

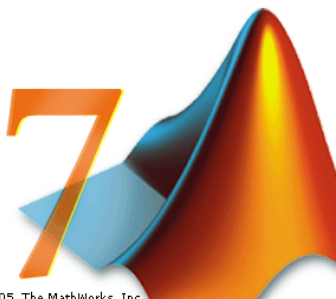


# SimMechanics 2.3

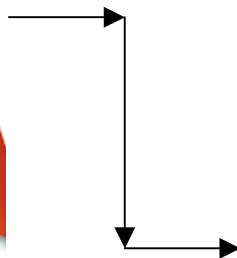
## Aloitussopas

© Matti Lähteenmäki  
2006  
[www.tamk.fi/~mlahteen/](http://www.tamk.fi/~mlahteen/)

**MATLAB**<sup>®</sup>  
*The Language of Technical Computing*



Copyright 1984-2005, The MathWorks, Inc.



**SimMechanics**

**Simulink**<sup>®</sup>

# SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto	3
1.1	Yleistä	3
1.2	SimMechanics analyysin vaiheet	3
1.3	Kappaleiden, liitosten ja rajoitteiden mallinnus	3
1.4	Antureiden ja toimilaitteiden mallinnus	4
1.5	Analyysityypit	4
1.6	Visualisointi	5
2	SimMechanics demot	6
3	SimMechanics lohkokirjastot	16
4	Simulointi	21
5	Visualisointi	23
6	Esimerkki	25

# 1 Johdanto

## 1.1 Yleistä

SimMechanics on MATLABin ja Simulinkin lisäohjelma, jolla voidaan mallintaa jäykistä kappaleista koostuvia mekanismeja ja analysoida niiden dynaamista käyttäytymistä. Analyysi perustuu kappaleiden tavanomaiseen Newtonin liikeyhtälöihin, mutta ohjelman käyttäjä ei muodosta näitä yhtälöitä eksplisiittisesti. Mekanismin rakenne ja ominaisuudet kuvataan Simulink tyyllisellä lohkokaavioilla ja liikeyhtälöiden muodostaminen ja ratkaiseminen tapahtuvat ohjelman sisäisesti.

SimMechanics lohkokaavio eroaa kuitenkin oleellisesti Simulink lohkokaaviosta. SimMechanics lohkokaaavion lohkot edustavat yleensä mekanismin fysikaalisia komponentteja ja lohkoja yhdistävät kytkentäviivat kuvaavat näiden komponenttien välisiä vuorovaikutuksia eivätkä siis yleensä kuljeta signaaleja. Simulink lohkokaaavion lohkot puolestaan edustavat systeemin yhtälöjärjestelmään sisältyviä matemaattisia operaatioita ja lohkoja yhdistävät signaaliviivat kuvaavat toisen lohkon ulostulon siirtymistä toisen lohkon käyttöön sen sisäänmenon kautta.

SimMechanics lohkoilla voidaan mallintaa mm. kappaleiden hitausominaisuudet, mekanismin alkutila, monen tyyppisiä kappaleiden välisiä liitoksia, kappaleiden liikerajoitteita ja liikeohjauksia, mekanismin liikesuureita mittaavia antureita ja sitä liikuttavia toimilaitteita.

## 1.2 SimMechanics analyysin vaiheet

Mekanismin analysointi SimMechanicsilla sisältää tyypillisesti seuraavia vaiheita.

- Mekanismin kappaleet ja niiden liitokset mallinnetaan kirjastolohkoilla. Kappaleiden ja liitosten kytkennät esitetään piirtämällä tarpeelliset kytkentäviivat. Kappaleiden ja liitosten ominaisuudet määritellään niitä vastaavien lohkojen parametri-ikkunoissa.
- Lisätään ja kytketään kirjastolohkot, jotka mallintavat kappaleiden liikerajoitteet, tulosten mittaamiseen käytettävät anturit sekä kappaleita ja liitoksia kuormittavat toimilaitteet. Lohkojen parametri-ikkunoissa määritellään, mitä ne rajoittavat, mittaavat tai ohjaavat. Lisätään ja kytketään tarvittavat Simulink lohkot ja määritellään niiden avulla vaadittavat ohjaussignaalit sekä ohjataan mitatut signaalit tallennettavaksi.
- Määritellään simulointiparametrit ja ratkaistaan laadittua lohkokaaaviota vastaava yhtälöjärjestelmä jollakin Simulinkin ratkaisijalla.
- Mallinnuksen ja simuloinnin aikana mallia visualisoidaan grafiikkaikkunassa.

## 1.3 Kappaleiden, liitosten ja rajoitteiden mallinnus

SimMechanics malliin liittyy aina joukko koordinaatistoja. World koordinaatisto on levossa oleva inertiaalikoordinaatisto ja sen Sim Mechanics asettaa automaattisesti. Muut koordinaatistot kiinnitetään kappaleisiin ja niiden sijainnit ja akseleiden suunnat on annettava.

Kappaleita mallinnetaan Ground ja Body kirjastolohkoilla. Ground lohko esittää levossa olevaa kappaletta ja sille määritellään yksi levossa oleva koordinaatisto. Body lohko esittää liikkuvaa kappaletta ja sillä on aina massakeskiöön kiinnitetty koordinaatisto ja lisäksi tarvittava määrä muihin pisteisiin kiinnitettyjä koordinaatistoja. Body lohkon koordinaatistot on siis kiinnitetty kappaleeseen ja ne liikkuvat sen mukana. Kutakin kappaletta esittävän Body lohkon parametri-ikkunassa määritellään kappaleen inertiaominaisuudet (massa ja hitausmatriisi massakeskiöön kiinnitetyssä koordinaatistossa) ja kappaleeseen kiinnitettävien koordinaatistojen (porttien) sijainnit ja akselien suunnat.

Kappaleet voivat kytkeytyä toisiinsa liitoksilla, jotka mallinnetaan Joints kirjastolohkoilla ja ne kuvaavat niitä liikemahdollisuuksia, joita kappaleilla on toisiinsa nähden. Joints lohko kiinnittyy liitettävissä kappaleissa jonkin kappalekoordinaatiston origoon. Joints lohkon parametri-ikkunassa määritellään liitoksen vapausasteet (primitiivit) ja portit antureita ja toimilaitteita varten. Kappaleiden välisille liikemahdollisuuksille voidaan antaa kinemaattisia rajoitteita kytkemällä ne toisiinsa Constraints & Drivers lohkoilla. Niillä voidaan asettaa kappaleiden välille sekä ajasta riippumattomia liikerajoitteita että halutun ajasta riippuvan funktion mukaisia liikeohjauksia. Drivers lohkon rajoitefunktio puolestaan syötetään Driver Actuator lohkokosta, jonka sisäänmenona voi olla Simulink signaali. Constraints & Drivers lohkoihin voidaan myös kytkeä antureita.

## 1.4 Antureiden ja toimilaitteiden mallinnus

SimMechanics lohkokaavioissa ainoastaan Sensor ja Actuator lohkoihin voidaan kytkeä Simulink signaaleja.

Sensor lohkoja käytetään mallintamaan kappaleisiin tai liitoksiin kiinnitettyjä antureita, jotka mittaavat systeemin dynaamisia suureita. Sensor lohkojen ulostulo on Simulink signaali ja se voidaan näin ollen ohjata johonkin toiseen Simulink lohkoon.

Actuator lohkoja puolestaan käytetään kappaleisiin ja liitoksiin vaikuttavien voimien ja momenttien mallintamisen ts. ne kuvaavat erilaisia toimilaitteita. Actuator lohkon sisäänmeno on Simulink signaali ja se voi siis olla peräisin jostakin toisesta Simulink lohkokosta. Actuator lohkoja käytetään myös systeemin alkuehtojes antamiseen ja ohjamaan kappaleiden liikkeitä rajoittavia lohkoja. Sensor lohkon ulostulo voidaan ohjata Actuator lohkon sisäänmenoksi, mikä mahdollistaa takaisinkytkennän.

Voimaelementit (Force Elements) ovat systeemin sisäisiä 'toimilaitteita', jotka aiheuttavat kappaleiden välille voimia, kun niiden kinemaattiset suureet poikkeavat alkuarvoistaan. Body Spring&Damper lohko aiheuttaa kahden kappaleen välisen jousi- ja vaimennusvoiman. Joint Spring&Damper on vastaava kahden kappaleen liitokseen kiinnittyvä lohko.

## 1.5 Analyysityypit

SimMechanicsissa on tarjolla neljä erityyppistä mekanismien analysointimahdollisuutta, jotka ovat suora dynamiikka (Forward Dynamics), käänteinen dynamiikka (Inverse Dynamics), kinemattinen analyysi (Kinematics) ja virittäminen (Trimming).

- Suorassa dynamiikassa tunnetaan ennalta kaikkien kappaleiden inertiaominaisuudet, kuormitukset ajan funktiona ja systeemin alkutila (asemat ja nopeudet). Lisäksi voidaan antaa mekanismin vapausasteiden määrää pienempi joukko keskenään ristiriidattomia asemiin ja nopeuksiin kohdistuvia rajoitteita. SimMechanics selvittää seurauksena olevan liikkeen suuret ratkaisemalla kappaleiden liikeyhtälöiden ja rajoiteyhtälöiden muodostaman yhtälöryhmän jollakin Simulinkin ratkaisijalla.
- Käänteistä dynamiikkaa voidaan soveltaa vain avoimiin kinemaattisiin ketjuihin. Tässä analyysityypissä ratkaistaan kuormitukset, jotka tarvitaan, jotta mekanismi liikkuisi tietyllä ennalta määrättyllä tavalla.
- Kinemaattinen analyysi on tarkoitettu samanlaiseen käyttöön kuin käänteinen dynamiikka, mutta se sopii mekanismeihin, joissa esiintyy suljettuja kinemaattisia ketjuja. Rajoitteita voi olla kuitenkin vain suljetuissa ketjuissa.
- Virittäminen on suoran dynamiikan muoto, joka käyttää malliin Simulinkin `trim` komentoa, mikä puolestaan tekee mahdolliseksi systeemin tasapainotilan etsimisen.

## 1.6 Visualisointi

SimMechanics ohjelmaan sisältyy visualisointityökalu, joilla voidaan tarkastella mallia sekä sen luonnin että simuloinnin aikana. Visualisointityökalu käyttää MATLABin grafiikkaikkunaa, jossa kuitenkin on SimMechanicsiin liittyviä lisätoimintoja. Jos käyttäjällä on Virtual Reality Toolbox, visualisointi voidaan suorittaa myös sen mukana tulevassa virtuaalitodellisuusikkunassa.

Visualisointityökalu pystyy esittämään mekanismiin kuuluvat kappaleet ja niihin kiinnitetyt koordinaatistot. Kappaleet esitetään vain melko karkeasti yksinkertaistetussa muodossa, sillä SimMechanicsilla ei ole käytettävissään täydellistä tietoa kappaleen geometriasta. Kappaleista annetaan vain inertiaominaisuudet ja tarvittava joukko kappaleeseen kiinnitetyjä koordinaatistoja, joista se voi kiinnittyä mekanismin muihin osiin. Yksinkertaistetuksi esitysmuodoksi voidaan valita kappalekoordinaatistojen origoista muodostuvan pistejoukon konvekksi verho tai kappaleen kanssa ekvivalentti ellipsoidi. Ekvivalenttisuus tarkoittaa, että pähkäusmomentit ovat samat.

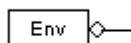
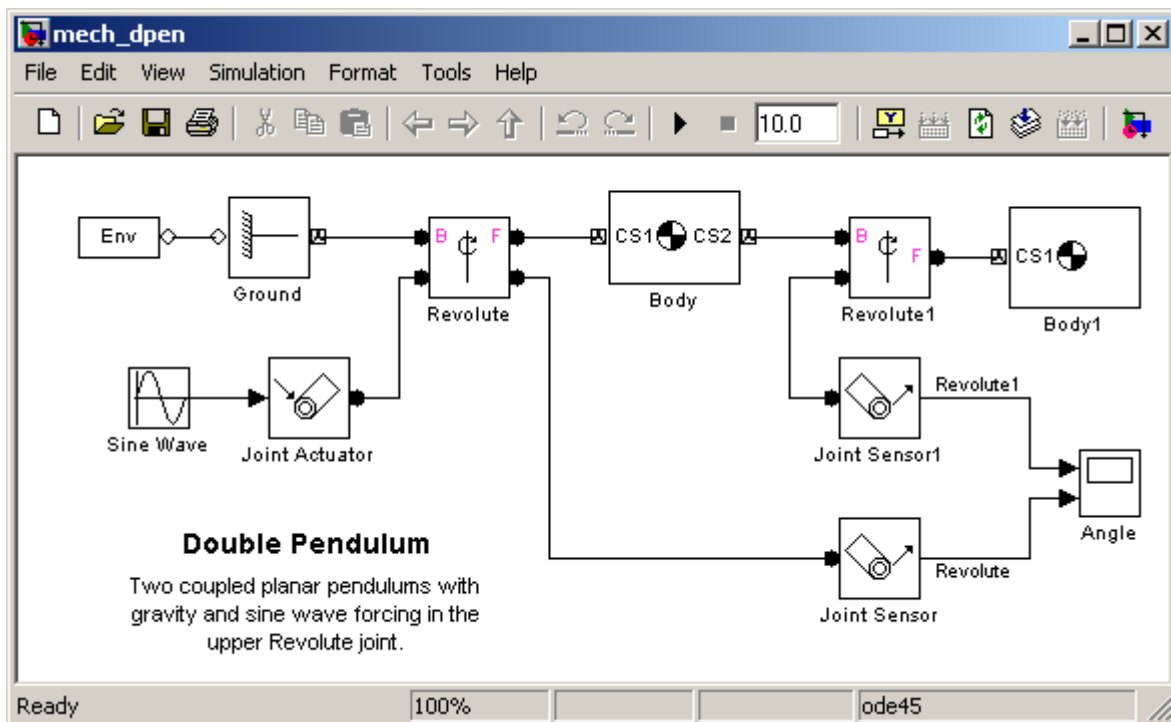
Mekanismin realistisempi esittäminen virtuaalitodellisuusikkunassa on mahdollista, mutta edellyttää geometrian VRML-ohjelmointia. Tällöin mekanismin SimMechanics lohkoavioon voidaan lisätä rajapinta sen VRML-malliin, mikä tekee visualisoinnista huomattavasti enemmän todellisuutta vastaavan.

## 2 SimMechanics demot

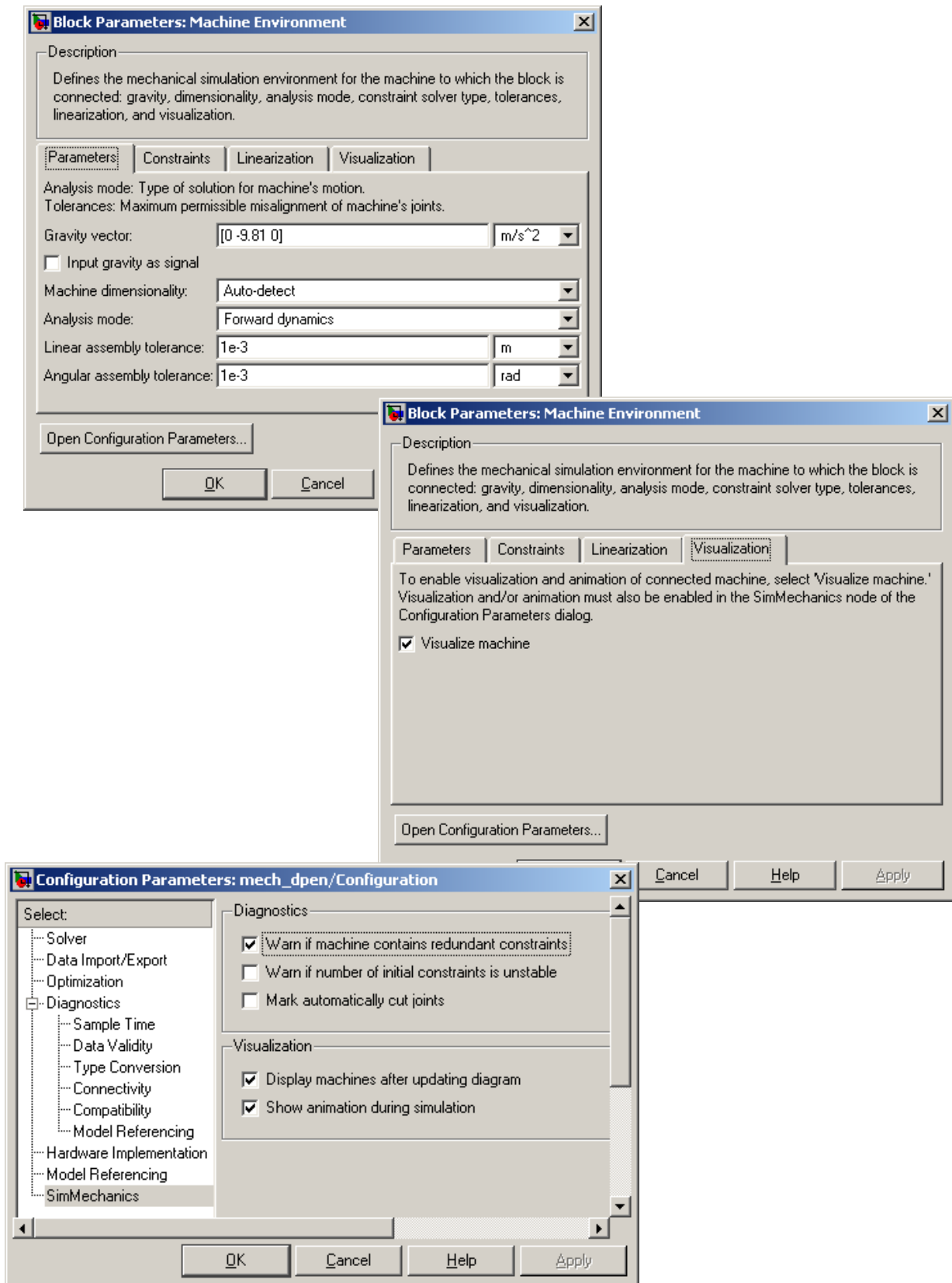
SimMechanicsin mukana tulee joukko sen käyttöä havainnollistavia lohkokaavio-esimerkkejä. Jotkut esimerkeistä edellyttävät, että käytettävissä on Virtual Reality Toolbox. Lohkokaavioita vastaavat tiedostot nimetään SimMechanicsissa kuten Simulinkissä muodossa tiedostonimi.mdl. Esimerkkeihin liittyvät mdl-tiedostot ovat hakemistossa `$matlabroot\toolbox\physmod\mech\mechdemos`, missä `$matlabroot` on se hakemistopolku, johon MATLAB on asennettu.

Esimerkkejä voi tutkia mm. MATLABin Start-painikkeen kautta valitsemalla Simulink-kohdasta ensin SimMechanics ja sitten Demos. Tällöin käynnistyy MATLABin Ohje-selain siten, että SimMechanics-demot ovat näkyvissä selaimen vasemmassa reunassa. Kun demon nimi valitaan, tulee siihen liittyvää informaatiota näkyviin selaimen oikeaan osaan. Demotiedostoja voi sitten avata selaimen vasemmasta osasta kaksoisklikkaamalla demon nimeä tai oikeasta osasta linkistä Open this model. Toinen mahdollisuus esimerkin tutkimiseen on avata vastaava mdl-tiedosto suoraan sen sijaintihakemistosta tai kirjoittaa vastaava tiedostonimi (ilman mdl-tarkenninta) komentona MATLABin komentoriville.

