

Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu
Konetekniikan osasto
Konstruktiotekniikan laitos

I -Ve el Pe etr tor -k r erobot ll u
ADAMS-ohjelto

Diplomityön aihe on hyväksytty konetekniikan osaston osastoneuvostossa 3.4.2002

Työn tarkastajana ja ohjaajana on toiminut professori Asko Rouvinen

Lappeenrannassa 18.4.2002

Kari Dufva
Orioninkatu 11 A 6
53850 Lappeenranta

TIIVISTELMÄ

Tekijä: Kari Dufva
Nimi: In-Vessel Penetrator -käärmerobotin mallinnus ADAMS-ohjelmistolla
Osasto: Konetekniikan osasto
Paikka: Lappeenranta
Vuosi: 2002

Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.

74 sivua, 18 kuvaa, 11 taulukkoa, 2 liitettä

Tarkastaja: Professori Asko Rouvinen

Hakusanat: Virtuaaliprototyyppi, monen vapausasteen robotti, monikappale dynamiikka

Työn tavoitteena oli muodostaa virtuaaliprototyyppi fuusioreaktorin huollossa käytettävästä IVP-robotista. Työssä mallinnettiin robotin mekaniikka joustavana sekä toimilaitteiden ja käyttöjen dynaamiset ominaisuudet valmistajien esitietojen ja mitoitustietojen perusteella. Käyttöjen ja mekaniikan mallit yhdistettiin ADAMS-ohjelmistossa. Mekaanisten joustojen mallinnuksessa sekä verifiointissa käytettiin apuna ANSYS –ohjelmistoa.

Virtuaaliprototyypin toimivuudesta varmistuttiin vertaamalla sitä robotin suunnittelutietoihin ja fyysiseen prototyyppiin. Robotin ohjauksessa käytettävän P-säätäjän vaikutusta tutkittiin eri vahvistuksen arvoilla sekä verrattiin mekaanisia vasteita fyysisen prototyypin dynaamisiin testeihin. Esimerkkinä robotin käyttäytymisestä todellisessa tilanteessa simuloitiin sen ajoa reaktoriin.

Toteutetun simulointimallin todettiin vastaavan rakenteeltaan sekä siinä esiintyvien voimien osalta suunnitelmien mukaista konstruktiota. Käytetyillä parametreilla se toteutti hyvin robotille asetetut nopeusvaatimukset.

ABSTRACT

Author: Kari Dufva
Title: Modeling an In-Vessel Penetrator snake-like robot in ADAMS
Department: Mechanical Engineering
Place: Lappeenranta
Year: 2002

Master's thesis. Lappeenranta University of Technology

74 sheets, 18 figures, 11 tables, 2 appendices

Supervisor: Professor Asko Rouvinen

Keywords: Virtual prototyping, multi-redundant robot, multibody dynamics

The aim of this study was to develop a virtual prototype of the IVP-robot, which will be used in maintenance activities in ITER fusion reactor. At this work, the flexibility of mechanics and dynamical behavior of the actuators was noticed by design information and manufacture's data sheets. Individual models of both actuators and mechanics were connected to fully representative dynamic model using ADAMS. Mechanical flexibility was modeled using ANSYS FE-program.

Accuracy and reliability of the virtual prototype was verified by comparing it with available design information and physical prototype. P-controller, which is used as robot's control system, was studied by using different parameters of gain. Case study from real activities of the robot was the situation when the robot enters in to the vessel.

As the result of the study it was verified that the structure of the model and forces acting in it, are similar with designed construction. With the used parameters, the desired velocity was achieved and the robot was proven to be able to move required design speed.

ALKUSANAT

Diplomityö on tehty Lappeenrannan teknillisen korkeakoulun konetekniikan osastolla ja se liittyy osaprojektina EU:n fuusioreaktorin kehityshankkeeseen. Työn tarkastajana toiminutta professori Asko Rouvista haluan kiittää niin mielenkiinnosta työtäni kohtaan kuin kannustavasta opetuksesta luentosaleissa. Konstruktiotekniikan laitoksen johtajalle professori Heikki Handroosille esitän kiitokset mahdollisuudesta olla mukana mielenkiintoisessa ja haastavassa projektissa. Ilman Dipl.ins. Janne Kovasen sekä Dipl.ins. Jussi Sopsasen asiantuntemusta työni olisi ollut monin verroin hankalampaa ja heille esitän erityiskiitokset kaikesta avusta.

Lisäksi haluan kiittää kaikkia ystäviäni, sekä elämäkumppaniani Katjaa.

K YTETYT MERKINN T

- A** = kiertomatriisi
- B** = aikaderivaattojen kiertomatriisi kulmanopeuksiksi
- C** = itsenäisten rajoiteyhtälöiden vektori
- C_q** = Jacobin matriisi
- F** = voima
- Fⁱ** = kappaleeseen vaikuttava voimavektori
- i** = mielivaltainen kappale
- I** = yksikkömatriisi
- I¹, ..., I⁹** = massainvariantit
- K^{BB}** = reunaehtovapausasteisiin liittyvä jäykkyysmatriisi
- K^{II}** = sisäisiin vapausasteisiin liittyvä jäykkyysmatriisi
- K_r** = osarakenteen jäykkyysmatriisi
- $\hat{\mathbf{K}}$** = yleistetty jäykkyysmatriisi
- m_i** = solmun *i* massa
- \mathbf{I}_{RR}^i** = kappaleen massat sisältävä massamatriisi
- \mathbf{I}_{R0}^i** = kappaleen hitaustulo lokaalissa koordinaatistossa
- \mathbf{I}_{00}^i** = kappaleen lokaali hitausmomentti
- Mⁱ** = kappaleen massamatriisi
- M^{BB}** = reunaehtovapausasteisiin liittyvä massamatriisi
- M^{II}** = sisäisiin vapausasteisiin liittyvä massamatriisi
- $\hat{\mathbf{M}}$** = yleistetty massamatriisi
- M_{mm}** = modaalikoordinaatteihin viittaava massamatriisin osa
- M_{rr}** = rotaatiovapausasteisiin viittaava massamatriisin osa
- M_{tt}** = translaatiovapausasteisiin viittaava massamatriisin osa
- n_c** = rajoiteyhtälöiden lukumäärä
- N** = transformaatiomatriisi modaalikoordinaateista ortogonaalisiin koordinaatteihin
- Oⁱ** = kappaleen lokaalin koordinaatiston origo
- p** = modaalikoordinaattivektori

\mathbf{p}^C	= staattisten korjausmuotojen modaalikoordinaattivektori
\mathbf{p}^N	= normaalimuotojen modaalikoordinaattivektori
\dot{P}^i	= kappaleen i liikemäärän muutos
P^i	= kappaleen i partikkeli
\mathbf{p}^i	= yleistettyjen koordinaattien vektori
\mathbf{p}^i	= kappaleen i yleistettyjen koordinaattien vektori
\mathbf{d}^i	= riippuvat yleistetyt koordinaatit
\mathbf{i}^i	= riippumattomat yleistetyt koordinaatit
\mathbf{f}^i	= joustavuutta kuvaavat yleistetyt koordinaatit
\mathbf{r}^i	= jäykän kappaleen liikettä kuvaavat yleistetyt koordinaatit
\mathbf{Q}	= yleistettyjen voimien vektori
\mathbf{Q}_v	= neliöllinen nopeusvektori
\mathbf{f}	= osarakenne
\mathbf{r}^i	= pisteen P^i globaali asemavektori
\mathbf{R}^i	= kappaleen i lokaalin origon globaali sijaintivektori
t	= aika
T	= kineettinen energia
\mathbf{u}	= solmujen siirtymävektori
$\bar{\mathbf{u}}^i$	= pisteen P^i lokaali sijaintivektori
\mathbf{u}^i	= pisteen P^i lokaali sijaintivektori globaalisti
$\bar{\mathbf{u}}_0^i$	= pisteen P^i asema deformatumattoman kappaleen lokaalissa koordinaatistossa
$\bar{\mathbf{u}}_f^i$	= pisteen P^i sijainnin muutos deformatuneessa tilassa lokaalisti
\mathbf{u}_f^i	= pisteen P^i sijainnin muutos deformatuneessa tilassa globaalisti
$\bar{\mathbf{u}}_p^i$	= pisteen P^i asema deformatuneessa tilassa lokaalissa koordinaatistossa
\mathbf{u}^B	= liityntävapausaste
\mathbf{u}^I	= sisäinen vapausaste
\mathbf{v}	= yksikkövektori
$\tilde{\mathbf{v}}$	= vinosymmetrinen matriisi
W	= työ

Krekkil et

- α^i = kappaleen i globaali kulmakiihtyvyyssvektori
- δ = virtuaalinen muutos
- δ_r^B = osarakenteen r liityntäpisteiden siirtymävektori
- δ_r^I = osarakenteen r sisäisten pisteiden siirtymävektori
- θ = lokaalikoordinaatiston kiertymä
- θ^i = rotaatiokoordinaattivektori
- λ = Lagrangen kertoimet
- ρ = tiheys
- φ_i = ominaismuotovektori
- φ_{ij}^r = j :nnen muodon, solmun i , rotaatiovapausasteisiin liittyvä muotovektori
- φ_{ij}^t = j :nnen muodon, solmun i , translaatiovapausasteisiin liittyvä muotovektori
- Φ = ominaismuotomatriisi
- Φ_i^r = solmun i , rotaatiovapausasteiden muotovektori
- Φ_i^t = solmun i , translaatiovapausasteiden muotovektori
- Φ^C = reunaehtomuotojen ominaismuotomatriisi
- Φ^N = normaalimuotojen ominaismuotomatriisi
- Φ^* = Craig-Bampton –esityksen ominaismuotomatriisi
- ω^i = kappaleen i globaali kulmanopeusvektori
- $\bar{\omega}^i$ = kappaleen i lokaali kulmanopeusvektori

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	3
1.1 Työn tavoitteet	4
1.2 Tehtävän rajaus	5
2. USEAN VAPAUSASTEEN ROBOTTI.....	6
2.1 Toimintaympäristö	7
2.2 Kokoonpano	8
2.2.1 Nostomekanismi	9
2.2.2 Putki	10
2.2.3 Vetotangot	10
2.2.4 Päätykappaleet.....	10
2.3 Nelinivelmekanismien toiminta.....	11
3. MEKATRONISEN KONEEN SIMULOINNIN TEORIAA.....	13
3.1 Jäykän kappaleen dynamiikka	13
3.1.1 Kappaleen kuvaus avaruudessa ja kiertomatriisi	14
3.1.2 Kappaleen nopeus ja kiihtyvyys.....	16
3.1.3 Yleistetyt koordinaatit	17
3.1.4 Kinemaattiset rajoitteet	18
3.1.5 Jacobin matriisi	19
3.1.6 Yleistetyt voimat	20
3.1.7 Lagrangen dynamiikka.....	21
3.1.8 Massamatriisi	23
3.1.9 Neliöllinen nopeusvektori	23
3.1.10 Liiketyhtälöiden muotoilu	24
3.2 Joustavan kappaleen kuvaus	25
3.2.1 Keskittyneiden massojen periaate	26
3.2.2 Kappaleen moodien hyväksikäyttö	27
3.2.3 Joustavan jäsenen kinematiikka	28
3.2.4 Moodien superponointi	29
3.2.5 Reunaehto- jien huomioiminen	30
3.2.6 Joustavan kappaleen yleistetyt koordinaatit.....	34
3.2.7 Joustavan kappaleen nopeus ja kiihtyvyys.....	34
3.2.8 Joustavan kappaleen massamatriisi.....	35

4. VIRTUAALIPROTOTYYPPI	39
4.1 Mekanismin analysointi	39
4.1.1 Mekanismin vapausasteet	40
4.2 Mekaniikkamalli ADAMS –ohjelmalla	42
4.2.1 Moduulien massatiedot	43
4.2.2 Osien kuvaukset	45
4.2.3 Runko	45
4.2.4 Päätykappaleet ja vetotangot	46
4.2.5 Putki	46
4.2.6 Nostomekanismi	46
4.2.7 Joustokehävaihde	48
4.2.8 Jäykän mallin nivelet	50
4.3 Joustavuuden huomioiminen	51
4.3.1 Putken joustavuus	52
4.3.2 Nostomekanismin joustavuus	55
4.3.3 Vetotankojen joustavuus	56
4.3.3 Nivelkappaleiden jousto	57
4.3.4 Joustavan mallin nivelöinti	58
5. VIRTUAALIPROTOTYYPIN TESTAUS	59
5.1. Staattinen analyysi	59
5.2. Ohjausjärjestelmän testaus	62
5.3. Esimerkki simuloidusta ajotilanteesta	64
5.4. Tulosten tarkastelu	67
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	70
6.1. Jatkokehitys	72
L I HDELUETTELO	73

LIITTEET

1. JOHDANTO

Tutkimushanke ”Mechanical Modeling of Dynamics of IVP”, johon liittyen diplomityö tehdään, kuuluu FFUSION2-ohjelmaan. FFUSION2 on TEKESin käynnistämä kansallinen hanke ja se on osa EU:n fuusio-ohjelmaa, jonka tarkoituksena on rakentaa fuusioreaktorin prototyyppi. ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) toteutetaan Kanadan, Euroopan, Japanin ja Venäjän yhteishankkeena. ITER-hanke käynnistyi vuonna 1985 Neuvostoliiton esittämän ajatuksen pohjalta, ja konseptitason suunnittelu alkoi vuonna 1988. Nykytilanteessa etsitään reaktorin sijoituspaikkaa johon vahvimmin ehdolla ovat Ranska ja Kanada. Tavoitteena on saada kahdeksanvuotinen rakennushanke päätökseen vuonna 2010. Diplomityössä kehitetään simulointimallin avulla uuden fuusioreaktorin prototyypin huollossa käytettävää robottia. Työ toteutetaan yhteistyössä robotin kehitystyötä tehneen ranskalaisen CEA- tutkimuskeskuksen kanssa.

Fuusioreaktorin ympäristössä tarvittavien koneiden ja laitteiden suunnittelu muodostavat optimaalisen ympäristön virtuaaliprototyypinnille. Tuotteet ovat yksittäiskappaleita ja usein tavallista konepajatuotetta vaativampia, jolloin perinteisten suunnittelumenetelmien käyttö toimivien fyysisten prototyyppien tuottamiseen ei välttämättä ole enää riittävä. Kehitystyössä käytetyn 3D-suunnittelun ansiosta eri laitteiden osista on luontevaa muodostaa virtuaaliprototyyppi, jonka avulla voidaan testata ja kehittää monimutkaisia kokoonpanoja.

Virtuaaliprototyyppien käyttö fuusiohankkeessa on projektin laajuuteen nähden ollut kuitenkin vähäistä. LTKK:n Mekatroniikan ja Virtuaalisuunnittelun Laboratorio on aikaisemmin toteuttanut yhden merkittävän virtuaaliprototyypin liittyen reaktorin huoltotoimenpiteitä suorittavaan IWR-robottiin. IWR-robotissa havaittiin selvä rakennevika, joka johti aina robotin uudelleen suunnitteluun asti. Onnistuneesta virtuaaliprototyypistä saatavat hyvät tulokset ovat herättäneet kiinnostusta tätä uutta suunnittelun apuvälinettä kohtaan myös muissa fuusioreaktorin projekteissa.

1.1 Työn tavoitteet

Fuusioreaktorin tyhjiöastiassa on halkaisijaltaan pieni huoltoaukko, josta voidaan suorittaa rajoitettuja huolto- ja tarkastustoimenpiteitä multiredundantin ”käärmerobotin” avulla. IVP (In Vessel Penetrator) huoltorobotin ulottuma on yli kahdeksan metriä ja sen poikkileikkauksen halkaisija on 160 mm. Fuusioreaktorin olosuhteet vaativat robotin ohjaukselta kaukohallintajärjestelmän, jolla mahdollistetaan turvalliset huoltotoimenpiteet reaktorin lyhyellä alasajolla. IVP-robotti on sähkökäyttöinen ja sen ohjauksen sekä komponenttien suunnittelussa on erittäin tärkeää tietää joustojen vaikutus laitteen staattiseen ja dynaamiseen käyttäytymiseen. Diplomityön tarkoituksena on mallintaa laitteen mekaaniset joustot sekä yhdistää käytön ja mekaniikan mallit ADAMS-ohjelmistossa.

Laboratorion aikaisempien kokemusten perusteella varteenotettavana riskitekijänä projektin onnistumiselle oli robotin parametritietojen hankinta. Tietojen saamista CEA:lta päätettiin varmistaa ja nopeuttaa henkilökohtaisella vierailulla Ranskaan. Samalla tutustuttiin ensimmäisestä moduulista jo rakennettuun prototyyppiin. Tapaamisessa olivat meidän edustajiemme lisäksi läsnä IVP-projektin johtaja Dr. J. D. Palmer, CEA:n mekaniikka osaston johtaja Jean-Pierre Friconeau, sekä CEA:n suunnittelupäällikkö Yann Perrot. Tapaamisen tuloksena päätettiin ensimmäisessä vaiheessa muodostaa virtuaaliprototyyppi saatujen lähtötietojen perusteella, sekä testata sen toimivuutta vertaamalla sitä fyysiseen prototyyppiin. Toisessa vaiheessa mietitään dynaamisia kuormitustilanteita sekä tutkitaan näistä aiheutuvia mekaanisia rasituksia. Konkreettisenä esimerkkinä saatujen tulosten hyödyntämisestä esitettiin niiden käyttäminen robotin työntökelkan suunnittelussa. Ranskalaisten tuli toimittaa meille ns. ”ostoslista” heille tärkeistä tutkimuskohteista, mutta näitä tuloksia ei tähän diplomityöhön ehditty liittää. Työn pääasiallisena tavoitteena voidaan pitää valmiin virtuaaliprototyypin tuottamista.

1.2 Tehtävän rajaus

Virtuaaliprototyypin mallinnuksessa päähuomio kiinnittyy mekaniikan sekä toimilaitteiden muodostamaan kokonaisuuteen normaalissa ympäristöolosuhteissa. Toimilaitteiden ohjaus toteutetaan mahdollisimman yksinkertaisesti, sillä fyysisessä prototyypissä käytettävästä ohjausjärjestelmästä ei työtä tehdessä ollut tarkkaa tietoa. Ohjausjärjestelmä voidaan näin liittää malliin myöhemmin. Robotin mallinnuksessa käytetään Mechanical Dynamics Inc:n ADAMS –ohjelmistoa. Robotti on kevytrakenteinen ja sillä on suuri ulottuvuus, jolloin mekaanisilla joustoilla on paljon merkitystä sen käyttäytymiseen. Joustojen kuvaamisessa ja verifiointissa käytetään apuna CEA:n laboratorioon rakennetusta robotin ensimmäisestä moduulista saatavia testituloksia, sekä Ansys Inc:n ANSYS –ohjelmistoa. Joustavassa virtuaaliprototyypissä huomioidaan toimilaitteiden vaikutus robotin käyttäytymiseen saatavissa olevien teknisten tietojen perusteella.

2. USEAN VAPAASTEEN ROBOTTI

Käärmerobotilla tarkoitetaan multiredundanttista, usean vapausasteen robottia, jolle on tyypillistä suuri pituus poikkileikkaukseensa nähden. Nimitys ”käärmerobotti” tulee englanninkielisestä termistä snake-like robot. Robotit hyödyntävät käärmeen luonnollista olemusta ja matkivat niiden liikkumistapaa. Ne koostuvat useista peräkkäin nivelöidyistä moduuleista, joissa erilaiset sähkökäytöt ovat usein käytettyjä liikkeen tuottajia. Käärmerobotit voidaan karkeasti jakaa kahteen eri päätyyppiin: alustasta saatavaa tukea hyödyntäviin liikkuviin robotteihin, sekä kiinteään runkoon ankkuroituihin robotteihin. Ankkurointi tapahtuu yleensä kiinnittämällä robotti jostakin moduulistaan kiinteästi alustaan, jolloin robotin muut jäsenet liikkuvat suhteessa tähän moduuliin. Tällaisia robotteja käytetään usein erilaisissa tarkastustehtävissä ja videolaitteiden kannattimina paikoissa, joissa ihmisen on hankalaa tai vaarallista työskennellä. Hyötykuorma on niiden rakenteesta johtuen yleensä hyvin pieni.

Multiredundanteja robotteja on maailmalla tutkittu paljon ja aiheesta on myös saatavilla paljon julkaisuja. IVP:n kaltaisen moduulirakenteisen robotin soveltuvuutta visuaaliseen tarkastukseen on tutkittu mm. NASAN toimesta. JPL Serpentine Robotissa on 11 vapausastetta. Se on halkaisijaltaan noin 38 mm ja pituudeltaan 900 mm. Sen suorittamassa visuaalisessa toiminnassa käytetään hyväksi kuituoptiikkaa. Robotin ohjaukselle on kehitetty algoritmi, jonka avulla robottia ohjataan seuraamaan sille määrättyä trajektoria niin, että koko robotti seuraa kärjen kulkemaa reittiä. Robotin päätehtävänä on toimia avaruudessa osana suurempaa huolto-robotia, mutta käytetylle teknologialle on löydetty sovelluskohteita myös teollisuudesta, erityisesti lääketieteestä.

/1/

Tässä työssä hyödynnettävää ADAMS -ohjelmistoa on myös sovellettu useiden erilaisten robottien tutkimiseen. Esimerkiksi Janusz Frączekin käyttää artikkelissaan “Kinematical synthesis and dynamical analysis of multilink robot using multi-body approach” hyväksi

ADAMS -ohjelmistoa multiredundantin robotin kinematiikan synteisiin ja trajektorin suunnitteluun, sekä systeemin käänteiskinematiikan ja dynamiikan ratkaisemiseen. Artikkelissa käytetään menetelmää, jossa robotin päätepistettä ajetaan haluttua trajektoria pitkin, ja nivelten asemat tallennetaan muistiin. Toisessa vaiheessa nivelille annetaan kullekin pakkoliike, jonka arvona on aikaisemmin tallennettu funktio niiden suorittamasta liikkeestä. Ajon jälkeen halutun trajektorin suorittamiseen tarvittavat ajomomentit saadaan tuloksista pakkoliikkeisten nivelrajoitteiden reaktiomomentteina. /2/

IVP:n kehitys on ollut CEA:n vastuulla ja he ovat kehittäneet nyt prototyypivaiheessa olevan mekanismin. Heidän suunnittelemansa vastaavan tyyppinen käärmerobotti on ollut koekäytössä heidän laboratoriossaan. Edellinen prototyyppi perustui samanlaiseen mekanismiin, mutta oli dimensioiltaan ja materiaaleiltaan erilainen. Sen ohjaus oli toteutettu yksinkertaisesti antamalla jokaiselle nivelelle asematietoa yksitellen. Tietokoneelle mallinnetusta 3D huoneesta voitiin seurata robotin sijoittumista huoneessa. Robotin päätepistettä asetoitiin siihen liitetyn kameran avulla ja mekanismin joustot huomioitiin jättämällä 20 cm:n turvamarginaali huoneessa oleviin esteisiin.

2.1 Toimintaympäristö

IVP:n päätehtävinä ovat seinämien liitoskohtien tarkastaminen sekä pienet huoltotoimenpiteet. Jotta reaktorin kaikki pinnat voidaan tarkastaa tulee robotin ylettyä jokaiseen pisteeseen reaktorin sisällä. Robottia ei liikuteta kiinnityspisteestään reaktorin sisällä, vaan kuusi huoltoaukkoa on sijoitettu ympäri reaktoria, joista jokaisesta ajetaan oma huoltorobotti reaktoriin. Robotin on hankala toimia aivan kiinnityspisteensä ympärillä. Robottien työalueet on jaettu päällekkäin meneviin sektoreihin, jolloin vältetään monimutkaisilta robotin asemoinneilta. Huoltotoimenpiteet voidaan suorittaa kevyillä laitteilla, jolloin robotin ei tarvitse kuljettaa suurta kuormaa. Suurimmaksi hyötykuormaksi on laskelmissa huomioitu 10 kg.

