



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Virumaa kolledž

## **Pneumaatilise Hexapod'I mudel**

### **Model of Pneumatic Hexapod**

MASINAEHITUSTEHNOLLOOGIA ÕPPEKAVA LÕPUTÖÖ

Üliõpilane: Maksim Moissejonok

Üliõpilaskood: 193246

Juhendaja: Tatjana Baraškova

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"...." ..... 20.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab rakenduskõrgharidusõppe lõputööle/magistritööle esitatud nõuetele

"...." ..... 20.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"...." ..... 20.....

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS JA REPRODUTSEERIMISEKS**

Mina Maksim Moissejonok (sünnikuupäev: 13.09.1993)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Pneumaatilise Hexapod'I mudel, mille juhendaja on Tatjana Baraškova,
  - 1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja elektroonilise avaldamise eesmärgil, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
  - 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta kolmandate isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ja teistest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

# TalTech Inseneriteaduskond Virumaa kolledž

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Maksim Moissejonok, 193246

Õppekava, peeriala: EDJR16/17 Masinaehitus- ja energiatehnoloogia protsesside juhtimine

Juhendaja(d): vanemlektor, Tatjana Baraškova, tatjana.baraskova@taltech.ee

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Pneumaatilise Hexapod'i mudel

(inglise keeles) Model of Pneumatic Hexapod

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Arendada Taltechi Virumaa kolledži jaoks Pneumaatilise Hexapod'i mudel
2. Rakendada erialaseid teadmisi ja oskusi praktiliselt koostöös Amien, Pikardie Jules Verne Universite ülikooliga

**Lõputöö etapid ja ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Prototüübi jaoks informatsiooni kogumine.	05.03.2023
2.	Platvormi jooniste arendamine ja arvutuste tegemine.	1.04.2023
3.	Lõputöö ettepanekute kirjutamine ja parandamine.	14.05.2023

**Töö keel:** eesti keel      **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "....."..... 20.....a

**Üliõpilane:** .....      "....."..... 20.....a  
/allkiri/

**Juhendaja:** .....      "....."..... 20.....a  
/allkiri/

**Konsultant:** .....      "....."..... 20.....a  
/allkiri/

**Programmijuht:** .....      "....."..... 20.....a  
/allkiri/

# SISUKORD

EESSÕNA .....	6
SISSEJUHATUS .....	7
1. PARALLEELMEHCHANISMID JA ROBOTID .....	8
1.1 Paralleelmehhanismid .....	8
1.2 Paralleel robot .....	9
1.3 Liigendid .....	9
1.4 Vabadusaste .....	11
1.5 Mõned paralleel robotid .....	12
1.5.1 Lennundus .....	13
1.5.2 Teleskoop .....	14
1.5.3 Kuueksajalgsete robotid .....	14
1.5.4 Kuueksajalgsete robotite tüübid .....	15
2. KONSTRUEERIMINE .....	17
2.1 Esimene etapp .....	17
2.1.1 Festo .....	17
2.1.2 Silindri ühendamine pneumo stendiga .....	18
2.2 Teine etapp .....	19
2.2.1 Plaadide arvutus .....	19
2.2.2 Ülemise ja alumise plaadi valmistamine .....	22
2.3 Kolmas etapp .....	22
2.3.1 Ühendamine .....	22
2.3.2 Ühendatud platvorm .....	23
3. VISUALISEERIMINE .....	24
3.1 Eileri nurgad .....	24
3.2 Excel .....	25
3.3 Solidworks .....	26
3.4 Matlab .....	28
KOKKUVÕTE .....	30
SUMMARY .....	31
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	32
LISAD .....	33
Lisa 1 ÜLEMINE PLATVORM .....	34
Lisa 2 ALUMINE PLATVORM .....	35
Lisa 3 PLATVORMI KOOST .....	36

Lisa 4 SILINDRI KOOST..... 37

## **EESSÕNA**

Talvel kuulsin, et tuleb arendada Taltech Viruma kolledži jaoks pneumaatilise platvormi mudeli. Lõputöö teema mõtlesin välja koos Taltech Viruma kolledži vanemlektori Tatjana Baraškovaga. Kevadel toimusid videoloengud koostöös Prantsuse ülikooliga, kelle videoloengust ja Tatjana Baraškovalt kogusin kirjutamiseks algandmed.

Avaldan tänu vanemlektorile Tatjana Baraškovale toetuse ja abistamise eest lõputöö koostamisel ning Prantsusmaa ülikoolile koostöö eest.

Võtmesõnad: Pneumaatilised mehhanismid, Robotid, projekteerimine, Matlab, Solidworks, rakenduskõrgharidusõppe lõpp töö.

## SISSEJUHATUS

Kolledži tudengid osalevad projektis koostöös Prantsusmaa ülikooliga. Kuna ma olen viimasel kursusel ja kavatsesin kirjutada diplomitööd, siis mul oli ka tahe osaleda selles projektis nagu tudeng. Meie kolledžis kavatakse juurutada uue aine. Loodan, et uus aine toob kasu erinevatele erialale kolledžis. Uue aine jaoks oli vaja modeleerida ja konstrueerida mudeli. Diplomitöö teema arenes koos Tatjana Baraskovaga. Diplomitöö teema on Pneumaatilise Hexapod`i mudel. Esimese informatsiooni kirjutamisele sain Prantsusmaa lektori loengute põhjal ja Tatjana Baraskovi käest. Saan öelda, et videoloengud on hea lahendus õppimisele ja informatsiooni vahetusele teistega ülikoolidega. Tulevikus platvormi näidatakse kooliõpilastele, et luua reklaami sisseastumiseks kolledžisse. Viimasel ajal on Hexapodi arendamine on põletav kuum.

Lõputöö esimeses peatükis käsitletakse paralleel mehhanismid ja robotid. Vaatlemine lähemalt paralleel robotit ja liigendite tüpidest ning vabadustaste. Teises osas käsitletakse platvormi konstrueerimine, arvutused ja ühendamine. Kolmandas peatükis tutvustan visualiseerimisega Solidworksis ja Matlabis. Ning vaatlen simulatsiooni Excelis ja Eileri nurgad.



# 1. PARALLEELMEHCHANISMID JA ROBOTID

Robotid on tänapäeva tööstuse jaoks väga oluline lahendus. Tööstuses automatiseerimine aitab säilitada tootmise kvantiteeti ja kvaliteeti tootmisliinidel. Pidevalt suurenev vajadus võtta kasutusele uusi toote protsessi ning parandada toodete kvaliteeti ja vähendada tootmiskulusid, on toonud kaasa robotseadmete kasutuselevõttu. Alguses kasutasid autotööstused oma tootmisliinidel roboteid. Viimastel aastatel igal pool kasutatakse roboteid. Tööstused, mis toodavad kodumasinaid, toidu- ja ravimi materjale jne on võtnud kasutusele robotsüsteemid. Aastatega robotite hinnad langenud, aga inimtööjõu kulud on vastupidi kasvanud. Seepärast tööstused juurutavad rohkem ja rohkem robotid. Samuti on robotid arendanud. Nüüd nad on tõhusam, kiirem, arukam, täpsem ja paindlikum. Tööstusrobotid on tavaliselt valmistatakse liigendatud konstruktsiooniga. Tähtis, et robotil on suur tööruum. Saavutatud seda lülide ridadega ühendamisega. Juhitakse liikumine üksikute ajamite kaudu. See tähendab, et nad manipuleerivad iga lüli liikumist. Kuna robotid projekteeritud suure tööruumiga ja hea paindlikkusega, siis roboti täpsus oluliselt madalam.[\[1\]](#),[\[2\]](#)

## 1.1 Paralleelmehhanismid

Paralleelsete lülide mehhanismid on mehhanismid, mille väljundlüli on ühendatud alusega mitme kinemaatilise ahela kaudu. Nende masinate konstruktsioonil on suurem kandevõime ja täpsus kui järjestikuste masinate puhul. Paralleel struktuuriga mehhanismide täiendavaks eeliseks on võimalus paigaldada ajamid väljaspool tööpiirkonda, selline paigutus võimaldab vähendada mehhanismi elementide inertsust ja suurendada liikumiskiirust. Paralleelseid ühendusi on lihtne ehitada, kuna kõik kinemaatilised ahelad on üldiselt ühesuguse konstruktsiooniga.

Kasutatakse paralleelstruktuuriga hammasrattaid väga mitmesugustes rakendustes kuigi tööpiirkond on piiratud ja selleks on tehtud erisätted. Näiteks simulaatorite, meditsiiniliste robotite, katse- ja mõõteseadmete ehitamisel. Erinevalt järjestikuse struktuuriga mehhanismidest on paralleel struktuuriga mehhanisme ainult piiratud arv. Skeemide variante on palju ja igaühel neist on erinev mõju mehhanismi jõudlusele ja tõhususele.[\[2\]](#)

Robotil võivad olla järgmised omadused:

- Loodud kunstlikult, mitte looduslikult.
- Suudab tajuda oma keskkonda

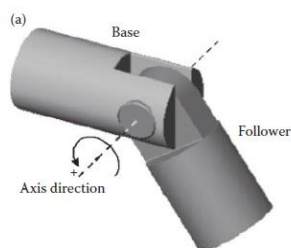
- Oskab käsitseda objekte
- Omab teatud intelligentsust
- Saab programmeerida
- Oskab liikuda mitmel teljel

## 1.2 Paralleel robot

Paralleel robot on suletud ahelaga kineetiline mehhanism, mille liikuv platvorm on seotud alusega mitme sõltumatu kineetilise ahelaga. Paralleel robot koosneb fikseeritud aluse platvormist, mis on ühendatud liikuva platvormiga liikuvate osadega abil. Need osad koosnevad sageli käivitatud prismaatilistest liigendist, mis on ühendatud platvormidega sfääriliste või universaalsete liigete kaudu. Seega lülidel on ainult tõmbe- või survetunnet, mitte paindumist, mis suurendab nende asukoha täpsust ja võimaldab konstrueerida kergemat konstruktsiooni. Lisaks sellele paralleelsetel robotitel on kõrge jäikus, kuna liikuvat platvormi toetavad korraga mitu lüli. Kõigi need omaduste tulemusena võimaldavad konstrueerida laia liikumise võimekusega robotid. Peamiseks puuduseks on piiratud tööruum sest osad võivad kokku põrkuda ja lisaks sellele on igal osadel mitu passiivset liigest, millel on oma mehaanilised piirid. Teine paralleelsete robotite puudus on see, et nad võivad kaotada täielikult oma jäikuse üksikutes kohtades ja saab lisa vabadusastmeid, mis on kontrollimatu, ja seetõttu muutub ta kõikuvaks või liikuvaks. Vabadusastmete arv sõltub linkide arvust ja kasutatavate liigete tüübist. Robotites on lingid ühendatud paarikaupa ja ühendav elementi nimetatakse liigendiks. Liigend määrab mõned füüsilised piirangud suhtelisele liikumisele kahe ühendava elemendi vahel.[\[2\]](#)

