

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Automaatio- ja systeemitekniikan osasto
Systeemitekniikan laboratorio

Jari Kostamo

**SÄÄTÖTEKNIIKKAA HAVAINNOLLISTAVAN
LAITTEEN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS**

Diplomi-insinöörin tutkintoa varten
tarkastettavaksi jätetty diplomityö.

Työn valvoja: prof. Heikki Hyötyniemi

Espoo 12.3.2004

Tämä diplomityö on tehty Teknillisen korkeakoulun Systeemitekniikan laboratoriossa. Kiitän professori Heikki Hyötyniemeä mielenkiintoisen ja monipuolisen diplomityöaiheen tarjoamisesta sekä opastamisesta sen tekemisessä. Kiitokset kuuluvat myös Koneensuunnittelun laboratorion professori Petri Kuosmaselle, jonka ohjauksessa projektin ensimmäinen vaihe toteutettiin.

Systeemitekniikan laboratorion hyvä työilmapiiri ja erinomainen yhteishenki auttoivat suuresti tämän työn valmistumisessa. Kiitän kannustuksesta ja saamastani tuesta koko laboratorion henkilökunnalle. Myös Koneensuunnittelun laboratoriohenkilökunnalle kuuluu suuri kiitos työn edistymisestä ja sen lopputuloksesta. Heiltä sain hyviä neuvoja teknisissä ratkaisuissa sekä apua niiden toteuttamisessa.

Projektin ensimmäisen vaiheen onnistuminen oli tärkeä edellytys tämän työn tekemiselle. Erityisesti haluan kiittää tässä vaiheessa mukana olleita tekniikan opiskelijoita Kalle Kantolaa ja Aleksi Kuitusta. Heidän työpanostaan ja ideoitaan ei voi projektin onnistumisen kannalta liikaa korostaa. Vaativan projektin toteuttaminen hyvien kavereiden kanssa oli mukava ja opettavainen kokemus, josta jäi paljon hauskoja muistoja koko ryhmälle.

Espoossa 12.3.2004

Jari Kostamo

TEKNILLINEN KORKEAKOULU DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä:	Jari Kostamo		
Työn nimi:	Säätötekniikkaa havainnollistavan laitteen suunnittelu ja toteutus		
Päivämäärä:	12.3.2004	Sivumäärä:	120
Osasto:	Automaatio- ja systeemitekniikan osasto		
Professuuri:	Systeemitekniikka	Koodi:	AS-74
Työn valvoja:	professori Heikki Hyötyniemi		
Työssä suunniteltiin ja toteutettiin takaisinkytkennän ja säädön periaatteita havainnollistava demonstraatiolaitte. Työ tehtiin Teknillisen korkeakoulun Systeemitekniikan ja Koneensuunnittelun laboratorioissa. Tarkoituksena oli kehittää laite, jonka avulla voidaan havainnollistaa säätötekniikan perusteita mahdollisimman mielenkiintoisella ja selkeällä tavalla. Laite tuli suunnitella siten, että sitä voidaan lainata tiedekeskus Heurekaan automaatioaiheiseen näyttelyyn. Demonstraatiolaitte tarjoaa käyttäjälle mielenkiintoisen haasteen pelin muodossa. Käyttäjä voi itse kokeilla prosessin säätämistä manuaalisesti ja vertailla taitojansa tietokonetta vastaan. Säädettyväksi prosessiksi valittiin pienen pallon tasapainotus kupuran tason päälle. Säätöjärjestelmä perustuu konenäöltä saatavaan pallon paikan mittaukseen. Pallon paikkatieto syötetään Kalman-suodattimelle, jolla estimoidaan pallon tila. Kun pallon tila on estimoitu, käytetään LQ-säätäjää optimaalisen ohjauksen laskemiseksi. Demonstraatiolaitteesta saatiin kehitettyä varmatoiminen ja se pystyy toimimaan vaihtelevissa valaistusolosuhteissa. Laitetta koekäytettiin myös yleisötilaisuuksissa, joissa se osoittautui kiinnostavaksi kohteeksi. Pallon tasapainotus onnistuu tietokoneen ohjauksessa kaikissa tilanteissa ja laitteen käyttäytyminen on hallittua. Demonstraatiolaitteen viimeistelyyn ulkonäköön kiinnitettiin erityisesti huomiota ja lopputuloksen voidaan todeta täyttävän asetetut tavoitteet.			
Avainsanat:	säätö, takaisinkytkentä, epästabiili prosessi, konenäkö, Kalman-suodatin, LQ-säätäjä		

Author:	Jari Kostamo	
Title of thesis:	Design and Development of Device Demonstrating Control Theory	
Date:	March 12th, 2004	Pages: 120
Department:	Dept. of Automation and System Technology	
Professorship:	Control Technology	Code: AS-74
Supervisor:	Heikki Hyötyniemi, professor	
In this work a device demonstrating basic ideas of feedback and control was developed. Work was carried out at the Control Engineering and Machine Design Laboratories of Helsinki University of Technology. Device was also designed so that it can be borrowed by Finnish Science Centre Heureka. The demonstration device provides to the user an interesting challenge. The user can try to control the process by himself or let the computer do the work. In the demonstration device a small ball is set on a convex round surface and the balancing can be done by turning the surface. Control system is based on a position measurement obtained from a machine vision system. Position information is fed to Kalman filter used to estimate the state of the ball. Optimal control can be calculated from state estimate. As a result of this work a reliable demonstration device was developed. Control system of the device can handle balancing of the ball in all situations and the behavior of the device is predictable. A lot of effort was also done to take care of the finished outlook of the device and the result satisfies demands. Device was also tested by audience and people found it interesting.		
Keywords:	control, feedback, unstable process, machine vision, Kalman filter, LQ regulator,	

Sisältö

Symboliluettelo	IX
1 Johdanto	1
I Laitteen suunnittelu	4
2 Pallo Hallinnassa!	5
2.1 Sääntötekniikasta	5
2.2 Demonstraatiolaitteen idea	7
2.3 Pallo hallinnassa! -projekti	9
2.3.1 Projektin aloitus	9
2.3.2 Laatuvaatimukset näyttelylaitteelle	10
2.3.3 Projektin ensimmäinen vaihe	11
2.3.4 Projektin toinen vaihe	12
3 Systeemin dynaaminen malli	16
3.1 Mekaaninen rakenne	16
3.2 Pallon dynaaminen malli	17

3.2.1	Alustalevyn kulma	19
3.2.2	Pallon tilamalli	20
3.2.3	Pallon paikka	21
3.3	Lineaarimoottorien dynaaminen yhtälö	23
3.3.1	Levyn kulman ja lineaarimoottorien paikan välinen yhteys	24
3.3.2	Alustalevyn hitausmomentti	25
3.3.3	Toimilaitteiden mitoitus	26
3.4	Mallin epäideaalisuudet	26
4	Säätösuunnittelu	28
4.1	Säätöjärjestelmän rakenne	29
4.2	Prosessin ominaisuudet	31
4.3	Tilahavaitsija	32
4.3.1	Kalman-suodatin	34
4.4	Optimisäätö	35
4.4.1	Optimisäätäjä	35
4.4.2	Suboptimaalinen säätäjä	37
4.4.3	Servo-ongelma	40
4.5	Radanseuranta	40
4.5.1	Suboptimaalinen radanseuranta	42
4.6	Tilatakaisinkytkentä rekonstruoiduista tiloista	44
4.6.1	LTR-menettely	47

4.6.2	Jatkuvan tilan virheen minimoiminen	50
4.7	Lineaariservojen säätimen virittäminen	51
4.8	Järjestelmän simulointi	51
5	Järjestelmän testaus ja koeajot	54
5.1	LQ-säätäjän virittäminen	55
5.2	Kalman-suodattimen virittäminen	58
5.3	Radan seuranta	60
5.4	Ristikkäisvaikutukset	62
II	Tekninen toteutus	66
6	Demonstraatiolaitteen ohjausjärjestelmä	67
6.1	Ohjaustietokone	67
6.2	LabVIEW	69
6.2.1	LabVIEW-ohjelmointi	69
6.3	Säätöohjelma	70
6.4	Servojärjestelmä	71
6.5	Lineaarimoottorit	72
6.5.1	Lineaarimoottorien toimintaperiaate	73
6.5.2	Lineaarimoottorien servovahvistin	73
6.5.3	Servovahvistimen asetusten valitseminen	74
6.6	Rotaatioenkooderit	75

6.7	Servo-ohjain	75
6.8	Servo-ohjaimen asetusten valitseminen	76
6.8.1	PID-säätimen virittäminen	77
7	Konenäkö	81
7.1	Kamera	81
7.2	Linssi	82
7.3	Valaistus	84
7.4	Pallon tunnistaminen	85
7.5	Hahmonsovitusalgoritmin toiminta, IMAQ Vision	86
7.5.1	Opetusvaihe	87
7.5.2	Sovitusvaihe	88
7.5.3	Tunnistettavan kohteen valinta	89
7.6	Korrelaatiomenetelmä	89
7.7	Pallon paikannuksen tarkkuus	91
8	Laitteen viimeistely	95
8.1	Mekaniikka	95
8.1.1	Mekaaniset rajat	95
8.1.2	Keskinivel	96
8.1.3	Painonapit	96
8.1.4	Sähkötyöt	97
8.1.5	CE-hyväksyntä	97

8.1.6	Ulkopinnan levyt	97
8.1.7	Katon suunnittelu	98
8.1.8	Pintakäsittely ja maalaus	99
9	Yhteenveto	100
	Lähdeluettelo	104
A	Säätöohjelma	106
A.1	Ohjelman rakenne	106
A.2	Aliohjelmat	108
B	Servovahvistimen asetusten valitseminen	117
B.1	Parametrit	117

Symboliluettelo

A	Systeemimatriisi
B	Ohjausmatriisi
C	Lähtömatriisi
D	Suoravaikutusmatriisi
d_l	Alustalevyn paksuus
d_o	Kuvattavan kohteen halkaisija
d_{lm}	Lineaarimoottorin kiinnityspisteen etäisyys alustalevyn keskipisteestä
$d_p(t)$	Prosessihäiriö
d_s	Lineaarimoottorin enkooderilähdön askeleen pituus
d_x	Diskreetointiväli (kuvapikselin koko)
E_{ij}, F_{ij}	Matriisit, joita käytetään korrelaation laskussa.
$e(t)$	Säätötuloksen virhe.
e_{lm}	Lineaarimoottorin paikkavirhe.
F_{lm}	Lineaarimoottorin synnyttämä voima
$F_K(s)$	Säätäjän siirtofunktio
$F_r(s)$	Referenssisignaalin siirtofunktio
F_x, F_y	Palloon vaikuttavan voiman x - ja y -komponentit
F_μ	Kitkavoima
f	Linssin polttoväli
G, G_x, G_y	Painovoima ja sen x - ja y -komponentit
$G_d(s)$	Prosessihäiriön siirtofunktio
$G_k(s)$	Avoimen silmukan vahvistus
G_v	Vahvistuskerroin jännitteen ja voiman välillä
g	Maan putoamiskiihtyvyys
h_i	CCD-kennon koko
I	Pallon hitausmomentti
I_l	Alustalevyn hitausmomentti