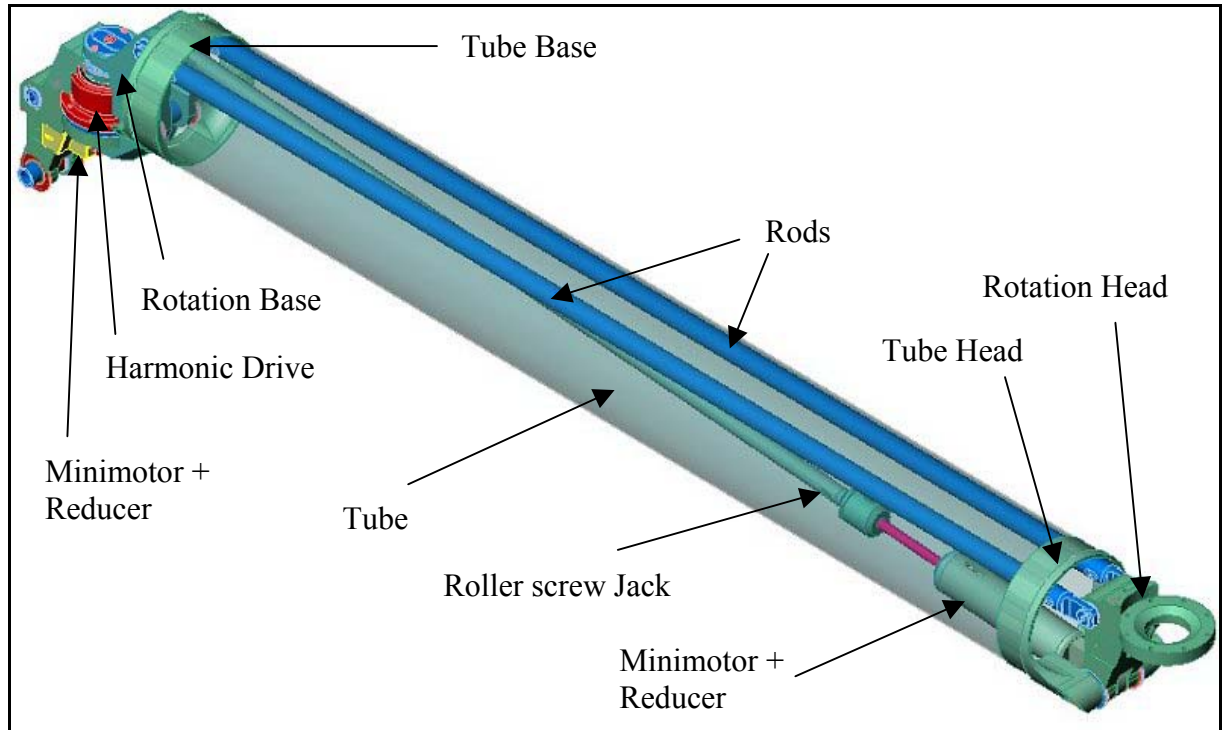
Huoltotoimenpiteet pyritään suorittamaan mahdollisimman lyhyellä reaktorin alasajolla, jolloin toimintaolosuhteet voivat olla vaativat. Suurimpia haasteita toiminnalle asettavat toimiminen tyhjiössä, sekä korkea lämpötila. Ensimmäisessä kehitysvaiheessa robotti tullaan toteuttamaan normaaleissa huoneisto-olosuhteissa, mutta myöhemmin nämä tiukentuneet toimintaympäristövaatimukset lisätään robotin vaatimuslistaan. Ympäristön lisäksi vaatimuksia asettavat robotilta vaadittavat toiminnot ja niiden suorittamistarkkuus. Vaatimus törmäyksen välttämiseksi reaktorin ja robotin välillä on erittäin tärkeä. Robotti on hidasliikkeinen, jotta fyysiset joustot ja vaikea ohjattavuus eivät johtaisi tilanteisiin, joissa hallitsematon kosketus olisi mahdollista. Robotilta vaadittavat ominaisuudet asettavat vastaavat vaatimukset myös simulointimallille. Mekaniikkamallilta tulee luonnollisesti vaatia samojen fyysisten ja toiminnallisten ominaisuuksien toteuttamista kuin todelliseltakin prototyypiltä.

IVP tunkeutuu sisäänajovaiheessa reaktorin seinämien läpi ja saavuttuaan reaktoriin se joutuu heti varomaan vastakkaista seinämää. Robottia taivutetaan ylöspäin välittömästi sen tunkeuduttua reaktoriin ja työnnetään samalla eteenpäin moduulien ollessa 40°:een kulmassa. Sisäänajossa apulaitteena on vielä suunnitteluasteella oleva kelkka. Kelkan vaikutusta ei simulointimallissa voida ottaa huomioon, sillä siitä ei ole saatavissa minkäänlaisia tietoja. Tunkeutumistie on suorakaiteen muotoinen 150 x 160 mm:n suuruinen aukko. Aukossa on 30 mm:n toleranssi, jonka sisällä robotin on pysyttävä.

2.2 Kokoonpano

IVP on viidestä samantyyppisestä moduulista koottava monen vapausasteen robotti. Kukin moduuli koostuu samanlaisesta yhdensuuntaisesta nelinivelmekanismista, ja jokaisella on kaksi kiertymävapausastetta. Moduulit eroavat toisistaan vain materiaalivahvuuksiltaan ja dimensioiltaan. Jokaista moduulia voidaan ohjata yksitellen toisistaan riippumatta, niiden omilla toimilaitteilla, sekä antureilla. Yhden moduulin pituus on 1640 mm. Kokonaisuudessaan robotin pituus on 8200 mm. Kuvassa 2.1 on esitetty yhden moduulin

kokoonpano sekä osien nimet. Tässä työssä käytetään pääasiassa osien alkuperäisiä, englanninkielisiä nimiä.



Kuv 2.1. Osien nimitykset IVP-moduulissa.

2.2.1 Nostomekanismi

Nostomekanismi, Jack, koostuu kuularuuvista ja sitä ohjaavasta sähkömoottorista. Sähkömoottorina on pieni DC –mikromoottori, joka on teholtaan 16 W. Moottoriin on liitetty alennusvaihte jonka välityssuhde on 134. Akselilta saatava suurin vääntömomentti on noin 2,5 Nm. Sähkömoottori pyörittää kierretankoa, joka liikkuu metalliputkessa kiinni olevan kuularuuvin ohjaamana. Kuularuuvin nousu on 1 mm/r. Putken sisään menevällä liikkeellä synnytetään tangon lyheneminen ja ulos suuntauvalla liikkeellä vastaavasti piteneminen. Lävistäjäsauva on molemmista päistään tuettu kiertonivelin muuhun rakenteeseen. Kiertoniveliin laakerointi on toteutettu neulalaakerein. Materiaalina moottorin tuennassa ja putkessa on käytetty titaania, kierretanko on terästä. Osan

dimensioiden muuttumisesta eri moduuleissa ei ole tarkkaa tietoa, joten kaikissa moduuleissa tullaan mallinnuksessa käyttämään samoja mittatietoja.

2.2.2 Putki

Nelinivelmekanismin alasuva on halkaisijaltaan suuri putki, Tube, joka muodostaa samalla moduulin rungon. Sen päihin on hitsattu liityntäkappaleet, Tube Base ja Tube Head, joista putki kiinnitetään epäkeskeisesti moduulin päätykappaleisiin. Kiertonivelet putken päissä on laakeroitu neulalaakerein. Tube kantaa kuormitusta pääasiassa puristuksen sekä väännön kautta. Materiaalina on titaani.

2.2.3 Vetotangot

Rodit toimivat nelinivelmekanismin ylempinä tankoina. Niiden tehtävänä mekaniismissa on pitää moduulin pää pystysuuntaisena, ja ne ovat käytännössä aina vetokuormituksen alaisina. Kun kaksi moduulia on ajettu siten, että ne ovat ensimmäisen moduulin takana on, tangoissa puristusta. Tällainen tilanne ei reaktorissa kuitenkaan ole mahdollinen. Vetotankoja on kaksi kappaletta ja ne on kiinnitetty moduulin kumpaankin päähän samalle nivelakselille. Laakerointi on toteutettu neulalaakerein. Tankojen profiilina on putki ja materiaalina teräs.

2.2.4 Päätykappaleet

Päätykappaleet ovat titaanista koneistettuja umpinaisia osia, jotka on muotoiltu siten, että sähkömoottori ja mittalaitteet eivät vaadi erillisiä lisäosia, vaan ne tukeutuvat nivelien runkoihin. Muiden mekanismin jäsenien liittäminen päätykappaleisiin tapahtuu nivelakseleilla, jotka kulkevat läpi runkokappaleiden. Päätykappaleet pysyvät mekanismin

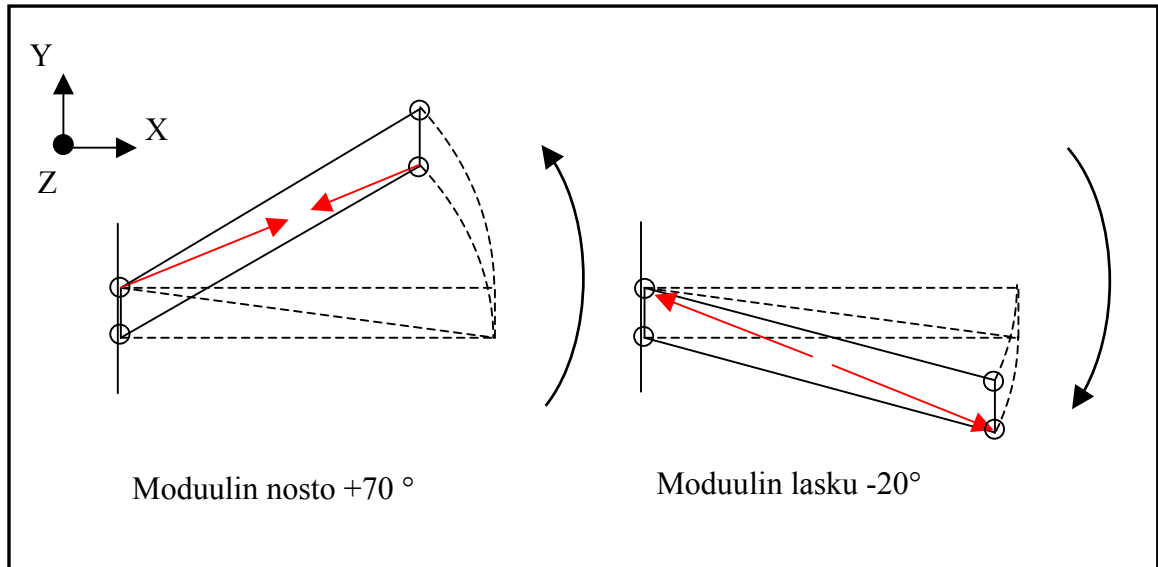
toimintaperiaatteesta johtuen aina pystysuuntaisina, jolloin saadaan yaw-suuntaisen kiertymän synnyttävien nivelien akselit pysymään aina vaakatasossa. Yaw-suuntainen liike on moduulin kiertymä globaalin Z-akselin ympäri ja pitch-liikkeellä tarkoitetaan kiertymää vaakatasossa globaalin Y-akselin ympäri. Globaalisen koordinaatiston sijaintia on havainnollistettu kuvassa 2.2.

Joustokehävaihte, harmonic drive, liittää moduulin Rotation Base -kappaleen edellisen moduulin Rotation Head -kappaleeseen, muodostaen näin kokonaisuuden; Base Joint.

2.3 Nelinivelmekanismin toiminta

Rakenteen perustana on nelinivelmekanismin perustapaus eli ns. nivelsuunnikas. Nivelsuunnikkaassa vastakkaiset sivut ovat yhtä pitkät ja yhdensuuntaiset. Mekanismin tarkoitus on pitää vaakatasossa tapahtuvan liikkeen, pitch, synnyttävä nivel pystysuuntaisena, jolloin minimoidaan staattinen momentti nivelen toimintasuunnassa. Mekanismi mahdollistaa robotille hoikan rakenteen. Nivelen suunnan säilymisen ansiosta seuraava moduuli säilyttää oman orientaationsa edellisestä riippumatta.

Nivelsuunnikkaaseen on lisätty lävistäjäsauva, joka lukitsee mekanismin. Lävistäjäsauvan pituutta muuttamalla voidaan mekanismiin synnyttää pystysuuntainen liike. Sauvaa pidentämällä nivelsuunnikkaan vapaa pää laskee ja sauvaa vastaavasti lyhentämällä voidaan päätä nostaa ylöspäin. Mekanismin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 2.2. Lävistäjäsauvassa tapahtuva pituuden muutos synnytetään kuularuuvilla, jota ohjataan DC-mikromoottorilla ja alennusvaihteella. Mekanismin vaakatasossa tapahtuva liike tapahtuu nivelsuunnikkaan juuressa olevalla kiertonivelellä. Kiertonivelessä on sitä käyttävä DC-mikromoottori, 12 W, alennusvaihte välityssuhteella 134, sekä Harmonic Drive välityssuhteella 160.



Kuv 2.2. Nivelsuunnikkaan toimintaperiaate.

Moduuli pystyy kiertymään Z-akselin ympäri, yaw, $+70^\circ / -20^\circ$. Kierro vaakatasossa Y-akselin ympäri, pitch, on mahdollista $\pm 90^\circ$. Ääriasennoissa liikettä rajoittavat osien törmäminen toisiinsa. Moduulin kiertyessä Z-akselin ympäri täydet 90° , muuttuu Jack-osan pituus noin 130 mm.

3. MEKATRONISEN KONEEN SIMULOINNIN TEORIAA

Keskeisen osan mekatronisen koneen simuloinnista muodostaa jäykän kappaleen dynamiikka. Kappaleiden muodostamaan dynaamiseen kokonaisuuteen voidaan liittää ohjauksen tai muun osajärjestelmän tuoma vaikutus ja näin simuloida konetta kokonaisuutena. Tämän kokonaisuuden täydentäminen joustavan kappaleen dynamiikalla tuo virtuaaliprototyypin käyttäytymisen jo hyvin lähelle koneen todellista toimintaa. Diplomityön teoriaosuudessa pyritään valottamaan niitä perusteita, joiden pohjalle mekaanisten osien joustavuuden huomioiva IVP-robotin virtuaaliprototyyppi on luotu. Teoriaosuuden pääasiallisena lähteenä käytettävää Ahmed A. Shabanan kirjoittamaa *Dynamics of Multibody Systems* –kirjaa voidaan pitää eräänä alansa kattavimpana perusteoksena.

3.1 Jäykän kappaleen dynamiikkaa

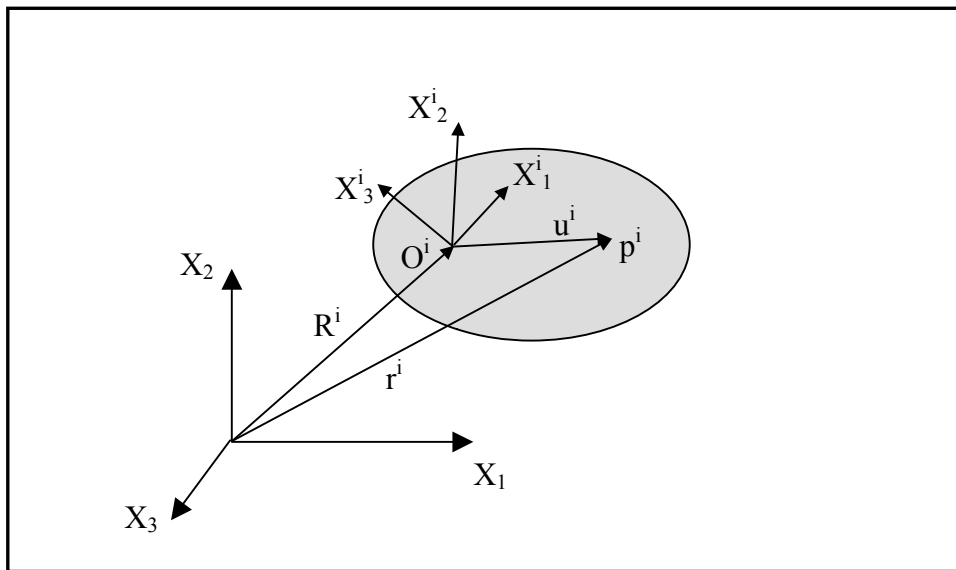
Newtonin formalismi on rakenteeltaan vektorimekaniikkaa ja johtaa nopeasti suuriin käytännöllisiin vaikeuksiin, silloin kun kysymyksessä on runsaasti kappaleita sisältävä kappalesysteemi. Nämä vaikeudet voidaan usein voittaa käyttämällä J.L.Lagrangen vuonna 1788 esittämää menettelytapaa. /3 s.249/

Luonteenomaista Lagrangen formalismille on se, että systeemin asemaa kuvataan niin sanotuilla yleistetyillä koordinaateilla, jotka sopivat karteesisia koordinaatteja huomattavasti joustavammin kuvaamaan systeemin asemaa. Voimat jaetaan ulkoisiin voimiin ja rajoitevoimiin. Tämä jako poikkeaa oleellisesti Newtonin formalismin voimien luokittelusta. Lagrangen formalismi on rakenteeltaan analyyttistä mekaniikkaa ja siinä systeemiä käsitellään kokonaisuutena kuvaamalla sitä skalaariarvoisilla funktioilla kuten liike –energia – ja potentiaalienergiafunktioilla. /3 s.249/

3.1.1 Kappaleen kuvaus avaruudessa ja kiertomatriisi

Matemaattisesti kappaleen ajatellaan koostuvan joukosta partikkeleita. Näin kappaleen ominaisuudet, kuten massa ja inertia, määritellään siihen kuuluvien partikkeleiden avulla. Kappaleeseen kuuluvat partikkelit on yleensä helpoin kuvata käyttäen lokaalista koordinaatistoa. Tämä koordinaatisto liikkuu kappaleen mukana, jolloin partikkeleiden kuvaus pysyy muuttumattomana kappaleen liikkeen aikana. Kappaleen dynamiikkaa laskettaessa tarkastellaan kappaleeseen kuuluvia partikkeleita globaalissa koordinaatistossa. Globaali koordinaatisto on liikkumaton, jolloin partikkelin kuvaus globaalissa koordinaatistossa muuttuu kappaleen liikkuessa. Partikkelin paikka globaalissa koordinaatistossa voidaan määrittää kun tiedetään partikkelin kuvauksessa käytetyn lokaalin koordinaatiston paikka ja orientaatio. /4 s.7/

Jäykän kappaleen kuvaus avaruudessa voidaan esittää kuudella koordinaatilla. Kolme koordinaattia kuvaavat kappaleen sijaintia ja kolme kappaleen orientaation. Kappaleelle i kuuluvan partikkelin P^i sijainti sen lokaalissa ja globaalissa koordinaatistossa voidaan esittää kuvan 3.1 mukaisesti.



Kuv 3.1. Pistein P^i vektoriesitys avaruudessa.

Kappaleelle i kuuluvan mielivaltaisen pisteen P^i globaali asema voidaan laskea yhtälöstä:

$$\mathbf{r}^i = \mathbf{R}^i + \mathbf{u}^i \quad (3.1)$$

missä $\mathbf{r}^i = [r_1^i r_2^i r_3^i]^T$ ilmoittaa pisteen P^i globaalien aseman, $\mathbf{R}^i = [R_1^i R_2^i R_3^i]^T$ on kappaleen lokaalin origon O^i sijaintivektori ja vektori $\mathbf{u}^i = [u_1^i u_2^i u_3^i]^T$ kuvaa pisteen P^i sijainnin globaalissa koordinaatistossa kappaleen lokaalin koordinaatiston suhteen. /5 s.11/

Vektorit \mathbf{r}^i ja \mathbf{R}^i on kuvattu globaalissa koordinaatistossa ja siksi on tärkeää pystyä kuvaamaan myös lokaalissa koordinaatistossa tunnetun pisteen P^i komponentit kiinnitetyn globaalien koordinaatiston suhteen. Transformaatiomatriisilla voidaan kappaleen lokaalissa koordinaatistossa kuvattu vektori muuntaa kiinnitettyyn globaaliin koordinaatistoon ja päinvastoin. /5 s.12/

Avaruustapauksessa lokaalin koordinaatiston rotaatio voi tapahtua kolmen eri koordinaattiakselin ympäri. Yleisessä tapauksessa rotaation ajatellaan tapahtuvan lokaalin koordinaatiston origosta lähtevän vektorin ympäri. Vektorin suunta voi olla mielivaltainen, mutta sen tulee olla yksikön pituinen. Tällöin kiertomatriisi voidaan määrittää yksikkövektorista \mathbf{v} muodostetun vinyymmetrisen matriisin $\tilde{\mathbf{v}}$ avulla yhtälöstä:

$$\mathbf{A} = \left[\mathbf{I} + \tilde{\mathbf{v}} \sin(\theta) + 2(\tilde{\mathbf{v}})^2 \cdot \sin^2 \frac{\theta}{2} \right]. \quad (3.2)$$

Missä \mathbf{I} on yksikkömatriisi ja θ lokaalikoordinaatiston kiertymä. Kiertomatriisille on kehitetty myös useita vaihtoehtoisia esitystapoja. Tällaisia ovat mm. Eulerin parametri- ja Eulerin kulma- esitykset. /4 s.12/

Jäykän kappaleen mielivaltaisen pisteen P^i paikka globaalissa koordinaatistossa saadaan yhtälöstä:

$$\mathbf{r}^i = \mathbf{R}^i + \mathbf{A}^i \bar{\mathbf{u}}^i \quad (3.3)$$

missä $\bar{\mathbf{u}}^i$ on jäykän kappaleen mielivaltaisen pisteen kuvaus lokaalissa koordinaatistossa.

/5 s.34/

3.1.2 Kappaleen nopeus ja kiihtyvyys

Partikkeli P^i kuuluu kappaleelle i , jonka lokaalin koordinaatiston paikan määrää vektori \mathbf{R}^i . Vektori $\bar{\mathbf{u}}^i$ määrittelee partikkelin P^i aseman lokaalissa koordinaatistossa. Partikkelin P^i nopeus saadaan kun vektori \mathbf{r}^i derivoidaan ajan suhteen:

$$\dot{\mathbf{r}}^i = \dot{\mathbf{R}}^i + \dot{\mathbf{A}}^i \bar{\mathbf{u}}^i + \mathbf{A}^i \dot{\bar{\mathbf{u}}}^i \quad (3.4)$$

Mikäli kappale i , johon piste P^i kuuluu, oletetaan äärettömän jäykäksi, on vektori $\bar{\mathbf{u}}^i$ vakio ajan suhteen. Näin vektorin $\bar{\mathbf{u}}^i$ aikaderivaatta $\dot{\bar{\mathbf{u}}}^i$ on nolla. /4 s.20/

Jäykän kappaleen mielivaltaisen pisteen absoluuttinen nopeus voidaan kirjoittaa muodossa:

$$\dot{\mathbf{r}}^i = \dot{\mathbf{R}}^i + \mathbf{A}^i (\bar{\boldsymbol{\omega}}^i \times \bar{\mathbf{u}}^i) \quad (3.5)$$

missä $\dot{\mathbf{R}}^i$ on kappaleen lokaalisen koordinaatiston nopeus, \mathbf{A}^i on kiertomatriisi, $\bar{\boldsymbol{\omega}}^i$ on kappaleen i kulmanopeusvektori lokaalissa koordinaatistossa ja $\bar{\mathbf{u}}^i$ pisteen P^i lokaalinen sijainti. Derivoimalla yhtälö ajan suhteen sekä käyttämällä hyväksi kiertomatriisin ominaisuuksia voidaan jäykän kappaleen pisteelle muodostaa absoluuttista kiihtyvyyttä kuvaava yhtälö:

$$\ddot{\mathbf{r}}^i = \ddot{\mathbf{R}}^i + \boldsymbol{\omega}^i \times (\boldsymbol{\omega}^i \times \mathbf{u}^i) + \boldsymbol{\alpha}^i \times \mathbf{u}^i \quad (3.6)$$

missä $\ddot{\mathbf{R}}^i$ on kappaleen lokaalin koordinaatiston kiihtyvyyssvektori, $\boldsymbol{\omega}^i$ ja $\boldsymbol{\alpha}^i$ ovat kulmanopeus sekä kulmakiihtyvyyssvektoreita globaalissa koordinaatistossa, ja \mathbf{u}^i on vektori $\mathbf{u}^i = \mathbf{A}^i \bar{\mathbf{u}}^i$. Kiihtyvyyssvektori $\ddot{\mathbf{r}}^i$ voidaan määrittellä myös lokaalissa koordinaatistossa, jolloin se on muotoa:

$$\ddot{\mathbf{r}}^i = \ddot{\mathbf{R}} + \mathbf{A}^i [\bar{\boldsymbol{\omega}}^i \times (\bar{\boldsymbol{\omega}}^i \times \bar{\mathbf{u}}^i)] + \mathbf{A}^i (\bar{\boldsymbol{\alpha}}^i \times \bar{\mathbf{u}}^i) \quad (3.7)$$

missä $\bar{\boldsymbol{\omega}}^i$ ja $\bar{\boldsymbol{\alpha}}^i$ ovat kulmanopeus ja kulmakiihtyvyyssvektoreita lokaalin koordinaatiston suhteen. /5 s.62/

3.1.3 Yleistetyt koordinaatit

Yleistetyillä koordinaateilla tarkoitetaan muuttujia, jotka täydellisesti kuvaavat jokaisen systeemiin kuuluvan kappaleen aseman sekä orientaation. Avaruustapauksessa yhden jäsenen aseman sekä orientaation täydelliseen kuvaamiseen tarvitaan yleistettyjen koordinaattien vektori:

$$\mathbf{q}^i = \left[\mathbf{R}_1^i \quad \mathbf{R}_2^i \quad \mathbf{R}_3^i \quad \boldsymbol{\theta}^{iT} \right]^T \quad (3.8)$$

missä \mathbf{R}_1^i , \mathbf{R}_2^i , ja \mathbf{R}_3^i määrittävät kappaleen koordinaatiston globaalien aseman ja vektori $\boldsymbol{\theta}^i$ on vektori joka määrittää kiertomatriisin kuvauksessa käytetyt rotaatiokoordinaatit. Eulerin kulmia ja Rodriguezin parametrejä käytettäessä sisältää $\boldsymbol{\theta}^i$ kolme muuttujaa. Avaruustapauksessa kolmea orientaatiokoordinaattia käyttämällä muodostuu \mathbf{q}^i termistä kuuden alkion pituinen vektori. /5 s.91/

Useasta jäykästä kappaleesta koostuvan järjestelmän kuvaamiseen avaruudessa tarvitaan $6n$ kappaletta yleistettyjä koordinaatteja, missä n on kappaleiden lukumäärä. Yleistetyt koordinaatit eivät ole täysin riippumattomia systeemissä vallitsevien rajoitteiden johdosta.