## 1.3 Liigendid

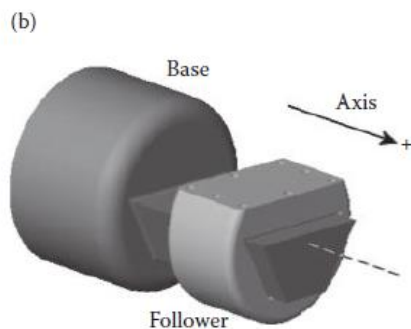
Revoluut liigend R võimaldab kahe paarilise elemendi vahelist pöörlemist ümber telje (vt Joonis 1.1). Seega revoluuatliigendis on viis piirangut ühendavate lülide vahel ja annab ühe vabadusastme.[\[2\]](#)



Joonis 1.1 Revoluut liigend R

### Prismaühendus (P)

Tähistatakse tähega P ja võimaldab kahe lüli vahelt suhtelist nihutamist piki telge. Prismaatilise liigendil on kahe lüli ühenduskohas üks vabadusaste (vt Joonis 1.2). Mõnikord toimub translatsioon piki kõverat ja siis nimetatakse liigendit kõveraks prisma paariks. Tähistus P näitab, et prisma ühendus on aktiivne kinemaatiline paar, vastasel juhul on tegemist passiivse prisma ühendusega. Prismaatilise paari vabadusastme suund määratakse, nagu milline lüli liigub teise suhtes, ja seda tuleb hoolikalt kaaluda. [3]



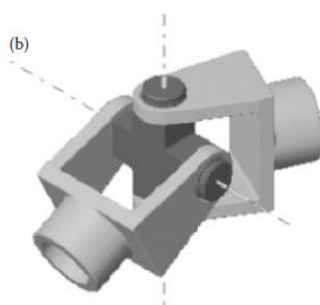
Joonis 1.2 Prismaühendus (P)

Silindriline liigend, C, toimub pöörlemine ühe telje ümber ja liikumist piki teist telge (vt Joonis 1.3). Tal on 2 vabadusastet. [2]



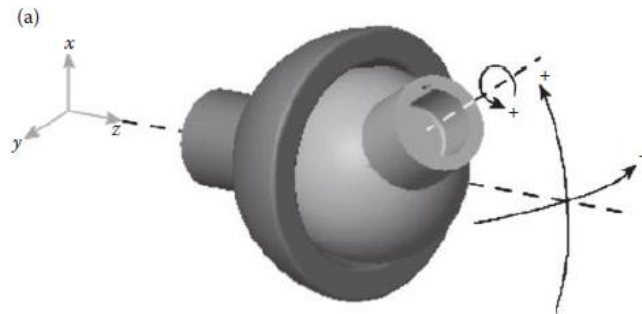
Joonis 1.3 Silindriline liigend, C

Universaalliigend, U, toimub pöörlemine kahe sõltumatu telje ümber, nagu on näidatud joonisel (vt Joonis 1.4). Universaalliigendil on neli piirangut ühenduskohtade vahel. Tal on 2 vabadusastet. [2]



Joonis 1.4 Universaalliigend, U

Sfääriline liigend S Toimub ühe elemendi vaba pöörlemine teise elemendi suhtes (vt Joonis 1.5). Tal on 3 vabadusastet. [2]



Joonis 1.5 Sfääriline liigend S

## 1.4 Vabadusaste

Vabadusastmed mehaanikas - sõltumatute liikumis- ja/või pöörlemiskoordinaatide kogum, mis määrab täielikult süsteemi või keha asendi.

Kinemaatiliste ühenduste vabadusastmete arvutada on võimalik Grublers reegluga.

Grublers reegel - vabadusaste valem

$$DOF = 3 \cdot (n - 1) - 2 \cdot l - h; \quad \text{kus,}$$

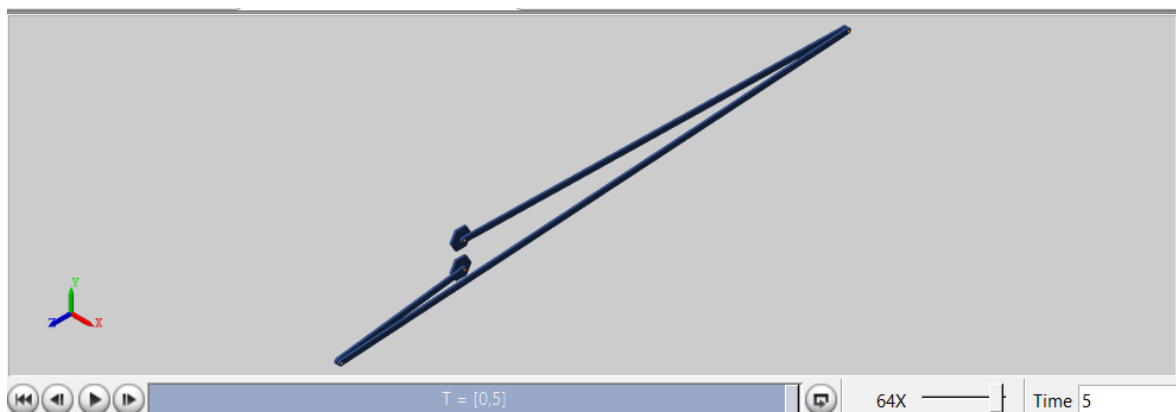
$n$  = linkide arv kokku

$l$  = madalamate paaride arv

$h$  = kõrgemate paaride arv (kui lingi piiramiseks on vaja rohkem kui ühte sisendit). [4], [5]

Näidis:

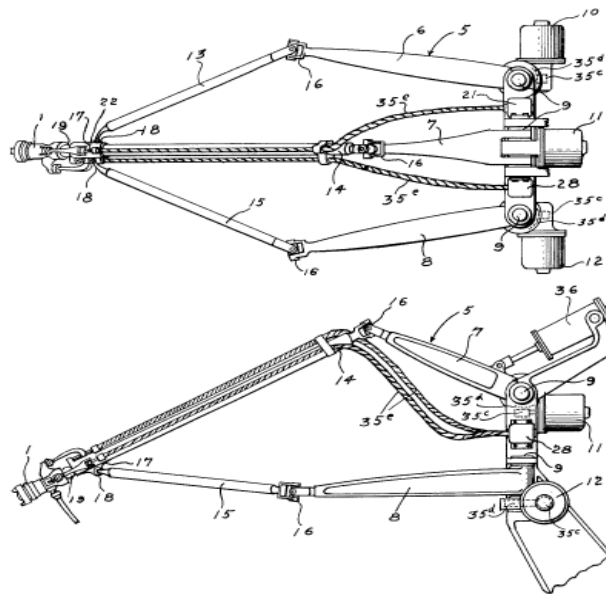
$$DOF = 3 \cdot (4 - 1) - 2 \cdot (4) = 1 \quad (\text{vt Joonis 1.6})$$



Joonis 1.6 Teljalülilise mehhanismi näite

## 1.5 Mõned paralleel robotid

Esimese paralleelselt töötava roboti patenteeris ja töötas välja Willard L.V.Polard. Paralleelroboti eesmärk oli värviprintsimine, kuid ei ehitatud (vt Joonis 1.7).



Joonis 1.7 Paralleelselt töötav robot

Mitte väheoluline leiutus oli paar aastat hiljem Inglismaal kaheksanurkne kuuekandiline, muutuva pikkusega tugipostidega kuuskandjalg (vt Joonis 1.8). Seda korrati rohkem kui tuhat korda. Dr. Eric Gough oli Dunlop Rubber Co. auto tööstusinsener. Dr. Gough nimetas oma leiutist universaalseks statiiviks ja see oli mõeldud maandumis koormusega seotud probleemide lahendamiseks. Seda oli vaja rehvide omaduste määramiseks kombineeritud koormuste korral. [6], [7]

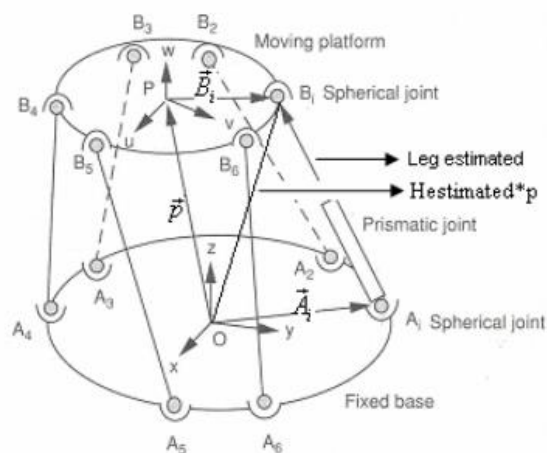


Joonis 1.8 Robot kombineeritud koormuste korral

Seejärel töötati välja Stewarti platvorm(vt Joonis 1.9). Platvorm oli mõeldud kasutamiseks lennusimulaatorina. Platvormi kasutatakse mitmesugustes rakendustes. Näiteks lennundus- ja kosmosetööstuses, kaitsetööstuses, autotööstuses ja tööpinkide tootmises. Samuti kasutatakse seda satelliitantennide positsioneerimiseks, laevaehituses ja Kuu liikuril.

Mitmeteljeliste süsteemide projekteerimisel on abiks paralleelne või järjestikune kinemaatiline struktuur. Stewarti platvormil on paralleelne kinemaatiline struktuur. Seetõttu kasutati Stewarti platvormi pneumosilindritega paralleelse platvormi prototüübi projekteerimise alusena.

