

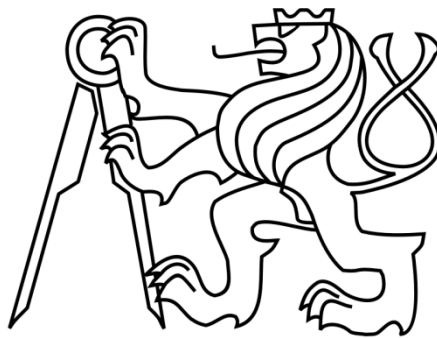
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV MECHANIKY, BIOMECHANIKY A MECHATRONIKY

Odbor mechaniky a mechatroniky



## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

### **3D prototyping mechanismů**

**Praha 2016**

**Tomáš Havlan**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Havlan** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **419941**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**3D prototyping mechanismů**

Název bakalářské práce anglicky:

**3D prototyping of mechanism**

Pokyny pro vypracování:

1) Proveďte rešerši metod 3D prototypování a tisku. 2) Proveďte kinematický návrh mechanismu typu delta. 3) Optimalizujte mechanismus. 4) Mechanismus realizujte metodou 3D tisku. Předpokládaný rozsah práce: 35 stran

Seznam doporučené literatury:

- [1] Brát V.: Maticové metody v analýze a syntéze prostorových vázaných mechanických systémů. Praha: Academia, 1981.  
[2] Stejskal V., Valášek M.: Kinematics and dynamics of machinery. New York: Marcel Dekker, 1996. ISBN 0-8247-9731-0.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jan Zavřel Ph.D.**

Jméno a pracoviště konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **17.06.2016**

Platnost zadání bakalářské práce:

  
Podpis vedoucí(ho) práce

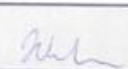
  
Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

25.4.2016

Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta(ky)

## Anotační list

<b>Jméno autora:</b>	<b>Tomáš Havlan</b>
<b>Název bakalářské práce:</b>	<b>3D prototyping mechanismů</b>
<b>Anglický název:</b>	<b>3D prototyping of mechanisms</b>
<b>Akademický rok:</b>	2015/2016
<b>Obor studia:</b>	Teoretický základ strojního inženýrství
<b>Ústav/odbor:</b>	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky Odbor Mechaniky a mechatroniky
<b>Vedoucí bakalářské práce:</b>	Ing. Jan Zavřel, Ph.D
<b>Bibliografické údaje:</b>	Počet stran: 48 Počet obrázků: 29 Počet tabulek: 1
<b>Klíčová slova:</b>	3D tisk, rapid prototyping, delta robot, kinematika
<b>Keywords:</b>	3D print, rapid prototyping, delta robot, kinematics

### **Abstrakt:**

Bakalářská práce je zaměřena na problematiku rapid prototypingu (3D tisku) a jejího využití k tvorbě fyzických modelů mechanismů. V práci je popsána technologie 3D tisku od historie, principu, rozdělení a popsaní jednotlivých metod až po postup výroby modelů touto technologií. Dále je v práci zmíněna problematika kinematik mechanismů, jejich rozdělení a stručný popis. Cílem práce je navrhnout z kinematického hlediska mechanismus typu delta, provést optimalizaci podle zadaných požadavků a následně model vytvořit pomocí 3D tisku.

### **Abstract:**

The bachelor thesis is focused on problems of rapid prototyping (3D printing) and its utilization for creation of physical models and mechanisms. In the thesis is described technology of 3D printing from history, principle, allocation and description of individual methods to the procedure of the model's manufacture with this technology. The kinetics issue of the mechanisms, its diversification and brief specification are also mentioned in this thesis. The goal of this thesis is to design from kinematical view, a delta type mechanism, fulfil optimalization following given requirements and afterwards to construct a model by using 3D printing.

## **Prohlášení**

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

V Praze, dne .....

Podpis .....

## **Poděkování**

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

# Obsah

Anotační list .....	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah .....	6
Seznam obrázků .....	8
Seznam tabulek.....	9
1 Úvod.....	10
2 Cíle bakalářské práce.....	11
3 Rapid prototyping.....	12
3.1 Historie RP .....	14
3.2 Princip RP .....	15
4 Metody RP .....	17
4.1 Dělení metod RP.....	17
4.2 Přehled nejpoužívanějších technologií RP.....	17
4.2.1 Stereolitografie (SLA) .....	17
4.2.2 Selective Laser Sintering (SLS).....	18
4.2.3 Laminated Object Manufacture (LOM).....	19
4.2.4 Fused Deposition Modeling (FDM).....	20
4.2.5 Ballistic Particle Manufacturing (BPM).....	21
4.2.6 Multi-Jet Modeling - MJM .....	22
4.2.7 Digital Light Processing – DLP.....	22
5 Průmyslové roboty .....	24
5.1 Mechanismy.....	25
5.2 Rozdělení průmyslových robotů podle kinematiky.....	25
5.3 Delta roboty .....	27
6 Praktická část.....	29
6.1 Kinematický návrh mechanismu typu delta .....	29
6.1.1 Stupně volnosti.....	30
6.1.2 Inverzní kinematika.....	30
6.1.3 Simulace .....	33
6.2 Optimalizace mechanismu.....	36
6.2.1 Kritéria optimalizace.....	38

6.2.2 Výsledky optimalizace .....	39
6.3 Realizace modelu .....	39
6.3.1 Tisk dílů .....	41
6.3.2 Stavba modelu.....	42
7 Závěr.....	45
Seznam příloh na CD.....	48

## Seznam obrázků

Obr. 1: 3D tiskárna Stratasys Objet500 Connex3 – převzato z <a href="http://www.gigaom.com">www.gigaom.com</a> .....	13
Obr. 2: Reprapová tiskárna Rebelix X2 – převzato z <a href="http://www.rebelix.cz">www.rebelix.cz</a> .....	13
Obr. 3: Patentovaný princip Stereolitografie Charlese Hulla – převzato z [2] .....	14
Obr. 4: Princip metody Stereografie – převzato z [4] .....	18
Obr. 5: Princip metody SLS – převzato z [4] .....	19
Obr. 6: Princip metody LOM – převzato z [4] .....	20
Obr. 7: Princip metody FDM – převzato z [4] .....	21
Obr. 8: Popis metody MJM – převzato z [5] .....	22
Obr. 9: Popis metody DLP – převzato z <a href="http://www.aniwaa.com">www.aniwaa.com</a> .....	23
Obr. 10: První průmyslový robot firmy Unimate – převzato z <a href="http://www.robotics.org">www.robotics.org</a> .....	24
Obr. 11: Druhy kinematických – převzato z [8] .....	25
Obr. 12: Rozdělení obráběcích strojů a robotů podle kinematiky – převzato z [10] ...	26
Obr. 13: Paralelní kinematika delta robotu – převzato z <a href="http://www.intechopen.com">www.intechopen.com</a> .....	28
Obr. 14: Manipulátor IRB FlexPicker od firmy ABB – převzato z <a href="http://www.abb.com">www.abb.com</a> .....	28
Obr. 15: Popis delta robotu – převzato z [11] .....	29
Obr. 16: Schéma delta robotu .....	33
Obr. 17: Náhled simulace v programu MATLAB .....	36
Obr. 18: Schéma pracovního prostoru .....	37
Obr. 19: Mapa výsledků optimalizace .....	38
Obr. 20: Graf hodnocení kritéria .....	38
Obr. 21: 3D vizualizace delta robotu .....	40
Obr. 22: Návrh sférického kloubu .....	40
Obr. 23: Prostředí programu Slic3r .....	41
Obr. 24: Tisk dílů na tiskárně Rebelix X2 .....	41
Obr. 25: Hotový model delta robotu .....	42
Obr. 26: Vytisknutá patka spojující podstavec a rám delta robotu .....	43
Obr. 27: Detail serva MG996R .....	43
Obr. 28: Detail sestaveného gripperu .....	44
Obr. 29: Zjednodušené schéma řízení v prostředí MATLAB Simulink .....	44



## Seznam tabulek

Tab. 1: Porovnání paralelní a sériové kinematiky .....	27
--	----

# 1 Úvod

V posledních letech je 3D prototyping (rapid prototyping, zkráceně RP), jinak také 3D tisk, velmi diskutovaným a velmi rychle se rozvíjejícím odvětvím průmyslu. Jedním z hlavních důvodů jsou čím dál tím více se zvyšující nároky na zkracování času potřebného k návrhu a výrobě nových řešení. Rapid prototyping je soubor technologií tzv. aditivní výroby, které umožňují během několika hodin zhmotnit digitální návrhy a vytvořit reálný model. Pomocí těchto technologií jsou vyráběny především prototypy, které slouží např. k designérskému posouzení, pro reklamní nebo marketingové účely na různých výstavách a veletrzích, pro funkční zkoušky či k ověření smontovatelnosti sestav. Kromě prototypů lze pomocí 3D tisku také vyrábět modely pro slévárenský průmysl, pro zdravotnictví nebo jen výrobky pro domácí použití. Aditivní výrobu lze chápat jako proces, při kterém vzniká postupným nanášením stavebního materiálu v jednotlivých tenkých vrstvách fyzický model.

Další z velmi aktuálních odvětví průmyslu je robotizace, která se v poslední době velmi rozmáhá. Jedním z hlavních důvodů je opět čas, který se zavedením robotů do výroby velmi krátí a s tím související také nižší náklady na výrobu. Kromě zvýšení produktivity a úspory nákladů jsou dalšími důvody také zvýšení kvality, bezpečnosti pracovníků apod.

Spojením těchto dvou velmi aktuálních témat vznikla myšlenka této bakalářské práce.

## **2 Cíle bakalářské práce**

Cíle bakalářské práce vycházejí ze zadání a jsou:

1. Proved'te rešerši metod 3D prototypování a tisku
2. Proved'te kinematický návrh mechanismu typu delta
3. Optimalizujte mechanismus
4. Mechanismus realizujte metodou 3D tisku

### 3 Rapid prototyping

Rapid prototyping [1] je soubor technologií, pomocí kterých se dají vytvořit velmi složité trojrozměrné objekty. Počátky těchto technologií byly zaznamenány v druhé polovině 20. století, kdy si Charles Hull v roce 1986 nechal patentovat technologii stereolitografie. Technologie spočívala v trojrozměrném laserovém tisku s využitím UV laseru a tekutého fotopolymeru. Před koncem 90. let pak jeho firma 3D Systems vytvořila první zařízení tisknoucí v 3D formátu, tzv. stereolitografický aparát SLA-1. Toto zařízení se ještě nedalo nazývat 3D tiskárnou, každopádně to bylo první zařízení, které pracovalo na podobném principu jako dnešní 3D tiskárny a stalo se základem vývoje současných moderních 3D tiskáren a také CNC strojů. Později v roce 1993 byla patentována institutem Massachusetts Institute of Technology (MIT) další technika pro tisk trojrozměrných modelů, která pracovala s práškovým materiálem a tekutým spojovačem. Licenci koupila firma Z Corporation a na stejném principu začala vývoj 3D tiskáren jako takových. Pojem 3D tiskárna tedy pochází až z druhé poloviny 90. let. Pořizovací cena těchto strojů se však často pohybovala až v řádech milionů korun a samotný tisk také nebyl levnou záležitostí. Postupem času se povedlo technologii natolik zdokonalit, že v dnešní době si bez těchto strojů konstruktéři, vývojáři a spousta dalších profesí neumí svoji práci téměř představit. Pomocí 3D technologie se může díl, spíše jeho prototyp, vymodelovaný na počítači v některém z CAD programů, vytvořit během několika minut či hodin. Většina dílů vytvořených pomocí technologie 3D tisku je založena na plastových materiálech. V současnosti se ale začínají častěji objevovat i materiály kovové či materiály plastové s příměsí např. karbonových nebo skelných vláken.

V současnosti lze 3D tiskárny rozdělit do dvou hlavních skupin a to 3D tiskárny profesionální (komerční) – obr. 1 a 3D tiskárny pro hobby využití – obr. 2, mezi které spadají i tzv. reprop<sup>1</sup> tiskárny. Kromě výrazných rozdílů v pořizovací ceně zařízení (profesionální tiskárny se momentálně pohybují řádově v milionech korun, hobby tiskárny v desetitisících korun) je samozřejmě také podstatný rozdíl v kvalitě tisku a v omezenosti využití různých druhů materiálů. Podstatou reprop 3D tiskáren je jejich reprodukovatelnost, tedy možnost vytisknutí dílů na další 3D tiskárnu na již postaveném stroji. Také většina repropových tiskáren spadá do celosvětového

---

<sup>1</sup> Reprop (Replicating Rapid prototyper) je open-source komunitní projekt, což znamená, že každý si může vlastní RepRap postavit, vylepšit ho a svá vylepšení vrátit zpět komunitě [13].

programu open source, kdy veškerá data potřebná k sestavení 3D tiskárny jsou volně k dispozici na internetu. Tento typ tiskáren je mezi „tiskaři“ velmi oblíbený, jelikož si dotyčný může stroj postavit sám a kvalita tisku těchto 3D tiskáren je někdy velmi překvapivá. Většina hobby 3D tiskáren využívá metody FDM<sup>2</sup> (kapitole 4.2.4).



