

Návrh prototypu bionické ruky

Richard Daněček

Bakalářská práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Richard Daněček
Osobní číslo:	T23633
Studijní program:	B0788A270001 Procesní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Návrh prototypu bionické ruky

Zásady pro vypracování

- teoretické studie na dané téma
- skenování 3D nestatického objektu
- úprava naskenovaných dat
- zpracování dat do organického designu a kombinace s pohybovým mechanismem

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

Seznam doporučené literatury:

BASUMATARY, Hirakijoti; HAZARIKA, Shyamanta M. State of the art in bionic hands. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2020, 50.2: 116-130.
BAYRAK, Alper; BEKIROGLU, Erdal. Bionic hand: A brief review. *Journal of Bionic Memory*, 2022, 2.1: 37-43.
CHAPPELL, Paul H. *Mechatronic hands: prosthetic and robotic design*. Stevenage: The Institution of Engineering and Technology, 2016, xviii, 167 s. IET control, robotics and sensors series. ISBN 9781785611544.
DAVIM, J. Paulo. *Additive and subtractive manufacturing: emergent technologies*. Berlin: Walter de Gruyter, [2019], 1 online zdroj. De Gruyter series in advanced mechanical engineering. ISBN 9783110549775. Dostupné také z: <https://proxy.k.utb.cz/login?url=https://www.degruyter.com/openurl?genre=book&isbn=9783110549775>

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 6. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení bakalářské práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji bakalářskou 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;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – bakalářskou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské 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 bakalářské práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....

podpis autora

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá prvotním návrhem konstrukce bionické ruky, vytvořeného s využitím CAD programů. Cílem práce je vytvořit funkční konstrukční návrh bionické horní končetiny, který bude navržen dle předlohy lidské horní končetiny a bude využívat základní biomechanické principy pro jeho fungování. Těchto principů bylo dosaženo pomocí topologických anatomických atlasů v kombinaci s pořízeným 3D skenem lidské horní končetiny. Díky této kombinaci byl vytvořen prototyp dodržující její ergonomii.

Klíčová slova: ruka, biomechanika, 3D skenování, reverzní inženýrství

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the initial design of a bionic hand created using CAD programs. The purpose of the thesis is to create a functional design of a bionic hand, which will be designed according to a human hand template and will use basic biomechanical principles for its functioning. These principles were achieved by using topological anatomical atlases in combination with a 3D scan of a human hand. Thanks to this combination, a prototype following the ergonomics of the hand was created.

Keywords: hand, biomechanics, 3D scanning, reverse engineering

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ondřeji Bílkovi, Ph.D. za rady, poznámky a připomínky, které jsem využil při psaní diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a blízkým za podporu při tvorbě práce a studiu.

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 REVERZNÍ INŽENÝRSTVÍ.....	13
1.1 VYUŽITÍ REVERZNÍHO INŽENÝRSTVÍ V RŮZNÝCH ODVĚTVÍCH	15
1.1.1 Architektura.....	15
1.1.2 Armáda.....	16
1.1.3 Biotechnika	16
1.1.4 Software	16
1.1.5 Strojírenství.....	17
1.2 3D SKENOVÁNÍ	17
1.2.1 Druhy 3D skenování	18
1.2.2 Způsoby zpracování a úpravy dat	22
1.2.3 Využití naskenovaných dat	23
2 POHYBOVÝ MECHANISMUS	26
2.1 KONVENČNÍ POHYBOVÉ MECHANISMY	26
2.2 BIOMECHANIKA.....	31
2.2.1 Topografické anatomie horní končetiny	32
2.2.2 Využití biomechanických mechanismů	33
3 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI.....	36
II PRAKTICKÁ ČÁST.....	37
4 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	38
5 VÝROBA DUPLIKÁTU NESTATICKÉHO TĚLESA PRO 3D SKENOVÁNÍ.....	39
5.1 SILIKONOVÁ FORMA	39
5.2 ODLÉVÁNÍ VÝROBKU	41
6 NÁVRH POHYBOVÉHO MECHANISMU.....	44
6.1 DIGITALIZACE ODLÉVANÉHO VZORKU.....	44
6.2 NÁVRH POHYBOVÉHO MECHANISMU	47
7 DISKUZE	54
ZÁVĚR	56
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	59
SEZNAM OBRÁZKŮ	61
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	62
SEZNAM PŘÍLOH.....	63

ÚVOD

Vývoj bionických protéz představuje významný krok směrem ke zlepšení kvality života osob se ztrátou končetin. V posledních letech dochází k výraznému pokroku jak v oblasti elektroniky, tak i samotné konstrukce těchto zařízení. Tato bakalářská práce se zaměřuje na návrh konstrukčního řešení bionické horní končetiny s důrazem na využití principů biomechaniky lidské horní končetiny. Cílem práce je vytvořit prototyp, který co nejvěrněji napodobuje pohyb a ergonomii lidské horní končetiny.

V rámci této práce byly využity moderní technologie využívané pro mechanický design. Jednou z těchto technologií je 3D skenování, které umožňuje digitalizaci libovolných objektů. Za její pomoci byl pořízen 3D model, který posloužil jako referenční model pro tento návrh. Další technologie zahrnuje využití CAD systémů, pomocí nichž byl vytvořen a zformován návrh bionické horní končetiny do finální podoby.

Práce poskytuje kompletní přehled o postupu návrhu bionické horní končetiny. Popisuje podrobný postup od výroby formy, přes odlévání duplikátu, 3D skenování až po vytvoření konečného modelu. Výsledkem tohoto snažení je návrh bionické horní končetiny ve formě 3D modelu, který by se mohl stát prvním krokem pro další využití.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 REVERZNÍ INŽENÝRSTVÍ

Jedná se o proces, který se zaměřuje na vytváření dokumentace již existujících objektů či systémů pro bližší pochopení jejich fungování. Případně pro budoucí reprodukci objektů, které jsou předmětem tohoto zkoumání. Dalším z možných cílů je vyhledání silných a slabých stránek zkoumaných objektů či systémů, pro jejich následné využití nebo zneužití, dle potřeb a cílů zkoumání daného systému. Tento proces bývá zpravidla časově náročný a vyžaduje vyšší úroveň odborných znalostí v rámci oboru, kterého se zkoumaný objekt týká.

Jedním ze známějších příkladem využití reverzního inženýrství z období od druhé světové války až po konečné období studené války je německá balistická raketa V-2 poháněná kapalnými palivy. Tato raketa nesla vysoce explozivní náklad směrem k Londýnu i jiným městům ve spojeneckých zemích. Na základě ukořistěných plánů, německých vědců a inženýrů byla americká vláda schopna vytvořit balistické rakety rodiny Redstone. [1]



Obrázek 1 Balistická raketa Redstone

(zdroj:[1])

Reverzní inženýrství, jakožto většina procesů, se drží jistého postupu, který se sice mění v závislosti na daném problému, avšak základní postup je vesměs stejný. [2]

- **Definování cíle** – Na začátku každé nové operace by mělo být hlavní stanovení cíle a upřesnění, čeho chceme dosáhnout. Díky definování cíle jsme schopni vytvořit konkrétní postup a sled operací tak, aby byl daný cíl splněn. Možné cíle mohou být: reprodukce objektu, optimalizace, zjištění funkčnosti systému nebo jen obnovení dokumentace.
- **Sběr dat** – Po tom, co byl definován cíl, je vhodné nashromáždit veškerá dostupná data o analyzovaném objektu. V rámci prvotních kroků by nemělo chybět pozorování objektu v běžném provozu. V případě mechanického objektu odhalit kde, při čem a jak moc se která část zahřívá nebo jestli nedochází k viditelným deformacím. Tyto nashromážděné informace mohou v budoucích operacích pomoci s modifikací daného objektu či s úpravou doporučených zatížení. Při sběru dat se využívají různé nástroje, a to ať už při kontaktním měření tak i při bezkontaktním. Nejčastěji užívanými nástroji jsou 3D skenery a mechanická měřidla.
- **Analýza a zpracování dat** – Nashromážděná data je třeba analyzovat a zpracovat do použitelného stavu. Pro tyto operace se hojně využívají různé programy, a to od nástrojů pro virtuální sochařství až po pokročilé CAD systémy. Cílem tohoto kroku je úprava nashromážděných dat pro následné zpracování a pokud možno, co nejvíce usnadnit budoucí práci s nimi.
- **Dokumentace** – Je nutné vytvoření dokumentace analyzovaného objektu. V tomto bodě je daný objekt plně zdigitalizován a je zapotřebí vytvořit výkresovou či bezvýkresovou dokumentaci, schématické náčrty a případné výstupní diagramy měřících zařízení.
- **Rekonstrukce a vylepšování** – Mezi finální fáze v reverzním inženýrství je testování daného objektu vytvořeného na základě toho analyzovaného. V případě, že výrobek nesplňuje veškerá očekávání, je nutné jej upravit tak, aby vyhovoval všem požadavkům. Teprve v případě plného schválení je u daného objektu možné spustit výrobní proces.

1.1 Využití reverzního inženýrství v různých odvětvích

Jelikož se jedná o proces složený ze zkoumání existujících objektů a případné následné replikace, je možné jej tedy využít v různých průmyslových odvětvích.

1.1.1 Architektura

V architektuře se reverzní inženýrství využívá nejen pro dokumentace, rekonstrukce či modernizace historických staveb, ale také pro analýzy konstrukcí. Z pohledu architektury by se tento proces dal rozřadit do několika následujících odvětví:

- **Restaurování** – Nesjipš nejznámějším příkladem v dnešní době je restaurace katedrály Notre-Dame, která v roce 2019 byla zasažena požárem. Pro obnovu této honosné a historicky významné stavby byly využity různé metody sběru dat, jako například 3D laserové skenování, pořízených před požárem katedrály. [3][4]
- **Modernizace a dokumentace** – Jak už název napovídá, toto odvětví je zaměřené na využití nasbíraných dat pro modernizaci budov. Dokonce i v dnešní době pro spoustu budov, neexistuje jakákoli dokumentace. V takových případech je jedinou možností reverzní inženýrství. Zpracovaná data lze využít pro plánování umístění nových výrobních linek, rozvodného potrubí vzduchotechniky a podobně. [4]



Obrázek 2 Dokumentace historické fasády

(zdroj: vlastní)

1.1.2 Armáda

Reverzní inženýrství jako takové zažilo svůj rozkvět v období válek. Například v průběhu druhé světové války ve snaze posunout válečnou mašinérii na vyšší úroveň. Jedním z příkladů je vývoj válečných letadel. Ve chvíli, kdy jedna strana vyvinula novou technologii, druhá strana sestřelené letouny vybavené touto technologií schraňovala, analyzovala, případně vylepšila a použila ve svůj vlastní prospěch.

Obecně se reverzní inženýrství v armádě využívá pro vývoj zbraní a techniky na základě podkladů získaných z nepřátelských objektů. Dále je možné použít nashromážděná data k vývoji protipatření vůči těmto hrozbám.

1.1.3 Biotechnika

Analýza biologických systémů či organismů. Díky rozvoji reverzního inženýrství se ve zdravotnictví využívají například umělé orgány a bionické protézy.

- **Protetika** – Jedná se o odnož biotechnického reverzního inženýrství, které se zabývá vývojem protéz a náhrad. Navrhování biomechanických protéz nejen končetin ale také například očí. Vývoj polymerních systémů schopných reagovat s lidskou tkání směřuje k vytvoření nových srdečních chlopní. [5][6][5]
- **Farmacie** – Umožňuje navrhovat nové molekuly, které mohou blokovat nebo aktivovat určité biologické cesty či procesy, čímž se vytváří prostor pro vývoj cílené léčby a léků.

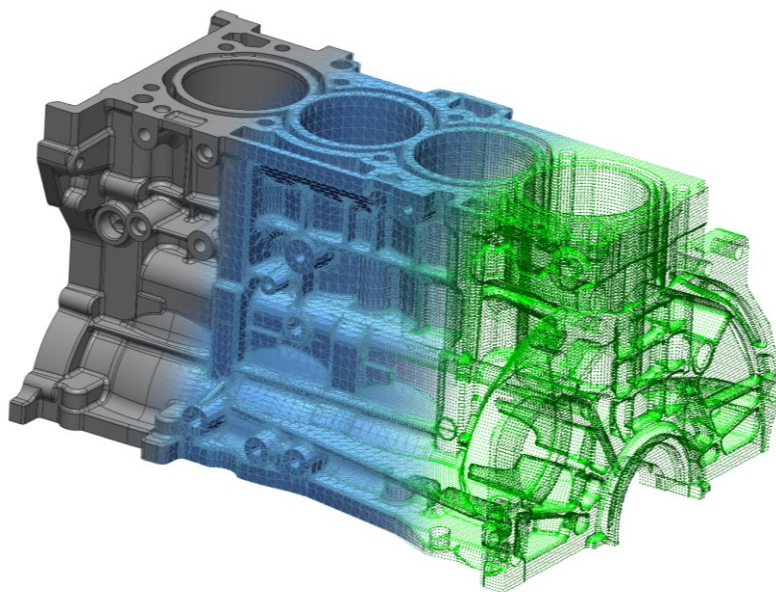
1.1.4 Software

Rekonstrukce existujících funkcí a programů na základě jejich funkčnosti

- **Statická analýza** – Jedná se o analýzu zdrojového kódu či jakéhokoliv typu souboru, aniž by došlo k jeho spuštění. Tuto metodu využívají například antivirové systémy při skenování souborů kvůli škodlivému malwaru. Metoda se zaměřuje specificky na strukturu a datové sekce souboru. [7]
- **Dynamická analýza** – Analýza programů, která probíhá během spuštění programu za použití debuggerů a monitorovacích nástrojů. Cílem je zjistit chování programu, zdali je například škodlivý či ne a které podprogramy při jaké operaci využívá. [7]

1.1.5 Strojírenství

Reverzní inženýrství v tomto průmyslu má využití zpravidla při snaze vytváření kopií již existujících dílů. Jedná se především o díly, které se již nevyrábí nebo se nedají koupit. Pro příklad by se dal uvést zadní blok převodovky historických motocyklů ale také různých jiných dílů, nejčastěji ve spojitosti s historickými stroji. [8]



Obrázek 3 Vizualizace reverzního inženýrství

(zdroj: [9])

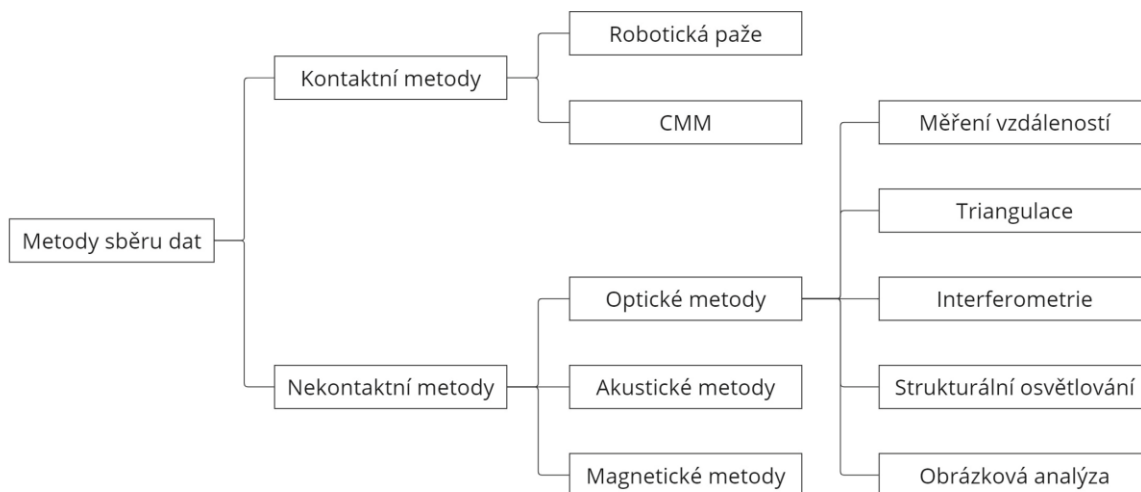
1.2 3D Skenování

3D Skenování je proces, který umožňuje shromažďovat data o povrchu, textuře, geometrii a tvaru objektu, které je následně možné využít od jednoduchého 3D tisku až po extrakci textury objektu.