Stewarti platvorm on mehaanilise konstruktsiooni põhinäide, mida kasutatakse positsioonikontrolliks. See on sisuliselt paralleelmehhanism, mis koosneb ülemisest plaadist, mis on ühendatud fikseeritud alusega ja kõik on ühendatud ajamite abil. Stewarti platvormi puhul kasutatakse prismaaktuaatoreid, nagu on näidatud allpool. Selle ajamiseks on vaja lineaarmootoreid, kuulikruvisid, pieso seadmeid jne.[\[7\]](#), [\[22\]](#)



Joonis 1.9 Stewarti platvormi mudel

Pneumaatiliste ajamite kasutamine võimaldab kasutada lineaarset liikumist rasketes tingimustes, näiteks kõrgetel temperatuuridel või tugevates magnetväljades.

### 1.5.1 Lennundus

Lennunduses on väljaõppeks vaja kuut vabadusastet, seega kasutatakse lennusimulaatoris Stewarti platvormi disaini eeskujuna(vt Joonis 1.10).



Joonis 1.10 Lennusimulaator [7]

### 1.5.2 Teleskoop

Stewarti platvormi kasutatakse 6 vabadusastmega heksapood-teleskoobi valmistamiseks(vt Joonis 1.11).



Joonis 1.11 Heksapood-teleskoob [7]

### 1.5.3 Kuueksajalgised robotid

Hexapod tuleneb ladinakeelsest sõnast "kuus jalga".

Hexapodid on teatud tüüpi paralleelsed kinemaatilised mehhanismid, millel on kuus vabadusastet: X, Y, Z, roll, pike ja yaw.

On tootjaid, kes nimetavad kuuekandjalisi roboteid "heksapoodideks"(vt Joonis 1.12). Mõiste "heksapood" viitab ka kuuejalgsetele lüljalgsetele.

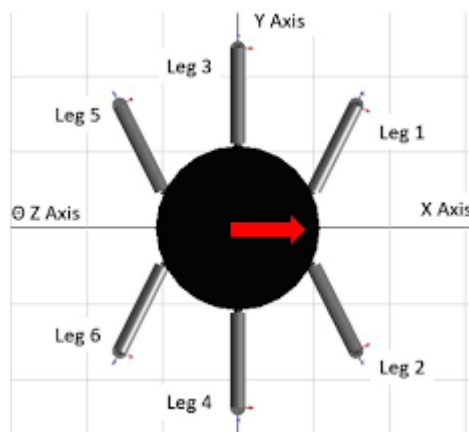


Joonis 1.12 Kuueksajalgse robot [7]

Suur eelis on see, et heksapoodid on tavapäraastest positsioneerimise vahenditest vastupidavamad, dünaamilised, väga täpsed ja paindlikud. Nad võimaldavad täpsemat positsioneerimise kontrolli kui teised robotid. Tänu suurele arvule ajamitele on nad stabiilsemad ja manööverdamis võimelisemad.

#### 1.5.4 Kuueksajalgsete robotite tüübid

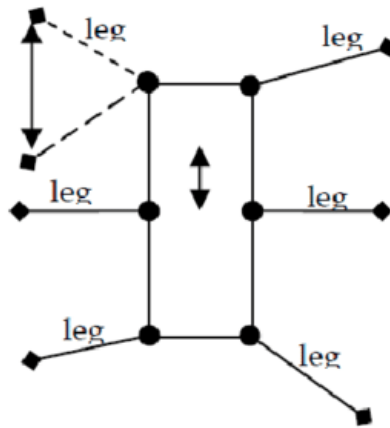
Iga heksapood on erineva konstruktsiooniga. Need jagunevad kahte kategooriasse: ristikülikukujulised ja kuusnurksed. Ristikülikukujulisel robotil on ristikülikukujuline keha, mille mõlemal küljel on kaks 3 jalga sisaldavat rühma. Kuuekandistel on seevastu ümmargune või kuuekandiline keha, kus jalad paiknevad ühtlaselt. Ristiküliku kujulised robotid on vähem stabiilsed ja tõhusad.



Joonis 1.13 Heksapoodi jalad

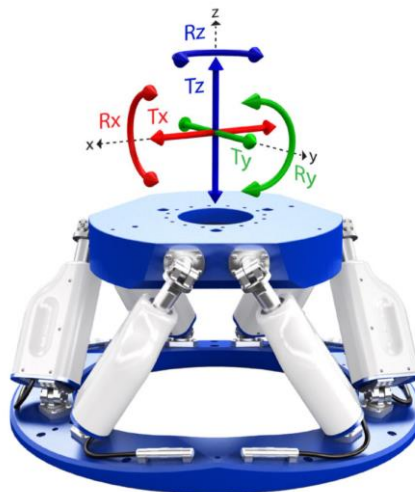
Nende disainilahenduste jalad jäljendavad putukate jalgu. Robotil on erinev arv jalgu ja mehhanismi tüüp.[8]





Joonis 1.14 Heksapoodi roboti jalad

Hexapod-robotid eristuvad mitmeteljelistest süsteemidest selle poolest, et neil on kuue telje jaoks määratletud pöörlemiskeskus või pöördepunkt. Neil on ka hea jäikus ja nad suudavad taluda suuremaid koormusi kui kaubanduses saadaolevad kinemaatilised robotid. Tänu paralleelsele konstruktsioonile on iga ajami vead keskmistatud, mitte akumuleeritud nagu seeriarobotite puhul.



Joonis 1.15 Stewart platvormi liikumise suunad [8]

Kui asetate keha platvormile, saab see liikuda kuue vabadusastme ulatuses. Kõrge täpsus ja väga dünaamiline liikumine saavutatakse, sest ülemine platvorm liigub, samal ajal kui mootorid ja muud komponendid on paigal. Hexapod-roboteid on lihtne kasutusele võtta. On ainult üks liikuv platvorm ja jäikus on suur, nii et mõnikord ei ole vaja servoajamit reguleerida. Kui seda on vaja teha, on kõigi 6 telje reguleerimine sama. Reguleerimisprotsess on kiirem ja lihtsam kui kaubanduslikult saadaolevate robotite puhul. Vahepeal heksapodid nimetatakse Stewart platvormina.[9]

## 2. KONSTRUEERIMINE

### 2.1 Esimene etapp

Esimeses etapis oli välja mõelda konstruktsiooni ja tellida komponendid konstrueerimisele. Konstruktsiooni alusel läks Stewart platvorm ja Heksapood. Oluline valikuse kriteerium oli komponentide hind. Konstrueerida tuli pneumaatika ja hüdraulika laboratooriumi baasil.





















Taltech Virumaa kolledži Elektropneumaatika ja pneumaatika labor nr 108. Labor on loengute pidamiseks ja pneumaatika ja tootmise automatiseerimise praktikumide läbiviimiseks. Seal toimus konstruktsiooni kokku monteerimine ja ühendamine (vt Joonis 2.1).[\[15\]](#)
















Joonis 2.1 Pneumaatika ja hüdraulika laboratoorium

#### 2.1.1 Festo

Alustanud kirjavahetust FESTO ettevõttega. Festo asub Saksamaal Esslingen am Neckaris. Ettevõtte toodab tööstuslike ja automaatikasüsteemide seadmeid. Peamised tegevusvaldkonnad on pneumaatika ja automaatika. Nende kataloogist valitud tsilindrid ja kinnitused. Silindrid on valitud vastavalt kandevõimele ja maksimaalsele jõule, sest need silindrid ei kannu mitte ainult aksiaaljõudu, vaid ka külgjõudu. Nad töötavad nurgaasendi muutmiseks. Samuti on ostetud liitmikud ja adapterid silindrite ühendamiseks stendiga. Veel silindrid valitud, nii et neid on võimalik tulevikus programmeerida, kuna silindrid on kontrollitud jaoturi poolt. Jaoturid on reguleeritakse rõhuga ja elektromagnetiliselt. Rõhust võetakse laboratooriumi kompressorist. Kuna komponendid on kallid, siis valitud silindrilised liigendid. Festo tegi silindrite ja tarvikute pakkumist (vt Joonis 2.2 ja 2.3).[\[14\]](#)

Foto	Symbol	Kogus	Tootekood	Tüüp	ID1	Tarnekuupäev	Hind/tk. €/km-ta	Hind/kokku ilma km-ta	Link
		6	1366958	<a href="#">DSBC-50-400-PPVA-N3</a>	<a href="#">DSBC-50-400-PPVA-N3</a>	Tarnekuupäev [Eesti]	137,00	822,00	 
		6	174399	<a href="#">SNCS-50</a>	<a href="#">SNCS-50</a>	Tarnekuupäev [Eesti]	45,21	271,26	 
		12	31763	<a href="#">LBG-50</a>	<a href="#">LBG-50</a>	Tarnekuupäev [Eesti]	59,00	708,00	 
		6	9263	<a href="#">SGS-M16X1.5</a>	<a href="#">SGS-M16X1.5</a>	Tarnekuupäev [Eesti]	32,22	193,32	 
		12	193146	<a href="#">GRLA-1/4-QS-6-D</a>	<a href="#">GRLA-1/4-QS-6-D</a>	Tarnekuupäev [Eesti]	13,3	159,60	 
		6	8060301	<a href="#">VIJVS-LK20-B52-D-G18-1C1+GL-S</a>	<a href="#">VIJVS-LK20-B52-D-G18-1C1+GL-S</a>	Tarnekuupäev [Eesti]	59,17	355,02	 

Joonis 2.2 Hinnapakumine

		20	153002	<a href="#">QS-1/8-6</a>	<a href="#">QS-1/8-6</a>	Tarnekuupäev [Eesti]	1,44	28,80	 
		1	576421	<a href="#">VARM-R10-20S-G14-6</a>	<a href="#">VARM-R10-20S-G14-6</a>	Tarnekuupäev [Eesti]	61,06	61,06	 
		2	2316	<a href="#">U-1/4</a>	<a href="#">U-1/4</a>	Tarnekuupäev [Eesti]	3,90	7,80	 
		50	159664	<a href="#">PUN-5X1-BL</a>	<a href="#">PUN-5X1-BL</a>	Tarnekuupäev [Eesti]	1,01	50,50	 

Joonis 2.3 Hinnapakumine

- Pneumosilindrid - 6tk
- Pöörlev äärik sfäärilise laagriga - 6tk
- Tugijalg, kus pöördepunkt on kinnitatud vastu pöörlemise vastu vedruga - 12tk
- Kuuliliigend - 6tk
- Ühesuunalised voolu reguleerivad ventiilid - 12tk
- Jaotid - 6tk
- Liitmik - 20tk
- 5/2 jaoti plokk - 1tk
- Summuti - 2tk
- Plast torud - 50tk

### 2.1.2 Silindri ühendamine pneumo stendiga.

Laboris on mitu pneumaatilise stendid. Kui komponendid oli kohal, siis proovitud ühendada pneumo stendiga silindri.