Obr. 1: 3D tiskárna Stratasys Objet500 Connex3 – převzato z [www.gigaom.com](http://www.gigaom.com)



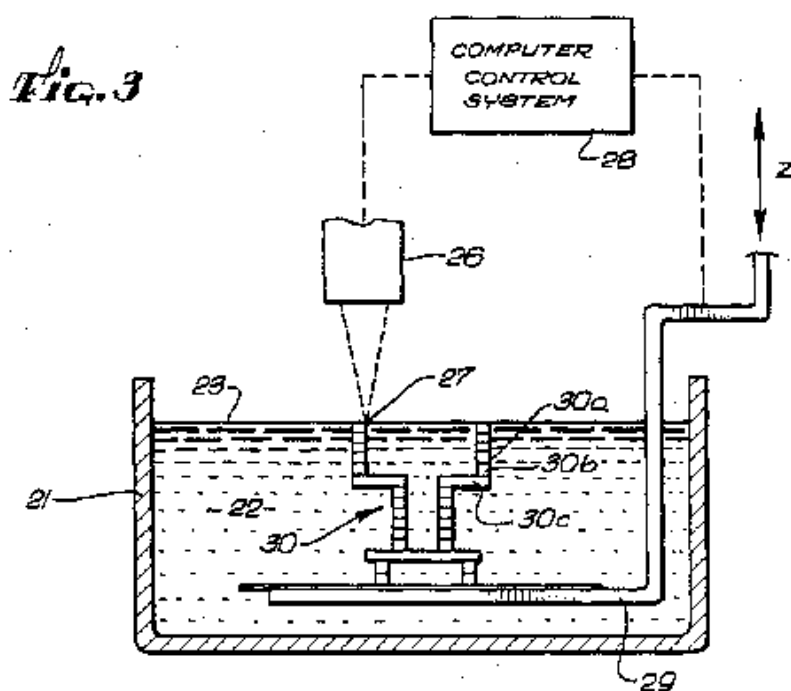
Obr. 2: Reprapová tiskárna Rebelix X2 – převzato z [www.rebelix.cz](http://www.rebelix.cz)

---

<sup>2</sup> FDM (Fused Deposition Modeling) je metoda 3D tisku, pracující na principu přímého nanášení roztaveného materiálu z tiskové hlavy

### 3.1 Historie RP

Počátky rapid prototypingu [1] spadají do 80. let 20. století, kdy začala být komerčně využívána první z metod 3D tisku – Stereolitografie, jejíž princip lze vidět na obr. 3. Původní myšlenka pochází od Charlese Hulla, který si ji patentoval a v roce 1986 založil v Kalifornii firmu 3D Systems. S technologií pracující na stejném principu přišel také pár let před ním japonský výzkumník Hideo Kodaky a nezávisle na něm také Američan Alan Herbert z firmy 3M Corporation. Přesto se Charles Hull považuje za zakladatele Rapid Prototypingu. Jeho patent na technologii stereolitografie je zapsán pod číslem 4575330 a byl zaregistrován 11. března 1986. Před koncem 90. let pak jeho firma 3D Systems vytvořila první komerční zařízení tisknoucí v 3D formátu, tzv. stereolitografický aparát SLA-1, které pracovalo na podobném principu současných 3D tiskáren. Pojem 3D tiskárna tedy pochází až z druhé poloviny 90. let.



Obr. 3: Patentovaný princip Stereolitografie Charlese Hulla – převzato z [2]

V následujících letech se objevilo a prosadilo hned několik dalších technologií, pracujících na principu postupného přidávání nebo vytvrzování vrstev materiálu. V

roce 1987 byla vyvinuta technologie BPM<sup>3</sup> Američanem Billem Mastersem, který o rok později zakládá firmu BPM Technology. V roce 1988 přichází americká firma Helysis s technologií LOM (Laminated Object Manufacturing), která pracuje na principu vrstvení tenkých fólií z plastu nebo papíru. O rok později se objevuje technologie SLS (Selective Laser Sintering), pracující na principu slinování práškových materiálů za použití laseru, která byla vyvinutá na Texaské univerzitě v Austinu a licencovaná na společnost DTM Corp. V roce 1992 představuje společnost Stratasys úplně odlišnou metodu oproti metodám předešlým, a to technologii FDM, kde není na rozdíl od ostatních metod použit laser, ale jednotlivé vrstvy jsou vytvářeny nanášením roztaveného termoplastu. V roce 1993 byla patentována institutem MIT (Massachusetts Institute of Technology) další technologie s názvem 3DP (Three-dimensional printing), pro tisk trojrozměrných modelů, která pracovala s práškovým materiálem a tekutým spojovačem. Tato metoda funguje na podobném principu jako inkoustový tisk. Licenci koupila firma Z Corporation a na stejném principu začala vývoj 3D tiskáren jako takových.

## 3.2 Princip RP

Technologie na výrobu fyzických modelů, prototypů a různých komponentů pracuje na principu rozložení modelu v elektronické podobě do tenkých vrstev a jejich následném sestavení do reálného modelu. Model v elektronické podobě je vypracovaný v daném formátu nejčastěji za pomoci CAD programu v počítači nebo získán pomocí 3D skeneru. Model je stavěn na základní desce, která po dokončení tisku každé vrstvy poklesne dolů právě o tloušťku této vrstvy. Materiál je po velmi tenkých vrstvách přidáván na vrstvy již vytvořené a každá vrstva má v podstatě svůj 2D formát. Toto se opakuje stále dokola, dokud není díl vyroben. Velikost modelu je omezena velikostí komory 3D tiskárny. 3D tisk využívá více technologií, které se různě liší především fyzikálním principem tvoření jednotlivých vrstev. S tím souvisí také použitý druh materiálu, jeho skupenství, které může být pevné, kapalné či práškové, dále pak tloušťka vrstev, od které se odvíjí také přesnost a kvalita hotového dílu. Mezi 3D tiskem a klasickým obráběním je rozdíl především v procesu výroby. Zatímco při obrábění je materiál ubírán, při 3D tisku je tomu přesně naopak.

---

<sup>3</sup> BPM (Ballistic Particle Manufacturing) je metoda 3D tisku, pracující na principu nástřiku kapek termoplastu pomocí pracovní hlavy

Postup 3D tisku bývá často rozdělen do 3 základních etap/fází nazývaných preprocessing, processing a postprocessing. Tento způsob členění je velmi blízký například postupu při využití CNC strojů. Stejně jako u uvedených technologií jde o přípravu dat, vlastní zpracování a zhodnocení výsledků. V případě 3D tisku rozumíme preprocessingem přípravu 3D dat pro tisk, processingem vlastní tisk dílu danými metodami 3D tisku a postprocessingem další operace (odstranění podpor, povrchová úprava, barvení, vyztužení atd.) daných dílů.



## 4 Metody RP

### 4.1 Dělení metod RP

Metod RP je v současné době velké množství, takže je spousta možností, jak daný díl zhotovit. Dělit metody můžeme podle použitých materiálů, podle způsobu výroby dílů apod.

#### Dělení metod [3]:

##### 1) podle použitého materiálu:

- tekuté materiály: Stereo Lithography (SLA), Digital Light Projection (DLP)
- práškové materiály: Selective Laser Sintering (SLS), ProMetal 3D Printing, Direct Laser Forming (DLF)
- tryskové spojování: Multiphase Jet Solidification (MJS)
- tryskové tištění: Fused Deposition Modeling (FDM), Ballistic Particle Manufacturing (BPM), Multi-Jet Modeling (MJM)
- polymerní materiály: Solid Ground Curing (SGC)
- papírové materiály: Laminated Object Manufacture (LOM)

##### 2) podle výrobního postupu:

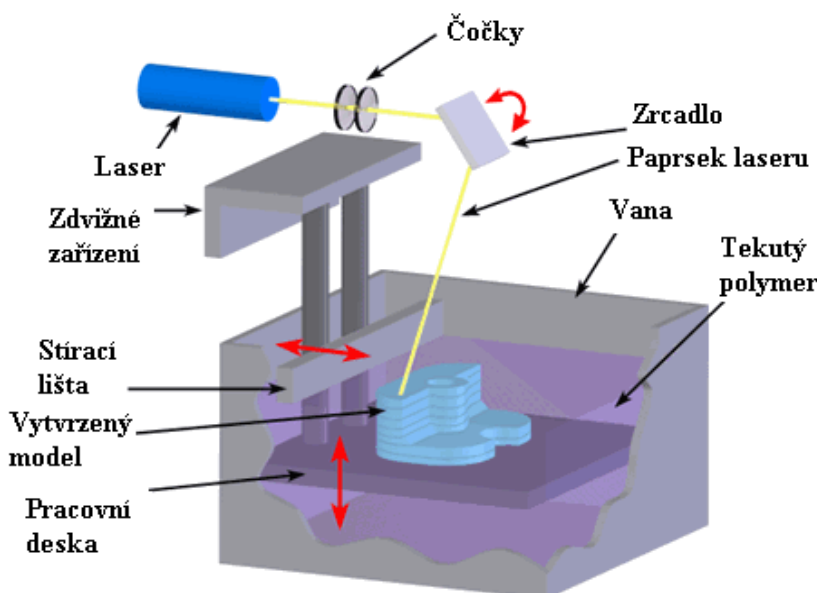
- systém přidávání vrstev při použití laseru s vytvrzováním bod po bodu
- systém přidávání vrstev při použití laseru s vytvrzováním po vrstvách
- systém přidávání vrstev bez použití laseru s vytvrzováním bod po bodu
- systém přidávání vrstev bez použití laseru s vytvrzováním po vrstvách

### 4.2 Přehled nepoužívanějších technologií RP

#### 4.2.1 Stereolitografie (SLA)

Stereolitografie (SLA) [3] je nejstarší z technologií RP. Byla vyvinuta v roce 1986 společností 3D Systems. Stereolitografie je založena na principu (obr. 4) postupného vytvrzování fotopolymery (hmoty citlivé na světlo) pomocí UV laseru, který je na základě dat přicházejících z počítače zaměřován složitou optickou soustavou na hladinu fotopolymery. Skenovací hlava vyzařující laserový paprsek je

vedena počítačem po osách XY v místech modelu v dané vrstvě nad horní plochou nádoby s polymerem. Model je vytvářen na nosné desce, která se na začátku procesu nachází přímo pod hladinou fotopolymeru, přesněji o tloušťku jedné vrstvy. Po vytvrzení (tj. po osvětlení) jedné vrstvy se nosná deska ponoří o tloušťku vrstvy hlouběji do lázně a začne se vytvářet další vrstva. Opakováním děje pak vzniká celý model. Aby se vyrovnaly nepřesnosti vzniklé nanášením fotopolymeru, je nutné před osvitom každé vrstvy přejet hladinu tzv. stěračem. Tato metoda vyniká především svou přesností. Nevýhodou technologie je poměrně pomalý proces vytvrzování fotopolymeru a u některých materiálů také nižší odolnost modelu oproti vyšším teplotám.

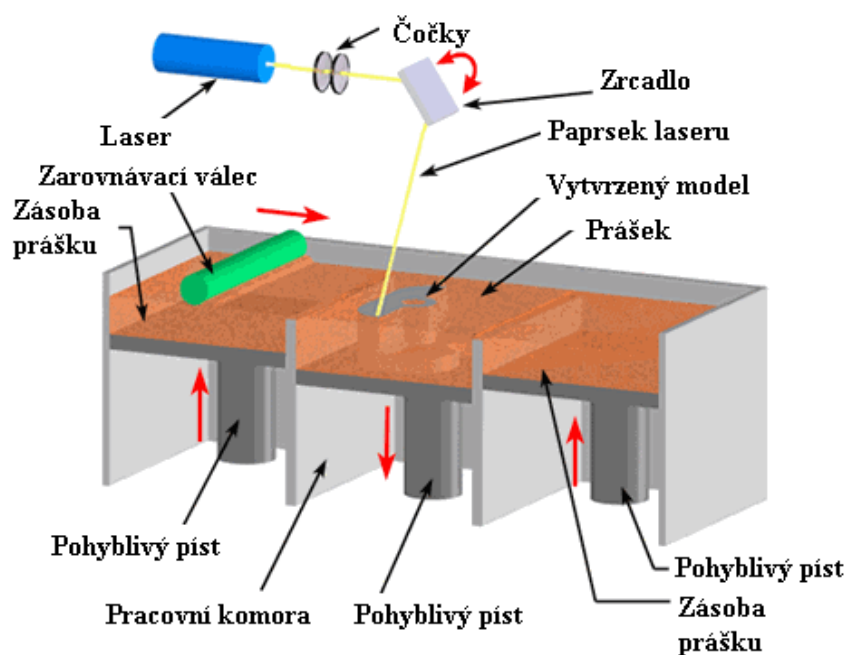


Obr. 4: Princip metody Stereografie – převzato z [4]

#### 4.2.2 Selective Laser Sintering (SLS)

Metoda selektivního zpevňování [3] byla vyvinuta na Texaské univerzitě v Austinu Carlem Deckardem a vychází z metody stereografie (SLA). Na rozdíl od stereografie, kde je stavebním materiálem fotopolymer, který je vytvrzován UV laserem, se používá u metody SLS jako stavební materiál práškový materiál. Ten můžeme použít téměř kterýkoliv, který se působením tepla taví a poté opět ztuhne. Jinak postup je velice podobný jako u stereografie (SLA). Vrstvy prášku jsou nanášeny a zarovnávány zarovnávacím válcem, kdy po každém nanesení je daná vrstva na

vybraných místech zpevněna a proces se opakuje. Materiál, který nebyl zpevněn, slouží jako podpůrný materiál. Možností, jak zpevňovat materiál je více. Nejčastěji, jak název napovídá, je zpevňování realizováno pomocí laseru, ale používají se i různá pojiva apod. Laser se využívá především pro zpevňování plastů, mosazi, hliníku či nerezové oceli. U hliníku i jiných materiálů je potřeba ochranné atmosféry. Pomocí pojiva můžeme zpevňovat např. keramický prášek. Výhodou této metody je možnost použití široké škály materiálů a stavba modelů bez nutnosti tvorby podpor. Princip metody lze vidět na obr. 5.