Yleistetyt koordinaatit sekä nopeudet yhdistävien rajoitteiden kautta systeemissä yhden jäsenen liikkeeseen vaikuttavat myös muiden jäsenten liikkeet. Systeemin hallitsemisen kannalta on tärkeää eritellä itsenäiset yleistetyt koordinaatit, joita voidaan kutsua myös systeemin vapausasteiksi. /5 s.91/

3.1.4 Kinemaattiset rajoitteet

Yleistetyt koordinaatit eivät ole toisistaan täysin riippumattomia, sillä systeemin nivelet synnyttävät vuorovaikutusta eri koordinaattien välille. Kappaleiden vuorovaikutukset kuvataan rajoiteyhtälöiden avulla. Rajoiteyhtälöt luovat systeemille kinemaattisia sideehtoja, jotka vähentävät systeemin liikemahdollisuuksia. Yleistetyt koordinaatit voidaan kuvata vektorilla:

$$= [q_1 q_2 q_3 \dots q_n]^T \quad (3.9)$$

missä n on yleistettyjen koordinaattien lukumäärä. Rajoiteyhtälöiden lukumäärä tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin koordinaattien lukumäärä n . Mikäli nämä rajoiteyhtälöt voidaan esittää muodossa:

$$\mathbf{C}(q_1 q_2 \dots q_n, t) = \mathbf{C}(\mathbf{q}, t) = 0 \quad (3.10)$$

missä $\mathbf{C} = [C_1(\mathbf{q}, t) C_2(\mathbf{q}, t) \dots C_{n_c}(\mathbf{q}, t)]^T$ on riippumattomien rajoiteyhtälöiden joukko, kutsutaan rajoitteita holonomisiksi. Mikäli rajoiteyhtälöissä ei esiinny aikaa t , sanotaan rajoitteita skleronomisiksi. Mikäli rajoitteet koskevat sekä koordinaatteja että aikaa, mutta niitä ei silti voida kirjoittaa yhtälön 10 mukaan, ovat ne epäholonomisia. Kiertonivel on yksinkertainen esimerkki skleronomisesta rajoitteesta. /5 s.92/

Holonomisessa systeemissä rajoiteyhtälöiden ollessa lineaarisesti riippumattomia, voidaan jokaista rajoiteyhtälöä käyttää poistamaan yksi yleistetty koordinaatti kirjoittamalla tämä

muiden koordinaattien avulla. Tästä johtuen systeemillä, jolla on n kappaletta yleistettyjä koordinaatteja ja n_c kappaletta rajoiteyhtälöitä, voidaan riippumattomien koordinaattien lukumäärä laskea kaavalla $n - n_c$. Tämä on samalla systeemin vapausasteiden lukumäärä.

/5 s.99/

Yleistetyt koordinaatit voidaan jakaa rajoiteyhtälöiden avulla riippuviin \mathbf{q}_d ja riippumattomiin \mathbf{q}_i yleistettyihin koordinaatteihin. Koordinaatit voidaan esittää vektorimuodossa:

$$= \begin{bmatrix} r & r \\ i & d \end{bmatrix}^T. \quad (3.11)$$

Vektorit \mathbf{q}_i ja \mathbf{q}_d koostuvat $n - n_c$ ja n_c määrästä komponentteja. Jako riippuviin ja riippumattomiin koordinaatteihin voidaan valita vapaasti, joten riippuvat ja riippumattomat koordinaatit eivät ole yksiselitteisiä. /5 s.100, 3 s.25/

3.1.5 Jacobin matriisi

Virtuaalisen työn avulla löydetään systeemin energian minimi, joka on samalla systeemin tasapainotila. Kun systeemin yleistettyihin koordinaatteihin kohdistetaan virtuaalinen siirtymä, saadaan muodostettua systeemin Jacobin matriisi, joka koostuu rajoiteyhtälöiden osittaisderivaatoista yleistettyjen koordinaattien suhteen. /4 s.26/

Virtuaalisen siirtymän $\delta \mathbf{q}$ sekä Taylorin sarjakehitelmän avulla voidaan yhtälö 10 johtaa muotoon:

$$\mathbf{C}_{q_1} \delta q_1 + \mathbf{C}_{q_2} \delta q_2 + \dots + \mathbf{C}_{q_n} \delta q_n = 0 \quad (3.12)$$

$$\text{missä } \mathbf{C}_{q_i} = \partial \mathbf{C} / \partial q_i = \begin{bmatrix} \partial \mathbf{C}_1 / \partial q_i & \partial \mathbf{C}_1 / \partial q_i & \dots & \partial \mathbf{C}_{n_c} / \partial q_i \end{bmatrix}^T.$$

Yhtälö 12 voidaan kirjoittaa muotoon:

$$\mathbf{C}_q \delta = 0 \quad (3.13)$$

missä,

$$\mathbf{C}_q = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ C_{n_c1} & C_{n_c2} & \cdots & C_{n_cn} \end{bmatrix}. \quad (3.14)$$

\mathbf{C}_q on $n_c \times n$ matriisi, jota kutsutaan systeemin Jacobin matriisiksi. /5 s.100/

3.1.6 Yleistetyt voimat

Tärkeä askel Lagrangen monen kappaleen dynamiikkaa kuvaavissa yhtälöissä on yleistettyihin koordinaatteihin liittyvien yleistettyjen voimien ratkaiseminen. Yleistettyjä voimia voidaan käsitellä soveltamalla virtuaalisen työn periaatetta joukkoon partikkeleita. Olettamalla jäykän kappaleen koostuvan suuresta määrästä partikkeleita, voidaan vastaavanlainen menettely kohdistaa kokonaisille kappaleille. Virtuaalisen työn periaate staattisessa tapauksessa on muotoa:

$$\delta W = \delta W_e = \sum_{i=1}^{n_p} \mathbf{F}_e^i \cdot \delta \mathbf{r}^i = 0 \quad (3.15)$$

missä δW tarkoittaa systeemin virtuaalista työtä, δW_e on ulkoisten voimien tekemä virtuaalinen työ, \mathbf{F}_e^i on ulkoisten voimien vektori partikkeliin i ja $\delta \mathbf{r}^i$ on sen virtuaalinen siirtymä. Yhtälö ilmaisee partikkelisysteemin ulkoisten voimien tekemän virtuaalisen työn olevan nolla, kun rajoitevoimat eivät tee työtä. Kaikkien partikkeleiden ulkoiset voimat eivät kuitenkaan ole nollia, sillä rajoitteita sisältävässä partikkelisysteemissä \mathbf{r}^i , ($i = 1, 2, \dots, n_p$) vektorit eivät ole täysin riippumattomia. / 5 s.116, 109/

Yleistettyjä koordinaatteja hyväksikäyttäen yhtälö 15 saadaan muotoon:

$$\delta W = \delta W_e = \sum_{j=1}^n Q_j \delta q_j = \mathbf{Q}^T \delta \mathbf{q} = 0 \quad (3.16)$$

missä $\mathbf{Q} = [Q_1 \ Q_2 \ \dots \ Q_n]^T$ on yleistettyjen voimien vektori. Vektorin termi Q_j ilmaisee yleistettyyn koordinaattiin q_j liittyvän voimakomponentin. /5 s.108/

Virtuaalisen työn periaate on edellä esitetyllä tavalla sovellettavissa myös dynaamiseen liikkeeseen. Newtonin toisen lain mukaan partikkelin vaikuttavien voimien summan tulee dynaamisessa tasapainotilassa olla yhtä suuri kuin liikemäärän muutos:

$$\mathbf{F}^i = \dot{\mathbf{P}}^i \quad (3.17)$$

Soveltamalla virtuaalisen työn periaatetta yhdessä voimavektorin kanssa voidaan D'Alembertin periaate kirjoittaa muodossa:

$$\sum_{i=1}^{n_p} (\mathbf{F}_e^i - \dot{\mathbf{P}}^i) \cdot \delta \mathbf{r}^i = 0 \quad /5 s.114/ \quad (3.18)$$

3.1.7 Lagrangen dynamiikka

Lagrangen yhtälö voidaan nähdä energiakeskeisenä lähestymistapana systeemin dynamiikan tutkimiseksi. Monet kaupalliset dynamiikan simulointiohjelmat perustuvat Lagrangen yhtälöön tai siitä sovellettuihin yhtälöihin. Lähtökohtana Lagrangen yhtälössä on Newtonin toinen laki johon sovelletaan D'Alembertin sekä virtuaalisen työn periaatteita. /4 s.33/

D'Alembertin yhtälöä ja kineettisen energian lauseketta hyväksi käyttäen voidaan Lagrangen yhtälö saattaa muotoon:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} - Q_j = 0 \quad (3.19)$$

missä T on partikkelisysteemin totaalinen kineettinen energia, q_j on yleistetyt koordinaatit ja Q_j on yleistettyihin koordinaatteihin liittyvä yleistetty voimakomponentti. /5 s.122/

Rajoiteyhtälöt lisätään usein liikeyhtälöihin Lagrangen kertoimien avulla. Lagrangen kertoimien käyttö ei vähennä systeemin differentiaaliyhtälöiden määrää, vaan lisää yhtälöryhmään rajoitteita kuvaavia algebraliyhtälöitä. Tällöin systeemin dynamiikan kuvaamiseen käytetään yhtä monta differentiaaliyhtälöä kuin systeemillä on yleistettyjä koordinaatteja sekä n_c kappaletta algebraliyhtälöitä. Saaduista yhtälöistä muodostuu varsin yksinkertaisia ja siten suhteellisen nopeita ratkaista ja muodostaa. Menettelyllä saadut liikeyhtälöt sisältävät rajoitevoimien kuvaukset. /4 s.36/

Kun rajoiteyhtälöt huomioidaan Lagrangen kertoimilla saadaan liikeyhtälö muotoon:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right)^T - \left(\frac{\partial T}{\partial \mathbf{q}} \right)^T + \mathbf{C}_q^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{Q}. \quad (3.20)$$

Yhtälö muodostaa nyt liikettä kuvaavien differentiaaliyhtälöiden joukon, joka yhdessä rajoiteyhtälöiden kanssa voidaan ratkaista systeemin yleistettyjen koordinaattien \mathbf{q} sekä Lagrangen kerrointen $\boldsymbol{\lambda}$ suhteen. Tätä yhtälöä käytetään usein perustana kehitettäessä yleisiä laskenta-algoritmejä niin holonomisten kuin epäholonomisten kappalesysteemien dynamiikan analysointiin. /5 s.127/

3.1.8 Massamatriisi

Jäykän kappaleen massamatriisi saadaan sijoittamalla kappaleeseen kuuluvien partikkeleiden nopeudet ja tiheydet kappaleen kineettisen energian lausekkeeseen. Kappaleen massamatriisi voidaan esittää muodossa: /4 s.40/

$$\mathbf{M}^i = \begin{bmatrix} i_{RR} & i_{R\theta} \\ i_{\theta R} & i_{\theta\theta} \end{bmatrix}. \quad (3.21)$$

Massamatriisin termi $m_{\theta\theta}^i$ määrittelee kappaleen massahitausmomentin lokaalin koordinaatiston suhteen. Termi m_{RR}^i on matriisi, jonka diakonaalitermit ovat kappaleen kokonaismassoja. Vektori $m_{R\theta}^i$ määrittelee kappaleen hitaustulon kappaleen lokaalin koordinaatiston suhteen. Erikoistapauksessa, jossa kappaleen massakeskipiste sijaitsee osan lokaalissa origossa, saa matriisi $m_{R\theta}^i$ arvon nolla. /5 s.152/

3.1.9 Neliöllinen nopeusvektori

Kun Lagrangen yhtälöön sijoitetaan kineettisen energian lauseke ilmaistuna massamatriisin ja yleistettyjen koordinaattien avulla, saadaan yhtälö muotoon jonka erästä termiä kutsutaan neliölliseksi nopeusvektoriksi. Neliöllinen nopeusvektori voidaan ilmaista yhdelle kappaleelle muodossa:

$$\mathbf{Q}_v^i = -\dot{\mathbf{M}}^{i \cdot i} + \left(\frac{\partial T^i}{\partial \dot{i}} \right)^T. \quad (3.22)$$

Koko systeemin dynamiikkaa voidaan nyt kuvata yhtälöllä:

$$\mathbf{M}'' + \mathbf{C}_q^T \lambda = \mathbf{Q}_e + \mathbf{Q}_v \quad (3.23)$$

missä massamatriisi \mathbf{M} on matriisi systeemin kaikkien kappaleiden massamatriiseista ja \mathbf{q} on systeemin kaikki yleistetyt koordinaatit. /5 s.155/

Neliöllinen nopeusvektori huomioi kappaleen pyörimisestä syntyvän keskipakovaikutuksen kappaleen lokaaliin koordinaatistoon. /4 s.45/

3.1.10 Liikkeyhtälöiden muotoilu

Kinemaattiset rajoitteet eri kappaleiden välillä voidaan huomioida vektorimuodossa:

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, t) = 0. \quad (3.24)$$

Missä \mathbf{C} on vektori itsenäisistä rajoiteyhtälöistä, t on aika ja \mathbf{q} on vektori systeemin kaikista yleistetyistä koordinaateista.

Differentiaaliyhtälö 23 edustaa yhdessä kinemaattisen rajoitevektorin 24 kanssa rajoitetun systeemin dynaamisia yhtälöitä. Nämä dynaamiset yhtälöt ovat yleisesti epälineaarisia ja niiden ratkaiseminen suljetussa muodossa on usein hankalaa. Yhtälöt saadaan helpommin ratkaistavaan muotoon kun yhtälö 24 derivoidaan ensin kaksi kertaa ajan suhteen jolloin saadaan: /5 s.155/

$$\mathbf{C}_q'' = -\mathbf{C}_{tt} - (\mathbf{C}_q')_q \dot{\mathbf{q}} - 2\mathbf{C}_{qt} \dot{t} \quad (3.25)$$

merkitsemällä:

$$\mathbf{C}_q'' = \mathbf{Q}_c \quad (3.26)$$

voidaan liikkeyhtälö kirjoittaa muotoon:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{C}_q^T \\ \mathbf{C}_q & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_e + \mathbf{Q}_v \\ \mathbf{Q}_c \end{bmatrix}. \quad (3.27)$$

Liikkeyhtälö on nyt ryhmä algebraaliyhtälöitä, josta voidaan ratkaista kiihtyvyyksvektori \ddot{q} sekä Lagrangen kertoimet λ . Annetuilla alkuehdoilla kiihtyvyyksvektori voidaan integroida ja näin ratkaista nopeudet sekä yleistetyt koordinaatit. /5 s.156/

3.2 Joustavan kappaleen kuvaus

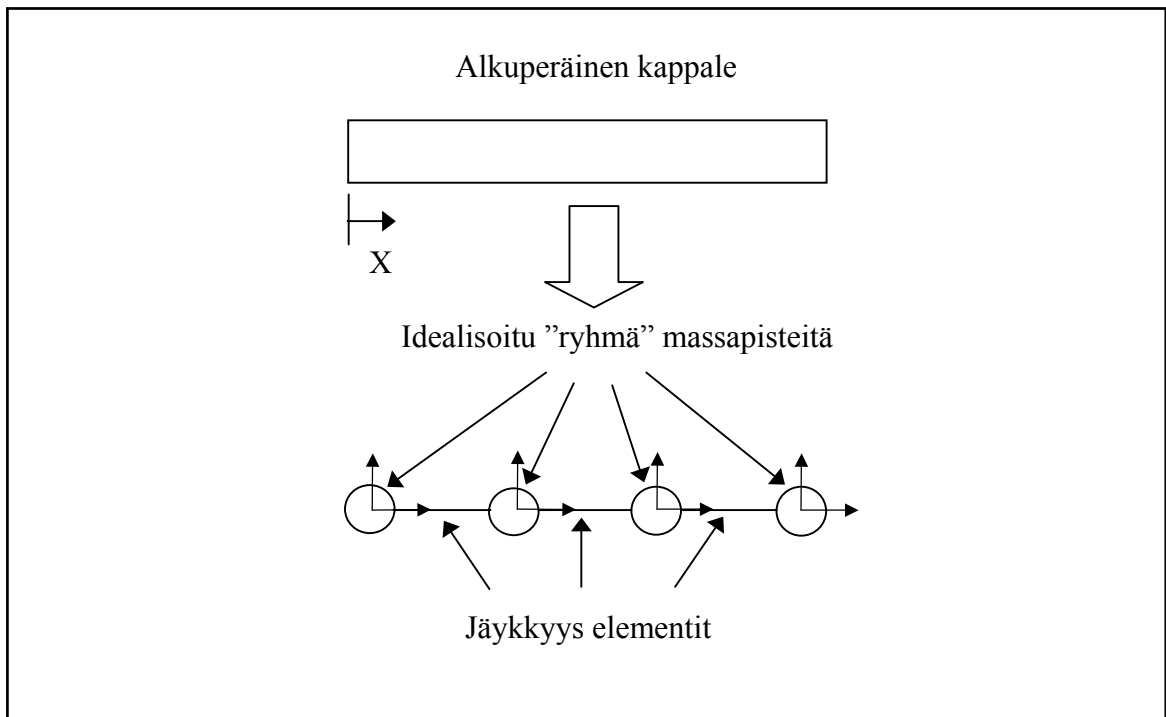
Mekanismin jäsenet ovat matemaattisessa mielessä aina joustavia. Käytännössä mekaanisten jäsenten joustoa ei monestikaan ole tarvetta huomioida. Yleispätevää sääntöä siitä, milloin mekaanisen jäsenen joustokäyttäytyminen on niin merkittävää että se tulee huomioida simuloinneissa, ei ole olemassa. Joustava systeemin dynaaminen analyysi on kohtuullisen vaikea tehtävä, joka voidaan ratkaista ainakin kahdella periaatteellisella tavalla; keskittyneiden massojen periaatteella tai jäsenen moodien avulla. /4 s.55/

Jäykän kappaleen kuvaamisessa käytettävät koordinaatit ovat riittävät kuvaamaan kappaleen mielivaltaisen pisteen ja orientaation. Tämä on mahdollista, sillä jäykän kappaleen kaksi mielivaltaista pistettä säilyttävät etäisyytensä. Joustavien kappaleiden kohdalla tämä ei enää pidä paikkaansa. Kaksi mielivaltaista pistettä joustavassa kappaleessa liikkuu suhteellisesti toisiinsa nähden ja tämän seurauksena referenssikoordinaatisto ei enää ole riittävä kuvaamaan joustavan kappaleen kinematiikkaa. /5 s.15/

Yksinkertaisellakin rakenteella on matemaattisessa mielessä ääretön määrä vapausasteita. Käytännössä rakenteen käyttäytymistä voidaan tutkia riittävällä tarkkuudella käyttämällä äärellistä määrää vapausasteita. Jatkuvan systeemin korvaamista pistejoukolla kutsutaan diskretisoinniksi. Sekä keskittyneiden massojen että moodien avulla tapahtuvat kuvaukset nojautuvat diskretisointiin vaikka ne muutoin eroavatkin toisistaan selkeästi. /4 s.56/

3.2.1 Keskittyneiden massojen periaate

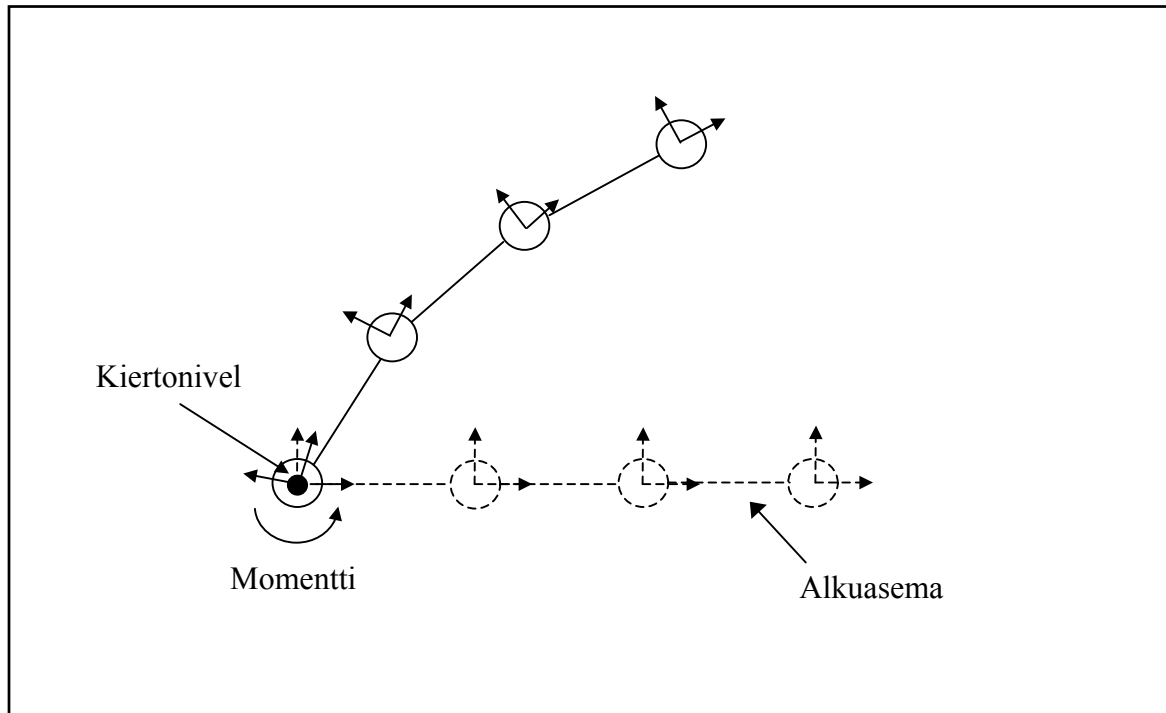
Periaate voidaan nähdä jäykkien mekanismien erikoistapauksena ja menetelmässä itse asiassa käytetään jäykistä mekanismeista tuttuja liikeyhtälöitä. Menetelmässä joustavana mallinnettava mekanismin jäsen pilkotaan useisiin massapisteisiin, joista jokaiselle muodostetaan liikeyhtälöt. Massakeskipisteiden välille mallinnetaan jousia, jotka kuvaavat jäsenen joustoa. Kuvassa 3.2 on esitetty joustavan palkkimaisen jäsenen idealisointi massapisteisiin ja niiden välisiin jousiin. Jousivoimista muodostetaan yleistetty voimavektori, jolloin joustavia jäseniä sisältävän systeemin dynamiikka voidaan ratkaista samoin kuin jäykän kappaleen dynamiikka. /4 s.56/



Kuv 3.2. Joustavan jäsenen idealisointi massapisteisiin. /4 s.56/

Joustavan jäsenen toimintaa on havainnollistettu kuvassa 3.3, jossa jäsenen toinen pää on kiinnitetty kiertonivelellä. Nivelessä vaikuttaa momentti, joka synnyttää ensimmäisessä massakeskipisteessä kulmakiihtyvyyden $\ddot{\theta}_1$. Kuvasta nähdään, että toisen massapisteen asema suhteessa ensimmäiseen massapisteeseen on muuttunut alkuperäisestä tilanteesta.