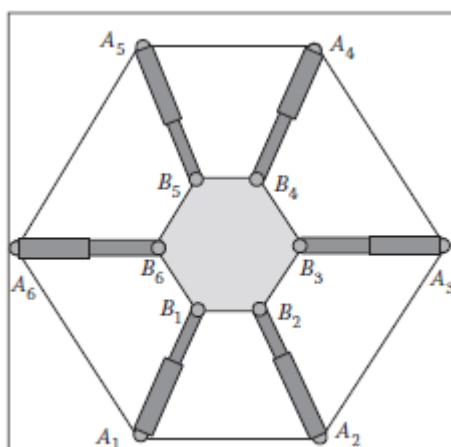


Joonis 2.4 Ühendamine pneumostendiga

## 2.2 Teine etapp

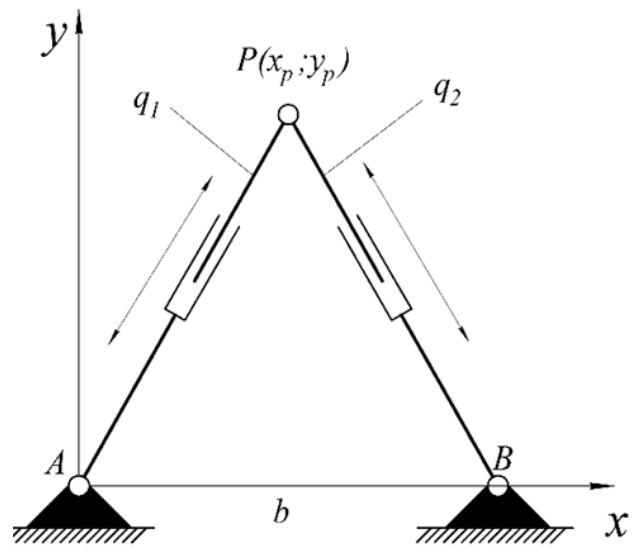
### 2.2.1 Plaadide arvutus

Platvormi kokku monteerimiseks välja mõeldud plaadid. Oli valitud kuue vabadusastmega kuusjalgse esialgne asend. Kõige stabiilsem asend selle paigutusega. (vt Joonis 2.5). [\[2\]](#), [\[17\]](#), [\[18\]](#)

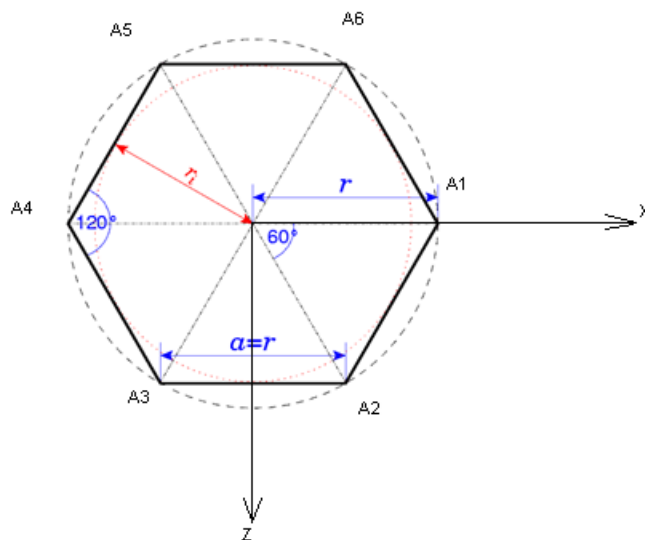
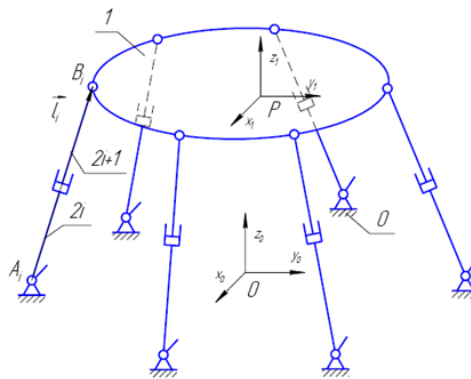


Joonis 2.5 Arvutuste mudel

Massikesse on väga oluline füüsikaline suurus, sest see määrab mehhanismide, näiteks paralleelsete manipulaatorite (joonis 1,2) aluse tippude koordinaadid.



Joonis 2.6 Manipulaatori tipu koordinaat



Joonis 2.7 Paralleel manipulaatori arvutuste mudel

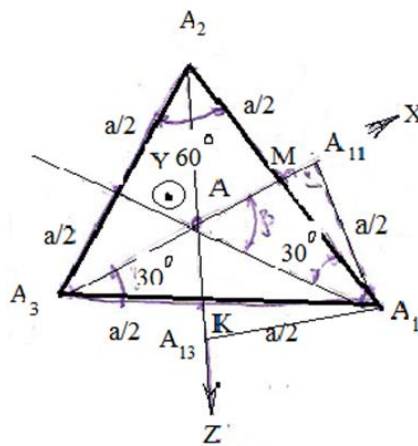
$$A_1 = (r; 0; 0) \quad A_2 = \left(\frac{a}{2}; 0; \frac{a\sqrt{3}}{2}\right) \quad A_3 = \left(-\frac{a}{2}; 0; \frac{a\sqrt{3}}{2}\right) \quad A_4 = (-r; 0; 0) \quad (2.1)$$

$$A_5 = \left(-\frac{a}{2}; 0; -\frac{a\sqrt{3}}{2}\right) \quad A_6 = \left(\frac{a}{2}; 0; -\frac{a\sqrt{3}}{2}\right) \quad (2.2)$$

Kolmnurkse masina puhul on massikeske (A) mediaanide ristumiskohas. Mediaan jagab kolmnurga külje pooleks. Olgu võrdkülgse kolmnurga külg  $a$ . Mediaanid lõikepunktis jagunevad suhtega 2:1, st võrdkülgse kolmnurga puhul on mediaan võrdne kõrguse ja poolitusjoonega. [10], [11]

$$A_2A = 2AK = 2 \frac{a\sqrt{3}}{6} = \frac{a\sqrt{3}}{3} \quad (2.3)$$

Siis:



Joonis 2.8 Arvutuste mudel

Kolmnurkse ristlõike massi keskpunkt:

$$Y = AA_{12} = 0 \quad (2.4)$$

$$AM = AA_1 \cdot \cos\beta \quad (2.5)$$

$$AM = AK = \frac{a\sqrt{3}}{6} \quad (2.6)$$

$$AA_1 = A_2A = \frac{a\sqrt{3}}{3} \quad (2.7)$$

$$\frac{a\sqrt{3}}{6} = \frac{a\sqrt{3}}{3} \cdot \cos\beta \quad \beta = 60^\circ \quad (2.8)$$

Punkt  $A_{11}$  ja M klapivad. See tähendab, et manipulaatori alguspunkti koordinaadid on järgmised:

$$Y = AA_{12} = 0; \quad X = AA_{11} = \frac{a\sqrt{3}}{6}, \quad \text{aga } Z = AA_{13} = \frac{a}{2}, \quad \text{kuna } AA_{13} = A_1M = \frac{a}{2} \quad (2.9)$$

## 2.2.2 Ülemise ja alumise plaadi valmistamine

Ülemise plaadi  $\varnothing$  on 600mm ja paksus 10mm.(joonis 1). Alumise plaadi  $\varnothing$  on 700mm ja paksus 18mm.(vt Lisa 1 ja Lisa 2).

Algusest oli mõtte valmistada plaadid paksusega 10 mm alumiiniumist. Arvutused oli tehtud alumiiniumise järgi. Kuna olid probleemid metalliga, seetõttu prototüüpi ülemine ja alusplaat valmistatud vineerist.

Kuna ühe silindri rõhk on 1bar, silindri osa on 50mm, aluse plaadi  $\varnothing$  on 700mm siis paksuse arvutamine järgmine:

$$\frac{1,2 \frac{N}{mm^2} \cdot 2500mm^2 \cdot 3,14 \cdot 6}{700mm \cdot Xmm \cdot 4} = 55 \frac{N}{mm^2} \quad (2.10)$$

1,2MPa – ühe silindri maksimaalne rõhk

$\frac{3,14 \cdot 0,0025mm^2}{4}$  – silindri osa ristlõige pindala

6 - silindrite arv

700 – alumine plaadi, mm  $\varnothing$

55 MPa – alumiiniumi voolavuspiir

Vastus=0,36mm  $\Rightarrow$  1,0 mm alumiiniumi paksus sobib. Selline vastus kuulub ilma koormuseta variandile.

$$\frac{1,2 \frac{N}{mm^2} \cdot 2500mm^2 \cdot 3,14 \cdot 6}{4} + 1000N}{700mm \cdot Xmm} = 55 \frac{N}{mm^2} \quad (2.11)$$

Vastus=0,39 mm  $\Rightarrow$  1,0 mm alumiiniumi paksus sobib. Selline vastus kuulub koormusega variandile.[\[21\]](#)

## 2.3 Kolmas etapp

### 2.3.1 Ühendamine

Kuna platvormiga on vaja juhtida, siis ta peaks olema ühendatud pneumaatilise stendiga. Selle jaoks kasutatud:[\[16\]](#)

SAI4-2056 Toiteplokk - 2 tk .

- Sisendpinge: 100÷240VAC
- Väljund: 24VDC / 2,5A.
- Lühisvoolu kaitse
- Sisendlüliti ja LED-ekraan
- Kaasas toitekaabel

SAI4-2038 releer komplekt - 4 tk.