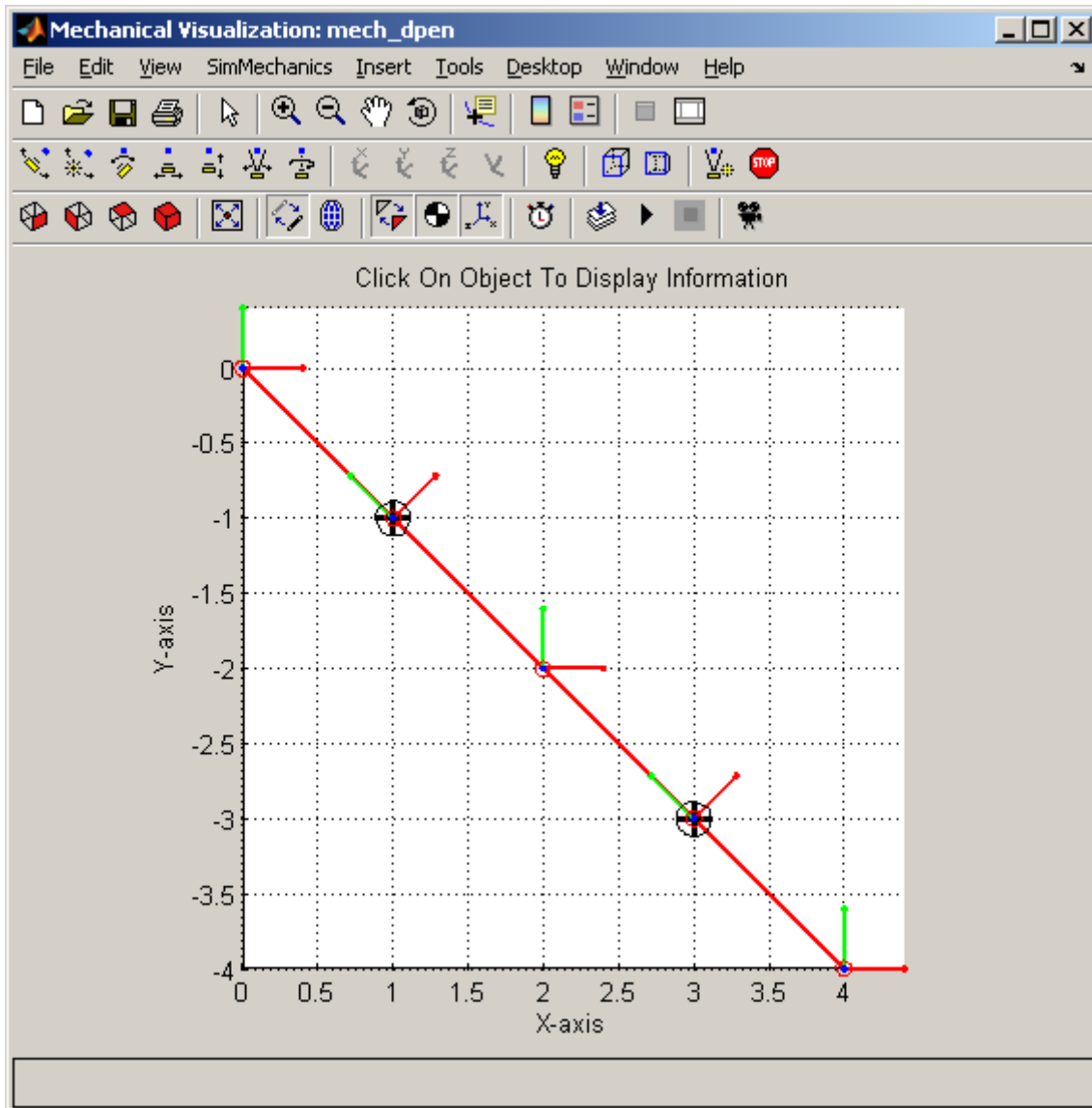
Tarkastellaan esimerkkinä lohkokaaviota Double Pendulum, jossa on mallinnettu kaksoisheilurin dynamiikkaa. Vastaava mdl-tiedosto on `mech_dpem.mdl`. Kun malli avataan, tulee näkyviin seuraavan kuvan mukainen lohkokaavio.



Avataan lohkokaaviossa vasemmalla ylhäällä olevan Env-lohkon parametri-ikkuna, jonka Parameters- ja Visualization-välilehdet asetetaan seuraavan sivun kuvien mukaisiksi. Klikataan parametri-ikkunan Open Configuration Parameters-painiketta ja asetetaan avautuvassa Configuration Parameters-ikkunassa SimMechanics-kohta seuraavan sivun kuvan mukaiseksi.



Valitaan malli-ikkunan Edit-valikosta Update Diagram, jolloin tulee näkyviin malliin liittyvä MATLABin grafiikkaikkuna, josta näkyy heilurin osien pituudet, osien massakeskiöiden sijainnit ja niihin kiinnitetyt koordinaatit. Edellä Parameters välilehdellä määriteltiin painovoiman suunta (-Y suunta), analyysityypiksi suora dynamiikka ja asennustoleranssit.



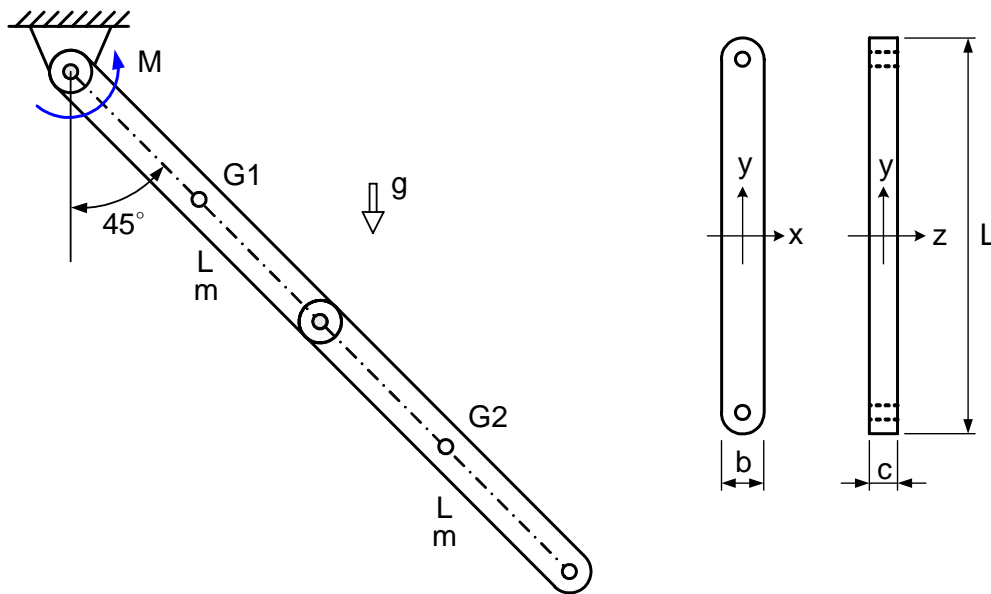
Muutetaan malli seuraavan sivun kuvan mukaiseksi, koska alkuperäisessä demossa on hieman kummalliset parametrien arvot. Käytetään arvoja  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ,  $L = 0,5 \text{ m}$ ,  $b = 0,06 \text{ m}$ ,  $c = 0,04 \text{ m}$  ja  $m = 9,42 \text{ kg}$ . Kummankin sauvan hitausmomentit ja hitaustulot massakeskiöön sijoitetussa xyz-koordinaatistossa ovat tällöin:

$$I_{xx} = m(L^2 + c^2)/12 = 0,197506 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad I_{yy} = m(b^2 + c^2)/12 = 0,004082 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

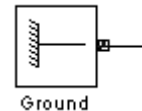
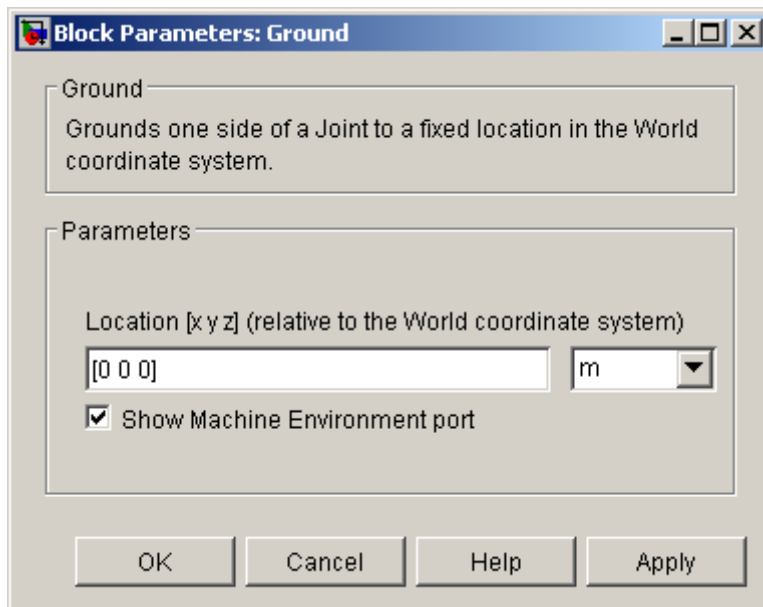
$$I_{zz} = m(L^2 + b^2)/12 = 0,199076 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad I_{xy} = I_{xz} = I_{yz} = 0$$

Momentin lauseke on  $M(t) = M_0 \sin(\Omega t + \psi)$ , missä  $M_0 = 200 \text{ Nm}$ ,  $\Omega = 5 \text{ rad/s}$  ja  $\psi = \pi/2 \text{ rad}$ . Heiluri on alkuhetkellä levossa kuvan mukaisessa asemassa.

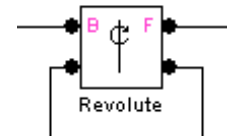
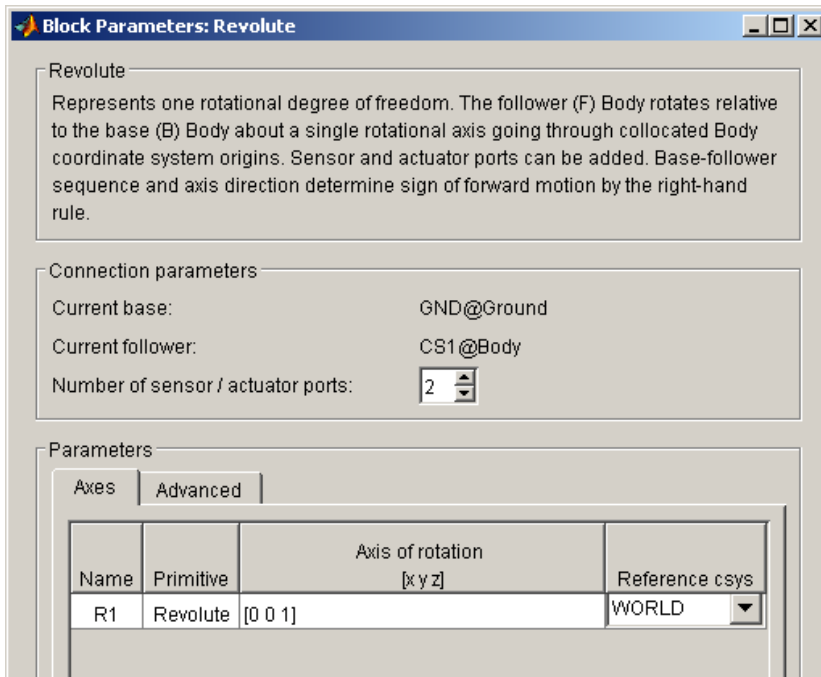




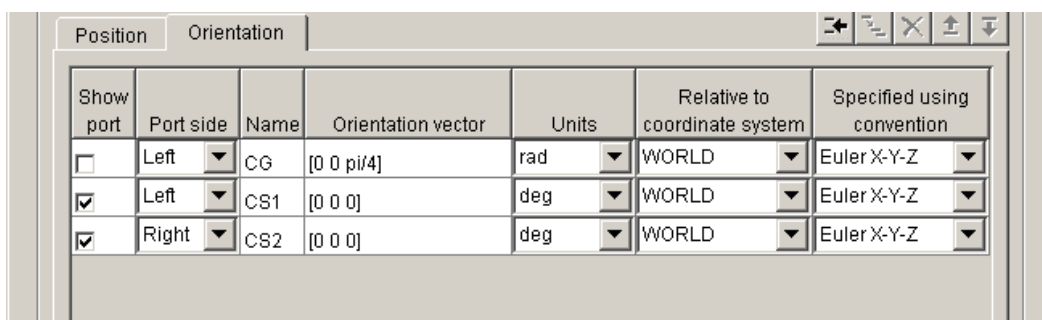
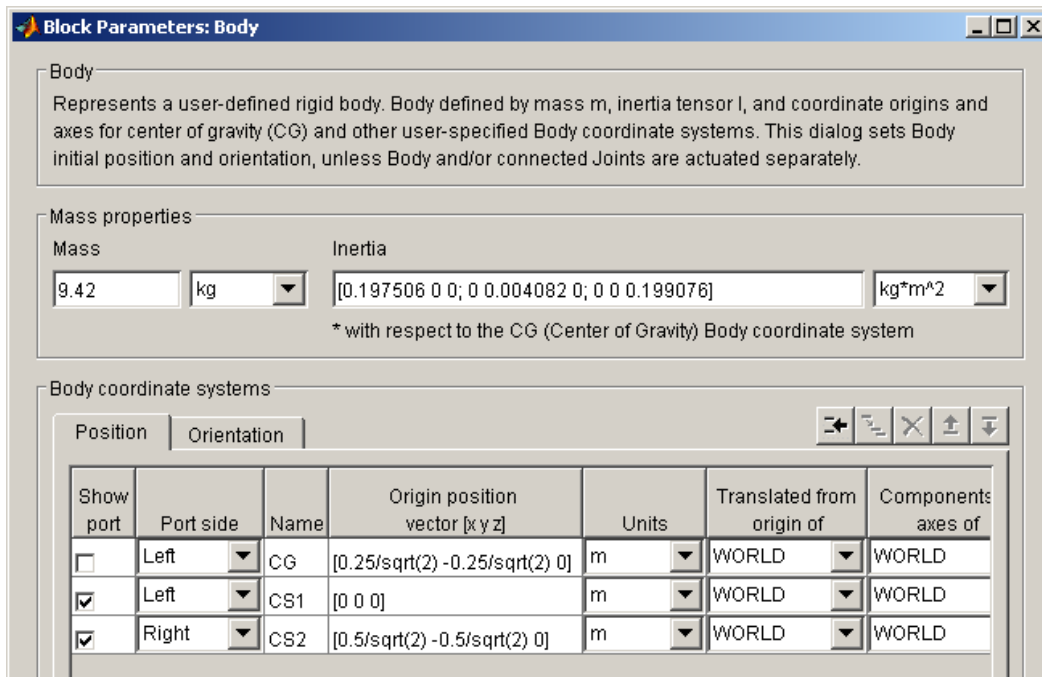
Otetaan esille Ground lohkon parametri-ikkuna. Lohkon koordinaatiston origo on samassa pisteessä kuin World koordinaatiston origo. World on levossa oleva inertiaalikoordinaatisto ja sen origo on ylemmän nivelen kohdalla. Hyväksytään OK painikkeella.

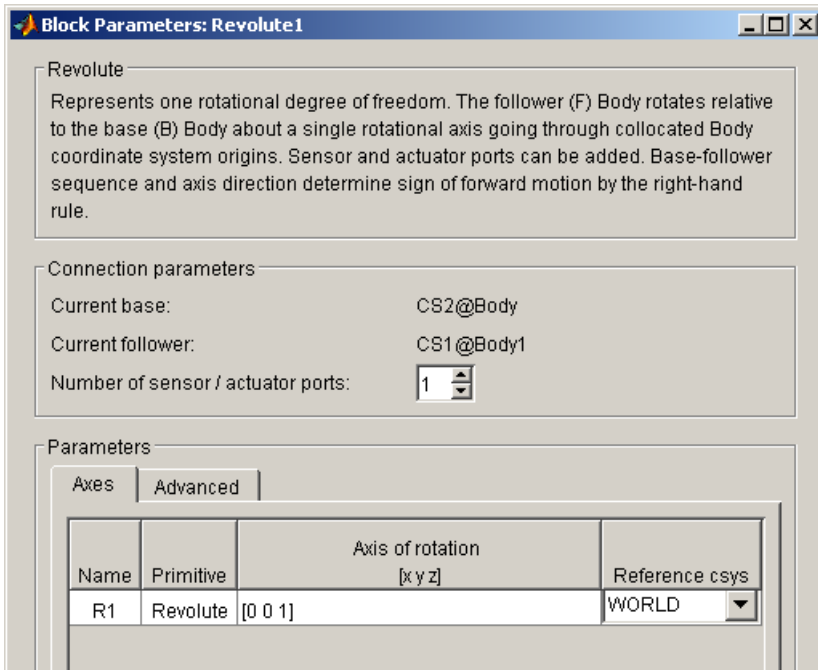


Otetaan esille ylempää niveltä kuvaavan Revolute lohkon parametri-ikkuna. Nivel on kytetty Ground lohkon kiinteään koordinaatistoon GND ja Body lohkon koordinaatistoon CS1. Lohkolla on yksi rotaatiovapausaste R1 World koordinaatiston Z suunnan ympäri ja kaksi porttia Sensor/Actuator lohkoille. Hyväksytään OK painikkeella.



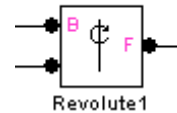
Otetaan esille ylemmän kappaletta kuvaavan Body lohkon parametri-ikkuna. Muutetaan massa, hitausmatriisi ja koordinaatistojen sijainnit kuvan mukaisiksi. Lohkolla on massakeskiössä oleva koordinaatisto CG ja se kytkeytyy ylemmään niveleen CS1 koordinaatistosta ja alemmaan niveleen CS2 koordinaatistosta. Hyväksytään OK painikkeella.



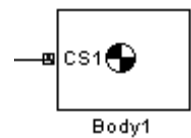
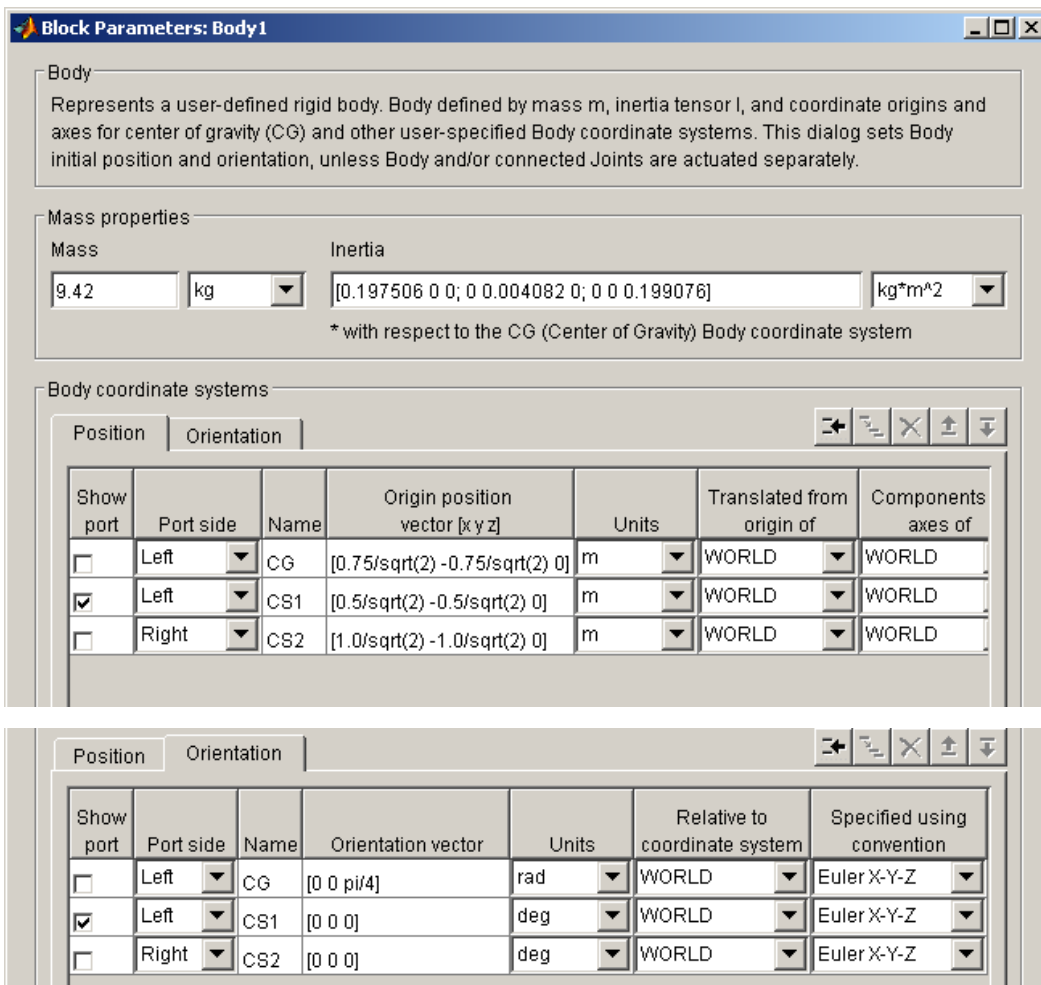


Tallennetaan muutettu malli omaan hakemistoon nimellä kaks\_hei.mdl.

