelskou přívětivost adaptivního koncového efektoru.

4.3 Finální návrh koncového efektoru

Finální návrh odstraňuje nedostatky prototypu a vylepšuje celé řešení. Mezi hlavní prvky gripperu patří:



Obrázek 22: Finální návrh gripperu – rozložený pohled

4.3.1 Pevné prvky

Pevné prvky gripperu poskytují nezbytnou strukturální pevnost a spojují jeho jednotlivé komponenty, což umožňuje jeho funkční a spolehlivou operaci. Tyto prvky zahrnují:

- **Prodloužení a redukce na robotu** – Tento adaptér umožňuje připojení gripperu k různým modelům robotů. Upevňuje se k horní části gripperu čtyřmi šrouby M4 a na své horní straně obsahuje díry pro upevnění k robotu. Tato komponenta je navržena tak, aby byla snadno přizpůsobitelná pro různé typy přírub robotů.

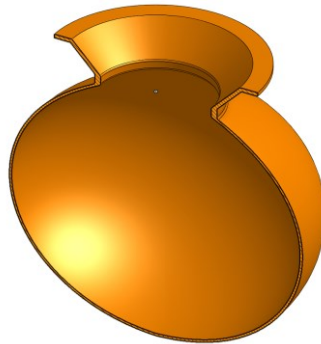
- **Pneumatická průchodka** – Klíčová pro přívod vzduchu do gripperu, pneumatická průchodka zároveň zajišťuje hermetické utěsnění. Použití matky M16 a těsnění z termoplastického polyuretanu (TPU) zaručuje, že vzduch zůstává uvnitř systému bez úniků, to je zásadní pro správnou funkci pneumatického systému.
- **Horní část** – Tato komponenta těsně přiléhá ke střední části a je k ní připevněna pomocí čtyř šroubů M3x12. Je navržena tak, aby poskytovala pevný a stabilní základ pro ostatní části gripperu a zároveň umožňovala snadnou montáž a demontáž.
- **Střední část** – Obsahuje speciální drážku pro umístění O-kroužku s průměrem 80 mm a tvrdostí Shore A 70, která zajišťuje těsné spojení částí. Do střední části se také zašroubovaná filtrační element gripperu. Spolu se spodní částí tvoří pevný základ, který drží membránu na místě s pomocí čtyř M3x10 šroubů.
- **Spodní část** – tato část je základem pro uchycení membrány a zároveň zabraňuje jejímu nadměrnému roztáhnutí pomocí vyvýšeného okraje. Je klíčová pro integritu a funkčnost celého gripperu, protože zajišťuje, že membrána zůstává na svém místě a je chráněna před poškozením během operace.

4.3.2 Membrána

Membrána je klíčovou součástí bezprstého gripperu a její účinnost v uchopování objektů je ovlivněna několika důležitými faktory:

- **Materiál – Silikon GMS A05** – Použitý materiál pro výrobu membrány, silikon GMS A05, je dvousložkový kondenzační silikon, který se vyznačuje vynikající tekutostí a kopírovací schopností. S tvrdostí Shore A 05 nabízí vynikající pružnost a adaptabilitu. Pro úspěšné zesíťování je nezbytné tento silikon smíchat s polyadiční silikonovou pryskyřicí, která funguje jako druhá složka.
- **Tloušťka stěny** – Tloušťka stěny membrány hraje klíčovou roli v její pružnosti a odolnosti. Tloušťka stěny byla stanovena na 0,6 mm. Pro oblasti vystavené většímu namáhání, jako je horní část pro uchycení ke gripperu, byla tloušťka stěny zvětšena na 1,2 mm, aby se zajistila větší odolnost bez významné ztráty pružnosti. Je důležité počítat se smrštěním silikonu během výroby a toto zohlednit již v návrhu membrány.
- **Tvar membrány** – Tvar je zásadní pro funkčnost a kapacitu membrány. Zvolený tvar připomíná kouli s otvorem pro proudění vzduchu, který je zvětšen a upraven pro uchycení ke konstrukci. Tvar umožňuje efektivní roztahování membrány při aplikaci

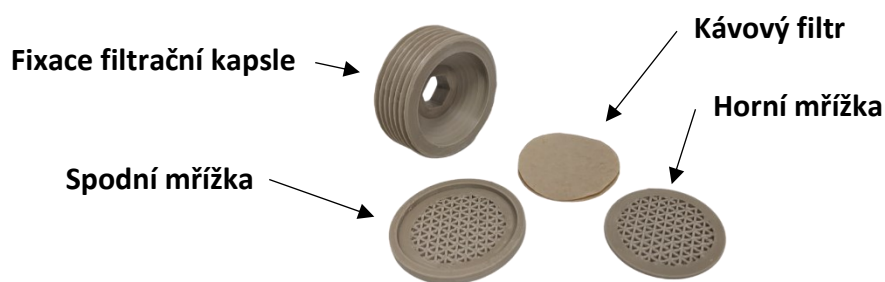
tlaku a optimalizuje množství výplně, kterou lze do membrány v neutrálním stavu umístit.



Obrázek 23: 3D model
membrány

4.3.3 Filtrační kapsle

Filtr slouží k zamezení vniknutí nečistot z výplně gripperu do vzduchové cesty. Filtrační složka musí zachytit i malé částice v závislosti na zvolené náplni. Proto byl jako filtrační médium zvolen filtrační papír na mletou kávu. Pro udržení filtru v požadované poloze slouží díl fixace filtrační kapsle, který se zašroubuje na požadované místo. Díky rozebíratelnému filtru může být membrána naplněna i poté, co je již připevněna ke spodní a střední části.



Obrázek 24: Jednotlivé části filtru

4.3.4 Ovládání gripperu

Pro efektivní ovládání uchopení a uvolnění objektů je klíčová schopnost gripperu alternovat mezi přívodem tlaku a podtlaku do membrány. Vakuový ejektor FESTO VADMI-140-P, vybavený dvěma integrovanými elektromagnetickými ventily, se v této souvislosti ukazuje jako ideální řešení. Jeden ventil je určen pro aktivaci sání, což umožňuje vytvoření podtlaku pro pevné uchopení objektu, zatímco druhý ventil slouží pro rychlé vyfukování vzduchu, čímž se membrána uvolní a objekt je možné pustit.

Dále ejektor obsahuje integrovaný vakuový spínač, který umožňuje pokročilé řízení a optimalizaci spotřeby stlačeného vzduchu. Tento spínač je schopen detekovat úroveň vakua a na základě nastavených parametrů automaticky regulovat činnost ejektoru.

Celý systém je ovládán prostřednictvím vstupní/výstupní karty robotu, což zajišťuje přesné a synchronizované ovládání s pohyby robotu.



Obrázek 25: Vakuový ejektor
FESTO VADMI-140-P

4.3.5 Náplň membrány

Náplň membrány je zásadním faktorem ovlivňujícím uchopovací schopnosti adaptivního gripperu. Aby byla zajištěna efektivita při uchopení objektů různých velikostí a tvarů, je klíčové vybrat materiál, který nabízí nízkou hustotu a zároveň schopnost zvýšit svou tuhost při aplikaci podtlaku. Tato kombinace vlastností umožňuje, aby membrána efektivně obepnula a pevně držela uchopovaný předmět.

Na základě rešerše odborných zdrojů [19] a [27] byly identifikovány následující tři nejvhodnější náplně:

- **Mletá káva**
- **Kuličky z expandovaného polystyrenu (EPS)** (průměr cca 1-2 mm)
- **Termoplastický elastomer TPE** (granulát cca 2-3 mm)

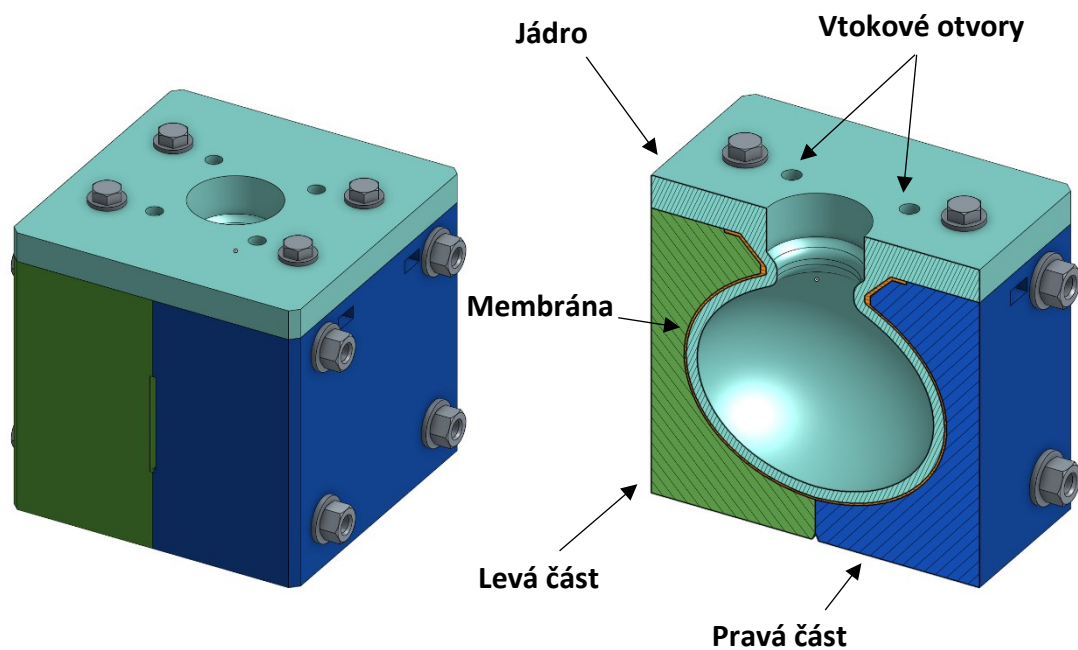


Obrázek 26: Tři typy materiálů jako náplň do membrány

4.4 Forma pro výrobu membrány

Pro výrobu silikonové membrány byla zvolena metoda odlévání silikonu do přesně vyrobené formy, což je zásadní pro zabránění nežádoucímu prosakování silikonu do dělicí roviny. Celá forma je spojena čtyřmi šrouby M10x160, které jsou utaženy s použitím podložek a matek, čímž se zajistí pevnost a stabilita formy. Umístění jádra do formy zajišťují čtyři šrouby M8x30, které jsou přesně umístěny, aby jádro drželo na správném místě. Upevnění matek je usnadněno speciálními drážkami na straně formy, které umožňují jejich vložení do formy.

Pro odlévání silikonu do formy jsou určeny čtyři otvory umístěné v horní části jádra. Tyto otvory jsou navrženy s takovou přesností, aby umožnily přesné vložení a utěsnění 50 ml injekční stříkačky, skrze kterou je silikon odléván dovnitř formy. Tento postup umožňuje přesné a kontrolované dávkování silikonu, což je klíčové pro dosažení optimální kvality výsledné membrány.



Obrázek 27: 3D model formy pro výrobu membrány

5 VÝROBA KONCOVÉHO EFEKTORU

5.1 Výroba pevných částí

Pevné komponenty koncového efektoru byly vyrobeny pomocí aditivní technologie (3D tisku). Tento přístup byl vybrán kvůli jeho schopnosti jednoduše vyrábět prototypy, které nabízejí poměrně vysokou pevnost při nízkých nákladech ve srovnání s tradičními výrobními technologiemi.

Většina dílů byla vytisknuta na průmyslové 3D tiskárně Stratasys Fortus 900mc s použitím materiálu ABS-M30 společnosti Stratasys, která odpovídá za kvalitu dodaného materiálu, stejně jako za výsledné vlastnosti vytištěných dílů.