- Sisaldab kolme releed 24V mähisega ja 4 lülitatavat kontakti.
- Relee-aktiivne LED.
- 4 mm turvaklemmid kasutamiseks kiirühenduste juhtmestikuga.

SAI4-2036 Elektrisisendite komplekt - 4 tk.

- 4 mm turvaklemmid kasutamiseks kiirühenduste juhtmestikuga.
- Kaks surunuppu ja lukustuv surunupp.
- Sõltumatu valgusnäidik.
- Kaks nupuvajutusega lülituskontakti.

SAI4-2091 - Õhupuhastusseade 3/2 jaotus klapiga

- Koosneb filtrist, regulaatorist ja 1 MPa manomeetrist.
- 5 µm filtreerimine.

### **2.3.2 Ühendatud platvorm.**



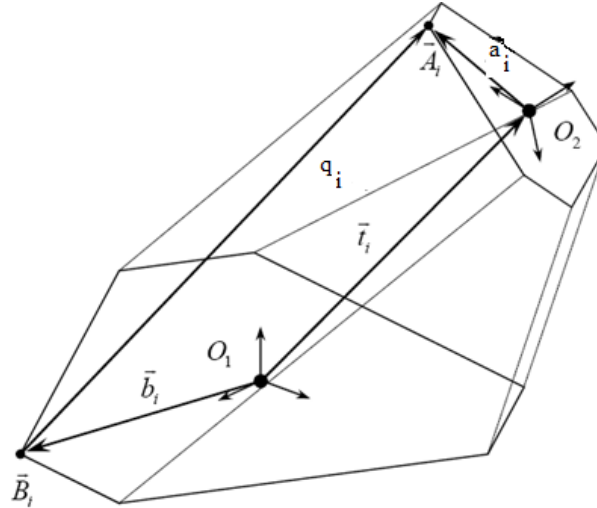
Joonis 2.9 Ühendatud platvorm



### 3. VISUALISEERIMINE

#### 3.1 Eileri nurgad

Kinemaatiline ülesanne on määrata ülemise platvormi iseloomulike punktide koordinaatide asukoht igal ajahetkel. Need muutuvad, sest robotit juhitakse silindrite abil. Silindrid muudavad ülemise ja alumise platvormi liigeste vahelist kaugust.



Joonis 3.1 Liikuv platvorm

$$A_\psi = \begin{pmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

$$A_\vartheta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\vartheta & -\sin\vartheta \\ 0 & -\sin\vartheta & \cos\vartheta \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

$$A_\varphi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Matriks  $A = A_\psi A_\vartheta A_\varphi$ . Maatriksi  $A$  koefitsiendid on väljendatud järgmiselt valemitega:

$$\alpha_{11} = \cos\psi \cdot \cos\varphi - \sin\psi \cdot \cos\vartheta \cdot \sin\varphi$$

$$\alpha_{12} = -\cos\psi \cdot \sin\varphi - \sin\psi \cdot \cos\vartheta \cdot \cos\varphi$$

$$\alpha_{13} = \sin\psi \cdot \sin\vartheta$$

$$\alpha_{21} = \sin\psi \cdot \cos\varphi + \cos\psi \cdot \cos\vartheta \cdot \sin\varphi$$

$$\alpha_{22} = -\sin\psi \cdot \sin\varphi + \cos\psi \cdot \cos\vartheta \cdot \cos\varphi$$

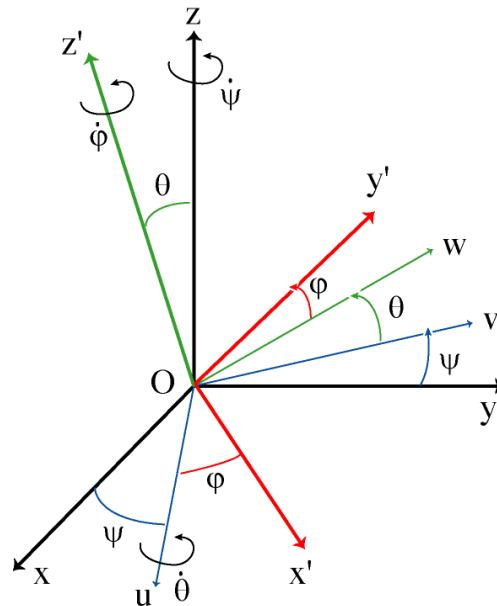
$$\alpha_{23} = -\cos\psi \cdot \sin\vartheta$$

$$\alpha_{31} = \sin\vartheta \cdot \sin\varphi$$

$$\alpha_{32} = \sin\vartheta \cdot \cos\varphi$$

$$\alpha_{33} = \cos\vartheta$$

See on tegelikult kinemaatiline T-liikumise paaritus. Määrake nihkumine, st vektori pikkus, mis ühendab alumise punkti ülemise punktiga. Alumine punkt ei ole liikuv ja ülemine punkt muudab oma asendit. See muutub piki mõnda telge ja pöörleb, seega vajame nihkematriike. Sellisel juhul määratakse  $A_\psi, A_\theta, A_\phi$ .

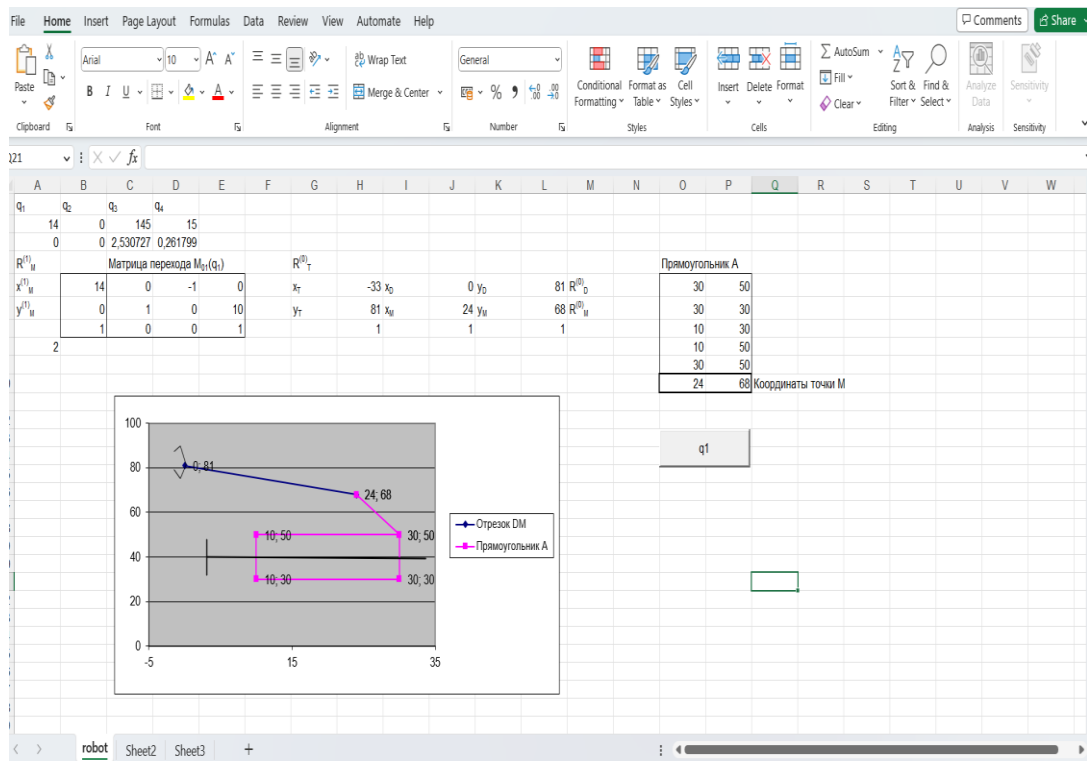


Joonis 3.2

Need on Euleri nurgad, mis määravad ülemise platvormiga seotud lokaalse koordinaatsüsteemi pöörlemise mingi telje suhtes. Pöörlemismatriksid tuleb arvutada, et lõpuks määrata ülemise platvormi punktide asukoht igal ajahetkel. See on nihkumine ja pöörlemine. [\[2\]](#), [\[12\]](#)

### 3.2 Excel

Simulatsiooniprogramm Excelis koos makrosiga näitab, kuidas saab Exceli programmis teha ulatuslikumalt roboti simulatsiooni. Selleks joonistatakse kõigepealt robot ja määratakse punktide koordinaadid, seejärel ühendatakse nende vahel jooned ja punktide koordinaadid muutuvad sõltuvalt pöörlemise maatriksi või positsiooni maatriksi asukohast, st muudetakse pikkust ja pööratakse. See Exceli programm realiseerib tegelikult kineetilise platvormi juhtimise probleemi, kus kineetiline paar liikumine ja pöörlemine.



Joonis 3.3 Rooboti liikumise Simuleerimine Excel programmis

Ainult translatsioonipaar T ja rotatsioonipaar realiseeritud, kuna silinder liigub ja liigend pöörleb silindrit. Seetõttu määratleda ülemise liigendi asukoha koordinaadid iseloomulike punktidenä, mis sõltuvad varda kiirusest ja silinder pöörleb siiski juhuslikult. Euleri nurgad on määramata. Koosneb 4 üldkoordinaadist  $q_1, q_2, q_3, q_4$ . Alumine platvormi silinder on kujutatud tavalise liuguri ja hinge mehhanismina. Purpurpunane ristkülik on liugur ja liugur on kinnitatud 3 hingega käepideme külge.