$J(t)$	Kustannuskriteeri
K	Tilatakaisinkytkennän vahvistus
K_r	Kerroy referenssisignaalin skaalaamiseksi
K_v	Radanseurannassa käytettävä ohjaussignaalin vahvistuskerroin
K_p	Servo-ohjaimen asetettava P-termin kerroin
K_d	Servo-ohjaimen asetettava D-termin kerroin
k_1	Paikan vahvistuskerroin tilatakaisinkytkennässä
k_2	Nopeuden vahvistuskerroin tilatakaisinkytkennässä
L	Kalman-suodattimen vahvistus
l_c	Kameran etäisyys kuvattavasta kohteesta
l_x	Sauvan pituus
M	Momentti
m	Pallon massa
m_{red}	Alustalevyn redusoitu massa
m_{lm}	Lineaarimoottorin karan massa
N	Alustan tukivoima
n	Kokonaisluku
$n_m(t)$	Mittaushäiriö
P	Riccatin yhtälön ratkaisu
P_{t0}	Lopputilan painomatriisi
Q, R	LQ-ongelman kustannuksen painomatriisit
q_1	Paikkavirheen painokerroin
q_2	Nopeusvirheen painokerroin
R_l	Alustalevyn kaarevuussäde
R_1	Mittauskohinan kovarianssi
R_2	Prosessikohinan kovarianssi
R_d	Alustalevyn säde
r	Tasapainotettavan pallon säde
$r_{ref}(t)$	Referenssisignaali

$r(t)$	Ratakäyrä
$S(s)$	Herkkyysfunktio
s	Laplace-muuttuja
$s(t)$	Pallon paikka
$s_{lm}(t)$	Lineaarimoottorin karan paikka
$s_x(t), s_y(t)$	Pallon paikan x - ja y - suuntaiset komponentit
T_d	Derivaatan laskentaväli
$T(s)$	Komplementäärinen herkkyysfunktio
t	Aikamuuttuja
$u(t)$	Ohjaussuure
V_d	D-termistä riippuva servovahvistimen ulostulojännite
V_p	P-termistä riippuva servovahvistimen ulostulojännite
$v(t)$	Ratakäyrästä riippuva ohjaussignaali
$v_1(t)$	Valkoinen prosessikohina
$v_2(t)$	Valkoinen mittauskohina
X	Satunnaismuuttuja
$x(t)$	Tilavektori
$\hat{x}(t)$	Tilaestimaatti
$\tilde{x}(t)$	Estimointivirhe
$x_1(t), x_2(t)$	Tilamuuttujat
$y(t)$	Lähtösuure
α	LTR-menettelyssä käytettävä apumuuttuja
$\theta(t)$	Tason kaltevuuskulma pallon alla
ρ	Alustalevyn materiaalin tiheys
$\phi(t)$	Levyn kallistuskulma
$\varphi(t)$	Alustalevyn kaltevuus määritellyssä pisteessä
$\psi(t)$	Pallon kiertokulma
ω_B	Säädetyin järjestelmän kaistanleveys
ω_0	Säätimen kaistanleveys

Luku 1

Johdanto

Automaatio on nykyihmisille tuttu käsite. Useimmat arvioivat kohtaavansa automaatiota lähes jatkuvasti tai epäilevät, että nykyihminen ei tulisi toimeen ilman sitä. Tavallisimmin mieleen tulevia esimerkkejä automaation sovelluksista ovat pankkiautomaatti, hissi, bussikortinlukija ja kodinkoneet. Automaatiota ei mielletä sinänsä omana tekniikkana, vaan sitä ajatellaan yleensä ensisijaisesti erilaisten laitteiden ja niiden ominaisuuksien kautta. Asiaan perehtymättömille tulee harvoin mieleen ajatella automaatiota ja säätötekniikkaa myös erilaisten teollisuudessa tarvittavien prosessien hallinnassa.

Automaatioon ja säätötekniikkaan liittyviä perusasioita tiedetään varsin huonosti. Tavallinen ihminen ei useimmiten tule ajatelleeksi, miten talon sisälle voidaan säätää mukava lämpötila termostaatilla tai miten hissi saadaan pysähtymään pehmeästi oikean kerroksen kohdalle. [1]

Järjestelmien ohjaukseen ja säätöön liittyviä kysymyksiä käsittelee *säätötekniikka*, joka on olennainen osa automaatiota. Ohjattavia kohteita voivat olla esimerkiksi erilaiset koneet, laitteet ja prosessit. Säätötekniikka on oikeastaan osa automaatiota ja sitä on käsitteenä vaikeaa erottaa automaatiotekniikasta. Järjestelmien säätöön liittyy myös säädettävien prosessien mallintaminen, joka on usein edellytys hyvän säätöratkaisun löytämiselle. Jos prosessi kyetään

mallintamaan riittävän hyvin, saattaa säädön suunnittelu pelkistyä rutiininomaiseksi matemaattiseksi laskennaksi. Kun tarkastellaan koko ongelmaa, joka sisältää prosessin mallintamisen sekä säädön suunnittelun, on parempi käyttää termiä *systeemitekniikka*, joka viittaa näihin molempiin. Automaation tavoitteena ei ole pelkän säädön suunnittelu, vaan järjestelmän hallinnan edellytyksenä on sen käyttäytymisen ymmärtäminen.

Suurin osa systeemitekniikan tutkimukseen liittyvästä työstä on menetelmä-tutkimusta, johon kuuluvat erilaisten prosessien ja dynaamisten järjestelmien mallittamisen, analyysin ja säätösuunnittelun tehtävät. Systeemitekniikan käytännön sovelluksissa teoreettisten tulosten merkitystä ei pyritä erityisesti korostamaan, vaan useimmiten säätöjärjestelmät tehdään käyttäjän kannalta mahdollisimman huomaamattomiksi ja niiden tulee toimia luontevana osana koko laitteistoa.

Tavallinen kuluttaja törmää systeemitekniikan sovelluksiin käyttäessään esimerkiksi erilaisia kodinkoneita, joissa peruslaitteen kanssa sitä ohjaava mikroprosessori ja ohjelmisto muodostavat erottamattoman kokonaisuuden. Tällaisten sulautettujen järjestelmien merkitys kasvaa koko ajan ja niitä sovelletaan jatkuvasti uusille aloille. Kotitalouksissa mikroprosessorit ohjaavat jomonia laitteita jääkaapista mikroaaltouuniin puhumattakaan nykyaikaisten autojen sisältämistä säätöjärjestelmistä. Tämä tarkoittaa samalla sitä, että säätötekniikan ja eri prosessien mallittamisen tarve kasvaa jatkuvasti. Tällöin on tärkeää, että on olemassa tarvittava teoreettinen pohja halutulla tavalla toimivan ohjausjärjestelmän suunnittelemiseksi.

Vaikka systeemitekniikan merkitys kasvaa sovelluksissa, se ei näytä johtavan säätötekniikan perusteiden tiedon lisääntymiseen ja popularisoitumiseen. Joissakin tapauksissa tämä saattaa johtaa laitteiden virheelliseen käyttöön ja huoltoon. Säädön perustana olevan takaisinkytkennän idea on kuitenkin varsin yksinkertainen ja se voitaisiin esittää tavalla, jonka tekniikkaan perehtymätönkin ihminen voi ymmärtää. Tämän vuoksi on olemassa tarve havainnollistaa säädön perusideoita jonkin helposti ymmärrettävän ja tutun esimerkin kautta.

Tämän tarpeen pohjalta Teknillisessä korkeakoulussa käynnistettiin syyslukukauden 2002 alussa projekti, jonka tavoitteena oli toteuttaa laite "Pallo hallinnassa". Laitteen idea on havainnollistaa takaisinkytketyn säädön ideoita ja auttaa esittämään nämä periaatteet selkeällä tavalla asiasta kiinnostuneille. Laitteesta tuli suunnitella mielenkiintoinen ja interaktiivinen, jotta se pystyisi herättämään ihmisten kiinnostuksen esitettävää asiaa kohtaan.

Tässä työssä kuvataan demonstraatiolaitteen kehittämiseen liittyneet vaiheet. Toimivan kokonaisuuden rakentamiseksi jouduttiin ratkaisemaan monelle eri alalle liittyviä ongelmia. Tämä teki työstä mielenkiintoisen ja samalla haastavan. Projekti havainnollistaa hyvin automaation monialaisuutta ja poikkitieteellisyyttä. Yksittäisiä ratkaisuja tehtäessä oli koko ajan pidettävä tavoite mielessä ja ratkaisut oli valittava siten, että ne mahdollistivat päämäärän saavuttamisen.

Osa I

Laitteen suunnittelu

Luku 2

Pallo Hallinnassa!

Tämän luvun tarkoitus on antaa ”ei-ammattilaiselle” selkeä kokonaiskuva laitteen toimintaperiaatteista sekä siitä, mitä sillä on tarkoitus havainnollistaa. On tärkeää huomata, että tehdyn työn päämääränä ei ollut pelkästään säätöjärjestelmän toteuttaminen epästabiilin systeemin ohjaukseen, vaan työn merkitys on ymmärrettävä laajemmin yrityksenä tuoda säätötekniikkaan ja -teoriaan liittyvät asiat esille mielenkiintoisella ja ymmärrettävällä tavalla.

2.1 Säätötekniikasta

Säätötekniikan voidaan ajatella olevan systeemien sekä niiden hallintamekanismien ja -rakenteiden analysointia, kehittämistä ja toteuttamista. Säätötekniikassa keskeinen käsite on *takaisinkytkentä*, joka tarkoittaa järjestelmän käyttäytymisen mittaamista ja tämän tiedon hyödyntämistä järjestelmän ohjauksessa. Säätöteorian tarkoituksena on tutkia, miten järjestelmää kannattaa ohjata saadun mittaustiedon perusteella.

Käytännössä lähtökohtana on useimmiten kone, prosessi tai laite, jonka käyttäytymiseen halutaan vaikuttaa. Etenkin teollisuudessa säätötekniikan merkitys on korvaamaton järjestelmien ohjauksessa. Säädön tavoitteena voi olla systeemin saattaminen johonkin toimintapisteeseen, jolloin se toimii halutul-

la tavalla ja useimmiten myös mahdollisimman tuottavasti. Kohteena saat-
taa olla myös epästabiili systeemi, joka vaatii jatkuvaa ohjausta, jotta sen
käyttäytyminen säilyy hallittavana.