Obrázek 28: Pevné díly, ze kterých se skládá koncový efektor

5.2 Výroba membrány

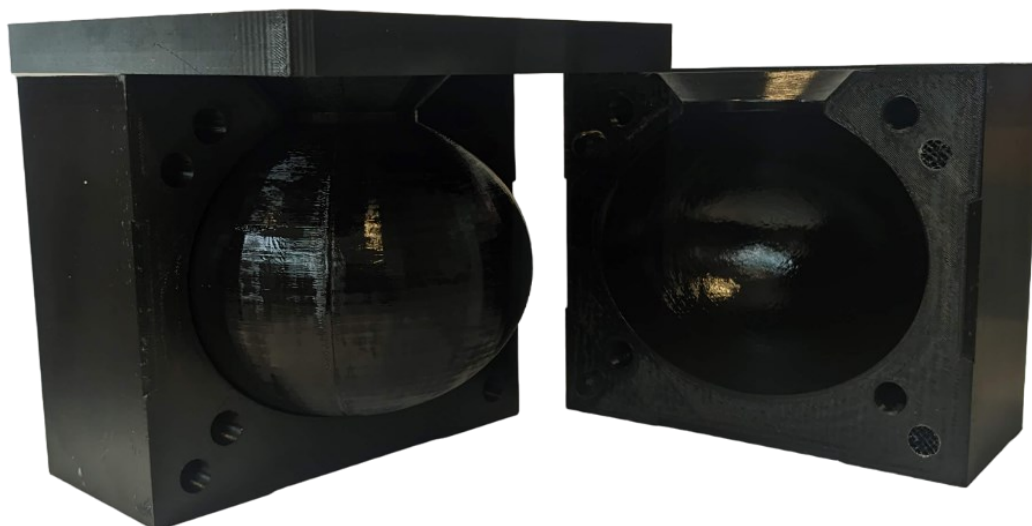
Výroba membrány pro adaptivní gripper je klíčová pro jeho efektivní funkčnost. Správný výrobní proces je nezbytný k zajištění vysoké kvality a spolehlivosti produktu. Postup výroby se skládá z následujících kroků:

5.2.1 Příprava formy

Forma vytažena z 3D tiskárny, musí projít procesem čištění ve speciálním zařízení, které se často přezdívá "pračka", kde se odstraňuje podpůrný materiál SR-35. Tento materiál se rozpouští ve vodném roztoku hydroxidu sodného s koncentrací 12 % při teplotě 70 °C. Po této lázni se model vypláchne čistou vodou a jeho vnitřní části se dále upravují za použití brusných papírů různých zrnitostí, aby se dosáhlo hladkého povrchu. Pro dokonalou hladkost se vnitřní stěny dodatečně ošetřují štětcem namočeným v acetonu, který má schopnost rozpustit ABS plast [26].

Aby se zabránilo nechtěnému přilnutí silikonu k modelu, aplikuje se separační prostředek Ease Release 200. Tento prostředek se aplikuje na obě části formy i vložené jádro pomocí aerosolového spreje, čímž se vytvoří rovnoměrná separační vrstva.

Jakmile separátor zaschne, formu lze smontovat s použitím šroubů a matic.



Obrázek 29: Forma připravená na montáž

5.2.2 Příprava silikonu

Při výrobě membrány pro adaptivní gripper je klíčové zajistit, že výsledný produkt bude mít co nejvyšší kvalitu a pevnost. Pro výrobu jedné membrány bylo připraveno 50 ml silikonu.

Důkladné promíchání dvou složek silikonu je nezbytné pro zajištění homogenní směsi a správné chemické reakce, která vede k zesíťování silikonu. Během míchání vznikají mikrobublinky, které mohou negativně ovlivnit mechanické vlastnosti výsledné membrány.

Jednou z nejefektivnějších metod, jak odstranit mikrobublinky, je použití vakuové komory. Ta umožňuje, že pod sníženým tlakem dojde k expanzi a následné evakuaci vzduchu z míchané silikonové směsi. Tento proces zajišťuje, že výsledná směs bude homogenní a bez vzduchových bublin. V tomto konkrétním případě byl použit systém pro vakuovou impregnaci Poly'Vac od společnosti Presi.

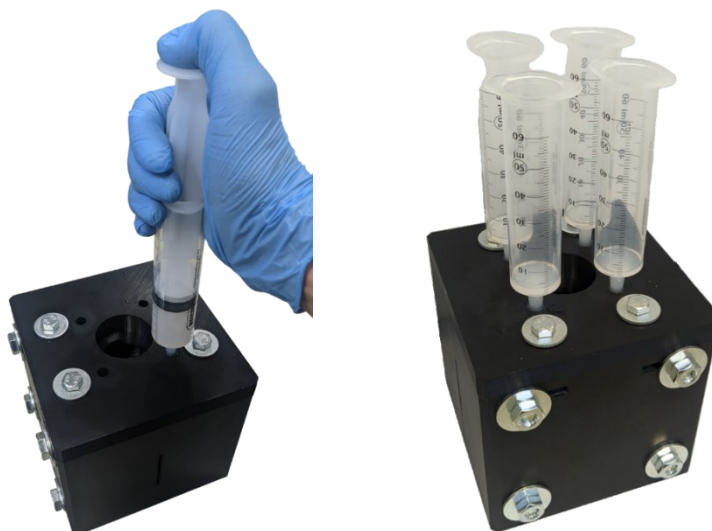


Obrázek 30: Příprava silikonu ve vakuové komoře

5.2.3 Odlévání silikonu

Odlévání silikonu připomíná spíše nízkotlaké vstřikování než tradiční odlévání. Nejprve se silikon nasaje do injekční stříkačky, poté se vybere jeden z vtokových kanálů, do kterého se špička stříkačky zasune. Těsnost tohoto spojení zabrání vytlačování silikonu mimo vybraný vtok. Silikon se poté opatrně dávkuje do formy. Ve dvou nejbližších otvorech lze sledovat, jak silikon postupně zaplňuje formu. Jakmile se naplní i poslední otvor a jsou evakuovány všechny bubliny, umístí se do všech vtokových otvorů zbývající tři otevřené stříkačky, naplněné přibližně 5 ml silikonu. Tento krok je nezbytný, protože během

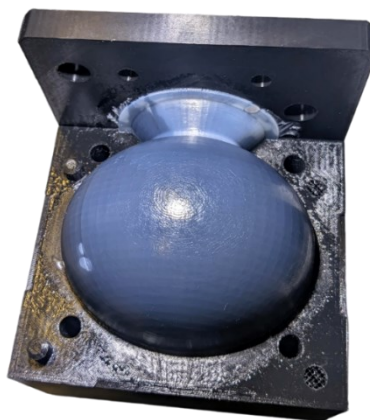
zesíťování dochází k mírnému smrštění silikonu, což by bez doplnění mohlo vést k neúplnému vyplnění horní části membrány.



Obrázek 31: Vlevo plnění formy, vpravo plná forma připravená na vulkanizaci

5.2.4 Zesíťování silikonu

U zvoleného silikonu dochází k zesíťování za pokojové teploty 20 °C během 3-5 hodin. Aby se tento proces urychlil, umístí se celá forma do teplotní komory předehřáté na 50 °C, kde zůstává přibližně 1 hodinu. Po uplynutí této doby je možné formu otevřít a vyjmout hotovou membránu. Po vyjmutí z formy je potřeba jen lehce zaříznout místa u vtokových kanálů, kde došlo k přebytku silikonu. Díky pevnému utažení všech částí formy se silikon do dělicí roviny téměř nedostal.



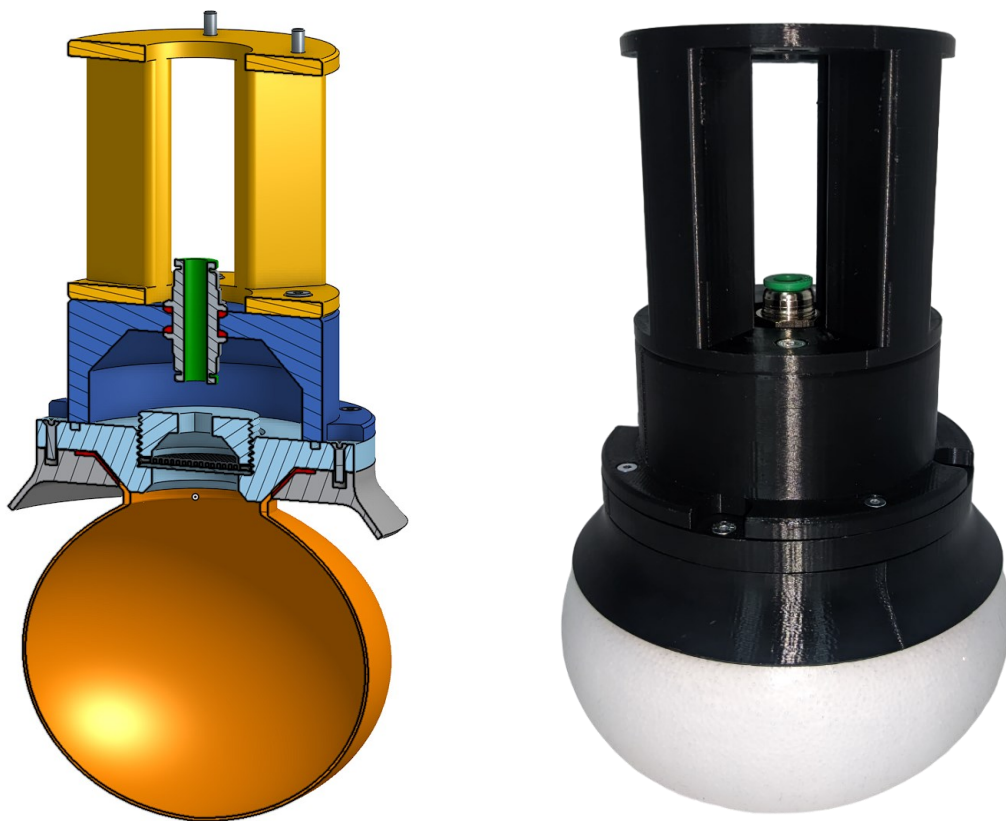
Obrázek 32: Otevřená forma s vyrobenou membránou

5.3 Sestavení koncového efektoru

Sestavení koncového efektoru předchází příprava pevných částí, kde se do předem připravených otvorů vkládají závitové vložky. Tyto slouží jako základ pro spojovací šrouby, jež mají za úkol udržet celou konstrukci gripperu pohromadě.

Dále je nezbytné vložit těsnící o-kroužek do speciálně navržené drážky ve střední části konstrukce. Tento o-kroužek zabraňuje úniku vzduchu ze systému, a zaručuje tak správnou funkci gripperu.

Při montáži je klíčové, aby byly všechny šrouby utahovány postupně, což umožňuje rovnoměrné rozložení síly napříč celou spojovací plochou. Takový postup zamezí potenciálnímu poškození nebo deformaci komponent během sestavování.



Obrázek 33: Vlevo 3D model gripperu v řezu,
vpravo reálné sestavení gripperu

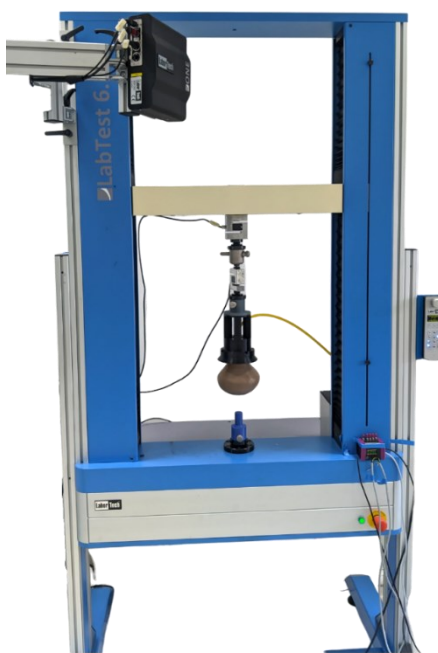
6 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI NAVRŽENÉHO KONCOVÉHO EFEKTORU

6.1 Měření maximální síly uchopení

Ověření funkčnosti navrženého koncového efektoru je důležité pro zajištění jeho bezpečného a efektivního nasazení. Před začátkem testování na robotu je nezbytné identifikovat limity a možnosti, které adaptivní úchop nabízí.