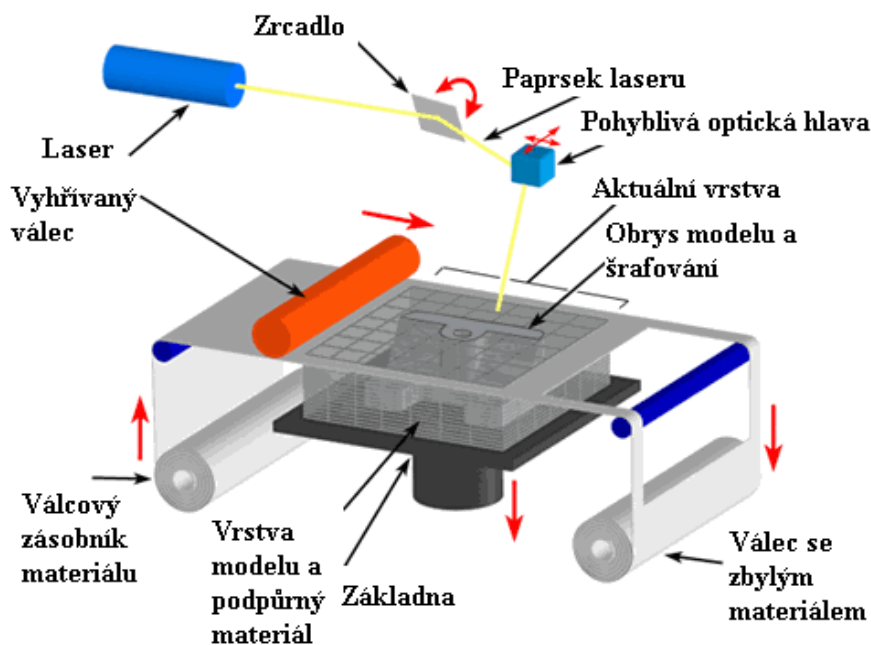


Obr. 5: Princip metody SLS – převzato z [4]

### 4.2.3 Laminated Object Manufacture (LOM)

Tato technologie [4], oproti předešlým technologiím, pracuje na odlišném principu (obr. 6). Byla vyvinuta v roce 1988 americkou firmou Helix. Stavebním materiálem u této metody tisku jsou speciální plastové fólie (cca 0,15- 0,20 mm tenké) nebo speciální papír napuštěný zpevňující hmotou (čím tenčí, tím je model detailnější). Materiál je navinutý na rolích, ze kterých se odvíjí přes celou pracovní plochu, která se pohybuje ve svislém směru. Do části fólie, která se nachází nad pracovní deskou, se CO<sub>2</sub> laserem vyřízne obrys pro aktuální vrstvu a přebytečný materiál se rozřeže většinou na menší čtvercové díly, pro pozdější lepší odstranění. Po celý proces ale přebytečný materiál zůstává na pracovní desce a slouží jako

podpůrný materiál a k jeho odstranění dochází až po dokončení modelu. Nevýhodou je, že podpůrný materiál v dutinách zůstává a nelze zpětně odstranit. Po vyříznutí obrysu v dané vrstvě je na povrch rozprášeno lepidlo, pokud není součástí materiálu, a je natažena nová vrstva fólie a opět je vyříznut obrys nové vrstvy. Poté je vrstva přitlačena soustavou vyhřívaných válců a slepena s vrstvou předešlou. Tento děj se stále opakuje, než je model dokončen. Výsledný model má velice podobné vlastnosti jako model dřevěný. Tato technologie je řazena mezi levnější metody 3D tisku díky relativně nízké pořizovací ceně materiálu. Nevýhodou je velké množství odpadního materiálu, kterého je při optimálním využití 40-50 % v závislosti na velikosti modelu (čím menší objekt, tím větší odpad).

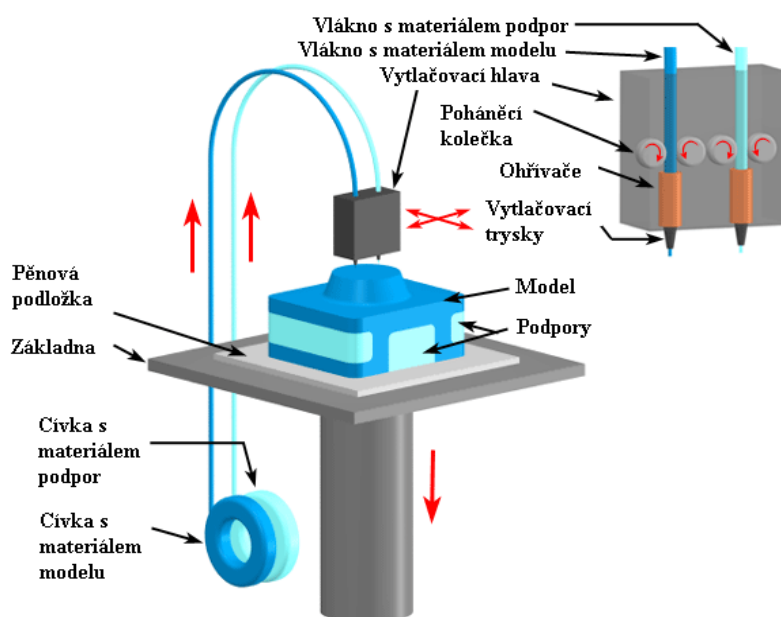


Obr. 6: Princip metody LOM – převzato z [4]

#### 4.2.4 Fused Deposition Modeling (FDM)

Tato metoda [5] je po stereografii a SLS metodě asi nejpoužívanější metodou. Byla patentována v roce 1992 společností Stratasys. Pracuje na zcela odlišném principu než předešlé metody, a to na principu (obr. 7) přímého nanášení materiálů z tiskové hlavy. Materiál je v hlavici ohříván (nejčastěji tavnou spirálou) na teplotu tavení a postupně vytlačován tryskou na pracovní plochu, kde při styku s povrchem vytvářeného modelu ztuhne a spojí se s již vytvořenou vrstvou. Tloušťku vrstev určuje průměr trysky. U této metody se často využívají podpěry, které jsou

vytlačovány stejným způsobem jako stavební materiál druhou tryskou, která obvykle doprovází trysku hlavní. Stavební materiál je nejčastěji dodáván navinut na cívce v podobě plastových drátů, ale také jako granulát nebo prášek. Nejčastějším způsobem pohybu u této technologie je horizontální pohyb trysky (XY). O vertikální pohyb se stará pracovní plocha, která po nanesení vrstvy poklesne níže vždy o tloušťku vrstvy. Tato technologie je považována za nejlevnější metodu 3D tisku především díky široké škále použitelných materiálů (ABS plast, vosk atd.) a proto se s ní můžeme setkat také ve veřejných projektech jako je například RepRap.



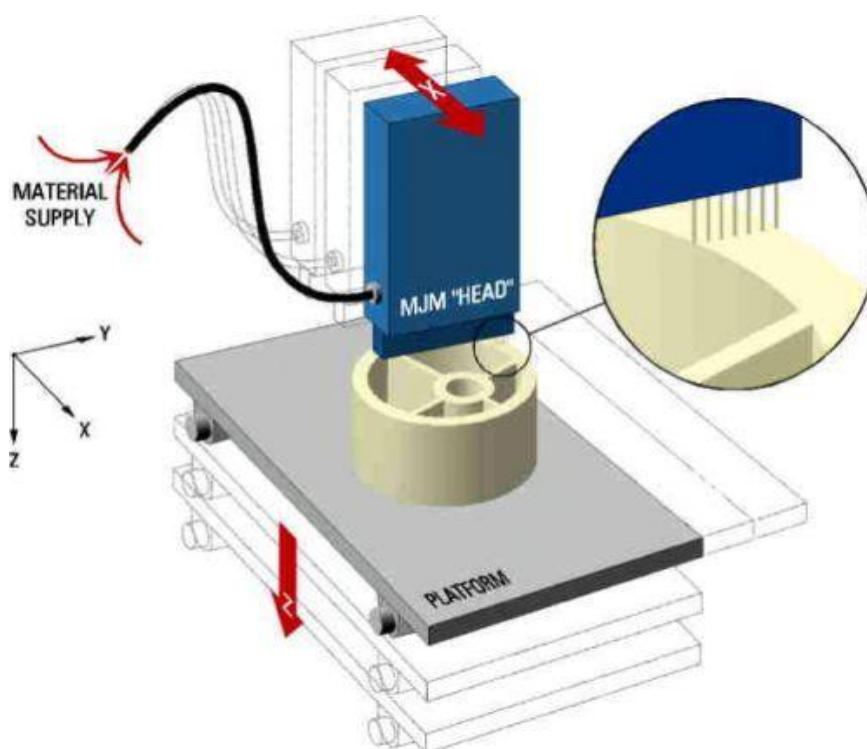
Obr. 7: Princip metody FDM – převzato z [4]

#### 4.2.5 Ballistic Particle Manufacturing (BPM)

Technologie Ballistic Particle Manufacturing [6] byla vyvinuta v roce 1987 Billem Mastersem, který o rok později založil firmu Perception Systems, která se věnovala dalšímu rozvoji technologie. Později se firma přejmenovala na BPM Technology. Technologie pracuje na principu podobném principu inkoustových tiskáren. Základem technologie je nástřik kapek termoplastu pomocí pracovní hlavy, které jsou nanášeny tlakem. Kapky jsou vystřelovány z pracovní hlavy a po kontaktu s ostatním materiálem se vytvrzují. Tímto způsobem je vytvořen celý model. Tisková hlava má 5 stupňů volnosti, což umožňuje vytvářet modely bez podpurné konstrukce.

## 4.2.6 Multi-Jet Modeling - MJM

Technologie Multi-Jet Modeling (obr. 8) [6] byla vyvinuta v roce 1994 firmou 3D Systems stejně jako stereografie. Tisk probíhá podobně jako u metody BPM pomocí termoplastu. Ten je postupně nanášen pomocí speciální tiskové pracovní hlavy, která má 96 trysek, uspořádaných rovnoběžně vedle sebe. Dávkování termoplastu je samostatně řízeno počítačem z každé trysky. Model je stavěn opět na pracovní desce pohybující se jen v horizontálním směru. Je-li součást širší než pracovní hlava, posouvá se ve směru osy tak, aby se vytvořila celá součást. Velký počet trysek zaručuje rychlé a rovnoměrné nanášení materiálu. Nanášený termoplastický materiál ztuhne při styku s už naneseným materiálem téměř okamžitě.

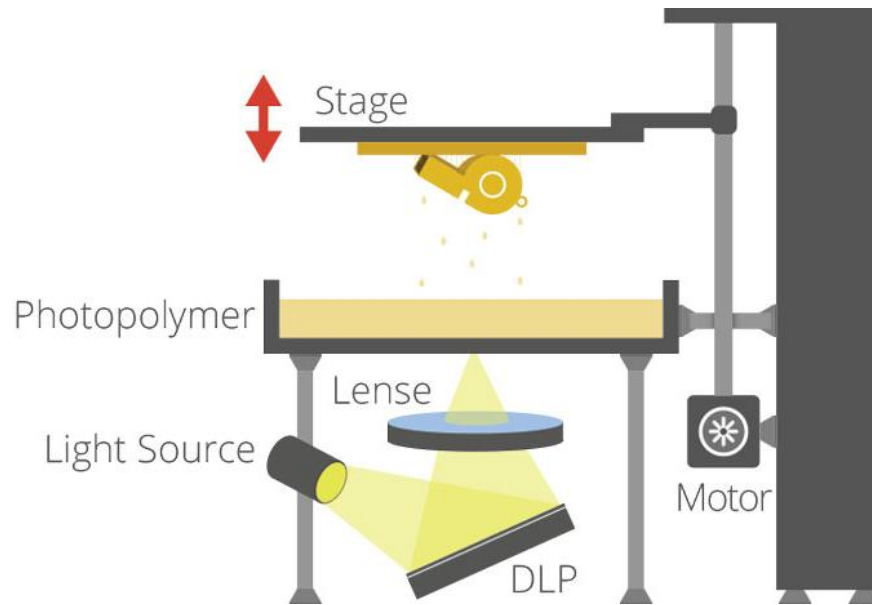


Obr. 8: Popis metody MJM – převzato z [5]

## 4.2.7 Digital Light Processing - DLP

V současné době nejnovější technologie Digital Light Processing (obr. 9) byla vyvinuta německou firmou InvisionTEC. Technologie pracuje podobně jako stereografie s tekutým materiálem – fotopolymerem, který je, na rozdíl od

stereografie, v jednotlivých vrstvách nasvícen plošně. Děj se opět opakuje do té doby, než je model vytvořen. Technologie pracuje pouze s jedním materiálem a podpory jsou tisknuty zároveň s modelem. Ty jsou po dokončení mechanicky odstraněny. Výhodou technologie je bezesporu její rychlost a tvorba kvalitních rovných ploch.



Obr. 9: Popis metody DLP – převzato z [www.aniwaa.com](http://www.aniwaa.com)

## 5 Průmyslové roboty

V současné době jedno z nejvíce aktivních témat v průmyslu jsou bezesporu průmyslové roboty. Počátky zavedení prvních průmyslových robotů do výroby sahají až do roku 1961, kdy byl zprovozněn první prototypový průmyslový robot firmy Unimate na výrobní lince General Motors v New Jersey (obr. 10). Od té doby byly roboty zaváděny čím dál více až do současnosti, kdy jsou nedílnou součástí všech velkých i malých firem.