Jotta tarkasteltavaa järjestelmää voidaan ohjata halutulla tavalla, täytyy sii-
hen ensin tutustua ja sen käyttäytyminen ja ominaisuudet tulee ymmärtää.
Tätä sanotaan *mallitukseksi*. Järjestelmän ominaisuuksien tunteminen aut-
taa ymmärtämään, miten hyvään suorituskyykyyn on mahdollista päästä ja
miten se saavutetaan. Toisaalta voidaan osoittaa, että säädön kannalta on
olemassa rajoituksia, joita ei voida mitenkään välttää. Mallituksen lähesty-
mistapana saattaa olla esimerkiksi fysikaaliselta pohjalta muodostettu dy-
naaminen malli. Toinen tapa lähestyä ongelmaa on mallittaa järjestelmää
mittausdatan perusteella.

Kun systeemin keskeisimmät ominaisuudet on saatu selville, voidaan sen
käyttäytymiseen yrittää vaikuttaa takaisinkytkennän eli säädön avulla. Sää-
ttöteoria tarjoaa tehokkaat työkalut erilaisten tapausten ratkaisemiseksi ja sen
avulla voidaan suunnitella järjestelmille säätöratkaisuja, jotka täyttävät en-
nalta määritellyt vaatimukset suorituskyyvylle. Joissakin tapauksissa säädön
suunnittelu voi yksinkertaisimmillaan pelkistyä suoraviivaiseksi matemaat-
tiseksi laskennaksi, mutta on huomattava, että säädön suunnittelemisen ei
ole aina yksinkertaista ja välillä tarvitaan järeämpiä apukeinoja ratkaisun
löytämiseksi. Tässä vaiheessa säätöteoria tarjoaa useita menetelmiä, joilla
voidaan analysoida tarkemmin ongelmakohtia ja pyrkiä poistamaan niiden
vaikutukset.

Nykyaikana säätötekniikan sovelluksia käytetään lähes kaikkialla. Useimmis-
sa sovelluskohteissa tavallinen käyttäjä ei edes huomaa sitä. Kun laitteet toi-
mivat kunnolla, unohdetaan säätöpiirien tärkeä rooli järjestelmien ohjaukses-
sa. Sääto- ja ohjauspiirien merkitys korostuu vasta sitten, jos niihin aiheutuu
jokin vikatilanne ja ne eivät toimi enää kunnolla.

2.2 Demonstraatiolaitteen idea

Havainnollinen, mielenkiintoinen ja nykyaikainen tapa esittää asioita on tehdä niistä *peli*, joka tarjoaa opetettavan asian lisäksi myös siihen liittyvän haasteen. Myös säätötekniikan perusteita havainnollistava laite olisi kiinnostavaa toteuttaa pelin muodossa. Laitetta suunniteltaessa täytyy kuitenkin kiinnittää huomiota siihen, että se tukee täysin opetettavaa asiaa ja sen käytettävyys on mahdollisimman hyvä. Opetuslaitetta suunniteltaessa on tärkeää pitää mielessä, että esitettävä asia on tärkeämpi kuin itse laite.

Takaisinkytketyn säädön ideoiden havainnollistamista varten suunniteltiin laite, joka kykenee tasapainottamaan pallon kuperan tason päälle. Kuperalle tasolle asetettu pallo ei tahdo luonnollisesti pysyä keskipisteen päällä, vaan se pyrkii aina vierimään levyn reunalle. Pallon paikkaan voidaan vaikuttaa, mikäli kuperaan tasoa kallistellaan sen keskipisteen ympäri. Jos pallo halutaan viedä johonkin tiettyyn paikkaan ja pitää siinä, vaatii systeemi jatkuvaa ohjausta. Kuva 2.1 havainnollistaa tätä ajatusta.



Kuva 2.1. Pallo ei pysy kuperan tason päällä, vaan pyörii reunalle.

Peliominaisuuden tavoittamiseksi laite suunniteltiin siten, että käyttäjä voi halutessaan koettaa ohjata laitetta itse, mutta tarvittaessa pallon tasapainotuksen hoitaa helpponnäköisesti säätöpiiri. Jotta pelin käyttämiseksi ei tarvittaisi paljoa käyttäjien ohjeistusta, järjestelmän ohjaus toteutettiin kaikille

2.2 Demonstraatiolaitteen idea

tutun ”labyrinttipelin” ideaa soveltaen. Pelin toteutusta voitaisiin pitää onnistuneena, mikäli se tarjoaa sopivan vaikean haasteen ja se ei menetä heti mielenkiintoaan. Tietokonepohjaisen säädön tulisi pystyä tasapainottamaan pallo huomattavasti ihmistä nopeammin ja tarkemmin, jolloin säätöteorian tehokkuus tulisi hyvin havainnollistettua.

Näiden ideoiden pohjalta kehittyi ensimmäinen näkemys laitteesta, joka oli lähtökohtana suunnittelulle. Kuva 2.2 havainnollistaa taiteilijan hahmottelemaa luonnosta pallon tasapainotukseen tarkoitetusta laitteesta. Laitteen sivuilla näkyvät käsipyörät, joiden avulla käyttäjä voi kääntää levyä ja pyrkiä tasapainottamaan pallon keskelle.



Kuva 2.2. Taiteilijan hahmotelma demonstraatiolaitteesta. [18]

2.3 Pallo hallinnassa! -projekti

Kun laitteen idea oli selvinnyt, aloitettiin laitteen suunnittelu ja toteutus. Tätä varten käynnistettiin projekti ”Pallo hallinnassa”. Projekti tehtiin yhteistyössä Systeemitekniikan ja Koneensuunnittelun laboratorioden kanssa ja se oli kaksivaiheinen. Projektin ensimmäisen osan tavoitteena oli toteuttaa laitteen mekaniikka mekatroniikan kurssin harjoitustyönä. Toinen vaihe piti sisällään laitteen säätöjärjestelmän suunnittelun ja toteuttamisen ja se tehtiin Systeemitekniikan laboratoriolle diplomityönä.

2.3.1 Projektin aloitus

Projektin ensimmäinen osa eli mekaniikan suunnittelu ja rakentaminen aloitettiin syyslukukaudella 2002. Projektin ensimmäinen vaihe oli osa Koneensuunnittelun laboratoriolta järjestettävää mekatroniikan kurssia ja projekti-ryhmä muodostui kolmesta kurssin opiskelijasta.

Projekti aloitettiin tekemällä projektisuunnitelma, jossa määriteltiin aikataulu ja arvioitu budjetti. Aikataulu oli suhteellisen tiukka, sillä laitteen tuli valmistua yhden lukuvuoden aikana. Aikatauluun määriteltiin myös katselmuspäivät, jolloin projektin etenemistä seurattiin ja siitä laadittiin väliraportteja. Projektin ensimmäisen vaiheen päättymispäiväksi määriteltiin 25.4.2002, jolloin sen tulokset esiteltiin yleisölle.

Budjetin arviointi oli aivan projektin alussa varsin vaikeaa, koska vasta parin kuukauden suunnittelutyön jälkeen voitiin varmistua siitä, minkä tyyppisiä toimilaitteita käytetään. Rahoituksen osalta projektin budjetti saatiin kuntoon, kun Teknillisen korkeakoulun rehtori myönsi tarvittavan rahoituksen. Budjettiin myönnettiin riittävästi rahaa edustavan näyttelylaitteen rakentamiseksi.

Projektin tavoitteeksi asetettiin rakentaa demonstraatiolaitte, joka havainnollistaisi takaisinkytketyn säädön periaatteita mahdollisimman selkeällä ta-

valla. Laitteen tuli olla interaktiivinen, jotta käyttäjät voisivat itse havaita opetettavan asian merkityksen. Laitetta suunniteltaessa tuli ottaa myös huomioon, että sitä tullaan käyttämään näyttelytarkoitukseen ja tämän vuoksi sille asetettiin korkeat laatuvaatimukset. Käyttötarkoituksesta johtuen oli vaatimuksia asetettaessa otettava huomioon erityisesti monipuolinen käyttäjäjoukko sekä tosiasia, että laite saatetaan yrittää saada tahallaan rikki.

2.3.2 Laatuvaatimukset näyttelylaitteelle

Interaktiiviselle näyttelylaitteelle on tärkeää, että sen käytettävyys on hyvä. Tiedekeskuksissa kävijöiden sietokyky ja kärsivällisyys huonosti toteutettuja kohteita kohtaan on heikko, eikä aikaa viitsitä kuluttaa käyttöohjeisiin tutustumiseen. Tavoitteena oli, että laitteen käytettävyys on niin hyvä, että käyttäjä pystyy saavuttamaan tavoitteensa tehokkaasti, on hän millä osamistasolla tahansa. Laitteen ergonomian tulisi olla myös riittävän hyvä, ettei peliä tarvitse pelata epämiellyttävältä tuntuvassa asennossa.

Näyttelykäyttö asettaa teknisille ratkaisuille monia vaatimuksia. Erityisen tärkeää on suunnitella laitteesta mahdollisimman varmatoiminen, sillä rikki-näiset laitteet ovat tiedekeskuksissa järjestettävien näyttelyiden kannalta hyvin ongelmallisia. Ylläpitokustannuksien hallitsemiseksi laitteessa tulisi käyttää standardiosia ja erikoisten teknisten ratkaisujen käyttämistä tulisi välttää. Laitteen tarvitseman huollon tulisi olla mahdollisimman vähäistä ja helppoa suorittaa. Komponenttien valinnassa tuli ottaa huomioon, että ne olisivat CE-hyväksytyjä ja täyttäisivät turvallisuusvaatimukset.

Ohjelmistokehityksessä pyrittiin laadukkaaseen lopputulokseen. Ohjelmisto tuli suunnitella siten, että kone reagoi nopeasti käyttäjän antamiin komentoihin, eikä käyttäjä voi antaa useita komentoja samanaikaisesti. Ohjelmiston käyttöliittymästä piti tehdä mahdollisimman selkeä, jotta käyttäjä pystyy ymmärtämään heti, miten sitä käytetään. Laadukkaan lopputuloksen varmistamiseksi tavoitteeksi asetettiin, että ohjelmiston toiminta testataan perusteellisesti eri tilanteiden varalta.[2]

2.3.3 Projektin ensimmäinen vaihe

Mekatronisen suunnittelun alussa oli päätetty ainoastaan idea laitteen toimintaperiaatteesta. Tekniset ratkaisut jäivät ryhmän pohdittavaksi, mutta laite tuli kuitenkin rakentaa siten, että se mahdollistaa myöhemmin säätöjärjestelmän toteuttamisen ensimmäisessä vaiheessa hankituilla komponenteilla.