Näin toiseen massapisteeseen kohdistuu jousivoima, joka synnyttää pisteessä kulmakiihtyvyyden $\ddot{\theta}_2$. Joustavan jäsenen deformaatio muodostuu siis sarjasta siirtymiä. Menetelmä soveltuu parhaiten palkkimaisille kappaleille, joilla on alhaisia ominaistajuuksia sillä tällaisissa kappaleissa selvittää pienellä massapisteiden lukumäärällä. /4 s.57/



Kuv 3.3. Joustavan jäsenen deformaatio. /4 s.57/

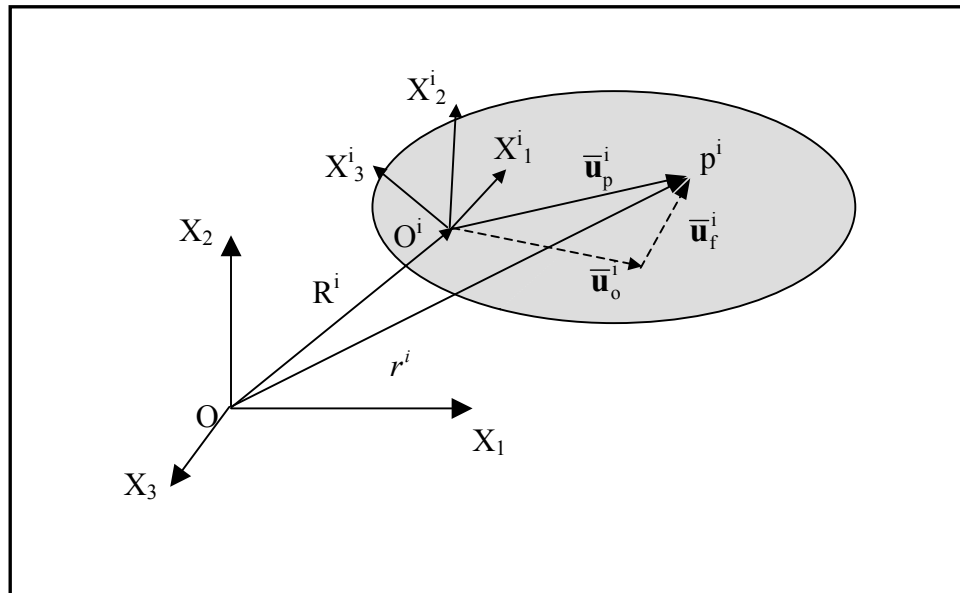
3.2.2 Kappaleen moodien hyväksikäyttö

Mekaanisen jäsenen joustoa on mahdollista kuvata käyttäen hyväksi jäsenen moodeja. Tyypillisesti moodit ovat sen ominaismuotoja, mutta ne voivat olla myös ”keksittyjä” tai oletettuja rakenteen deformaatiomuotoja. Moodien avulla voidaan kuvata periaatteessa mielivaltaisen jäsenen joustoa. Käytännössä yleisin tapa muodostaa jäsenen moodeja on elementtimenetelmä. /4 s.57/

Menetelmän perustana on erottaa kappaleen deformaatio referenssiliikkeestä. Referenssiliike on jäykän kappaleen liikettä, kun taas deformaatio nähdään kappaleen värähtelynä referenssiliikkeen ympärillä. Kappaleen dynamiikan ajatellaan siis syntyvän jäykän kappaleen liikkeestä johon superponoituu kappaleen deformaatio. Jäykän kappaleen liikkeen ja deformaation välinen vuorovaikutus huomioidaan massamatriisin ja neliöllisen nopeusvektorin avulla. Tämä mahdollistaa tarkan massajakauman ja inertian mallinnuksen.
/4 s.58/

3.2.3 Joustavan jäsenen kinematiikkaa

Kuvassa 3.4 on esitetty joustava jäsen i johon partikkeli P^i kuuluu. Deformoitumattomassa tilassa partikkelin paikan kappaleen lokaalissa koordinaatistossa määrittelee vektori $\bar{\mathbf{u}}_0^i$.



Kuv 3.4. Joustavan kappaleen koordinaatisto. /5 s.194/

Deformoituneessa tilassa pisteen P^i sijainnin muutosta kuvataan vektorilla $\bar{\mathbf{u}}_f^i$. Partikkelin paikkaa globaalissa koordinaatistossa voidaan nyt kuvata yhtälöllä:

$$\mathbf{r}^i = \mathbf{R}^i + \mathbf{A}^i \bar{\mathbf{u}}_p^i = \mathbf{R}^i + \mathbf{A}^i (\bar{\mathbf{u}}_o^i + \bar{\mathbf{u}}_f^i). \quad (3.28)$$

Vektorin $\bar{\mathbf{u}}_f^i$ käyttäytymistä voidaan kuvata sarjalla rinnakkaisia differentiaaliyhtälöitä. Soveltamalla muuttujien erottelua saadaan yhtälöiden ratkaisuksi, mikäli se on mahdollista, deformaatiota kuvaavia äärettömiä sarjoja. Laskennallisista syistä tällaisia teoreettisia sarjoja ei voida käyttää joustavan rakenteen analysoinnissa. Vektoria $\bar{\mathbf{u}}_f^i$ voidaan parhaiten aproksimoida elementtimenetelmän avulla. /4 s.58/

3.2.4 Moodien superponointi

Tyypillisesti muotojen superponointitekniikalla saavutetaan kohtuullisen tarkka tulos vaikka käytetään vain muutamaa ominaismuotoa. Näin voidaan kuitenkin huomattavasti vähentää tehtävän ratkaisemiseksi tarvittavaa laskentakapasiteettia. Tämä ominaisuus tekee muotojen superponointitekniikan ylivertaiseksi silloin kun elementtimenetelmää käytetään osana dynamiikan simulointia. /4/

Joustavan jäsenen deformaatiota kuvaava vektori \mathbf{u}_f on funktio ajasta, jolloin sen muodostaminen edellyttää dynaamista analyysiä. Elementtimenetelmässä elementin dynaamiseksi tasapainoyhtälöksi eli liikeyhtälöksi saadaan:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (3.29)$$

missä \mathbf{u} solmujen siirtymiä kuvaava vektori, $\dot{\mathbf{u}}$ kuvaa solmujen nopeutta ja $\ddot{\mathbf{u}}$ kiihtyvyyttä. Matriisi \mathbf{M} on elementin massamatriisi ja \mathbf{K} jäykkyydematriisi. Vektori \mathbf{F} kuvaa elementtiin vaikuttavia voimia ja \mathbf{C} on vaimennusmatriisi. /6 s.432/

Joustavan jäsenen diskretisointi elementtimenetelmällä korvaa äärettömän määrän vapausasteita äärellisellä, mutta suurella määrällä vapausasteita. Elementtimenetelmän siirtymätilaa \mathbf{u} voidaan aproksimoida pienellä määrällä ominaismuotovektorin $\boldsymbol{\varphi}_i$ lineaarikombinaatioita:

$$\mathbf{u} = \sum_{i=1}^M \boldsymbol{\varphi}_i \mathbf{p}_i = \boldsymbol{\Phi} \mathbf{p} \quad (3.30)$$

missä M on moodien lukumäärä, $\boldsymbol{\Phi}$ on ominaismuotojen muotomatriisi, suurennuskerroin tai amplitudi, \mathbf{p} , on modaalikoordinaattien muodostama vektori. /7 s.2/

Menetelmän perusidea, tarvittavien ominaismuotojen hyväksikäyttö, asettaa käytännön mallinnustyöhönkin vaikuttavan kysymyksen: mitkä ominaismuodot tulee valita, jotta kaikki tarvittavat deformaatiot saadaan kuvattua mahdollisimman pienellä määrällä ominaismuotoja? Tähän kysymykseen teoria ei anna yksiselitteistä vastausta.

3.2.5 Reunaehtojuen huomioiminen

Joustava jäsen tulee voida kiinnittää simulointimalliin samoja nivelmalleja hyväksi käyttäen kuin jäykkäkin kappale. Tämä aiheuttaa ongelmia erityisesti nivelrajoitteiden muuttuessa simuloinnin aikana. Ominaismuodothan ovat erilaiset erilaille tuetuille kappaleille.

Ratkaisuna reunaehtojuen huomioimiselle voidaan käyttää osarakennetekniikkaa (component mode synthesis). Eräs yleisesti, esimerkiksi ADAMS –ohjelmistossa, käytetty Craig-Bampton –menetelmä hyödyntää tätä tekniikkaa. Menetelmässä koko rakenteen vapausasteiden joukosta valitaan ne vapausasteet, jotka eivät osallistu muotojen superponointiin. Näitä vapausasteita kutsutaan reunaehtovapausasteiksi. Menetelmässä ominaismuodot ja -arvot lasketaan tukemattomalle kappaleelle ja sen lisäksi rakenteelle lasketaan staattisia korjausmuotoja, joiden avulla reunaehdot huomioidaan. /7 s.3/

Ottarssonin artikkelissa ”Appendix D Theoretical Background”, menetelmää sovelletaan niin, että liityntäpisteet ovat pisteitä joihin nivelrajoitteet voidaan kohdistaa. /7/

Craig-Bambton –menetelmässä oletetaan osarakenteen r jäykkyyismatriisi \mathbf{K}_r tunnetuksi. Jaottelemalla jäykkyyismatriisi liityntävapausasteiden ja sisäisten vapausasteiden kesken voidaan staattinen voimatasapaino esittää muodossa:

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{F}^B \\ \mathbf{F}^I \end{Bmatrix}_r = \begin{bmatrix} \mathbf{K}^{BB} & \mathbf{K}^{BI} \\ \mathbf{K}^{IB} & \mathbf{K}^{II} \end{bmatrix}_r \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\delta}^B \\ \boldsymbol{\delta}^I \end{Bmatrix}_r \quad (3.31)$$

missä $\boldsymbol{\delta}_r^B$ on liityntäpisteiden fyysinen siirtymävektori ja $\boldsymbol{\delta}_r^I$ on sisäisten pisteiden fyysinen siirtymävektori. /8/

Reunaehtomuodot kuvataan sisäisten vapausasteiden moodimuotoina asettamalla yksikön suuruinen siirtymä reunavapausasteille pitäen samalla kaikki muut reunaehtovapausasteet täysin lukittuina. Reunaehtomuotojen määrittämiseksi asetetaan sisäisten vapausasteiden voimat nolliksi. Alaindeksi r voidaan jättää merkinnöistä pois. /8/ Yhtälöstä 31 saadaan:

$$0 = \mathbf{K}^{IB} \boldsymbol{\delta}^B + \mathbf{K}^{II} \boldsymbol{\delta}^I \quad (3.32)$$

tai

$$\boldsymbol{\delta}^I = -\mathbf{K}^{II^{-1}} \mathbf{K}^{IB} \boldsymbol{\delta}^B \equiv \boldsymbol{\Phi}^C \boldsymbol{\delta}^B \quad (3.33)$$

Matriisi $\boldsymbol{\Phi}^C$ on haluttu matriisi reunaehtomuodoista. /8/

Keskittyneiden massojen periaatteella muodostetulle massamatriisille voidaan tehdä vastaavanlainen osittelu kuin jäykkyyismatriisille jolloin se voidaan kirjoittaa muodossa:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}^{BB} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}^{II} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

missä BB viittaa reunaehtovapausasteisiin ja II sisäisiin vapausasteisiin. /8/

Tukemattoman kappaleen ominaisuudet eli normaalimuodot voidaan ratkaista yhtälöstä:
/9/

$$(\mathbf{K}^H - \omega^2 \mathbf{M}^H) \Phi^N = 0. \quad (3.35)$$

missä ω on ominaisarvovektori. Fyysisten vapausasteiden ja Craig-Bampton –muotojen ja niiden modaalikoordinaattien välinen riippuvuus kuvataan yhtälöllä:

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} \mathbf{u}^B \\ \mathbf{u}^I \end{Bmatrix} \cong \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \Phi^C & \Phi^N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{p}^C \\ \mathbf{p}^N \end{Bmatrix} = \hat{\Phi} \mathbf{p} \quad (3.36)$$

,

\mathbf{u}^B on osarakenteen liityntävapausaste,

\mathbf{u}^I on sisäinen vapausaste,

$\mathbf{I}, \mathbf{0}$ ovat yksikkö- ja nollamatriiseja,

Φ^C on sisäisten vapausasteiden fyysiset siirtymät staattisissa korjausmuodoissa,

Φ^N on sisäisten vapausasteiden fyysiset siirtymät normaalimuodoissa,

\mathbf{p}^C on staattisten korjausmuotojen modaalikoordinaatit,

\mathbf{p}^N on normaalimuotojen modaalikoordinaatit.

Nyt voidaan muodostaa yleistetty jäykkymatriisi:

$$\hat{\mathbf{K}} = \hat{\Phi}^T \mathbf{K} \hat{\Phi} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{K}}^{CC} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \hat{\mathbf{K}}^{NN} \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

ja yleistetty massamatriisi:

$$\hat{\mathbf{M}} = \hat{\Phi}^T \mathbf{M} \hat{\Phi} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{M}}^{CC} & \hat{\mathbf{M}}^{CN} \\ \hat{\mathbf{M}}^{NC} & \hat{\mathbf{M}}^{NN} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

missä C viittaa staattisiin korjausmuotoihin ja N normaalimuotoihin. /7 s.4/

Saadut yleistetyt jäykkyys- ja massamatriisit eivät ole diakonaalisia, eivätkä sovellu suoraan dynamiikan simulointiin. Craig-Bampton –muodoilla on myös joitakin ei toivottuja ominaisuuksia, jotka tulee huomioida ennen niiden käyttämistä simuloinnissa. Niiden staattiset korjausmuodot sisältävät 6 jäykän kappaleen liikettä kuvaavaa muotoa, jotka tulee erotella ja poistaa ennen dynaamista analyysiä. Staattiset korjausmuodot eivät sisällä epälinearisessa simuloinnissa tarvittavaa tietoa niiden taajuuksista. Korjausmuotoja ei myöskään voida poistaa, sillä se vastaisi rajoitteiden asettamista rakenteelle. /7 s.6/

Edellä esitetyt ongelmat ratkaistaan ortogonalisoinnilla jäykkyys- ja massamatriisit. Ortogonalisoinnissa yleistetyillä jäykkyys- ja massamatriiseilla ratkaistaan ominaisarvotehtävä:

$$\hat{\mathbf{K}}\mathbf{p} = \omega^2 \hat{\mathbf{M}}\mathbf{p} \quad (3.39)$$

ja muodostetaan transformaatiomatriisi \mathbf{N} , jonka avulla siirrytään modaalikoordinaateista ortogonaalisiin koordinaatteihin:

$$\mathbf{N}\mathbf{p}^* = \mathbf{p}. \quad (3.40)$$

Muotojen superponointiyhtälö saadaan muotoon:

$$\mathbf{u} \cong \sum_{i=1}^M \boldsymbol{\varphi}_i \mathbf{p}_i = \sum_{i=1}^M \boldsymbol{\varphi}_i \mathbf{N}\mathbf{p}^* = \boldsymbol{\Phi}^* \mathbf{p}^*. \quad (3.41)$$

Nämä ortogonalisoidut Craig-Bampton –muodot $\boldsymbol{\Phi}^*$ eivät ole alkuperäisen systeemin ominaismuotoja, vaan Craig-Bampton –esityksen ominaismuotoja systeemistä sisältäen sen ominaistajuudet. Täysin fysikaalista selitystä näille muodoille on hankala antaa. /7 s.6/

3.2.6 Joustavan kappaleen yleistetyt koordinaatit

Yhtälöiden 28 ja 30 mukaan voidaan joustavassa kappaleessa i olevan pisteen P^i sijainti määrittää yhtälöllä:

$$\mathbf{r}^i = \mathbf{R}^i + \mathbf{A}^i(\bar{\mathbf{u}}_0^i + \Phi \mathbf{p}) \quad (3.42)$$

Yleistetyt koordinaatit voidaan jakaa jäykän kappaleen liikettä kuvaaviin koordinaatteihin, ja jouston kuvaamiseen liittyviin koordinaatteihin. Jäykän kappaleen liikettä kuvaavat yleistetyt koordinaatit \mathbf{q}_r^i ovat samoja kuin jäykälle mekanismin jäsenelle. Joustavalle kappaleelle voidaan yleistetyt koordinaatit esittää muodossa:

$$\mathbf{q}_r^i = \begin{bmatrix} i \\ r \\ i \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i \\ r \\ \mathbf{p} \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

missä vektori \mathbf{q}_r^i on joustavan kappaleen yleistetyt koordinaatit. Jouston kuvaamiseen liittyvät koordinaatit \mathbf{p} ovat modaalikoordinaatteja. Kinemaattiset rajoitteet muodostetaan joustavia kappaleita sisältävälle systeemille samoja periaatteita noudattaen kuin pelkkien jäykkien kappaleiden systeemille. Yhtälöissä ja matriiseissa joustavien ja jäykkien osien kuvaukseen käytettävät yleistetyt koordinaatit pidetään erillään, esimerkiksi Jacobin matriisissa. /5 s.222/

3.2.7 Joustavan kappaleen nopeus ja kiihtyvyys

Joustavan kappaleen nopeus ja kiihtyvyys muodostetaan periaatteessa samoin kuin jäykän kappaleen dynamiikassa. Derivoimalla partikkelin paikkaa kuvaava yhtälö kerran saadaan ratkaistua kappaleen nopeus ja derivoimalla tämä vielä kertaalleen saadaan joustavan kappaleen kiihtyvyys. Yhtälöissä käytetään apuna modaalikoordinaattiesitystä.

3.2.8 Joustavan kappaleen massamatriisi

Joustavan kappaleen massamatriisi voidaan johtaa kineettisen energian avulla kuten jäykänkin kappaleen tapauksessa tehdään. Joustavan kappaleen symmetrinen massamatriisi voidaan kirjoittaa muodossa

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{tt} & \mathbf{M}_{tr} & \mathbf{M}_{tm} \\ & \mathbf{M}_{rr} & \mathbf{M}_{rm} \\ \text{Symm.} & & \mathbf{M}_{mm} \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

missä alaindeksi t viittaa translaatiovapausasteisiin, r rotaatiovapausasteisiin ja m modaalikoordinaatteihin. Jäykän kappaleen liikkeen ja deformaation välinen vuorovaikutus huomioidaan \mathbf{M}_{tm} ja \mathbf{M}_{rm} termeillä. /7 s.18/

Massamatriisin termit ovat monimutkaisia lausekkeita joita kuvataan ns. massainvarianttien avulla. Nämä invariantit eivät ole ajasta riippuvia, joten ne lasketaan vain kerran simuloinnin aikana. Invariantteja voidaan myös asettaa nolllaksi. Tämä luonnollisesti heikentää laskennan tarkkuutta, mutta nopeuttaa sitä huomattavasti. /10/

Massamatriisin termit voidaan esittää yksinkertaistetussa muodossa yhdeksän inertiaainvariantin avulla seuraavasti:

$$\mathbf{M}_{tt} = \mathbf{I}^1 \mathbf{I} \quad (3.45)$$

$$\mathbf{M}_{tr} = -\mathbf{A} [\tilde{\mathbf{I}}^2 + \tilde{\mathbf{I}}_j^3 \quad] \mathbf{B} \quad (3.46)$$

$$\mathbf{M}_{tm} = \mathbf{A} \mathbf{I}^3 \quad (3.47)$$

$$\mathbf{M}_{rr} = \mathbf{B}^T [\mathbf{I}^7 - [\mathbf{I}_j^8 + \mathbf{I}_j^{8T}] \quad] - \mathbf{I}_{ij}^9 \quad] \mathbf{B} \quad (3.48)$$

$$\mathbf{M}_{rm} = \mathbf{B}^T [\mathbf{I}^4 + \mathbf{I}_j^5 \quad] \quad (3.49)$$

$$\mathbf{M}_{mm} = \mathbf{I}^6 \quad (3.50)$$

Orientaatiokoordinaattien riippuvuudet huomioidaan transformaatiomatriiseilla A ja B . B matriisi kuvaa Eulerin kulmien aikaderivaatat kulmanopeuksiksi ja A on kiertomatriisi lokaalin koordinaatiston kuvaamiseksi globaalisti. /10, 7 s.18/

Inertiainvariantit on laskettu elementtimenetelmän N kappaleelle solmuja perustuen jokaisen solmupisteen massa m_i , solmupisteen deformatumattomaan asemaan $\bar{\mathbf{u}}_0$, ja sen osallistumiseen ominaismuotomatriisiin Φ_i . /7 s.18/

Ensimmäinen invariantti kuvaa joustavan kappaleen kokonaismassaa:

$$\mathbf{I}^1 = \sum_{i=1}^N m_i \quad (\text{skalaari}) \quad (3.51)$$

missä,

N on joustavan kappaleen solmujen lukumäärä,

m_i on solmun i massa.

Toinen invariantti on ensimmäinen staattinen momentti, ja kuvaa siis deformatumattoman kappaleen hitausmassaa:

$$\mathbf{I}^2 = \sum_{i=1}^N m_i (\bar{\mathbf{u}}_0)_i \quad (3 \times 1) \quad (3.52)$$

Kolmas invariantti kuvaa deformaation aiheuttamaa massakeskipisteen siirtymää:

$$\mathbf{I}_j^3 = \sum_{i=1}^N m_i \phi_{ij}^t \quad j=1, \dots, M \quad (3 \times M) \quad (3.53)$$

missä,

ϕ_{ij}^t on j :nnen muodon, solmun i , translaatiovapausasteisiin liittyvä muotovektori,

M on valittujen muotojen lukumäärä.

Neljäs invariantti kuvaa joustavan kappaleen rotaatiota globaalisti:

$$\mathbf{I}^4 = \sum_{i=1}^N m_i (\tilde{\mathbf{u}}_0)_i \Phi_i^t + \mathbf{I}_i \Phi_i^r \quad (3 \times M) \quad (3.54)$$

missä Φ_i^r on i :n solmun rotaatiodeformaatiota kuvaava termi ja \mathbf{I}_i sen inertiavektori.