Před začátkem procesu skenování je velice vhodné připravit daný objekt a jeho prostředí tak, aby proběhl celý proces skenování a následné vyhodnocení dat v programu bez komplikací a bylo dosaženo, pokud možno, co nejlepších výsledků. Skenování by mělo probíhat na místě za stabilního osvětlení. Co se týče předmětu skenování, je možné lehce upravit jeho povrch, například jej zdrsnit. Obecně platí, že povrchy s matnou texturou se skenují lépe než povrchy lesklé. Kroky přípravy se však liší v závislosti na druhu skenování, který je použit. [10][3]

1.2.1 Druhy 3D skenování

Data nashromážděná pomocí 3D skenování se dají shromažďovat několika způsoby, které se od sebe liší především využitím odlišných nástrojů měřicích zařízení. Proces převedení surových dat získaných skenerem do geometrického modelu ve virtuálním modelovacím prostoru je však velice podobné pro všechny druhy.



Obrázek 4 Základní rozdělení metod 3D skenování

(zdroj: vlastní)

1.2.1.1 Kontaktní metody

Kontaktní metody jsou takové metody, kde je zapotřebí úzký fyzický kontakt mezi měřicím zařízením a skenovaným objektem.

- **Robotická paže** – Jedná se o jednu z méně používaných metod. Snímací zařízení jsou umístěna v kloubech robotického ramene a informace o hodnotě úhlu pootočení jsou následně využity pro výpočet přesných souřadnic v prostoru. Možnosti skenování jsou ovšem silně omezené rozpětím pohybu robotické paže. [5][10]
- **CMM** – Coordinate measuring machines, čili souřadnicové měřicí zařízení je pravděpodobně nejpoužívanější metodou kontaktního skenování. Tato zařízení mohou být naprogramována tak, aby sledovala cestu na povrchu a sbírala přesná data. Nejčastěji se využívají pro zachycení polohy obrobku v obráběcích strojích. [5][10]

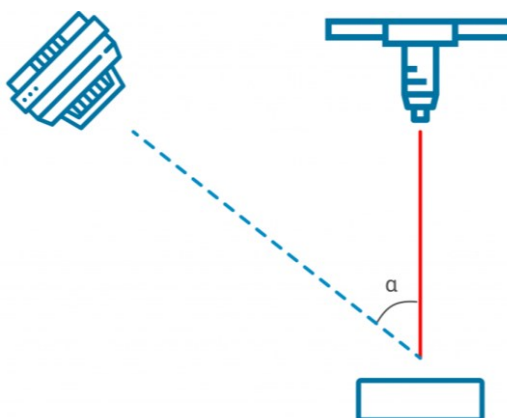
1.2.1.2 Bezkontaktní metody

Bezkontaktní metody jsou takové metody, při kterých nedochází k jakémukoliv fyzickému styku mezi měřicím zařízením a povrchem skenovaného objektu. V rámci shromažďování 3D dat jsou to mnohem využívanější metody. Dokážou nashromáždit velký objem přesných dat za relativně krátký čas ve srovnání s kontaktními metodami.

1.2.1.2.1 Optické metody

Optické metody jsou nejvyužívanějšími metodami pro 3D skenování. Jejich výhodou je, že nepotřebují kontakt s povrchem pro získání dat. Jsou rychlé, spolehlivé a některé z metod jsou schopny zachytit dokonce i barvu povrchu. [7]

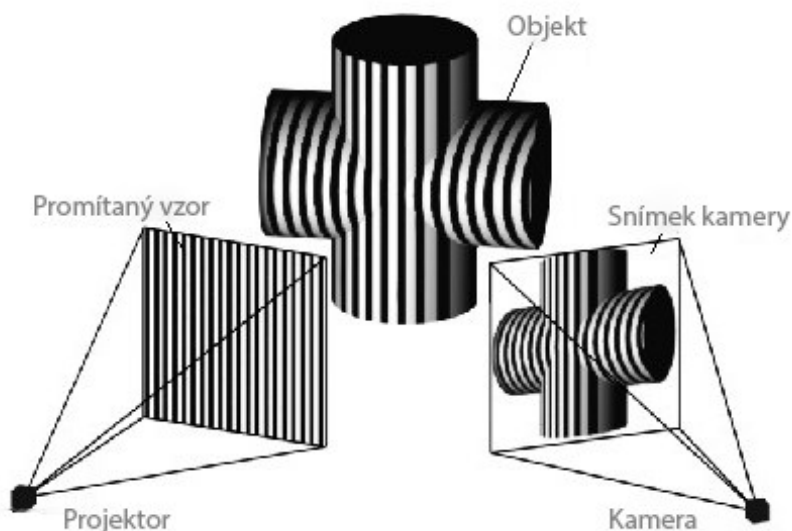
- **Pomocí měření vzdálenosti** – Metoda pomocí měření vzdálenosti je velice jednoduchá. Měření probíhá zachycením doby letu světelného paprsku ke skenované ploše a doby letu zpět do snímáče. [3][10]
- **Triangulace** – Triangulace je metoda, která využívá měření úhlu mezi vyslaným světelným paprskem a fotosenzitivním snímačem, pomocí čehož je schopna vypočítat pozici tohoto bodu v prostoru. Paprsek koncentrovaného světelného záření je pod předurčeným úhlem vyslán na skenovanou plochu, fotosenzitivní zařízení v podobě kamery zachytí odraz světelného paprsku od plochy a pomocí geometrické triangulace ze známého úhlu a vzdálenosti je vypočítána pozice bodu. Přesnost skenu je určena rozlišením snímací kamery a vzdáleností skenovacího zařízení od skenované plochy. [10]



Obrázek 5 Schéma triangulační metody

(zdroj: [11])

- **Interferometrie** – Jedná se o skenování povrchu na základě vlnových délek světelného paprsku a jejich interference. Tato metoda skenování využívá monochromatického viditelného světla. [10]
- **Strukturální osvětlení** – Jde o promítání jednotlivých obrazců a tvarů světla na zkoumanou plochu. Na skenovaném objektu se promítaný tvar zdeformuje. Tato deformace je zachycena kamerou. Pravděpodobně nejvyužívanější je promítání čar, které při zachycení a následné analýze určují vzdálenost mezi sebou. Tato vzdálenost slouží k vyhodnocení výšky jednotlivých bodů na povrchu tělesa a následnému přiřazení souřadnic k těmto bodům. Tato metoda dokáže pořídit velký objem dat v rámci jedné fotografie, ale její analýza může být relativně komplexní. [10][12]



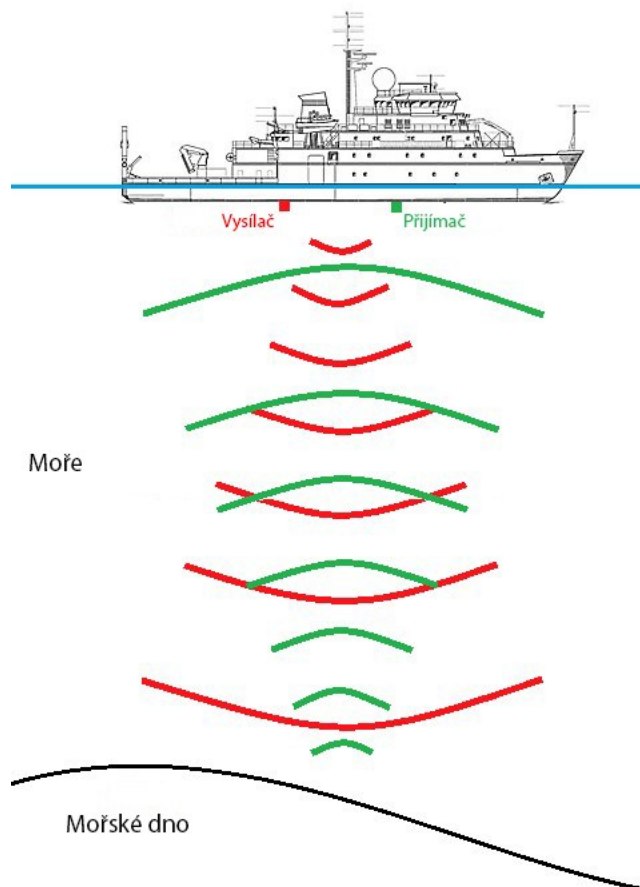
Obrázek 6 Schéma strukturálního světlení

(zdroj: [12])

- **Obrázková analýza** – Metoda skenování pomocí obrázkové analýzy je podobná metodě strukturálního osvětlování, taktéž je jejím základem analýza pořízených snímků. Tato metoda ovšem nezávisí na analyzování promítaných vzorců na objekt, ale místo toho využívá dvojice obrázků k určení souřadnic jednotlivých bodů na objektu. Korelace dvou obrázků probíhá za pomoci využití stěžejních záchytných bodů a pozadí. Tento proces je náročný na výpočetní techniku. [3]

1.2.1.2.2 Akustické metody

Akustické metody jsou využívány již po několik desítek let. Nejznámějším využitím akustických vln je sonar, který se historicky stal nepostradatelným. Jedno z jeho prvních využití byla detekce ledových ker a ledovců při zaoceánských plavbách a následně se dostal i do armády v průběhu první světové války. Méně známým faktem je, že některé kamery, které mají automatické zaostřování, též využívají principu sonaru pro určení vzdálenosti. Metoda jako taková funguje velice podobně jako některé optické metody. Jde pouze o jednoduchý výpočet vzdálenosti pomocí doby letu akustické vlny k objektu a následné doby letu ke snímači po odrazu. Takzvané dynamické zobrazování využívá ultrazvukové zařízení, které umožňuje jednoduše se vyhnout nechtěné analýze akustického šumu z okolí. Sonar se využívá například pro mapování dna vodních ploch a objektů. [10]



Obrázek 7 Schéma sonaru

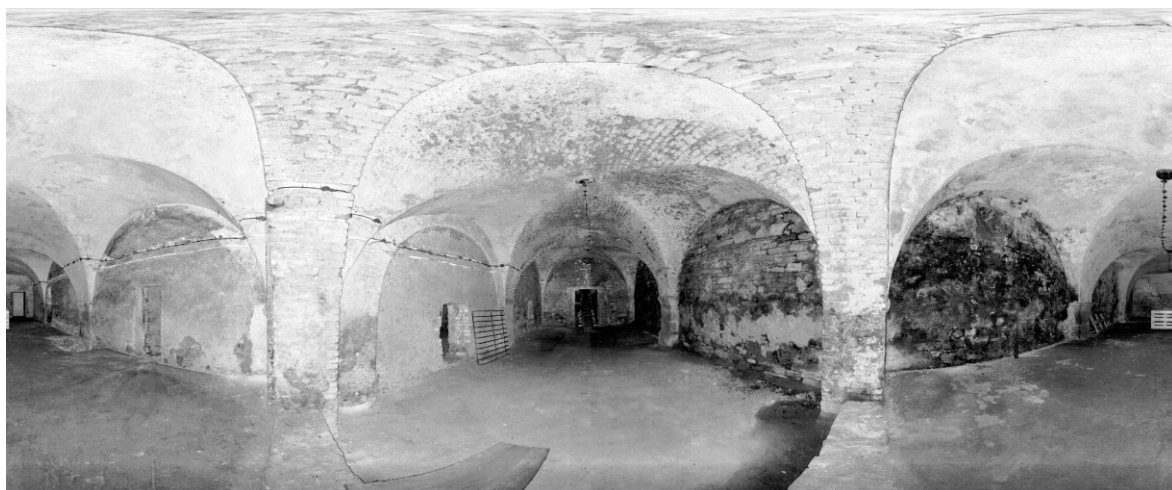
(zdroj: [13])

1.2.1.2.3 Magnetické metody

Skenování pomocí magnetického pole zahrnuje pozorování síly zdroje magnetického pole. Magnetické sondy snímají nejen polohu, ale i orientaci magnetického pole. Magnetická rezonance aktivuje atomy, které jsou předmětem měření v rámci materiálu pomocí rezonanční frekvence a poté měří jejich reakce. Tohoto se využívá především v MRI (magnetic resonance imaging) přístroji, bez kterého by moderní medicína takřka neexistovala. [10]

1.2.2 Způsoby zpracování a úpravy dat

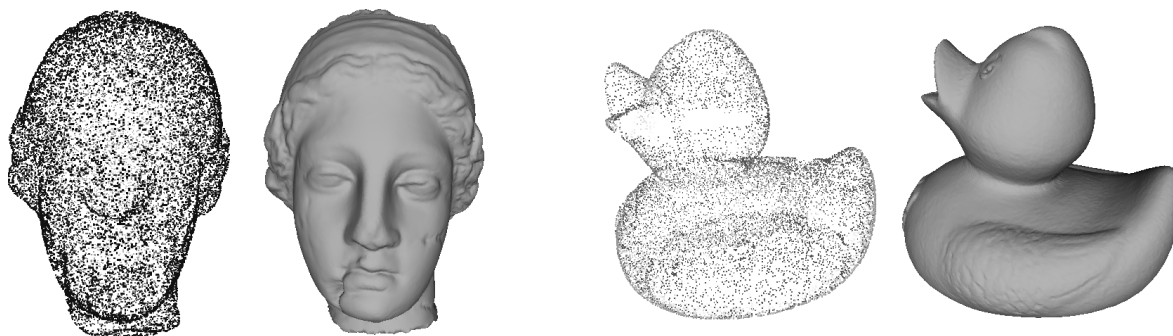
Surovým výstupem 3D skenování je něco, čemu se říká bodové mračno. Bodové mračno je shluk bodů v 3D prostoru, který je rozset po pomyslném povrchu skenovaného předmětu, jinými slovy, povrch skenovaného předmětu je představován mračnem bodů.



Obrázek 8 Pohled z perspektivy laserového skeneru

(zdroj: vlastní)

Tato surová data se využívají například při jejich vektorizaci v rámci dokumentace existujících staveb čili se jedná o vytváření stavebních výkresů již stojících staveb. Mnohem častěji se však bodové mračno využívá pro tvorbu 3D plošného modelu, který se vizuálně více podobá skenovanému objektu. Tvorba polygonální sítě je ovšem proces, který při skenování probíhá automaticky v programu, do kterého jsou údaje ze skeneru posílány. Obrázek 9 zobrazuje vizuální porovnání bodového mračna s polygonální sítí z něj vytvořenou. Polygonální síť čili mesh, je plošné těleso tvořené polygony, nejčastěji tvaru trojúhelníků. Množství polygonů meshe závisí na kvalitě skenování, není však problém pohybovat se v řádech milionů polygonů v rámci jednoho tělesa.