Obr. 10: První průmyslový robot firmy Unimate – převzato z [www.robotics.org](http://www.robotics.org)

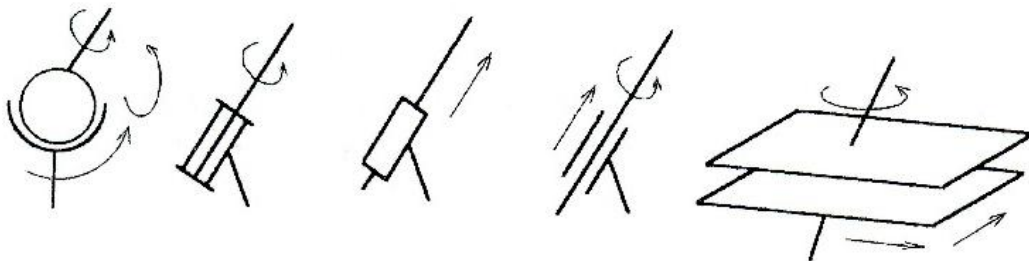
Definice průmyslového robota by se dala zformulovat různě, nejlépe ji však vystihl prof. P. N. Beljanina [7]:

*"Průmyslový robot je autonomně fungující stroj-automat, který je určen k reprodukci některých pohybových a duševních funkcí člověka při provádění pomocných a základních výrobních operací bez bezprostřední účasti člověka a který je k tomuto účelu vybaven některými jeho schopnostmi (sluchem, zrakem, hmatem, pamětí a podobně), schopností samovýuky, samoorganizace a adaptace, t.j. přizpůsobivosti k danému prostředí".*



## 5.1 Mechanismy

Zařízení, které je složeno z více vzájemně pohybujících těles, neboli kinematického řetězce, a které má jedno vůči ostatním nepohybující se těleso (rám), nazýváme mechanismem [8], [9]. Jeho úkolem je transformace pohybu a přenosu sil nebo vedení bodů a těles po dráze daných vlastností. Dvě navzájem se pohybující tělesa kinematického mechanismu tvoří tzv. kinematickou dvojici, jejíž pohyb je omezen vazbou těles. Podle druhu vazby nazýváme kinematické dvojice: sférické, rotační, posuvné, válcové, ploché (obr. 11).



Obr. 11: Druhy kinematických – převzato z [8]

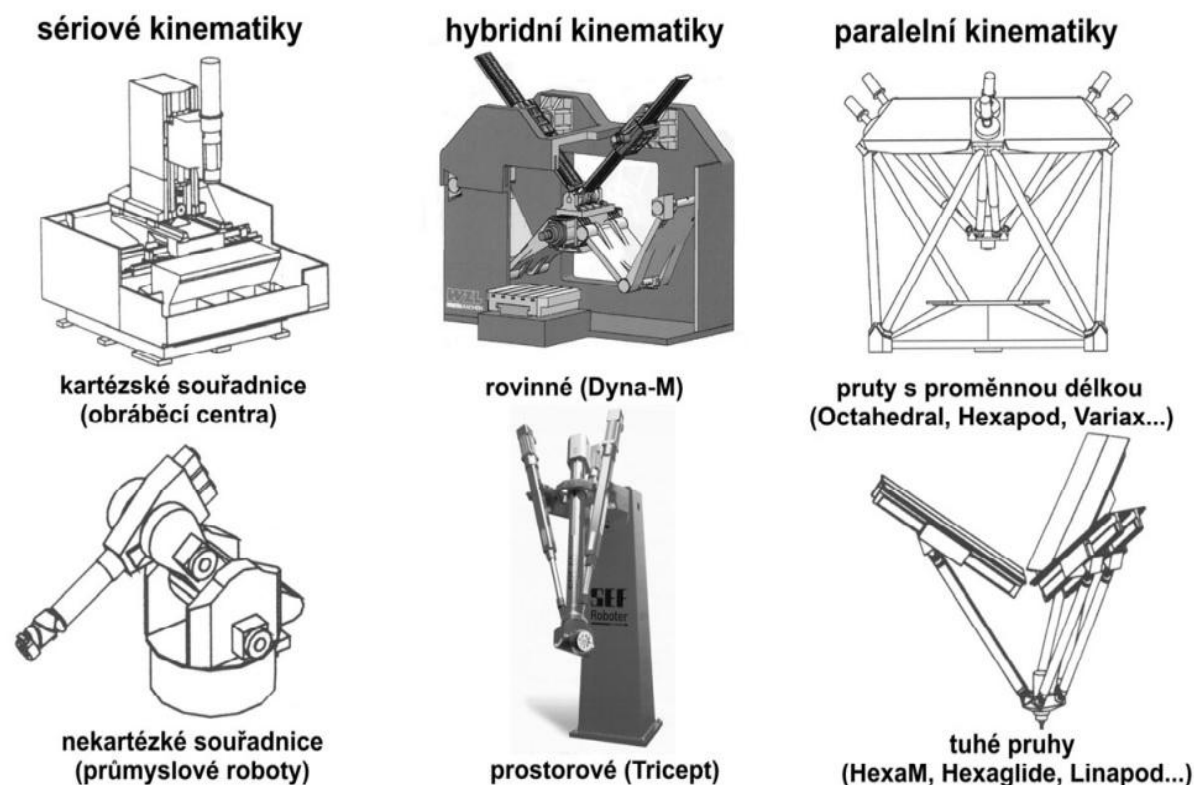
Kinematické mechanismy můžeme rozdělit na dvě skupiny a to mechanismy s otevřenou kinematickou smyčkou, kdy některé členy jsou připevněny pouze jednou kinematickou dvojicí a mechanismy s uzavřenou kinematickou smyčkou, kdy každý z členů je připevněn dvěma kinematickými dvojicemi.

## 5.2 Rozdělení průmyslových robotů podle kinematiky

Průmyslové roboty [10] lze rozdělit podle tvaru a velikosti jejich pracovního prostoru, který je definován kinematikou daného robota, tedy kombinací rotačních a posuvových os v kartézských a cylindrických souřadnicích. Podle tohoto kritéria rozlišujeme roboty se sériovou, hybridní nebo paralelní kinematikou (obr. 12).

Sériová kinematika je charakteristická pro mechanismy s otevřenou kinematickou smyčkou. Robot v tomto případě používá kinematické dvojice vždy o jednom stupni volnosti (tedy KD translační nebo rotační), které se mohou otáčet nebo posouvat nezávisle na sobě. Prvky tohoto mechanismu jsou tedy postupně spojeny za sebou. Výsledný pohyb je dán pohybem všech předešlých a do série řazených dvojic.

Paralelní kinematika je charakteristická pro mechanismy s uzavřenou kinematickou smyčkou. Jednotlivé pohony jsou tedy řazeny paralelně a výsledný pohyb vzniká spojením pohybů jednotlivých pohonů. Paralelní kinematiku lze ještě rozlišovat podle konstrukce prutů. Paralelní kinematika s proměnnou délkou prutů (Hexapod atd.) má platformu s 6 stupni volnosti, zatímco s pruty s konstantní délkou (Linapod atd.) jen se 3 stupni volnosti.



Obr. 12: Rozdělení obráběcích strojů a robotů podle kinematiky – převzato z [10]

V průmyslu se zatím používají častěji zařízení se sériovou kinematikou, kinematika paralelní či hybridní se využívá méně. Nejúspěšnější komerční nesériovou kinematiku používají roboty s koncepcí Tricept, které mají 6 stupňů volnosti. Kinematika vychází z kinematiky koncepce Tripod (tři pruty s proměnnou délkou) doplněný kloubovou hlavou. Nejvíce používaným robotem s paralelní kinematikou pro velmi rychlou manipulaci menších dílů jsou pak roboty s kinematikou delta, které jsou popsány v kapitole 5.3. Návrh, konstrukce a realizace robotu s touto kinematikou je také jeden z cílů této bakalářské práce.

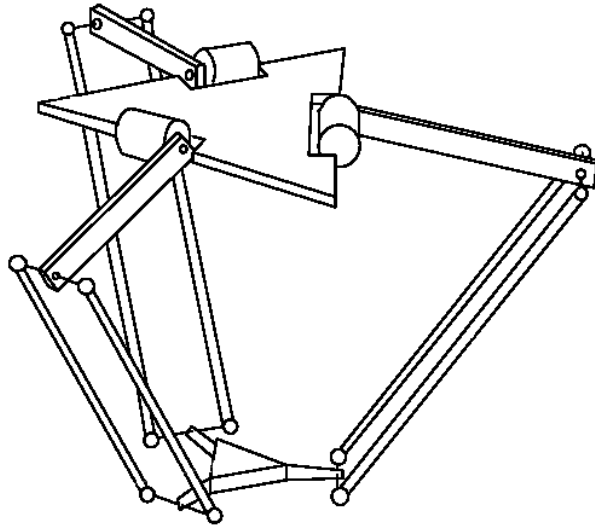
V tabulce 1 je provedeno porovnání sériové a paralelní kinematiky podle různých kritérií.

Vlastnosti	Paralelní kinematika	Sériová kinematika
Tuhost	Vysoká (jen tah/tlak, vzpěr)	Nízká (ohyb, krut)
Hmotnost pohybujících se součástí	Nízká (pohybují se jen ramena a platforma)	Vysoká (první člen je namáhán vždy členy následujícími)
Řízení	Složité (mechanismus musí být regulován jako celek)	Jednoduché (každá osa se řídí jednotlivě)
Kalibrace	Komplikovaná	Jednoduchá

Tab. 1: Porovnání paralelní a sériové kinematiky [9]

### 5.3 Delta roboty

První prototyp delta-robotu byl představen v roce 1988 Reymondem Clavelem ze Švýcarského národního technologického institutu v Lausanne EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne). Mechanismus měl tzv. trojúhelníkovou kinematickou strukturu (obr. 13). Postupem času bylo zveřejněno několik dalších modifikací této struktury, avšak původní koncepce nebyla překonána a delta roboty [11] dnes patří mezi nejpoužívanější stroje s paralelní kinematikou, především pro svoji rychlost. Pohyblivá platforma i pevný rám delta robotů mají tvar rovnostranného trojúhelníku a jsou vzájemně propojeny třemi vodícími řetězci. Každý z řetězců je tvořen ramenem a dvěma vzpěrami umístěnými do paralelogramu, díky nimž mají delta roboty pouze 3 stupně volnosti (translační osy x, y, z). Natočení platformy zůstává konstantní. Rameno vůči nepohyblivému rámu koná pouze rotační pohyb, má tedy pouze jeden stupeň volnosti. Vzpěry jsou spojeny s ramenem na jedné straně a s pohyblivou platformou na straně druhé pomocí kulových kloubů se třemi stupni volnosti.



Obr. 13: Paralelní kinematika delta robotu – převzato z [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com)

V současné době jedním z dominujících robotů v kategorii delta robotů je manipulátor IRB 360FlexPicker firmy ABB (obr. 14). Používá se především v balicích a montážních linkách a vyniká svojí rychlostí. Pravděpodobně je to jeden z nejrychlejších průmyslových manipulátorů na světě. Vyrábí se ve více variantách podle velikosti pracovního prostoru a zatížení, se kterým je schopen pracovat.



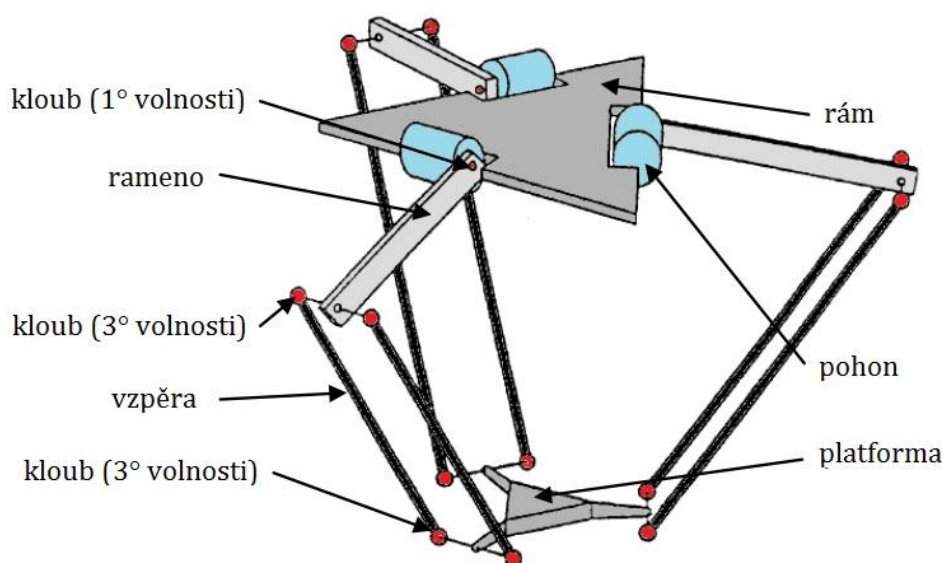
Obr. 14: Manipulátor IRB FlexPicker od firmy ABB – převzato z [www.abb.com](http://www.abb.com)

## 6 Praktická část

V této části práce je popis návrhu a stavby mechanismu typu delta realizovaného pomocí 3D tisku. Při realizaci bylo využito výhody RP, kdy bylo vytisknuto více variant jednotlivých dílů s cílem nalézt nejvhodnější řešení daného problému. Také konstrukčně byly díly navrhovány s ohledem na technologii, kterou byly vytvořeny. Výpočtová část byla tvořena v programu MATLAB a veškeré programy jsou na přiloženém CD.

### 6.1 Kinematický návrh mechanismu typu delta

Popis kinematiky mechanismu typu delta byl již popsán v kapitole 5.3. Jedná se o paralelní kinematiku. Delta robot (obr. 15) je poháněn třemi motory, které jsou umístěny pevně na rámu. Vůči sobě jsou natočené o  $120^\circ$  a podílejí se společně na polohování platformy. Motory otáčejí ramena, která jsou spojena s platformou pomocí šesti vzpěr, umístěných po dvou do paralelogramu (rameno = dvě vzpěry). Výsledkem je konstantní natočení platformy, která tak má pouze 3 stupně volnosti (translační pohyb  $x, y, z$ ). Pro naše účely bylo zapotřebí vyřešit inverzní kinematiku mechanismu typu delta, tedy známými souřadnicemi byly souřadnice platformy v zadaném pracovním prostoru, neznámé pak souřadnice natočení jednotlivých motorů.