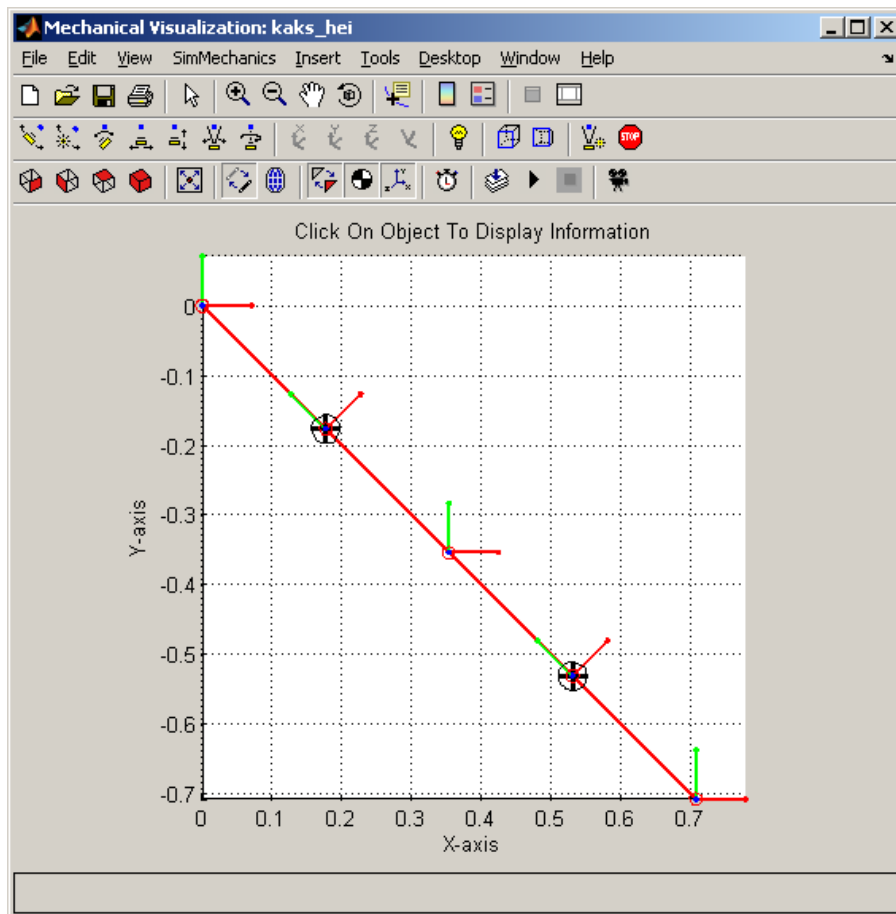
Otetaan esille alemmaa niveltä kuvaavan Revolute1 lohkon parametri-ikkuna. Nivel on kytketty Body lohkon kiinteään koordinaatistoon CS2 ja Body1 lohkon koordinaatistoon CS1. Lohkolla on yksi rotaatiovapausaste R1 World koordinaatiston Z suunnan ympäri ja yksi portti Sensor/Actuator lohkoille. Hyväksytään OK painikkeella.



Otetaan esille alemmaa kappaletta kuvaavan Body1 lohkon parametri-ikkuna. Muutetaan massa, hitausmatriisi ja koordinaatistojen sijainnit kuvan mukaisiksi. Lohkolla on massakeskiössä oleva koordinaatisto CG ja se kytkettyy alempaan niveleen CS1 koordinaatistostaan. Lohkolla on CS2 koordinaatisto, mutta sitä vastaavaa porttia ei näytetä. OK.



Tallennetaan malli ja tarkistetaan grafiikkaikkunasta sen päivittyminen.

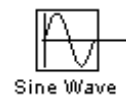


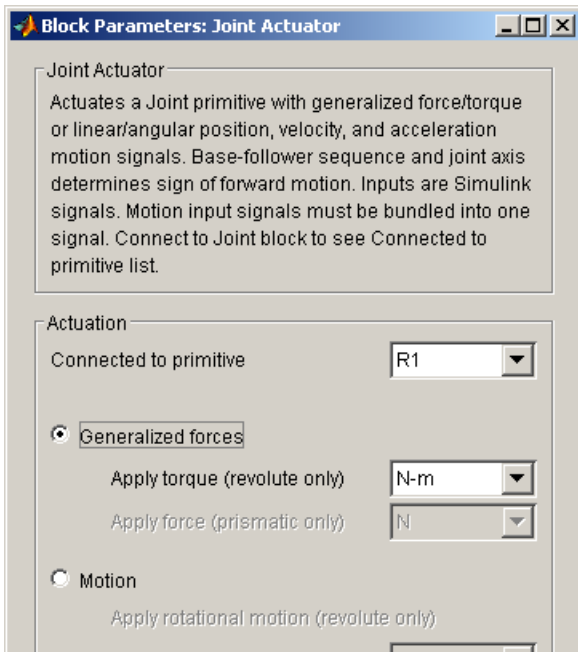
Täytetään Sin Wave lohkon parametri-ikkunaan edellä annettua momenttikuormitusta vastaavat tiedot alla olevan kuvan mukaisesti. Hyväksytään OK painikkeesta.

The screenshot shows a dialog box titled "Block Parameters: Sine Wave". The "Parameters" section contains the following fields and values:

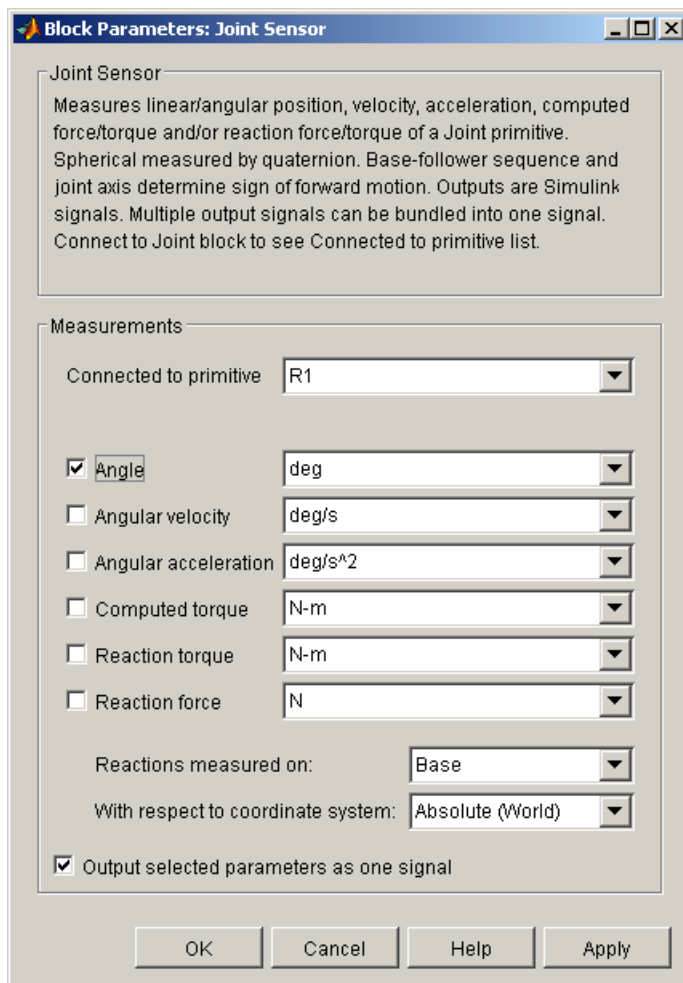
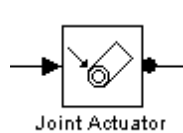
- Sine type: Time based (dropdown menu)
- Amplitude: 200 (text input)
- Bias: 0 (text input)
- Frequency (rad/sec): 5 (text input)
- Phase (rad):  $\pi/2$  (text input)
- Sample time: d (text input)

The checkbox "Interpret vector parameters as 1-D" is checked. At the bottom of the dialog are buttons for "OK", "Cancel", "Help", and "Apply".

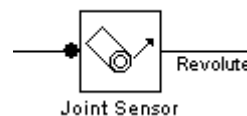


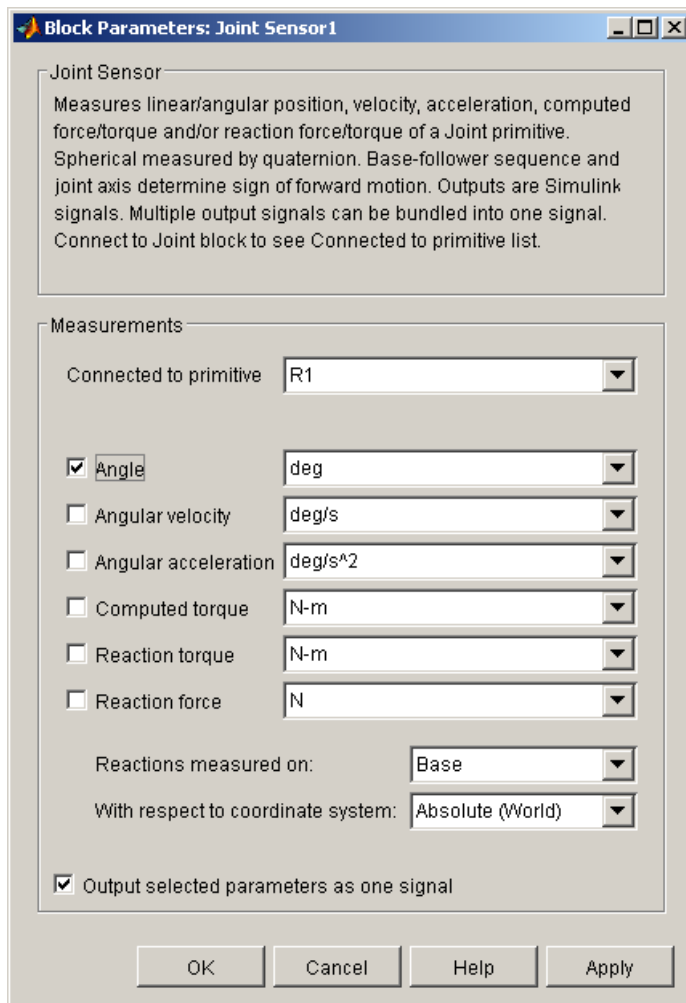


Otetaan esille Joint Actuator lohkon parametri-ikkuna. Lohko aiheuttaa Revolute lohkon rotaatiotapausasteen R1 suuntaisen momentin, joka vaihtelee Sin Wave lohkon antaman signaalin mukaisesti. OK.

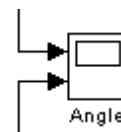
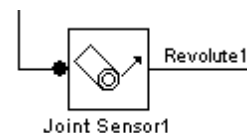


Otetaan esille Joint Sensor lohkon parametri-ikkuna. Lohko mittaa Revolute lohkon rotaatiotapausasteen R1 kulma-asemaa absoluuttisen World koordinaattiston suhteen. OK.



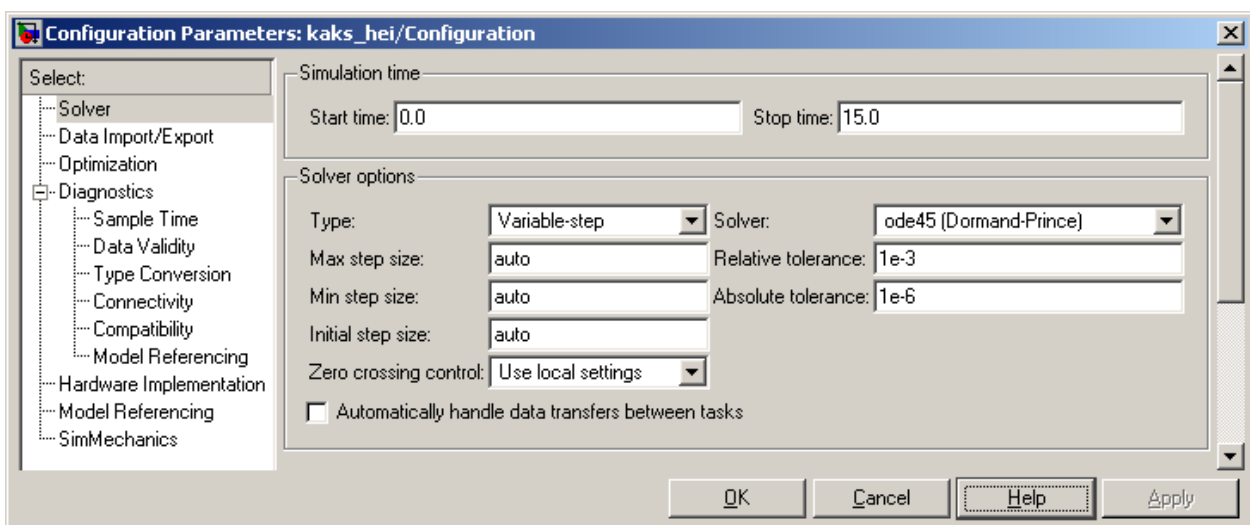


Otetaan esille Joint Sensor1 lohkon parametri-ikkuna. Lohko mittaa Revolute1 lohkon rotaatiovapausasteen R1 kulma-asemaa absoluuttisen World koordinaatiston suhteen. OK.

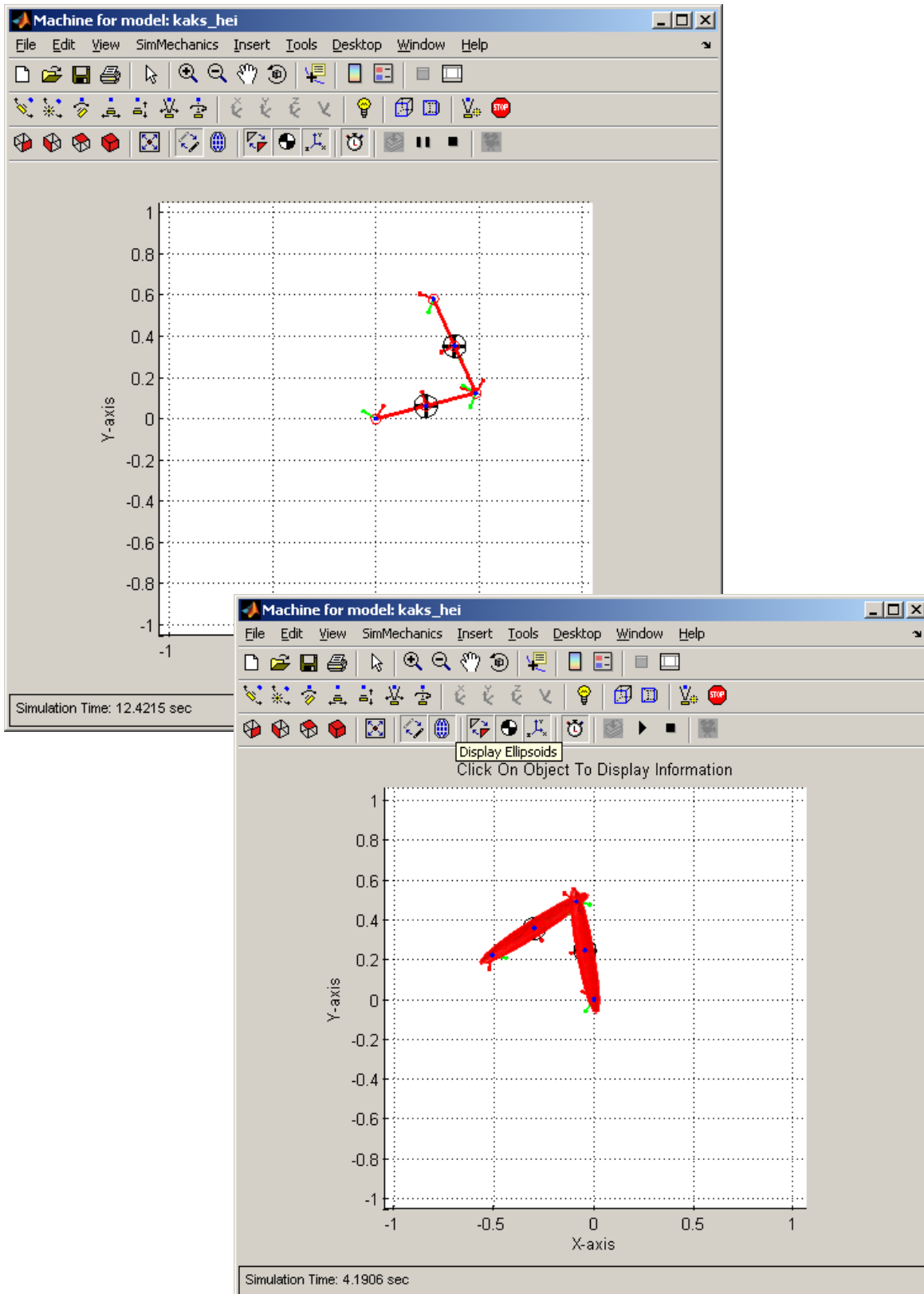


Joint Sensor ja Joint Sensor1 lohkojen ulostulosignaalit menevät Scope lohkoon Angle.

Valitaan Simulation valikosta Configuration Parameters ja asetetaan parametrit seuraavan kuvan mukaisesti. Tallennetaan malli ja käynnistetään simulointi työkalurivin painikkeesta.

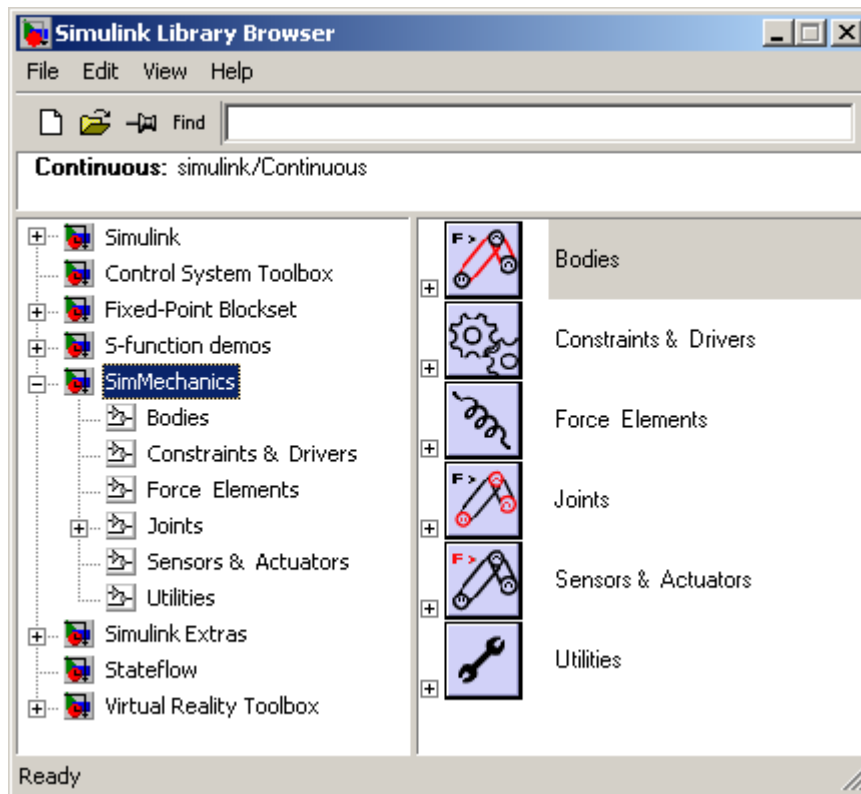


Alla olevissa kuvissa on mallia visualisoitu kahdella ajan hetkellä. Alemmassa kuvassa on työkaluriviltä valittu Display Ellipsoids, jolloin liike visualisoidaan käyttämällä kappaleiden esittämiseen niiden kanssa ekvivalenttisia ellipsoideja (samat päänäytysmomentit).

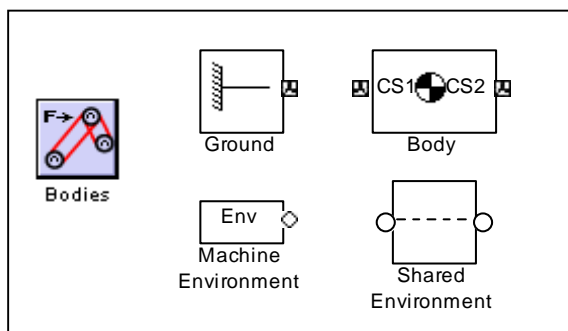


### 3 SimMechanics lohkokirjastot

SimMechanicsin lohkot on ryhmitelty toimintatapsa perusteella kirjastoiksi. Kirjastot saadaan esille esimerkiksi avaamalla Simulinkin lohkokirjastoselain ja siitä edelleen SimMechanics haara tai kirjoittamalla MATLABin komentoriville käsky `mechlib`. Lohkot vedetään ja pudotetaan kirjastosta malliin hiiren vasenta näppäintä käyttäen.