Obrázek 9 Porovnání bodového mračka s polygonální sítí

(zdroj: [14])

Data, získaná pomocí 3D skenování, je v drtivém množství případů nutné jistým způsobem upravit nebo připravit na následné operace neboli provést postprocessing. V ideálních případech, které se vyskytují opravdu jen zřídka, není nutné žádného dodatečného upravování či přípravy a je možné s nimi přímo pracovat jako s obyčejným 3D modelem, vytvořeným v jakémkoliv modelářském programu. V opačném případě je nutné v první řadě z naskenovaných dat vytvořit takový model, se kterým bude možné dále pracovat. Jedním z prvních kroků tedy bývá kontrola chyb v topologické síti, která tvoří 3D model. Nejčastějším případem chyb bývají díry ve vytvořené síti, přebytné části modelu nebo šum. [5]

1.2.3 Využití naskenovaných dat

Využití 3D naskenovaných dat je téměř neomezené, jinými slovy, představivosti se meze nekladou. Využití těchto dat se ovšem omezené z drtivé většiny na 3D programy.

- **3D tisk** – Nejjednodušším případem využití 3D skenovaných dat je 3D tisk. Skeny lze přímo převést do formátu STL či OBJ a v programu pro tvorbu tiskových programů vytvořit požadavek pro tisk. V dnešní době spousta programů pro 3D tisk již nemá mnoho problémů pracovat s plošnými tělesy, která nejsou uzavřená a dokážou jejich poškozenou topologickou síť opravit tak, aby byla použitelná. 3D tisk tedy představuje velice snadnou cestu pro znovu zhmotnění skenovaných objektů. [5]



Obrázek 10 Příklad 3D tisku

(zdroj: vlastní)

- **Extrahování povrchu** – V případě designových prvků se využívají data nasbíraná pomocí 3D skenování k extrakci textury jejich povrchu. Jedním z příkladů jsou moderní sprchové vaničky s texturou břidlice, která slouží jako designový prvek ale také částečně jako protiskluzové opatření. Proces extrahování textury povrchu je náročný na výpočetní techniku. Skeny mívají obrovský objem dat, protože jde o velice jemnou polygonální topologickou síť. Počet polygonu pro sken o velikosti 200x200 mm může obsahovat desítky až stovky milionů polygonů. Extrahovaný povrch je také možno použít pro vytváření textur ve vizualizačních programech.
- **Úprava a duplikace existujících děl** – V případě nutnosti úpravy či dokonce obnovení výroby tvarově složitých děl je 3D skenování hojně využíváno. Naskenovaná data ve formě objemového tělesa lze upravovat a s moderními nástroji vybavenými umělou inteligencí je možné díly zdokonalit a posunout na novou úroveň. Například zlepšit odvádění nežádoucího tepla, snížení hmotnosti při zachování pevnosti nebo zvýšení tuhosti a pevnosti. [5]

- **Pevnostní analýzy** – Pevnostní analýza probíhá na kopii virtuálního modelu součásti, které se říká FEM model (Finite Element Method). FEM model je jednoduše řečeno jen mesh model, vytvořený s vysokou přesností podle součásti, kterou chceme testovat. Jelikož konečným výstupem skenování pomocí 3D metod je také mesh model, je tedy možné na něm provádět pevnostní analýzy stejně jako na modelu součásti, která je vytvořena pouze ve virtuálním prostředí.
- **VFX** – V dnešní době se čím dál více využívá zachycování obličeje herců v kinematografickém i videoherním průmyslu. Zachycené záznamy mohou být využity hned dvěma způsoby. V kinematografii je možné obličej herce a jeho specifické pohyby mimických svalů použít jako základ pro vytvoření animací počítačově vytvořených postav. Kdežto ve videoherním průmyslu se více využívají skeny obličejů pro digitalizaci a lehkou úpravu pro virtuální prostředí. Jinými slovy, obličej herce představuje obličej postavy, jako tomu bylo v případě videohry Star Wars Jedi: Fallen order kde postavu Cal Kestise ztvárnil herec jménem Cameron Monaghan.
- **Dokumentace** – Jednou z velké části reverzního inženýrství je dokumentace již existujícího objektu. 3D skeny se mohou využít ve formě bodového mračka nebo polygonální sítě, pro vytvoření jak výkresové, tak bezvýkresové dokumentace. Příkladem výkresové dokumentace mohou být výrobní výkresy strojních součástí nebo stavební výkresy již existujících staveb. Bezvýkresovou dokumentací by se dal označit jakýkoliv 3D model obsahující poznámky PMI (product and manufacturing information).

2 POHYBOVÝ MECHANISMUS

Jedná se o systémy, které umožňují pohyb objektů či vykonávání daných úkonů. Úkolem pohybových mechanismů je přeměnit jeden druh pohybu na jiný nebo jej pouze přenést. Z tohoto důvodu se dají mechanismy dělit podle základního druhu pohybu, který vykonávají:

- **Lineární pohyb** – jedná se o jednoduchý pohyb podél jedné osy, jinými slovy o přímočarý pohyb
- **Rotační pohyb** – pohyb kolem osy, ať už se jedná osu vlastní, či osu uloženou mimo těleso vykonávající pohyb
- **Oscilační pohyb** – jedná se o kývavý pohyb tělesa kolem jednoho pevného bodu

Dále se dají dělit podle druhu pohonu:

- **Mechanické mechanismy** – mechanismy je poháněn mechanickými převody jako jsou například ozubená soukolí, řemenové převody nebo šroubové převody
- **Hydraulické mechanismy** – přenos poháněcích sil je zajištěn pomocí kapaliny dopravované nejčastěji nějakým druhem hydromotoru či čerpadla
- **Pneumatické mechanismy** – přenos poháněcích sil je zajištěn pomocí tlakového vzduchu vytvářený kompresorem
- **Elektrické mechanismy** – poháněcí síly vytváří elektromotor či elektromagnet

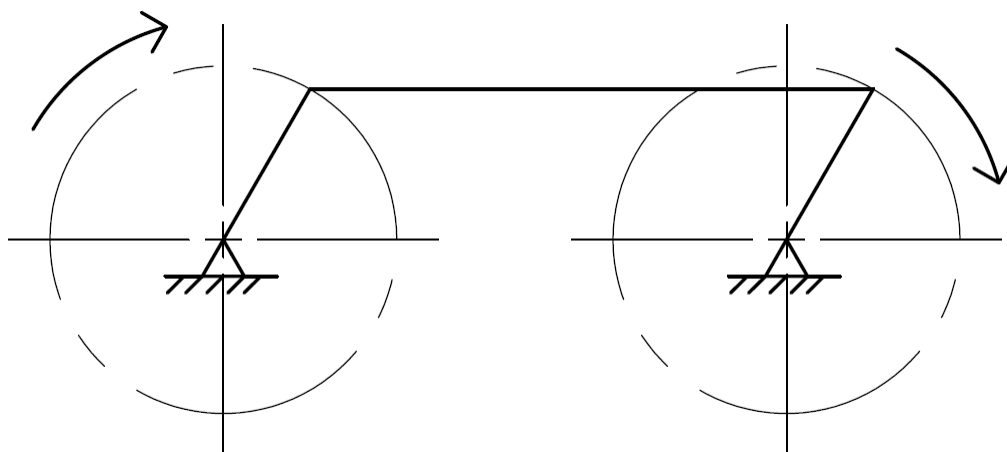
Mechanismy jsou většinou navrhovány specificky pro vykonávání předem daného úkonu či pohybu. V dnešní době jsou ovšem požadované úkony náročnější, a proto je za potřebí vytvářet složitější mechanismy pro vykonávání daných úkonů. Většina mechanismů se jeví jako velice podobných a je to tím že jsou. Všechny moderní mechanismy využívají principiálně stejných pohybů, jen trajektorie se stávají zpravidla stále složitější. Jedním z úkolů pohybových mechanismů je přeměna energie na jednodušší či složitější druh pohybu. [15]

2.1 Konvenční pohybové mechanismy

Pojmem konvenční pohybové mechanismy se dají vyjádřit mechanismy, které se běžně využívají pro přenos pohybu a sil v rámci nějaké soustavy. Jsou prakticky základními mechanismy využívanými ve strojírenství. Do jisté míry tvoří i základní stavební kámen pro

vývin složitějších druhů mechanismů. Zpravidla však konají jednoduché pohyby, jakou jsou přímočarý vratný, rotační pohyb či opisování jednoduchých křivek. [15]

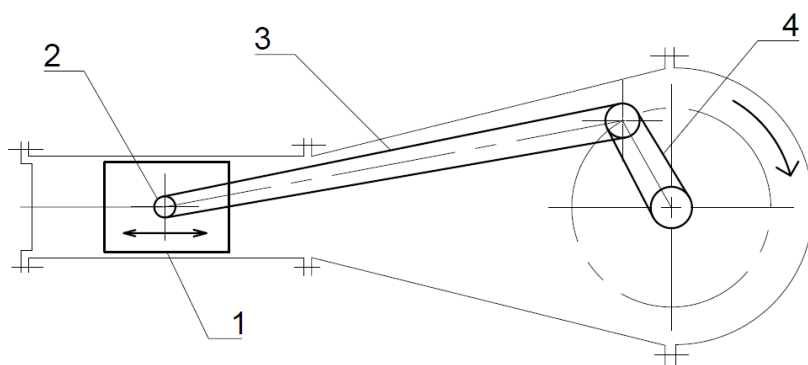
- **Kloubový mechanismus** – Jedná se o velice rozšířené mechanismy. Jejich úkol je jednoduchý, měnit rovnoměrný pohyb v periodicky se opakující nebo naopak. Často se také užívají jako převodové nebo vodící mechanismy, případně jako jejich kombinace. Kloubové mechanismy lze charakterizovat tím, že obsahují nejméně čtyři tuhé členy, které jsou navzájem spojeny otočnými či posuvnými klouby. Potřebují ovšem nejméně jeden nepohybový prvek, který je spojuje. K tomuto účelu slouží rám mechanismu. Nejčastější využití tyto mechanismy naleznou pravděpodobně v textilních, zemědělských nebo stavebních strojích.



Obrázek 11 Schéma kloubového mechanismu

(zdroj: vlastní)

- **Klikový mechanismus** – Převážná většina lidí na světě každodenně využívá klikového mechanismu, aniž by si to uvědomovala. Nejběžnější využití tohoto mechanismu je právě ve spalovacích motorech. Jeho úkol je přeměna přímočarého vratného pohybu, způsobeného řízenou explozí paliva v podobě aerosolu, na otáčivý pohyb, který zajišťuje pohyb například automobilu nebo sekačky na trávu. Klikový mechanismus je speciálním případem kloubového mechanismu.

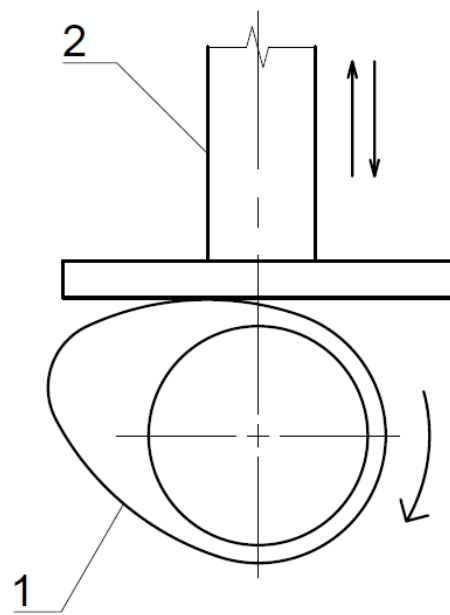


1. Píst
2. Pístní čep
3. Ojnice
4. Kliková hřídel

Obrázek 12 Schéma klikového mechanismu

(zdroj: vlastní)

- **Váčkový mechanismus** – Využívá se pro přeměnu rotačního pohybu na pohyb přímočarý vratný nebo pohyb kývavý. Princip toho mechanismu je relativně jednoduchý. Rotační pohyb vykonává takzvaná vačka. Jedná se o křivkový člen o nekruhovém průřezu, který odpovídá předem definovanému pohybu požadovaného od koncového členu mechanismu. Koncovým členem může být, pro zjednodušení, váleček, který se pohybuje kolmo k místu styku s vačkou. Podle tvaru vačky je tento pohybový objekt schopen měnit svou polohu v jedné ose s různým zrychlením a o různých vzdálenostech.



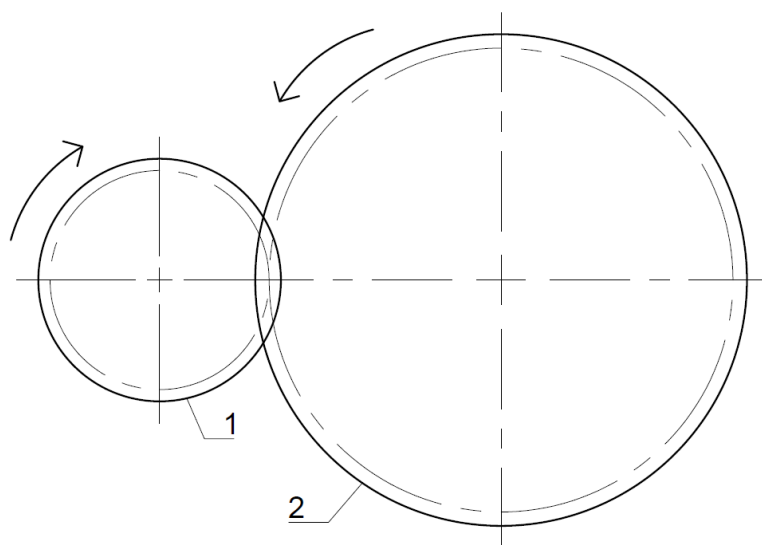
1. Vačka

2. Poháněný mechanismus

Obrázek 13 Schéma vačkového mechanismu

(zdroj: vlastní)

- **Ozubené převody** – Hojně využívané jsou ozubené převody a jsou základním stavebním kamenem téměř jakýchkoliv strojních převodů. Jsou postaveny na základě pákového zákona i když přenáší rotační pohyb, princip využívají stejný. Jejich účelem je převádět krouticí moment a otáčky v požadovaném poměru od zdroje rotačního pohybu až k výstupnímu zařízení. Využívají se tam, kde je potřeba převodového poměru bez prokluzu. Nejlepším příkladem jsou převodovky automobilů. Čím nižší převodový poměr tím se přenáší větší krouticí moment a menší otáčky z motoru. S vyšším převodovým poměrem se naopak výstupní krouticí moment snižuje a otáčky rostou.

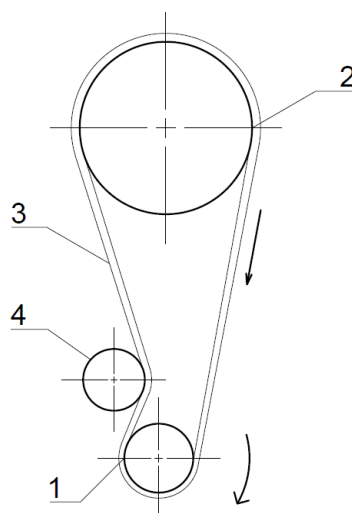


1. Hnací ozubené kolo
2. Hnané ozubené kolo

Obrázek 14 Schéma ozubeného převodu

(zdroj: vlastní)

- **Řemenové převody** – Jejich úděl je stejný jako u ozubených převodů, zajišťovat přenos točivého momentu a otáček z jednoho hřídele na druhý. Rozdíl mezi nimi je ten, že řemenové převody využívají pro přenos sil řemen, díky kterému od sebe hnací a hnaný hřídel mohou být uloženy dále než u ozubených převodů.