Obr. 15: Popis delta robotu – převzato z [11]

### 6.1.1 Stupně volnosti

Počet stupňů volnosti delta robotu určíme na základě počtu těles a počtu jednotlivých vazeb mezi tělesy ze vzorce [12]:

$$i = 6(n - 1) - \sum_{j=1}^5 jd_j = 6(11 - 1) - 5 \cdot 3_{\text{rotační}} - 3 \cdot 12_{\text{sférická}} = 9^\circ$$

$i$  – počet stupňů volnosti soustavy

$n$  – počet jejích členů (včetně rámu)

$d_j$  – počet kinematických dvojic  $j$ -té třídy

V soustavě se ale vyskytují tělesa, která mohou konat pohyby, které neovlivňují pohyblivost celé soustavy a které je potřeba vyloučit z výpočtu. Tyto pohyby nazýváme tzv. parazitními pohyby a v řešeném mechanismu jsou to rotace vzpěr kolem svých os. Skutečné stupně volnosti delta robotu tedy budou:

$$i = 9^\circ - 6^\circ = 3^\circ$$

### 6.1.2 Inverzní kinematika

Pro vyšetření inverzní kinematiky u daného mechanismu (obr. 16) byla použita maticová metoda a metoda vyjmutí těles [8]. Maticová metoda spočívá v transformacích souřadnicových systémů těles a základním souřadnicovým systémem pevně spojeným s rámem. To je provedeno roznásobením příslušných transformačních matic  $\mathbf{T}$  a vektorem  $\mathbf{r}$ , určující souřadnice hledaného bodu v daném souřadnicovém systému tělesa. Výsledkem je pak radiusvektor. Každý pohyb v prostoru lze složit z šesti základních pohybů – posuvů ve směru os  $x$ ,  $y$ ,  $z$  a rotací kolem os  $x$ ,  $y$  nebo  $z$ . Pro tyto základní pohyby jsou zavedeny tzv. základní transformační matice:

$$\mathbf{T}_x(x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{T}_y(y) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{T}_z(z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T}_{\varphi_x}(\varphi_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi_x & -\sin\varphi_x & 0 \\ 0 & \sin\varphi_x & \cos\varphi_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{T}_{\varphi_y}(\varphi_y) = \begin{bmatrix} \cos\varphi_y & 0 & \sin\varphi_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\varphi_y & 0 & \cos\varphi_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T}_{\varphi_z}(\varphi_z) = \begin{bmatrix} \cos\varphi_z & -\sin\varphi_z & 0 & 0 \\ \sin\varphi_z & \cos\varphi_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Pro řešenou inverzní kinematiku bude platit:

*Závislé souřadnice:*       $\mathbf{z} = [\varphi_2, \varphi_3, \varphi_4]^T$

*Nezávislé souřadnice:*       $\mathbf{q} = [x_{11}, y_{11}, z_{11}]^T$

Pro řešení byla použita metoda vyjmutí těles, která spočívá ve vyjmutí těles známého rozměru mezi dvěma sférickými vazbami, díky čemuž vznikne stejný počet vazbových rovnic jako vyjmutých těles. Vazbové rovnice jsou popsány jako rozdíl délek dvou radiusvektorů koncových bodů vyjmutého tělesa rovnající se vzdálenosti bodů. V tomto případě stačí vyjmout pouze tři tělesa, jelikož se jedná o paralelogram a lze nahradit dvě vzpěry na jednom pohyblivém rameni vzpěrou jednou. Poté lze sestavit tři vazbové rovnice  $f_1$ ,  $f_2$  a  $f_3$ .

*Těleso 5:*       $|AB| = l$

$$|\mathbf{r}_{1A} - \mathbf{r}_{1B}| = l$$

$$\mathbf{r}_{1A} = \mathbf{T}_{12} \cdot \mathbf{r}_{2A} = \mathbf{T}_x(b) \cdot \mathbf{T}_{\varphi_y}(\varphi_2) \cdot \begin{bmatrix} r \\ a \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{r}_{1B} = \mathbf{T}_{111} \cdot \mathbf{r}_{11B} = \mathbf{T}_x(x_{11}) \cdot \mathbf{T}_y(y_{11}) \cdot \mathbf{T}_z(z_{11}) \cdot \mathbf{T}_{\varphi_z}(\beta_1) \cdot \begin{bmatrix} c \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\boxed{f_1 = l^2 - (x_A - x_B)^2 - (y_A - y_B)^2 - (z_A - z_B)^2 = 0}$$

Těleso 7:  $|EF| = l$

$$|\mathbf{r}_{1E} - \mathbf{r}_{1F}| = l$$

$$\mathbf{r}_{1E} = \mathbf{T}_{13} \cdot \mathbf{r}_{3E} = \mathbf{T}_{\varphi_z(-\alpha_3)} \cdot \mathbf{T}_x(b) \cdot \mathbf{T}_{\varphi_y(\varphi_3)} \cdot \begin{bmatrix} r \\ a \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_E \\ y_E \\ z_E \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{r}_{1F} = \mathbf{T}_{111} \cdot \mathbf{r}_{11F} = \mathbf{T}_x(x_{11}) \cdot \mathbf{T}_y(y_{11}) \cdot \mathbf{T}_z(z_{11}) \cdot \mathbf{T}_{\varphi_z(-\beta_2)} \cdot \begin{bmatrix} c \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_F \\ y_F \\ z_F \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\boxed{f_2 = l^2 - (x_E - x_F)^2 - (y_E - y_F)^2 - (z_E - z_F)^2 = 0}$$

Těleso 9:  $|IJ| = l$

$$|\mathbf{r}_{1I} - \mathbf{r}_{1J}| = l$$

$$\mathbf{r}_{1I} = \mathbf{T}_{14} \cdot \mathbf{r}_{4I} = \mathbf{T}_{\varphi_z(\alpha_4)} \cdot \mathbf{T}_x(b) \cdot \mathbf{T}_{\varphi_y(\varphi_4)} \cdot \begin{bmatrix} r \\ a \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_I \\ y_I \\ z_I \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{r}_{1J} = \mathbf{T}_{111} \cdot \mathbf{r}_{11J} = \mathbf{T}_x(x_{11}) \cdot \mathbf{T}_y(y_{11}) \cdot \mathbf{T}_z(z_{11}) \cdot \mathbf{T}_{\varphi_z(-\beta_3)} \cdot \begin{bmatrix} c \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_J \\ y_J \\ z_J \\ 1 \end{bmatrix}$$

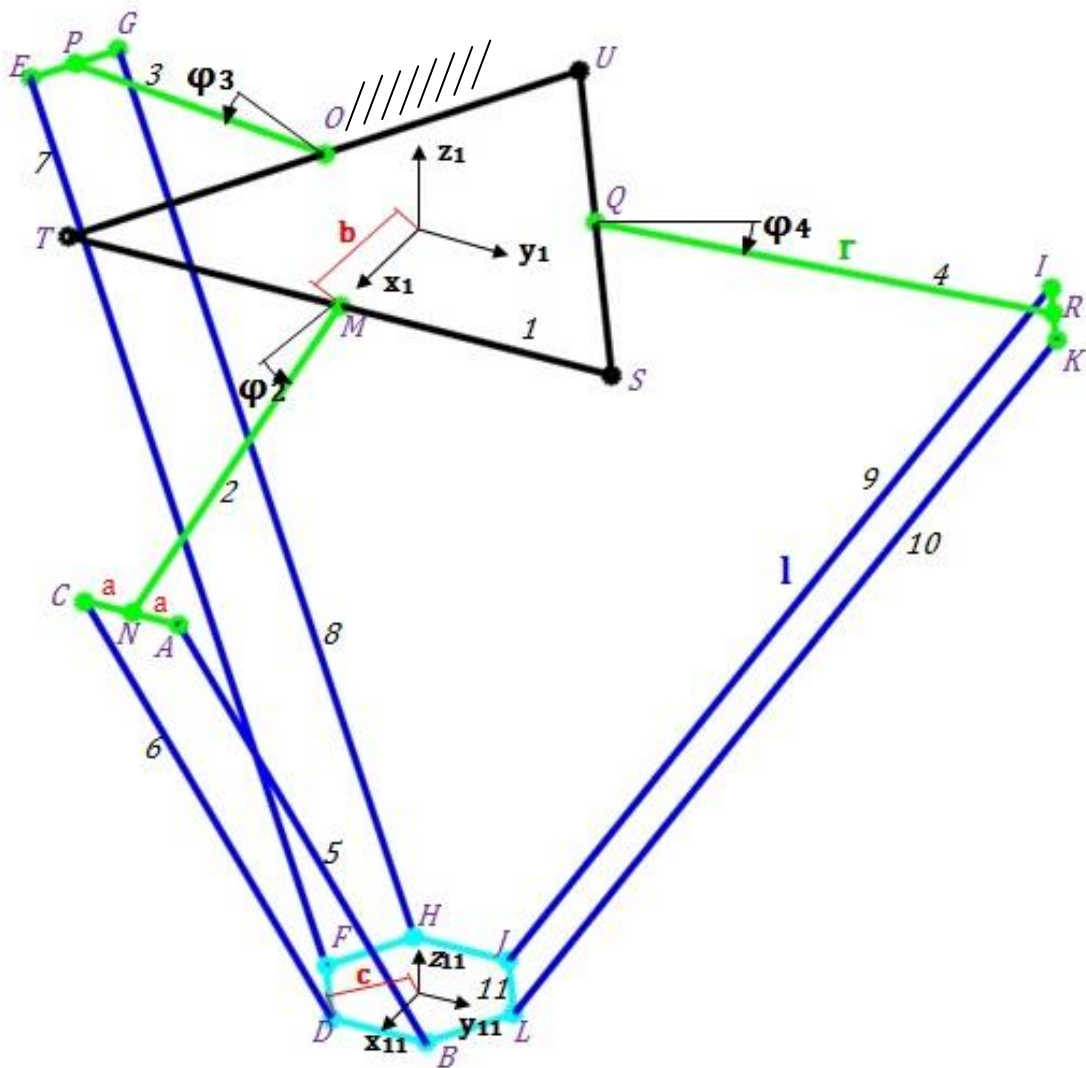
$$\boxed{f_3 = l^2 - (x_I - x_J)^2 - (y_I - y_J)^2 - (z_I - z_J)^2 = 0}$$

Po sestavení tří vazebních rovnic můžeme sestavit Jacobiho matici  $\mathbf{J}$ , kterou budeme potřebovat pro jejich numerické řešení. Vyčíslená kompletní matice včetně dalších výpočtů je umístěna na příloženém CD.

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \varphi_2} & \frac{\partial f_1}{\partial \varphi_3} & \frac{\partial f_1}{\partial \varphi_4} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \varphi_2} & \frac{\partial f_2}{\partial \varphi_3} & \frac{\partial f_2}{\partial \varphi_4} \\ \frac{\partial f_3}{\partial \varphi_2} & \frac{\partial f_3}{\partial \varphi_3} & \frac{\partial f_3}{\partial \varphi_4} \end{bmatrix}$$



Následně s využitím vyčíslené Jacobiho matice  $\mathbf{J}$  a Newtonovy iterační metody lze pro zadané hodnoty  $x_{11}$ ,  $y_{11}$  a  $z_{11}$  získat příslušné hodnoty úhlů  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  a  $\varphi_4$ . Na přiloženém CD lze nalézt takto vypočtenou jednoduchou kruhovou trajektorii platformy.



Obr. 16: Schéma delta robotu

### 6.1.3 Simulace

Pro kontrolu a ověření funkčnosti výpočtu z předchozí kapitoly byla naprogramována simulace řešené kinematiky delta robotu. Nedefinovaným rozměrovým proměnným z předchozí kapitoly byly přiřazeny velikosti následovně:

$$a = 0,2 \text{ m} \quad b = 0.08 \text{ m} \quad r = 0.1341 \text{ m} \quad l = 0.271 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \alpha_3 &= 120 \cdot \left(\frac{\pi}{180}\right) & \beta_1 &= 30 \cdot \left(\frac{\pi}{180}\right) \\ \alpha_4 &= 120 \cdot \left(\frac{\pi}{180}\right) & \beta_2 &= 90 \cdot \left(\frac{\pi}{180}\right) \\ c &= \frac{a}{\sin(\beta_1)} & \beta_3 &= 210 \cdot \left(\frac{\pi}{180}\right) \end{aligned}$$

Všechny zmíněné hodnoty jsou voleny. Hodnoty  $r$  a  $l$  jsou výsledkem optimalizace z kapitoly 6.2.

Hodnota  $a$  představuje polovinu vzdálenosti mezi dvojicí vzpěr (např. 5 a 6), hodnota  $b$  vzdálenost základního souřadnicového systému k ose pohonu. Hodnota  $r$  je délka ramen těles 2, 3, 4 a  $l$  délka vzpěr 5, 6, 7, 8, 9, 10. Hodnoty  $\alpha_3$  a  $\alpha_4$  popisují vzájemnou polohu pohonů vůči sobě. Pomocí úhlů  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  a délky  $c$  jsou popsány polohy sférických kloubů od souřadného systému platformy, tělesa 11.