Suunnittelun alkuvaiheessa erilaiset mekaaniset rakenteet pyrittiin käymään mahdollisimman tarkasti läpi ja niitä vertailtiin keskenään. Rakennetta suunniteltaessa erityistä huomiota kiinnitettiin yksinkertaisuuteen ja kestävyys-teen. Tavoitteena oli rakentaa mekaniikasta niin kestävä, että se tarvitsisi vähän huoltoa eikä olisi altis rikkoontumaan. Suunnittelutyössä käytettiin apuna 3D-mallintamista, jonka avulla voitiin arvioida erilaisten ratkaisujen toteuttamiskelpoisuutta.

Suunnittelun tuloksena päädyttiin ratkaisuun, jossa kupera levy on nivelöity keskikohdastaan runkoon ja levyä kääntelevät kaksi lineaariservomoottoria. Kuva 2.3 havainnollistaa laitteen perusrakennetta. Kuvassa näkyvät lineaarimoottorit kiinnittyvät levyn alapintaan, jolloin levy kallistuu moottorien karoja liikuteltaessa ylös- tai alaspäin.



Kuva 2.3. Demonstraatiolaitteen perusrakenne.

Kaikki tärkeimmät ratkaisut laitteen rakenteen kannalta oli tehty tammikuuhun 2003 mennessä. Tällöin oli myös järjestelmää ohjaava tietokone tilattu ja laitteen rakennus alkoi. Riittävän tarkat suunnitelmat sekä 3D-mallintamisen käyttäminen helpottivat prototyypin rakennustyötä huomattavasti ja työ eteni nopeasti.

Prototyyppiä rakennettaessa jouduttiin tilaamaan paljon osia eri valmistajilta ja tärkeä osa projektin hallintaa oli varmistaa osien toimitukset. Projektin ainutlaatuisuudesta johtuen paljon osia jouduttiin myös valmistamaan itse ja laitteen kokoaminen tehtiin projektiryhmän omalla työllä.

Projektin ensimmäisen vaiheen päättyessä laite oli saatu tavoitteiden mukaisesti valmiiksi ja pallon tasapainotusta pystyi kokeilemaan käsipyöristä pyörittämällä. Onnistunut projektin ensimmäinen vaihe tarjosi hyvän pohjan jatkaa kehitystyötä konenäön ja säätösuunnittelun osalta.

2.3.4 Projektin toinen vaihe

Projektin toisen vaiheen tavoitteena oli suunnitella ja rakentaa laitteeseen konenäköä hyväksi käytävä säätöjärjestelmä, jonka avulla laite pystyy tasapainottamaan pallon kuperan tason päälle. Laite täytyi myös viimeistellä näyttelyä varten virheettömään kuntoon ja sen häiriötön toiminta oli varmistettava.

Toisen vaiheen alkaessa ensimmäiseksi hankittiin kamera, jotta konenäköön perustuvaa pallon paikantamista päästiin kehittämään. Konenäköä testattaessa kokeiltiin useita eri vaihtoehtoja, joista valittiin vaihtelevissa olosuhteissa parhaan tuloksen antanut hahmonsovitukseen perustuva pallon tunnistusmenetelmä. Ohjelmoitaessa kuvan käsittelyyn ja pallon tunnistukseen liittyviä ohjelmia, oli koko ajan pidettävä mielessä haluttu säädön toimintataajuus. Kuvankäsittelyyn liittyvät toiminnot vaativat yleensä paljon laskentatehoa ja tämä oli otettava huomioon ohjelmaa suunniteltaessa. Pallon tunnistamiseen liittyvä ohjelma saatiin toimimaan riittävän nopeasti muuta-

man yrityksen jälkeen ja kokeiden perusteella osoittautui, että tunnistaminen kyetään tekemään luotettavasti vaihtelevissa olosuhteissa.

Samanaikaisesti pallon tunnistamisen kanssa kehitettiin myös säätöalgoritmeja. Pallon dynaamisen mallin pohjalta laskettiin Kalman-suodatin ja optimisäättäjä, jotka ohjelmoitiin demonstraatiolaitetta ohjaavalle tietokoneelle. Kalman-suodattimen ja optimisäättäjän laskemiseen käytettiin Matlab-ohjelmaa, jolla suoritettiin myös simuloinnit lasketuilla parametreilla. Säätöteorian pohjalta lasketut parametrit toimivat hyvin ja pallon tasapainotus onnistui, kun painokertoimiksi valittiin sopivat arvot. Painokertoimien hienosäätö tehtiin kokeilemalla erilaisia arvoja todellisessa prosessissa ja vertailemalla niillä saatuja tuloksia.

Kun säätöjärjestelmä saatiin toimimaan tyydyttävällä tavalla, keskityttiin seuraavaksi laitteen viimeistelyyn. Konenäköjärjestelmää testattaessa oli tullut jo selväksi, että laite tarvitsee oman valaisimen takaamaan kamerasarvutseman riittävän valotehon. Valaistusratkaisua selvitettyä oli huomiotava monta asiaa ja sopivan valaisimen löytäminen oli hankalaa.

Vasta kun kamera ja valaisin oli hankittu, katto voitiin suunnitella ja valmistuttaa. Katon suunnittelua helpotti huomattavasti projektin ensimmäisessä vaiheessa tehty CAD-malli, jonka pohjalta suunnittelutyö tehtiin. Kun lopullinen osa teetettiin jyrsimällä, se voitiin asentaa paikoilleen ilman ongelmia. Kuvassa 2.4 on koko laitteesta muodostettu 3D-malli, jossa on myös katto-osa asennettuna.

Demonstraatiolaitteen viimeistelyyn käytettiin runsaasti aikaa. Paljon pienemmällä työllä olisi selvitty, jos laite olisi rakennettu vain laboratoriokäyttöön ja se olisi ollut tarkoitettu käytettäväksi valvonnan alaisuudessa. Viimeistelyssä kiinnitettiin erityistä huomiota laitteen turvallisuuteen ja jokaisessa vaiheessa pyrittiin varmistamaan, että laite ei aiheuta käyttäjälleen minkäänlaista vaaraa. Tärkeää oli myös huolehtia viimeistelystä ulkonäöstä, jotta kävijät kiinnostuisivat kohteesta ja se pystyisi antamaan hyvän vaikutelman Teknillisen korkeakoulun osaamisesta. Kuvassa 2.5 on valokuva val-



Kuva 2.4. Valmis 3D-malli.

miista demonstraatiolaitteesta, joka oli ensimmäistä kertaa esillä yleisölle Automaatiopäivillä 2003 Helsingin Messukeskuksessa.



Kuva 2.5. Valmis demonstraatiolaite.

Luku 3

Systeemin dynaaminen malli

Mallinnettaessa demonstraatiolaitteella havainnollistettavaa prosessia on tärkeää etsiä järjestelmän käyttäytymisen kannalta olennaiset ilmiöt. Mallinuksessa tulisi pyrkiä siihen, että muodostettu malli kuvaa hyvin järjestelmän käyttäytymistä, mutta siinä ei ole turhia ja säätösuunnittelun kannalta epäolennaisia piirteitä. Hyvä lähestymistapa tässä tapauksessa on aloittaa mahdollisimman yksinkertaisesta mallista ja tarkastella, onko malli riittävän hyvä kuvaamaan järjestelmän olennaiset piirteet. Pallolle on mahdollista johtaa dynaaminen malli Newtonin mekaniikan pohjalta, kun tehdään tiettyjä oletuksia.

Tässä kappaleessa tarkastellaan systeemin käyttäytymistä ja esitetään pallon dynaamisen mallin johtaminen. Toimilaitteille johdetaan myös dynaaminen malli ja niiden suorituskyyvylle asetettavia vaatimuksia arvioidaan.

3.1 Mekaaninen rakenne

Systeemin perusrakenne koostuu laitteen rungosta, tasapainotettavasta pallosta, kuperasta alustalevystä, toimilaitteista ja ristinielistä. Kuperalevy on muodoltaan pallokalotti ja se on nivelöity keskipisteestään laitteen run-

koon. Nivel on pyritty sijoittamaan lähelle levyn pintaa, jotta levyn keskipiste pysyisi mahdollisimman tarkasti paikallaan, kun levyä kallistetaan.

Levyä kallistavina toimilaitteina käytetään lineaarimoottoreita, jotka on kiinnitetty levyyn toisiinsa nähden 90 asteen kulmassa. Tällä tavalla levyille saadaan kaksi vapausastetta, joiden suhteen levyä voidaan kallistaa ajamalla moottorien karoja ulos- tai sisäänpäin. Moottorit on kiinnitetty laitteen runkoon siten, että ne voivat kallistua vapaasti levyn kulman muuttuessa.

3.2 Pallon dynaaminen malli

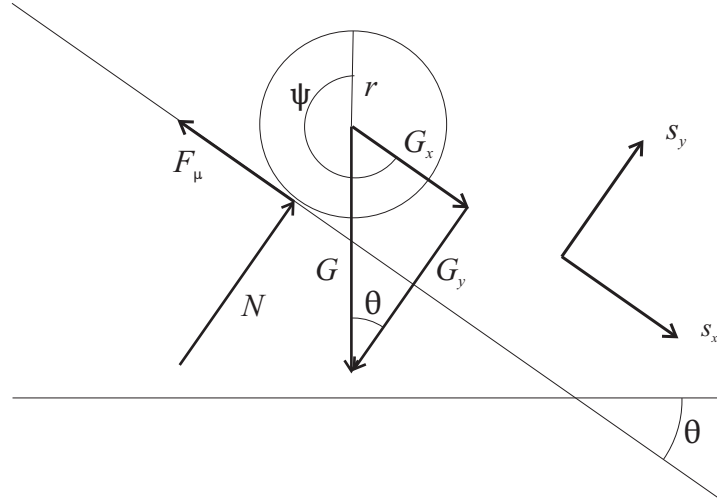
Dynaamista mallia johdettaessa on tehty oletus, että pallon eri liikesuunnat ovat toisistaan riippumattomia eli pallon paikan toisiaan vastaan kohtisuorassa olevien komponenttien s_x ja s_y välillä ei ole ristikkäisvaikutuksia. Tämä oletus yksinkertaistaa pallon liikeyhtälön johtamista ja se on hyvä lähtökohhta mallinnukselle. Myöhemmin järjestelmän toimintaa testattaessa voidaan arvioida, onko s_x - ja s_y -komponenttien välillä merkittävä riippuvuus, joka olisi syytä ottaa huomioon. Mikäli säädetty järjestelmä toimii kuitenkin riittävän hyvin, ei ole välttämätöntä tarkastella tätä ongelmaan sen tarkemmin. Seuraavassa tarkastelussa käsitellään liikettä ainoastaan yhden liikesuunnan suhteen ja tilanne voidaan olettaa toisessa suunnassa samanlaiseksi.