6.1 Měření maximální síly uchopení

Pro určení limitů, které adaptivní gripper může bezpečně zvládnout, je klíčové změřit maximální sílu, s jakou dokáže uchopit a držet různě těžká břemena. K tomuto účelu byl použit zkušební stroj LabTest 6.50 od firmy Labor Tech. Tento elektromechanický zkušební stroj je navržen pro univerzální statické testování a umožňuje provádět zkoušky v tahu, tlaku, ohybu, smyku a krutu. S jeho maximálním zatížením 50 kN je dostatečně vybavený pro efektivní testování úchopové síly gripperu. Toto měření je zásadní pro validaci schopnosti gripperu manipulovat s objekty o různé hmotnosti a velikosti.



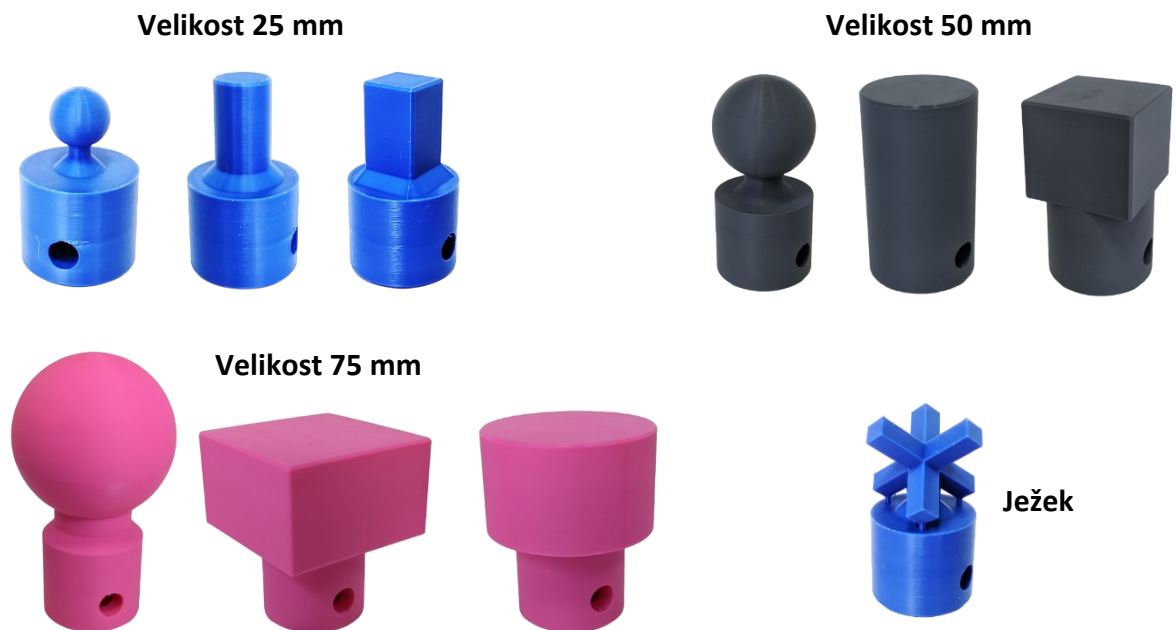
Obrázek 34: Testovací stroj
LabTest 6.50

6.1.1 Testovací díly

Jelikož kvalita uchopení adaptivního gripperu je silně ovlivněna tvarem uchopovaného dílu, bylo pro testování vytvořeno několik vzorových dílů reprezentující základní geometrické tvary. Tyto testovací díly byly navrženy ve třech různých velikostech s hlavním rozměrem 25 mm, 50 mm a 75 mm, aby se otestovala schopnost gripperu manipulovat s objekty různých velikostí.

Kromě standardních geometrických tvarů jako je krychle, válec a koule, byl také vyroben speciální tvar, který umožňuje prověřit, zda úchopná síla gripperu bude větší u tvarů, které podporují tvarové držení díky jejich specifické konfiguraci.

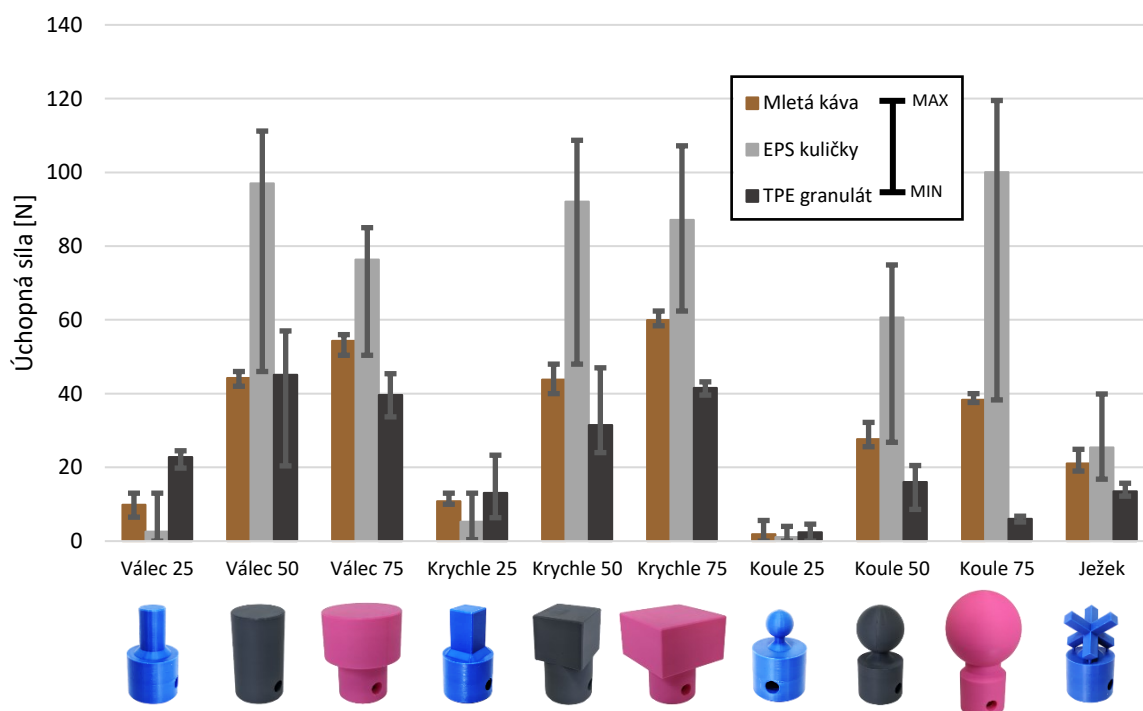
Všechny díly byly navrženy tak, aby je bylo možné snadno přichytit k testovacímu stroji. Toto bylo realizováno pomocí čepu, který slouží jako univerzální uchycení ke stroji pro různé typy dílů a zajišťuje jejich stabilitu během testování.



Obrázek 35: Testovací díly pro zkoušku únosnosti

6.1.2 Výsledky z testování

Graf 1 zachycuje naměřené hodnoty maximální síly uchopení získané při testování na zkušební stroji. Proces měření probíhal následovně: Nejprve byla membrána gripperu nafouknuta do předem určené velikosti. Poté byl gripper spuštěn směrem dolů, až do okamžiku, kdy došlo k obklopení testovaného dílu membránou. Vzdálenost mezi gripperem a dílem byla u všech testovaných vzorků stejná. Po obklopení dílu byl z membrány odváděn vzduch až do jejího zpevnění. V okamžiku, kdy byla membrána plně zpevněná, začal zkušební stroj zvedat gripper a současně měřit úchopnou sílu.

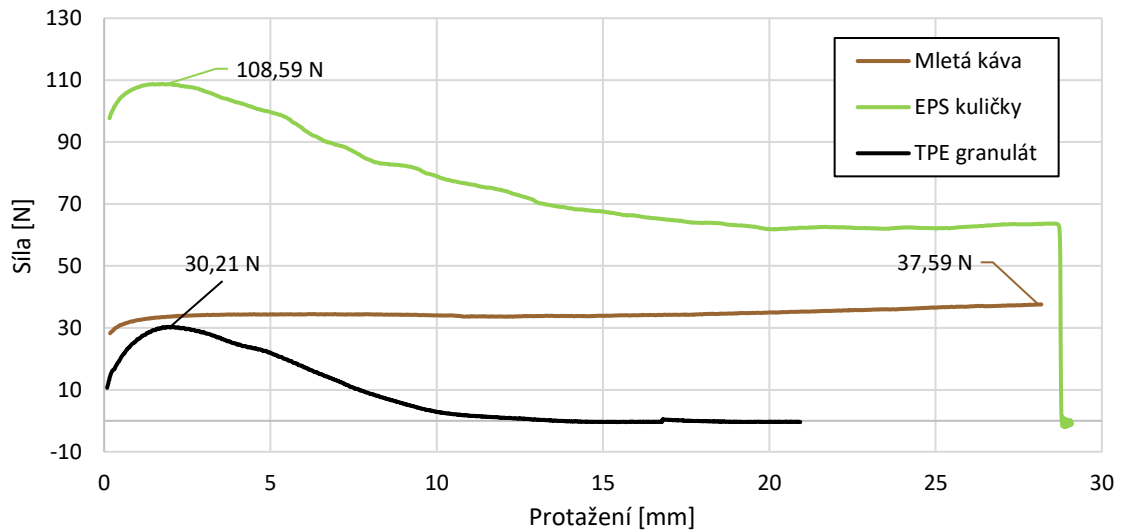


Graf 1: Úchopná síla naměřená při testování různých typů dílu a náplně membrány

6.1.3 Charakteristiky působení síly na testovaný díl

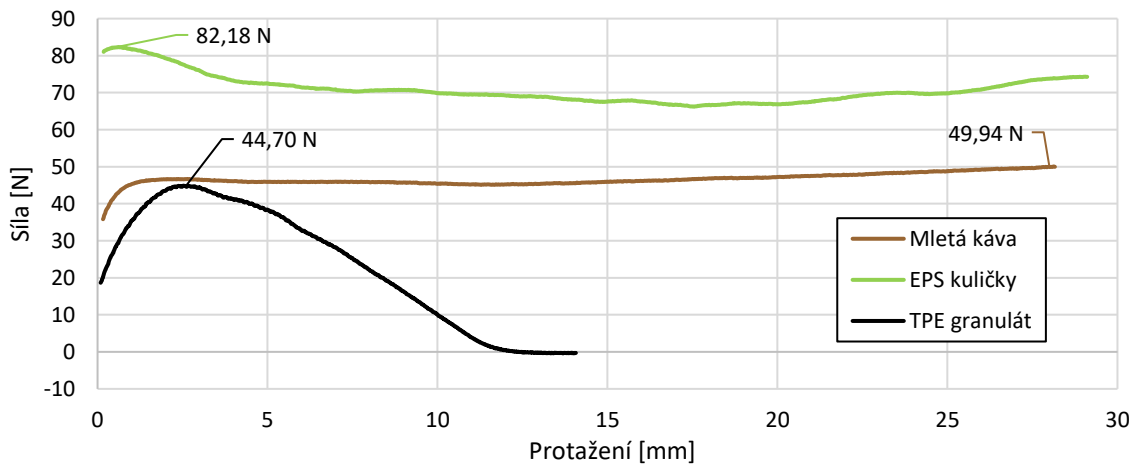
Závislost průběhu uchopovací síly na tvaru uchopovaného dílu je značná. Z naměřených dat bylo vyhodnoceno, že nejnižší uchopovací sílu mají sférické díly, což je způsobeno jejich malou kontaktní plochou s membránou v kolmém směru. Naopak, díly umožňující větší působení normálových sil, jako jsou válce nebo krychle, podporují pevnější úchop. Při překonání síly 40 N dochází k natažení membrány, což představuje limit celého adaptivního systému.

Grafy 2-5 zobrazují, jak se mění charakteristiky průběhu natažení v závislosti na tvaru dílu.