Dále bylo potřeba vypočítat souřadnice jednotlivých bodů pro vykreslení celého mechanismu v simulaci. Souřadnice zbylých bodů, které nebyly získány v předešlých kapitolách, byly vypočteny opět pomocí maticové metody.

$$\text{Bod } M: \quad \mathbf{r}_{1M} = \mathbf{T}_x(b) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_M \\ y_M \\ z_M \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Bod } N: \quad \mathbf{r}_{1N} = \mathbf{T}_x(b) \cdot \mathbf{T}_{\varphi_y}(\varphi_2) \cdot \mathbf{T}_x(r) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_N \\ y_N \\ z_N \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Bod } C: \quad \mathbf{r}_{1C} = \mathbf{T}_x(b) \cdot \mathbf{T}_{\varphi_y}(\varphi_2) \cdot \begin{bmatrix} r \\ -a \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Bod } D: \quad \mathbf{r}_{1D} = \mathbf{T}_x(x_{11}) \cdot \mathbf{T}_y(y_{11}) \cdot \mathbf{T}_z(z_{11}) \cdot \mathbf{T}_{\varphi_z}(-\beta_1) \cdot \begin{bmatrix} c \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_D \\ y_D \\ z_D \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Bod } P: \quad \mathbf{r}_{1P} = \mathbf{T}_{\varphi_z}(-\alpha_3) \cdot \mathbf{T}_x(b) \cdot \mathbf{T}_{\varphi_y}(\varphi_3) \cdot \mathbf{T}_x(r) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Bod G: } \mathbf{r}_{1G} = \mathbf{T}_{\varphi_z}(-\alpha_3) \cdot \mathbf{T}_x(b) \cdot \mathbf{T}_{\varphi_y}(\varphi_3) \cdot \begin{bmatrix} r \\ -a \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Bod H: } \mathbf{r}_{1H} = \mathbf{T}_x(x_{11}) \cdot \mathbf{T}_y(y_{11}) \cdot \mathbf{T}_z(z_{11}) \cdot \mathbf{T}_{\varphi_z}(-\beta_2 - 2 \cdot \beta_1) \cdot \begin{bmatrix} c \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_H \\ y_H \\ z_H \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Bod O : } \mathbf{r}_{1O} = \mathbf{T}_{\varphi_z}(-\alpha_3) \cdot \mathbf{T}_x(b) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_O \\ y_O \\ z_O \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Bod Q : } \mathbf{r}_{1Q} = \mathbf{T}_{\varphi_z}(\alpha_4) \cdot \mathbf{T}_x(b) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_Q \\ y_Q \\ z_Q \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Bod K: } \mathbf{r}_{1K} = \mathbf{T}_{\varphi_z}(\alpha_4) \cdot \mathbf{T}_x(b) \cdot \mathbf{T}_{\varphi_y}(\varphi_4) \cdot \begin{bmatrix} r \\ -a \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_K \\ y_K \\ z_K \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Bod L: } \mathbf{r}_{1L} = \mathbf{T}_x(x_{11}) \cdot \mathbf{T}_y(y_{11}) \cdot \mathbf{T}_z(z_{11}) \cdot \mathbf{T}_{\varphi_z}(-\beta_3 - 2 \cdot \beta_1) \cdot \begin{bmatrix} c \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \\ 1 \end{bmatrix}$$

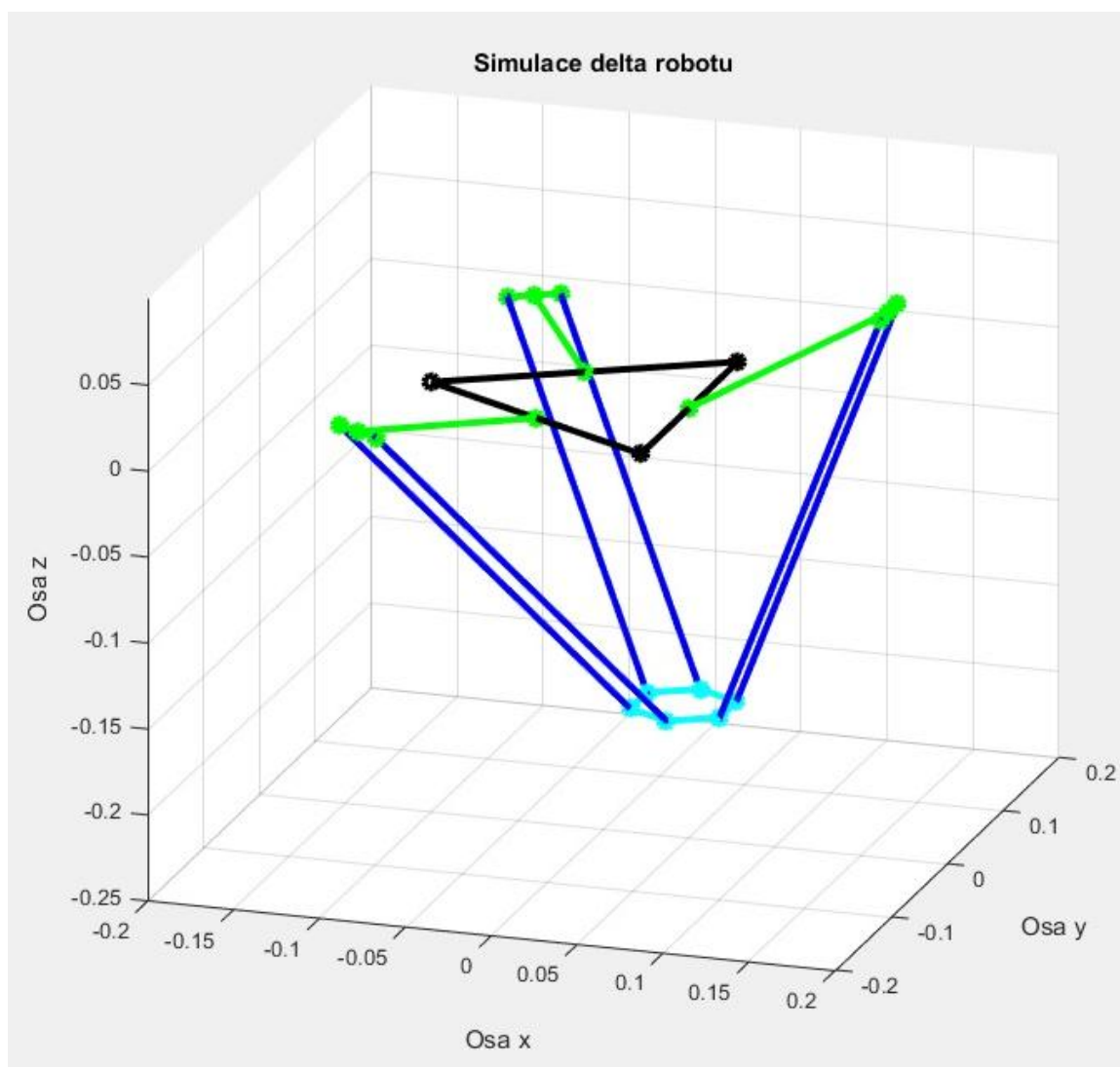
$$\text{Bod R: } \mathbf{r}_{1R} = \mathbf{T}_{\varphi_z}(\alpha_4) \cdot \mathbf{T}_x(b) \cdot \mathbf{T}_{\varphi_y}(\varphi_4) \cdot \mathbf{T}_x(r) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Bod S: } \mathbf{r}_{1S} = \mathbf{T}_{\varphi_z}\left(\frac{\alpha_4}{2}\right) \cdot \mathbf{T}_x(d) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Bod T: } \mathbf{r}_{1T} = \mathbf{T}_{\varphi_z}\left(-\frac{\alpha_4}{2}\right) \cdot \mathbf{T}_x(d) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Bod U: } \mathbf{r}_{1U} = \mathbf{T}_{\varphi_z}\left(\frac{3}{2} \cdot \alpha_4\right) \cdot \mathbf{T}_x(d) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_U \\ y_U \\ z_U \\ 1 \end{bmatrix}$$

Zdrojový kód simulace (obr. 17) je k dispozici na příloženém CD.



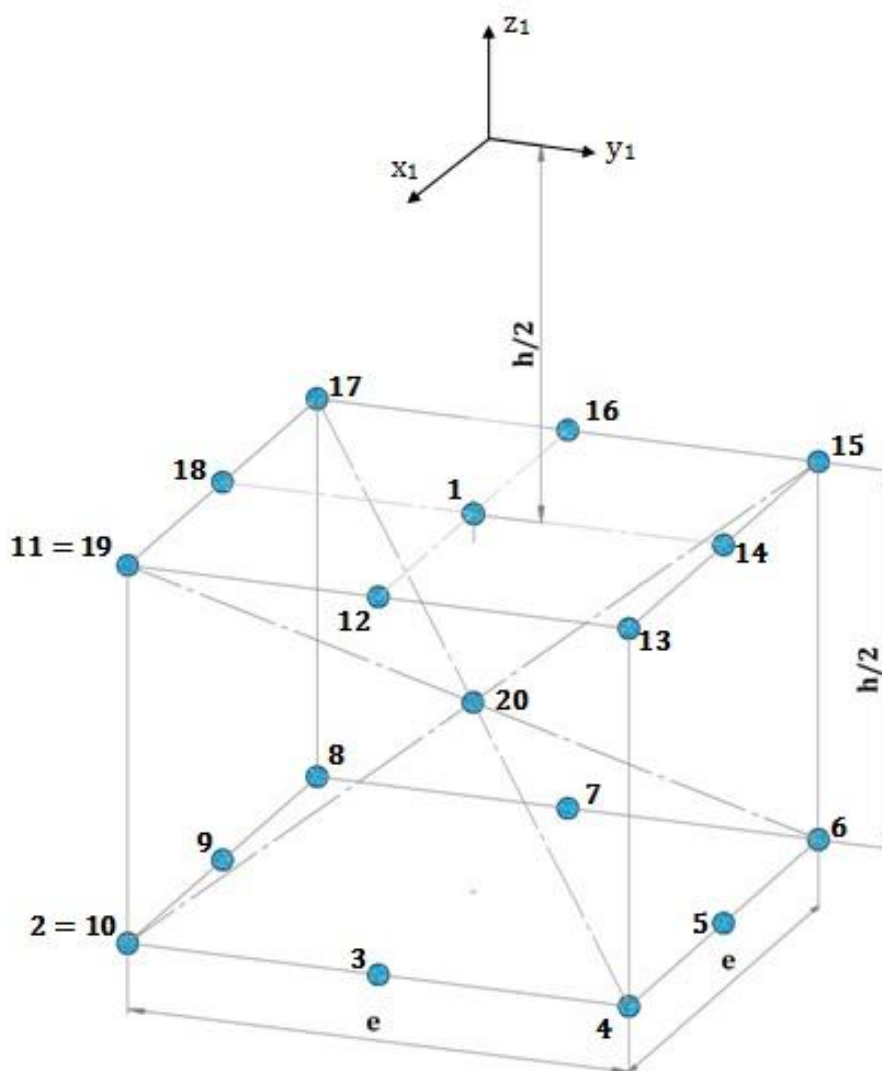
Obr. 17: Náhled simulace v programu MATLAB

## 6.2 Optimalizace mechanismu

Optimalizace řešeného robota byla nutná z důvodu omezeného rozsahu pohybů pohonů a také pro nalezení ideální kombinace délky ramen  $r$  a vzpěr  $l$  pro zadanou velikost pracovního prostoru 200x200x150mm. Pracovní prostor musí být dostupný pro pohyblivou platformu v celém rozsahu. Rozsah pohybů platformy delta robotu nejvíce ovlivňují velikosti ramen  $r$  a vzpěr  $l$ , a proto byly optimalizovány právě tyto rozměry.

Optimalizace byla provedena opět v programu MATLAB. Programy jsou dostupné na příloženém CD.

Obdélníkový pracovní prostor byl ohraničen body, které nám zaručí, že bude k optimalizaci využít kompletní pracovní prostor včetně krajních poloh (obr. 18).



Obr. 18: Schéma pracovního prostoru

Při optimalizaci byly zadány intervaly, ve kterých musí ležet navrhované rozměry  $r$  a  $l$ . Bylo navrženo přibližně 2180 různých kombinací, které byly později ohodnoceny podle kritéria (viz kapitolu 6.2.1.). Po vyhodnocení výsledků bylo nalezeno ideální řešení pro zadaný pracovní prostor daných rozměrů.