1. Hnací řemenice
2. Hnaná řemenice
3. Řemen
4. Přítlačné kolečko

Obrázek 15 Schéma řemenového převodu

(zdroj: vlastní)

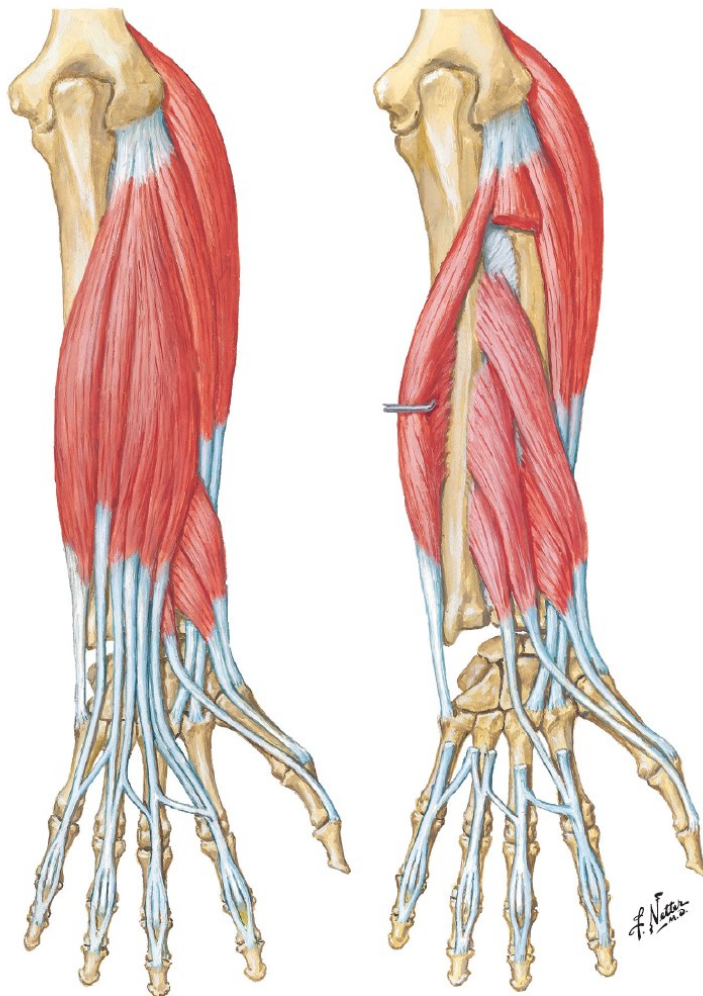
2.2 Biomechanika

Biomechanika je vědní odvětví, které se zabývá zkoumáním mechanických principů pohybu v živých organismech. Jinými slovy by se dalo říct, že se jedná o zkoumání přenášení, vytváření a využívání mechanických sil. Využívá poznatky nabyté v anatomii, fyzice a fyziologii. Studium biomechaniky také slouží jako inspirace pro inovace v různých odvětvích průmyslu.

Jedním z mnoha biomechanických mechanismů je například pákový mechanismus. Lidská horní končetina pákového mechanismu využívá pro efektivnější využití síly. Kostra obecně slouží pro pevné uchycení svalů, klouby jakožto kloubová spojení a svaly slouží k vyvinutí síly potřebné pro pohyb. Dalším z mechanismů v lidském těle jsou šlachy. Šlachy fungují jako pomyslná pružina nebo jako táhla, například Achillova šlacha při chůzi a běhu ukládá při došlápnutí energii a opět ji uvolňuje při odrazu. Nejdůležitějším hydraulickým systémem v těle člověka je cévní systém. Tento systém rozvodných trubek krve po těle se přizpůsobuje podle aktuálních požadavků těla. Dokáže měnit obsah vnitřního průřezu cév pro změnu rychlosti proudění krve, využívá tedy Bernoulliho zákona. [16][17][18]

2.2.1 Topografické anatomie horní končetiny

Topografická anatomie se obecným způsobem dá vyjádřit jako odvětví anatomie, které studuje struktury jednotlivých anatomických oblastí, jejich vzájemné uspořádání, projekci, vztah ke kostře, rozložení cévního a nervového systému. Na obrázku 16 je možné vidět svalovou anatomii se šlachami horní končetiny. [18][17][19]



Obrázek 16 Topologická anatomie horní končetiny

(zdroj: [20])

Část horní končetiny nazývaná také jako Manus se klasifikuje jako konečná část horní končetiny, a to od začátku zápěstí až po konečky prstů. Skládá se z několika částí:

Zápěstí – Tuto část horní končetiny lze popsat jako spojení předloktí a dlaně, které je tvořena shlukem meších kostí navzájem propojených interkarpálními klouby. Těchto kostí je 8 a jsou rovnoměrně uspořádány do dvou řad, proximální a distální. Díky složitému

anatomickému uspořádání nejen kostí ale i kloubů a šlach umožňuje zápěstí precizní pohyb s velkým rozsahem. [21]

Záprstní kosti – Jedná se o mezičlánek zápěstí a prstů. Jedná se o záprstní kosti jednotlivých prstů, které bývají označovány jako metakarpální kosti. Z pohledu prstů tvoří pevnou oporu, která umožňuje jejich pohyb pomocí kloubů, jimiž jsou spojeny. Kolem těchto kostí je upnuto několik svalů. Svaly pohybující palcem, malíčkem a svaly umožňující kývavý pohyb ostatních prstů. [21]

Prsty – Skládají se z několika článků, každý prst na ruce má tři články, vyjma palce, který má jen dva. Z hlediska biomechaniky se jedná o relativně jednoduchý mechanismus. Jejich pohyb je zajištěn důmyslně rozmístěnými pružnými táhly v podobě šlach, pevně ukotvených na člancích prstů a vedených v karpálních tunelech skrz dlaň a zápěstí až do předloktí, kde přecházejí ve svaly, které jimi pohybují. [22]

2.2.2 Využití biomechanických mechanismů

Biomechanika má relativně široké spektrum, a to od očekávané medicíny až po videoherní průmysl.

2.2.2.1 Medicína

- **Protézy** – Pro vývoj moderních protéz má biomechanika značný vliv. Díky poznatkům nashromážděných za léta studií je možné vytvářet robotické protézy, které umožňují přesnou kontrolu pohybu jednotlivých částí pomocí senzorů a základní umělé inteligence. [16][6][5][19]
- **Ortézy** – Jedná se o podpůrné pomůcky pro fixaci částí těla do pozice, která je ideální pro léčbu a rehabilitaci. S využitím poznatků z biomechaniky je možné optimalizovat ortézy pro efektivnější fixaci nebo individuální ortézy dle potřeby. [16][5]
- **Ergonomie** – Napomáhá prevenci proti dlouhodobému či trvalému poškození částí těla. Nejčastěji je využívána pro navrhování židlí, rukojetí a počítačových myší. Pomocí biomechaniky je možné navrhnout tvar, například židle, tak aby nedocházelo k poškození lidského těla dlouhodobým užíváním. [16][5]

2.2.2.2 Robotika

- **Exoskelet** – Jde o vnější kostru vybavenou pohybovými mechanismy, které napomáhají pohybu. Exoskelety se využívají k rehabilitaci po vážném zranění, ale

dostávají se postupně i do zbrojního průmyslu po vzoru různých sci-fi filmů. Na obrázku 17 je vyobrazený exoskelet pro podporu chůze. [16]



Obrázek 17 Exoskelet

(zdroj: [23])

- **Humanoidní roboti** – Biomechanika hraje v konstrukci humanoidních robotů klíčovou roli. Napomáhá napodobit funkčnost a pohyb lidského těla pomocí optimalizace energetické náročnosti a stability při dynamických pohybech. S využitím moderních elektrotechnických komponentů v kombinaci s biomechanickými modely umožňuje adaptabilní chůzi a manipulaci s objekty. [16][19]

2.2.2.3 Videohry

Ať už to zní sebevíce neuvěřitelně, biomechanika a anatomie má ve videoherním průmyslu své významné místo. Tyto oblasti zkoumání nejen lidského těla jsou využívány při modelování a programování živých bytostí jako jsou zvířata, příšery anebo lidi. Anatomie pomáhá při tvorbě 3D modelu kdy je běžným postupem vytvořena virtuální 3D kostry, okolo které se vytváří svalový obal. Pohyb postav a jejich svalů je tvořen okolo virtuální kostry, pomocí poznatků z biomechaniky je možné tyto pohyby naprogramovat do realistické

podoby. V moderním vývoji videoher se těchto poznatků využívá ve vývoji videoher pro virtuální realitu, kde pohyb a chování rukou postav má velký význam. [24]

3 SHRNUÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

Teoretická část bakalářské práce se zabývá nastíněním problematiky. Nacházející se v pozadí při návrhu konstrukce bionické horní končetiny. Jelikož tento druh návrhu prototypu je možné klasifikovat jako projekt využívající reverzní inženýrství, je toto téma umístěno jako první. V této kapitole je podrobněji rozebráno jeho použití a využití v různých průmyslových oblastech. Dále také popisuje poměrně často využívaný proces 3D skenování. Tato podkapitola popisuje využití skenování objektů v průmyslu a jeho základní druhy a principy, které lze také využít při návrhu prototypu.

Dalším rozvedeným tématem jsou pohybové mechanismy. Tato kapitola slouží k seznámení se základním rozdělením pohybových mechanismů podle druhu pohonu a pohybu, který vykonávají. Popis základních a běžně používaných konvenčních mechanismů je následován méně známým odvětvím, biomechanikou. V rámci této podkapitoly je možné se dočíst co a k čemu slouží biomechanika i v jakých oblastech se využívá. Dále je zde také popsán pohybový mechanismus horní končetiny, jehož pochopení je užitečné v následující části této práce.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

Cílem praktické části této práce je vytvořit 3D model návrhu prototypu bionické horní končetiny. Tento model by měl být vytvořen s použitím CAD programu dle volby. Dále by se měl co nejvíce přiblížit reálné lidské ruce. Což znamená že by se daný model měl být téměř totožný s anatomii lidské horní končetiny. Jinými slovy se dá říci, že je za potřeby využít organického designu. Princip fungování by měl využívat stejných principů jako biomechanika horní končetiny, která byla naznačena v teoretické části.

Pro splnění tohoto cíle budou nápomocné informace uvedené v rámci teoretické části této práce. Především pak obecný postup pro využívání reverzního inženýrství. Tento postup ovšem bude modifikovaný, jelikož cílem této práce je vytvořit pouze 3D model prototypu, nikoli jeho fyzickou kopii. Jelikož cíl práce je již zvolen, na řadě je otázka sběru dat. Pro tento účel budou využity anatomické atlasy obsahující topografickou anatomii horní končetiny. Nebylo by od věci pořídit i 3D model reálné horní končetiny, který by sloužil jako referenční model pro vytváření návrhu prototypu. Nashromážděná data budou zpracována programech k tomu účelu určených, do finální podoby, která bude splňovat předurčené cíle.

5 VÝROBA DUPLIKÁTU NESTATICKÉHO TĚLESA PRO 3D SKENOVÁNÍ

Nestatickými objekty jsou zde myšleny části lidského těla, konkrétně končetiny. Jelikož je 3D skenování relativně časově náročný proces, při kterém je nutné, aby skenovaný objekt zůstal ideálně tak statický, jak to jen jde. Seběmenší pohyb při procesu skenování může ve výsledných 3D datech vytvořit chyby v topologické síti tělesa. Tyto chyby se dají opravit v programech k tomu určenými. Pro usnadnění dalších procesů a vyvarování se opravám případných chyb na 3D modelu, je vhodné vytvořit duplikát skenovaného tělesa, v tomto případě kopii horní končetiny.

Nejjednodušším postupem pro výrobu duplikátu je odlitek do silikonové formy. Tento postup je rychlý, velice přesný a jednoduchý. Též vhodný především pro prototypovou výrobu. Pro objekt, který má být duplikován je vytvořena forma. Nejčastěji používaný materiál je silikon, přičemž druh silikonu se volí podle druhu objektu. Po zhotovení formy je možné výrobek odlévat, nejčastěji gravitačním odléváním, z materiálu, který splňuje požadavky výrobku.

5.1 Silikonová forma

V tomto případě byla zhotovena silikonová forma. Silikon byl volen tak, aby nebyl zdravotně závadný a měl dobrou elasticitu. Podle těchto požadavků byl zvolen silikon Dragon Skin 10 platinum cure silicone rubber od výrobce Smooth-On jehož materiálový list lze nalézt v příloze P I. Jedná se o dvoukomponentní silikon, což znamená, že aby došlo k procesu polymerace, je potřeba smíchat dvě složky, složku A se složkou B. Tento silikon je používán pro cosplay účely, jako je například vytváření obličejových masek na míru. Složky se mísí v hmotnostním poměru 1:1 a po jejich smíchání má materiál zpracovatelský čas přibližně sedm hodin při pokojové teplotě. Poté dojde k plnému zatuhnutí směsi.

V případě vytváření forem pro odlévání odlitků částí těla je vhodné vytvořit formu se dvěma až třemi vrstvami, což znamená že je potřeba namíchat daný počet dávek silikonové směsi. Do každé směsi se přidává jiný pigment. Pigment je důležitý, aby při nanášení silikonu na část těla bylo možné podle průhlednosti poznat, jak velká vrstva byla nanášena, případně pro odhalení vynechaných míst.

Prvním krokem je odstranění mazu, potu a nečistot z části těla, která bude použita jako pozitiv pro formu. Případné oholení chlupů je též na místě, aby se předešlo případným bolestem při snímání formy.

Subjektem, který zapůjčí svou horní končetinu jako pozitiv pro tvorbu formy byl zvolen Richard Daněček. První vrstva nánosu silikonové směsi slouží jako obtisková část a měla by být řidší než ostatní vrstvy, aby došlo k co nejlepšímu obtisku veškerých záhybů a detailů, které lidské tělo má. Řidšího nánosu je možné dosáhnout lehkou změnou poměru složek. Smícháním složek A a B v poměru 1:1,1 až 1:1,2. Po nanesení první vrstvy je možné reakční proces urychlit zahřátím směsi. Pokud je směs nanesená na části těla, není vhodné používat průmyslové trouby a pece, ale spíše horkovzdušné pistole. Po zatuhnutí vrstvy do ne zcela tuhého, spíše na dotek stále lepkavého stavu, je možné aplikovat další vrstvu, která tvoří již nosnou část formy. Stejným způsobem se vytváří i případná třetí vrstva.



Obrázek 18 Dokumentace silikonové formy

(zdroj: vlastní)

Posledním krokem je sejmutí formy. Forma na těle drží díky jeho členitosti povrchu, schopnosti silikonu zatékat do opravdu malých prostor a chlupům uvězněných ve formě. Forma byla sejmuta pomocí tlakového vzduchu o tlaku 6 bar, přičemž se jednalo o lehce bolestivý a časově náročnější proces.

5.2 Odlévání výrobku

Po vytvoření a sejmutí silikonové formy je možné vytvořit odlitek. Jelikož vytvořená forma je relativně tenkostěnná. Je nutné ji zajistit proti deformaci při odlévání. Nejjednodušší způsob je vložení formy ve vertikální poloze do nádoby a obsypat ji sypkým materiálem, například pískem. Ve chvíli, kdy je forma zajištěna je možné přichystat materiál.