Viides invariantti kuvaa myös rotaation ja deformaation välistä kytkentää muodossa:

$$\mathbf{I}_j^5 = \sum_{i=1}^N m_i \tilde{\phi}_{ij}^t \Phi_i^t \quad j=1, \dots, M \quad (3 \times M) \quad (3.55)$$

Invariantti kuusi on joustavan kappaleen yleistetty massamatriisi:

$$\mathbf{I}^6 = \sum_{i=1}^N m_i \Phi_i^{tT} \Phi_i^t + \Phi_i^{rT} \mathbf{I}_i \Phi_i^r \quad (M \times M) \quad (3.56)$$

Seitsemäs invariantti kuvaa joustavan kappaleen hitausmomenttia:

$$\mathbf{I}^7 = \sum_{i=1}^N m_i (\tilde{\mathbf{u}}_0)_i^T (\tilde{\mathbf{u}}_0)_i + \mathbf{I}_i \quad (3 \times 3) \quad (3.57)$$

Kahdeksas invariantti kuvaa deformaation aiheuttamaa ensimmäisen kertaluvun muutosta hitausmomentissa:

$$\mathbf{I}_j^8 = \sum_{i=1}^N m_i (\tilde{\mathbf{u}}_0)_i \tilde{\phi}_{ij}^t \quad j=1, \dots, M \quad (3 \times 3) \quad (3.58)$$

Yhdeksäs invariantti on deformaation aiheuttaman toisen kertaluvun muutos hitausmomentissa:

$$\mathbf{I}_{jk}^9 = \sum_{i=1}^N m_i \tilde{\phi}_{ij}^t \tilde{\phi}_{ik}^t \quad j,k=1,\dots,M \quad (3 \times 3) \quad (3.59)$$

/9 s.7, 10/

Invariantit 5 ja 9 ovat toisen kertaluvun korjaustermejä inertiavektorille. Ratkaistaessa joustavan jäsenen liikeyhtälöitä vievät nämä termit eniten CPU –aikaa. Poistamalla nämä termit voidaan simulointiaikaa huomattavasti lyhentää, huonontamatta silti useimmissa tapauksissa tulosten tarkkuutta. /10 s.72/

Kuudes invariantti kuvaa kunkin muodon massaa ja sen poistaminen tekee joustavasta kappaleesta jäykän. Esimerkiksi ADAMS –ohjelmaa käytettäessä tuloksessa voi erilaisesta yhtälöiden formuloinnista johtuen olla pieniä eroja verrattuna jäykän kappaleen simulointiin. /10 s.72/

Joustavan kappaleen dynaamiset liikeyhtälöt muodostetaan periaatteessa samoin kuin jäykälle kappaleelle. Virtuaalisen työn ja kineettisen energian avulla muodostettavat Lagrangen liikeyhtälöt ovat yhtäläillä ratkaistavissa numeerisin menetelmin. Simuloinnin kannalta hankala erityispiirre on massamatriisin riippuvuus sekä ajasta että yleistetyistä koordinaateista. Myös neliöllisestä nopeusvektorista tulee hyvin monimutkainen vektori.

4. VIRTUAALIPROTOTYYPPI

Virtuaaliprototyypointi tai virtuaalinen testaus on tietokoneavusteinen suunnittelu- menetelmä, jossa mallinnetaan koneen mekatroninen järjestelmä, simuloidaan ja visualisoidaan sen käyttäytyminen komiulotteisena todellisissa olosuhteissa ja optimoidaan sen ominaisuudet ilman fyysistä prototyyppiä. Virtuaaliprototyyppiä määritellään yleensä malli, joka vastaa geometrioiltaan sekä käytökseltään aitoa kappaletta, eli kappaleen virtuaaliprototyyppi noudattaa ”fyysiikan lakeja” (esimerkiksi hitausvoimat, gravitaatio, joustavuus) riittävässä määrin. Myös vuorovaikutus ympäristön kanssa voidaan huomioida, jolloin tehdyllä virtuaaliprototyyppillä voidaan simuloida esimerkiksi tyypillisiä työkiertoja virtuaaliympäristössä. Tällöin tulee huomioida myös vuorovaikutuksessa olevien kappaleiden ja ympäristön fysikaaliset ominaisuudet. /11. s.11/

4.1 Mekanismin analysointi

Mekanismiopin perusteiden mukaan ryhmää liikkuvasti toisiinsa kytkettyjä kiinteitä kappaleita kutsutaan kinemaattiseksi ketjuksi. Liikkuvia osia kutsutaan jäseniksi tai elimiksi. Jäsenet nojaavat tai kiinnittyvät kinemaattisiin elinpareihin, joiden kautta voimat ja liikkeet siirtyvät edelleen. Jos ketjun jäsenet muodostavat renkaan, nimitetään ketjua suljetuksi. Kinemaattinen ketju on pakkoliikkeinen, jos sen yhden jäsenen, minkä hyvänsä, asentoa vastaa vain yksi tai määrätty joukko kaikkien muiden jäsenten asentoja. Mekanismi on pakkoliikkeinen, suljettu kinemaattinen ketju, jonka yksi jäsen on kiinteä. /12 s.36/ Wuolijoen määritelmän mukaan IVP:n yksi moduuli muodostaa tällaisen pakkoliikkeisen suljetun kinemaattisen ketjun.

4.1.1 Mekanismin vapausasteet

Mekanismin vapausasteiden lukumäärällä tarkoitetaan sitä, kuinka monelle mekanismin jäsenelle on annettava määrätty liike, jotta kaikkien jäsenten liikkeet tulevat rungon suhteen yksikäsitteisesti määrättyiksi. /13 s.16/ Määrityksen perusteella voidaan yhden moduulin vapausasteiden lukumääräksi todeta 2 ja koko robotin vapausasteiden lukumääräksi 5 x 2 eli 10. Simulointimallia tehtäessä esimerkiksi ADAMS -ohjelmalla tämä ei kuitenkaan ole riittävä tieto, jotta mallin nivelet saadaan oikein kuvatuiksi.

Mekanisminmalli on aina matemaattinen idealisointi todellisesta fyysisestä systeemistä. Siksi mekanisminmallit, joilla on samat nivelet kuin fyysisellä systeemillä, eivät aina toimi moitteettomasti. Fyysisten systeemien osien joustot ja nivelten liikkumavarat takaavat usein nivelten toiminnan staattisesti määräämättömistä (Redundant constraint) rajoitteista huolimatta. Matemaattisella mallilla, jolla on staattisesti määräämättömiä rajoitteita, ei aina voida simuloida todellisuutta. /14 s.56/

3D-mekanisminmallin vapausasteet voidaan laskea Kuzbachin kaavalla, jossa jäsenellä on kuusi vapausastetta:

$$\text{DOF} = 6 \times (N - 1) - \text{RA} \quad (4.1)$$

Missä,

DOF = Degree of Freedom, vapausasteiden lukumäärä,

N = mekanismin jäsenten lukumäärä, runko mukaan lukien,

RA = mekanismin kaikkien liikerajoitteiden summa.

Joidenkin nivelalkioiden ja nivelien rajoitteita on listattu taulukkoon 4.1.

T ulukko 4.1. Nivelalkioiden ja nivelien rajoitteita. /10/

Nivel / nivelalkio	R o tteet		
	Siirtymät	Kiertymät	Yhteensä
Pallo-	3	0	3
Sylinteri-	2	2	4
Kierto-	3	2	5
Lukko-	3	3	6
Risti-	3	1	4
Ruuvi-	1/2	1/2	1
In Line	2	0	2
In Plane	1	1	2
Yhdensuuntaisuus	0	2	2
Kohtisuoruus	0	1	1

IVP-robotin yhden moduulin mekanismi muodostuu yhdeksästä osasta runko mukaan lukien, jolloin Kuzbachin kaavaan sijoittamalla moduulin vapausasteiksi saadaan:

$$\text{DOF} = 6 \times (9 - 1) - 10 \times 5 - 1 \times 1 = -3 \quad (4.2)$$

Kaavaan on sijoitettu moduulin fyysisiä niveliä vastaavat nivelrajoitteet. Mekanismissa on 10 kiertonivelä ja yksi ruuvinivel. Nivelsuunnikas on tämän kaavan mukaan kolme kertaa staattisesti määräämätön, jolloin mekanismin sanotaan olevan ylijarjottunut. /14 s.52/

Simulointimallia tehtäessä on kiertonivelten sijaan valittava taulukkoa 4.1 hyväksikäyttäen eri nivelten ja nivelalkioiden yhdistelmiä, niin että staattisesti määräämättömyys voidaan poistaa. ADAMS tarkistaa mekanismin vapausasteet ennen analyysiä sekä tunnistaa ja poistaa staattisesti määräämättömät rajoitteet. Tämän jälkeen ohjelma ratkaisee systeemin tilan jäljelle jääneiden rajoiteyhtälöiden avulla. Poistettujen staattisten määräämättömien

rajoitteiden reaktivoimia se ei kuitenkaan pysty ratkaisemaan. Staattisesti määräämättömät rajoitteet haittaavat myös analyysin suoritusta. /10/

Robotti koostuu viidestä kahdenvapausasteen moduulista, jolloin koko robotin vapausasteiden lukumääräksi tulee näin ollen 10. Vapausasteiden lukumäärä ylittää nyt tunnetussa karteesisessa koordinaatistossa olevat kuusi vapausastetta. Robotin tai manipulaattorin ollessa kyseessä onkin kuvaavampaa käyttää vapausasteille nimitystä liikkuvuusaste.

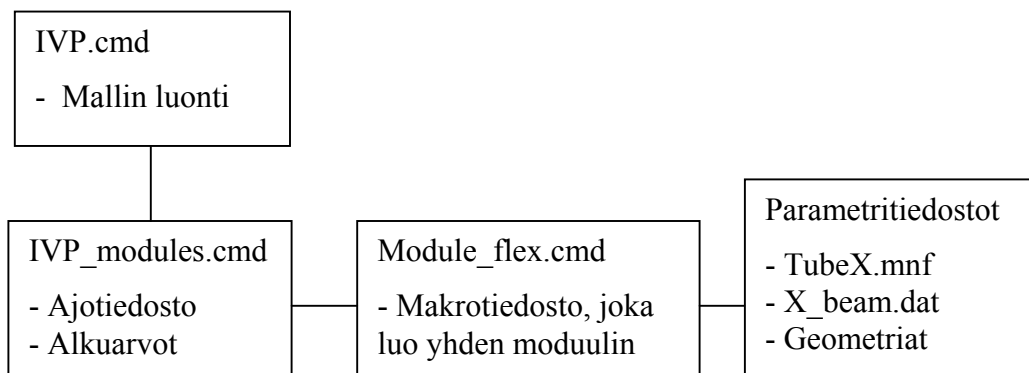
4.2 Mekaniikkamalli ADAMS –ohjelmalla

Ohjelmistoversiona oli käytössä ADAMS 10.0. Käytetystä mallinnustekniikasta johtuen robotista oli luontevaa muodostaa kaksi erillistä virtuaaliprototyyppiä. Ensin mekaniikka mallinnettiin pelkästään jäykillä osilla, jolloin voitiin varmistua robotin kinemaattisesta toimivuudesta. Jäykkään malliin lisättiin joustoa kuvaavat komponentit, jolloin saatiin paremmin systeemin dynamiikkaa kuvaava joustava malli. Joustava malli on luonnollisesti lähempänä fyysistä todellisuutta, mutta jäykän mallin etuna on sen huomattavasti nopeampi ja luotettavampi laskettavuus.

Mallinnuksessa on käytetty hyväksi mahdollisuutta kirjoittaa makrotiedostoja, joita voidaan helposti muokata. Tällöin robotissa tapahtuvat muutokset on helppo lisätä simulointimalliin. IVP-robotti kasataan suorittamalla sama, yhden moduulin luova makro, tarvittavan monta kertaa. Tällöin voidaan haluttaessa simuloida robottia eri moduulimäärillä. Kokonaismalli jakautuu useisiin komentotiedostoihin. Hajautuksen tarkoituksena on kokonaiskuvan selkeyttäminen ja mallin hallitseminen paremmin. Tiedostot voidaan ryhmitellä päätehtäviensä mukaan; mallitiedoston ja ympäristön luoviin tiedostoihin, moduulin tekevään makrotiedostoon sekä parametritiedostoihin. Parametritiedostoja tarvitaan kunkin moduulin mittatiedoille. Moduulit nimetään numerojärjestyksessä. Kaikki osat ovat joka moduulissa saman nimiset, jolloin niitä

erottaa toisistaan vain moduulin numero. Makrotiedoston suorittaminen vaatii seuraavat parametrit:

- Moduulin nimi
- Moduulin sijainti
- Kiertonivelen sijainti
- Moduulin alkukulma vaakatasossa
- Moduulin nousukulma
- Edellisen moduulin nimi
- Parametritiedoston perusteella luotavan muuttujaryhmän nimi



Kuv 4.1. Kaavio ADAMS –mallin tiedostojaosta.

4.2.1 Moduulien massatiedot

IVP on hyvin hidasliikkeinen robotti, liikenoisuus on noin 10 mm/s, jolloin sen dynaamiset vasteet ovat hitaita. Ominaisaajuuksien oletetaan robotin rakenteesta johtuen olevan matalia. Tällöin yksittäisten pistemassojen vaikutus ei korostu kuten nopeilla liikkeillä. Toisaalta robotin rakenne on pitkä ja joustava, jolloin moduulien omasta painosta syntyvällä staattisellakin kuormituksella on suuri merkitys. Simulointimallia tehtäessä on kappaleiden kokonaismassat pyritty saamaan mahdollisimman lähelle laskettuja arvoja, jolloin rakenteen joustoihin vaikuttavat kuormitukset tulevat kuvatuksi mahdollisimman

realistisesti. Taulukossa 4.2 on vertailtu CEA:n väliraporteissa /15, 16/ annettuja osien massoja sekä simulointimallissa olevien osien massoja.

T ulukko 4.2. Ensimmäisen moduulin punnitut massat sekä Adams mallin osien massat moduulittain. Sulkumerkeissä olevat arvot ovat CEA:n arvioita. Yksikkö on kg.

O	M. 1. Pu tut	M. 1	M. 2	M. 3	M. 4	M. 5
Tube	6.6	6.75	5.06	3.37	1.69	1.69
Tube base	0.9	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
Tube head	1.3	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
Kokoonpano	8.2	8.4	6.7	4.98	3.3	3.3
Rotation head	2.3	2.92	2.92	2.92	2.92	2.13
Rotation base	3.0	2.57	2.57	2.57	2.57	2.57
HD	1.5	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84
Rotation motor + vaihteisto	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Kokoonpano	7.3	7.5	7.5	7.5	7.5	6.7
Jack	2.7	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
Rodit	6.8	6.1	4.1	1.7	1.0	0.7
Moduulin kokonaismassa	25.8 (24.3)	24.3	20.6	16.5	14.1	13
Kokonaismassa	(89.67) ja (83.6)					88.5

Simulointimallissa ja ANSYS –ohjelmassa laskettaessa Tube-osien ominaistajuuksia, on materiaalien tiheytenä teräkselle käytetty arvoa $\rho = 7801 \text{ kg/m}^3$ ja titaanille 4850 kg/m^3 . Tiheydet eivät ole samoja, joita CEA ilmoittaa käyttävänsä toisessa väliraportissaan /16/, sillä käytetyillä arvoilla saatiin huomattavasti yhteensopivammat massatiedot CEA:n laskemiin, sekä punnitsemiin arvoihin. Tästä johtuen materiaalitietoina käytetään ADAMS-ohjelmassa olevia oletusarvoja.

4.2.2 Osien kuvaukset

Simulointimalliin sisällytettiin mekanismiin kuuluvat, kuvassa 2.1 esitetyt merkittävimmät osat ja nivelet perustuen CEA:lta saatuihin mitta- ja kokoonpanopiirustuksiin, sekä joidenkin osien kohdalta heiltä saatuihin 3D-tilavuusmalleihin. Toimilaitteiden fyysiset rakenteet on mallinnettu yksittäisinä jäykkinä osina. Osien geometrioiden luonnissa ja muokkauksessa on käytetty apuna SolidWorks 98 sekä Mechanical Desktop 2.0 3D-mallinnusohjelmia. CEA:lla robotin osat on suunniteltu SolidWorks ohjelmalla. Ne osat, jotka tuotiin valmiina geometrioina simulointiohjelmaan olivat Mechanical Desktopissa muunnettu stl-tiedostomuotoon. Jokaisen jäykän osan geometriat makroa suoritettaessa luetaan omista shl-tyyppisistä tiedostoista. Kuva toteutetun simulointimallin ensimmäisestä moduulista on esitetty liitteessä 2.

Mallinnuksessa pyrittiin toteuttamaan tasaisen tarkkuuden periaatetta, jolloin joistakin osista jouduttiin piirtämään uudet, yksinkertaistetut cad-kuvat, ja tuomaan niiden geometria vasta sitten ADAMS -ohjelmaan. Simulointimallissa esimerkiksi pienet ruuvien reiät ja koneistetut lovet on jätetty mallintamatta, sillä tällaisten piirteiden vaikutus dynamiikan simulointiin on hyvin vähäinen. Toimilaitteilta vaadittiin niiden pääasiallisen toiminnan toteuttamista, jolloin niiden sisäinen dynamiikka huomioidaan ohjausyhtälöissä.

4.2.3 Runko

Robotin kiinnitystä runkoon on visualisoitu asettamalla Rotation Head kappale rungon geometriaksi. Rungon geometrialla ei ole merkitystä mallin toimintaan, mutta se havainnollistaa ensimmäisen nivelen toimintaa. Simulointimallin globaalin koordinaatiston origo on sijoitettu runkokappaleen ja ensimmäisen moduulin nivelkohtaan, Rotation Base kappaleen alapintaan. Koordinaatisto on oletusasennossaan, jolloin x-akseli on robotin pituuden ja y-akseli sen korkeuden suuntaisesti.

4.2.4 Päätykappaleet ja vetotangot

Moduulin päätykappaleet, Rotation Base ja Rotation Head, on piirretty Mechanical Desktop 2.0 ohjelmalla CEA:lta saatujen mittakuvien perusteella. Kappaleista olisi ollut saatavilla myös iges-muodossa olevat 3D-mallit, mutta niiden tarkkuus simulointimalliin oli aivan liian suuri. ADAMS ei onnistunut laskemaan massaa kummallekaan päätykappaleelle. Tiedonsiirtoa kokeiltiin myös stl-muodossa, mutta geometrian kuvaus ei tällöinkään onnistunut alkuperäiselle kappaleelle. Simulointimallissa riittää alkuperäistä huomattavasti karkeampikin kappaleen malli, joten päätykappaleet päätettiin piirtää yksinkertaistetusti uudestaan. Vetotankojen visualisoinnissa meneteltiin samoin.

4.2.5 Putki

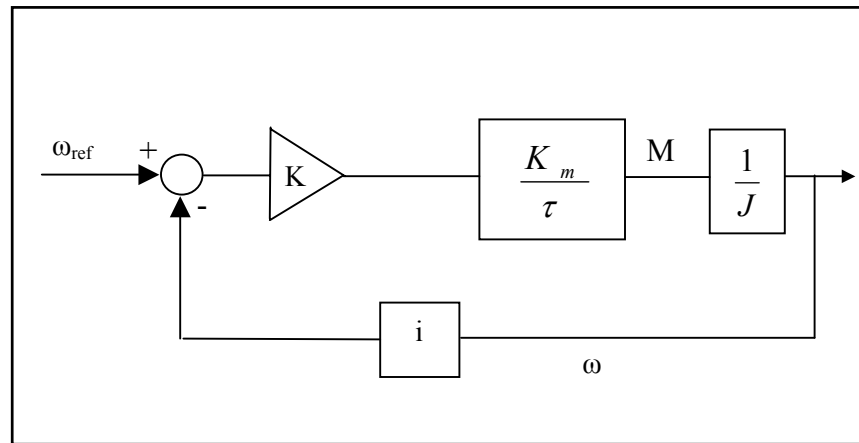
Putkiosan, Tube, päätykappaleet Tube Head ja Tube Base on muunnettu alkuperäisestä SolidWorks muodostaan SolidWorks 98-ohjelmalla Mechanical Desktopin ymmärtämään sat-muotoon. Tämän jälkeen ne on Mechanical Desktopissa muunnettu stl-muotoon, jonka jälkeen osat on voitu viedä ADAMS -ohjelmaan. Osien massojen laskeminen kestää useita minutteja ja sen vuoksi niiden massa, hitausominaisuudet sekä massakeskipisteiden paikat on laskettu etukäteen ja annettu makrotiedostossa valmiina. Sama menettely pätee useimmille osille. Tube on erillinen osa ja se on mallinnettu Mechanical Desktopissa, saatujen mittatietojen perusteella. Tube on liitetty päätykappaleisiin lukkonivelellä. Joustavassa mallissa Tube-osalle saadaan geometria sen mnf-tiedostosta.

4.2.6 Nostomekanismi

Diakonaalisauvassa oleva nostomekanismin malli koostuu kolmesta eri osasta; sähkömoottorin rungosta, kierretangosta ja putkesta. Sähkömoottorin runko on mallinnettu Mechanical Desktopissa yhdeksi kokonaisuudeksi moottorin kanssa, jolloin välttyään

ylimääräisiltä osilta. Kierretangon ja putken geometriat luodaan ADAMS –ohjelmassa, jossa niiden massatiedot lasketaan mallia luotaessa. Sähkömoottorin mallinnuksessa sen ominaisuudet huomioidaan mekaanisen aikavakion avulla. Se määritellään aikana, jolloin moottorin pyörimisnopeus on saavuttanut 63% sille asetetusta arvosta.

Moottorin säätöjärjestelmä mallinnettiin yksinkertaisena P-säätäjänä. Kuvassa 4.2 on nopeus takaisinkytketyn P-säätäjän toimintaperiaate.



Kuv 4.2. P-säätäjän toimintaperiaate

Sähkömoottorin toimintaa kuvataan differentiaaliyhtälöllä:

$$\dot{M} = \frac{K_m (K(\omega_{ref} - \omega \cdot i)) - M}{\tau} \quad (4.3)$$

missä,

M on vaihteelta tuleva momentti,

K_m on moottorin vahvistuskerroin,

K_p on säätäjän vahvistus,

ω_{ref} on moottorin kulmanopeuden ohjearvo,

ω on kulmanopeuden mitattu arvo,

i on alennusvaihteen välityssuhde,

τ on moottorin mekaaninen aikavakio,

J on systeemin hitausmomentti.

Taulukkoon 4.3 on koottu sähkömoottorien sekä alennusvaihteiden ominaisuuksia.

T ulukko 4.3. Toimilaitteiden suoritusarvoja.

Moottori + alennusvaihde	P	M_{\max}	n_{\max}	$\Delta n/\Delta M$	τ	
Nostoliike	16 W	30 Nmm	5000 rpm	41.3 rpm/Nmm	7 ms	134
Kiertoliike	12 W	16 Nmm	7000 rpm	99.5 rpm/Nmm	6 ms	134

4.2.7 Joustokehävaihde

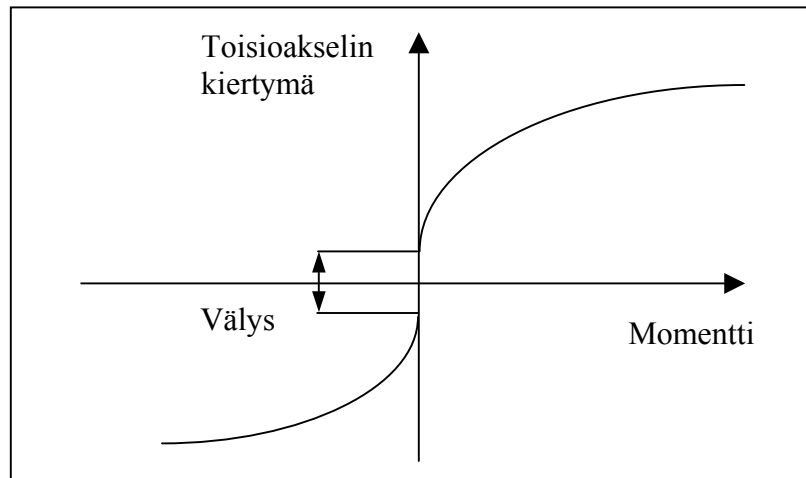
Joustokehävaihde eli Harmonic Drive on mallinnettu geometrian osalta Mechanical Desktop ohjelmalla. Sen ulkoiset dimensiot perustuvat mittatietoihin, mutta eivät ole aivan tarkat. Kappaleen massa on saatu lähelle oikeaa käyttämällä materiaalina titaania. Kiertoliikkeen tuottavan sähkömoottorin geometria mallinnettiin mittatietojen perusteella massan lisäämiseksi niveleen. Se tuo myös havainnollisuutta nivelen toimintaan.