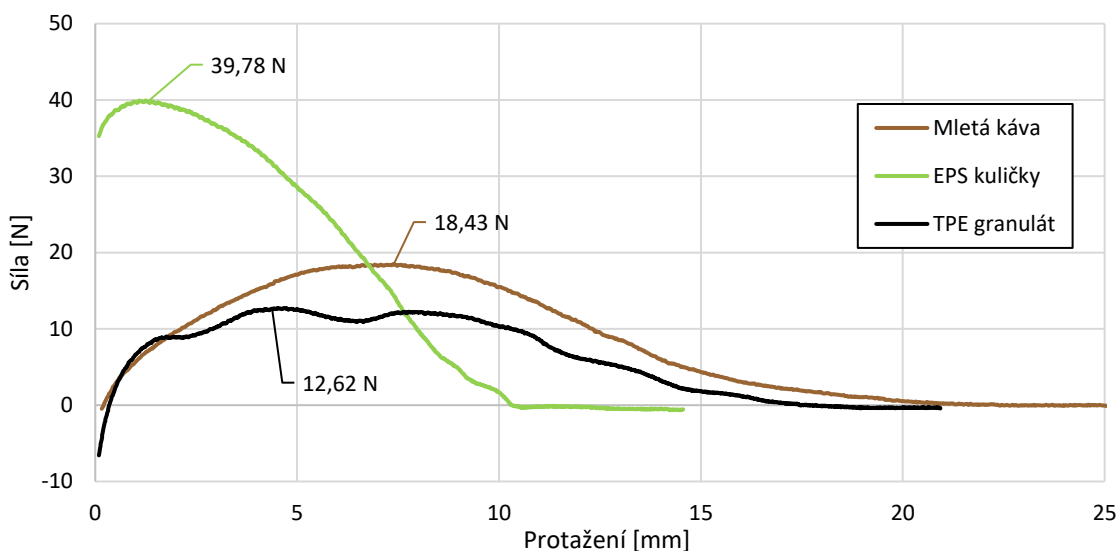
Graf 2: Průběh síly v závislosti na posunu gripperu u krychle o rozměru 50 mm

V experimentech, kde došlo k přílišnému natažení membrány, bylo testování ukončeno předčasně, aby se zabránilo jejímu poškození. Z toho vyplývá, že pro dosažení maximální uchopovací síly je ideální, když díl má velkou kontaktní plochu s membránou v kolmém směru, což zvyšuje efektivitu uchopení díky lepšímu rozložení síly po celé ploše.



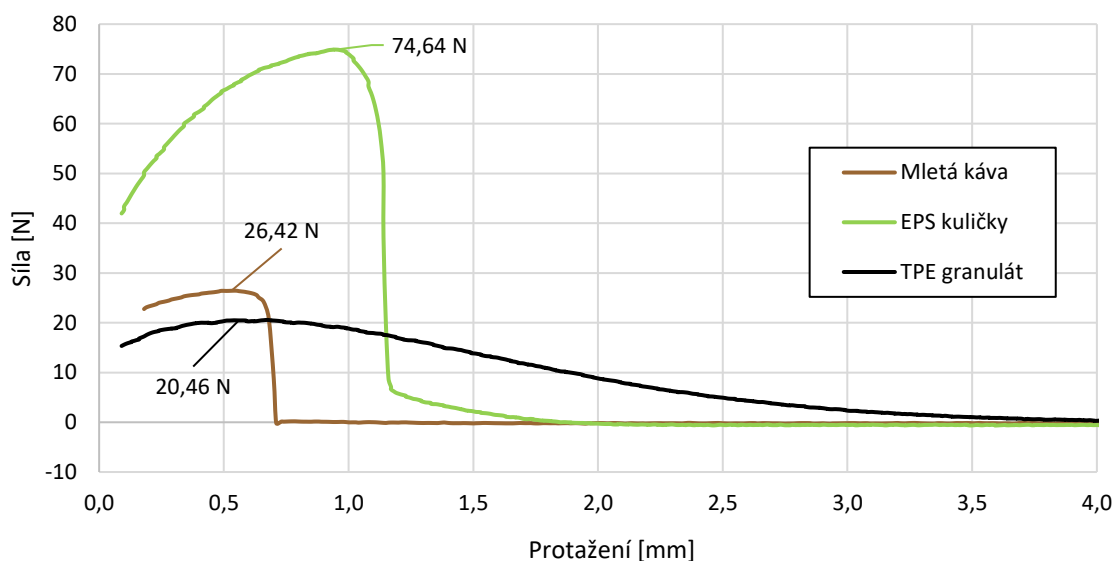
Graf 3: Průběh síly v závislosti na posunu gripperu u válce o rozměru 75 mm

Při testování speciálního tvaru ve tvaru ježka bylo zkoumáno, zda bude uchopovací síla výrazně vyšší ve srovnání s běžnými díly. Naměřené hodnoty však ukázaly, že uchopovací síla pro tento specifický tvar byla podprůměrná napříč všemi typy náplní. Tento výsledek lze přičíst skutečnosti, že nedošlo k tvarovému uchopení dílu, což by zvyšovalo sílu uchopení prostřednictvím tvarového styku.



Graf 4: Průběh síly v závislosti na posunu gripperu u dílu ve tvaru ježka

Uchopovací síla byla v tomto případě generována pouze prostřednictvím statického tření, které disponovalo menší efektivní kontaktní plochou ve srovnání s jinými testovanými díly. V důsledku toho byla síla, kterou gripper dokázal vyvinout, omezena a nedosahovala hodnot charakteristických pro díly s lepší adaptabilitou tvaru k membráně gripperu.



Graf 5: Průběh síly v závislosti na posunu gripperu u koule o velikosti 50 mm

V případě použití polystyrenových kuliček jako náplně dochází k jejich smrštění při odvádění vzduchu, což zvyšuje uchopovací sílu díky většímu tvarovému přizpůsobení mezi membránou a uchopovaným tvarem. Tato síla je v tomto případě největší, ale jakmile je překonána, dojde k uvolnění membrány a upuštění dílu.

Celkově byl gripper naplněný EPS kuličkami nejpevnější při aplikaci vakua. Naměřená síla dosahovala i dvojnásobku naměřené síly, než při použití granulátu nebo kávy. Tato konfigurace poskytovala nejefektivnější uchopení díky optimálnímu přenosu síly a výborné adaptabilitě k povrchovým nerovnostem dílů. Tento zjištěný efekt podtrhuje důležitost výběru vhodného materiálu pro náplň adaptivního gripperu, zvláště když je cílem manipulace s objekty specifických tvarů a vlastností.

Adaptivní gripper je schopen efektivně manipulovat s objekty, jejichž průměr se pohybuje od 25 mm až do 100 mm. Klíčovým faktorem pro úspěšný pevný úchop je tvar manipulovaného objektu. Nejvhodnější tvary jsou ty, které umožňují maximální kontakt s membránou gripperu v kolmém směru, jako jsou například válce a krychle. Od specifického tvaru objektu také závisí maximální možná nosnost, která může dosáhnout hodnoty až 3 kg.



Obrázek 36: Ukázka natažení membrány u různých typů náplně membrány

6.2 Hmotnost adaptivního gripperu

Během testování maximální síly uchopení na měřicím stroji byla zkoumána i hmotnost adaptivního gripperu, která se liší v závislosti na typu náplně membrány. Pro efektivní použití na průmyslovém robotu je klíčová celková hmotnost koncového efektoru, protože ovlivňuje výběr vhodné velikosti robota. Robot s nižší nosností může být omezen ve schopnosti manipulovat s těžšími břemeny na delší vzdálenosti. Vyšší hmotnost efektoru tak může značně omezit operativní rozsah robota.

Tabulka 1: Hmotnost adaptivního úchopu

Typ náplně	Celková hmotnost adaptivního úchopu
Mletá káva	0,846 kg
EPS kuličky	0,571 kg
TPE granulát	1,121 kg

Z naměřených dat v tabulce 1 vyplývá, že hmotnost gripperu naplněného EPS kuličkami je téměř o polovinu nižší ve srovnání s hmotností gripperu naplněného plastovým granulátem.

Tento rozdíl je částečně způsoben také tím, že při naplňování membrány dochází k jejímu rozpínání pod tíhou náplně, což umožňuje vložit do membrány větší množství materiálu s vyšší hustotou, jako je plastový granulát. Naopak, polystyrenové kuličky, které mají nízkou hustotu rozpínají membránu méně efektivně, což omezuje množství materiálu, které lze do gripperu vložit.

7 TESTOVÁNÍ NA PRŮMYSLOVÉM ROBOTU

Testování adaptivního úchopového systému na průmyslovém robotu představuje klíčovou fází vývoje, která umožňuje ověřit praktickou funkčnost a efektivnost systému v reálných operačních podmínkách. Pro účely testování byl použit průmyslový robot ABB IRB1600, který s nosností 8 kg a dosahem 1,45 metru představuje ideální platformu pro ověření adaptivního úchopu.

Na základě předchozích testů, které ukázaly nejlepší výsledky u gripperu naplněného EPS kuličkami, byla právě tato náplň zvolena pro další testování na robotu. Tato volba umožňuje maximálně využít potenciál gripperu při manipulaci s různými objekty v dynamickém průmyslovém prostředí.



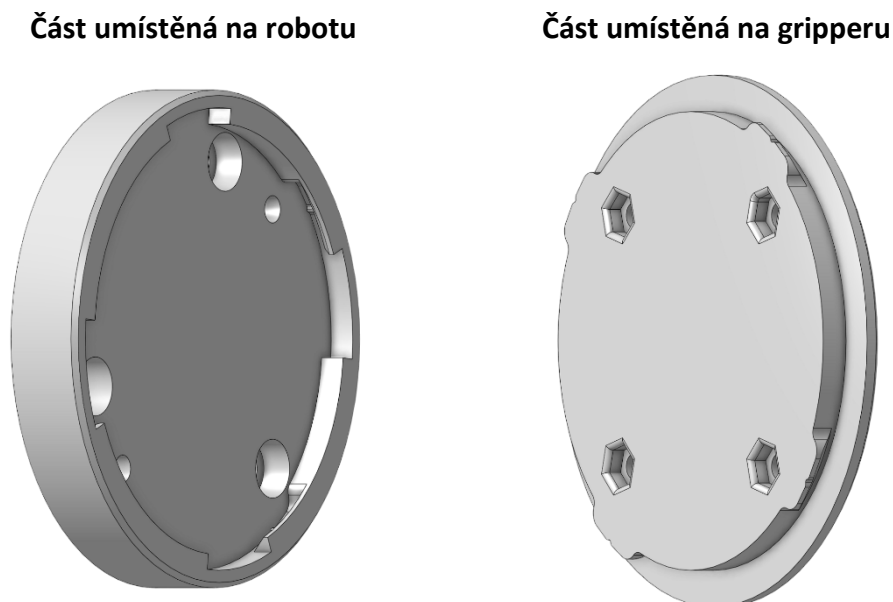
Obrázek 37: Robot ABB IRB 1600 osazený adaptivním úchopem

7.1 Mechanismus rychlé výměny nástroje

Vzhledem k tomu, že na zvoleném robotu ABB IRB1600 probíhalo v daný čas testování více aplikací, byl navržen systém rychlé výměny nástroje. Tento mechanismus umožňuje rychlou a snadnou výměnu koncového efektoru robotu bez nutnosti použití dalších nástrojů. Skládá se ze dvou částí, které přesně zapadají do sebe díky sérii čtyř drážek, jež zajišťují pevné spojení obou polovin.

Tento systém není primárně navržen pro manipulaci s velkými zátěžemi, ale v rámci testování poskytl efektivní a bezproblémovou výměnu nástrojů, což usnadnilo rychlé přizpůsobení robotu různým testovacím scénářům. Tato flexibilita je zásadní pro efektivní

využívání robotických systémů v průmyslových aplikacích, kde je potřeba často měnit typy operací nebo experimentovat s různými úchopovými systémy.