Palloa ohjataan kallistelemalla kuperaa alustalevyä. Tällä tavoin voidaan säädellä alustalevyn palloon aiheuttaman tukivoiman vaakatason suuntaista komponenttia ja aiheuttaa pallolle sivuttaissuuntainen kiihtyvyys. Pallon kiihtyvyys kaltevalla tasolla voidaan johtaa kuvan 3.1 esittämän mallin perusteella.

Mallin johtaminen aloitetaan kirjoittamalla tasapainoyhtälöt. Tasapainoyhtälöt kirjoitetaan erikseen molemmille koordinaattiakseleille ja momentille.

[3]

3.2 Pallon dynaaminen malli



Kuva 3.1. Pallon malli.

$$\sum F_x = G_x - F_\mu = m\ddot{s}_x(t) \quad (3.1)$$

$$\sum F_y = N - G_y = m\ddot{s}_y(t) \quad (3.2)$$

$$\sum M = -F_\mu r = I\ddot{\psi}(t) \quad (3.3)$$

Yhtälöissä on käytetty seuraavia merkintöjä:

$s_x(t), s_y(t)$	Pallon paikan x - ja y -suuntaiset komponentit
F_x, F_y	Palloon vaikuttavan voiman x - ja y -suuntaiset komponentit
F_μ	Kitkavoima
G_x, G_y	Painovoiman x - ja y -suuntaiset komponentit
M	Momentti
N	Alustan palloon aiheuttama tukivoima
ψ	Pallon kiertokulma

Ratkaistaan yhtälö (3.3) muuttujan F_μ suhteen ja sijoitetaan tämän yhtälöön (3.1). Kuvasta 3.1 nähdään suoraan, että painovoiman x -suuntainen komponentti on

$$G_x = mg \sin \theta, \quad (3.4)$$

3.2 Pallon dynaaminen malli

jossa g on maan putoamiskiihtyvyys ja m on pallon massa. Kulmalla θ on merkitty pallon alla olevan tason kallistuskulmaa. Pallon hitausmomentti I voidaan laskea kaavalla:

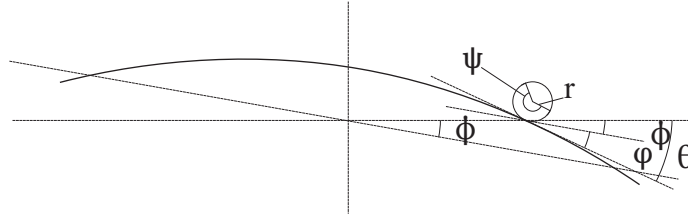
$$I = \frac{2}{5}mr^2, \quad (3.5)$$

jossa r on pallon säde. Lisäksi pallon kulmakiihtyvyyden ja x -akselin suuntaisen kiihtyvyyden välillä on yhteys $\ddot{s}_x(t) = \ddot{\psi}(t)r$. Ottamalla nämä huomioon saadaan pallon kulmakiihtyvyydelle lauseke:

$$\ddot{\psi}(t) = \frac{5g \sin \theta}{7r}. \quad (3.6)$$

3.2.1 Alustalevyn kulma

Jotta painovoimasta palloon aiheutuva kiihtyvyys voitaisiin määrittää, täytyy tietää, miten lasketaan levyn kulma jossakin tietyssä pisteessä. Määritetään seuraavaksi alustalevyn kulma, kun pallon paikka tiedetään. Kuva 3.2 havainnollistaa tilannetta, kun levyä on kallistettu kulman ϕ verran.



Kuva 3.2. Levyn kulma.

Kuvasta nähdään, että alustalevyä kallistettaessa kulman ϕ verran, summautuu kallistuskulma suoraan kokonaiskulmaan. Tällöin levyn kulma pallon alla voidaan laskea kaavalla

$$\theta(t) = \phi(t) + \varphi(t) = \phi(t) + \frac{r\psi(t)}{R_l}, \quad (3.7)$$

jossa $\varphi(t)$ on levyn kaarevuudesta johtuva kulma jossakin tietyssä levyn pisteessä ja R_l on alustalevyn kaarevuussäde. Yhteys pallon paikan ja levyn kaarevuudesta johtuvan kulman välille on johdettu yhtälössä (3.13).

3.2.2 Pallon tilamalli

Sijoitetaan levyn kulmaa kuvaava yhtälö (3.7) pallon dynaamiseen malliin (3.6), jolloin saadaan yhtälö pallon pyörimiselle kuperalla pinnalla:

$$\ddot{\psi}(t) = \frac{5g \sin(\phi(t) + \frac{r\psi(t)}{R_l})}{7r}. \quad (3.8)$$

Pallon pyörimiselle voidaan muodostaa tilamalli, kun yhtälö (3.8) linearisoidaan. Koko systeemiä kuvaavat yhtälöt voitaisiin myös kerätä yhteen tilamalliin, mutta alustaa kallistelevien moottorien ja pallon paikan säätöpiirit toimivat olennaisesti erisuuruksilla näytteenottotaajuuksilla. Tämän vuoksi on tarpeen muodostaa pallolle ja alustan dynamiikalle eri tilaesitykset.

Pallon dynamiikkaa kuvaava yhtälö on helppo linearisoida. Oletetaan, että pallon ohjaukseen käytettävät kulmat ovat pieniä, jolloin pätee:

$$\sin(\phi(t) + \frac{r\psi(t)}{R_l}) \approx \phi(t) + \frac{r\psi(t)}{R_l}. \quad (3.9)$$

Huomion arvoista on, että linearisoinnin yhteydessä tehty oletus pitää paikkansa yhtä hyvin myös levyn reunoilla. Linearisoidun mallin tarkkuuteen vaikuttaa ainoastaan pallon ohjaukseen käytetyn kulman suuruus, joka on stabiilissa tilanteessa ja hallitussa rata-ajossa yleensä riittävän pieni. Voidaan ajatella, että säädön toimiessa oikein, prosessi pyrkii aina tilaan, jossa sitä voidaan approksimoida hyvin lineaarisella mallilla.

Kun linearisointi on tehty, voidaan muodostaa pallon lineaarinen tilamalli. Valitaan tilamuuttujiksi pallon pyörähdyskulma $\psi(t)$ ja pyörimisnopeus $\dot{\psi}(t)$. Ohjaussuureeksi valitaan levyn kulma $\phi(t)$ ja mittaussuureena mallista saadaan pallon paikka.

$$x(t) = \begin{pmatrix} \psi(t) \\ \dot{\psi}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix}, \quad u(t) = \phi(t), \quad y(t) = \psi(t) = x_1(t). \quad (3.10)$$

Tilamalliksi saadaan:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t), \end{cases} \quad (3.11)$$

jossa

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \frac{5g}{7R_l} & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{5g}{7r} \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \text{ ja } D = 0. \quad (3.12)$$

Tilaesityksessä on käytetty seuraavia merkintöjä:

A	Systeemimatriisi
B	Ohjausmatriisi
C	Lähtömatriisi
D	Suoravaikutusmatriisi
$u(t)$	Ohjaussuure
$x(t)$	Tilavektori
$x_1(t), x_2(t)$	Tilamuuttujat
$y(t)$	Mittausuure

3.2.3 Pallon paikka

Pallon keskipisteen paikan ja pallon kiertokulman välisen yhteyden kuvaava yhtälö lasketaan, jotta kameran ottamasta kuvasta voidaan laskea pallon kiertokulma. Kuvasta 3.3 nähdään, että pallon pyörimiskulman ja levyn kulman välille voidaan kirjoittaa yhtälö:

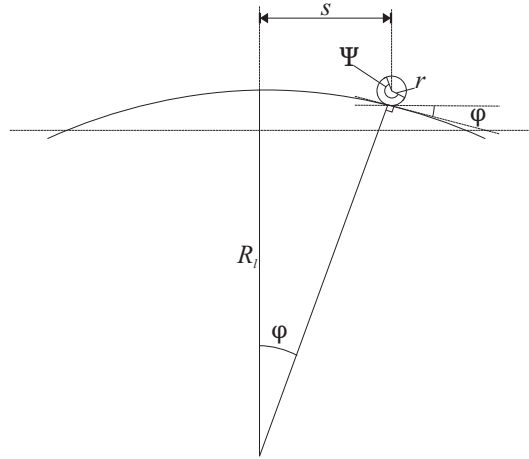
$$r\psi(t) = R_l\varphi(t), \quad (3.13)$$

kun oletetaan, että pallo pyörii alustallaan luistamatta.

Pallon paikka $s(t)$ saadaan nyt yhtälöstä:

$$\begin{aligned} s(t) &= (R_l + r) \sin \varphi(t) \approx (R_l + r) \varphi(t) \\ &= (R_l + r) \frac{r\psi(t)}{R_l} = \left(r + \frac{r^2}{R_l}\right) \psi(t) \approx r\psi(t). \end{aligned} \quad (3.14)$$

Yhtälöä johdettaessa on oletettu, että kulma $\varphi(t)$ on pieni ja $R_l \gg r$.



Kuva 3.3. Pallon paikan määrittäminen.

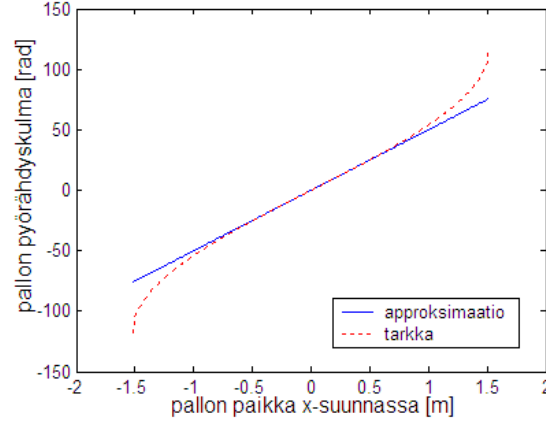
Tarkastellaan vielä tästä approksimaatiosta aiheutunutta virhettä. Pallon tarkka kiertokulma voidaan laskea sen paikan perusteella kun yhtälöön (3.14) sijoitetaan $\varphi(t) = \frac{r\psi}{R_l}$ ja ratkaistaan tämä yhtälö muuttujan ψ suhteen. Tällöin saadaan tarkaksi ratkaisuksi yhtälö

$$\psi = \frac{R_l}{r} \arcsin \frac{s}{R_l + r}. \quad (3.15)$$

Verrataan vielä tarkkaa ratkaisua approksimaatioon ja lasketaan, kuinka suuri virhe approksimaatiolla tehdään, kun tarkasteltava alue vastaa pallon tasapainotuslaitteessa käytettävän levyn kaarevuussädettä. Tarkasteltavan välin suuruus on maksimissaan $s \in [-1.52\text{m } 1.52\text{m}]$, joka vastaa tilannetta, jossa pieni pallo on pyörähtänyt isomman pallon ”päiväntasaajan” kohdalle. Kuvas-
ta 3.4 nähdään, että virhe muodostuu merkittäväksi vasta, kun lähestytään arvoa 1.5m.