Q1 - liuguri liikumine

Q2 - pöörlemine ümber koordinaadi 30 50

Q3 - pöörlemine ümber koordinaadi 24 68

Q4 - haaratsite enda pöörlemine

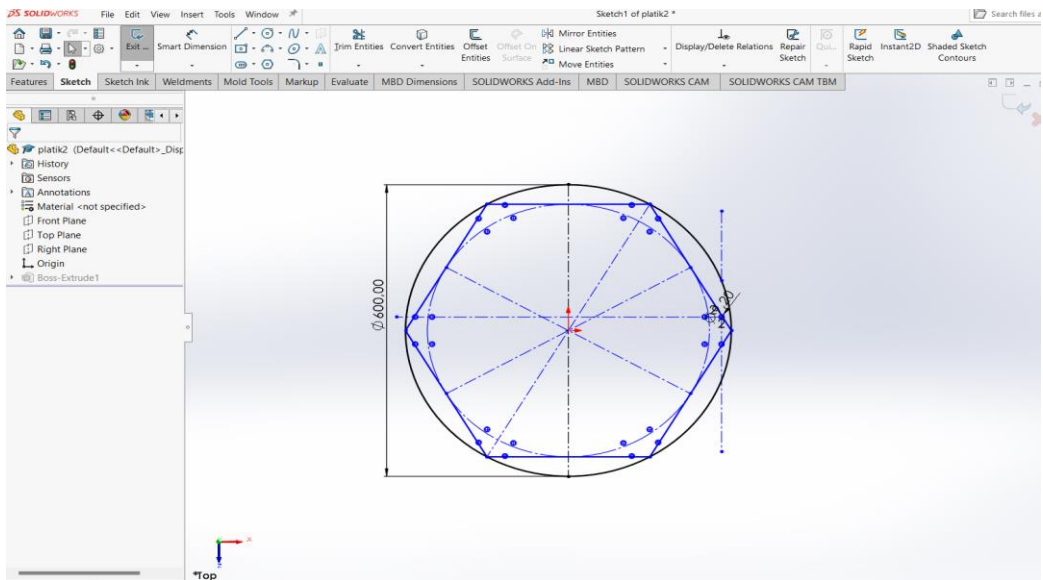
Neli muutujat, mis määravad ülemise platvormi asendi igal ajahetkel

Neli silindri liigutamine selles etapis realiseerub ainult 1.

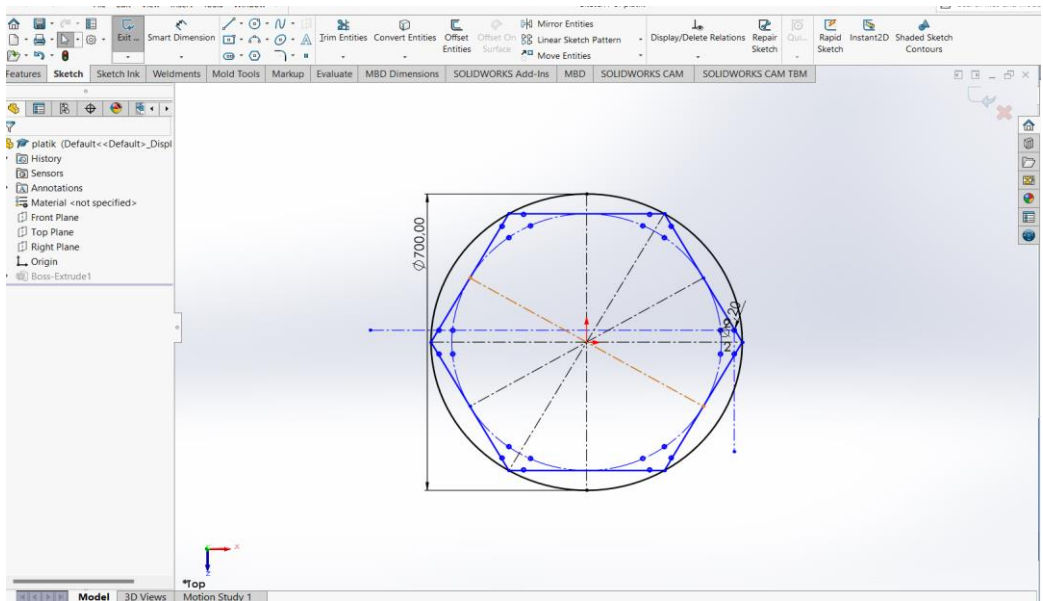
Esimese silindri krõbistamine hingedega.

### 3.3 Solidworks

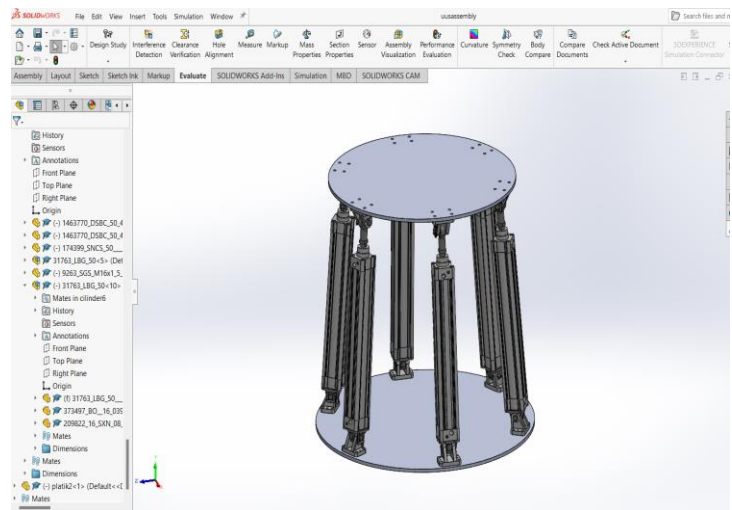
Solidworksis oli visualiseeritud platvorm. Joonistanud plaadid ning silindrite ja liigendite CAD failid võtnud Festo interneti leheküljest. Järgmisena teinud koostu.



Joonis 3.4 Ülemine plaadi Sketch



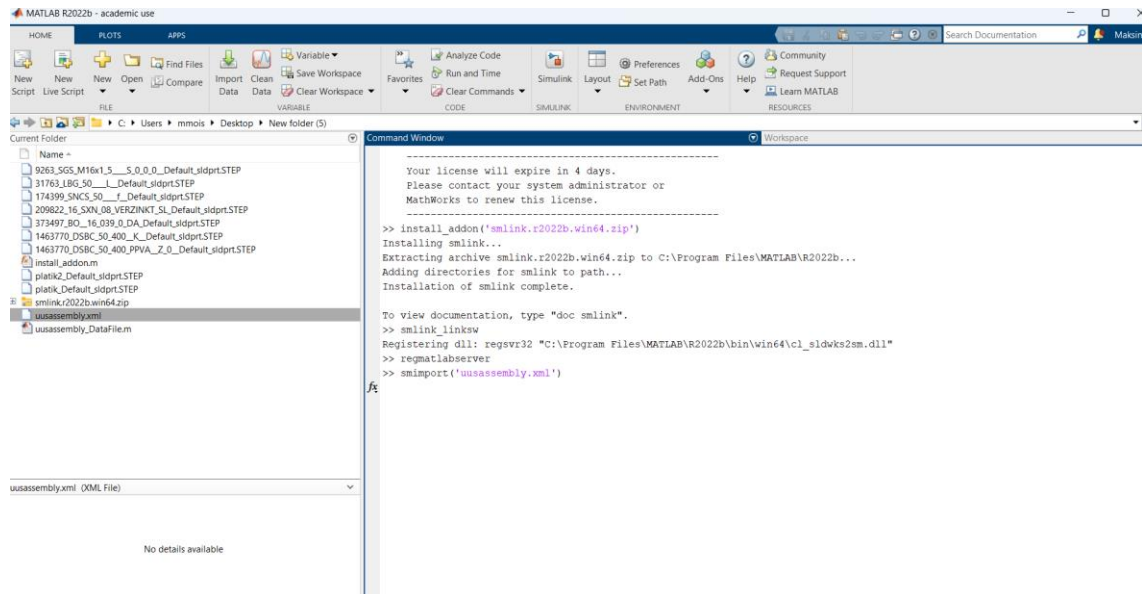
Joonis 3.5 Alumine plaadi Sketch



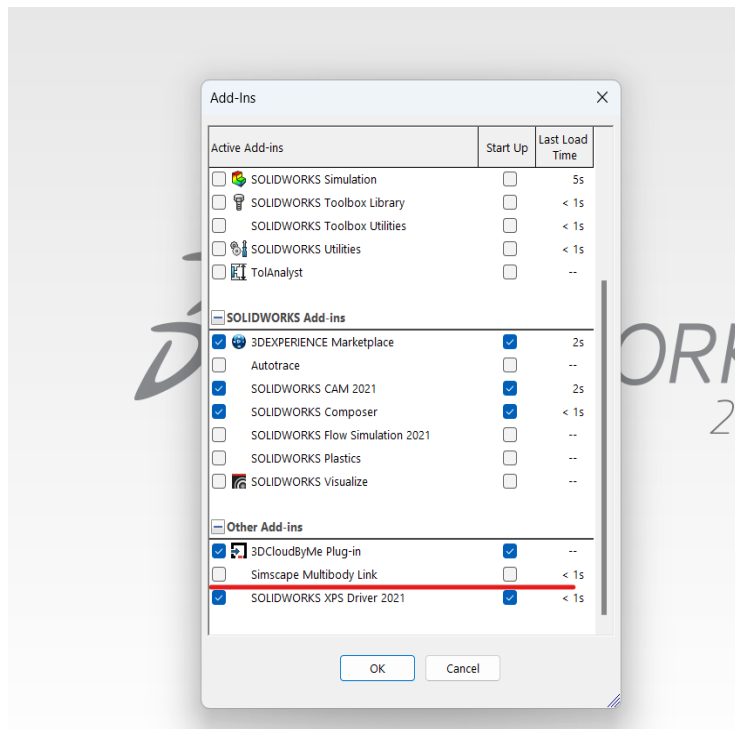
Joonis 3.6 Platvormi koost

### 3.4 Matlab

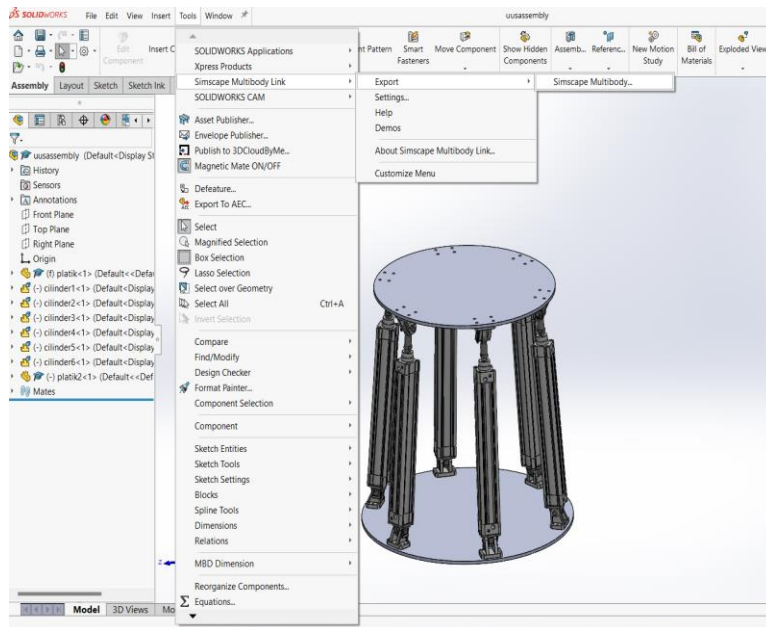
Visualiseerimiseks Matlabis oli laaditud internetist Simscape Multibody Link. Lisatud eraldi failid uue kaustasse. Järgmisena käivitatud Matlabi nagu Administraator. Avatud kommandi aknas installitud addon ning registreeritud matlab server solidworksi jaoks. Edasi käivitatud Solidworks, kus addonsis lisatud Simscape multibody link. Järgmise etapiga avatud platvormi koost ja tööristas exporteritud simscape multibody saama kaustasse. Salvestatud xml formaatiga faili käivitasin Matlabis ja platvorm visualiseeris.[\[23\]](#)