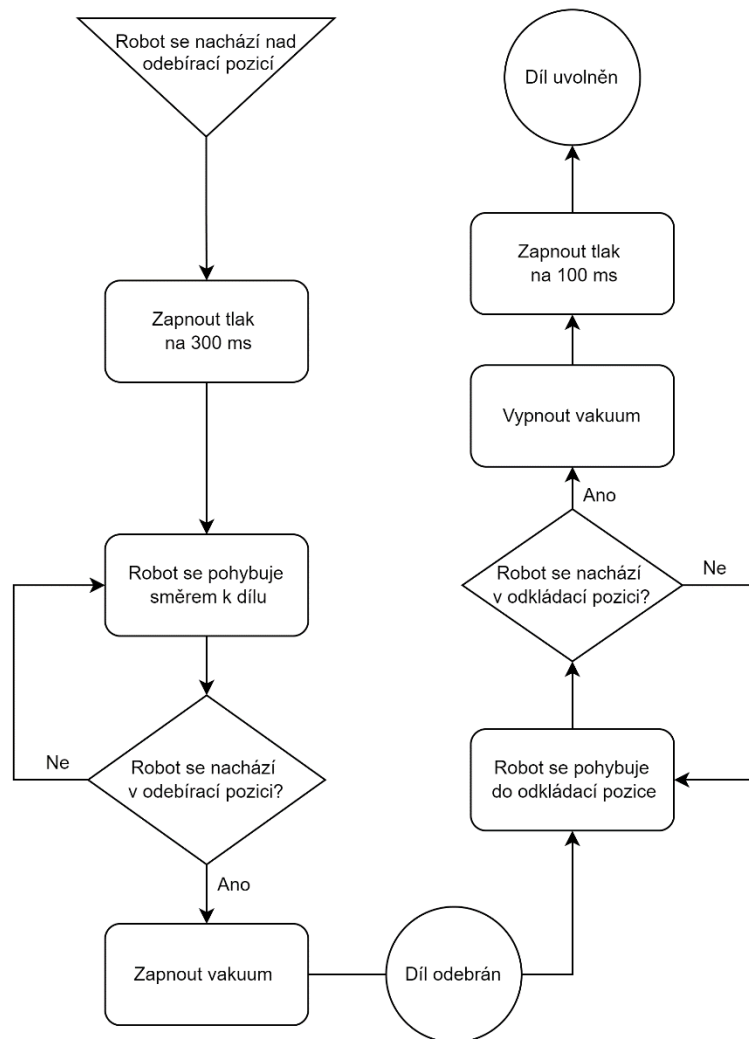
Obrázek 38: Obě poloviny mechanismu pro rychlou výměnu nástroje

7.2 Ovládání koncového efektoru

Ovládání tlaku a podtlaku je zajištěno vakuovým ejektorem, který je připojen k vstupně/výstupní kartě robotu. Konkrétně jsou k ní připojeny dva výstupy z robotu a jeden vstup do robotu. Tyto výstupy slouží ke spouštění podtlaku nebo tlaku, zatímco vstup získává zpětnou vazbu o tom, zda v membráně vzniklo vakuum.

Sekvence pro uchopení dílu začíná aktivací signálu pro spuštění tlaku po dobu 300 ms, což způsobí mírné nafouknutí membrány. Následně se robot přiblíží k dílu. Jakmile je robot v pozici, kde membrána obklopuje díl, aktivuje se druhý výstup, který spustí vakuum. Po obdržení zpětné vazby od senzoru vakua, která potvrdí vznik vakua v membráně, robot čeká dvě sekundy předtím, než začne manipulovat s dílem.

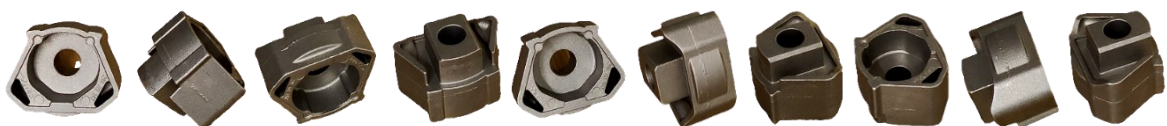
Pro uvolnění dílu stačí vypnout vakuum, a díl se po krátké době uvolní. Pro urychlení procesu uvolnění dílu může být po vypnutí vakua na 100 ms aktivován výstup s tlakem vzduchu, což umožní téměř okamžité uvolnění dílu.



Obrázek 39: Postup uchopení a uvolnění dílu

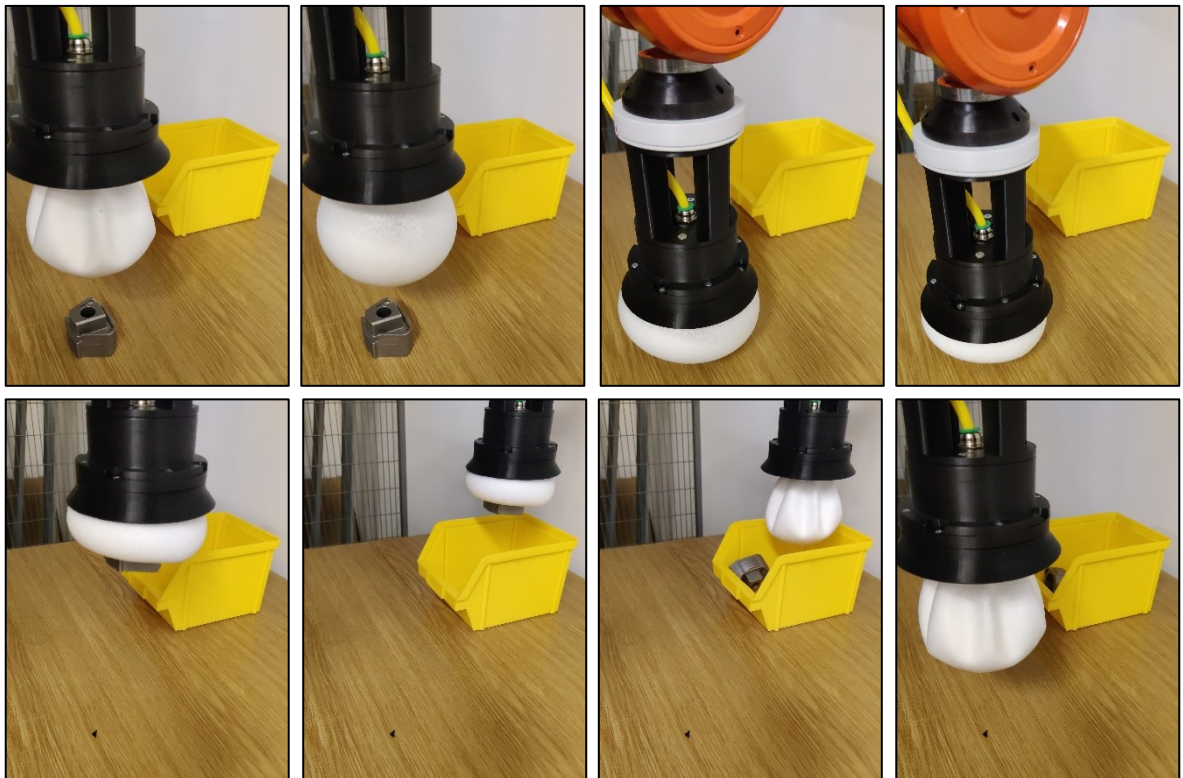
7.3 Demonstrace adaptability koncového efektoru

Hlavní vlastností navrženého koncového efektoru je jeho schopnost přispůsobovat se uchopovaným objektům. Tato schopnost byla demonstrována pomocí dílu, který má mnoho stabilních poloh. Všechny testované polohy jsou zobrazeny na obrázku 40. Použití tohoto dílu bylo se souhlasem firmy SumiRiko AVS Czech s.r.o která tento díl vyrábí.



Obrázek 40: Možné stabilní polohy testovacího dílu

Během testování robot bez problémů uchopil díl v každé z testovaných poloh. Po úspěšném uchopení byl díl přesunut do krabice, která byla využívána jako místo pro odkládání. Tato schopnost efektivně manipulovat s objekty různých konfigurací bez nutnosti předchozího nastavování nebo zásahu operátora potvrzuje vysokou míru adaptability efektoru.



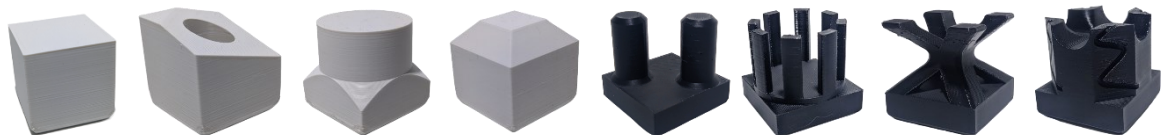
Obrázek 41: Proces odebrání při testování adaptability

7.4 Přesné uchopení a položení dílů

Schopnost navrženého adaptivního gripperu přesně uchopit a manipulovat s objekty různých tvarů a umístit je do specificky stanovených poloh je jedním z klíčových atributů, který významně přispívá k jeho univerzálnímu využití v průmyslových aplikacích. Tato přesnost je zajištěna díky pevnému uchopení dílu, který po zajištění v gripperu nevykazuje žádný pohyb. Díky této stabilizaci je možné s vysokou přesností definovat a dodržet cílovou pozici pro umístění dílu.

Pro ověření schopnosti adaptivního gripperu přesně manipulovat s různě tvarovanými objekty byla použita paleta z hliníkové slitiny, která obsahuje 20 lůžek. Tyto pozice jsou uspořádány v přesných intervalech s rozestupy 90 mm ve všech směrech.

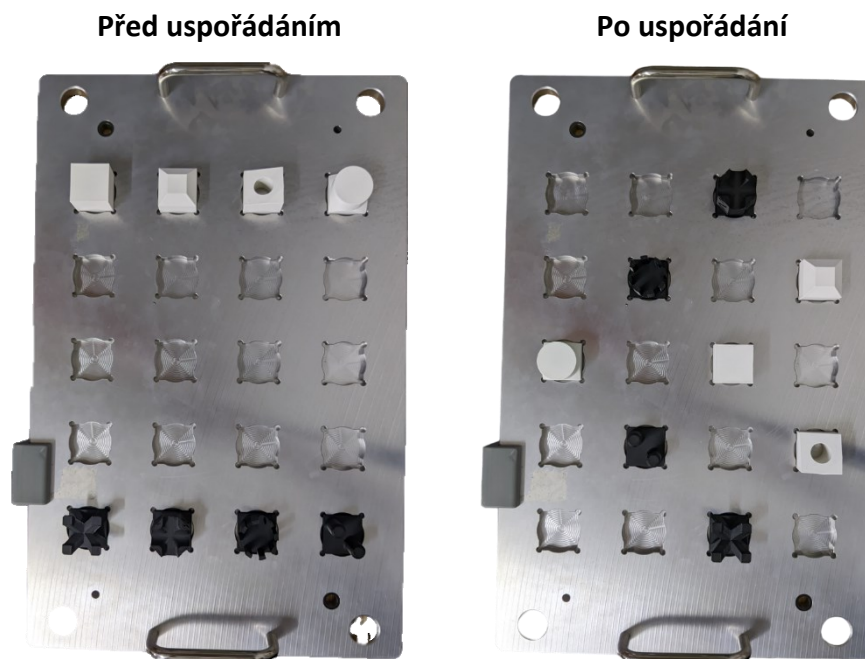
Každé lůžko na paletě je dimenzováno tak, aby přesně pojalo díl s půdorysem čtverce o rozměrech 40 mm x 40 mm. Tato specifikace základny byla zvolena pro umožnění testování s díly, které mají různé geometrické tvary na horní straně, což představuje výzvu pro interakci s adaptivním úchopovým systémem membrány. Každý z těchto dílů má unikátní tvar, který vyžaduje od gripperu různé úrovně adaptace, aby bylo možné je úspěšně a bezpečně uchopit a manipulovat s nimi. Všechny použité díly jsou zobrazeny na obrázku 42.



Obrázek 42: Díly různých tvarů pro testování přesného uchopení a položení dílů

Jeden konvenční koncový efektor by nedokázal uchopit všechny tyto různě tvarované díly z důvodu jeho limitované adaptability.

Během testování byly díly strategicky rozmístěny jak na horní, tak na spodní straně testovací palety. Robot byl programován tak, aby postupně uchopil a přesunul všechny díly do nového uspořádání, jehož cílový a počáteční tvar je detailně zobrazen na obrázku 43. Tento proces přesunu nejen demonstruje přesnost a opakovatelnost, s jakou robot dokáže manipulovat s díly, ale také testuje jeho schopnost adaptace na proměnlivé geometrie objektů a efektivitu úchopového systému v dynamickém prostředí.