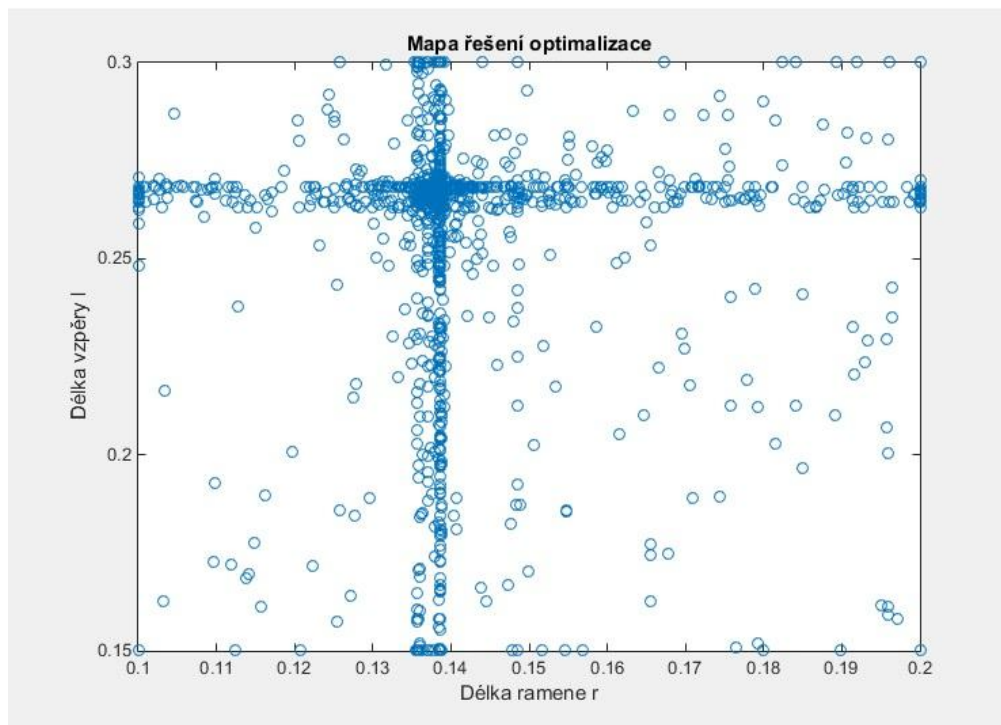
$r \in \langle 0.1; 0.2 \rangle \dots$  interval pro navrhované rozměry ramena  $r$

$l \in \langle 0.15; 0.3 \rangle \dots$  interval pro navrhované rozměry vzpěry  $l$

$e = 0.2 \text{ m}$ ,  $h = 0.3 \text{ m}$  ... rozměry zadaného pracovního prostoru

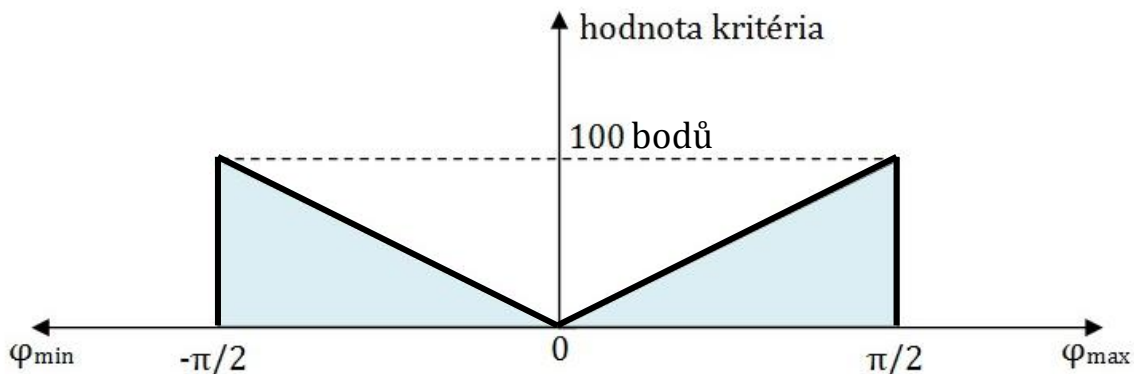
## 6.2.1 Kritéria optimalizace

Při výpočtu bylo navrženo přibližně 2180 různých variant (obr. 19) na základě kritérií.



Obr. 19: Mapa výsledků optimalizace

Maximální a minimální hodnoty natočení pohonů  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  a  $\varphi_4$  pro danou kombinaci  $r$  a  $l$  byly ohodnoceny podle kritéria (obr. 20) tak, aby bylo zabráněno citlivému chodu robotu (malé výchylky pohonu při velkých pohybech platformy) a zároveň byl využit celý rozsah pohybu pohonu ( $-\pi/2$  až  $\pi/2$ ). Dále záleželo na počtu dosažených bodů pracovního prostoru, což bylo také hodnoceno.



Obr. 20: Graf hodnocení kritéria

Ohodnocení dosažení polohy bodu pracovního prostoru bylo ohodnoceno +5 bodů za každý dosažený bod. Dosažených bodů pracovního prostoru mohlo být max. 20 a každý z úhlů  $\varphi_{2\max}$ ,  $\varphi_{2\min}$ ,  $\varphi_{3\max}$ ,  $\varphi_{3\min}$  a  $\varphi_{4\max}$ ,  $\varphi_{4\min}$  mohl být ohodnocen max. 100 body. Maximální hodnota kritéria je 700 bodů.

### 6.2.2 Výsledky optimalizace

Ohodnocením všech získaných řešení podle výše uvedeného kritéria byla získána ideální kombinace s hodnotou kritéria  $k$ , pro námi zvolenou velikost pracovního prostoru:

$$r = 0,1341 \text{ m}$$

$$l = 0,271 \text{ m}$$

$$\text{hodnota kritéria } k = 594,9 \text{ bodů}$$

Tato optimalizace je naprogramována s proměnnými hodnotami rozměrů velikosti pracovního prostoru. Je tedy možné vypočítat ideální kombinaci rozměrů  $r$  a  $l$  pro libovolně zadaný rozměr pracovního prostoru.

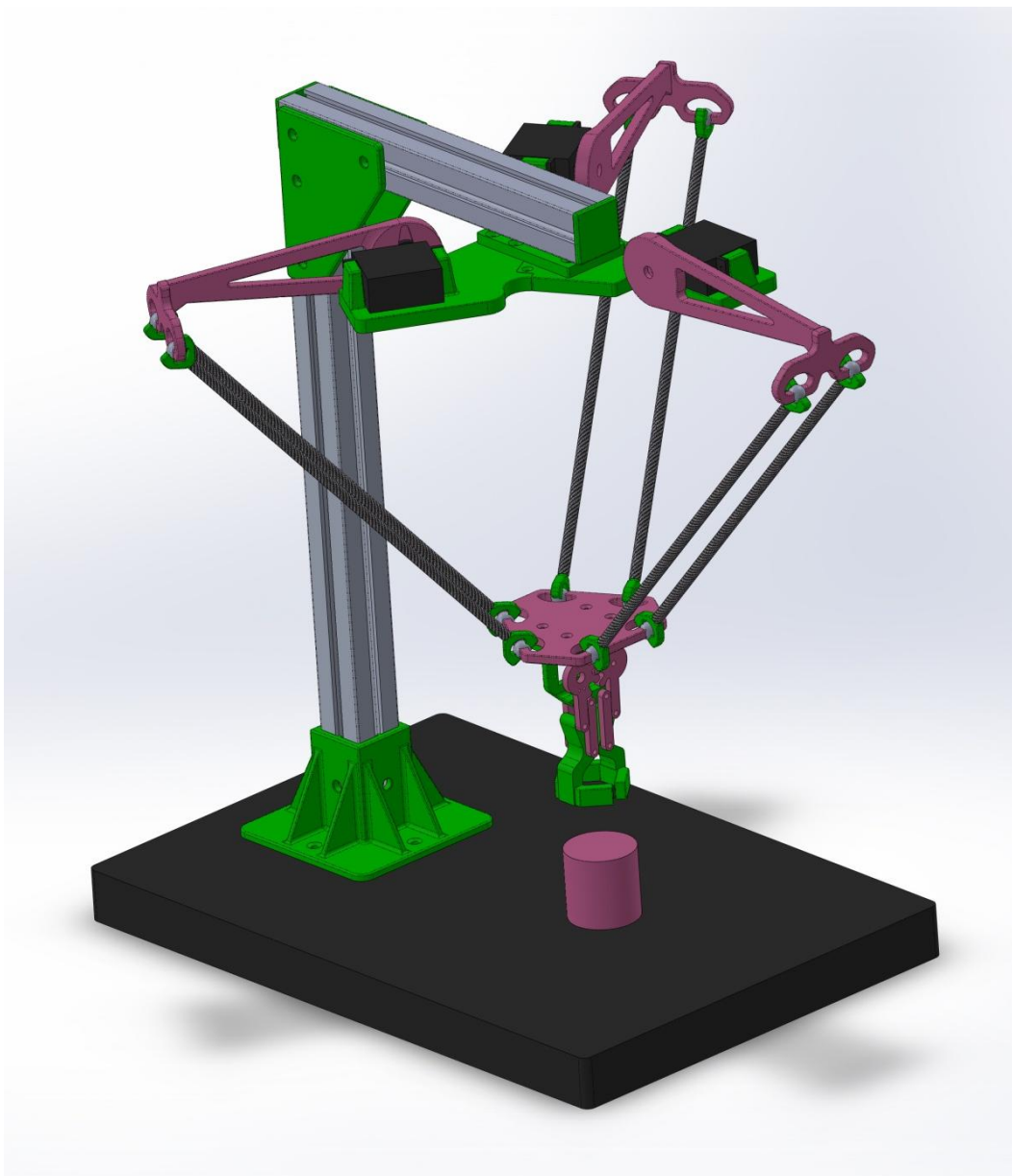
## 6.3 Realizace modelu

Na základě optimalizovaných a zvolených rozměrů v předešlých kapitolách byl vytvořen model delta robotu v programu SolidWorks (obr. 21). Jednotlivé díly jsou konstruovány tak, aby byly vhodné k realizaci pomocí RP.

Jelikož na modelu byla použita konstrukční řešení, u kterých nebyla předem známa správná funkčnost, bylo využito výhod 3D tisku (rychlost, přesnost, náklady na výrobu atd.). Jednotlivá problematická řešení byla vytisknuta, ověřena a bylo nalezeno nejvhodnější řešení daného problému. Pro názornou ukázkou lze na obr. 22 vidět postup návrhu sférického kloubu, který byl na modelu použit pro jeho jednoduchost a možnost realizace pomocí RP. Na pravé straně je finální podoba kloubu. U předešlých variant byl problém s udržením kuličky, velikostí, špatnými mechanickými vlastnostmi i nespokojenost se vzhledem.

Veškeré vymodelované díly i kompletní model sestavy jsou k dispozici ve finálních verzích na přiloženém CD.

Pracovní ruka (gripper) pohybující se na platformě byla převzata a upravena pro potřeby z veřejně dostupného modelu (<http://www.thingiverse.com/thing:2415>).



Obr. 21: 3D vizualizace delta robotu

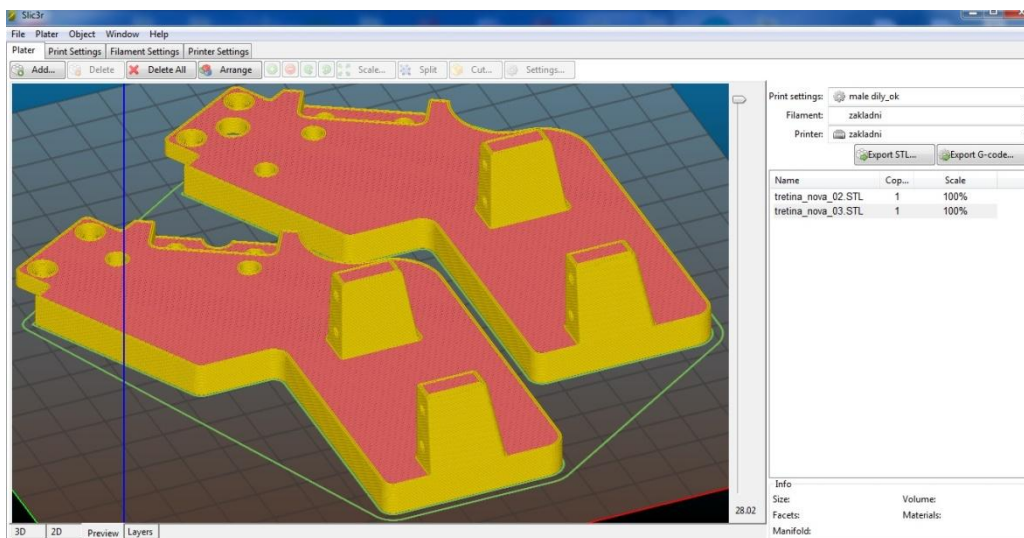


Obr. 22: Návrh sférického kloubu

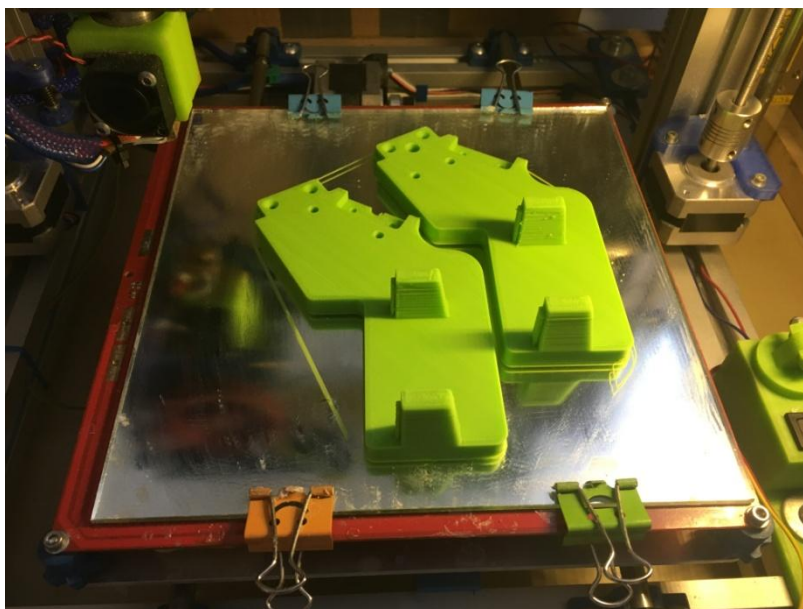


### 6.3.1 Tisk dílů

Všechny plastové díly byly vytisknuty technologií FDM na reparačnické tiskárně Rebelix X2 (obr. 2) z materiálu ABS<sup>4</sup>. G-cody<sup>5</sup> byly generovány v programu Slic3r, který po nahrání modelu vygeneruje veškeré dráhy tiskové hlavy během tisku daného modelu (obr. 23) a uloží jako zdrojový soubor pro následný tisk. Samotný tisk všech dílů trval přibližně 20 hodin. Ukázka tisku dílů rámu na obr. 24.