Materiál by měl být volen podle požadavků na odlitek, v tomto případě je na materiál jediný požadavek, a to je dobrá zatékavost. Z tohoto důvodu byl zvolen dvoukomponentní polyuretan PR 700 od výrobce Synthene jehož materiálový list lze nalézt v příloze P II. Jeho zatékavost je excelentní díky nízké viskozitě v tekutém stavu. Tento materiál se připravuje opět smícháním dvou složek, složky A a složky B ve hmotnostním poměru 80:100. Pro lepší vyplnění formy materiálem je možné její povrch nahřát, při odlévání polyuretanu je ideální teplota 40 °C.

Při odlévání je důležité myslet též na vyjímání odlitku z formy. Přeci jen vytahovat část těla z formy je velice odlišné od vyjímání odlitku rovinného tvaru. Z tohoto důvodu je víc než vhodné před zatuhnutím odlévací hmoty do odlitku vložit pomocné těleso pro vyjmutí z formy.



Obrázek 19 Dokumentace odlévání výrobku

(zdroj: vlastní)

Jelikož tento polyuretan má zpracovatelnost po smíchání obou složek pouze sedm minut, není na škodu konat rychle a zaplnit dutinu formy. Tuhnutí výrobku do podoby, ve které bylo možné jej bezpečně vytáhnout z formy bez poškození, trvalo přibližně pět minut. Zapříčiněním tvarové složitosti odlitku činilo odformování jisté problémy. Byl kladen důraz na to, aby se při tomto procesu nepoškodila forma, pro případ že by bylo nutné vytvořit více vzorků. Vyjmutí vzorku z formy proběhlo pomocí tlakového vzduchu o tlaku 6 bar. Po vyjmutí bylo odstraněno pomocné tělo a spodní plocha výrobku byla zabroušena do roviny, která bude následně využita jako základna pro statické umístění tělesa do skenovacího prostoru 3D skeneru. Při vizuální kontrole výrobku bylo zjištěno několik vad vzniklých již při tvorbě formy. Jedná se o menší bublinky, které byly zachyceny pod vrstvou silikonu. Na odlitku je možné demonstrovat schopnost silikonu neuvěřitelně přesně zachytit i ty nejmenší

detaily negativu použitého pro tvorbu formy. Jedním z příkladů je možné zde uvést úplný a neporušený otisk prstů a kompletní textura kůže i se všemi jejími tvarovými poruchami kolem nehtů.



Obrázek 20 Odlitek

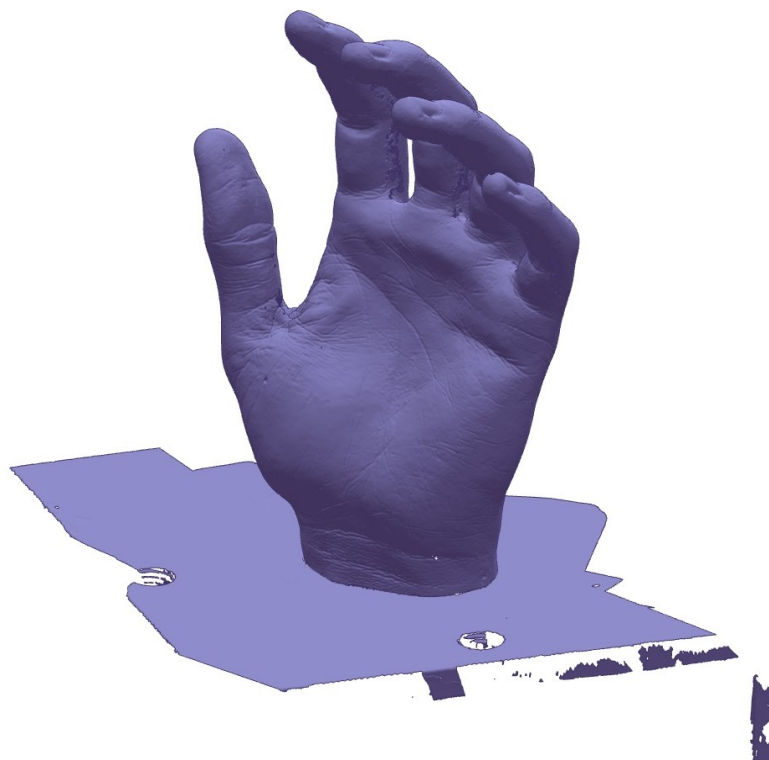
(zdroj: vlastní)

6 NÁVRH POHYBOVÉHO MECHANISMU

Pro návrh pohybového mechanismu byly již zvoleny cíle, které by měl splňovat. Prvním cílem je podobnost s biomechanickým mechanismem ovládající lidskou horní končetinu. Druhým cílem, kterého chceme dosáhnout, je anatomická podobnost. Což znamená že v ideálním případě by se měl rozměrově shodovat s reálnou lidskou rukou. Jelikož je lidská Horní končetina velice kompaktní a efektivní, co se týče využití prostoru a mechanismů bude tento cíl obtížné splnit.

6.1 Digitalizace odlévaného vzorku

Ve chvíli, kdy je odlitek vyjmut z formy, je nutné myslet na jeho ustavení do statické polohy. V tomto případě postačí zabroušení nálitkové roviny, poté je možné s ním pracovat dále. Pokud se jedná o následující krok při návrhu pohybového mechanismu bionické horní končetiny, dle předem stanovených cílů, je na místě zajistit převedení již vytvořeného odlitku do 3D virtuálního prostoru. Nejlepším způsobem, kterým je možné tohoto cíle dosáhnout, je využití moderních technologií, jako je bezkontaktní 3D skener. Shodou okolností na Fakultě technologické pod zprávou Ústavem výrobního inženýrství se jeden optický laserový skener nachází. Konkrétně se jedná o model Nikon ModelMaker H120 jehož nedílnou součástí je kloubové mechanické rameno zajišťující pohyb ve třech osách, MCAX Calibration, uchycený na pojízdném teleskopickém stojanu Brunson Model 231. Jedná se o optický laserový 3D skener využívající laserového paprsku s modrým světlem a je vhodný pro skenování i rozměrově větších objektů. Tento skener je schopen přenášet skenovaná data přímo do programu PolyWorks, který převádí přijatá data v podobě bodového mračka do polygonální sítě čili na mesh modelu. Za asistence odborně vyškolené obsluhy 3D skeneru byl pořízen sken odlitku. Tento proces trval přibližně 20 minut.



Obrázek 21 Pořízený 3D sken

(zdroj: vlastní)

Výstupem procesu 3D skenování byl mesh model, který obsahoval přibližně 2,46 milionu polygonu. Jeho nedílnou součástí byly předpokládané menšími chybami v polygonální síti, jak je možné vidět na obrázku 21. Tyto chyby nabývaly podoby děr a šumu polygonů. Pravděpodobným zapříčiněním těchto chyb byla nevhodná volba pigmentu přimíchaného do materiálu při odlévání. Naštěstí pro tyto případy je program PolyWorks vybaven sadou nástrojů umožňující opravu topologické sítě. Vybraná místa poškozená šumem stačí vybrat a odstranit. Pomocí funkce pro automatické či ruční zalátání děr v síti je možné opravit zbytek chyb v podobě děr, vzniklých v průběhu digitalizace objektu. Po dokončení veškerých oprav byl digitalizovaný odlitek převeden do univerzálnějšího formátu OBJ. Tento soubor obsahoval 2,38 milionu polygonů.

Po otevření tohoto souboru v programu Solid Edge 2024 byl zjištěn jistý problém. Naskenovaný objekt byl pravděpodobně špatně opraven a jeho síť nebyla uzavřena. Tento problém byl zjištěn jednoduchým způsobem. Objekt byl detekován jako plošné těleso, které nebylo možné převést na objemové těleso. Tento problém bylo nutné řešit z důvodu budoucích plánovaných operací s tímto objektem. Pro dodatečnou opravu sítě, popřípadě modelu, je nejvhodnější využít ty modelářské programy, které jsou schopné pracovat

s obrovským množstvím polygonů. Mezi tyto programy se řadí 3D Studio Max, Zbrush anebo Blender. Výběr programu byl poměrně jednoduchý. Zbrush oproti zbylým dvěma programům nepodporuje studentské licence. Blender je program volně dostupný i pro komerční účely, ve srovnání s 3D Studií Max má příjemnější modul pro virtuální sochařství, sculpture modul. Programem pro dodatečnou úpravu byl tedy zvolen Blender.

Pokud se jedná o opravu polygonální sítě, byla využita funkce pro automatickou generaci mesh sítě na základě již existující. Tato funkce se nazývá Remesh Modifier. Pomocí této funkce je možné zjemnit nebo zdrsňit polygonální síť. Jejím vedlejším efektem je, že dokáže zacelit díry v modelu. Po využití této funkce a následné optické kontrole se počet polygonů nějak výrazně nezměnil. Převedením tohoto modelu opět do OBJ formátu je možné jej otevřít v programu Solid Edge 2024. Objekt se po otevření chová jako objemové těleso, což znamená, že dodatečné úpravy sítě byly úspěšné a je možné pokračovat na další krok.



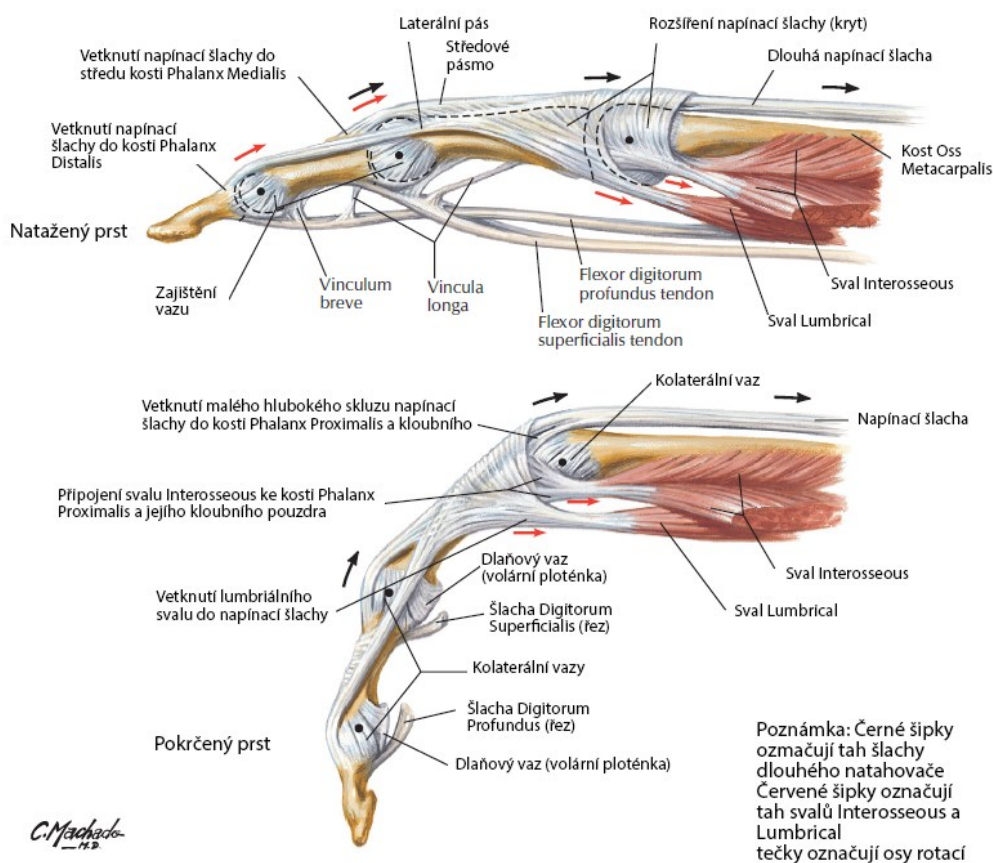
Obrázek 22 Porovnání kvality povrchu originálu, duplikátu a skenu

(zdroj: vlastní)

Na obrázku 22 je možné zpozorovat jak se mění kvalita vůči originálu. Odlívaný výrobek má kvalitu povrchu téměř stejnou jako pozitiv podle které byl vytvořen. Ovšem na 3D modelu pořízeném skenováním, je možné vidět drastický pokles kvality. Tento pokles je nejvíce znatelný na konečcích prstů, které ztratili své otisky.

6.2 Návrh pohybového mechanismu

Návrh pohybového mechanismu, jak již bylo zmíněno, by se měl přiblížit co nejvíce k biomechanismu lidské horní končetiny. Z tohoto již předem stanoveného cíle je možné vyvodit následný krok, bližší zkoumání. Nejlepší nedestruktivní metodou zkoumání lidské horní končetiny je pravděpodobně využití anatomických atlasů, konkrétně atlasů obsahujících topologickou anatomii těla.



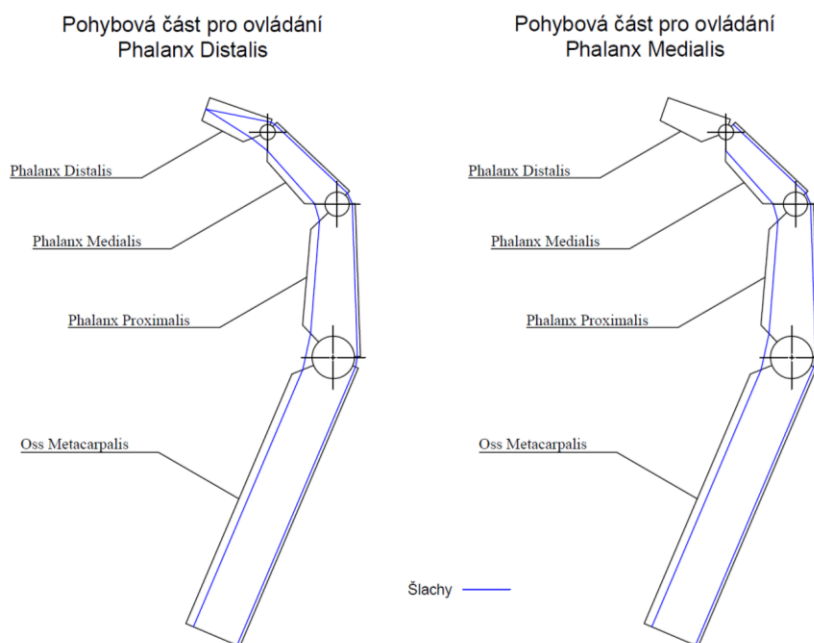
Obrázek 23 Topologická anatomie prstu

(zdroj: [20])

Pro bližší zkoumání je vhodné zvolit jeden prst. Na jeho výběru nesejde, protože pohyb všech prstů funguje na stejném principu, který je vyobrazený na obrázku 23. Jedinou výjimkou je palec, který je schopen jiných pohybů než zbylé prsty. Zvoleným prstem se stal Digitus Secundus čili ukazovák. Lze vidět, že každá kost článků prstu je ovládána samostatně. Při zkoumání vnitřní strany horní končetiny je možné vidět, že na záprstní kost Oss Metacarpalis je po téměř celé délce uchycen sval Interosseus, který pohybuje kostí Phalanx Proximalis (prima) směrem do dlaně. Dále na kosti Phalanx Medialis (sekunda) je

uchycena šlacha svalu Flexor Digitorum Profundus, která vede podél vnitřní strany prstu přes dlaň a zápěstí a přechází ve sval Flexor Digitorum Superficialis umístěný na předloktí. Na poslední kosti prstu Phalanx Distalis (tetria) je upnuta šlacha svalu Flexor Digitorum Profundus, která opět vede podél vnitřní strany prstu přes dlaň a zápěstí a přechází ve sval Flexor Digitorum Profundus. Toto je biomechanismus, který zajišťuje sevření ruce v pěst. Toto uchycení je analogické pro její hřbet a umožňuje napnutí prstů.