Obrázek 43: Rozložení dílů v paletě

7.4.1 Tvorba programu robotu

Pro tvorbu programu robotu byl použit simulační software RobotStudio, díky kterému bylo možné vytvořit digitální dvojče robotické buňky. Program je koncipován tak, že stačí definovat pouze jednu pozici v paletě a všechny ostatní pozice jsou dopočítány podle velikosti palety. Takové řešení usnadňuje testování na reálném robotu. V rámci simulace je také simulován pohyb testovaných dílů, tak jak se pohybují v závislosti na průběhu uspořádání.

Všechny pozice v paletě jsou vypočítány v relaci k jednomu definovanému bodu, který odpovídá levé dolní pozici. Pro výpočet pozic byl použit následující vzorec: [28]

$$X = ((C_p - 1) \bmod N_C) * W_C \quad (1)$$

$$Y = [(C_p - 1) / N_C] * W_R + ((N_R * W_R) * [(C_p - 1) / (N_C * N_R)]) \quad (2)$$

Kde:

X, Y – Posun od prvního bodu v jednotlivých souřadnicích,

C_p – Aktuální pozice, pro pohyb robotu,

N_C – Počet sloupců v paletě,

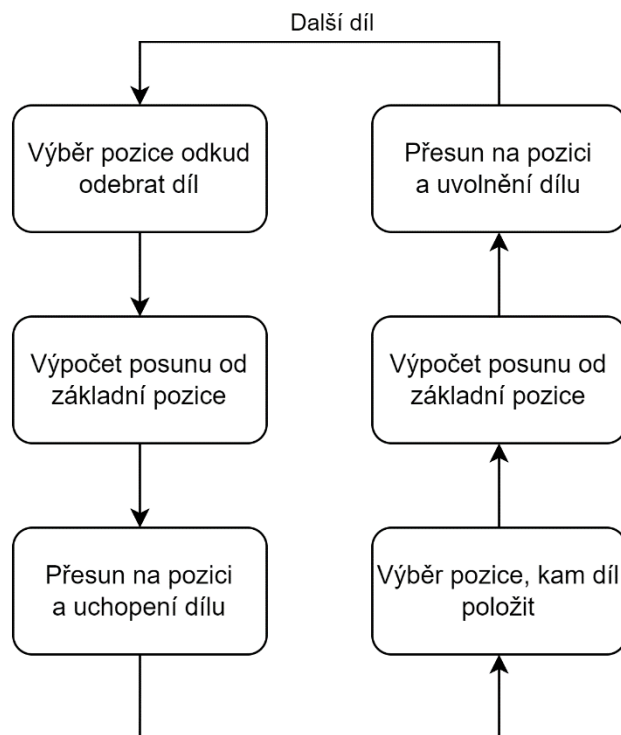
N_R – Počet řádků v paletě,

W_C – Šířka sloupce,

W_R – Šířka řádku,

mod – Operace modulo.

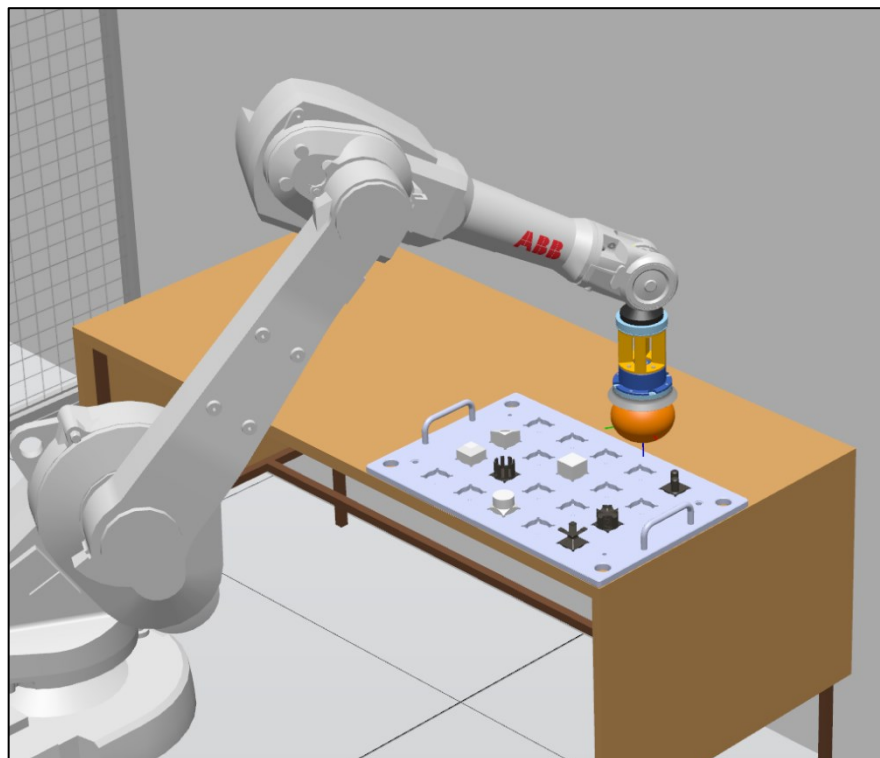
Program robotu pracuje podobně jako stavový automat, kde je každý stav přiřazen jednomu typu dílu. V každém stavu je řešeno jak odebrání, tak položení dílu. Číslo pozice, kam přesunout daný díl, bylo určeno tak, aby díly vytvořily obrazec podle obrázku 43. Pořadí přesunu dílů bylo určeno náhodně. Program robotu je rozdělen do několika procedur, aby byl výsledný kód co nejvíce zjednodušen. Při volání procedury pro odebrání dílu lze definovat pozici v paletě a také posunutí v X, Y a Z souřadnicích. Toto dodatečné posunutí v daných souřadnicích slouží ke kompenzaci případných reálných nepřesností v paletě.



Obrázek 44: Zjednodušený vývojový diagram programu

Zde je ukázka, jak je řešen jeden stav v programu robotu:

```
WHILE state <= 80 DO
  TEST state
  CASE 10:
    ! výběr pozice, ze které přesunout díl
    cur_pos:=20;
    ! odebrání dílu
    PickFromPos cur_pos,0,0,0;
    ! výběr pozice, kam přesunout díl
    cur_pos:=9;
    ! umístění dílu
    PutToPos cur_pos,0,0,0;
    ! další díl
    state:=20;
```



Obrázek 45: Simulace přeskládání dílů

7.4.2 Testování na reálném robotu

Klíčovým aspektem tohoto testování je ověření, že robot a jeho adaptivní úchopový systém může spolehlivě a přesně provádět složité manipulační úkony, které vyžadují vysokou míru flexibility a adaptace na různorodé tvarové požadavky, což jsou typické výzvy v průmyslových aplikacích.



Obrázek 46: Průběh překládání dílů robotem

Robot úspěšně uchopil a přesunul všechny díly do cílové polohy bez jakýchkoli problémů. Tento test potvrdil vysokou efektivitu navrženého adaptivního gripperu, který dokázal nejen uchopit různě tvarované díly, ale také je z jejich původního umístění přemístit do přesně definované nové pozice. Tato schopnost je zásadní pro průmyslové aplikace, kde je požadována nejen adaptabilita k různým objektům, ale také schopnost jejich precizní manipulace. Test tak demonstruje, že adaptivní gripper splňuje klíčové požadavky pro efektivní robotickou manipulaci v dynamickém a proměnlivém výrobním prostředí.

7.5 Životnost membrány

Zásadní pro nasazení navrženého adaptivního gripperu v průmyslu je životnost membrány. Jelikož se jedná o měkký prvek, který musí být schopen se přizpůsobit různým tvarům, je relativně náchylný k poškození. Nejvíce mohou membránu poškodit díly s ostrými hranami. Proto byl navržen a realizován test pro ověření této limitace, kdy gripper manipuluje s kovovou krychlí s ostrými hranami o hmotnosti 500 g.

Bylo provedeno více než 100 uchycení a položení testovacího dílu. Po pečlivém zkoumání membrány nebylo nalezeno žádné poškození vyplývající z tohoto testu. Aby bylo možné přesně stanovit životnost membrány, muselo by být provedeno více experimentů s testováním v dlouhodobém časovém horizontu.



**Nerezová krychle
s ostrými hranami**



Obrázek 47: Testování životnosti membrány

8 POROVNÁNÍ S KOMERČNĚ DOSTUPNÝM ŘEŠENÍM

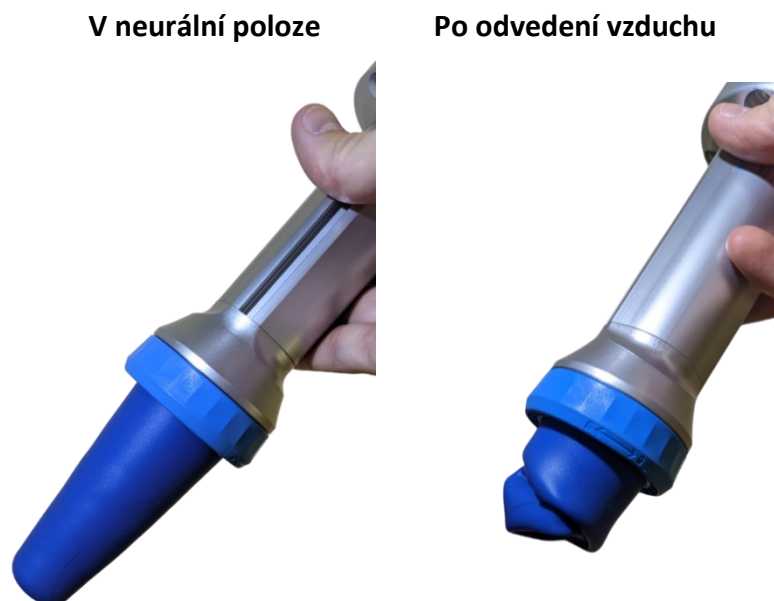
Pro hlubší pochopení výhod navrženého adaptivního úchopového systému je klíčové provést porovnání s komerčně dostupnými řešeními na trhu. Toto porovnání umožňuje identifikovat unikátní atributy a potenciální konkurenční výhody nově vyvinutého systému.

8.1 Festo FlexShapeGripper

Pro srovnání výkonnosti navrženého adaptivního gripperu byl k testování použit gripper od společnosti Festo s.r.o. Tento koncový efektor také využívá adaptivní membránu, která je schopná se přizpůsobit různým typům dílů.

V procesu uchopení manipulační systém přivádí uchopovací zařízení k objektu tak, aby s ním přišla do kontaktu silikonová membrána. V této chvíli se vypustí vzduch z horní komory a silikonová část naplněná vodou se stáhne dovnitř, což vede k přiblížení uchopovacího mechanismu k předmětu. Silikon narazí na libovolně tvarovaným předmět, který je potřeba uchopit a adaptuje se k jeho tvaru tím, že ho obepne. Díky pružnosti silikonu je možné dosáhnout přesného přizpůsobení různorodým tvarům objektů. Materiál vytváří díky svému statickému tření vysokou adhezní sílu, což zaručuje pevné uchopení [29].