Moottorin toimintaa kuvataan yhtälön 4.3 mukaisesti. Sähkömoottorin ja joustokehävaihteen välissä olevaa kartiohammaspyöräparia ei ole mallinnettu, sillä sen mitoista ei ole tietoa, ja sen merkitys on kovin vähäinen. Hammaspyöräparin välityssuhde on 1. Joustokehävaihteen, kuorman tai kartiohammaspyöräparin moottorin akselille redusoitua hitausmomenttia voidaan tarkastella kaavalla:

$$J_{red} = \frac{J}{i_v^2} \quad (4.4)$$

missä J_{red} on sähkömoottorin näkemä vaihteiston tai kuorman hitausmomentti J . Alennusvaihteen välityssuhdetta on merkitty lyhenteellä i_v . /17 s.295/ Mikäli vaihteita on useampi peräkkäin, kerrotaan niiden välityssuhteiden neliöt keskenään. Yhtälön 4 perusteella laskettiin kuorman hitausmomentin olevan noin tuhatkertainen verrattuna joustokehävaihteen hitausmomenttiin redusoituna moottorille.

Joustokehävaihteen matemaattinen malli on erittäin hankala, eikä kirjallisuudestakaan löydetty yhtään kyseistä vaihdetyyppiä koskevaa esimerkkitapausta. Kuvassa 4.3 on havainnollistettu vaihteen joustoa ja välystä (”backlash”) tilanteessa, jossa ensiöakseli on lukittu. Vaihte oletetaan kitkattomaksi. Kun toisioakselia väännetään, se kiertyy vaihteen osien välysten ja joustojen vuoksi. Tavallisesti joustokäyrä poikkeaa suorasta. Tuoteluetteloissa vaihteelle annetaan joustokäyrää approksimoiva jousivakio yhtenä tai useampana lukuna. Kuvasta näkyy, että vaihteen vällys aiheuttaa nollamomentin kohdalla epämääräisen alueen: kun momentti on nollan suuruinen, toisioakselin asema ei ole tarkka. Jos toisiopuolella on asema-anturi, se voi näyttää epämääräisiä lukemia nollamomentilla. Säätojärjestelmä voi yrittää korjata asemaa, mutta korjausliikkeet menevät helposti yli ja järjestelmä jää värähtelemään (asemointivärähtely). /17/



Kuv 4.3. Kitkaton vaihte, jossa on joustoa ja vällystä. /18/

IVP-robotin joustokehävaihteen välityssuhde on 160. Joustokäyrää approksimoiva jousivakio on laskettu keskiarvona kolmesta jousivakion arvosta. Jousivakioksi saatiin $4.6e4$ Nm/rad. Vaihteen jousto huomioidaan mallissa ainoastaan staattisessa analyysissä. Tarkoituksena on lisätä jousto myös dynaamiseen analyysiin, mutta tämä joudutaan toteuttamaan diplomityön ulkopuolella. Moduuliin tullaan liittämään erillinen osa, ja luomaan vaihteen sekä osan välille joustoa kuvaava yhteys. Kitkan sekä siitä aiheutuvan hystereesisilmukan mallintaminen on erittäin vaikeata eikä niitä ole huomioitu mallissa.

4.2.8 Jäykän mallin nivelet

Reduntanteista vapausasteista johtuen nivelten valintaan kiinnitettiin erityistä huomiota. Suurin osa kiertonivelistä on korvattu pallonivelen ja kohtisuoruusehdon asettavan perpendicular-nivelalkion yhdistelmällä. Tällä nivelyhdistelmällä poistetaan 4 vapausastetta. Taulukossa 4.4 on erittely jäykässä mallissa käytetyistä niveltyypeistä. Kuzbachin kaavalla laskettaessa saadaan mekanismin vapausasteiden lukumääräksi nyt

$$\text{DOF} = 6 \times (9-1) - 7 \times 3 - 3 \times 5 - 5 \times 1 - 1 \times 1 - 1 \times 4 = 2 \quad (4.5)$$

Kaavassa ei ole huomioitu putken sisällä olevia lukkoniveleitä, sillä ne muodostavat putken päätyjen kanssa oman suljetun ketjunsä, jonka vapausasteiden lukumäärä on kuusi. Suljettu ketju käyttäytyy yhden kappaleen tavoin. Joustokehävaihte on jätetty myös pois.

Diakonaalisauvassa, Jack, olevassa ruuvimekanismissa ruuvinivel ei yksin riitä kuvaamaan kierretapin ja putken liitosta sillä se poistaa vain yhden vapausasteen. Sylinterinivel tarvitaan tukemaan liitos fyysisesti järkeväksi. Sylinterinivel sallii kappaleiden translaatio- ja rotaatioliikkeen pituusakselinsa suhteen. Kierretapin ja sähkömoottorin välille tarvitaan kiertonivel.

T ulukko 4.4. Yhden moduulin nivelet jäykässä mallissa.

No	Osa I	Osa J	Rajoitteen tyyppi	Rajoitteen nimi	RA
1	Rot. Base	Rot. Head	Kiertonivel	JOI Rotation	5
2	Tube Base	Rot. Base	Pallonivel	JOI Rotation Base	3
3	Tube Base	Rot. Base	Kohtisuoruusehto	JPR Rotation Base	1
4	Tube Head	Rot. Head	Kiertonivel	JOI Rotation Head	5
5	Tube	Tub. Base	Lukkonivel	JOI Lock1	6
6	Tube	Tub. Head	Lukkonivel	JOI Lock2	6
7	Minimotor	Rot. Head	Pallonivel	JOI Jack Head	3
8	Minimotor	Rot. Head	Kohtisuoruusehto	JPR Jack Head	1
9	Screw	Rot. Base	Pallonivel	JOI Jack Base	3
10	Screw	Rot. Base	Kohtisuoruusehto	JPR Jack Base	1
11	Minimotor	Screwpin	Kiertonivel	JOI Motor Screwpin	5
12	Screw	Screwpin	Sylinterinivel	JOI Screw Translation	4
13	Screw	Screwpin	Ruuvinivel	JOI Screw	1
14	Rod 1	Rot. Base	Pallonivel	JOI Rod 1	3
15	Rod 1	Rot. Base	Kohtisuoruusehto	JPR Rod 1	1
16	Rod 1	Rot. Head	Pallonivel	JOI Rod1 head	3
17	Rod 2	Rot. Base	Pallonivel	JOI Rod 2	3
18	Rod 2	Rot. Base	Kohtisuoruusehto	JPR Rod 2	1
19	Rod 2	Rot. Head	Pallonivel	JOI Rod2 Head	3
20	HD	Rot. Head	Lukkonivel	JOI HD	6
21	Rot. Motor	Rot. Head	Lukkonivel	JOI Lock3	6
Rajoitteiden summa					70

4.3 Joustavuuden huomioiminen

Mekanismin jäsenistä osat Rod, Jack ja Tube mallinnettiin joustavina. CAE:n toimittamassa toisessa väliraportissa todetaan nivelien olevan erittäin joustavia. Ensimmäiselle nivelelle on mittaustulosten perusteella johdettu jousivakio taivutukselle $0.78^\circ/\text{kNm}$, sekä väännölle $0.82^\circ/\text{kNm}$. Joustot ovat niin suuria, että ne tulee ottaa huomioon simulointimallissa. Joustavuuden kuvaamiseen käytettiin nostomekanismin osalta keskittyneiden massojen periaatetta, Tube-kappale mallinnettiin osan moodeja hyödyntävällä menetelmällä ja vetotangot, Rod, voiman avulla.

4.3.1 Putken joustavuus

Ominaisaajuusanalyysin tekemiseen Tube-osalle valittiin ANSYS 5.7 –ohjelmisto. ANSYS on hyvin yhteensopiva ADAMS –ohjelmiston kanssa, ja se on jo valmiiksi LTKK:ssa käytettävissä. Mallista jouduttiin tekemään useita variaatioita, jolloin oli luontevaa kirjoittaa mallin luova komentotiedosto tekstieditorilla ja lukea se ohjelmassa. Tällöin rakenteessa tapahtuvat muutokset ovat helposti muutettavissa malliin komentotiedoston kautta. Ominaisaajuusanalyysin tuloksena muodostettiin mnf-tiedosto kunkin moduulin Tube-osalle, jotka voidaan lukea ADAMS -ohjelmistossa. Mnf-tiedosto sisältää mallin geometria-, jäykkyys- ja massatiedot.

Elementtimallissa elementtien lukumäärän kasvattaminen lisää mallin vapausasteiden lukumäärää ja kasvattaa laskettavien ominaisarvojen tarkkuutta. Toisaalta se kasvattaa myös huomattavasti laskenta-aikaa. Jotta tarvittavat ominaisaajuudet, sekä niiden riittävä tarkkuus saatiin selville, laskettiin Tubelle enimmillään 150 alinta ominaismuotoa, elementtiverkolla jossa oli 4400 elementtiä.

Elementtimallissa käytetyt materiaali- ja elementtitiedot on listattu taulukossa 4.5. Käytetyssä kuorielementissä on 8 solmua ja jokaisessa solmussa 6 vapausastetta. Kahdeksansolmuista elementtiä voidaan pitää hieman tarkempana kuin nelisolmuista. Robotin hidastuokkeisuudesta ja kuormitustavasta johtuen tarvittavien ominaisaajuuksien oletetaan olevan alhaisia, jolloin voidaan käyttää suhteellisen harvaa elementtiverkkoa. Homer Rahnejat /18/ on tutkinut vastaavanlaista putkirakennetta nopeakäyntisessä sovelluksessa. Auton voimansiirrossa olevassa ontossa akselissa hän käyttää nelisolmuista elementtiä ja tiheämpää elementtiverkkoa.

T ulukko 4.5. ANSYS -mallissa käytetyt materiaali- ja elementtiedot.

	Putk	J k teet
Materiaali	Titaani	Jäykiste teräs
Tiheys	4.85e-6 [kg/mm ³]	7.801e-9 [kg/mm ³]
Poissonin vakio	0.3	0.3
Kimmokerroin	102040 [N/mm ²]	210000e2 [N/mm ²]
Elementtityypit	Kuorielementti, SHELL93	3D Palkkielementti, BEAM4

Valitussa elementtiverkossa on 24 elementtiä putken kehällä ja 30 elementtiä putken pituudella. Putken pituus on 1400 mm, ulkohalkaisija 160 mm ja seinämän paksuus moduulista riippuen 0.5 mm – 2 mm. Kaikissa malleissa on sama elementtien lukumäärä.

Fyysisessä rakenteessa Tube on päistään ympärihitsattu kiinni laippoihin, joiden välityksellä se kiinnitetään niveliin. Tämä jäykistää putken päitä niin paljon, että jäykistys on huomioitava myös ANSYS-mallissa. Päiden jäykistämiseksi on palkkielementtejä hyväksikäyttäen putken päihin tehty jäykiste-elementit, jotka ovat kiinni putken keskilinjassa olevassa solmussa ja toisesta päästään putken kuorella olevissa solmuissa. Elementtejä on kuoren päädyssä oleviin jokaiseen solmupisteeseen. Palkkien materiaalissa kimmokerroin on 100 kertaa terästä suurempi ja tiheys 1000 kertaa terästä pienempi, jolloin se jäykistää rakennetta huomattavasti, mutta tuo analyysin virhettä lisäävää lisämassaa hyvin vähän.

Ominaistaajuusanalyysiä varten rakenteelle ei aseteta kuormitusta eikä reunaehtoja, vaan se suoritetaan tukemattomalle kappaleelle. Analyysi tehtiin valmiilla ADAMS -makrolla, joka muodostaa automaattisesti mnf-tiedoston. Lopullisessa analyysissä kolmen ensimmäisen moduulin Tube-osien ominaisarvot laskettiin 50:lle alimmalle ominaistaajuudelle. Kahdelle viimeiselle osalle laskettiin 100 alinta ominaistaajuutta. Materiaalipaksuus näissä osissa on vain 0.5 mm, jolloin niissä esiintyi paljon kuoren lommahdusmuotoja alhaisilla taajuuksilla.

Joustavan Tuben kuvaus ADAMS -ohjelmistossa toteutettiin ADAMS/FLEX-moduulia käyttäen. Ominaisuudoista laskentaan huomioitiin 10 ominaisuudetta: neljä alinta taivutusmuotoa, yksi alin vääntöväärähtelyä kuvaava muoto sekä yksi puristusmuoto. Vääntöväärähtelymuodoilla on kullakin omalla taajuudellaan kaksi eri suuntaa. Liitteessä 1 on esitetty valitut ominaisuudet sekä ensimmäisen Tube-osan kunkin muodon ominaistajuudet. Massainvariantteista poistettiin numerot 5 ja 9. Nämä invariantit vievät suuresti laskentakapasiteettia ja hidastavat simulointia, mutta niiden vaikutuksen tuloksiin todettiin olevan hyvin vähäinen.

Osan joustavuutta verifioitiin yksinkertaisella kuormituksella vertaamalla tuloksia ANSYS -ohjelman kanssa. Analyysissä Tuben toinen pää sidotaan jäykästi avaruuteen ja toiseen päähän asetetaan puristuskuorma kuvaamaan osan todellista kuormitusta. Kuormitus on 20895 N, tämä vastaa kuormitusta vaakatasossa olevassa ensimmäisessä moduulissa, jonka mitoilla verifiointi on tehty. Vertailussa on käytetty valittuja ominaisuudetta ja massainvariantteja. Verifiointin tulokset on esitetty taulukossa 4.5.

T ulukko 4.6. Tube-osan jouston vertailu.

	ADAMS	ANSYS
Kokonaismassa	6.7466 kg	6.7466 kg
Puristus $F = 20895$ N	0.29681 mm	0.29681 mm
Vääntö $M = 2000$ Nm	0.01164 rad	0.01164 rad
Taivutus $F = 1000$ N	2.5766 mm	3.0852 mm

Taivutuksessa syntyy selvää eroavaisuutta laskentatapojen välillä. Tämä johtuu laskennassa käytetyistä muodoista. Valituissa muodoissa ei ole mukana kaikkia taivutuskuormituksessa tarvittavia muotoja, jolloin siirtymätila ei tule kuvatuksi tarkasti. Puuttuvia muotoja ei joustavassa mallissa tarvita, sillä putkelle ei tule puhdasta taivutuskuormitusta missään vaiheessa.

Elementtiverkon tihentämisellä ei ollut merkittävää vaikutusta mallin joustavuuteen ADAMS –ohjelmassa. Elementtiverkkoa tihennettäessä mallin joustavuus lisääntyi nopeilla liikkeillä ja kovissa kiihdytyksissä. Normaalissa ajotilanteessa elementtiverkon tihentäminen 720:stä elementistä 4400:aan elementtiin muutti kokonaisjoustoja (30 mm) ± 0.5 mm. Mallinnuksessa päädyttiin käyttämään harvempaa 720:n elementin verkkoa.

4.3.2 Nostomekanismin joustavuus

Nostomekanismin, Jack, kokoonpanossa olevaan putkimaiseen osaan on huomioitu sen joustavuus. Joustavuus kuvataan keskittyneiden massojen periaatteella ja osan luomiseen käytetään ADAMS/VIEW -moduulin diskreettiä palkkia. Osa muodostetaan kolmesta kappaleesta, joiden massakeskipisteiden välille luodaan palkin joustoja kuvaavat elementit. ADAMS –ohjelma käyttää palkkielementtien kuvaamiseen Timoshenkon palkkiteoriaa. Lineaariset translaatio- ja rotaatiovoimat palkin, jossa x-akseli kulkee palkin pituuden suuntaisesti, päätepisteiden välillä sisältävät: /10 s.244/

- aksiaaliset voimat,
- taivutusmomentit y- ja z-akseleiden suhteen,
- vääntömomentin x-akselin suhteen,
- leikkausvoimat.

Voimat muodostetaan yhtälöstä:

$$\mathbf{F} = -\mathbf{K}\mathbf{u} - \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} \quad (4.6)$$

missä,

\mathbf{F} on voima, joka vaikuttaa kappaleeseen,

\mathbf{K} on jäykkyysmatriisi,

\mathbf{u} on kiinnityspisteen siirtymävektori,

\mathbf{C} on vaimennusmatriisi,

$\dot{\mathbf{u}}$ on siirtymien aikaderivaatat, eli siirtymien nopeusvektori. / 10 s.246/

Putki on kiinnitetty päistään massattomiin kappaleisiin. Massattomat kappaleet vaaditaan palkkielementin nivelöimiseksi kinemaattisen ketjun seuraavaan jäseneen. Putki on moduulin alkupäästä kiinnitetty kiertonivelellä, Rotation Base, kappaleeseen ja toisesta päästään ruuvi- ja sylinterinivelellä kierretappiin. Näin kiinnitettynä jousto tulee kuvatuksi koko putken pituudelta. Putken kuormituksena on pääasiassa vetokuormitus, mutta useamman elementin käytöllä voidaan huomioida paremmin myös mahdollinen puristuskuormitus. Vaimennuksena on käytetty 1%:n oletusarvoa.

Kuularuuvien välystä ei ole huomioitu. Välyksen huomioiminen mallissa veisi turhaan laskentakapasiteettia, sillä sen vaikutus on kovin vähäinen. Ruuvien valmistaja ilmoittaa välykseksi 0.03 mm.

Sähkömoottorin tukirakenne on valmistettu titaanista, joka on terästä joustavampaa. Kierretanko on sen sijaan terästä ja sen jouston merkitys koko nostomekanismissa on merkityksetön. Kokonaisuuden joustoa tutkittiin ANSYS –ohjelmalla tehdyllä elementtimallilla, jossa tanko koottiin osien omilla materiaali- ja poikkileikkaustiedoilla käyttäen palkkielementtejä. Kuormitukseksi asetettiin vetokuormitus 17 kN. Väli raportissa osan suurimmaksi kuormaksi on laskettu 16253 N. Putkimaisen kappaleen osuus oli 88 % kokonaisjoustosta 1.63 mm.

4.3.3 Vetotankojen joustavuus

Vetotankojen joustavuus on huomioitu voimakomponentin avulla. Tangoissa käytetään kahta massakeskipistettä, jäykkiä kappaleita, joiden välille on mallinnettu translaationivel. Tangoissa on pääasiassa vetokuormitusta, jolloin voimakomponentin käyttö on mahdollista. Vetotangon jousivakio on muotoa:

$$K = \frac{EA}{l} \quad (4.7)$$

Yhtälössä 4.7 teräksen kimmokerroin E on $2.07e5$ Mpa, A on tangon poikkipinta-ala ja l sen pituus. Jokaiselle tangolle on laskettu omat jäykkyyssarvot tämänhetkisten suunnittelutietojen perusteella. Voima, joka vaikuttaa vetotangoissa on jousivakio K kerrottuna tangon päiden välisellä etäisyyden muutoksella.

4.3.3 Nivelkappaleiden jousto

Rakenteen yksityiskohtaiseen tarkasteluun, kuten Rotation Head -kappaleessa olevan vahvikkeen liitoskohtaan ei ole kiinnitetty huomiota. Tällaisten rakenneyksityiskohtien vaikutusta on liian työlästä ottaa huomioon simulointimallissa. Tavoitteena oli huomioida nivelkappaleen kokonaisjouston merkitys robotin käyttäytymiseen. Yksityiskohtien merkitystä voidaan luotettavasti arvioida vasta prototyypivaiheessa tai tarkoissa FEM-analyseissä. Kyseisen liitoskohdan arkuus paljastui prototyyppiä testattaessa.

Päätykappaleista tehtiin yksinkertaistetut elementtimallit palkkielementeillä, jotka antavat tietoa nivelrakenteen kokonaisjoustosta. Rotation Head -kappaleessa todettiin suurimman jouston tapahtuvan HD:n (Harmonic Drive) akselin linjalla. Pystysuuntaiselle siirtymälle saatiin suurimmaksi arvoksi 0.7 mm, yhdistetyllä 75 kg:n ja 2 kNm:n kuormituksella. Kiertymäksi saatiin 0.70° . Vaikka siirtymä nivelen kohdalla on pieni, vaikuttaa se kuitenkin robotin päätepisteeseen huomattavasti. CEA:n raportissa saadaan koetulosten perusteella nivelen kiertymäksi $0.78^\circ/\text{kNm}$. Tämä osoittaisi nivelen olevan huomattavasti joustavampi kuin mitä palkkimallilla voidaan olettaa. Nivelen jouston vaikutus on erittäin suuri robotin käyttäytymiseen ja se tulee näin ollen huomioida simulointimallissa.

Koska päätykappaleista tehtyjen laskentamallien perusteella todettiin osien olevan mittauksia huomattavasti jäykempiä, täytyy nivelten kokonaisjouston syntyä materiaali-joustojen, välysten sekä muiden nivelkomponenttien joustojen yhteisvaikutuksena. Rotation Head kappaleen materiaali-jouston todettiin olevan noin 50% nivelen kokonaisjoustosta. Tästä syystä nivelen jousto huomioitiin ADAMS –mallissa

voimakomponenttien avulla. Jousivakioiksi asetettiin väliraportissa ilmoitetut arvot. Taivutuskuormitukselle jousivakio $K = 0.78 \text{ }^\circ/\text{kNm}$ ja vääntöjouselle $0.82^\circ/\text{kNm}$. Jouset luotiin, ”torque vector”, voimakomponentilla, joka asetettiin kahden eri moduulin Rotation Head ja Rotation Base -osien välille. Vaimennuksena on käytetty 1%:a jousivakiosta.

4.3.4 Joustavan mallin nivelöinti

Joustavuuden lisääminen malliin aiheutti muutoksia mekanismin nivelissä. Malliin lisättiin vetotankoja varten kaksi translaationiveltä, jotka tuovat yhden vapausasteen malliin lisää. Tämä vapausaste mahdollistaa moduulin pään kiertymisen. Lisätty vapausaste kompensoituu voimakomponentilla, jolloin mekanismi pysyy halutun kaltaisena.

Nostomekanismin palkkiyhtälöt tuovat moduuliin 6 vapausastetta jokainen. Tällöin neljää elementtiä käytettäessä kokonaisvapausasteiden lukumäärä lisääntyy 24:llä. Tämä on laskennan kannalta erittäin epäedullista. Joustoa tulisi voida kuvata kuten vetotankojen yhteydessä esiteltiin, mutta putkiosan kuormitus sekä liityntä muihin jäseniin on hieman monimutkaisempi. Osan jouston yksinkertaisempi huomioiminen onkin yksi mallin kehityskohteita tulevaisuudessa. Kiinnitysnivel Rotation Base -osaan voitiin lisääntyneiden vapausasteiden takia mallintaa nyt kiertonivelellä.

Nivelkappaleissa, Rotation Base sekä Rotation Head, tapahtuvan jouston takia jouduttiin niiden välinen nivel vaihtamaan palloniveleksi. Nivel tuo kaksi vapausastetta lisää, joihin kohdistetaan joustoa kuvaavat voimakomponenteilla. Tube-osan mallinnuksessa käytettävät kymmenen ominaistajuutta lisäävät vapausasteiden lukumäärää kymmenellä. Nämä eivät aiheuta muutoksia niveliin.

Yhden moduulin kokonaisvapausasteiksi tulee edellisten perusteella 39. Koko robotissa on 195 vapausastetta.

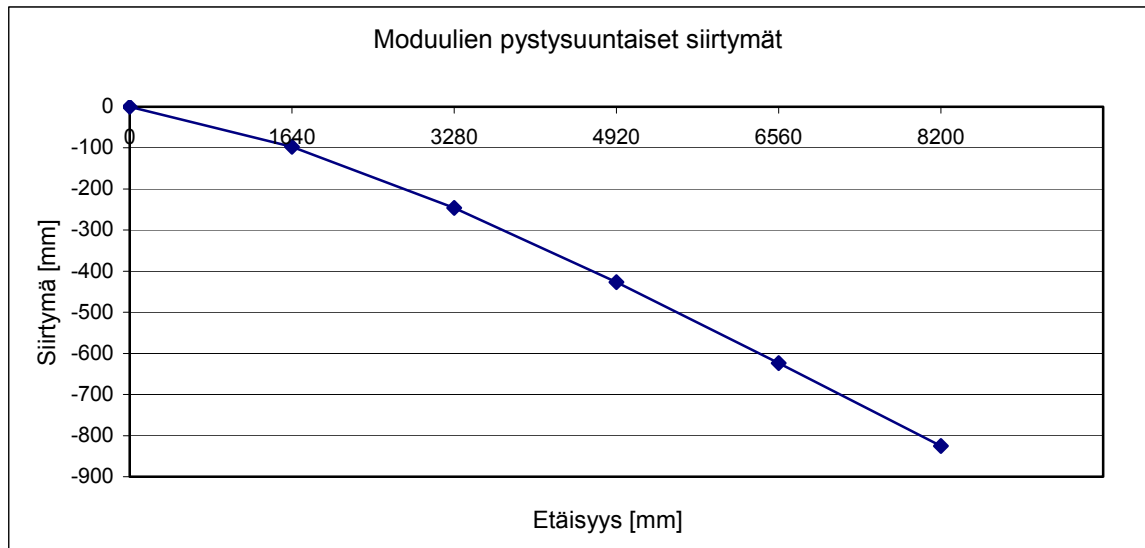
5. VIRTUAALIPROTOTYYPIN TESTAUS

Simulointimallia verrattiin fyysiseen prototyyppiin, sekä laskettuihin suunnitteluarvoihin. Prototyypistä saadut mittaustulokset on ilmoitettu CEA:n toisessa väliraportissa /17/ . Vertailtavat suunnitteluarvot otettiin ensimmäisestä väliraportista /16/, sillä siinä olevat dimensiot ja massatiedot ovat lähempänä simulointimallia. Toiseen väliraporttiin tehtyjä muutoksia ei ollut mahdollista toteuttaa sillä ne olisivat vaatineet Tube Head- ja Tube Base-osista uudet tilavuusmallit. Uudistuneessa mallissa myös päätykappaleet ovat kahdessa viimeisessä moduulissa pienemmät. Näistä ei ollut mittatietoja saatavilla.