Z tohoto zkoumání vyplývá, že je nutné vytvořit základní koncept, který bude využívat sadu táhel. V ideálním případě ukotvit ke každému článku prstu vlastní samostatné táhlo. Pro tyto účely, je možné některé prvky z biomechanického mechanismu zjednodušit či dokonce vyloučit. Jedním takovým prvkem jsou svaly Interosseous a Lumbrical, které umožňují kývavý pohyb, napomáhají při sevření v pěst a při ovládání prstů a jejich jemných pohybech. Sval Lumbrical je možné vynechat z důvodu zjednodušení konstrukčního návrhu prstů a záprstních kostí. Jelikož tento sval ovládá kývavý pohyb prstu. Jeho nahrazení by komplikovalo návrh kloubového spoje mezi částmi, které napodobují Oss Metacarpalis a Phalanx Proximalis. Sval Interosseous je možné vynechat, protože z teoretického hlediska lze jeho funkci nahradit rozmístěním sil působících na táhla.

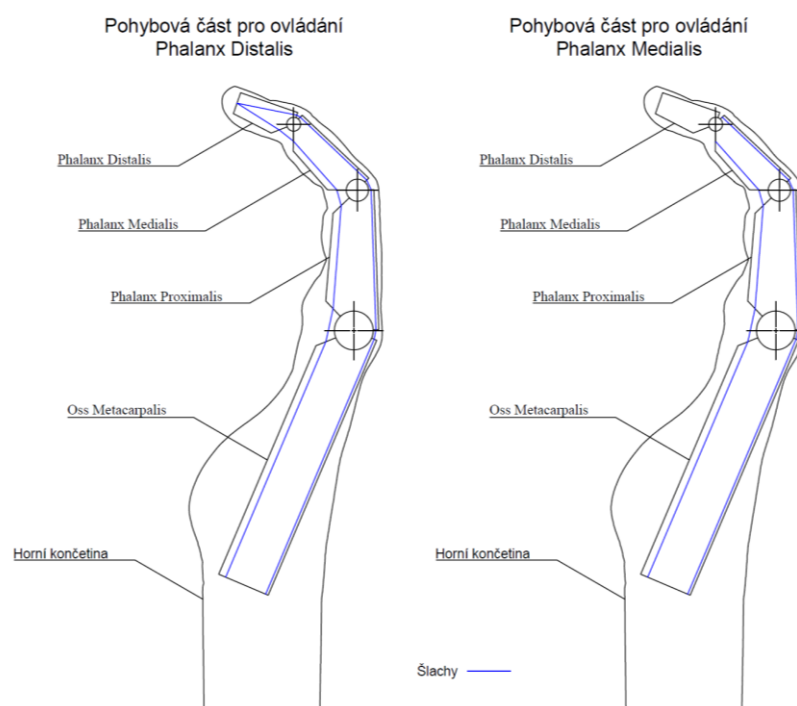


Obrázek 24 Návrh pohybového mechanismu

(zdroj: vlastní)

Na obrázku číslo 23 je zřetelné idealizované rozmístění jednotlivých pohybových částí imitujících kosti a vedení jednotlivých táhel v podobě drátu či lana. V tomto bodě návrhu vyvstává otázka, čím budou táhla pohybována. Jelikož šlachy při pohybu vykonávají pohyb pouze podél jedné osy, znamená to, že se výrazně snížil výběr pohonných jednotek, které mohou být využity. Důležitým faktorem je také potřeba dobré a relativně přesné polohovatelnosti. V závislosti na těchto informacích je možné zde využít například navíjecí kladky, šroubového převodu anebo využít nekonvenční způsob jako je umělý sval. Jelikož navíjecí kladka je náchylná na prokluz jeví je jako vhodnou volbou. Šroubový převod představuje výhodu ve věci eliminace prokluzu a jednoduššího polohování. Umělý sval se chová jako skutečný, také mění svou délku v závislosti na průřezu, ovšem rozdíl mezi nimi je v tom, že umělé svaly je možné ovládat teplem, tlakovým vzduchem anebo elektrinou.

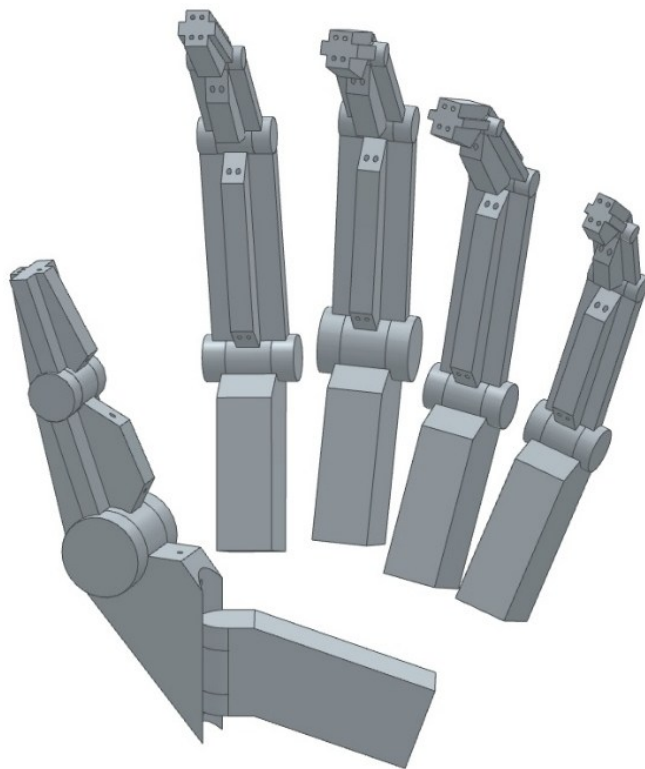
Pro lepší představu o rozložení jednotlivých částí ve vyhrazeném prostoru horní končetiny, je vhodné implementovat návrh, znázorněný na obrázku číslo 24, do 3D modelu. V průběhu vytváření modelů jednotlivých částí byl využit 3D sken odlitku. Model naskenovaného odlitku slouží jako referenční model. Pozice horní končetiny při vytváření formy byla zvolena tak, aby při vytvoření příčného řezu prstem bylo jasné zřetelné umístění kloubů.



Obrázek 25 Implementace mechanismu do horní končetiny

(zdroj: vlastní)

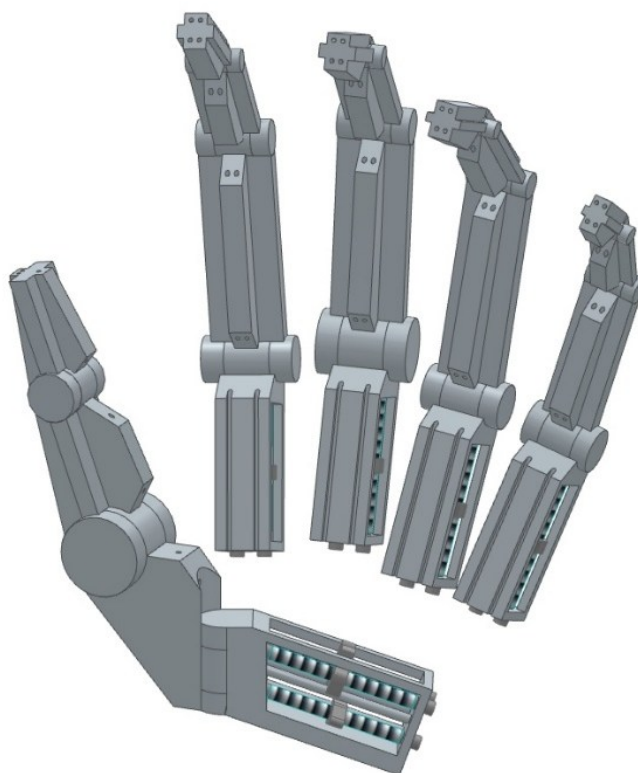
Vytvořením středových rovin pro každý prst v kombinaci s touto informací je možné vytvořit součásti napodobující kosti relativně rychle a jednoduše. Pro vytvoření těchto modelů byla použita základní funkce vysunutí ze skici.



Obrázek 26 Návrh prstů převedený do 3D modelu

(zdroj: vlastní)

V závislosti na volbě pohybové jednotky se bude odvíjet rozhodnutí, zdali, bude pohonná část táhel umístěna přímo do prostoru horní končetiny anebo mimo ni. Jelikož umělé svaly pro využití svého potenciálu potřebují prostor, který v reálném případě poskytuje předloktí, bude rozumnější volbou využití šroubového převodu. Tato volba poskytuje relativní prostorovou skromnost, která by mohla být důležitá při snaze omezit celou konstrukci velikostně tak, aby se shodovala s velikostí lidské horní končetiny. Je tedy zapotřebí zakomponovat do již existující části designu pohybovou jednotku v podobě šroubového převodu. Z důvodu úspory místa byl tento mechanismus umístěn do prostor záprstních kostí. V případě palce bylo nutné vytvořit nový objekt, který bude obsahovat tento mechanismus, protože v reálném případě je záprstní kost palce oproti ostatním prstům pohybová.



Obrázek 27 Návrh mechanismu se šroubovým převodem

(zdroj: vlastní)

Nyní je zapotřebí vymodelovat nějaký druh rámu, který by se podobal lidské dlani, k tomu účelu opět dobře poslouží 3D sken odlitku, který byl pořízen za tímto účelem. Pro přesnější napodobení ergonomie dlaně byly vytvořeny čtyři řezy rozložené rovnoměrně po celé délce dlaně. V těchto řezech byly vytvořeny hrubé obrysy kopírující tvar naskenovaného modelu. Skrz tyto skici byla vedena plocha, která imituje tvarově složitý povrch dlaně.

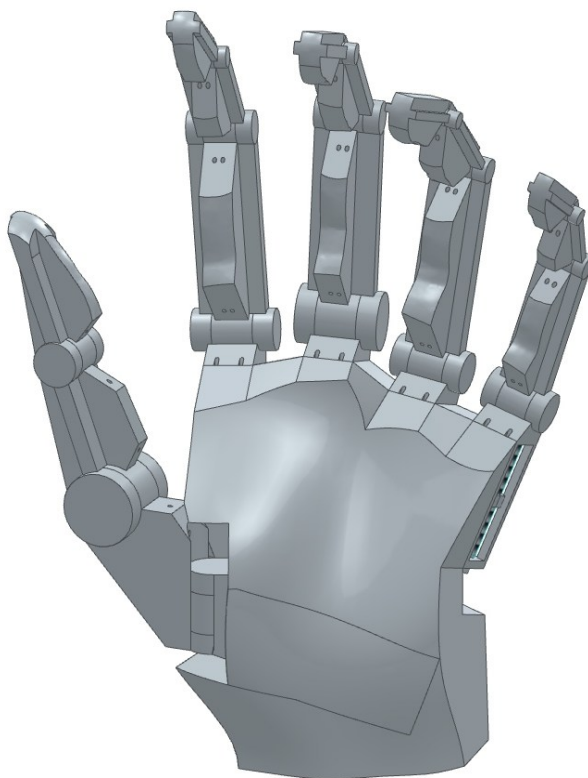


Obrázek 28 Vizualizace plochy dlaně

(zdroj: vlastní)

Tato plocha byla vytvořena schválně jen na vnitřní straně horní končetiny, jelikož zadní část je vymezena pro šroubový převod. Tato tvarově složitější část zároveň slouží jako designový prvek. Rám byl vytvořen opět pomocí funkce vysunutí ze skici, tentokrát byl ovšem nastavený parametr vysunutí na plochu dlaně.

V rámci finálních úprav byly všechny modely upraveny do částečně organického designu. Úpravy proběhly za využití funkce vysunutí na plochu. Plocha, která slouží jako limitní parametr představoval 3D sken, pořízený dříve.



Obrázek 29 Kompletní 3D model návrhu

(zdroj: vlastní)

7 DISKUZE

V průběhu vytváření této práce byla nalezena řada menších překážek, které bylo nutné překonat. Jednou z prvních překážek byla otázka týkající se vytvoření modelu, který by s jistou přesností kopíroval anatomii lidské horní končetiny. Pro tento účel je nejlepší řešení využít model horní končetiny, podobající se té reálné. Tento model je nejjednodušší získat pomocí technologie 3D skenování. V případě skenování částí lidského těla je možné narazit na problém. V průběhu skenování musí být skenovaný objekt nehybný, aby nedošlo k vytvoření poruch na 3D modelu, které by se museli složitě opravovat. Pro tento účel byla zhotovena silikonová forma horní končetiny. Vzniklý odlitek je objekt, který se na rozdíl od lidské končetiny nepohne, pokud na něj nepůsobí vnější síly. Je teda ideální pro digitalizaci. Při konstrukci prstů vyvstala otázka ohledně jednoduchosti kloubových spojů. Konkrétně o kloubový spoj mezi součástmi představující kosti Oss Metacarpalis a Phalanx Proximalis. Jelikož v reálném případě má tento kloubový spoj více stupňů volnosti než obyčejné kloubní spojení mezi kostmi Phalanx Proximalis a Phalanx Medialis. Pro zjednodušení konstrukčního řešení bylo tedy tento kloubový spoj zjednodušen tak, že neumožňuje prstům kývavý pohyb. Posledním problémem byl organický design. Protéza by měla mít schopnost dobrého úchopu, který zaručuje lidská horní končetina. Aby prsty nepůsobili dojmem masivního objemu, byl organický design použit pouze pro plochy, které zajišťují úchop předmětů.

Výhodou tohoto návrhu je kompaktnost. Jelikož je celý prototyp koncipovaný tak, aby se anatomicky přiblížil ke skutečné horní končetině, je možné říct že je objemově téměř totožný s předlohou. Využitý organický design, do kterého byla data zpracována, nijak nepřekáží pohybovému mechanismu v jeho fungování. Tento fakt představuje výhodu pro uživatele protézy vytvořené na základě tohoto prototypu. Dotyčná osoba si tak nemusí zvykat na rozměry a tvar náhrady, které normálně bývají abnormální vůči původní horní končetině. Jako další výhodou se dá považovat podobnost funkčnosti. Díky snaze zachovat návrh podobný biomechanismu lidské horní končetiny je možné vykonávat prsty téměř totožné pohyby. Volba šroubového převodu přináší výhodu v rámci současného stavu i pro budoucí vývoj. Tento mechanismus se vyznačuje jednoduchou polohovatelností, která se přenáší i na polohovatelnost jednotlivých článků prstů. Návrh je však limitován skrze již zmíněné zjednodušení. Prototyp není schopen napodobit kývavý pohyb prstů, teda pohyb odtahení prstů od sebe. Schopnost tohoto pohybu napomáhá úchopu větších oválných předmětů. Je však balancována vnitřním tvarem prstů.