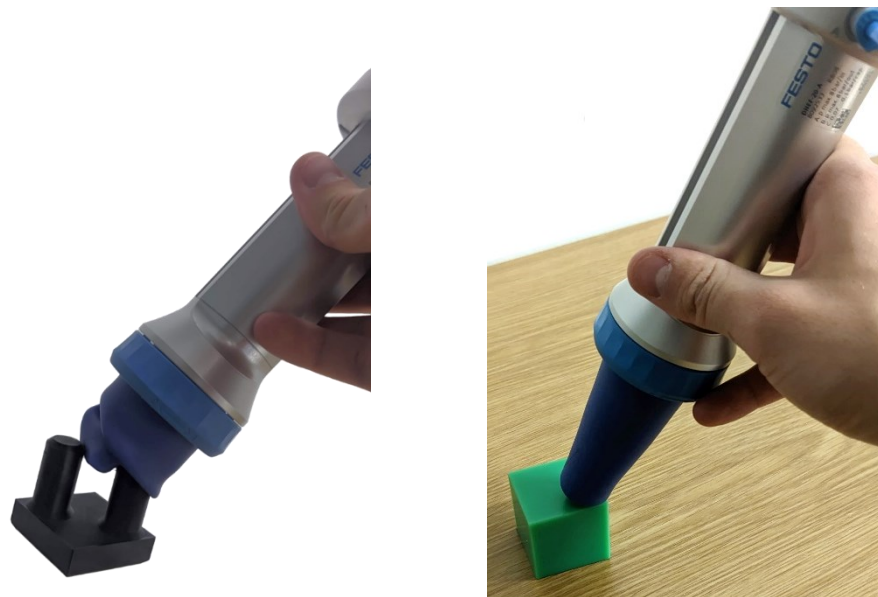
Klíčovým prvkem konstrukce je píst umístěný uvnitř membrány, který reguluje chování membrány při uchopování. Gripper je primárně navržen pro manipulaci s menšími objekty, jako jsou kovové kuličky a matice s maximálním rozměrem do 15 mm.



Obrázek 48: Různé stavy koncového efektoru
Festo FlexShapeGripper

V průběhu testování s různě tvarovanými zkušebními díly se ukázalo, že FlexShapeGripper je částečně efektivní pouze při uchopení dílů ve tvaru kolíků. Naopak při pokusech uchopit jiné tvary dílů gripper selhal a nebyl schopen tyto objekty odebrat. Jeho schopnost uchopení je efektivní pouze pro menší díly. Tato specifická omezení znamenají, že jeho použití je vhodné pouze v aplikacích, které vyžadují manipulaci s malými objekty.

Naopak, navržený adaptivní gripper prokázal výrazně větší flexibilitu během testování. Byl schopen účinně manipulovat s širokou škálou tvarů a velikostí objektů, což z něj činí vhodný nástroj pro variabilní a náročné průmyslové aplikace. Tato schopnost uchopit rozličné díly od malých po velké rozšiřuje jeho použitelnost a činí ho vhodnějším pro dynamické výrobní prostředí, kde se objekty a požadavky na manipulaci neustále mění.



Obrázek 49: Testování koncového efektoru Festo FlexShapeGripper

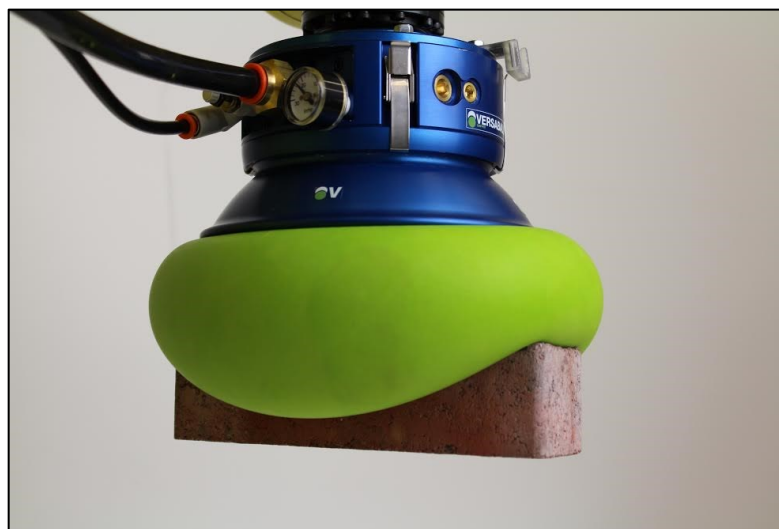
8.2 Empire Robotics Versaball

Versaball je komerční produkt vyvinutý společností Empire Robotics, který využívá stejného principu jako navržený adaptivní úchop. Tento systém se skládá z pružné membrány naplněné granulárním materiálem, který umožňuje pasivní adaptaci na tvar cílového objektu. Regulací tlaku vzduchu uvnitř membrány může Versaball rychle ztuhnout nebo změkknout, aby uchopil objekty různých velikostí a tvarů

Empire Robotics byla založena v roce 2012 s cílem vyvinout technologii jamming úchopu jako komerční produkt a prodávat jej na trhu průmyslové robotiky pod názvem Versaball. Od té doby společnost získala prostředky z obchodních soutěží, grantů, soukromých investic, a prodala svůj produkt mnoha významným společnostem, přičemž testovala přes 100 zákaznických aplikací pro vývoj produktu.

Versaball dokáže uzvednout předměty vážící až 9 kg. Cena zařízení se pohybuje okolo 4 000 USD (92 000 Kč)

Produkt byl oficiálně ukončen v roce 2020. Společnost se zaměřila na vývoj a prodej pokročilejších robotických systémů, jako jsou pick-and-place roboti a autonomní mobilní roboti [30] [31] [32].



Obrázek 50: Bezprsté chapadlo Versaball vyvinuté firmou Empire Robotics [33]

Kvůli ukončení výroby a prodeje Versaball nebylo možné otestovat fyzicky a porovnat s navrženým adaptivním úchopem. Podle zjištěných dat dokáže uzvednout až 9 kg což je více než navržený gripper. Také disponuje tělem z hliníkové slitiny což je vykoupeno vyšší cenou.

8.3 FormHand FH-R150

Chapadlo FH-R150 od německé firmy FORMHAND Automation GmbH je inovativní systém pro manipulaci s různými objekty. Funguje na principu adaptabilního uchopení, které umožňuje chapadlu automaticky přizpůsobit se tvaru a povrchu uchopovaného objektu. Tato adaptabilita je zajištěna pomocí polštářku plněného granulátem, který když se vytvoří vakuum, mění svůj tvar tak, aby dokonale obeplnul a bezpečně držel objekt. K uchopení také využívá speciální otvory na spodní straně polštářku, které slouží jako přísavky a tvoří přísavný efekt [34].



Obrázek 51: Chapadlo FH-R150 [34]

Polštářek má průměr 150 mm a může dynamicky zvednout až 8 kg. Je ideální pro širokou škálu aplikací, od montážních linek až po logistiku, a díky modulární konstrukci lze jeho polštářek rychle vyměnit bez použití nářadí.

Základní cena modulu FH-R150 se pohybuje kolem 2 650 EUR (65 000 Kč), ale celková cena systému je vyšší, jelikož pro správné fungování je potřeba speciální zařízení pro generování vakua, hadice a filtrační systém. Finální cena se může vyšplhat až na 10 000 EUR (250 000 Kč) [34].

Chapadlo FH-R150 nebylo přímo porovnáno s navrženým adaptivním úchopem kvůli jeho omezené dostupnosti. Podle specifikace ale dokáže uchopit těžší předměty s větší spolehlivostí. Velkou nevýhodou tohoto systému je jeho pořizovací cena a potřeba speciálního vakuového generátoru.

9 SHRnutí VÝSLEDKŮ

Tato kapitola představuje souhrn výsledků získaných v průběhu diplomové práce zaměřené na návrh a vývoj adaptivního koncového efektoru pro průmyslové roboty. Cílem práce bylo vyvinout efektor, který je schopný efektivně manipulovat s různorodými objekty různých tvarů a velikostí, což bylo dosaženo prostřednictvím designu využívající deformaci a změnu tuhosti membrány.

9.1 Flexibilita a adaptibilita

Efektor je schopen přizpůsobit se a úspěšně uchopit objekty s průměrem od 25 mm do 100 cm, což dokládá jeho vysokou adaptabilitu. Membrána efektoru byla navržena tak, aby se mohla deformovat a obepnout různorodé geometrie, což bylo testováno na objektech s nepravidelnými povrchy, včetně kovových a plastových součástek s různými povrchy.

9.2 Použité materiály

Hlavní části koncového efektoru byly vyrobeny pomocí aditivní technologie (3D tisku), což umožnilo efektivní výrobu i složitějších komponent, jako je forma pro výrobu membrány. Jako vhodný materiál pro výrobu membrány se osvědčil silikon GMS A05, zejména díky jeho mechanickým vlastnostem a vysoké tekutosti. Membrána také prošla omezeným testem životnosti, při kterém nedošlo k jejímu poškození ani protržení.

9.2.1 Materiály pro náplň membrány

Byly otestovány tři typy materiálů pro náplň membrány adaptivního úchopu. Testované materiály zahrnovaly mletou kávu, kuličky z expandovaného polystyrenu (EPS) a termoplastický elastomer ve formě granulátu. Během testování na zkušebním stroji, který hodnotil maximální nosnost adaptivního úchopu, se ukázalo, že kuličky z EPS jsou nejlepší náplní pro většinu testovaných dílů.

9.3 Použití v průmyslu

Před nasazením adaptivního koncového efektoru do reálného provozu je nutné provést studii proveditelnosti, aby bylo ověřeno, zda je takový gripper vhodný pro manipulaci s konkrétním dílem. V praxi se může ukázat, že daný díl není kompatibilní s touto konstrukcí a je vyžadována jiná metoda uchopení. Tato studie je klíčová pro optimalizaci času a finančních nákladů spojených s návrhem a realizací aplikace.

ZÁVĚR

V této diplomové práci byl úspěšně navržen, implementován a otestován adaptivní úchopový systém pro průmyslové roboty, který demonstruje významný pokrok v oblasti robotické manipulace. Hlavním přínosem je schopnost systému automaticky se přizpůsobovat objektům různých tvarů a velikostí, což bylo potvrzeno testy na průmyslovém robotu ABB IRB1600. Experimenty prokázaly, že systém může efektivně manipulovat s objekty bez potřeby manuálního nastavení nebo programování specifických úchopových sekvencí.

Navržené řešení konstrukce adaptivního gripperu umožňuje upevnění na jakéhokoli průmyslového robota pouze po úpravě redukční části. Celou sestavu membrány lze také snadno měnit přímo na robotu, aniž by docházelo ke kontaminaci pracoviště náplní membrány.

Adaptivní gripper dokáže manipulovat s objekty o průměru přibližně 25 mm až 100 mm. Efektivita pevného úchopu primárně závisí na tvaru dílu. Ideální jsou objekty, které maximalizují kontakt s membránou v kolmém směru, jako například válec nebo krychle. Na tvaru dílu závisí i maximální nosnost, která může dosáhnout až 3 kg. Jako nejlepší z testovaných náplní membrány byla náplň využívající kuličky z expandovaného polystyrenu (EPS). V případě odebrání dílu z přesné pozice je možné ho položit do jiné přesné pozice, jelikož nedochází k pohybu součásti v membráně během manipulace. Životnost membrány může snižovat manipulace s díly s ostrými hranami, což se však v rámci omezeného experimentu nepotvrdilo.

Navržený model adaptivního úchopu byl otestován na řadě experimentů a v čase testování nevykazoval žádné nedostatky nebo chyby.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] CRAIG, John J. *Introduction to robotics: mechanics and control*. Third edition. Always learning (Pearson). Harlow: Pearson, [2014]. ISBN 978-1-292-04004-2.
- [2] ÚŘEDNÍČEK, Zdeněk. *Mechatrické systémy – úvod*. Přednáška. Zlín: Univerzita T. Bati ve Zlíně. 19.10.2020.
- [3] KOLÍBAL, Zdeněk. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
- [4] *Types of Industrial Robots and Their Different Uses*. Online. 2021. Dostupné z: <https://howtorobot.com/expert-insight/industrial-robot-types-and-their-different-uses>. [cit. 2024-02-26].
- [5] ESHAH BUDIN SHAH, Nur Syahirah; OSMAN, Khairuddin a ZAINUDDIN, Norzahirah. *5-Axis of Mitsubishi RV-2AJ Robotics Arm Modelling Using Solidworks*. Online, PNG. In: . IEEE, 2020. ISBN 978-1-7281-5310-0. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/CSPA48992.2020.9068674>. [cit. 2024-02-26].
- [6] *What Is a SCARA Robot?* Online. 2023. Dostupné z: <https://robodk.com/blog/what-is-a-scara-robot/>. [cit. 2024-02-26].
- [7] INCERTI, Giovanni. *On the possibility to minimize trajectory tracking errors of planar robots endowed with compliant joints*. Online. PNG. 2000, roč. 2000. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/307887723_On_the_possibility_to_minimize_trajectory_tracking_errors_of_planar_robots_endowed_with_compliant_joints. [cit. 2024-02-26].
- [8] *Průmyslové roboty*. Online. 2018. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/prumyslove-roboty-2/>. [cit. 2024-02-26].
- [9] *Cartesian Robots*. Online. 2021. Dostupné z: <https://howtorobot.com/expert-insight/cartesian-robots>. [cit. 2024-02-26].
- [10] *ABB releases 'faster, higher payload' delta robot*. Online. PNG. 2020. Dostupné z: <https://roboticsandautomationnews.com/2020/05/14/abb-releases-faster-higher-payload-delta-robot/32264/>. [cit. 2024-02-26].
- [11] *Tactical Robots*. Online. PNG. Dostupné z: <https://www.superdroidrobots.com/tactical-robots/>. [cit. 2024-02-26].