**Bodies kirjasto:** Kappaleiden mallinnus.



- **Ground** on World koordinaatiston suhteen kiinteä kappale. Lohkolla on yksi World koordinaatiston suhteen kiinteä koordinaatisto, jonka origon sijainti annetaan ja portti Machine Environment lohkoa varten.
- **Body** on liikkuva jäykkä kappale. Massakeskiössä on aina koordinaatisto ja lisäksi annetaan tarpeellinen määrä lisäkoordinaatistoja muiden lohkojen kiinnittymistä varten. Lisäkoordinaatistoista annetaan origo

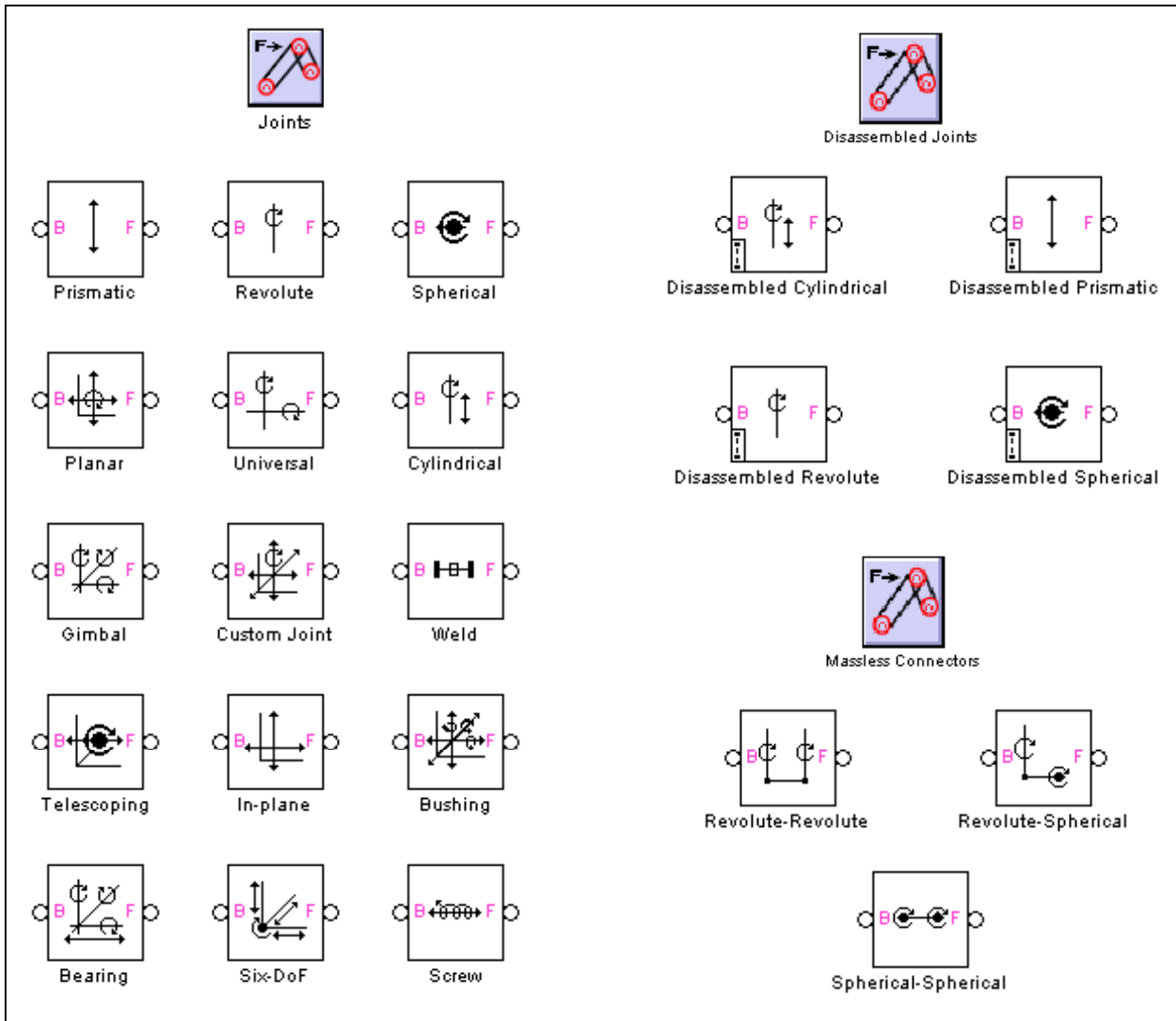
ja akselien suunnat joko World koordinaatiston suhteen tai saman kappaleen toisen koordinaatiston suhteen tai sellaisen toisen kappaleen koordinaatiston suhteen, joka kytkeytyy kyseisen lisäkoordinaatistoon Joint, Driver tai Constraint lohkon välityksellä. Koordinaatistot on kiinnitetty kappaleeseen ja liikkuvat sen mukana. Annetaan massa ja hitausmatriisi massakeskiössä olevan koordinaatiston suhteen.

- **Machine Environment** lohkon parametri-ikkunassa annetaan mallin mekaanisia ominaisuuksia ja ratkaisijan asetuksia.
- **Shared Environment** lohkolla kytetään yhteen kaksi toisistaan riippumatonta mallia, jolloin niille voidaan antaa yhteinen Machine Environment lohko.



## Joins kirjasto: Liitoksien mallinnus.

Lohkoilla liitetään kaksi eri kappaleissa sijaitsevaa koordinaatistoa toisiinsa. Porttiin F (=Follower) kiinnittyvä kappale liikkuu porttiin B (=Base) kiinnittyvän kappaleen suhteen liitoksen kuvaamalla tavalla. Liitoksilla on tietty määrä vapausasteita eli primitiivejä. Primi-



tiivit ovat translaatio- ja rotaatiovapausaste sekä palloliikevapausaste, jossa on kolme rotaatiovapausastetta yhdistettynä. Translaatio- ja rotaatiovapausasteiden suunnat annetaan joko World koordinaatistossa tai toisessa liitettävistä kappalekoordinaatistoista. Palloliikevapausasteiden suuntia ei anneta. Joins lohkojen vapausasteisiin voidaan kytkeä rajoitusta Sensor lohkoja ja Actuator lohkoja palloliikevapausasteita ja Weld lohkoa lukuun ottamatta.

- **Prismatic:** Kappaleiden välillä on yksi translaatiovapausaste.
- **Revolute:** Kappaleiden välillä on yksi rotaatiovapausaste.
- **Spherical:** Kappaleiden välillä on palloliikevapausaste (kolme rotaatiovapausastetta).
- **Planar:** Kappaleiden välillä on kaksi translaatiovapausastetta ja yksi rotaatiovapausaste. Rotaatiovapausaste on kohtisuorassa translaatiovapausasteiden määräämää tasoa vastaan.
- **Universal:** Kappaleiden välillä on kardaaninivel, jossa on kaksi rotaatiovapausastetta.

- **Cylindrical:** Kappaleiden välillä on yksi translaatio- ja yksi rotaatiovapausaste, ja ne ovat samansuuntaiset.
- **Gimbal:** Kappaleiden välillä on kardaaninivel, jossa on kolme rotaatiovapausastetta.
- **Custom Joint:** Kappaleiden välillä on käyttäjän räätälöimä 1-6 vapausasteen liitos. Translaatiovapausasteita voi olla 1-3, samoin rotaatiovapausasteita. Kolmen rotaatiovapausasteen sijasta voi olla palloliikevapausaste.
- **Weld:** Kappaleiden välillä on jäykkä liitos, jolla ei ole vapausasteita.
- **Telescoping:** Kappaleiden välillä on teleskoopinivel, jossa on translaatio- ja palloliikevapausaste.
- **In-plane:** Kappaleiden välillä on kaksi translaatiovapausastetta.
- **Bushing:** Kappaleiden välillä on kolme translaatio- ja kolme rotaatiovapausastetta.
- **Bearing:** Kappaleiden välillä on yksi translaatio- ja kolme rotaatiovapausastetta.
- **Six-DOF:** Kappaleiden välillä on kolme translaatiovapausastetta ja palloliikevapausaste.
- **Screw:** Kappaleiden välillä on yksi translaatio- ja yksi rotaatiovapausaste. Vapausasteiden suunta on sama ja niissä tapahtuvat liikkeet ovat suoraan verrannollisia toisiinsa (ruuvin nousu).

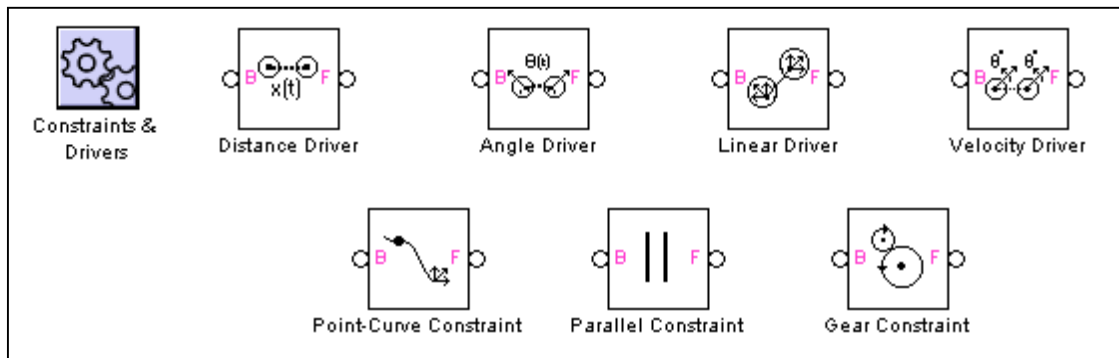
Joints kirjasto sisältää kaksi alikirjastoa **Disassembled Joints** ja **Massless Connectors**.

**Disassembled Joints** alikirjasto sisältää liitoksia, jotka SimMechanics asentaa simuloinnin alussa. Näiden lohkojen translaatio- ja rotaatiovapausasteille annetaan sekä Base että Follower kappaleeseen liittyvä suunta, jotka siis voivat olla toisistaan poikkeavat. Palloliikevapausaste tulee vastaavasti määriteltä kumpaankin liitettävistä kappalekoordinaatistoista. Liitettävien kappalekoordinaatistojen origoiden ei näitä liitoksia käytettäessä tarvitse olla samassa avaruuden pisteessä. Asentaminen tarkoittaa, että SimMechanics laskee alkuaseman, jossa eri kappaleisiin liittyvien primitiivien suunnat ja origoiden sijainnit yhtyvät asennustoleranssien puitteissa. Laskettuun alkuasemaan siirtymiseksi voidaan joutua liikuttamaan jo asennettuja liitoksia niille annetuista alkuasemista. Asentamattomia liitoksia voidaan sijoittaa vain suljettuihin kinemaattisiin ketjuihin ja niitä voi kussakin ketjussa olla vain yksi. Sensor ja Actuator lohkoja ei voida kytkeä asentamattomiin liitoksiin.

**Massless Connectors** alikirjasto sisältää liitoksia, joilla voidaan kytkeä yhteen kaksi kappalekoordinaatistoa, joiden origot eivät ole liikkeen aikana samassa avaruuden pisteessä, mutta niiden välinen etäisyys pysyy vakiona. Näitä liitoksia käytetään mallintamaan kappaleita, joiden massa muihin mekanismien massoihin verrattuna on niin pieni, että se voidaan olettaa nolaksi. Pienimassaisia kappaleita voitaisiin mallintaa tavallisesti Body lohkoilla, mutta Massless Connectors lohkojen käyttö voi olla edullista liikeyhtälöiden ratkaisun tarkkuuden ja tehokkuuden kannalta. Massless Connectors lohkot sisältävät kaksi liitosta, joilla kummallakin on yksi vapausaste. Mahdollisia vapausasteita ovat rotaatio- ja palloliikevapausaste. Rotaatiovapausasteen suunta annetaan joko World koordinaatistossa tai toisesta liitettävistä kappalekoordinaatistoista. Palloliikevapausasteiden suuntia ei anneta. Sensor ja Actuator lohkoja ei voida kytkeä näihin lohkoihin.

**Constraints & Drivers kirjasto:** Kappaleiden liikerajoitteiden ja -ohjausten mallinnus. Lohkoilla liitetään kaksi eri kappaleissa sijaitsevaa koordinaatistoa toisiinsa. Porttiin F (=Follower) kiinnittyvä kappale liikkuu porttiin B (=Base) kiinnittyvän kappaleen suhteen lohkon määräämällä tavalla. Nämä lohkot pelkäästään poistavat systeemistä vapausasteita (Joints lohkot lisäävät vapausasteita), sillä ne poissulkevat tietyn tyyppiset liikkeet. Constraints lohkot kuvaavat ajasta riippumattomia liikerajoitteita. Drivers lohkot taas kuvaavat ajasta riippuvia liikeohjauksia ja niillä voi olla toimilaitteina Driver Actuator lohkoja, joiden

sisäänmeno puolestaan on halutun ajan funktion mukainen Simulink signaali. Ilman toimilaitetta olevat Drivers lohkot toimivat systeemin alkutilan mukaisina liikerajoitteina. Voimasuureita mittaavia Constraint & Driver Sensor lohkoja voidaan kytkeä rajoituksesta. Constraints & Drivers lohkoja voidaan sijoittaa vain suljettuihin kinemaattisiin ketjuihin ja niitä voi kussakin ketjussa olla vain yksi.

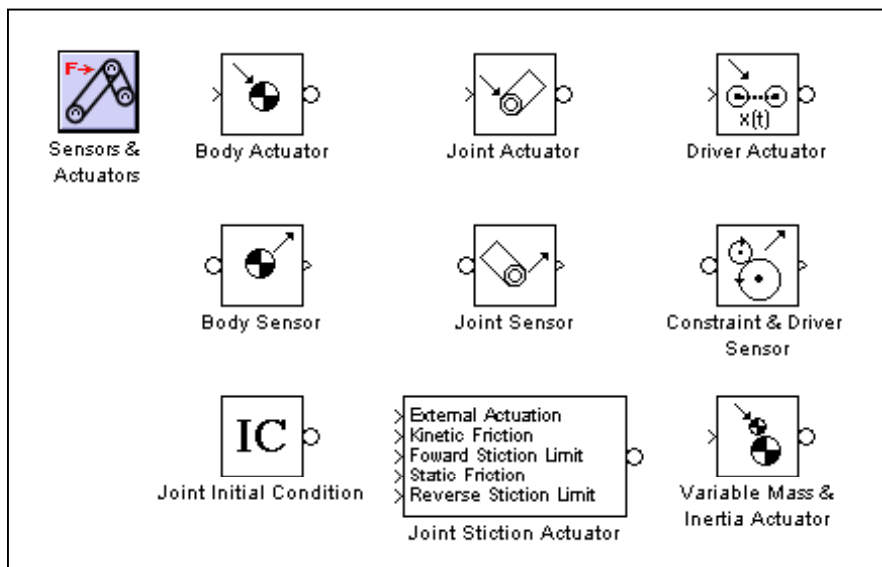


- **Distance Driver:** Ohjaa kappalekoordinaatistojen origojen välistä etäisyyttä annetun ajan funktion mukaisesti.
- **Angle Driver:** Ohjaa kappaleisiin kiinnitettyjen kahden akselin välistä kulmaa annetun ajan funktion mukaisesti.
- **Linear Driver:** Ohjaa kappalekoordinaatistojen origojen välisen paikkavektorin yhtä World koordinaatistoon liittyvää komponenttia annetun ajan funktion mukaisesti.
- **Velocity Driver:** Ohjaa kappaleiden nopeus- ja kulmanopeuskomponenteista muodostetun lineaarisen lausekkeen vaihtelua annetun ajan funktion mukaisesti.
- **Point-Curve Constraint:** Rajoittaa kappalekoordinaatiston origon liikkeen tapahtumaan toiseen kappaleeseen kuuluvaa käyrää pitkin. Käyrä on paloittain määritelty kuutio spline ja liike alkaa toisen kappalekoordinaatiston origosta.
- **Parallel Constraint:** Alkutilassa kappaleisiin kiinnitetty yhteinen suunta pysyy liikkeen aikana samansuuntaisena kummassakin kappaleessa.
- **Gear Constraint:** Muodostaa kappaleiden välille välityksen.

### **Sensors & Actuators kirjasto:** Anturien ja toimilaitteiden mallinnus.

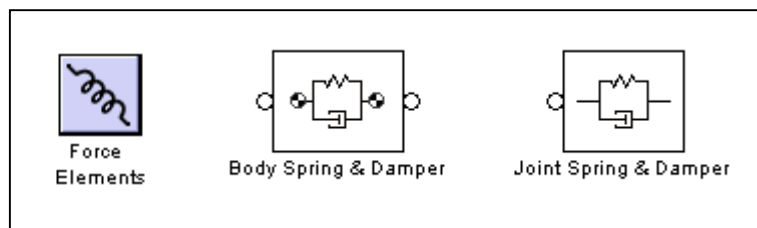
Actuator lohkoja käytetään kappaleisiin ja liitoksiin vaikuttavien voimien ja momenttien määrittelyyn sekä liitoksien ja liikeohjaimien kinemaattisten suureiden (asema, nopeus ja kiihtyvyys) antamiseen. Actuator lohkojen sisäänmeno on Simulink signaali ja lohko aiheuttaa tämän signaalin mukaisen aikariippuvuuden siihen kytketylle dynaamiselle suurelle. Kirjastossa on myös kolme muuhun käyttöön tarkoitettua lohkoa, jotka toimivat Actuator lohkojen tapaan.

Sensor lohkoja käytetään kappaleiden kinemaattisten suureiden mittaamiseen, liitoksien kinemaattisten suureiden ja voimasuureiden mittaamiseen sekä liikerajoitteisiin liittyvien tukireaktioiden mittaamiseen. Sensor lohkojen ulostulo on Simulink signaali, joka siis voidaan ohjata johonkin Sinks lohkon mittauksen analysointia varten.



- **Body Actuator:** Mallintaa kappaleeseen vaikuttavan ajasta riippuvan voima- tai momenttivektorin, joka liittyy lohkon kytkennän mukaiseen kappalekoordinaatistoon.
- **Joint Actuator:** Aiheuttaa liitoksen vapausasteeseen ajasta riippuvan voiman tai momentin tai aiheuttaa vapausasteeseen ajasta riippuvat kinemaattiset suureet (asema, nopeus, kiihtyvyyys). Ei voida kytkeä palloliikevapausasteeseen.
- **Driver Actuator:** Aiheuttaa kappaleiden välisen ajasta riippuvan liikeohjauksen Driver lohkon välityksellä.
- **Body Sensor:** Mittaa kappaleen kinemaattiset suureet valitun koordinaatiston suhteen.
- **Joint Sensor:** Mittaa yhteen liitoksen vapausasteeseen liittyvät kinemaattiset suureet ja liitoksessa kappaleisiin kohdistuvat sisäiset voimasuureet.
- **Constraint & Driver Sensor:** Mittaa liikerajoitteeseen liittyvät tukireaktiot.
- **Joint Initial Condition:** Aiheuttaa liitoksen vapausasteiden asemille ja nopeuksille simuloinnin alkamishetkellä käytettävät alkuarvot.
- **Joint Stiction Actuator:** Mallintaa liitoksen vapausasteeseen Coulombin klassisen kitkalain mukaisen käyttäytymisen.
- **Variable Mass & Inertia Actuator:** Mallintaa kappaleen, jonka massa tai hitausmatriisi on ajasta riippuva. Inertiaominaisuuksien muuttumisesta aiheutuvat voimavaikutukset on mallinnettava erikseen Body Actuator lohkolla.