5.1. Staattinen analyysi

Virtuaaliprototyypille tehdyissä staattisissa analyyseissä tutkittiin sen omasta painosta syntyvää joustoa, sekä 10 Kg:n kuormalla rakenteissa syntyviä reaktivoimia. Staattisessa analyyseissä nopeudet ja kiihtyvyydet ovat nolliä, jolloin hitausvoimia ei huomioida. Mekanismille etsitään tasapainotila, jossa voimat ja rakenteen siirtymät ovat tasapainossa. Tasapainotilan etsimiseen ohjelma käyttää Newton-Raphson iteraatiomenetelmää. Ohjelma iteroi lineaarisia yhtälöryhmiä kunnes se täyttää kaksi virhekriteeriä: muutokset kaikkien kappaleiden siirtymissä on nolla (Displacement error), ja kaikkien voimien summa on nolla (force imbalance).

ADAMS –ohjelmassa suoritettussa ensimmäisessä staattisessa analyyseissä Tube-osasta on käytössä kaikki valitut muodot. Massainvarianteista on poistettu numerot 5 ja 9, eli käytössä on partial couplin -asetus. Displacement error virhetoleranssi on arvossa 4, ja imbalance arvossa $1e-4$. Analyyseissä kaikki moduulit ovat vaakatasossa ja robotti on täysin suorana. Taulukkoon 5.1 on listattu moduulien päätepisteiden pystysuuntaiset siirtymät. Kuvassa 5.1 on siirtymät esitetty moduulin pituuden funktiona, jolloin ne kuvaavat taipumamuotoa.



Kuv 5.1. Pystysuuntaisten siirtymien muodostama robotin taipumamuoto.

T ulukko 5.1. Moduulien pystysuuntaiset siirtymät

Moduulin nro.	Siirtymä Y [mm]
1	-97
2	-246
3	-427
4	-625
5	-825

Taulukossa 5.2 on moduulien liityntänivelien, base joint, joustosta syntyvät kiertymät, sekä niissä vaikuttavat momentit.

T ulukko 5.2. Nivelien kiertymät sekä niissä vaikuttavat momentit.

Nivel nro.	Nivelen kiertymä [°]	Momentti [Nm]
1	2.43	3114
2	1.46	1873
3	0.78	997
4	0.33	422
5	0.08	97

Väliraportissa lasketuissa kuormitustiedoissa on huomioitu robotin 10 kg:n hyötykuorma. Kuorma lisättiin toiseen staattiseen analyysiin, ja pidettiin muut asetukset samoina. Moduulin tärkeimmissä komponenteissa, putkessa, ruuvissa, ja vetotangoissa esiintyviä voimia on vertailtu taulukoissa 5.3 – 5.5. Erotusprosentti kuvaa simulointimallin eroa suunnitteluarvoihin nähden.

T ulukko 5.3. Nivelissä vaikuttavat momentit 10 kg:n kuormalla.

Nivel nro.	Simuloitu [Nm]	Laskettu [Nm]	Erotus [Nm]	Erotus %
1	3943	3865	78	2.0
2	2535	2453	82	3.3
3	1493	1419	74	5.2
4	753	703	50	7.1
5	263	236	27	11.4

T ulukko 5.4. Vetotangoissa vaikuttavat voimat 10 kg:n kuormalla.

Moduuli nro.	Simuloitu [N]	Laskettu [N]	Erotus [N]	Erotus %
1	26068	24531	1537	6.3
2	15482	14191	1291	9.1
3	7936	7029	907	13.0
4	2898	2362	536	22.6
5	121	100	21	21.0

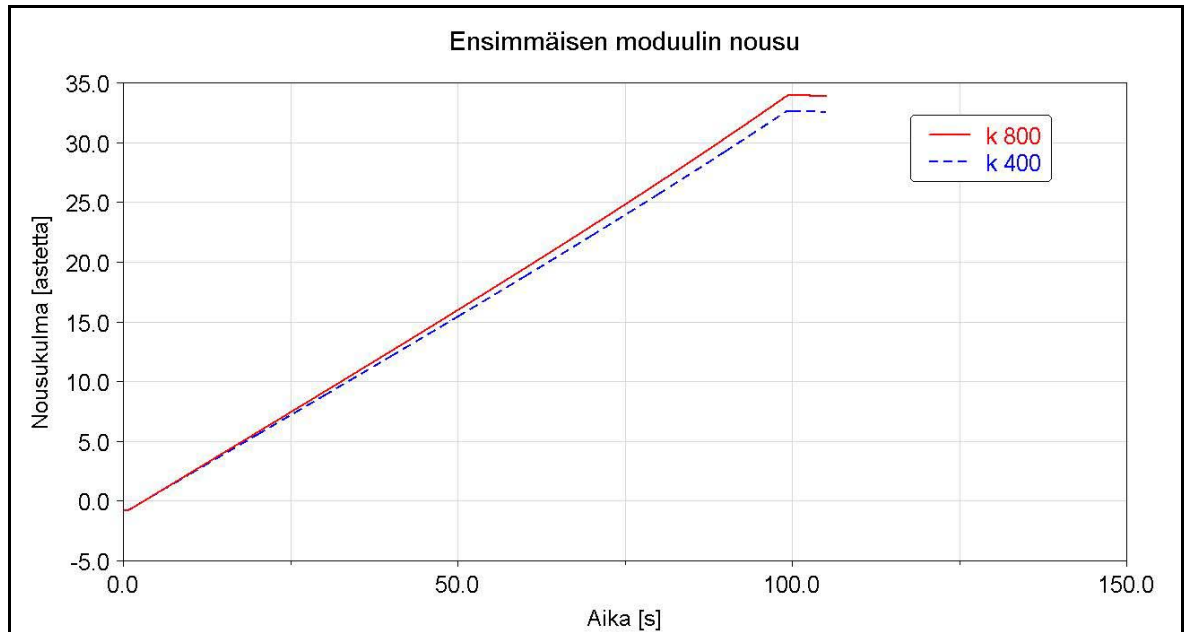
T ulukko 5.5. Ruuveissa vaikuttavat voimat 10 kg:n kuormalla.

Moduuli nro.	Simuloitu [N]	Laskettu [N]	Erotus [N]	Erotus %
1	12542	12808	266	2.1
2	9252	9383	131	1.4
3	6550	6500	50	0.8
4	4335	4235	100	2.4
5	2335	2144	191	8.9

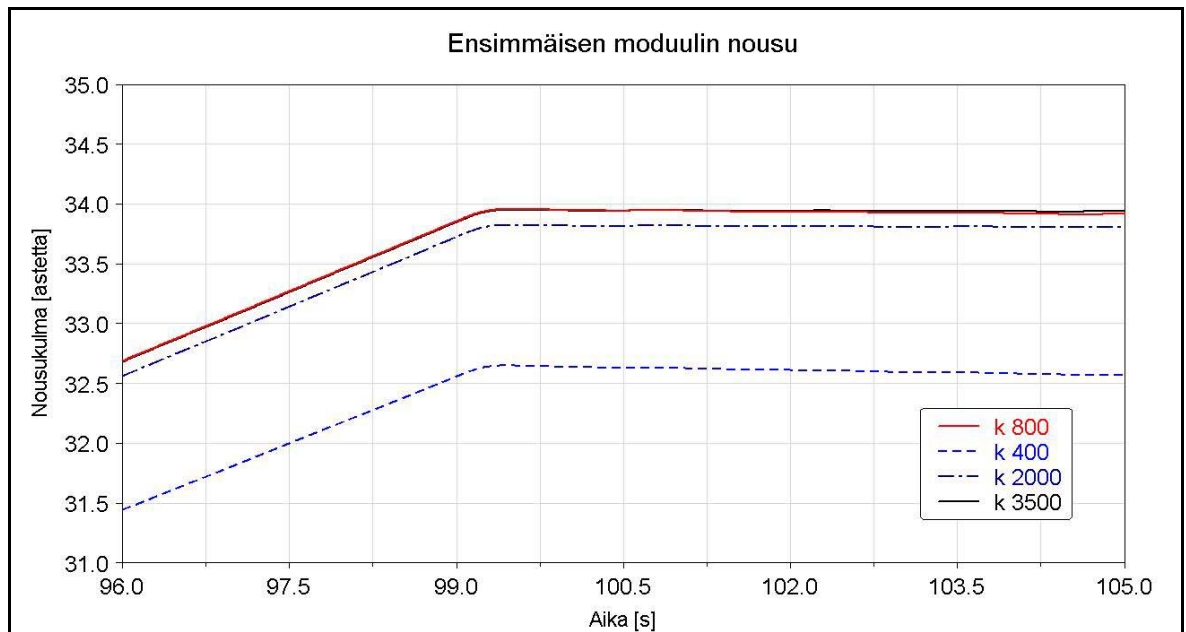
5.2. Ohjausjärjestelmän testaus

Toimilaitteiden ohjauksessa käytettävän P-säätäjän vahvistuksen vaikutusta tutkittiin ajotilanteessa, jossa ensimmäinen moduuli nostetaan kohti 40°:een kulmaan. Tilanne simuloi robotin nostoa asentoon, jossa se ajetaan sisään reaktoriin. Robotin tarkoista liikeradoista ei ole tietoa, mutta kyseinen ajo jäljittelee CEA:n testiraportissa käyttämää staattista testiä, jossa ensimmäinen moduuli oli 40°:een kulmassa. Tällöin nostomekanismin rakenteessa esiintyvät suurimmat kuormitukset.

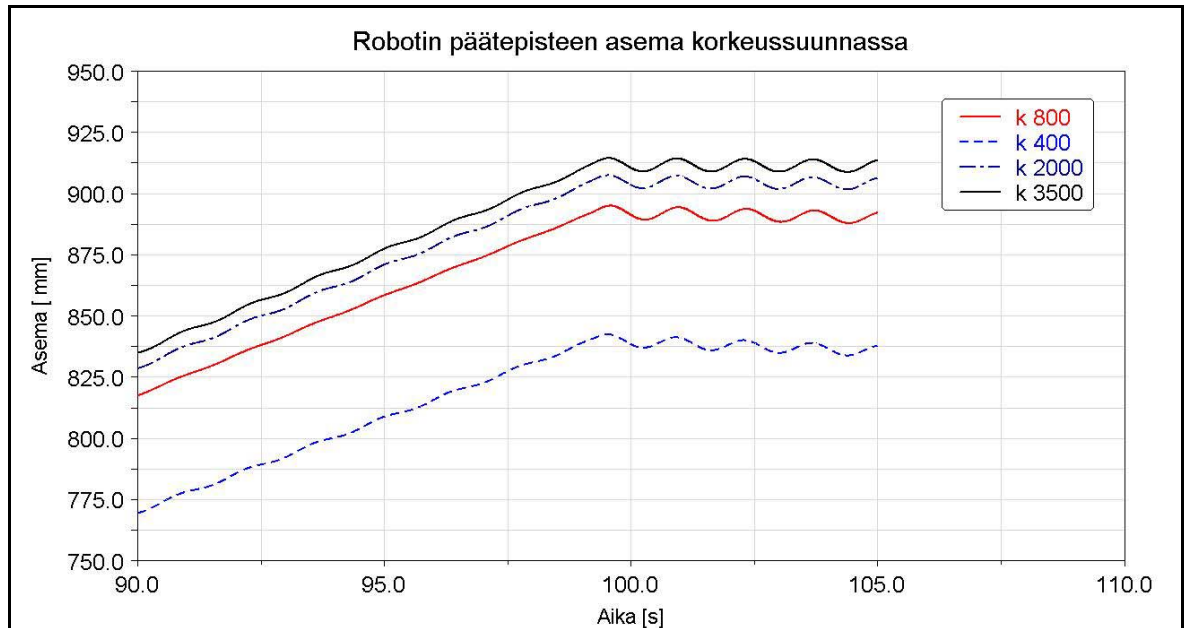
Simulointi aloitetaan vaakatasosta, staattisesta tasapainosta. Moduulin nousunopeudeksi on määritetty sama kuin CEA:n kinemaattisissa testeissä, 0.41°/s, ilman kuormaa. Simuloinnissa moottorille annettiin nopeusohjetta 4820 r/min, joka toteuttaa halutun nousunopeuden. Moottorin ohjausjännite on 20 V. Ohjauksessa käytettiin hyväksi step-funktiota, jolla kiihdytysajaksi määritettiin 0.5 sekuntia. Simulointiaikana dynaamisessa analyysissä oli 105 sekuntia ja integraattorin aika-askeleena 0.01 sekuntia. Virhetoleranssi oli arvossa 3. Vertailu tehtiin vahvistuksen arvoilla 400, 800, 2000 ja 3500. Kuvassa 5.2 on esitetty ensimmäisen moduulin kokonaisnousu ajan funktiona kahdella eri vahvistuksen arvolla. Kaksi arvoa on otettu kuvaajaan mukaan, sillä vain näiden välille syntyi havaittavaa eroa kyseisellä asteikolla. Kuvassa 5.3 on tarkennus saavutetusta asemasta kaikilla vahvistuksilla.



Kuv 5.2. Ensimmäisen moduulin nousukulma kahdella eri vahvistuksen arvolla.



Kuv 5.3. Ensimmäisen moduulin saavuttama asema neljällä vahvistuksen arvolla.

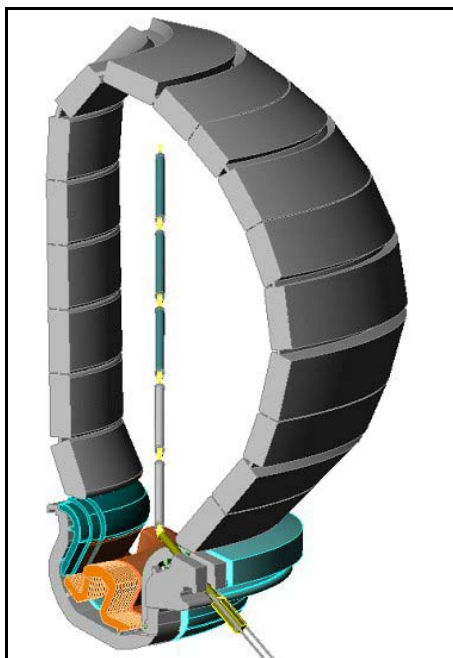


Kuv 5.4. Robotin päätepisteen asema työkierron lopussa.

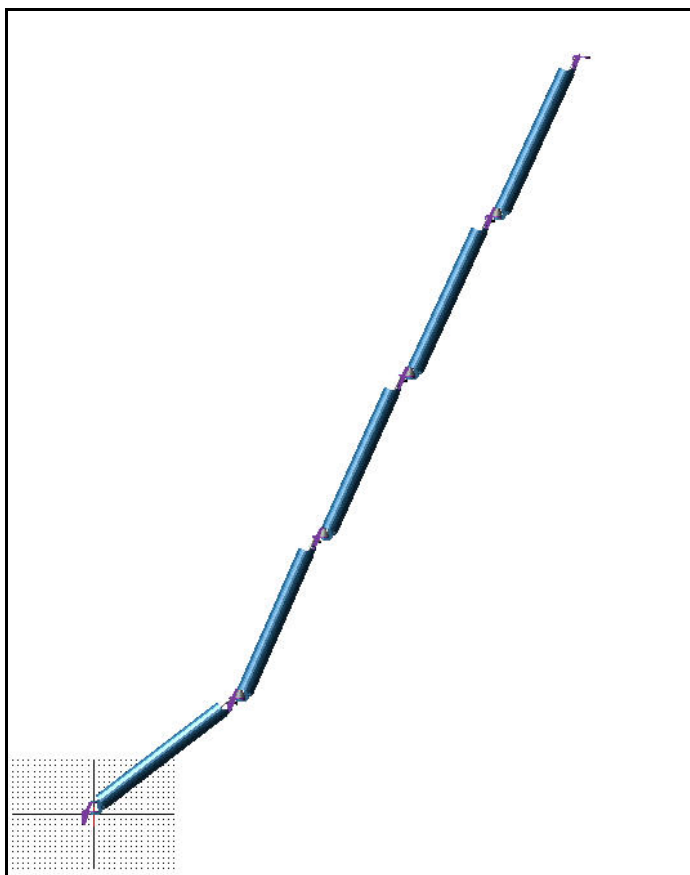
5.3 Esimerkki simuloidusta ajotilanteesta

Robotin työntyessä reaktoriin oletetaan sen asennon olevan työkierron loppuvaiheessa kuvan 5.5 mukainen. Ensimmäistä moduulia työnnetään 40° :een kulmassa reaktoriin, nopeudella 10 mm/s. Muut moduulit ovat ääriasennossaan 70° :een kulmassa. Robotin äkillinen pysähdys aiheuttaa heilahtelua robotin päätepisteessä, jolloin on tärkeä tietää sen käyttäytyminen tällaisessa tilanteessa.

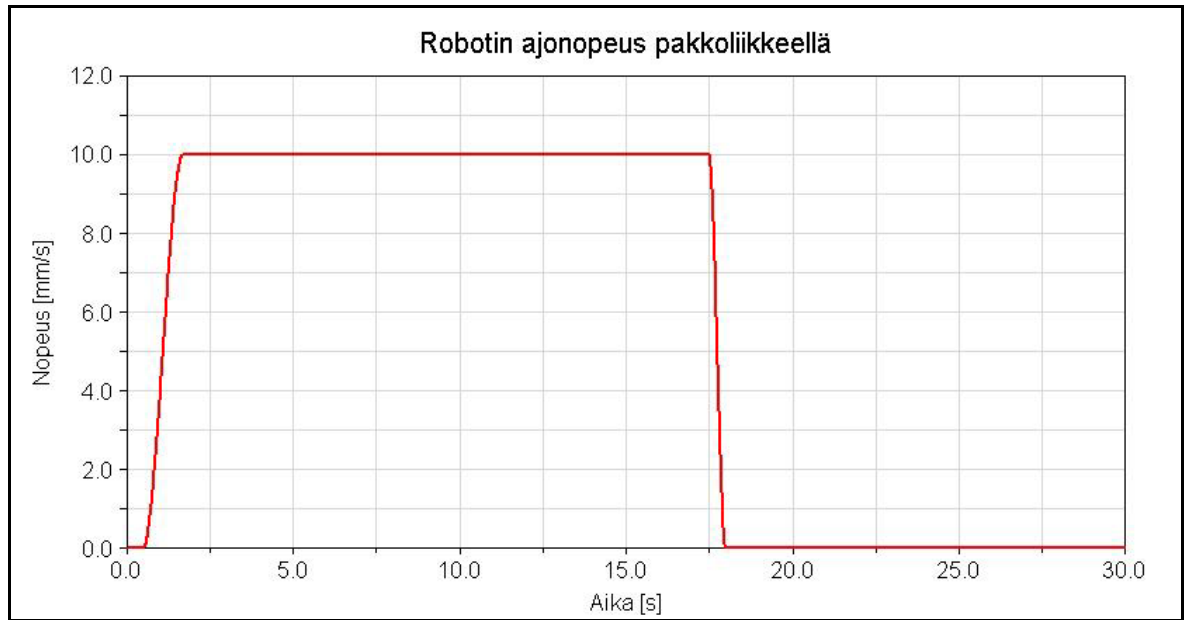
Tilannetta simuloitiin kiinnittämällä robotti juurestaan uuteen kappaleeseen ja liikuttamalla tätä 10 mm/s pakkoliikkeellä 40° :een kulmassa. Simulointimalli on esitetty kuvassa 5.6. Ajonopeutena käytettiin kuvan 5.7 mukaista nopeusfunktiota. Simulointiaika oli 30 sekuntia, aika-askeleena integraattorissa käytettiin 0.001 sekuntia ja näytteenottotaajuutena 0.01 sekuntia. Integraattorin virhetoleranssi oli arvossa 3. Toimilaitteiden ohjauksessa käytettiin vahvistuksen arvona 800. Ohjauksen kiihdytysaika on 1 s ja hidastusaika 0.5 s.



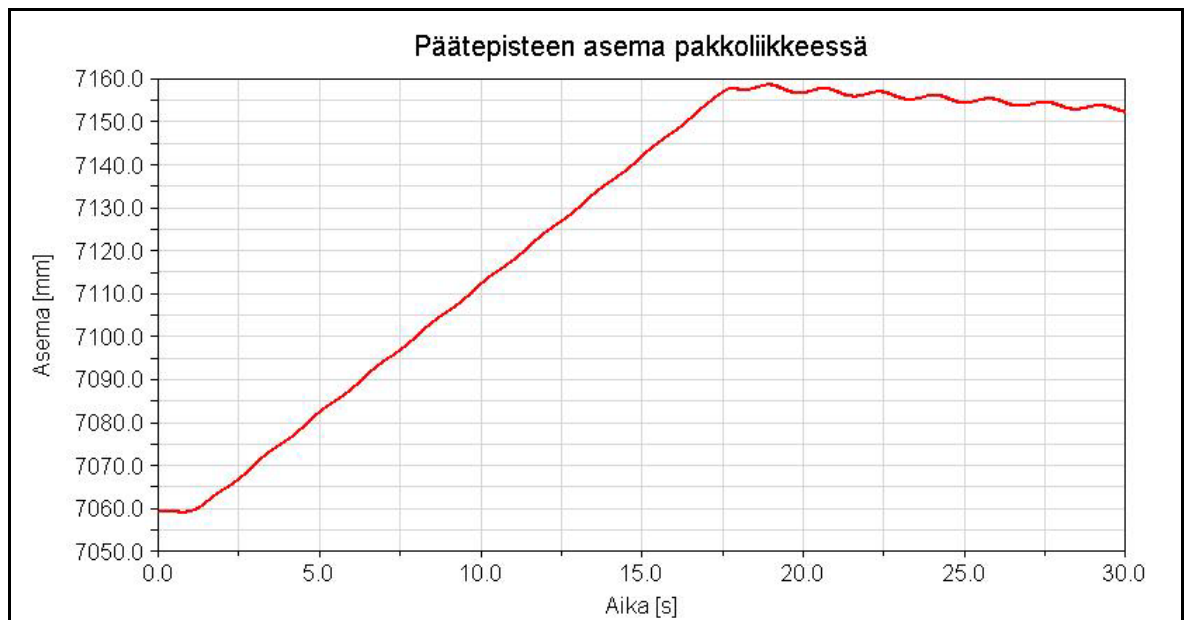
Kuv 5.5. Robotti työntymässä reaktoriin.