Tento návrh je ve své podstatě optimální řešení protézy, jelikož využívá jednoduchých biomechanismů, které využívá lidské tělo pro jeho fungování. Ve spojení s jeho organickým designem představuje teoreticky funkční prototyp. I přesto se však z pohledu konstrukčního řešení nachází na svém počátku. Navazující vývoj by se měl soustředit na volbu materiálu. Materiál by měl mít relativně nízkou hustotu a zároveň vyšší pevnost, aby byl schopen vydržet namáhání vzniklé při běžném používání. Jelikož se jedná o prvotní návrh je za potřebí provést pevnostní výpočty jednotlivých částí mechanismu a upravit je tak, aby splňovali pevnostní požadavky. Nedílnou součástí pro fungování mechanismu je elektrotechnika. Rám je koncipovaný tak, že obsahuje dostatek prostoru pro implementaci elektrotechniky i elektrických rozvodů. Poslední důležitou věcí, který by měla být zahrnuta v následujícím vývoji, je volba materiálu táhel a jejich uchycení v mechanismu. V případě nahrazení šroubového převodu za umělý sval by bylo ovšem nutné předělat koncept rámu. Ve stavu, ve kterém se aktuální návrh nachází je teoreticky funkční a vyrobitelný. Jelikož se jedná o prototyp, bylo by vhodné využít technologií pro prototypovou výrobu. Nejjednodušším způsobem je 3D tisk, které zaručuje rychlou a levnou volbu. Další možností je vytvoření silikonové pro odlévání například již využitého polyuretanu PR 700, popřípadě voskových modelů určených pro přesné slévárenství.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo seznámení s problematikou návrhu prototypu bionické ruky. Tohoto cíle bylo dosaženo teoretickým zkoumáním a následným vytvořením jednotlivých částí návrhu s využitím získaných informací. V první kapitole teoretické části bylo rozebráno téma reverzního inženýrství společně s jeho nejvyužívanější metodou v rámci mechanického designu, 3D skenováním. Druhá kapitola byla zaměřuje na pohybové mechanismy s bližším pohledem do problematiky biomechaniky. Cílem praktické části bylo vytvořit 3D model návrhu bionické horní končetiny. Tento model byl vytvořen podle modifikovaného postupu reverzního inženýrství, který byl uveden v teoretické části této práce. Cílem bylo vytvoření prototypu, který bude splňovat dané požadavky, a to anatomickou a funkční podobnost s lidskou rukou. K dosažení tohoto cíle byla vytvořena silikonová forma. Z této formy byl vyjmut odlitek, který posloužil pro jednodušší digitalizaci lidské horní končetiny. Digitalizace probíhala pomocí laserového 3D skenování do programu PolyWorks, kde byla hrubá naskenovaná data následně upravena. Tento digitalizovaný objekt byl poté využit pro vytvoření 3D modelu, který vcelku věrohodně kopíruje anatomii a ergonomii pořízeného skenu. Tento model byl vytvořen v programu Solid Edge 2024. Pro návrh pohybového mechanismu v rámci modelu byl použit atlas obsahující topologickou anatomii horní končetiny.

Co se týče anatomické podobnosti, model tento cíl z větší části splnil. Model bionické horní končetiny obsahuje všechny části napodobující kosti, vyjma palce. Pro zajištění přesnější pohybové volnosti bylo nutné pro tento prst jednu část vytvořit navíc. Při pohledu na model jako na celek je možné vidět robotický design smíšený s designem organickým designem. Částečný podíl na tomto designu má volba tvaru rámu, který drží všechny pohybové části pohromadě. Vnitřní tvar tohoto rámu byl navržen tak, aby kopíroval dlaň. Jelikož se jedná o poměrně přesnou kopii originálního tvaru, měla by tato dlaň zajistit lepší úchop objektů než rovná plocha. Dalším organickým prvek, který má původ ve tvaru lidské horní končetiny je vnitřní strana prstů. Všechny články prstů jsou z vnitřní upraveny tak, aby napodobovaly tvar prstu. Tato úprava byla provedena pouze na plochách, které slouží k úchopu předmětů.

Po stránce mechanismu se model částečně přiblížil k biomechanismu horní končetiny. Při návrhu mechanismu došlo ke zjednodušení odebrání pohybových částí, které by nahrazovaly svaly Interosseous a Lumbrical. Odebráním svalu Lumbrical bylo prstům znemožněno vykonávat kývavý pohyb. Avšak odebráním svalu Interosseous se

z teoretického hlediska nic nemění, jelikož prst stále teoreticky dokáže vykonávat stejné pohyby, je zapotřebí jen specifická kombinace sil působících skrze táhla v daných směrech. Volba pohonné části pohybového mechanismu však dojmem biomechanismu nepůsobí. V případě ideálního napodobení biomechanismu lidské horní končetiny by měl být využit umělý sval. Výsledné působení sil na táhla jsou ale stejná tudíž se dá považovat, že podobnosti fungování bylo dosaženo.

Návrh prototypu může posloužit jako solidní základ pro tvorbu robotické protézy založené na základních biomechanických principech.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] THE UNITED STATES ARMY. *Redstone Arsenal Historical Information*. Online. Dostupné z: <https://history.redstone.army.mil/space-redstone.html>. [cit. 2025-04-29].
- [2] HALEEM, Abid; JAVAID, Mohd; SINGH, Ravi Pratap; RAB, Shanay; SUMAN, Rajiv et al. Exploring the potential of 3D scanning in Industry 4.0: An overview. Online. *International Journal of Cognitive Computing in Engineering*. 2022, roč. 3, s. 161-171. ISSN 26663074. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijcce.2022.08.003>. [cit. 2025-05-14].
- [3] 3D Scanning: A Comprehensive Survey. Online. In: . 2001, s. 1 - 8. ISBN 1801.08863. ISSN arXiv preprint arXiv:1801.08863. Dostupné z: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1801.08863>. [cit. 2025-04-04].
- [4] CRNKOVIC, Ivica; GRUHN, Volker a BOOK, Matthias (ed.). *Software Architecture: 5th European Conference, ECSA 2011, Essen, Germany, September 13-16, 2011. Proceedings*. Online. Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011. ISBN 978-3-642-23798-0. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-642-23798-0_25. [cit. 2025-05-14].
- [5] VOLONGHI, Paola; BARONIO, Gabriele a SIGNORONI, Alberto. 3D scanning and geometry processing techniques for customised hand orthotics: an experimental assessment. Online. *Virtual and Physical Prototyping*. 2018, roč. 13, č. 2, s. 105-116. ISSN 1745-2759. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1426328>. [cit. 2024-11-21].
- [6] Integrated linkage-driven dexterous anthropomorphic robotic hand. Online. *Nature Communications*. 2021, vol. 12, no. 12. Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/s41467-021-27261-0#Bib1>. [cit. 2025-04-04].
- [7] FILLER, Tomáš; PEVNÝ, Tomáš; CRAVER, Scott a KER, Andrew (ed.). *Information Hiding: 13th International Conference, IH 2011, Prague, Czech Republic, May 18-20, 2011, Revised Selected Papers*. Online. Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011. ISBN 978-3-642-24178-9. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-642-24178-9_19. [cit. 2025-05-14].
- [8] BUONAMICI, Francesco; CARFAGNI, Monica; FURFERI, Rocco; GOVERNI, Lapo; LAPINI, Alessandro et al. Reverse engineering of mechanical parts: A template-based approach. Online. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2018, roč. 5, č. 2, s. 145-159. ISSN 2288-5048. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2017.11.009>. [cit. 2025-05-14].
- [9] NARIMUNE. *Reverse Engineering Service*. Online. Reverse Engineering Service. 2023. Dostupné z: <https://www.narimune.com/page-15500-reverse-engineering-service.html>. [cit. 2025-05-03].
- [10] 3D LASER SCANNERS: HISTORY, APPLICATIONS, AND FUTURE. Online. *Assiut University*. Vol. 2011, s. 9 - 65. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Mostafa-Ebrahim-3/publication/267037683_3D_LASER_SCANNERS_HISTORY_APPLICATIONS_AND_FUTURE/links/5442bdf10cf2e6f0c0f93727/3D-LASER-SCANNERS-HISTORY-APPLICATIONS-AND-FUTURE.pdf. [cit. 2025-04-04].
- [11] HERMARY. *Principles of Laser Triangulation*. Online. Dostupné z: <https://hermary.com/learning/principles-of-laser-triangulation/>. [cit. 2025-04-30].

- [12] BITFAB. *3D Scanning With Structured Light*. Online. Dostupné z: <https://bitfab.io/blog/3d-structured-light-scanning/>. [cit. 2025-05-01].
- [13] THE MARINERS MUSEUM AND PARK. *The Ages of Exploration*. Online. Dostupné z: <https://exploration.marinersmuseum.org/object/sonar/sonar-active/>. [cit. 2025-04-30].
- [14] *PDEs and Variational Method on 3-D Surfaces and Point Clouds*. Online. Dostupné z: https://elmoatazbill.users.greyc.fr/point_cloud/index.html. [cit. 2025-05-03].
- [15] UICKER, John Joseph; PENNOCK, G. R. a SHIGLEY, Joseph Edward. *Theory of machines and mechanisms*. Online. Sixth edition. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2024. ISBN 978-1-009-30367-5. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=BkPGEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR17&ots=ujCFd3MRLO&sig=pP0FoIZyXMPWoOjxRKfJQwR4kVE&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. [cit. 2025-02-04].
- [16] Biomechanics of human movement and its clinical applications. Online. *The Kaohsiung journal of medical sciences*. 2012, roč. 25, č. 2, s. 13-25. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.kjms.2011.08.004>. [cit. 2025-05-05].
- [17] JI, Dafeng; WANG, Peng; ZHANG, Xinhua a CHEN, Xinrong. Feasibility study on accurate rapid prototyping for human hand bones and affiliated artery. Online. *Rapid Prototyping Journal*. 2017, roč. 23, č. 1, s. 96-100. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/RPJ-08-2015-0104>. [cit. 2025-05-06].
- [18] MAGNENAT-THALMANN, N. a CORDIER, F. Construction of a human topological model from medical data. Online. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*. 2000, roč. 4, č. 2, s. 137-143. ISSN 10897771. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/4233.845206>. [cit. 2025-05-06].
- [19] DUNAI, Larisa; NOVAK, Martin a GARCÍA ESPERT, Carmen. Human Hand Anatomy-Based Prosthetic Hand. Online. *Sensors*. 2021, roč. 21, č. 1. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s21010137>. [cit. 2025-05-06].
- [20] ATLAS OF HUMAN ANATOMY SIXTH EDITION. In: *Atlas of human anatomy*. 6th ed. Philadelphia: Saunders Elsevier, c2014, s. 427-457. ISBN 978-1-4557-5888-3.
- [21] KIJIMA, Yasumu a VIEGAS, Steven F. Wrist Anatomy and Biomechanics. Online. *The Journal of Hand Surgery*. 2009, roč. 34, č. 8, s. 1555-1563. ISSN 03635023. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2009.07.019>. [cit. 2025-05-06].
- [22] Large index-fingertip forces are produced by subject-independent patterns of muscle excitation. Online. *Journal of Biomechanics*. 1998, roč. 8, č. 31, s. 693-703. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(98\)00082-7](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(98)00082-7). [cit. 2025-05-06].
- [23] TUČEK, Josef. Zvýší sílu i výkon: exoskelet si hledá nový trh. Online. *Newstream*. Dostupné z: <https://www.newstream.cz/money/zvysi-silu-i-vykon-exoskelet-si-hleda-novy-trh>. [cit. 2025-04-30].
- [24] SUO, Xiang; TANG, Weidi a LI, Zhen. Motion Capture Technology in Sports Scenarios: A Survey. Online. *Sensors*. 2024, roč. 24, č. 9. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s24092947>. [cit. 2025-05-06].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Balistická raketa Redstone	13
Obrázek 2 Dokumentace historické fasády	15
Obrázek 3 Vizualizace reverzního inženýrství	17
Obrázek 4 Základní rozdělení metod 3D skenování.....	18
Obrázek 5 Schéma triangulační metody	19
Obrázek 6 Schéma strukturálního světlení	20
Obrázek 7 Schéma sonaru.....	21
Obrázek 8 Pohled z perspektivy laserového skeneru.....	22
Obrázek 9 Porovnání bodového mračka s polygonální sítí	23
Obrázek 10 Příklad 3D tisku.....	24
Obrázek 11 Schéma kloubového mechanismu	27
Obrázek 12 Schéma klikového mechanismu	28
Obrázek 13 Schéma vačkového mechanismu.....	29
Obrázek 14 Schéma ozubeného převodu.....	30
Obrázek 15 Schéma řemenového převodu	31
Obrázek 16 Topologická anatomie horní končetiny	32
Obrázek 17 Exoskelet	34
Obrázek 18 Dokumentace silikonové formy	40
Obrázek 19 Dokumentace odlévání výrobku.....	42
Obrázek 20 Odlitek	43
Obrázek 21 Pořízený 3D sken	45
Obrázek 22 Porovnání kvality povrchu originálu, duplikátu a skenu.....	46
Obrázek 23 Topologická anatomie prstu	47
Obrázek 24 Návrh pohybového mechanismu	48
Obrázek 25 Implementace mechanismu do horní končetiny	49
Obrázek 26 Návrh prstů převedený do 3D modelu	50
Obrázek 27 Návrh mechanismu se šroubovým převodem	51
Obrázek 28 Vizualizace plochy dlaně	52
Obrázek 29 Kompletní 3D model návrhu.....	53

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

CAD Computer Aided Design (Počítačově podporované navrhování)

CMM Coordinate Measuring Machines (Souřadnicové měřicí stroje)

FEM Finite Element Method (Metoda konečných prvků)

MRI Magnetic Resonance Imaging (Magnetická rezonance)

OBJ Object (Objekt)

PMI Product and Manufacturing Information (Informace o výrobku a výrobě)

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Materiálový list Dragon Skin 10 platinum cure silicone rubber

Příloha P II: Materiálový list polyuretanu PR 700

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST DRAGON SKIN 10 PLATINUM CURE SILICONE RUBBER

Dragon Skin™ Series

Addition Cure Silicone Rubber Compounds



Cured Material
Certified Skin Safe!



www.smooth-on.com

PRODUCT OVERVIEW

Dragon Skin™ silicones are high performance platinum cure liquid silicone compounds that are used for a variety of applications ranging from creating skin effects and other movie special effects to making production molds for casting a variety of materials. Because of the superior physical properties and flexibility of **Dragon Skin™** rubbers, they are also used for medical prosthetics and cushioning applications. **Dragon Skin™** rubbers are also used for a variety of industrial applications and have a service temperature range of a constant -65°F to +450°F (-53°C to +232°C).

Great for Making Molds for a Variety of Applications - Available in Shore 10A, 15A, 20A and 30A, **Dragon Skin™** silicones can be used to make exceptionally strong and tear resistant molds for casting plaster, wax, concrete (limited production run), resins and other materials. **Dragon Skin™ 10 AF** is an anti-fungal silicone suitable for making a variety of skin-safe cushioning device configurations that resist fungi for orthopedic and orthotic applications. **Dragon Skin™ 10** silicones are Flame Rated to UL-94 HB specification and they meet the B1 classification for the GB 8624-2012 Fire Test to Building Material and Products (does not include 'NV' formulas).

Time Tested, Versatile Special Effects Material - Soft, super-strong and stretchy, **Dragon Skin™ 10** (Very Fast, Fast, Medium and Slow speeds) is used around the world to make spectacular skin and creature effects. An infinite number of color effects can be achieved by adding Silc Pig™ silicone pigments or Cast Magic™ effects powders. Cured rubber can also be painted with the Psycho Paint™ system. Cured material is skin safe and certified by an independent laboratory.