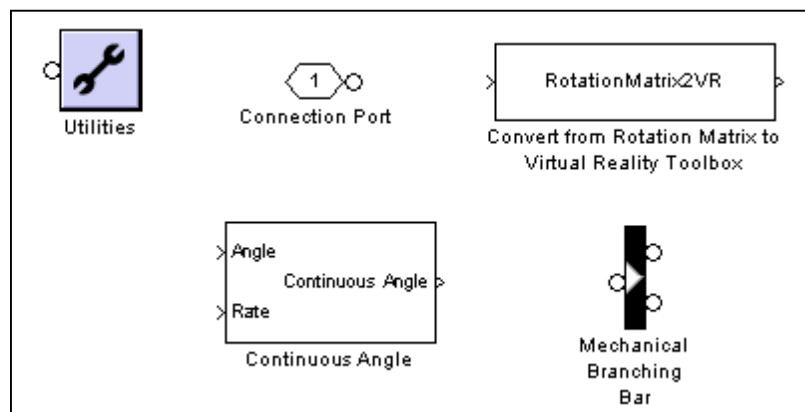
**Force Elements kirjasto:** Mekanismin sisäisten jousi- ja vaimennusvoimien mallinnus.



- **Body Spring & Damper:** Mallintaa kahden kappalekoordinaatiston välillä olevan lineaarisen jousi-vaimennin-elementin. Jousi- ja vaimennusvoima ovat aina koordinaatistojen origoja yhdistävän janan suuntaisia.
- **Joint Spring & Damper:** Mallintaa liitoksen translaatio- tai rotaatiovapausasteisiin liittyviä lineaarisia jousi-vaimennin-elementtejä. Lohko kytetään liitoksen Sensor/Actuator porttiin.

**Utilities kirjasto:** Muutamia erityistoimintoja.

- **Connection port:** Alijärjestelmään lisättävä kytkentäportti.
- **Convert from Rotation Matrix to Virtual Reality Toolbox:** Muuntaa Body Sensor lohkon antaman ulostulosignaalin Virtual Reality Toolboxissa olevan lohkon VR Sink käyttämään muotoon.
- **Continuous Angle:** Muuntaa puoliavoimelle välille  $(-\pi, \pi]$  tai  $(-180^\circ, 180^\circ]$  rajoitetun signaalin jatkuvaksi rajoittamattomaksi signaaliksi.
- **Mechanical Branching Bar:** Lohkon avulla voidaan kytkeä useita Sensor/Actuator loh-



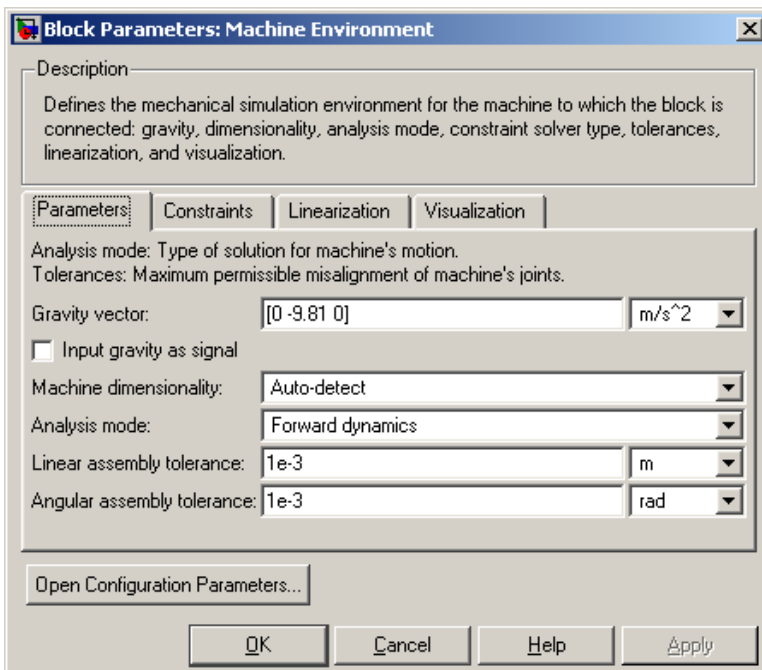
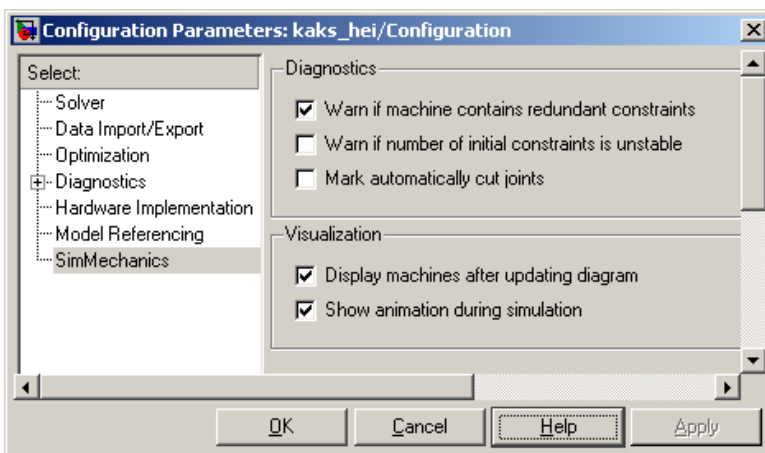
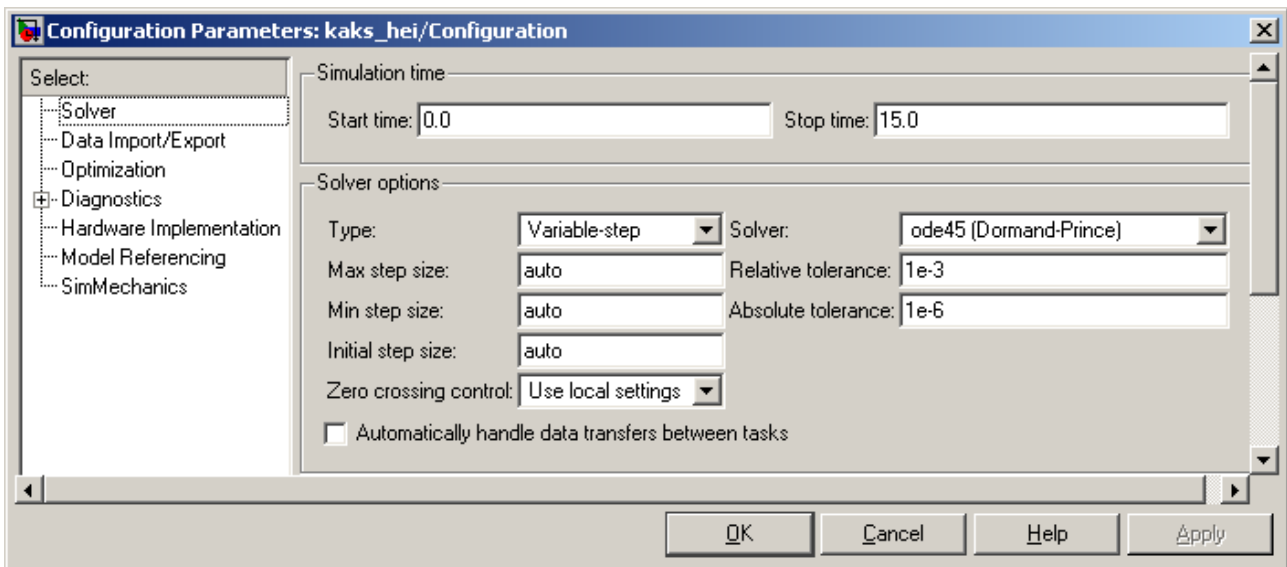
koja Joint, Constraint, Driver tai Body lohkoissa olevaan yhteen porttiin.

## 4 Simulointi

Mekaniikan simulointi SimMechanicsilla on samanlainen operaatio kuin muutkin Simulink ajot, lohkoavion luonnin jälkeen asetetaan simulointiparametrit, käynnistetään simulointi, korjataan mahdolliset virheet, analysoidaan tuloksia ja tehdään malliin tarvittavat muutokset. Jo Simulinkissä on käytettävissä suuri joukko parametreja, joilla voidaan vaikuttaa simuloinnin kulkuun, mutta SimMechanics tarjoaa vielä lisää parametreja, jotka liittyvät mekaniikan simulointiin.

SimMechanics ratkaisee tarkasteltavan systeemin liikeyhtälöt jollakin Simulinkin osittaisdifferentiaaliyhtälöryhmän ratkaisumenetelmällä käyttäen apuna lisäksi jotakin rajoitusten ratkaisijaa. Simulinkin ratkaisija ja sen asetukset valitaan Simulation valikon Configuration Parameters ikkunasta kohdasta Solver. Oletusratkaisija `ode45` toimii hyvin myös useimmille mekaanisille systeemeille. Jos systeemin yhtälöjärjestelmä on jäykkä (esimerkiksi kappaleiden massoissa on suuria eroja) tai kappaleiden liikkeet voivat olla epäjatkuvia (esimerkiksi kitkalliset liitokset), voi oletusratkaisija olla tehoton. Jäykille systeemeille kan-

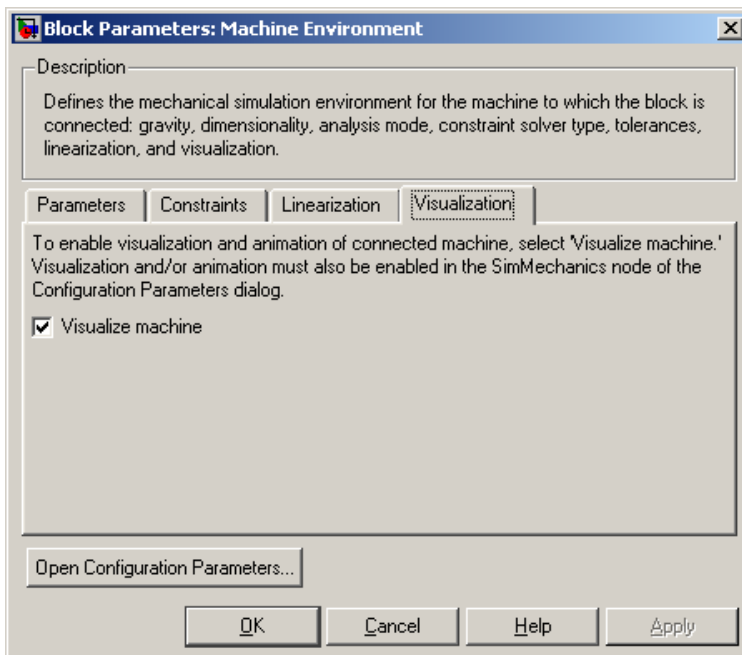
nattaa kokeilla myös muita ratkaisijoita, kuten esimerkiksi ode15s, ode23t, ode23tb ja ode23s. Ratkaisijan oletustoleranssit voivat olla mekaaniselle systeemille liian suuria, varsinkin epälineaarisen tai kaottisen systeemin tapauksessa.



SimMechanics simuloinnissa käytävissä olevat lisäparametreja asetetaan Configuration Parameters ikkunasta kohdasta SimMechanics. Lisäksi SimMechanics malliin kuuluu aina yksi Machine Environment lohko, jonka parametri-ikkunassa annetaan mallin asetuksia. Tässä ikkunassa on neljä välilehteä Parameters, Constraints, Linearization ja Visualization.

Parameters välilehdellä määritellään painovoiman kiihtyvyyden suuruus ja suunta, valitaan analyysin tyyppi ja annetaan asennustoleranssit. Asennustoleranssit määrittelevät tarkkuuden, jolla samaan avaruuden pisteeseen viittaavat sijainnit ja kulma-asetat on annettava ja myös tarkkuuden, jolla SimMechanics ratkaisee asentamattomien liitosten alkutilat.

Constraints välilehden valinnoilla on merkitystä, jos mallissa on Constraints & Drivers lohkoja. Välilehdellä valitaan rajoitusten



ratkaisija kolmesta vaihtoehdosta Stabilizing, Tolerancing ja Machine Precision. Linearization välilehden valinnoilla on merkitystä, jos analyysityyppi on valittu Trimming. Välilehdellä valitaan mallin linearisoinnissa käytettävän häiriömenetelmän tyyppi ja häiriön suhteellinen suuruus.

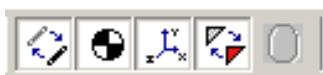
Visualization välilehdellä ruksataan kohta Visualize machine, kun mallin liikettä halutaan tarkastella grafiikkaikkunassa simuloinnin aikana.

## 5 Visualisointi

SimMechanicsin mukana tulee mahdollisuus visualisointiin MATLABin grafiikkaikkunassa, jossa tosin ei ole aivan kaikkia tavanomaisen grafiikkaikkunan ominaisuuksia käytettävissä. Toisaalta ikkunaan on lisätty SimMechanicsiin liittyvät SimMechanics valikko ja työkalurivi, kuten seuraavalla sivulla olevasta kuvasta ilmenee. Kuva ja Kamera työkalurivit ovat samat kuin tavanomaisessa MATLABin grafiikkaikkunassa, joten niitä ei käsitellä tässä.

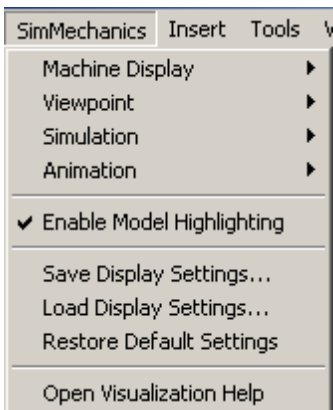
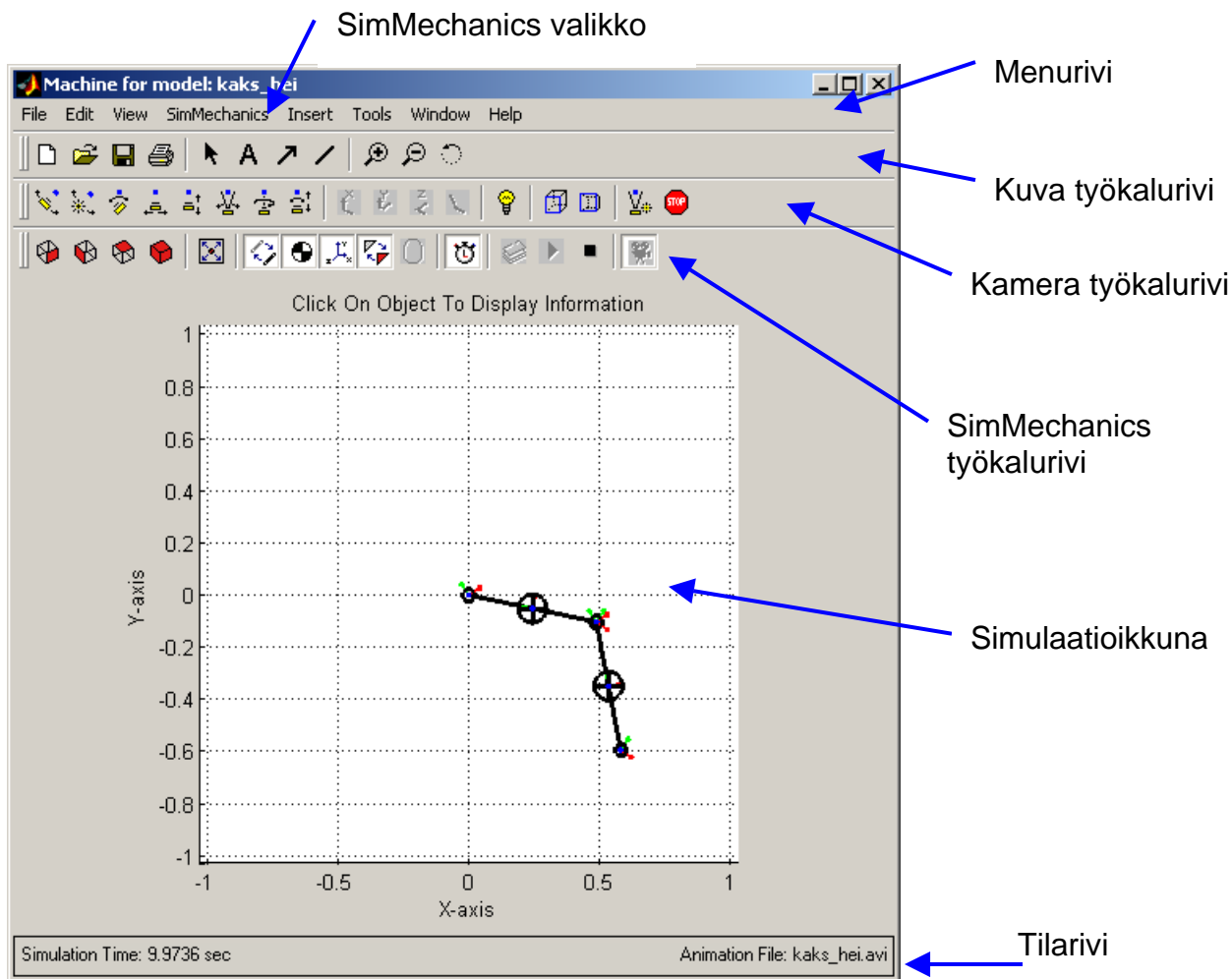
Tilarivillä näkyy haluttaessa simulointiajan eteneminen ja simulointia vastaavan animaatio-tiedoston nimi, mikäli se tallennetaan. SimMechanics valikosta löytyvät mekaniikan simulointiin liittyvät komennot, mutta yleisimmät niistä ovat myös SimMechanics työkalurivillä.

Simulaatioikkunassa näkyvä esitys riippuu siitä, käytetäänkö kappaleiden esittämiseen konvekseja verhoja vai ekvivalentteja ellipsoideja. Kummassakin tapauksessa voidaan näyttää kappaleiden massakeskiöiden sijainnit ja kappaleisiin kiinnitettyt koordinaatistot. Massakeskiön symbolina on plus-merkin sisältävä ympyrä ja koordinaatistot näytetään RGB-värikoodattuina (x=Red, y=Green, z=Blue). Konveksien verhojen tapauksessa voi-



daan näyttää verhon ääriviivat ja kaksi- ja kolmiulotteisessa tapauksissa esittää verhon reunapinnat punaisella värillä. Esitysmuoto valitaan SimMechanics valikon kohdasta Machine Display tai

SimMechanics työkalurivin painikkeista. Aktiivisena ovat aina vain käytettävään kappaleen esitysmuotoon liittyvät valinnat.



SimMechanics valikon Viewport alivalikossa on kuvan näyttämiseen liittyviä valintoja, joista viisi ensimmäistä on myös työkalurivillä painikkeina. Kun kuudes valinta Enable Automatic Axis Resize on aktiivinen, simulaatioikkunan koko muuttuu visualisoinnin aikana niin, että malli näkyy aina kokonaan.



Simulation valikosta voidaan ottaa simulointiaika näkyviin tilariville, päivittää lohkokaavio ja käynnistää tai pysäyttää simulointi. Kaikille toiminoille on myös painike työkalurivillä.



Animation valikosta simulaatio voidaan tallentaa AVI-animaatiotiedostoksi. Lisäksi voidaan määrätä tallennettavan tiedoston sijainti ja pakkaus.

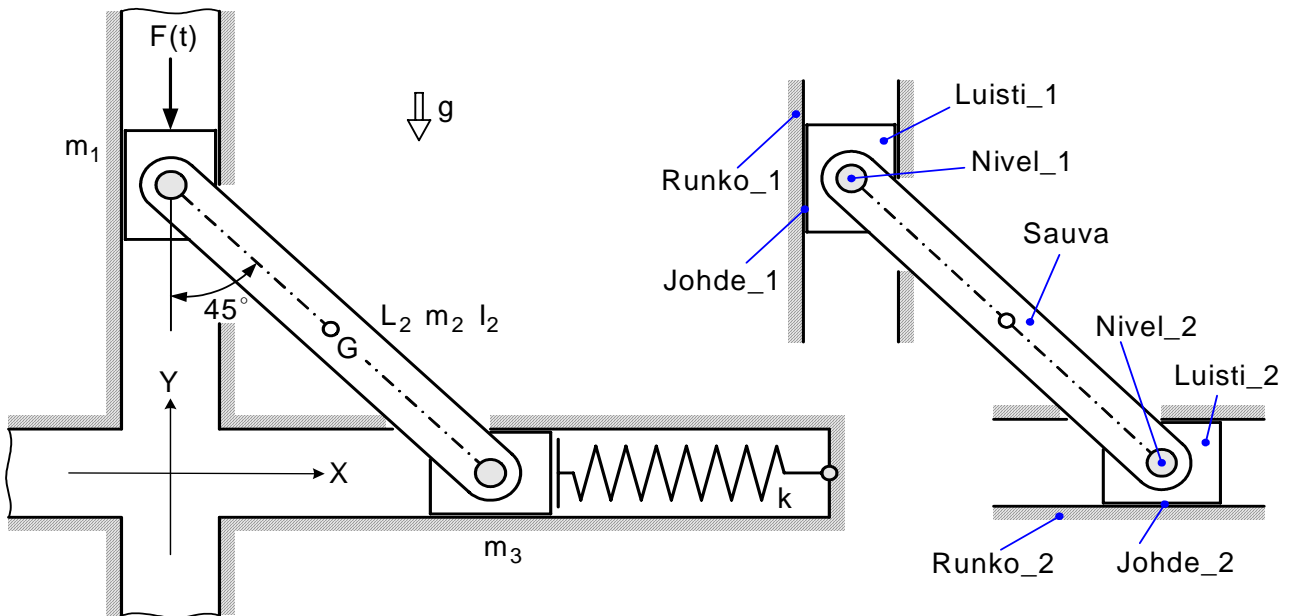
Kun valinta Enable Model Highlighting on päällä, korostetaan simulaatioikkunassa valittua kohdetta vastaava lohko lohkokaaviossa punaisella värillä. Valittu kohde puolestaan korostetaan joka tapauksessa keltaisella.