Obr. 23: Prostředí programu Slic3r



Obr. 24: Tisk dílů na tiskárně Rebelix X2

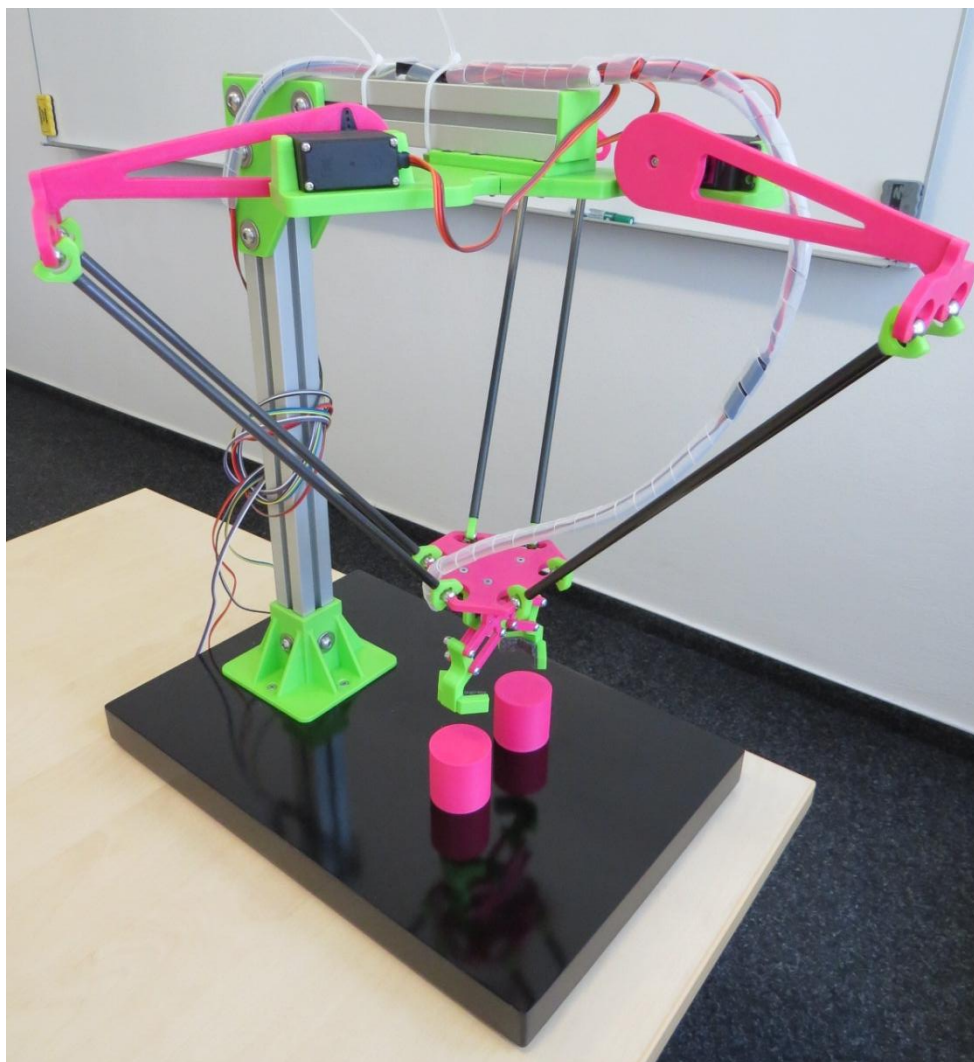
<sup>4</sup> ABS (Akrylonitrilbutadienstyren) je jeden z nejpoužívanějších materiálů v oblasti 3D tisku a také v průmyslu.

<sup>5</sup> G-code = zdrojový soubor dat pro tisk a také název programovacího jazyka, který se používá k řízení CNC a NC strojů.

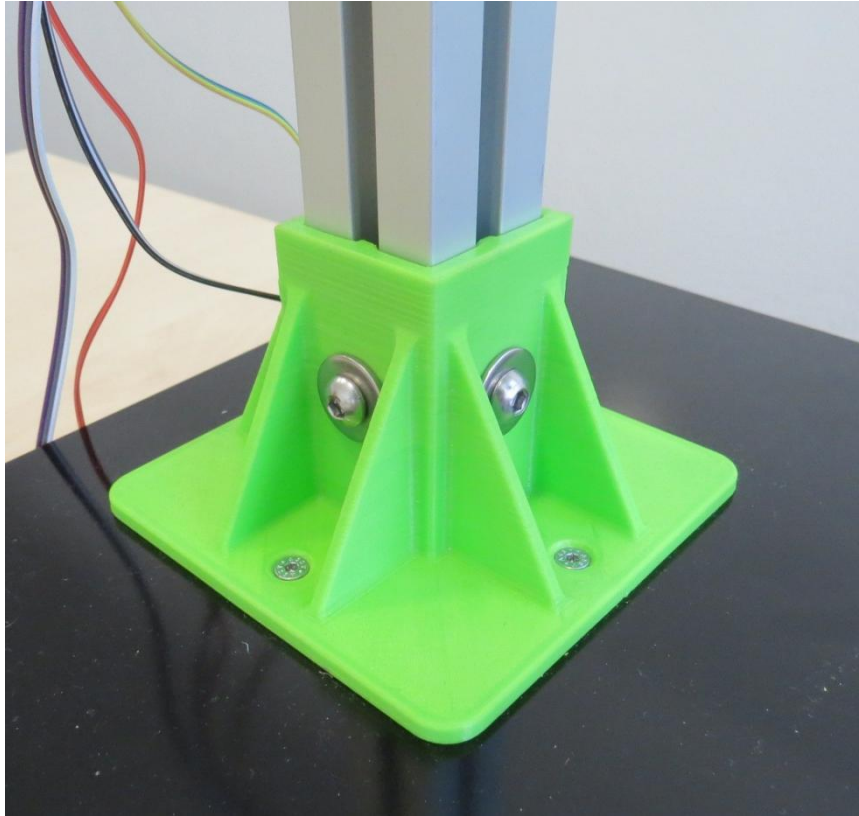
### 6.3.2 Stavba modelu

Po vytisknutí všech potřebných dílů byl model sestaven (obr. 25). Na nosnou konstrukci byly použity hliníkové profily 30x30 mm v délkách 231 mm a 390 mm uchycené pomocí vytisknuté patky k podstavci (obr. 26). Na vzpěry pak uhlíkové trubičky s vnějším průměrem 6 mm a vnitřním 4 mm v délce 247 mm, do kterých byly zalepeny vytisknuté konce. Do konců byly nacvaknuty 10 mm ocelové kuličky z ložiska. Kuliček na modelu je celkem 12 ks.

O pohyb modelu se starají tři klasická modelářská 5V serva typ PowerPro MG996R (obr. 27) o síle 12 kg/cm. Gripper (obr. 28) je ovládán modelářským mini servem typu Emax ES08MA o síle 2 kg/cm. Vše je řízeno pomocí Arduina MEGA 2560, naprogramovaném v prostředí MATLAB Simulink (obr. 29).



Obr. 25: Hotový model delta robotu



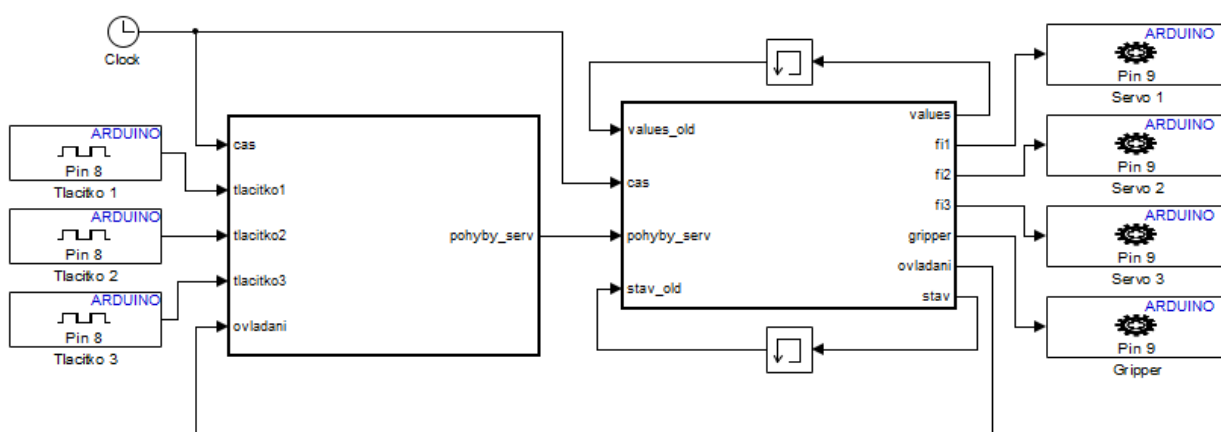
Obr. 26: Vytisknutá patka spojující podstavec a rám delta robotu



Obr. 27: Detail serva MG996R



Obr. 28: Detail sestaveného gripperu



Obr. 29: Zjednodušené schéma řízení v prostředí MATLAB Simulink

## 7 Závěr

Bakalářská práce je zaměřena na 3D prototyping mechanismů, přesněji na mechanismus typu delta. Všechny čtyři cíle z kapitoly 2 byly splněny.

V první části práce byly shrnuty informace o 3D tisku, v současnosti o jedné z často diskutovaných technologií v technickém světě. Byl popsán vývoj technologie od 80. let 20. století, kdy byla vyvinuta, až po současnost. Dále byly popsány jednotlivé metody 3D tisku včetně materiálů, které se u dané metody využívají a také její výhody či nevýhody.

Další část práce byla věnována průmyslovým robotům, které jsou v dnešní době nedílnou součástí menších i větších firem jak v České republice, tak ve světě. Bylo provedeno porovnání sériových a paralelních kinematik používaných u průmyslových robotů a podrobněji popsána paralelní kinematika typu delta, která byla použita u realizovaného modelu.

V praktické části byl proveden kinematický návrh mechanismu typu delta včetně numerického řešení. Byla vyšetřena inverzní kinematika potřebná k řízení delta robotu a provedena simulace.

Mechanismus byl optimalizován podle zvolených kritérií a byla stanovena ideální kombinace rozměrů jednotlivých těles tak, aby byly využity v plném rozsahu pohybů použité pohony a byl pokryt kompletní pracovní prostor delta robotu.

Následně byl delta robot vymodelován v programu SolidWorks, většina dílů vytisknuta na rerapové tiskárně Rebelix X2 a model sestaven. Dále byly nainstalovány pohony a řídicí elektronika, potřebná k řízení delta robotu a celý model oživen. Fyzický model bude využíván pro účely výuky.

## Literatura

- [1] SLOVÁK, Vojtěch. Název: Metody rychlého prototypování (RP) použitelné ve slévárenství. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 49s. Vedoucí práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
- [2] DEVELOP3D blog [online].URL: <http://develop3d.com/blog/2011/05/3d-systems-gearing-up-for-the-mainstreaming-of-3d-printing> cit.[2016-06-02].
- [3] ŘASA, Jaroslav, KEREČANINOVÁ, Zuzana. Nekonvenční metody obrábění 9. Díl. Mmspektrum [online]. 2008, č. 11 [cit. 2016-06-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencnimetody-obrabeni-9-dil>>.
- [4] NĚMEC, Jiří. Přehled moderních metod při výrobě prototypových odlitků. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 52 s. Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
- [5] VACULÍK, Martin. Název: Rapid Prototyping. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 63 s. Vedoucí práce prof. Ing. Michal Staněk, Ph.D.
- [6] ŘASA, Jaroslav, KEREČANINOVÁ, Zuzana. Nekonvenční metody obrábění 10. Díl. Mmspektrum [online]. 2008, č. 12 [cit. 2016-06-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencnimetody-obrabeni-10-dil>>.
- [7] KOLÍBAL, Zdeněk. Průmyslové roboty I: Konstrukce průmyslových robotů a manipulátorů (PRaM). Brno:skriptum VUT Brno, 1993. 188 s. ISBN 80-214-0526-0.
- [8] Valášek M.: Mechatronika, Vydavatelství ČVUT Praha, 1996, ISBN 80-01- 01276-X.
- [9] PAVLICA, J. Paralelní kinematické struktury průmyslových robotů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 42 s. Vedoucí bakalářské práce doc.Ing. Radek Knoflíček, Dr.

- [10] MRÁZ, Petr. Průmyslové roboty v praxi. ČVUT (Praha), 2008. 14 s. Referát. České vysoké učení technické Praha, Fakulta strojní, Ústav konstruování a částí strojů. Dostupné z WWW: <http://docplayer.cz/6707543-Prumyslove-roboty-v-praxi.html>.
- [11] KOZUBÍK, J. Experimentální robotizované pracoviště s delta-robotem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 103 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.
- [12] Brát V.: Maticové metody v analýze a syntéze prostorových vázaných mechanických systémů. Praha: Academia, 1981.
- [13] „RepRapWiki,“ 20. Leden 2016. [Online]. Available: <http://reprap.org/>. [Přístup získán 13. Červen 2016].

## Seznam příloh na CD

Na přiloženém CD jsou tyto adresáře:

- 01\_Symbolická metoda\_DeltaRobot\_MATLAB
  - spouští se programem *symbolicke\_reseni\_DeltaRobot*
- 02\_Simulace\_DeltaRobot\_MATLAB
  - simulace dráhy kružnice - spouští se programem *kinematika\_kruznice*
  - simulace dráhy zadaného prostoru - spouští se programem *kinematika\_prostor*
  - simulace zadaného bodu - spouští se programem *kinematika\_zadanyBod*
- 03\_Optimalizace\_DeltaRobot\_MATLAB
  - optimalizace mechanismu - spouští se programem *optimalizace\_DR*
- 3D modely\_DeltaRobot
- PDF verze BP
- DOC verze BP