Todellisuudessa tarkasteltava alue, jolla approksimaation halutaan olevan tarkka on $s \in [-0.35\text{m } 0.35\text{m}]$, koska laitteessa olevan levyn halkaisija on

0.7m. On helppoa laskea, että approksimaatiolla tehty virhe on tällä välillä koko ajan pienempi kuin 1.4%, joka on riittävä tarkkuus.



Kuva 3.4. Pallon paikan approksimaatio ja tarkka ratkaisu

3.3 Lineaarimoottorien dynaaminen yhtälö

Moottorien dynaamisen yhtälön muodostaminen on suoraviivaista, koska niiden mekaaninen rakenne on yksinkertainen. Lineaarimoottoreiden karoja voidaan ohjata voimaohjeella, joka annetaan jänniteviestinä servovahvistimelle. Takaisinkytkentänä saadaan suoraan paikkatieto, jolloin moottoreita voidaan mallintaa tavallisella kaksoisintegraattorilla. Kitkan vaikutus moottoreissa on häviävän pieni ja se voitaisiin kompensoida erikseen servovahvistimen asetuksien avulla. Moottorien mallissa tulee karojen massan lisäksi ottaa huomioon alustalevyn redusoitu massa. Redusoitu massa voidaan laskea, kun tiedetään moottorien kiinnityskohta ja alustalevyn hitausmomentti. Lineaarimoottoreille voidaan kirjoittaa dynamiikkayhtälöt suoraan Newtonin mekaniikan pohjalta:

$$F_{lm}(t) = (m_{lm} + m_{red})\ddot{s}_{lm}(t), \quad (3.16)$$

jossa F_{lm} on lineaarimoottorin synnyttämä voima, m_{lm} on lineaarimoottorin karan massa ja m_{red} on alustalevyn redusoitu massa. Lineaarimoottorin karan paikkaa on merkitty kirjaimella $s_{lm}(t)$. Yhtälö (3.16) on lineaarinen ja siitä

voidaan muodostaa suoraan tilaesitys. Valitaan tilamuuttujiksi karan paikka ja nopeus. Tilamalliksi saadaan:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_{lm}x(t) + B_{lm}u(t) \\ y(t) = C_{lm}x(t) + D_{lm}u(t), \end{cases} \quad (3.17)$$

jossa

$$A_{lm} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B_{lm} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_{lm}+m_{red}} \end{pmatrix}, \quad C_{lm} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \text{ ja } D_{lm} = 0 \quad (3.18)$$

3.3.1 Levyn kulman ja lineaarimoottorien paikan välinen yhteys

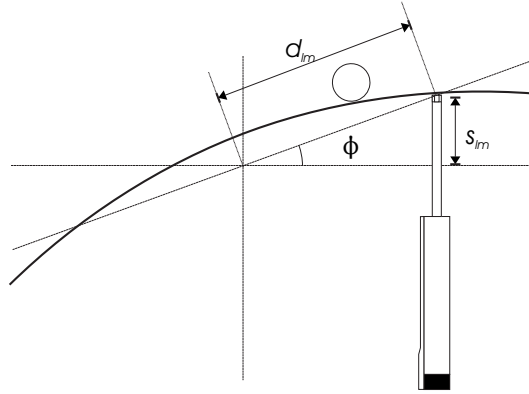
Säädin laskee halutun ohjaussuureen radiaaneissa. Tätä tietoa ei voida suoraan syöttää lineaarimoottorien paikkaohjeksi, vaan se täytyy muuttaa enkooderilukemaksi. Jotta tiedetään, mihin paikkaan moottorit täytyy ajaa, on laskettava yhteys levyn kulman ja moottorien paikan välille. Kuva 3.5 havainnollistaa tilannetta ja siitä nähdään suoraan, että

$$\sin(\phi(t)) = \frac{s_{lm}(t)}{d_{lm}}. \quad (3.19)$$

Lineaarimoottorin karan kiinnityskohdan etäisyyttä levyn keskipisteestä on merkitty kirjaimella d_{lm} . Kun tästä yhtälöstä ratkaistaan $s_{lm}(t)$, saadaan paikka, johon lineaarimoottorit halutaan ajaa:

$$s_{lm}(t) = d_{lm} \sin(\phi(t)). \quad (3.20)$$

Mikäli tämä paikka halutaan muuttaa lineaariservojen enkooderilukemaksi, se täytyy jakaa askeleen pituudella.



Kuva 3.5. Levyn kulman ja lineaarimoottorin paikan yhteys.

3.3.2 Alustalevyn hitausmomentti

Alustalevyn hitausmomentti sen akselin suhteen, jonka ympäri servomoottori sitä kääntää, voidaan laskea, kun levyn oletetaan olevan tasomainen pyöreä levy, jolla on sama halkaisija ja paksuus kuin alustana toimivalla pallokalotilla. Oletus voidaan tehdä hyvällä tarkkuudella, koska pallokalotin kaarevuussäde on suuri (1500mm) suhteessa sen säteeseen (350mm). Tällaisen levyn hitausmomentti voidaan laskea kaavalla [4]

$$I_l = \frac{d_l \rho \pi}{4} R_d^4, \quad (3.21)$$

jossa d_l on levyn paksuus, ρ on materiaalin tiheys ja R_d on alustalevyn säde. Lineaarimoottorien dynaamisia yhtälöitä varten täytyy laskea levyn hitausmomentista aiheutuva redusoitu massa. Moottorit on kiinnitetty demonstraatiolaitteessa $d_{lm} = 225\text{mm}$ päähän levyn keskipisteestä, jolloin redusoitu massa voidaan laskea kaavalla: [4]

$$m_{red} = \frac{I_l}{d_{lm}^2}. \quad (3.22)$$

Tarkasteltavan laitteen tapauksessa $R_d = 350\text{mm}$, $d_l = 3\text{mm}$ ja levy on valmistettu alumiinista, eli $\rho = 2.70 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Tällöin levyn hitausmomentiksi saadaan 0.095kgm^2 ja redusoiduksi massaksi 1.89kg .

3.3.3 Toimilaitteiden mitoitus

Kun tiedetään laitteen rakenne sekä alustalevyn hitausmomentti, voidaan arvioida moottoreilta vaadittavan voiman suuruutta. Oletetaan, että levyn reunalle halutaan antaa maksimissaan $3g$:n kiihtyvyys. Tämä on riittävä oletus, sillä palloon vaikuttaa alaspäin maksimissaan vain maan vetovoimakiihtyvyys, joka on yhden g :n suuruinen ja jota ei periaatteessa haluta ylittää. Jos levyä yritetään kiihdyttää tätä suuremmalla kiihtyvyydellä suuriin nopeuksiin, on vaarana, että pallo putoaa levyn reunan yli.

Levyn kääntelemiseen tarvittava voima voidaan laskea käyttämällä moottorien dynamiikalle laskettua yhtälöä (3.16). Kun tähän yhtälöön sijoitetaan alustalevyn redusoitu massa, saadaan moottoreilta tarvittavaksi voimaksi $F = (3.90\text{kg} + 1.89\text{kg}) \cdot 3 \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 170\text{N}$. Tämän arvion perusteella voidaan päätellä, että moottoreilta tarvittava voima ei ole kovin suuri ja lineaarimoottorien suorituskyky riittää tähän sovellukseen.

3.4 Mallin epäideaalisuudet

Dynaamista mallia muodostettaessa on tarkasteltu ainoastaan levyn kaltevuuden aiheuttamaa vaikutusta palloon. Tarkastelun ulkopuolelle on jätetty muut mahdollisesti palloon vaikuttavat voimat. Tämä lähestymistapa on perusteltu, koska se johtaa yksinkertaiseen malliin ja sen voidaan osoittaa toimivan riittävän hyvin.

Mikäli muita pallon liikkeeseen vaikuttavia tekijöitä haluttaisiin tarkastella, voitaisiin esimerkiksi tarkastella levyn kulmanopeudesta aiheutuvaa keskipakovoimaa: jos alustaa pyöritetään jollakin vakiokulmanopeudella, täytyisi palloon kohdistaa voima, jotta se pysyisi koko ajan samalla etäisyydellä levyn keskipisteestä. Mikäli mitään ulkopuolista voimaa ei ole, saa pallo pyöritettävään tasoon nähden kiihtyvyyden, joka pyrkii siirtämään palloa pois

päin keskipisteestä. Tämä keskipakovoima saattaisi muodostua merkittävän suureksi, jos pallo olisi levyn reunalla kulmanopeuden kasvaessa suureksi.

Toinen huomion arvoinen epäideaalisuus saattaisi olla levyn kulmakiikhtyvyydestä palloon aiheutuva voima, joka pyrkii siirtämään sitä keskustasta pois päin. Tämän voiman kasvaminen merkittävän suureksi edellyttäisi kuitenkin levyttä huomattavia kulmakiikhtyvyyksiä.

Tarkemmassa pallon mallissa olisi myös syytä ottaa huomioon ristikkäisvaiikutukset pallon kahden eri liikesuunnan välillä. Erityisesti tällä ilmiöllä saattaisi olla merkitystä pallon nopeuden kasvaessa ja käytettäessä suurempia ohjauskulmia.

Luku 4

Säätösuunnittelu

Demonstraatiolaitteessa säädettävä prosessi on jatkuva. Prosessia ohjataan tietokoneella, jolloin säädin on diskreettiaikainen. Nykyään suurin osa prosessien ohjauksessa käytetyistä säätimistä on toteutettu tietokoneiden tai mikrokontrollerien avulla, sillä ne ovat edullisia ja erilaisten säätöalgoritmien toteuttaminen onnistuu niiden avulla ohjelmallisesti. Säättöohjelmissa myös erilaisten epälineaarisuuksien ja viiveiden huomioiminen on helpompaa.