Save Display Settings kohdasta voidaan grafiikkaikkunan asetukset tallentaa mat-tiedostoksi, Load Display Settings kohdasta voidaan vastaavasti ladata aikaisemmin tallennetut asetukset ja Restore Default Settings palauttaa oletusasetukset. Open Visualization Help valinta avaa MATLABin Ohje selaimen tähän ikkunaan liittyvästä kohdasta.

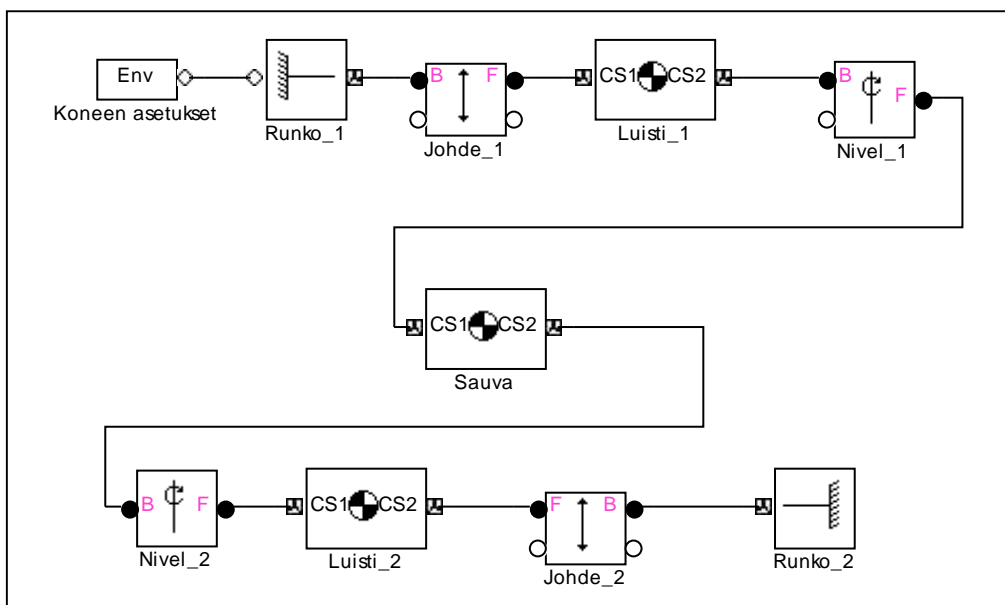


## 6 Esimerkki

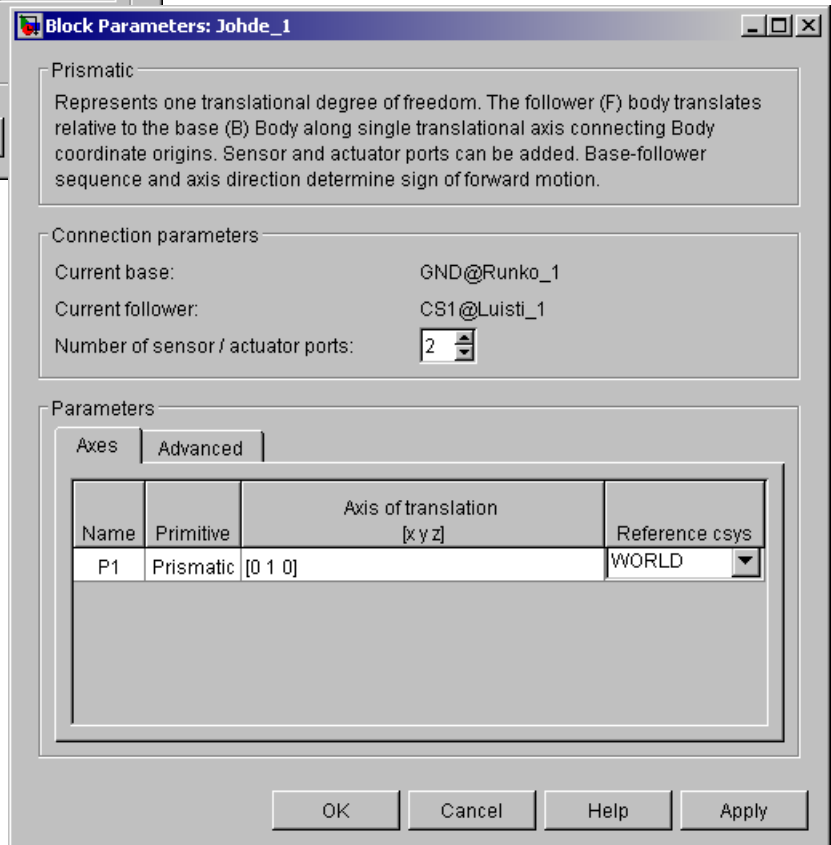
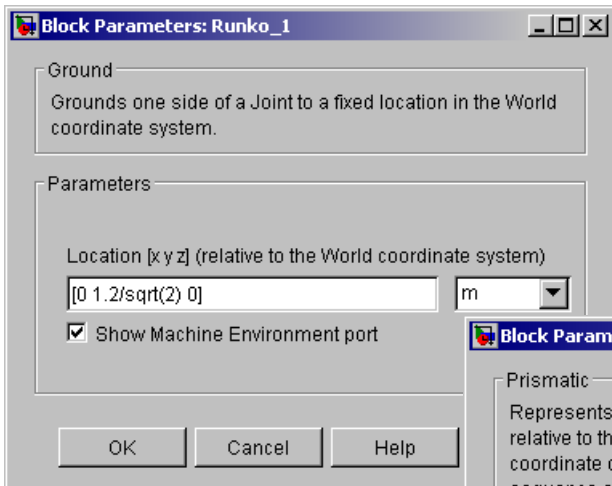
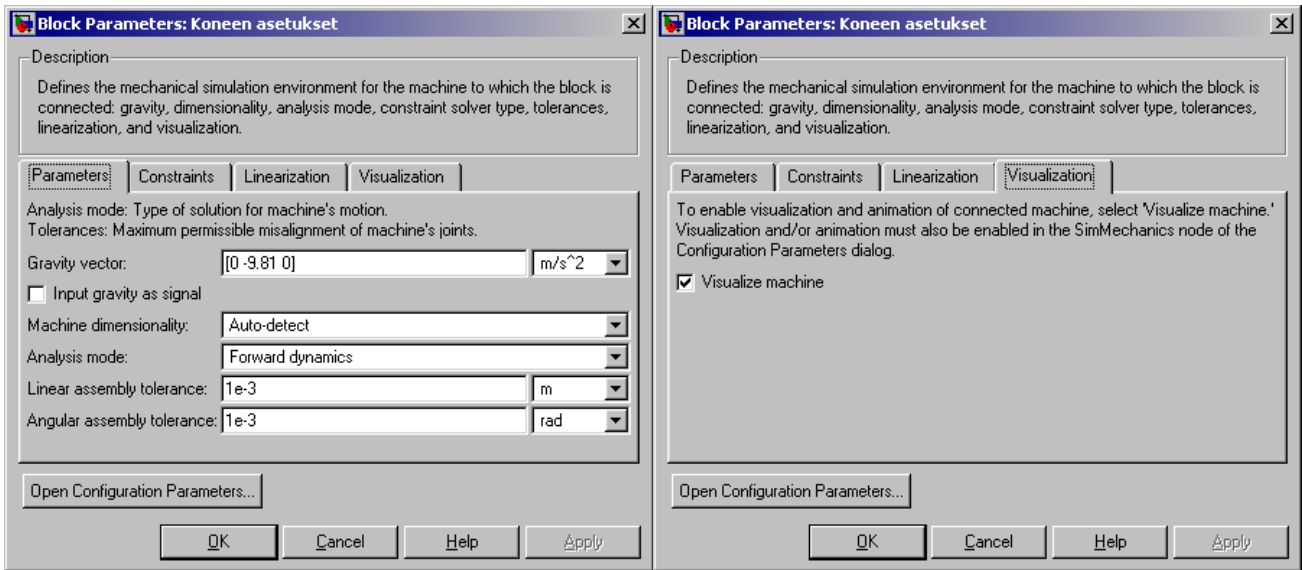
Tarkastellaan alla olevan kuvan systeemiä, jossa luistit liikkuvat pitkin kitkattomia johteita ja sauvan ollessa kuvan asennossa jousi on lepopituudessaan ja koskettaa vaakasuunnassa liikkuvaa luistia. Systeemin parametrit ovat  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ,  $m_1 = 0,8 \text{ kg}$ ,  $L_2 = 1,2 \text{ m}$ ,  $m_2 = 1,4 \text{ kg}$ ,  $I_2 = 0,168 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,  $m_3 = 0,6 \text{ kg}$  ja  $k = 600 \text{ N/m}$ . Pystysuuntaiseen luistiin vaikuttavan kuormituksen lauseke on  $F(t) = F_0 |\sin(\Omega t)|$  (kokoaaltoatasuunnattu sinikuormitus), missä  $F_0 = 200 \text{ N}$  ja  $\Omega = 2 \text{ rad/s}$ .

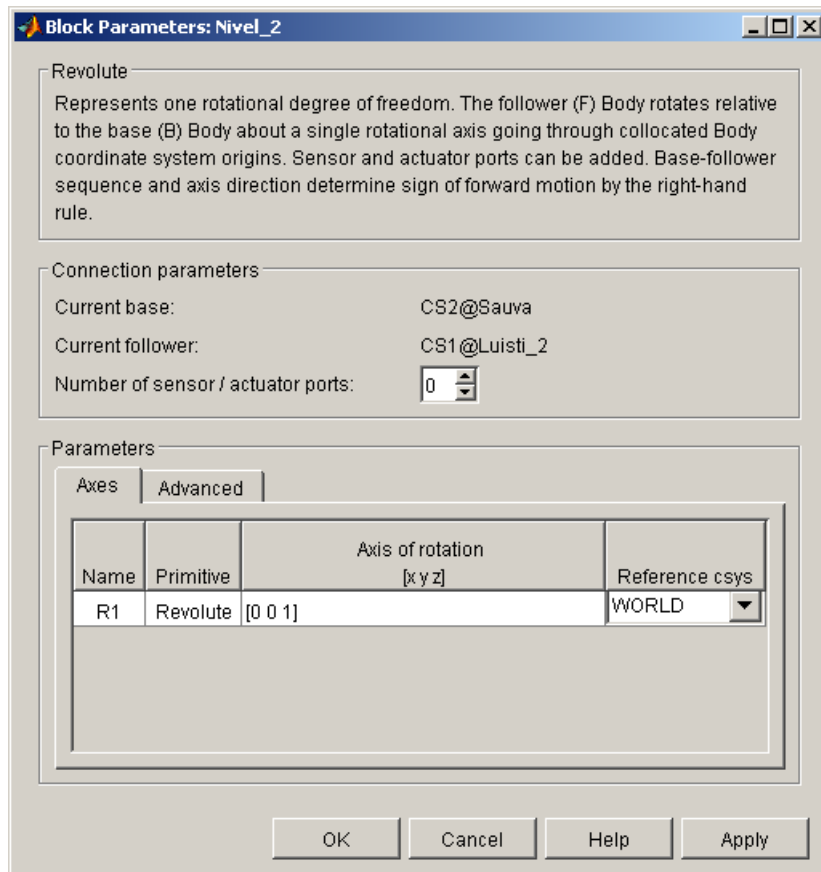
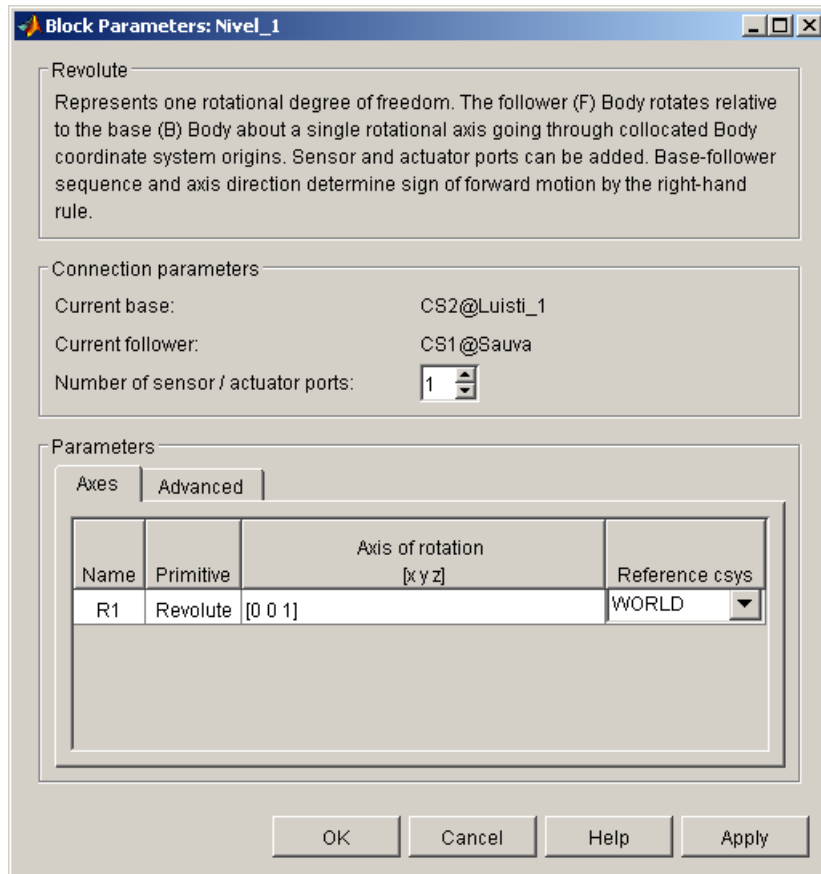


Käynnistä MATLAB, Simulink ja avaa uusi malli-ikkuna. Hae SimMechanics lohkokirjastosta kuvassa olevat lohkot ja nimeä ne kuvan mukaisesti. Kytke lohkot ja aseta Joints lohkojen B- ja F-portit kuvassa esitetyllä tavalla. Kuvassa näkyy Joints lohkoissa kytkemättömiä Sensor/Actuator portteja, mutta älä kiinnitä niihin tässä vaiheessa huomiota.

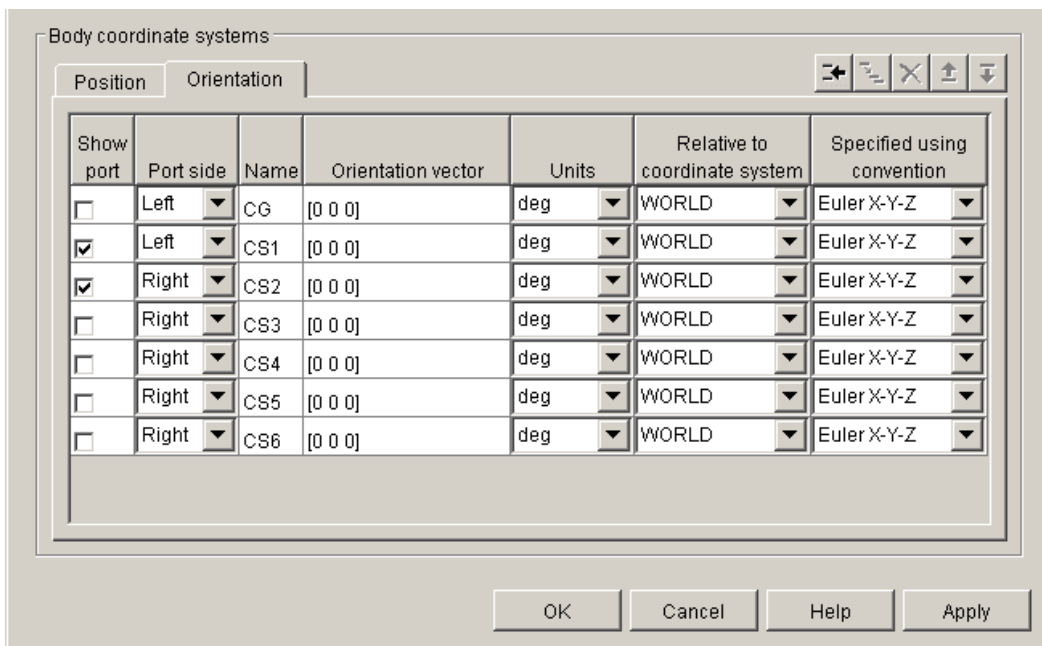
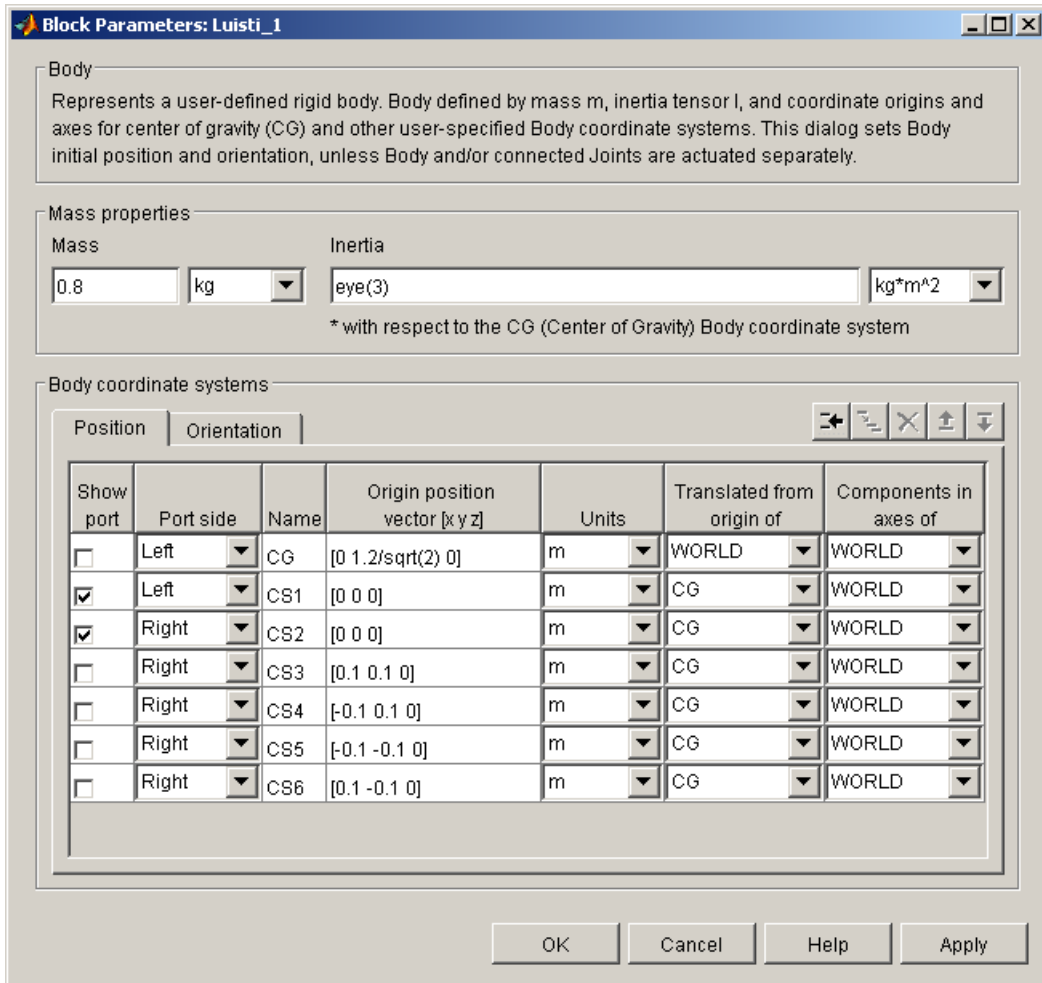