- [12] *Samsung designed public service bots to provide contact-free delivery with a smile!*. Online. PNG. 2021. Dostupné z: <https://www.yankodesign.com/2021/04/23/samsung-designed-public-service-bots-to-provide-contact-free-delivery-with-a-smile/>. [cit. 2024-02-26].
- [13] *Choose the right power cable to re-duce downtime in robotic welding applications*. Online. PNG. 2017. Dostupné z: <https://www.tregaskiss.com/choose-the-right-power-cable-to-reduce-downtime-in-robotic-welding-applications/>. [cit. 2024-02-26].
- [14] *Spot Welding Gun Parts*. Online. PNG. Dostupné z: <https://managementmania.com/en/companies/paramount-enterprises/products/spot-welding-gun-parts>. [cit. 2024-02-26].
- [15] KOLÍBAL, Zdeněk. *Průmyslové roboty II: Konstrukce výstupních hlavíc a periférií*. Učební texty vysokých škol. Brno: PC-DIR, 1993. ISBN 80-214-0533-3.
- [16] *Robot end of Arm Tooling*. Online. PNG. 2020. Dostupné z: <https://www.tthk.ee/inlearcs/7-robot-end-of-arm-tooling/>. [cit. 2024-02-26].
- [17] *Magnetic Grippers SGM-HP/-HT*. Online. PNG. Dostupné z: <https://www.schmalz.com/cs-cz/vakuova-technologie-pro-automatizaci/vacuum-components/special-grippers/magnetic-grippers/magnetic-grippers-sgm-hp-ht-306089/>. [cit. 2024-02-26].
- [18] QU, Juntian; YU, Zhenping; TANG, Wei; XU, Yining; MAO, Baijin et al. *Advanced Technologies and Applications of Robotic Soft Grippers*. Online. *Advanced Materials Technologies*. ISSN 2365-709X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/admt.202301004>. [cit. 2024-02-26].
- [19] FITZGERALD, Seth G.; DELANEY, Gary W. a HOWARD, David. *A Review of Jamming Actuation in Soft Robotics*. Online. *Actuators*. 2020, roč. 9, č. 4. ISSN 2076-0825. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/act9040104>. [cit. 2024-02-26].
- [20] BROWN, Eric; RODENBERG, Nicholas; AMEND, John; MOZEIKA, Annan; STELTZ, Erik et al. *Universal robotic gripper based on the jamming of granular material*. Online. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2010, roč. 107, č. 44, s. 18809-18814. ISSN 0027-8424. Dostupné z: <https://doi.org/10.1073/pnas.1003250107>. [cit. 2024-02-26].

- [21] PUSHPAKATH, Madan a ANG JR, Marcelo. Design of a Liquid Jamming Gripper. Online. *Designs*. 2023, roč. 7, č. 2. ISSN 2411-9660. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/designs7020044>. [cit. 2024-02-26].
- [22] KREMER, Paul; NOHOOJI, Hamed Rahimi; SANCHEZ-LOPEZ, Jose Luis a VOOS, Holger. TRIGGER: *A Lightweight Universal Jamming Gripper for Aerial Grasping*. Online. IEEE Access. 2023, roč. 11, s. 50098-50115. ISSN 2169-3536. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3276486>. [cit. 2024-02-26].
- [23] LICHT, Stephen; COLLINS, Everett; BALLAT-DURAND, Dorick a LOPES-MENDES, Manuel. Universal jamming grippers for deep-sea manipulation. Online. *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*. 2016, s. 1-5. ISBN 978-1-5090-1537-5. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2016.7761237>. [cit. 2024-02-26].
- [24] GUIZZO, Erico. *Building a Super Robust Robot Hand*. Online. PNG. 2011. Dostupné z: <https://spectrum.ieee.org/dlr-super-robust-robot-hand> [cit. 2024-02-26].
- [25] Andreas GEBHARDT a Jan-Steffen HÖTTER. *Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing*. Munich: Carl Hanser Verlag, 2016. ISBN 978-1-56990-582-1.
- [26] GIBSON, I.; ROSEN, D. W. a STUCKER, B. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. Second edition. New York: Springer, [2015]. ISBN 978-1-4939-2112-6.
- [27] GÖTZ, Holger; SANTAROSSA, Angel; SACK, Achim; PÖSCHEL, Thorsten a MÜLLER, Patric. Soft particles reinforce robotic grippers: robotic grippers based on granular jamming of soft particles. Online. *Granular Matter*. 2022, roč. 24, č. 1. ISSN 1434-5021. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10035-021-01193-4>. [cit. 2024-05-13].
- [28] MIŠKAŘÍK, Lukáš. *Rozhraní pro automatizované zakládání výrobků do indexovaných pozic KLT s nedeterministickými parametry*. Bakalářská práce. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta aplikované informatiky, Ústav automatizace a řídicí techniky, 2022. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/50732>.
- [29] *FlexShapeGripper*. Online. Dostupné z: https://www.festo.com/us/en/e/about-festo/research-and-development/bionic-learning-network/highlights-from-2015-to-2017/flexshapegripper-id_33444/. [cit. 2024-02-26].

- [30] SAUNDERS, Sarah. *Lessons Learned: Empire Robotics Explains Failed Attempt to Commercialize Soft Robotics Technology*. Online. 2017. Dostupné z: <https://3dprint.com/162151/versaball-lessons-learned/>. [cit. 2024-02-26].
- [31] AMEND, John; CHENG, Nadia; FAKHOURI, Sami a CULLEY, Bill. *Soft Robotics Commercialization: Jamming Grippers from Research to Product*. Online. *Soft Robotics*. 2016, roč. 3, č. 4, s. 213-222. ISSN 2169-5172. Dostupné z: <https://doi.org/10.1089/soro.2016.0021>. [cit. 2024-02-26].
- [32] FLAHERTY, Joseph. *A Beanbag Robot Hand That Works Insanely Well*. Online. In: *Wired*. 2014. Dostupné z: <https://www.wired.com/2014/01/empire-robotics-jamming-robot/>. [cit. 2024-05-02].
- [33] *Empire Robotics Presents the VERSABALL*. Online. 2014. Dostupné z: <https://industrialmachinerydigest.com/industrial-news/industry-updates/empire-robotics-versaball/>. [cit. 2024-02-26].
- [34] *FH-R150*. Online. In: *FormHand*. 2023. Dostupné z: <https://www.formhand.de/en/products/FH-R150>. [cit. 2024-05-02].

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PRaM	Průmyslový robot a manipulátor.
KD	Kinematická dvojice.
kPa	Kilopascal.
Pick and place	Přesunu a umístění
el	Elektrický
ml	Mililitr
cca	Přibližně
kg	Kilogram
g	Gram
ms	Milisekunda
USD	Americký dolar
EUR	Euro

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Schématické znázornění translační KD (a) a rotační KD (b) [vlastní zdroj]	11
Obrázek 2: Rozdělení akčního systému průmyslového robotu [3]	12
Obrázek 3: Šestiosý robot [5]	13
Obrázek 4: SCARA robot [7]	14
Obrázek 5: Kartézský robot [4]	15
Obrázek 6: Delta robot [10]	15
Obrázek 7: Vlevo taktický robot [11], vpravo univerzální servisní robot [12]	16
Obrázek 8: Hlavice pro obloukové svařování [13]	17
Obrázek 9: Hlavice pro bodové svařování [14]	17
Obrázek 10: Různé typy konstrukcí aktivních mechanických úchopů [16]	19
Obrázek 11: Ukázka aktivních úchopů s pneumagnety [17]	20
Obrázek 12: Příklad ovládání ejektorové přísavky [3]	21
Obrázek 13: Princip činnosti bezprstého měkkého chapadla [20]	22
Obrázek 14: Mletá káva jako náplň membrány [20]	23
Obrázek 15: Výroba membrány pomocí namáčení [19] [21]	24
Obrázek 16: Výroba membrány odléváním silikonu [22]	25
Obrázek 17: Bezprsté chapadlo uchopující předměty ležící na dně nádrže [23]	25
Obrázek 18: Dvouprstá měkká chapadla [18]	27
Obrázek 19: Víceprstá měkká chapadla [18]	27
Obrázek 20: Mnoho článková měkká chapadla [18] [24]	28
Obrázek 21: Vlevo 3D návrh prototypu, vpravo testování prototypu	32
Obrázek 22: Finální návrh gripperu – rozložený pohled	33
Obrázek 23: 3D model membrány	35
Obrázek 24: Jednotlivé části filtru	35
Obrázek 25: Vakuový ejektor FESTO VADMI-140-P	36
Obrázek 26: Tři typy materiálů jako náplň do membrány	37
Obrázek 27: 3D model formy pro výrobu membrány	38
Obrázek 28: Pevné díly, ze kterých se skládá koncový efektor	39
Obrázek 29: Forma připravená na montáž	40
Obrázek 30: Příprava silikonu ve vakuové komoře	41
Obrázek 31: Vlevo plnění formy, vpravo plná forma připravená na vulkanizaci	42

Obrázek 32: Otevřená forma s vyrobenou membránou.....	42
Obrázek 33: Vlevo 3D model gripperu v řezu,.....	43
Obrázek 34: Testovací stroj LabTest 6.50	44
Obrázek 35: Testovací díly pro zkoušku únosnosti	45
Obrázek 36: Ukázka natažení membrány u různých typů náplně membrány	49
Obrázek 37: Robot ABB IRB 1600 osazený adaptivním úchopem.....	51
Obrázek 38: Obě poloviny mechanismu pro rychlou výměnu nástroje.....	52
Obrázek 39: Postup uchopení a uvolnění dílu	53
Obrázek 40: Možné stabilní polohy testovacího dílu	53
Obrázek 41: Proces odebrání při testování adaptability	54
Obrázek 42: Díly různých tvarů pro testování přesného uchopení a položení dílů	55
Obrázek 43: Rozložení dílů v paletě.....	56
Obrázek 44: Zjednodušený vývojový diagram programu	57
Obrázek 45: Simulace přeskládání dílů	58
Obrázek 46: Průběh překládání dílů robotem	59
Obrázek 47: Testování životnosti membrány	60
Obrázek 48: Různé stavy koncového efektoru Festo FlexShapeGripper	61
Obrázek 49: Testování koncového efektoru Festo FlexShapeGripper	62
Obrázek 50: Bezprsté chapadlo Versaball vyvinuté firmou Empire Robotics [33] ...	63
Obrázek 51: Chapadlo FH-R150 [34].....	64

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Hmotnost adaptivního úchopu.....	50
---	----

SEZNAM GRAFŮ

- Graf 1: Úchopná síla naměřená při testování různých typů dílu a náplně membrány 46
- Graf 2: Průběh síly v závislosti na posunu gripperu u krychle o rozměru 50 mm47
- Graf 3: Průběh síly v závislosti na posunu gripperu u válce o rozměru 75 mm47
- Graf 4: Průběh síly v závislosti na posunu gripperu u dílu ve tvaru ježka48
- Graf 5: Průběh síly v závislosti na posunu gripperu u koule o velikosti 50 mm48

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha PI: Obsah CD

PŘÍLOHA P I: NÁZEV PŘÍLOHY

Struktura obsahu přiloženého CD:

- složka **Text diplomové práce** – obsahuje text diplomové práce ve formátu PDF/A