Easy To Use - **Dragon Skin™** silicones are mixed 1A:1B by weight or volume. Liquid rubber can be thinned with Silicone Thinner™ or thickened with Thi-Vex™. Rubber cures at room temperature (73°F/23°C) with negligible shrinkage. **Vacuum degassing is recommended to minimize air bubbles in cured rubber.**

TECHNICAL OVERVIEW

PROCESSING RECOMMENDATIONS

	Mixed Viscosity (ASTM D-2393)	Specific Gravity (g/cc) (ASTM D-1475)	Specific Volume (cc./in. ³) (ASTM D-1475)	Pot Life (ASTM D-2471)	Cure Time	Shore A Hardness (ASTM D-2240)	Tensile Strength (ASTM D-412)	100% Modulus (ASTM D-412)	Elongation at Break % (ASTM D-412)	Die B Tear Strength (ASTM D-624)	Shrinkage (in./in.) (ASTM D-2566)
Dragon Skin™ 10 Very Fast	23,000 cps	1.07	25.8	4 min.	30 min.	10A	475 psi	22 psi	1000%	102 pli	< .001 in./in.
Dragon Skin™ 10 Fast	23,000 cps	1.07	25.8	8 min.	75 min.	10A	475 psi	22 psi	1000%	102 pli	< .001 in./in.
Dragon Skin™ 10 Medium	23,000 cps	1.07	25.8	20 min.	5 hours	10A	475 psi	22 psi	1000%	102 pli	< .001 in./in.
Dragon Skin™ 10 Slow	23,000 cps	1.07	25.8	45 min.	7 hours	10A	475 psi	22 psi	1000%	102 pli	< .001 in./in.
Dragon Skin™ 10 AF	23,000 cps	1.07	25.8	20 min.	5 hours	10A	475 psi	22 psi	1000%	102 pli	< .001 in./in.
Dragon Skin™ 15	21,000 cps	1.07	25.8	40 min.	7 hours	15A	537 psi	40 psi	771%	112 pli	< .001 in./in.
Dragon Skin™ 20	20,000 cps	1.08	25.6	25 min.	4 hours	20A	550 psi	49 psi	620%	120 pli	< .001 in./in.
Dragon Skin™ 30	20,000 cps	1.08	25.7	45 min.	16 hours	30A	500 psi	86 psi	364%	108 pli	< .001 in./in.

Mix Ratio: 1A:1B by volume or weight
Color: Translucent

Useful Temperature Range: -65°F to +450°F (-53°C to +232°C)
Dielectric Strength (ASTM D-149): > 350 volts/mil

*All values measured after 7 days at 73°F/23°C

PREPARATION...

Safety - Use in a properly ventilated area ("room size" ventilation). Wear safety glasses, long sleeves and rubber gloves to minimize contamination risk. Wear vinyl gloves only. Latex gloves will inhibit the cure of the rubber.

Store and use material at room temperature (73°F/23°C). Warmer temperatures will drastically reduce working time and cure time. Storing material at warmer temperatures will also reduce the usable shelf life of unused material. These products have a limited shelf life and should be used as soon as possible. Mixing containers should have straight sides and a flat bottom. Mixing sticks should be flat and stiff with defined edges for scraping the sides and bottom of your mixing container.

Cure Inhibition - Addition-cure silicone rubber may be inhibited by certain contaminants in or on the pattern to be molded resulting in tackiness at the pattern interface or a total lack of cure throughout the mold. Latex, tin-cure silicone, sulfur clays, certain wood surfaces, newly cast polyester, epoxy, tin cure silicone rubber or urethane rubber may cause inhibition. If compatibility between the rubber and the surface is a concern, a small-scale test is recommended. Apply a small amount of rubber onto a non-critical area of the pattern. Inhibition has occurred if the rubber is gummy or uncured after the recommended cure time has passed.

Safety First!

The Material Safety Data Sheet (MSDS) for this or any Smooth-On product should be read prior to use and is available upon request from Smooth-On. All Smooth-On products are safe to use if directions are read and followed carefully.

Keep Out of Reach of Children

Be careful. Use only with adequate ventilation. Contact with skin and eyes may cause irritation. Flush eyes with water for 15 minutes and seek immediate medical attention. Remove from skin with waterless hand cleaner followed by soap and water.

Important: The information contained in this bulletin is considered accurate. However, no warranty is expressed or implied regarding the accuracy of the data, the results to be obtained from the use thereof, or that any such use will not infringe upon a patent. User shall determine the suitability of the product for the intended application and assume all risk and liability whatsoever in connection therewith.

Because no two applications are quite the same, a small test application to determine suitability for your project is recommended if performance of this material is in question.

Cure Inhibition - To prevent inhibition, one or more coatings of a clear acrylic lacquer applied to the model surface is usually effective. Allow any sealer to thoroughly dry before applying rubber. Note: Even with a sealer, platinum silicones will not work with modeling clays containing heavy amounts of sulfur. Do a small scale test for compatibility before using on your project.

Applying A Release Agent - Although not usually necessary, a release agent will make demolding easier when pouring into or over most surfaces. Ease Release™ 200 is a proven release agent for making molds with silicone rubber. Mann Ease Release™ products are available from Smooth-On or your Smooth-On distributor.

IMPORTANT: To ensure thorough coverage, lightly brush the release agent with a soft brush over all surfaces of the model. Follow with a light mist coating and let the release agent dry for 30 minutes.

If there is any question about the effectiveness of a sealer/release agent combination, a small-scale test should be made on an identical surface for trial.

MEASURING & MIXING...

Stir Part A and Part B thoroughly before dispensing. After dispensing required amounts of Parts A and B into mixing container (1A:1B by volume or weight), **mix thoroughly for 3 minutes (60 seconds for Dragon Skin™ 10 Very Fast) making sure that you scrape the sides and bottom of the mixing container several times.** After mixing parts A and B, vacuum degassing is recommended to eliminate any entrapped air in liquid rubber. Your vacuum pump must pull a minimum of 29 inches of mercury (or 1 Bar / 100 KPa). Leave enough room in container for material expansion. Vacuum material until it rises, breaks and falls. Vacuum for 1 minute after material falls.

POURING, CURING & MOLD PERFORMANCE...

For best results, pour your mixture in a single spot at the lowest point of the containment field. Let the rubber seek its level up and over the model. A uniform flow will help minimize entrapped air. The liquid rubber should level off at least 1/2" (1.3 cm) over the highest point of the model surface.

Curing / Post Curing - Allow rubber to cure as prescribed at room temperature (73°F/23°C) before demolding. Do not cure rubber where temperature is less than 65°F/18°C. **Optional:** Post curing the mold will aid in quickly attaining maximum physical and performance properties. After curing at room temperature, expose the rubber to 176°F/80°C for 2 hours and 212°F/100°C for one hour. Allow mold to cool to room temperature before using.

If Using As A Mold - When first cast, silicone rubber molds exhibit natural release characteristics. Depending on what is being cast into the mold, mold lubricity may be depleted over time and parts will begin to stick. No release agent is necessary when casting wax or gypsum. Applying a release agent such as Ease Release™ 200 (available from Smooth-On) prior to casting polyurethane, polyester and epoxy resins is recommended to prevent mold degradation.

Thickening Dragon Skin™ Silicones - THI-VEX™ is made especially for thickening Smooth-On's silicones for vertical surface application (making brush-on molds). Different viscosities can be attained by varying the amount of THI-VEX™. See the THI-VEX™ technical bulletin (available from Smooth-On or your Smooth-On distributor) for full details.

Thinning Dragon Skin™ Silicones - Smooth-On's Silicone Thinner™ will lower the viscosity of Dragon Skin™ for easier pouring and vacuum degassing. A disadvantage is that ultimate tear and tensile are reduced in proportion to the amount of Silicone Thinner™ added. **It is not recommended to exceed 10% by weight of total system (A+B).** See the Silicone Thinner™ technical bulletin (available from Smooth-On or your Smooth-On distributor) for full details.

Mold Performance & Storage - The physical life of the mold depends on how you use it (materials cast, frequency, etc.). Casting abrasive materials such as concrete can quickly erode mold detail, while casting non-abrasive materials (wax) will not affect mold detail. Before storing, the mold should be cleaned with a soap solution and wiped fully dry. Two part (or more) molds should be assembled. Molds should be stored on a level surface in a cool, dry environment.



Call Us Anytime With Questions About Your Application.

Toll-free: (800) 381-1733 Fax: (610) 252-6200

www.smooth-on.com is loaded with information about mold making, casting and more.

040825PA

PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST POLYURETANU PR 700



45 Ferme de L'Evêché - CS 20308
60723 Pont-Sainte-Maxence CEDEX - FRANCE
Tel : + 33 3 44 31 72 00
Fax : + 33 1 57 67 44 58
E-mail : contact@synthene.com
<http://www.synthene.com>

PR700

References :

Polyol: PR700-POLYOL-ST109000

Isocyanate: PR7SERIES-ISO-ST000401

Definition :

→ PR700 :

Polyurethane resin for the realisation of ABS-like parts with the vacuum casting process. The product has high thermal and mechanical properties, good chemical and impact resistance. Black material, with a low aggressiveness to silicone moulds. Low viscosity to facilitate the casting.

REACH-compatible material complying with the following European Directives:

- 2011/65/EU – 2015/863 – 2017/2102/EU (RoHS 1 and 2)
- 2002/96/EC (WEEE)
- 2000/53/EC (ELVs)
- 2000/11/EC

Average physical properties of the components :

	PR700 Polyol ST 109 000	PR 7 Series Iso ST 000 401	PR700 Mix ST 109 401
Aspect - Colour	Black liquid	Colourless transparent liquid	Black liquid Black solid
Brookfield LVT viscosity (mPa.s) According to MO-051	130	1200	600
Density at 25°C According to MO-032	1,13	1,15	1,14

Application properties :

	PR700 Polyol ST 109 000	PR 7 series Iso ST 000 401	PR700 Mix ST 109 401
Mixing ratio by weight	80	100	
Mixing ratio by volume	81,5	100	
Mixing time at 25°C			1 min.
Potlife on 180g at 25°C According to MO-062			6 -7 min.
Demoulding time at 70°C (on 3mm) According to MO-116			45 min.
Optimal curing time	1h at 70°C + 1h at 100°C + 2h at 120°C + 24h at room temperature		

The values mentioned on this document are based on tests and researches carried out in SYNTHENE's laboratory, in precise conditions. This document cannot be, in any case, considered as a specification data sheet. It is the responsibility of the users to check the suitability of the product in their own conditions, defined and tried by themselves. Synthene company disclaims any responsibility for any consequence occurred by the use of this product.



45 Ferme de L'Evêché - CS 20308
60723 Pont-Sainte-Maxence CEDEX - FRANCE
Tel : + 33 3 44 31 72 00
Fax : + 33 1 57 67 44 58
E-mail : contact@synthene.com
<http://www.synthene.com>

Average mechanical and thermal properties of the cured material :

- Average values obtained after post-curing : 1h at 70°C + 1h at 100°C + 2h at 120°C + 24h at room temperature

	Standard	Unit	Values PR700
Hardness	ISO 868 : 2003	Shore D1	82
Flexural modulus	ISO 178 : 2011	MPa	1700
Maximum flexural strength	ISO 178 : 2011	MPa	70
Tensile modulus	ISO 527-1 : 2012	MPa	1800
Elongation at maximum strength	ISO 527-1 : 2012	%	13
Elongation at break	ISO 527-1 : 2012	%	16
Maximum tensile strength	ISO 527-1 : 2012	MPa	60
Tensile strength at break	ISO 527-1 : 2012	MPa	60
Charpy impact resistance	ISO 179-1 : 2010 unnotched-1eU ^a	KJ/m ²	60
Heat Deflection Temperature (HDT)	ISO 75-2 : 2013 method B	°C	130
Glass transition temperature (Tg)	ISO 6721-10 : 2015	°C	>130

Hygiene and safety for using :

Wearing appropriate safety clothes and accessories (gloves, glasses) is advised.
Work in a ventilated room.
For more information, please read the Medical and Safety Data Sheet of the material.

Operating conditions :

➔ **Application process in a vacuum casting machine :**

1. Preheat the polyaddition silicone mould at 70°C.
2. Rehomogenise and weigh the separated components (upper cup : Iso / lower cup : Polyol), with addition of the necessary residual quantity in the upper cup. Then, put the cups inside the vacuum casting machine.
3. Degas the products during 10 minutes, with agitation in the lower cup (Polyol).
4. Stop the agitation and pour the content of the upper cup (Iso) into the lower cup (Polyol).
5. Start the agitation and mix for at least 1 minute.
6. Slightly release the vacuum in the chamber to a pressure of about 100 hPa (0,1bar).
7. Cast the mixture into the silicone mould until complete filling.
8. Break the vacuum back to atmospheric pressure.
9. Place the mould in an oven at 70°C.

The values mentioned on this document are based on tests and researches carried out in SYNTHENE's laboratory, in precise conditions. This document cannot be, in any case, considered as a specification data sheet. It is the responsibility of the users to check the suitability of the product in their own conditions, defined and tried by themselves. Synthene company disclaims any responsibility for any consequence occurred by the use of this product.



45 Ferme de L'Evêché - CS 20308
60723 Pont-Sainte-Maxence CEDEX - FRANCE
Tel : + 33 3 44 31 72 00
Fax : + 33 1 57 67 44 58
E-mail : contact@synthene.com
<http://www.synthene.com>

10. Demoulding is possible after :

- 45 minutes at 70°C, depending on the thickness of the part

In order to obtain the mechanical properties of the material, it is necessary to realize a complete curing, demoulding time included, of :

- Optimal curing time : 1h at 70°C + 1h at 100°C + 2h at 120°C + 24h at room temperature

→ **Application process for hand casting :**

1. Preheat the polyaddition silicone mould at 70°C.
2. Rehomogenise the polyol and the isocyanate, weigh them in a clean mixing cup.
3. Duly mix both components together for at least 1 minute, making sure that the mixture is homogeneous.
4. Pour the mix in a second cup without scrapping the bottom neither trying to get the residues back from the first mixing cup walls (in order to avoid problems linked to an inhomogeneous mix). Mix again with in the second bowl for around 30 seconds.
5. Degas the mixture in a vacuum chamber.
6. Cast in the mould at once, to avoid the incorporation of air in the mould while casting (if possible, cast from a low point).
7. Put the mould in an oven at 70°C.
8. Demoulding is possible after :
 - 45 minutes at 70°C, depending on the thickness of the part

In order to obtain the mechanical properties of the material, it is necessary to realise a complete curing, demoulding time included, of :

- Optimal curing time : 1h at 70°C + 1h at 100°C + 2h at 120°C + 24h at room temperature

Packaging :

- Box of 2 kits of (4,0 kg polyol + 5,0 kg isocyanate) = 18 kg
- Box of 6 kit of (0,8kg polyol + 1,0 kg isocyanate) = 10,8 kg

Storage :

18 months in original and unopened containers, stored between 15 and 25 °C.

The values mentioned on this document are based on tests and researches carried out in SYNTHENE's laboratory, in precise conditions. This document cannot be, in any case, considered as a specification data sheet. It is the responsibility of the users to check the suitability of the product in their own conditions, defined and tried by themselves. Synthene company disclaims any responsibility for any consequence occurred by the use of this product.