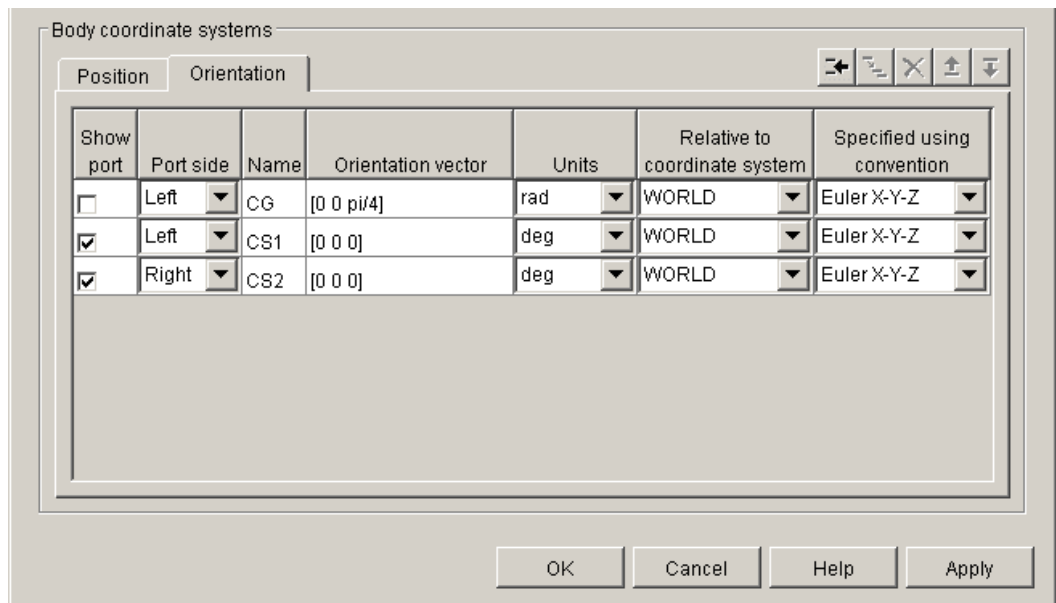
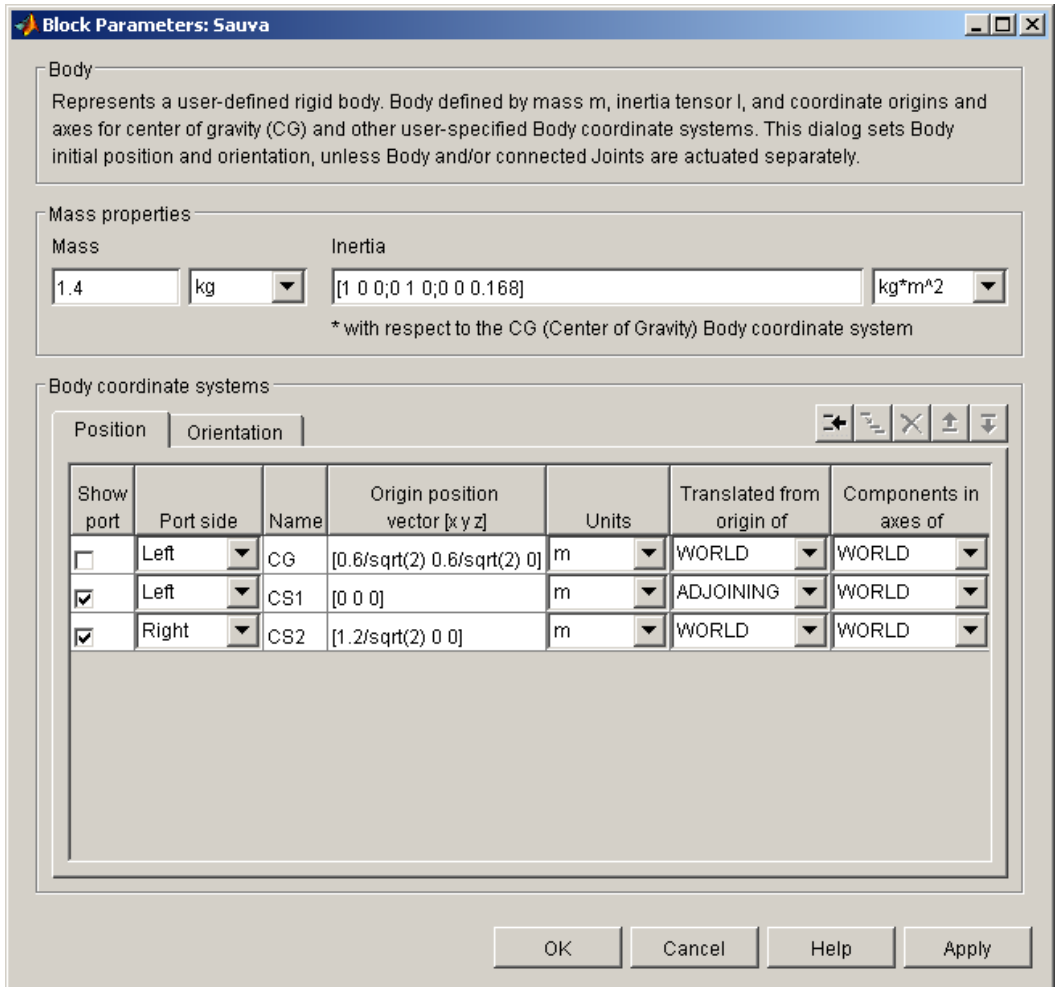
Anna lohkojen parametri-ikkunoihin tiedot seuraavilla sivuilla olevien kuvien mukaisesti.

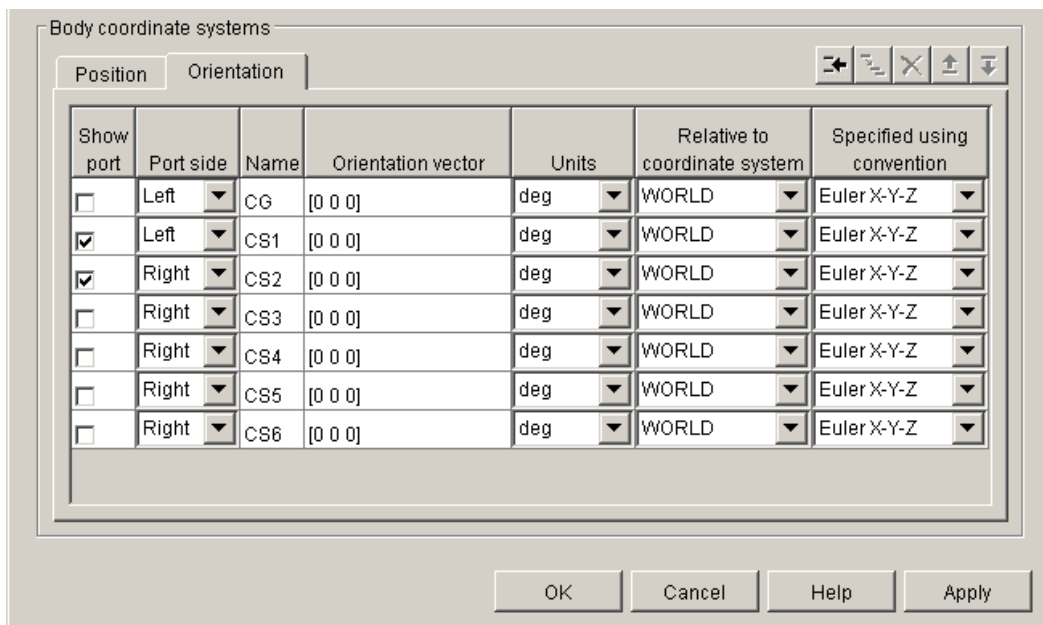
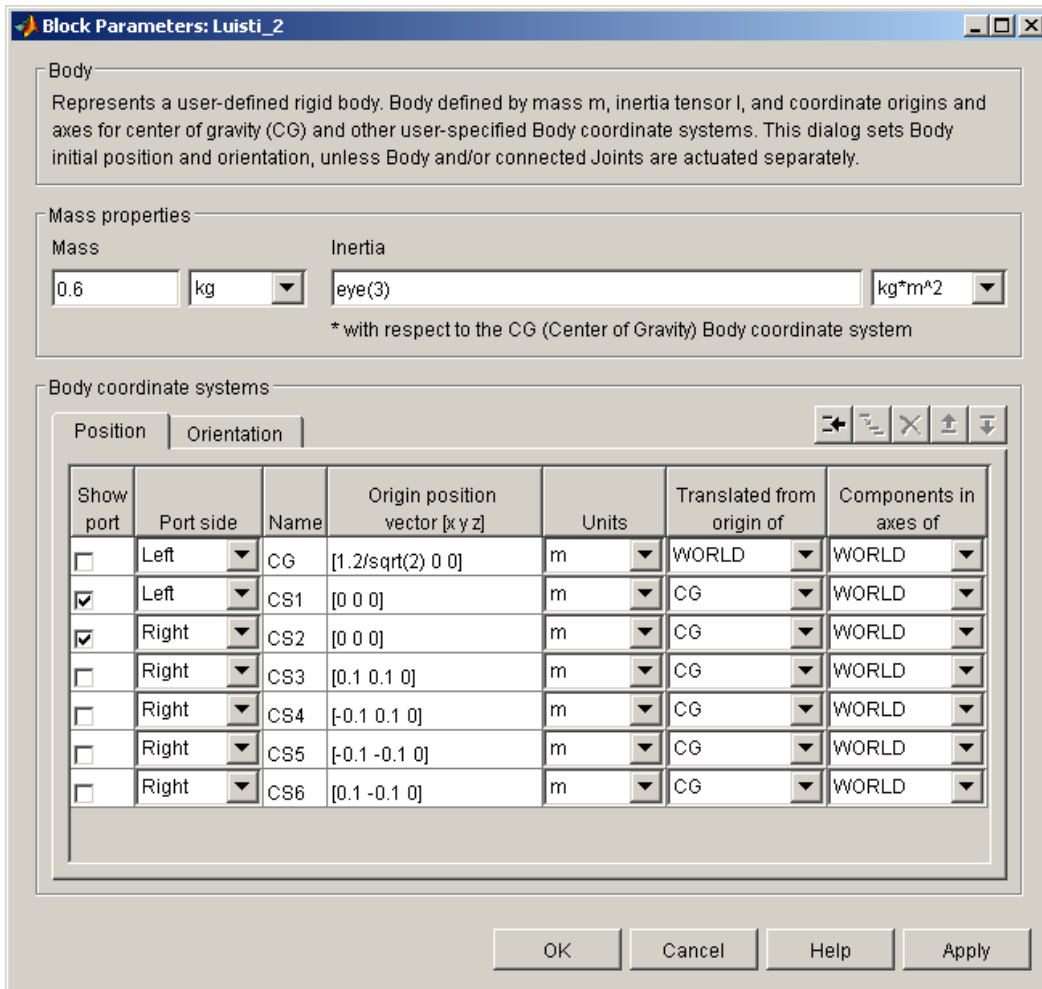


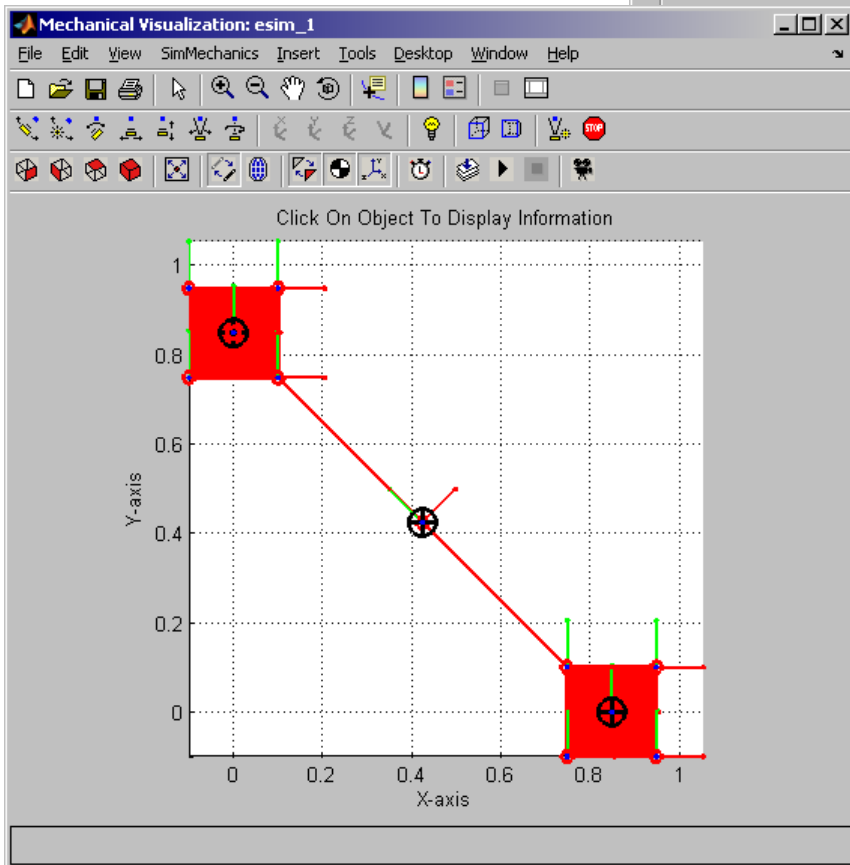
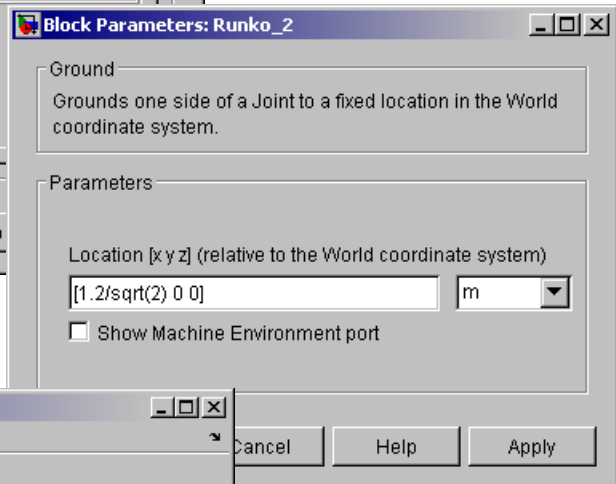
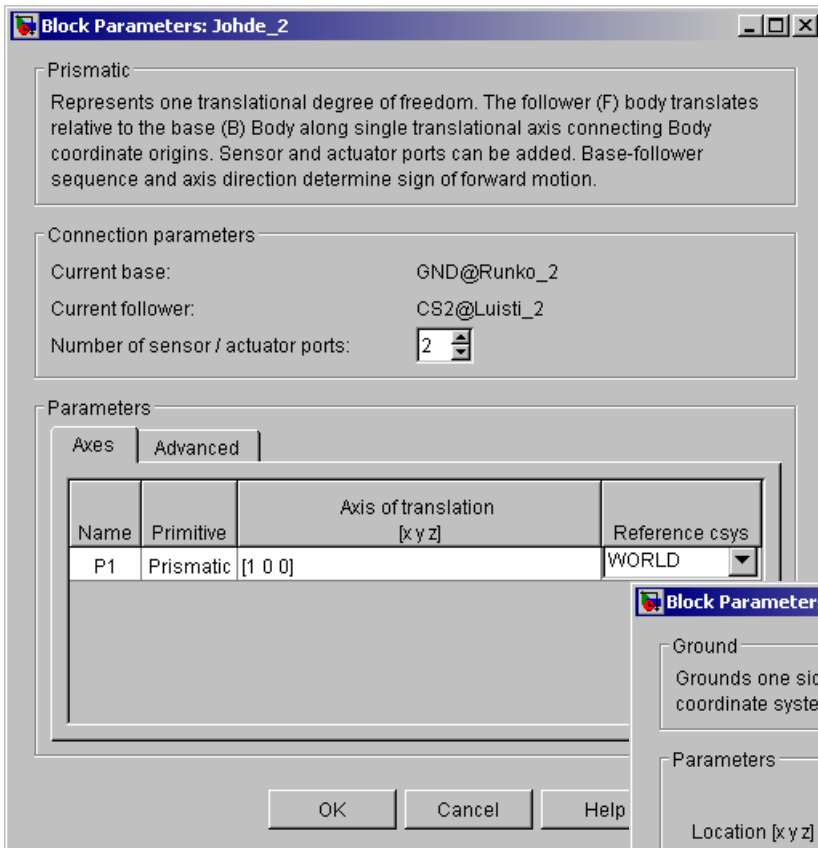


Annetaan niille kappaleiden p ahitusmomenteille, joita ei laskuissa tarvita, varmuuden vuoksi arvoiksi 1, jotta ei tule massamatriisiin singulaarisuuteen viittaavia virheilmoituksia.

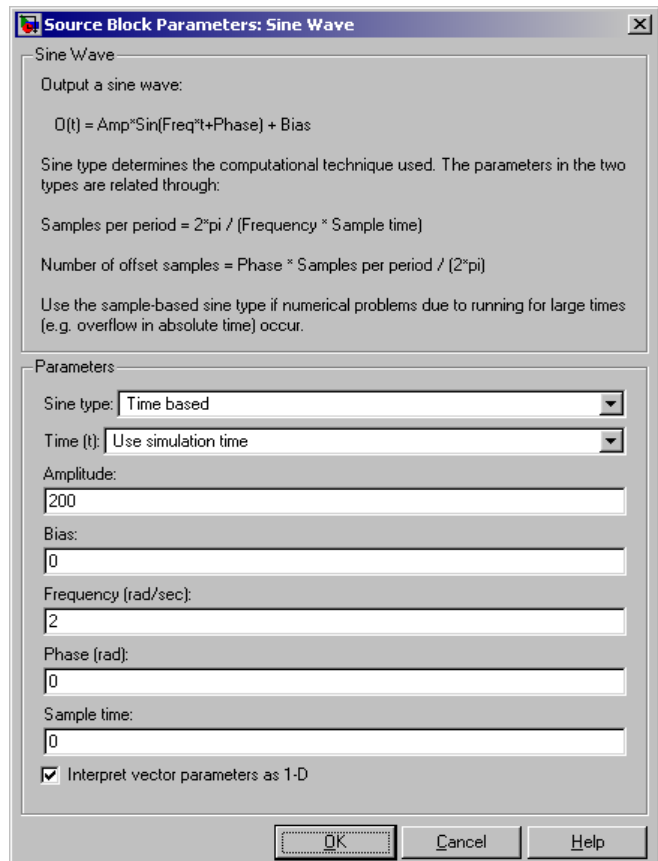
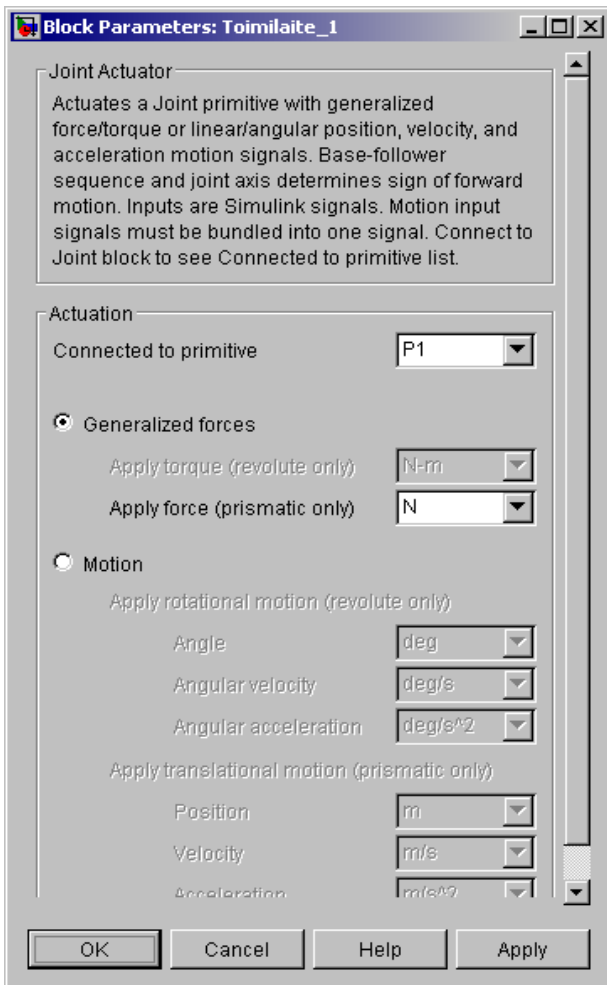
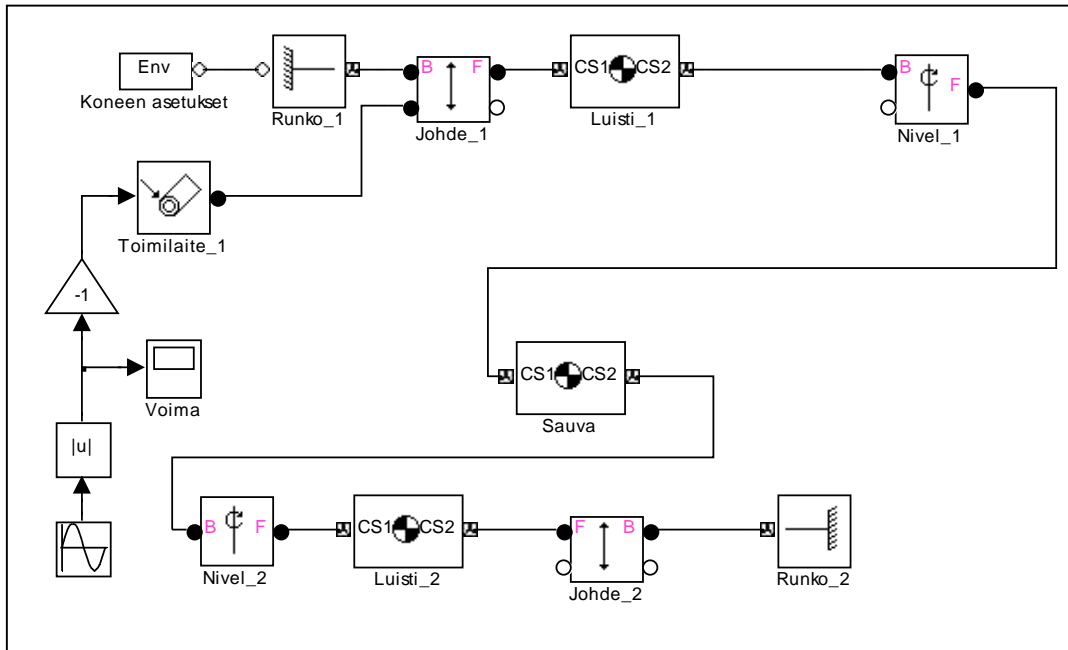