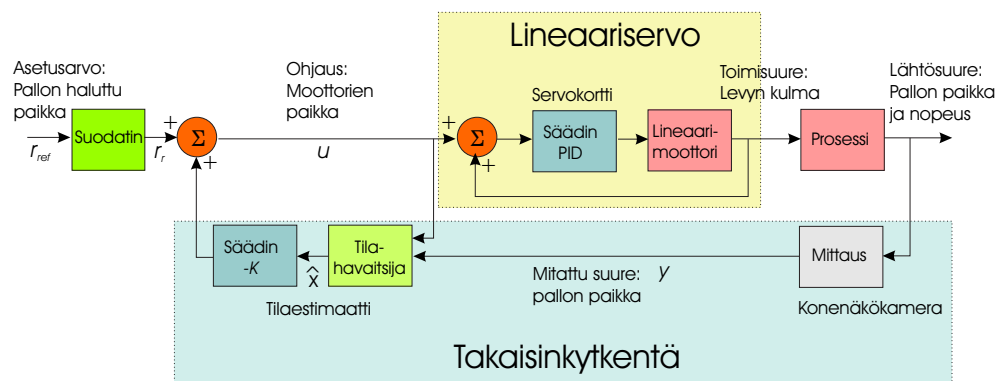
Lähtökohtana säätösuunnittelulle on kaksi vaihtoehtoa. Ensimmäisessä tapauksessa prosessille voitaisiin tehdä säätösuunnittelu kokonaan jatkuvataimaisen tarkastelun pohjalta ja laskea säädin, joka täyttää asetetut vaatimukset. Tätä säädintä voitaisiin approksimoida diskreetillä vastineella ja tarkastella, täyttääkö myös diskreetti säädin vaatimukset.

Toinen lähestymistapa on etsiä jatkuvalla prosessille sen diskreettiaikainen vastine ja suorittaa säätösuunnittelu diskreetin teorian pohjalta. Tällöin on syytä muistaa, että järjestelmää tarkastellaan vain näytteenottohetkillä ja jatkuvan järjestelmän käyttäytymisestä näytteenottohetkien välillä ei saada tietoa. Tämän vuoksi suunnitellun säätimen käyttäytymistä tulee verrata jatkuvaan prosessiin, ettei näytteenottohetkien välillä tapahdu epätoivottavaa käyttäytymistä.

Ensimmäinen vaihtoehto tulee käytännössä kyseeseen, kun näytteenottotaajuudet ovat suuria suhteessa suljetun järjestelmän kaistanleveyteen. Tässä sovelluksessa suurimman käytettävissä olevan näytteenottotaajuuden määrittelee kameran kyky ottaa uusia kuvia. Kameran kuvaustaajuutta ei voida kasvattaa kovinkaan suureksi ja jatkuvan säätimen diskreetillä approksimaatiolla ei välttämättä saavutettaisi parasta mahdollista tulosta. Säättösuunnittelun lähtökohtana käytetäänkin toisessa vaihtoehdossa esitettyä tapaa ja optimaalinen säätäjä lasketaan diskreetin teorian pohjalta.

4.1 Säättöjärjestelmän rakenne

Säättöjärjestelmä koostuu konenäkökamerasta, Kalman-suodattimesta, tilasäätäjästä, prosessista ja toimilaitteista sekä niiden säätöpiiristä. Säättö perustuu konenäkökameralta saatavaan mittaukseen, jota käytetään takaisinkytkentänä. Mittausta ei kuitenkaan käytetä suoraan säädön laskemiseen, vaan sillä päivitetään Kalman-suodattimen tilaestimaattia. Kuva 4.1 havainnollistaa säättöjärjestelmän rakennetta.



Kuva 4.1. Säättöjärjestelmän lohkokaavio.

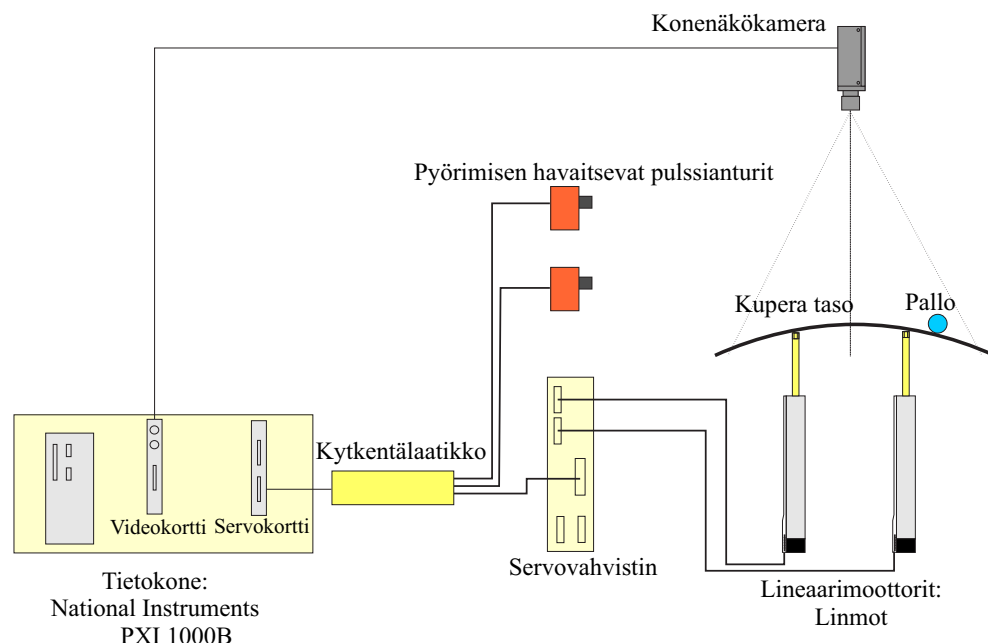
Kuvasta nähdään, että tilaestimaatin laskemiseksi tarvitaan mittaus pallon paikasta, sekä tieto käytetyn ohjaussuureen suuruudesta. Kun pallon tila on estimoitu, tilaestimaatin perusteella lasketaan uusi ohjaussuure. Ohjaussuureen laskemiseksi käytetään LQ-säätäjää. Yhdessä konenäöltä saatavan mit-

4.1 Säättöjärjestelmän rakenne

tauksen kanssa Kalman-suodatin ja tilasääätäjä muodostavat takaisinkytkennän.

Todellista järjestelmää mallinnettaessa täytyy servomoottorien vaikutus ottaa huomioon. Tilasääätimen laskema ohjaussuure ei vaikuta suoraan pallon ohjaukseen, vaan sen perusteella ajetaan lineaariservot haluttuun paikkaan. Lineaariservojen aikavakiot ovat pieniä, mutta silti niiden vaikutus prosessin dynamiikkaan havaitaan simulointi- ja säätötuloksista. Kuvassa 4.1 lineaariservojen säätösilmukkaa on havainnollistettu keltaisella värillä.

Säättöjärjestelmän fyysistä rakennetta havainnollistaa järjestelmän lohkokaavio 4.2, josta näkyvät eri laitteiden väliset kytkennät. Tästä lohkokaaviosta on havaittavissa samoja asioita kuin kuvasta 4.1, mutta niitä on tarkasteltu eri näkökulmasta.



Kuva 4.2. Laitteiden välisiä kytkentöjä kuvaava lohkokaavio.

Lohkokaaviosta näkyy selkeästi, että tietokoneelta saatu paikkaohje vaikuttaa levyn kulmaan lineaarimoottorien välityksellä. Rotaatioenkooderien avulla käyttäjä voi halutessaan ohjata laitetta.

4.2 Prosessin ominaisuudet

Säädettävän järjestelmän käyttäytymiseen on hyvä tutustua, ennen kuin varsinaisen säätöratkaisun suunnitteleminen aloitetaan. Vaikka prosessin malli on yksinkertainen, asettaa sen epästabiilisuus tiettyjä rajoituksia säätäjälle.

Edellisessä kappaleessa johdettiin tilamalli pallon käyttäytymiselle. Tilamallin määrittivät kohdassa (3.12) esitetyt matriisit. Järjestelmän dynaamisten ominaisuuksien kannalta on mielenkiintoista tarkastella, missä paikassa sen navat sijaitsevat. Napojen paikat saadaan selville matriisin A ominaisarvoista. Kun ominaisarvot lasketaan, saadaan järjestelmän navoiksi $\sqrt{\frac{5g}{7R_l}}$ ja $-\sqrt{\frac{5g}{7R_l}}$. Havaitaan, että järjestelmällä on napa oikeassa puolitasossa. Mikäli ei olisi itsestään selvää, että prosessi on epästabiili, niin se voitaisiin todeta tämän perusteella.

Epästabiili napa asettaa säätimen kaistanleveydelle minimirajan. Intuitiivisesti tuntuu selkeältä, että säätimen on kyettävä reagoimaan riittävän nopeasti järjestelmän tilan muutoksiin, jotta se kykenee hallitsemaan epästabiilisuuden. Viitteessä [5] on johdettu nyrkkisääntö, jonka mukaan tarvittavaa säätimen kaistanleveyttä voidaan arvioida. Tämän säännön mukaan kaistanleveyden tulisi olla huomattavasti suurempi kuin epästabiilin navan. Jos järjestelmällä on reaalinen napa p_1 , tulee säätimen kaistanleveyden olla vähintään $\omega_0 > p_1$. Annetun nyrkkisäännön perusteella säätimen kaistanleveydeksi tulisi valita vähintään $\omega_0 > 2p_1$.

Demonstraatiolaitteen tapauksessa prosessilla oli epästabiili napa pisteessä $\sqrt{\frac{5g}{7R_l}}$. Tästä voidaan päätellä, että säätimeltä vaaditaan vähintään 2.2Hz kaistanleveys. Sääötulos tällä valinnalla ei ole kuitenkaan hyvä ja käytännössä halutaan valita arvo joka ylittää reilusti vaaditun minimitaajuuden. Käytännössä kaistanleveydeksi halutaan mieluiten valita arvo, joka ylittää reilusti annetun nyrkkisäännön vaatimuksen. Viitteessä [5] on esitetty, että riittävä valinta voisi olla esimerkiksi $\omega_0 > 2\pi p_1$. Tällöin säätimen kaistanleveydeksi saadaan 13.6Hz ja tasapainotuksen pitäisi onnistua riittävän hyvin.

Säätöjärjestelmä on suunniteltu siten, että se kykenee tekemään säätöä 30Hz:n taajuudella. Käytännössä suurinta mahdollista näytteenottotaajuutta rajoittavana tekijänä on kameran kyky ottaa uusia kuvia. Edellisen tarkastelun perusteella 30Hz:n näytteenottotaajuutta voidaan kuitenkin pitää varsin riittävänä ja nopeamman kameran hankkimiselle ei ole tarvetta.