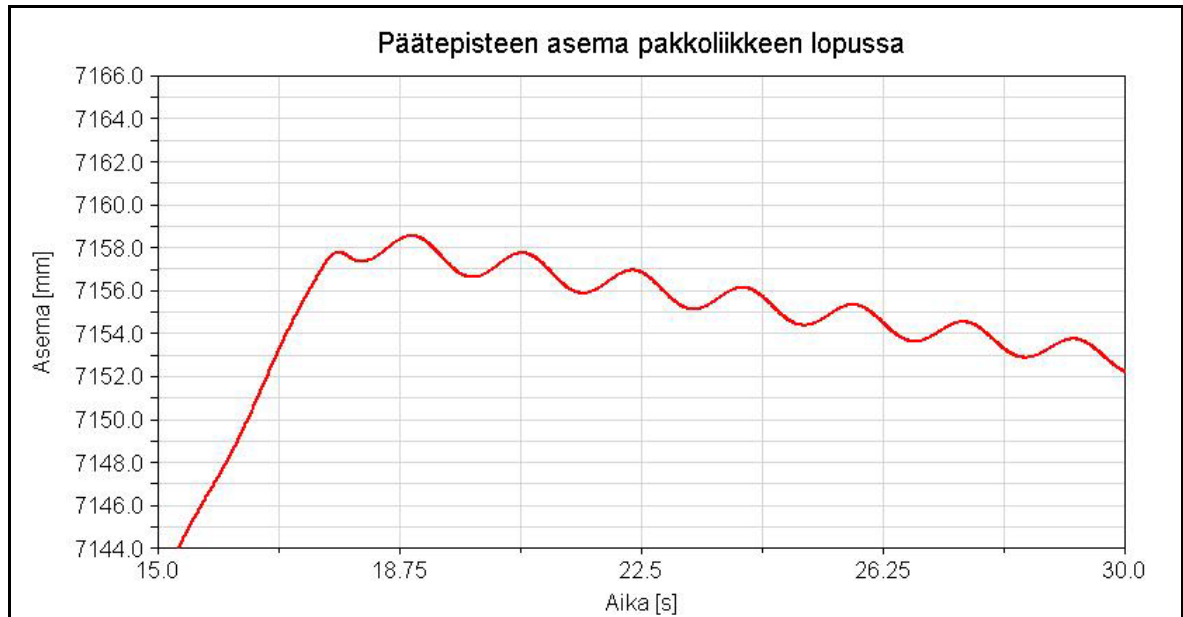
Kuv 5.6. Robotin asento esimerkkitilassa.



Kuv 5.7. Translaationivelen pakkoliikkeen nopeusfunktio.



Kuv 5.8. Robotin päätepisteen pystysuuntainen asema pakkoliikkeen aikana.



Kuv 5.9. Robotin päätepisteen pystysuuntainen asema pakkoliikkeen lopussa.

5.4. Tulosten tarkastelu

Staattisissa analyyseissä selvitetty rakenteessa vaikuttavat voimat ja momentit vastaavat hyvin CEA:n laskemia vastaavia arvoja. Samoin nivelissä syntyvät joustot toteuttavat niille asetetun jäykkyyden $0.78^\circ/\text{kNm}$. Rakenteen huomattava kokonaisjousto syntyy nivelkappaleiden, vetotankojen, putken ja nostomekanismin yhteisvaikutuksesta. Nivelissä tapahtuvalla kiertymällä on kuitenkin merkittävä vaikutus päätepisteen kokemaan siirtymään, sillä pitkästä rakenteesta johtuen kulmamuuutos ensimmäisessä nivelessä aiheuttaa suuren siirtymän päätepisteessä. Yhden asteen kulmamuuutos ensimmäisessä nivelessä laskee robotin päätä 143 mm.

Vetotangoissa vaikuttavat voimien arvot eroavat mitatuista suureista eniten. Vetotankojen kuormitus syntyy moduulin päähän tulevasta momenttikuormituksesta. Kuormitukseen vaikuttavat siis massoista ja maan vetovoimasta aiheutuva pystysuuntainen voima, sekä tämän voiman aiheuttama momenttivarsi. Kokonaismassojen ollessa vertailtavien

laskentatapojen kesken miltei samat, on momenttivarren synnyttävässä massajakaumassa oltava eroa. Suurimmillaan ero simulointimallista mitatun ja väliraportin suunnitteluarvon välillä vetotangoissa on 22.6 %. Prosentti on laskettu toiseksi viimeisestä moduulista, jossa kuormittavan voiman aiheuttaa viimeisen moduulin massa, sekä kuormavoiman (10 kg) momentti, mitä ei lasketuista arvoista (CEA) tunneta. Kuorman momenttivarren vaikutus on ratkaiseva tekijä viimeisen moduulin arvoihin eivätkä tulokset sen osalta näin ollen ole vertailukelpoisia. Simulointimallin viimeisessä moduulissa on 10 %:n ero laskelmissa käytettyyn massaan, joka yhdessä kuorman momenttivarren kanssa aiheuttaa eroa tuloksiin. CEA:n raporteissa on ilmoitettu kolme eri voiman arvoa kyseisille osille, jolloin tulosten vertailu on hankalaa. Robotin massaominaisuudet vaikuttavat merkittävästi myös muihin vertailuihin voimiin ja momentteihin. Kaikkien voimien vertailussa eroa lisäävät myös simulointimallin huomioimat osien joustot.

Säätöpiirin vahvistuksen eri arvoilla voidaan vaikuttaa systeemin mekaaniseen vasteeseen. Vahvistusta kasvattamalla saavutetaan nopeampi vaste, jolloin käyttömomentti nousee nopeammin asettumisarvoonsa. Moduulin käyttäytymisessä tämä näkyy pienempänä notkahtamisena alkutilanteessa. Tällöin systeemi jää kuitenkin herkemmin värähtelemään. Tämä näkyy kuvassa 5.4, missä viimeisen moduulin asema vahvistuksilla 2000 ja 3500 on ennen päätepistettä jatkuvassa värähdysliikkeessä. Säätöjärjestelmä ei kykene korjaamaan matalataajuista värähtelyä. Nostoliikkeen loppuessa robotin päätepiste jää värähtelemään vakioamplitudilla, miltei vahvistuksesta riippumatta. Ensimmäisen moduulin tavoiteasemaa 40° ei saavutettu, mutta nousunopeus $0.346^\circ/\text{s}$ vastaa CEA:n dynaamisessa testissä, kuormitettuna, mittamaa nousunopeutta $0.355^\circ/\text{s}$.

Kuvasta 5.4 voidaan todeta pysähdyksen jälkeisen värähtelyn olevan saman suuruista kolmella suurimmalla vahvistuksella. Vahvistuksen arvolla 400, moduulin nousukulma on kuitenkin hieman selvemmin laskeva. Tuloksissa esiteltyjen kokeiden lisäksi vahvistuksen arvoja kokeiltiin myös yhdelle moduulille, jossa tutkittiin sen pysymistä vaakatasossa eri vahvistuksilla. Havaittiin, että vahvistusta suurennettaessa moduulin nousukulma oli laskeva kaikilla arvoilla, mutta kulmakerroin noin puolittui vahvistusta

kaksinkertaistettaessa. Moduuli ei missään vaiheessa jäänyt värähtelemään vaakatason ympärillä. P-säätäjän ominaisuuksista johtuen vasteeseen ei saada ylitystä, jolloin siihen jää jatkuva virhe. Tämä näkyy mekaniikassa moduulin ”valumisena” alaspäin.

Sisäänajoa simuloivassa esimerkissä ei ollut mukana kuularuuvien itsepidättävyyttä, vaan siinä tutkittiin robotin käyttäytymistä pelkästään säätäjän kannalta. Asemoinnin lopussa esiintyvät värähtelyt sisältävät, kaikista moduuleista kumuloituvat, ohjauksesta sekä mekaanisista joustoista syntyvät värähtelyt. Viimeisen moduulin havaitaan jäävän värähtelemään liki vakioamplitudilla hieman laskevasti, kuten säätäjän testauksessakin havaittiin. Liikkeen aikana päätepiste on jatkuvassa pienessä värähdysliikkeessä, kun säätäjä yrittää pitää moduulia suorana.

Liikenopeus sisäänajovaiheessa on hyvin hidas, jolloin mekaniikan joustoista ei todennäköisesti synny toteutetussa testissä merkittäviä herätteitä. Jouston vaikutusta tulisi tutkia erikseen mallilla, jossa nostomekanismin kuularuuvi on täysin lukittu. Tällöin voitaisiin etsiä rajanopeutta, jolloin mekanismin joustojen aiheuttamien värähtelyiden suuruus on haitallista robotin toiminnan kannalta. Liikenopeuteen kiihdytyksellä on suuri vaikutus robotissa syntyvään värähtelyyn. Liikenopeutta voidaan ilmeisesti nostaa huomattavasti, mikäli kiihdytys- ja hidastusajat ovat riittävän suuret. Esimerkissä käytetty kiihdytysaika 1 s on suhteellisen nopea, sillä viimeinen moduuli jää hieman huojumaan. Pysähdysajalla 0.5 s saadaan päätepiste jo selvään värähtelyliikkeeseen.

Liiketyhtälöiden numeerinen integrointi tuo aina virhettä simulointituloksiin. Integroinnista johtuvien virheiden suuruuden arviointi on kyseisessä tapauksessa kuitenkin vaikeata, sillä tarkka vertailukohta puuttuu täysin. Mikäli tiedossa olisi määrätystä työkierrosta mitatut vasteet, voitaisiin simuloinnin tuloksia verrata näihin vasteisiin ja eri integrointiasetusten vaikutusta vertaillen päätellä mahdollisia virhelähteitä. Integroinnista johtuvan virheen voidaan nykyisessä simulointimallissa katsoa olevan hyvin pientä.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli muodostaa IVP-huoltorobotin virtuaaliprototyyppi, jolla voidaan simuloida erilaisia työkiertoja ja hyödyntää saatuja tuloksia robotin tuotekehityksessä. Virtuaaliprototyyppi toteutettiin kaupallisella ADAMS –ohjelmistolla. Osien joustavuuden tutkimiseen sekä liittämiseen simulointimalliin käytettiin ANSYS –ohjelmistoa, ja ADAMS/FLEX –moduulia. Toimilaitteiden ja käyttöjen dynaamiset ominaisuudet huomioitiin valmistajan antamien mitoitustietojen perusteella.

Simulointimallia verrattiin fyysisestä prototyypistä mitattuihin arvoihin, sekä suunnittelussa laskettuihin mitoitustietoihin. Mitattuja tietoja käytettiin hyödyksi myös mallinnusvaiheessa. Mekanismin osiin tehtyjen yksinkertaistusten, sekä joidenkin osien mitoituksen arvioinnin voidaan todeta onnistuneen, sillä mm. rakenteen massatiedot vastaavat punnittuja arvoja tyydyttävällä tasolla. Rakenteessa vaikuttavat voimat vastasivat myös hyvin mitoitustietoja. Joustavuuden vertailu mitattuihin arvoihin oli hieman hankalaa sillä testiraportissa ilmoitettiin pääasiassa vain nivelten kulmamuutoksia. Arvot eivät täsmänneet laskettuihin FE-mallien arvoihin, joten simulointimallissa käytettiin mitattuja arvoja. Mallin mekaniikan voidaan kokonaisuudessaan todeta vastaavan hyvin sen hetkisten suunnitelmien mukaista rakennetta jolloin mallinnus aloitettiin.

Virtuaaliprototyypin suurimpana puutteena voidaan pitää suunnitteilla olevan ohjausjärjestelmän puutumista mallista. Toimilaitteet ja käytöt on huomioitu mallissa, mutta työkierron suorittamiseen esimerkiksi nousukulman funktiona ei ole olemassa vielä riittävän hyvää toteutusta. Työkiertojen simuloitavuus hankaloituu kunnollisen ohjauksen puuttuessa. Joustokehävaihteen vaikutuksen jääminen pois diplomityössä käytetystä dynaamisesta mallista on myös selvä puute. Sen vaikutus työssä esitettyihin mallin tuloksiin on kuitenkin merkityksettömän vähäinen.

Työssä esiintyvien komponenttien, kuten joustokehävaihteen sekä kuularuuvien tehokkaaseen mallinnukseen ei tuntunut olevan keinoja. ADAMS –ohjelmistossa ei ole käytettävissä komponenttikirjastoa, josta voitaisiin valita eri toimilaitteet realistisesti mallintavia kuvauksia. Ohjelmassa oleva ruuvinivel voidaan kuvata niveltyyppinä, joka käsittelee liikerajoitteita, mutta ei huomioi esimerkiksi ruuvien itsepidättävyyttä. Välysten sekä muiden toimilaitteissa esiintyvien ilmiöiden mallinnuksen käytettävissä olevien peruskuvausten avulla todettiin olevan erittäin työlästä. Toisaalta valmiiden, usean fysikaalisen ilmiön huomioonottavien, komponenttien käytöllä kasvatettaisiin helposti laskenta-aikaa liian suureksi, jolloin vaarana olisi mallien kasvaminen tarkoituksettoman suuriksi.

Simulointiasetusten merkitys korostuu robotin hidasliikkeisyydestä johtuen. Sopivalla integraattorin aika-askeleella voidaan vaikuttaa huomattavasti käytettyyn ratkaisuaikaan. Hidasliikkeisyydestä johtuen työkiertojen kestoajat ovat pitkiä, jolloin myös analyyseistä tulee pitkiä ja tulostiedostojen koot kasvavat suuriksi. Tutkittavat ilmiöt ovat kuitenkin matalataajuisia, jolloin ne saadaan selville hieman pidemmällä integraattorin aika-askeleella ja näin simulointia voidaan yrittää nopeuttaa. Ratkaisuajan kannalta tehokkaimmaksi aika-askeleeksi havaitulla 100 Hz taajuudella saadaan jo useimmat tutkittavat ilmiöt mekanismista näkyviin.

Diplomityössä tehdyllä virtuaaliprototyypillä voidaan simuloida monenlaisia ajotilanteita reaktorin sisällä, sen toimivuus eri asennoissa ja oikeaoppinen kinemaattinen käyttäytyminen mahdollistavat tärkeät visuaaliset tarkastelut sen käyttäytymisestä. Dynaamisten ajotilanteiden hallinta auttaa suunnittelemaan robotin ohjausta, sekä helpottaa ymmärtämään sen reagoitua erilaisiin herätteisiin. Kahden vierekkäisen robotin yhteistyön tulee reaktorin sisällä olla hallittua, jolloin turva-alueet ja erilaiset ajojen vaiheistukset voidaan helpommin määrittää rakennetulla virtuaaliprototyypillä.

6.1. Jatkokehitys

Diplomityön tuloksena syntynyttä virtuaaliprototyyppeä tullaan kehittämään, jo esitettyjen puutteiden korjaamiseksi. Käytetystä mallinnustekniikasta johtuen muutosten tekeminen on suhteellisen nopeaa, jolloin mallin kehitys etenee uusien ideoiden myötä sujuvasti. Virtuaaliprototyypille tullaan mallintamaan kehittyneempi ohjausmenetelmä niin, että sitä voidaan ohjata annettujen pisteiden kautta, tai sille voidaan antaa suoraa asematietoa. Mekaanisten joustojen, erityisesti nivelien, tarkkuutta tullaan mahdollisuuksien mukaan parantamaan. Osien parametritietojen päivitys toisen kehitysversion tasolle on yksi mahdollinen kehityksen kohde. Tämä edellyttää kuitenkin uusien osien suunnittelutietojen sekä 3D-mallien saamista CEA:lta. Osien suunnitteluasteesta ei ole tarkempaa tietoa. Vain joitakin yksittäisiä mittoja on tiedossa.

Nykyisen simulointimallin visualisointia voidaan kehittää luomalla sille jonkinlainen ympäristö, tai rajoitteet joita sen tulee noudattaa. Näin voitaisiin havainnollistaa robotin vaatimien toleranssien suuruutta ja riittävyttä. Sisäänmenovaiheessa robotin liikeradan visualisoinnilla voidaan havainnollistaa moduulien tarvitsemaa tilaa, jolloin huoltoaukon kokoa sekä suuntaa voitaisiin optimoida.

Tärkeimpänä jatkotoimenpiteenä on kuitenkin todellisten työkiertojen simulointi ja näistä saatavan tiedon muokkaaminen tehokkaasti hyödynnettävään muotoon. CEA:n tarkoituksena on ilmeisesti nostaa robotin nopeutta, jolloin mallilla olisi hyvä simuloida uusien käyttöjen vaikutusta ennen testausta. Tiedonkulku aktiivisen suunnittelun toteutuessa on kuitenkin ensiarvoisen tärkeää. Tämä edellyttää hyvää yhteistyötä kummaltakin osapuolelta, sekä varauksetonta tiedonjakoa avainkomponenttien kohdalla.

LÄHDELUETTELO

- [1] NASA. JPL Serpentine Robot. Internet julkaisu. [Viitattu 17.4.2002] Saatavissa: <http://robotics.jpl.nasa.gov/tasks/rsi/accomplishments/snake/snake.html>

- [2] Fraçzek, J. Kinematical Synthesis and Dynamical Analysis of Multilink Robot Using Multi-Body Approach. [viitattu 17.4.2002] Saatavilla: http://www.adams.com/news/events/userconf/euro/2000/Warsaw_Multilink_Robot.pdf

- [3] Salmi, T. 1997. Dynamiikka 2. Kinetiikka, Teoriaa ja esimerkkejä. Pressus Oy. 312s. ISBN 952-9835-24-8.

- [4] Mikkola, A. 2000. Mekatronisen koneen simulointi. Luentomoniste. Lappeenrannan Teknillinen Korkeakoulu. 96 s.

- [5] Shabana, A. A. 1998. Dynamics of Multibody Systems. Second Edition. Cambridge University Press. 372 s. ISBN 0-521-59446-4.

- [6] Hakala, M. K. 1980. Lujuusopin Elementtimenetelmä. Otakustantamo. 490 s. ISBN 951-671-395-5.

- [7] Ottarsson, G. Appendix D. Theoretical Background. Mechanical Dynamics, Inc.2000. [Viitattu 17.4.2002] Saatavissa: <http://support.adams.com/kb/faq.asp?ID=kb7247.html>

- [8] Craig, R. R. Jr. & Bampton, M. C. C. Coupling of Substructures for Dynamic Analyses. AIAA Journal Vol. 6, No. 7, July 1968.

- [9] Ottarsson, G. Modal Flexibility Method in ADAMS/FLEX. Mechanical Dynamics, Inc. 1998.
- [10] ADAMS 10.0 Online Documentation. Mechanical Dynamics, Inc. 1999.
- [11] Hammarberg, T. Arola, S. Leino, S-P. Venemies, M. Liukkula, M. Mikkola, A. Handroos, H. Dynamiikan simuloinnin mahdollisuudet moniteknisten konejärjestelmien tuotekehityksessä. Tekninen tiedotus. Metalliteollisuuden keskusliitto 2001. 74 s. ISBN 951-817-774-0.
- [12] Wuolijoki, J. R. 1971. Johdatus mekanismioppiin. Moniste n:o 160. Teknillisen Korkeakoulun Ylioppilaskunta. 92 s.
- [13] Sandor, G. N. & Erdman, A. G. 1984. Advanced Mechanism Design: Analysis and Synthesis, Volume 2. Prentice-Hall, Inc. 688 2. ISBN 0-13-011437-5.
- [14] Loisa, A. 1990. Mekanismien järjestelmällinen mallintaminen moderneilla mekanismien analysointiohjelmilla. Tutkimusraportti 3. Lappeenrannan Teknillinen Korkeakoulu. 126 s. ISBN 951-763-644-X.
- [15] Perrot, Y. 2001. Prototypal carrier for access through IVVS penetration (IVP), Intermediate report. Raportti. CEA. 31 s.
- [16] Perrot, Y. 2002. In Vessel Penetrator (IVP) Manufacture and test of a demonstrator report. Raportti. CEA. 39 s.
- [17] Rahnejat, H. 1998. Multi-Body Dynamics. Vehicles, Machines, and Mechanisms. Professional engineering Publishing. 355 s. ISBN 1-86058-122-6.
- [18] Airila, M. 1993. Mekatroniikka. Otatiето. 367 s. ISBN 951-672-173-7.

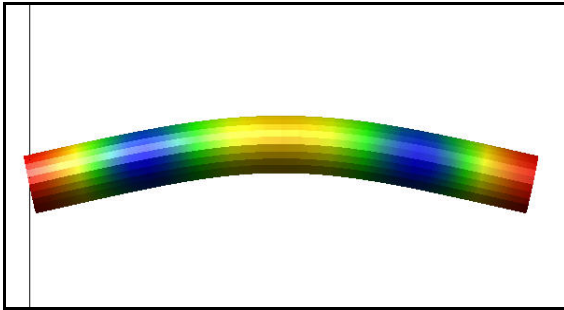
LIITTEET

Liite 1. Laskennassa käytetyt Tube-osien ominaismuodot.

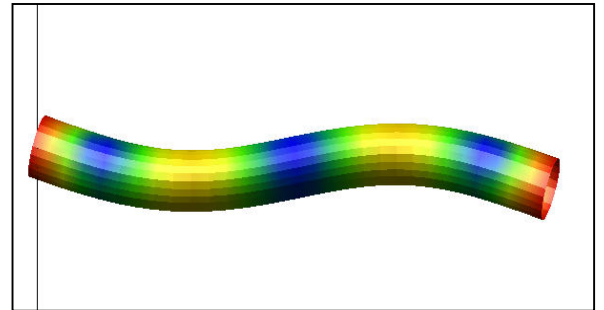
Liite 2. Virtuaaliprototyypin ensimmäisen moduulin ADAMS –geometria.

Liite 1. Laskennassa käytetyt Tube-osien ominaismuodot.

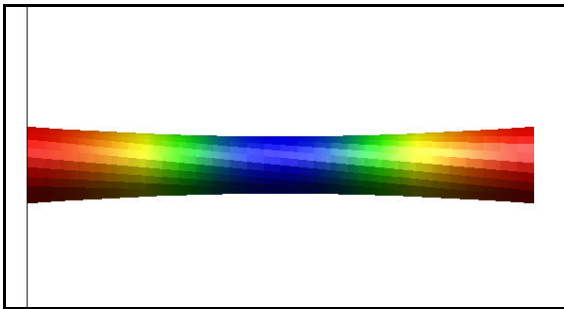
Taivutus- ja staattisia muotoja on kutakin kaksi kappaletta, kuvat 1, 2, 5, 6.



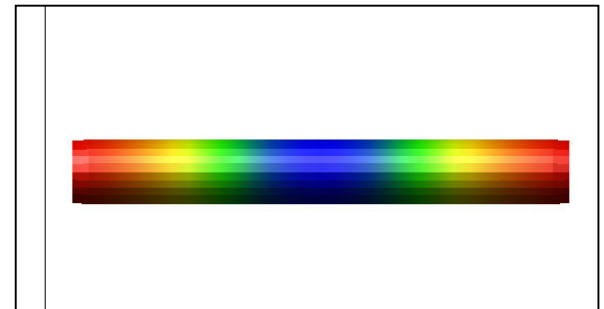
Kuva 1. Oinaismuoto 431.4 Hz



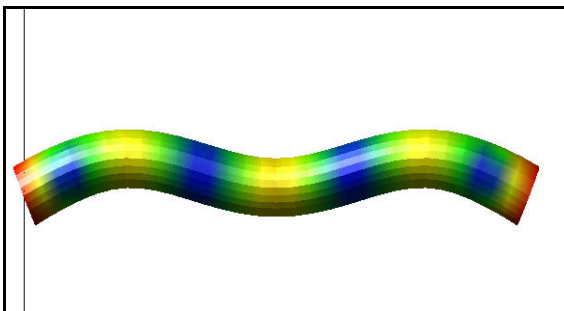
Kuva 2. Oinaismuoto 1078.9 Hz



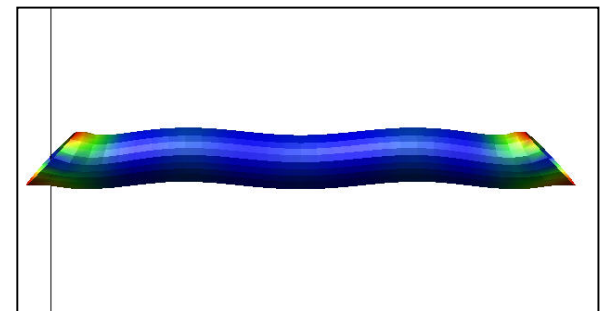
Kuva 3. Oinaismuoto 1125.3 Hz



Kuva 4. ominaismuoto 1825.1 Hz



Kuva 5. Oinaismuoto 1868.7 Hz



Kuva 6. Staattinen muoto 7174.8 Hz

Liite 2. Virtuaaliprototyypin ensimmäisen moduulin ADAMS –geometria.