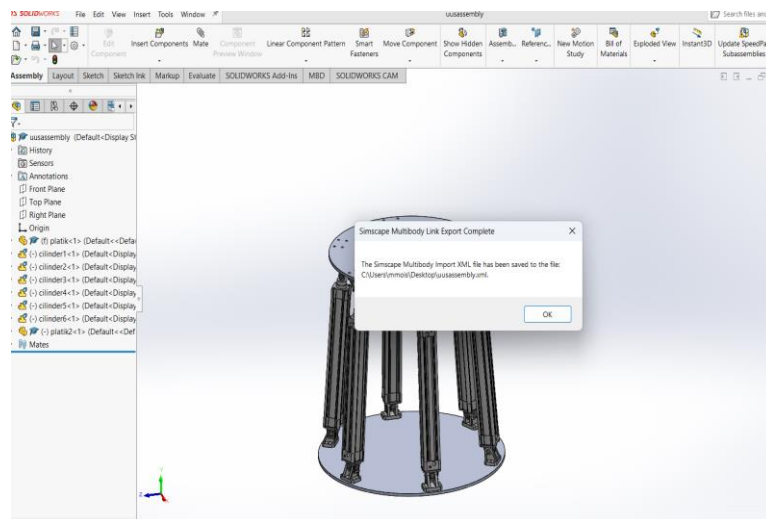
Joonis 3.7 Visualiseerimine Matlabis



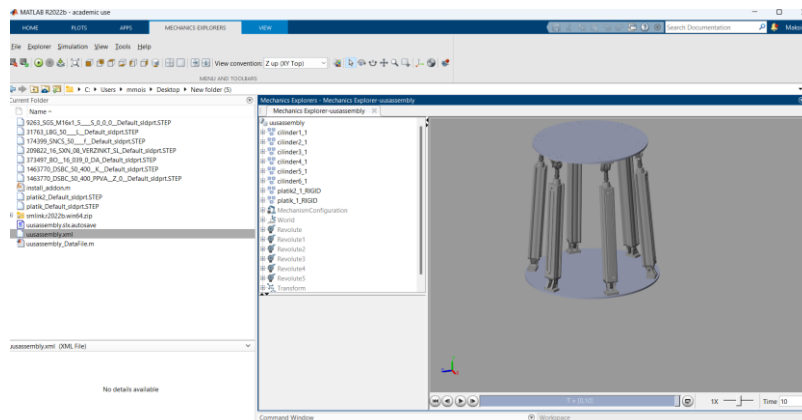
Joonis 3.8 Visualiseerimiseks Matlabis



Joonis 3.9 Visualiseerimiseks Matlabis



Joonis 3.10 Visualiseerimiseks Matlabis



Joonis 3.11 Visualiseerimiseks Matlabis

## KOKKUVÕTE

Platvorm on valmistatud. Heksapoodi väljatöötamise käigus kaaluti platvormi kõige stabiilsemat asukohta. Tulevikus võib paigutust muuta. Konstruktsioon aluseks oli võtnud Stewart platvormi ja Hexapodi. Konstruktsiooni viis annab võimaluse teha juhtimine pneumaatilise stendiga. Plaadid valmistatud vineerist, kuna metalli kättesaadavuse ja valmistamisega oli probleeme. Tulevikus peaksid plaadid olema valmistatud alumiiniumist, kuna paksusarvutused tehti spetsiaalselt alumiiniumi jaoks. Arvutati massikeskmed. Tehti simulatsioon Excelis. Silindrid aksiaal- ja pikisuunaliste jõudude jaoks. Tehtud visualiseerimine Solidworksis ja Matlabis. Tulevikus seda projekti arendatakse edasi. Mõned õpilased hoolitsevad kontrolli eest, teised õpilased hoolitsevad simulatsioonide eest Solidworksis ja Matlabis ning viimistlevad programmi makrosiga 6 silindri jaoks. Hetkel juhtimine tehtud käsitsi, kuid see tuleks rakendada automaatsena, st nuppu vajutatakse ja see läheb koormuse hoidmiseks. Lõputöö eesmärk oli käsitleda Hexapodi platvormi projekteerimist ja konstrueerimist, et platvorm saaks tuua kolledži erinevate erialale kasu.

## **SUMMARY**

The platform is made of. The most stable location for the platform was considered during the development of the Hexapod. The layout may be changed in the future. The design was based on the Stewart platform and the Hexapod. The way of construction gives the possibility to do the control with a pneumatic stand. The panels were made of plywood as there were problems with metal availability and fabrication. In the future, the plates should be made of aluminium, as thickness calculations were made specifically for aluminium. Calculated mass centres. A simulation was carried out in Excel. Cylinders for axial and longitudinal forces. Visualization done in Solidworks and Matlab. In the future this project will be further developed. Some students will take care of the control, other students will take care of the simulations in Solidworks and Matlab and will finish the program with macros for 6 cylinders. At the moment the control is done manually, but it should be implemented as automatic, i.e. a button is pressed and it goes to hold the load. The objective of the thesis was to address the design and construction of the Hexapod platform so that the platform could benefit the various disciplines in the college.