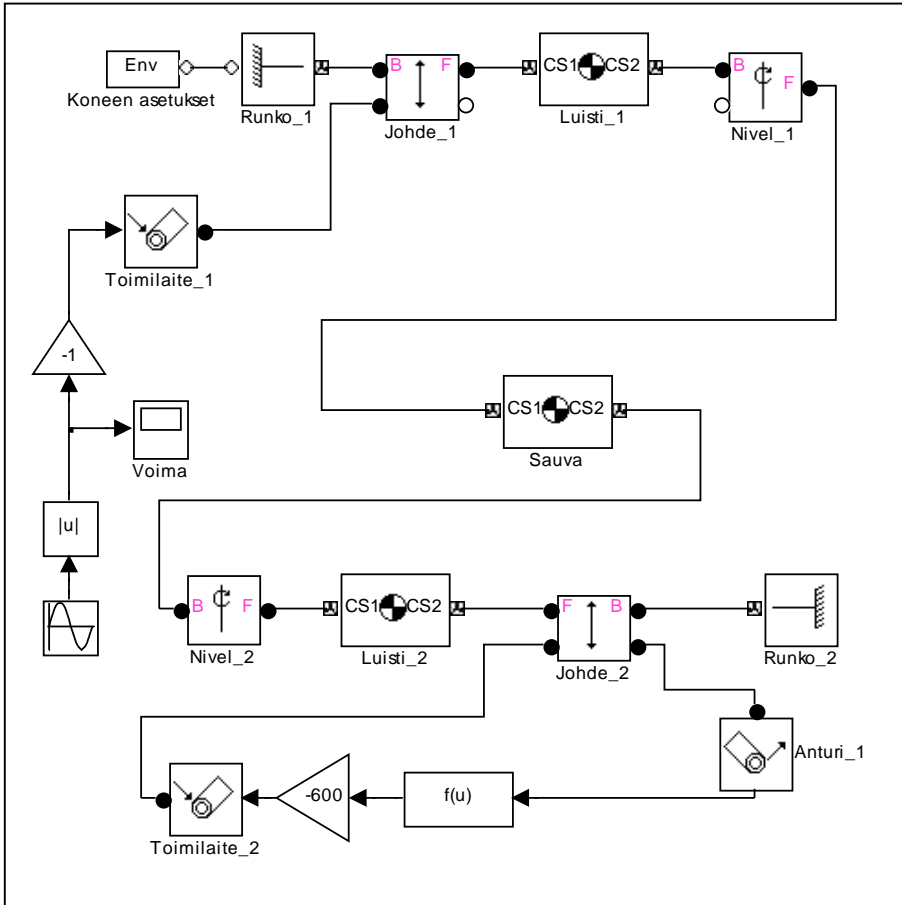




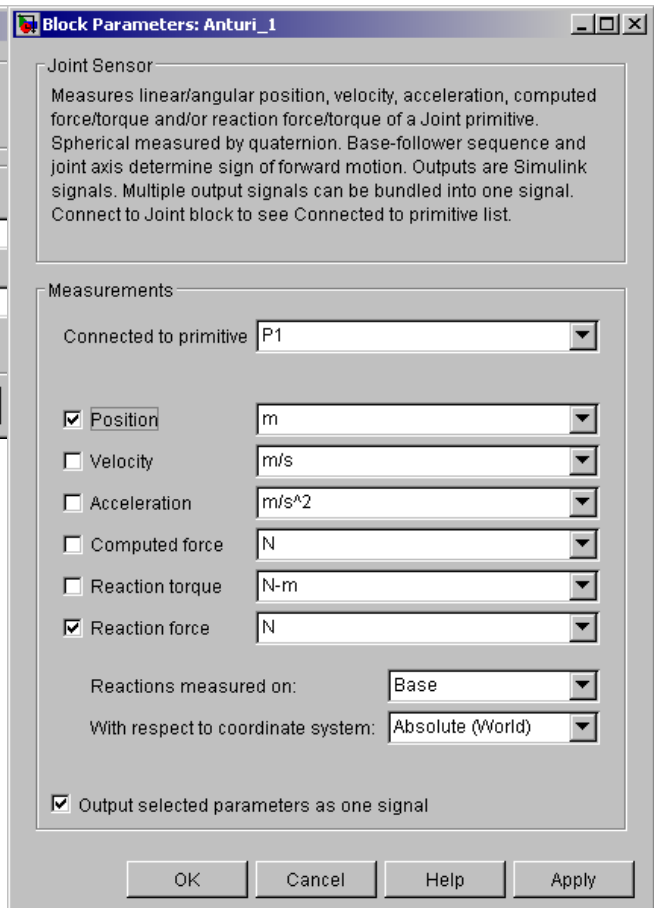
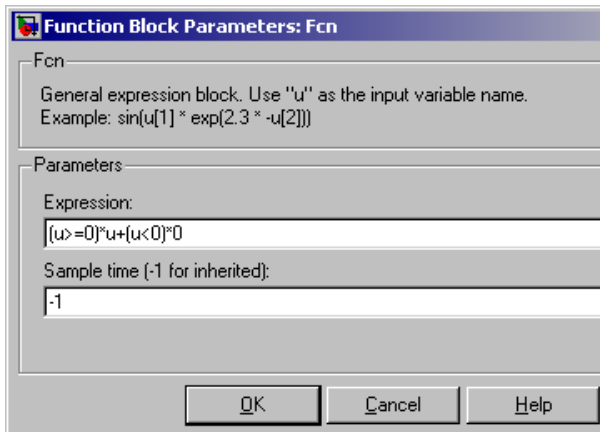
Lisää lohkokaaevioon pystysuuntaiseen luistiin vaikuttavan kuormituksen mallinnukseen tarvittavat Simulink ja SimMechanics lohkot ja täytä parametri-ikkunat kuvien mukaisesti.

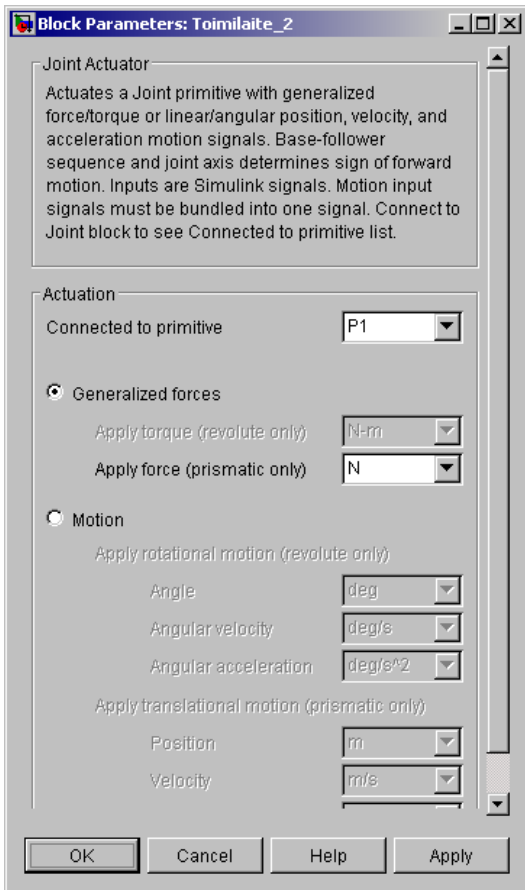




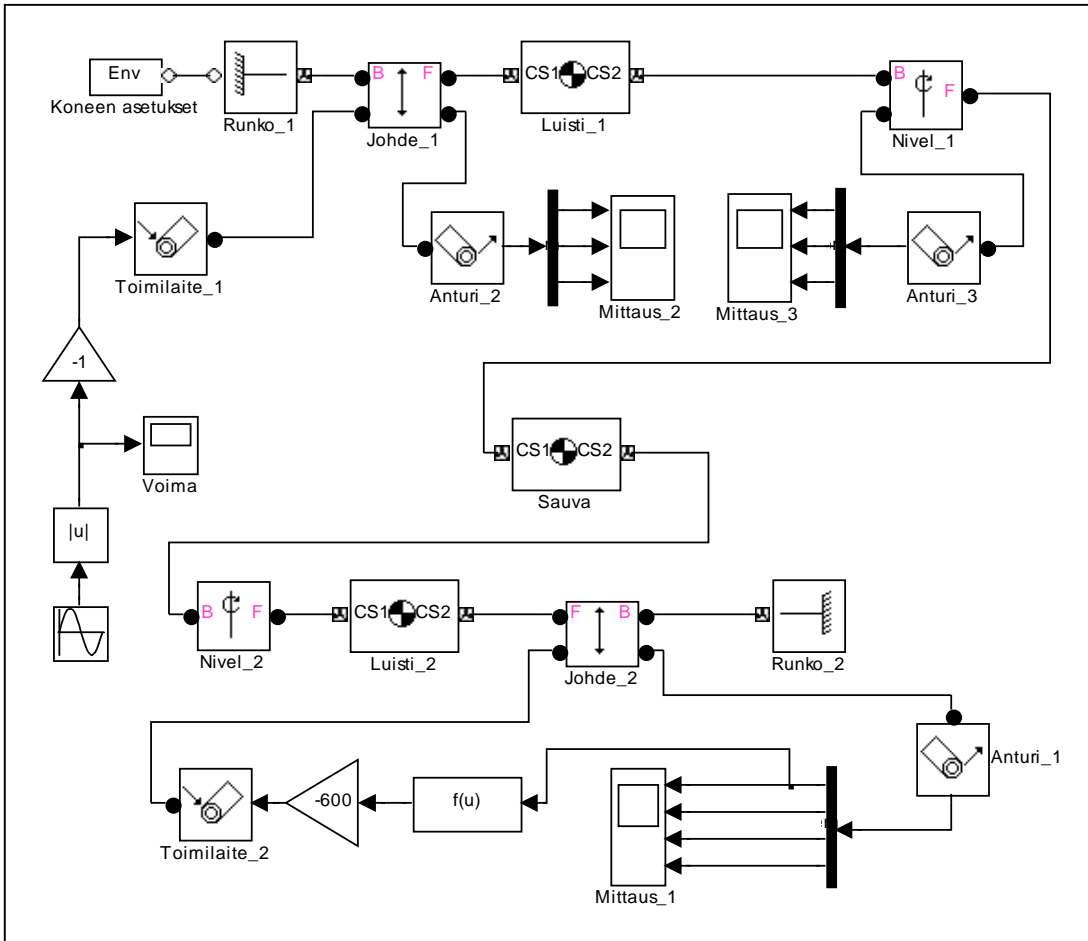


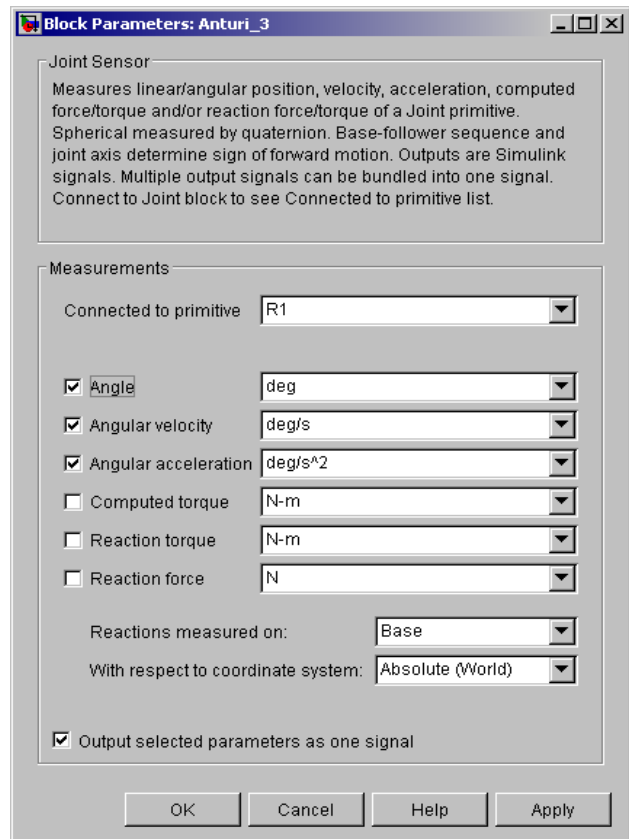
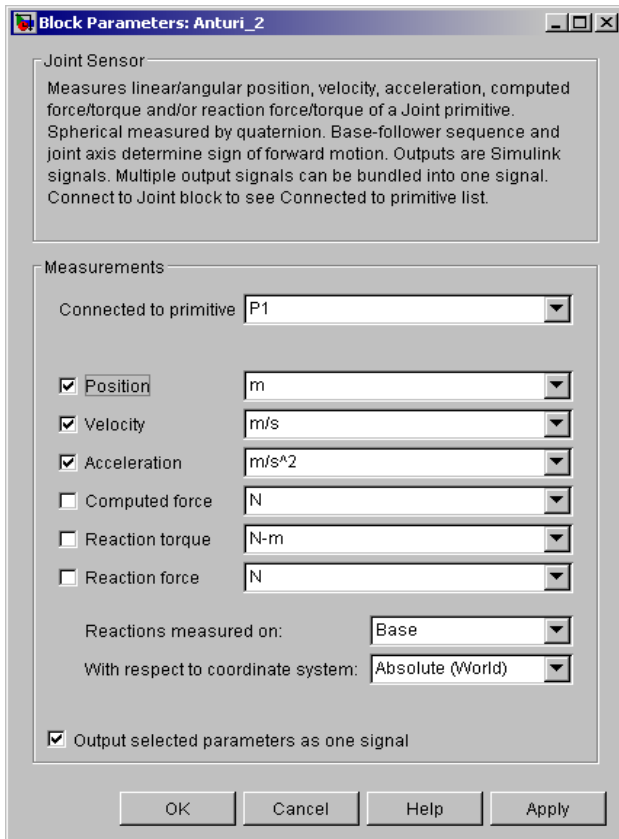
Lisää lohkokaaevioon vaakajohteessa olevan jousen mallinnukseen tarvittavat Simulink ja SimMechanics lohkot ja täytä parametri-ikkunat kuvien mukaisesti.



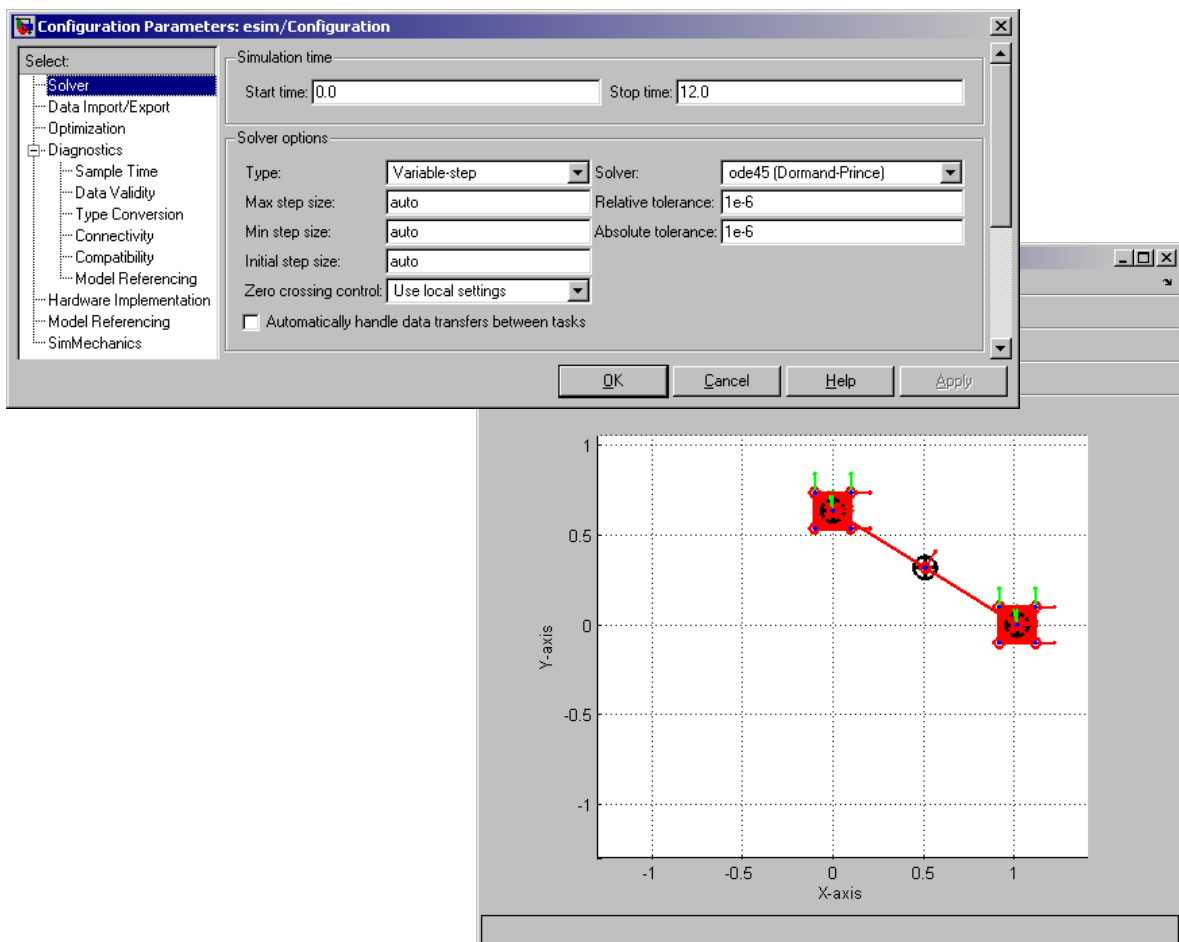


Lisää Joints lohkoihin suureiden mittaamista varten loput anturit ja Scope lohkot suureiden tarkastelua varten seuraavassa kuvassa esitetyllä tavalla.





Aseta simulointiparametrit kuvan mukaisesti ja käynnistä simulointi.



Scope lohkoihin tulee seuraavat kuvaajat.