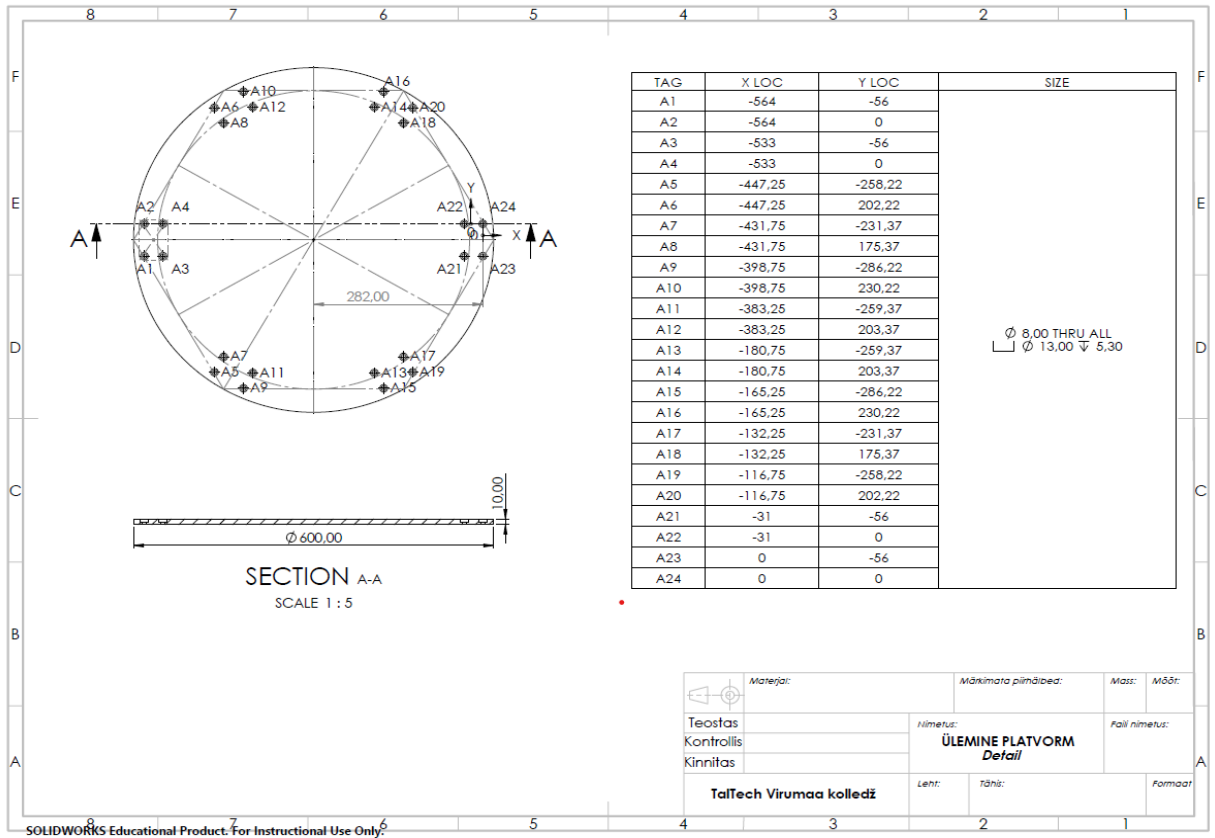


## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. Stefan Staicu, Dynamics of Parallel Robots (Parallel Robots: Theory and Applications), 2019.
2. Hamid D. Taghirat, Parallel Robots Mechanics and Control, 2017.
3. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/prismatic-joint>
4. [Степени свободы \(механика\) — Википедия \(wikipedia.org\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Степени_свободы_(механика))
5. <https://www.smlase.com/entries/mechanism/what-is-degree-of-freedom-dof-in-mechanics/>
6. <https://www.parallemic.org/Reviews/Review007.html>
7. [https://www.scribd.com/document/25461121/MME20120300008\\_25461121.pdf](https://www.scribd.com/document/25461121/MME20120300008_25461121.pdf)
8. <https://acromed.net/post/what-are-hexapod-robots-used-for>
9. <https://www.linear-motion.com/what-are-hexapod-robots-stewart-platforms/>
10. Голубев Ю.Ф Основы теоретической механики, 2-издание, 2000.
11. Яблонский А.А, Никифорова В.М Курс теоретической механики, 14-е изд, 2007.
12. [https://ru-frwiki.wiki/wiki/Angles\\_d%27Euler](https://ru-frwiki.wiki/wiki/Angles_d%27Euler)
13. П. И. Гришнюков Совершенствование Пневматической Системы управления Платформы Стюарта, 2016.
14. <https://www.festo.com/gb/en/>
15. <https://taltech.ee/laborid-ja-teenused#p18401>
16. [https://static.smc.eu/binaries/content/assets/smc\\_ee/trainingsystems/pneutrainer-400\\_en.pdf](https://static.smc.eu/binaries/content/assets/smc_ee/trainingsystems/pneutrainer-400_en.pdf)
17. <https://se.mathworks.com/company/newsletters/articles/creating-a-stewart-platform-model-using-simmechanics.html>
18. [https://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/february\\_2013/P\\_SI\\_316.pdf](https://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/february_2013/P_SI_316.pdf)
19. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:AngleEuler.png>
20. [Шесть степеней свободы — Википедия \(wikipedia.org\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Шесть_степеней_свободы)
21. <https://kcm.in.ua/splavu-alyminyi/>
22. [https://www.researchgate.net/publication/225211164\\_Parallel\\_Mechanisms\\_and\\_Robots](https://www.researchgate.net/publication/225211164_Parallel_Mechanisms_and_Robots)
23. <https://www.youtube.com/>

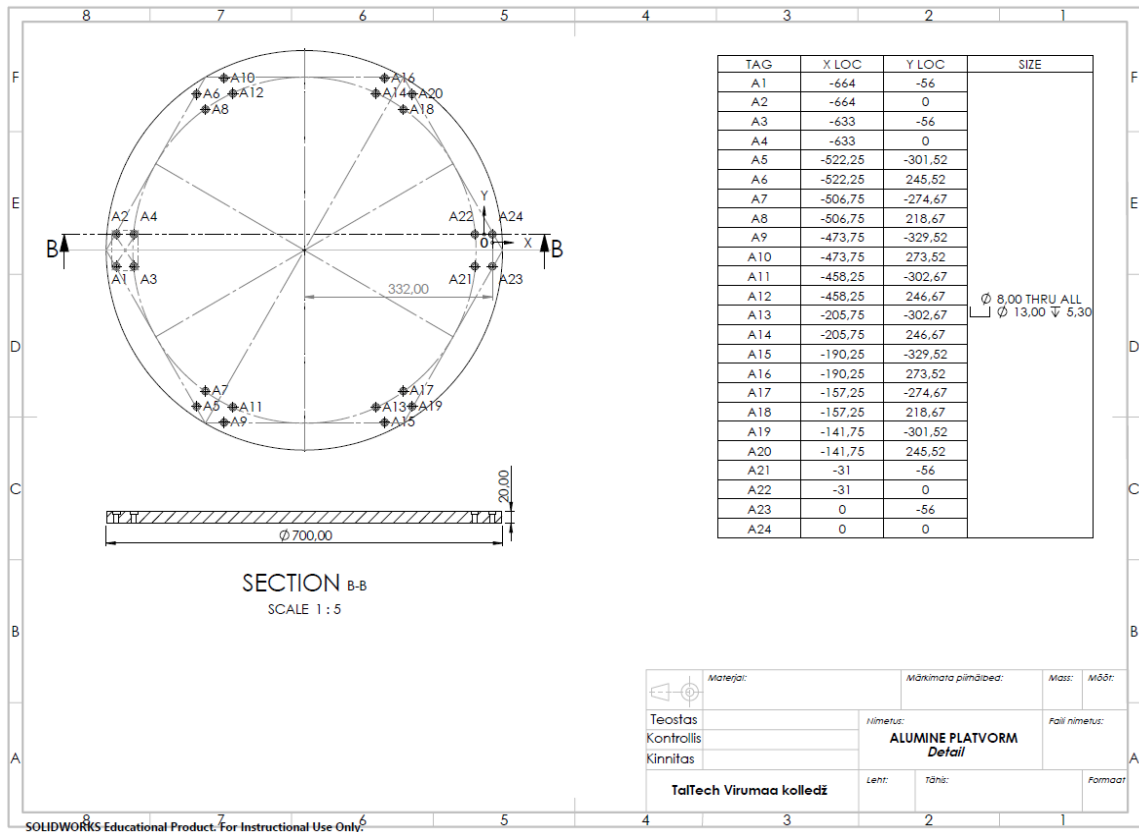
# LISAD

# Lisa 1 ÜLEMINE PLATVORM



Joonis 1

# Lisa 2 ALUMINE PLATVORM



Joonis 2

### Lisa 3 PLATVORMI KOOST

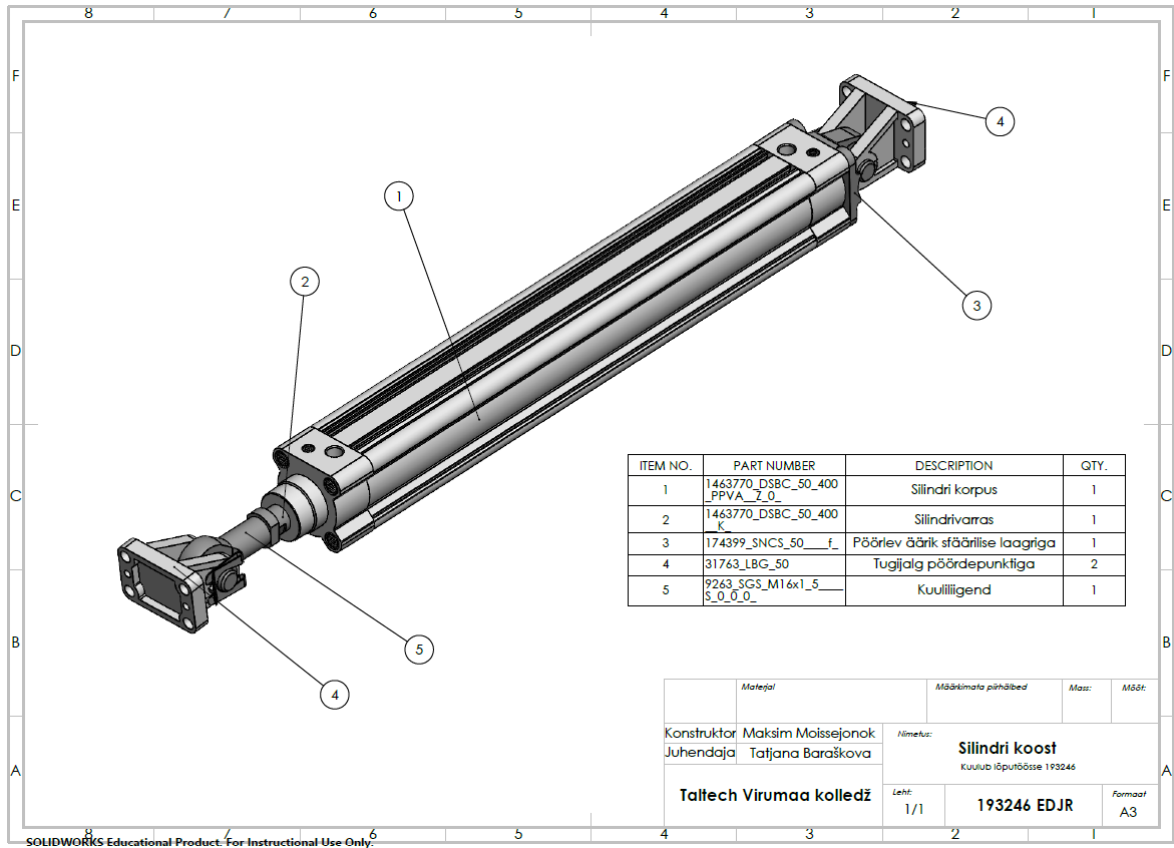
ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	Ulemine platvorm		1
2	cylinder1		1
	1463770_DSBC_50_400_PPVA_Z_0_		1
	1463770_DSBC_50_400_K_		1
	174399_SNCS_50_f_		1
	31763_LBG_50		2
	9263_SGS_M16x1_5_S_0_0_0_		1
3	cylinder2		1
	1463770_DSBC_50_400_PPVA_Z_0_		1
	1463770_DSBC_50_400_K_		1
	174399_SNCS_50_f_		1
	31763_LBG_50		2
	9263_SGS_M16x1_5_S_0_0_0_		1
4	cylinder3		1
	1463770_DSBC_50_400_PPVA_Z_0_		1
	1463770_DSBC_50_400_K_		1
	174399_SNCS_50_f_		1
	31763_LBG_50		2
	9263_SGS_M16x1_5_S_0_0_0_		1
5	cylinder4		1
	1463770_DSBC_50_400_PPVA_Z_0_		1
	1463770_DSBC_50_400_K_		1
	174399_SNCS_50_f_		1
	31763_LBG_50		2
	9263_SGS_M16x1_5_S_0_0_0_		1
6	cylinder5		1
	1463770_DSBC_50_400_PPVA_Z_0_		1
	1463770_DSBC_50_400_K_		1
	174399_SNCS_50_f_		1
	31763_LBG_50		2
	9263_SGS_M16x1_5_S_0_0_0_		1
7	cylinder6		1
	1463770_DSBC_50_400_PPVA_Z_0_		1
	1463770_DSBC_50_400_K_		1
	174399_SNCS_50_f_		1
	31763_LBG_50		2
	9263_SGS_M16x1_5_S_0_0_0_		1
8	Alumine platvorm		1

Materjal	Määrimata pihvibed	Mas:	M55f:
Konstruktor: Maksim Moissejonok	Juhendaja: Tatjana Baraškova	Nimetus: <b>Hexapodi koost</b>	Kuuluub idpuhõõsse 193246
Taltech Virumaa kolledž		Leht: 1/1	Formaat: A3
		193246 EDJR	

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

Joonis 3

# Lisa 4 SILINDRI KOOST



Joonis 4