Epästabiilin navan yhtälöstä nähdään, että alustalevyn kaarevuussäteen pienentäminen kasvattaa tarvittavaa säädön kaistanleveyttä ja tämän vuoksi kaarevuussäteen valinnalla voidaan oleellisesti vaikuttaa pelin vaikeuteen. Arvioitaessa tasapainotustehtävän vaikeutta ihmiselle, voidaan 0.1 sekunnin reaktioaikaa pitää suuntaa antavana arviona. Tällöin ihmisen ohjauksessa säätäjän kaistanleveys on noin 10Hz ja voidaan päätellä, että tehtävän pitäisi onnistua pienellä harjoittelulla, mutta se ei todennäköisesti ole aivan helppo.

4.3 Tilahavaitsija

Pallon tila voidaan kuvata kahdella muuttujalla eli paikalla ja nopeudella. Mikäli halutaan käyttää tilasäätäjää pallon ohjaamiseen, täytyy pallon tila saada jollakin tavalla selville. Ongelmana on, että kameran kuvasta ei saada suoraan pallon nopeutta, vaan siitä saadaan mitattua ainoastaan pallon paikka joillakin tietyillä ajanhetkillä.

Tavoitteena on estimoida pallon tila kameran saatavien paikkamittausten sekä ohjaussuureen pohjalta. Tähän tarkoitukseen käytetään yleensä tilatarkkailijaa, jonka ideana on ohjaussuureen ja saatavilla olevien mittauksien perusteella estimoida järjestelmän tila mahdollisimman tarkasti. Tämä idea voidaan esittää seuraavalla tavalla, kun tarkastellaan järjestelmää, joka on muotoa: [5]

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + v_1(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + v_2(t).\end{aligned}\tag{4.1}$$

Yhtälössä (4.1) $v_1(t)$ on nollakeskiarvoista korreloimatonta prosessikohinaa ja $v_2(t)$ nollakeskiarvoista korreloimatonta mittauskohinaa, joiden kovarianssit ovat R_1 ja R_2 . Aloitetaan simuloimalla järjestelmää, kun ohjaussuure tunnetaan.

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) \quad (4.2)$$

Yhtälöissä merkinnällä $\hat{x}$ tarkoitetaan tilaestimaattia. Estimaatin hyvyyttä voidaan tämän jälkeen kuvata kun lasketaan estimointivirhe $y(t) - C\hat{x}(t) - Du(t)$. Syöttämällä tämä $\hat{x}$:n laatua kuvaava suure takaisin simulaatioon, saadaan tarkkailija

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - C\hat{x}(t) - Du(t)). \quad (4.3)$$

Tässä yhtälössä L on estimaatin hyvyyttä painottava matriisi. Koska tavoitteena on, että $\hat{x}(t)$:n pitäisi olla lähellä todellista tilaa, muodostetaan estimointivirhe

$$\tilde{x}(t) = x(t) - \hat{x}(t). \quad (4.4)$$

Nyt yhtälöistä (4.4) ja (4.1) saadaan [5]

$$\dot{\tilde{x}}(t) = (A - LC)\tilde{x}(t) + v_1(t) - Lv_2(t). \quad (4.5)$$

Tästä yhtälöstä nähdään, että L :n valinta vaikuttaa estimointivirheeseen kahdella eri tavalla. Ensinnäkin L :n valinta määrittelee matriisin $A - LC$, joka kuvaa, miten nopeasti vanhojen virheiden vaikutus katoaa. Matriisin $A - LC$ ominaisarvojen tulisi olla niin kaukana stabiilisuusalueella kuin mahdollista. Toisaalta L :n valinta vaikuttaa virheeseen kertomalla mittausvirheen $v_2(t)$ kertoimella L . Käytännössä L :n valinta on kompromissi tilan rekonstruktio-nopeuden ja mittausvirheiden vaikutuksen välillä.

4.3.1 Kalman-suodatin

Prosessille voidaan suunnitella optimaalinen tilahavaitsija, jos prosessin ja sen häiriöiden ominaisuudet tunnetaan. *Kalman-suodatin* on optimaalinen lineaarinen suodatin, joka antaa parhaan mahdollisen tilaestimaatin, kun kohinan ominaisuudet tunnetaan.

Mittauksen suodatus on tärkeää säädön kannalta, sillä tietokone ei välttämättä aina tunnista kameran kuvasta palloa ja tällöin jouduttaisiin vaikeuksiin säädön laskemisessa. Kalman-suodattimen avulla pallon tilaa voidaan estimoida myös muutamia näytteenottovälejä eteenpäin ja tehdä säätöä näiden estimaattien pohjalta, mikäli mittausdataa ei ole saatavilla.

Säätöohjelmassa sovellettavan Kalman-suodattimen laskemista varten täytyy tietää pallon dynaaminen malli diskretoidussa muodossa. Dynaaminen malli johdettiin jo edellisessä kappaleessa ja sitä voidaan suoraan hyödyntää suodattimen laskemiseksi. Tarkastellaan Kalman-suodattimen laskemista diskreetissä tapauksessa, jolloin systeemi on seuraavaa muotoa:

$$\begin{aligned}x(t+1) &= Ax(t) + Bu(t) + v_1(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + v_2(t),\end{aligned}\tag{4.6}$$

Kameralta kestää yhden näytevälin ajan, ennen kuin sen ottama kuva saadaan tietokoneelle käsiteltäväksi. Tämän vuoksi estimaatin laskemisessa voidaan käyttää hyväksi mittausta, joka on yhden näytevälin vanha. Tässä tapauksessa tilaestimaatti voidaan laskea seuraavilla kaavoilla: [9]

$$\hat{x}(t+1|t) = A\hat{x}(t|t) + Bu(t) + L(y(t) - C\hat{x}(t|t) - Du(t))\tag{4.7}$$

$$L = APC^T(CPC^T + R_2)^{-1}.\tag{4.8}$$

Kaavoissa esiintyvä P on Riccatin yhtälön (4.9) stationaarinen ratkaisu:

$$P = APA^T + R_1 - APC^T(CPC^T + R_2)^{-1}CPA^T.\tag{4.9}$$

4.4 Optimisäätö

Kun pallolle on muodostettu dynaaminen malli tilaesitysmuodossa, voidaan prosessille suunnitella optimaalinen säätäjä. Seuraavassa tarkastelussa käsitellään optimisäätäjän laskeminen ensin tapauksessa, jossa säätöongelmaa tarkastellaan äärellisellä aikavälillä ja jossa pallon lopputila on vapaa. Tämän jälkeen aikaväli oletetaan pitkäksi ja säätimen kertoimet ratkaistaan uudelleen.

4.4.1 Optimisäätäjä

Oletetaan pallon käyttäytymistä kuvaavan mallin olevan ajasta riippumaton ja lineaarinen. Edellisessä kappaleessa on johdettu pallolle diskreetti tilamalli, joka on ilman kohinatermejä seuraavaa muotoa:

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t). \quad (4.10)$$

Tälle prosessille halutaan löytää optimisäätäjä, joka minimoi kustannuskriteerin

$$J(t_i) = \frac{1}{2}x(t_0)^T P_{t_0}x(t_0) + \frac{1}{2} \sum_{t=i}^{t_0-1} (x(t)^T Qx(t) + u(t)^T Ru(t)). \quad (4.11)$$

Kustannuskriteeri on määritelty siten, että kustannuksen suuruus riippuu käytetyn ohjauksen neliöstä painokertoimella R . Paikka- ja nopeusvirheiden neliöitä voidaan puolestaan painottaa valitsemalla matriisiin Q sopivat kertoimet ja vastaavasti poikkeamaa lopputilasta voidaan painottaa matriisilla P_{t_0} .

Optimisäätäjää voidaan nyt laskea seuraavien kaavojen avulla, jotka on esitetty viitteissä [6] ja [7].

$$K(t) = (B^T P(t+1)B + R)^{-1} B^T P(t+1)A, \quad t < t_0 \quad (4.12)$$

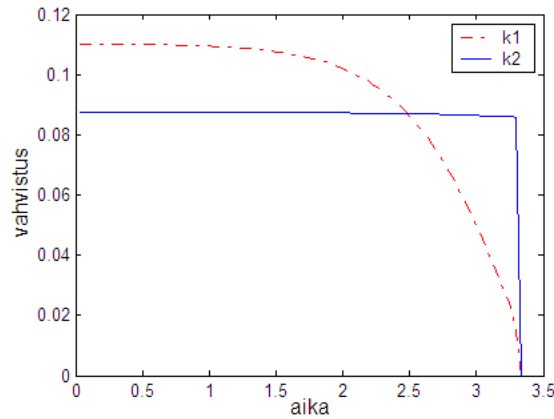
$$P(t) = A^T P(t+1)(A - BK(t)) + Q, \quad t < t_0, \quad P_{t_0} \text{ annettu} \quad (4.13)$$

$$u(t) = -K(t)x(t), \quad t < t_0 \quad (4.14)$$

$$J(t_i)^* = \frac{1}{2} x(t_i)^T P(t_i) x(t_i) \quad (4.15)$$

Yhtälöistä nähdään, että optimisäätö on ajasta riippuva tilatakaisinkytkentä, jossa takaisinkytkennän vahvistuksen määrittelee $K(t)$. Nämä kertoimet eivät riipu alkutilasta eivätkä liikeradasta ja ne voidaan laskea ja tallentaa säätöä tekevän tietokoneen muistiin etukäteen. Tämä tarkoittaa, että vapaan lopputilan LQ-säätimen optimiohjaus saadaan suljetun silmukan säätölakina.

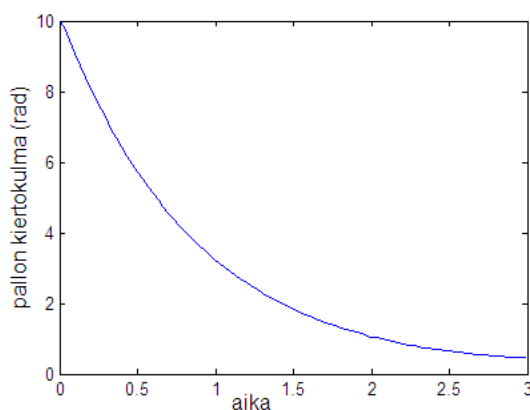
Optimisäädön määrittämiseksi täytyy laskea $P(t)$ ja $K(t)$. Kertoimet laskeaan aloittamalla loppuhetkestä ja iteroimalla siitä ajassa taaksepäin. Kuvassa 4.3 on esitetty kertoimien muuttuminen ajan funktiona.



Kuva 4.3. Takaisinkytkennän kertoimet ajan funktiona.

Kuvasta havaitaan, että kertoimet muuttuvat ajan loppuhetkillä voimakkaammin, mutta asettuvat tiettyyn arvoon ajan alkuhetkeä lähestyttäessä. Asettuminen tapahtuu nopeammin, mikäli lopputilan virheen painokertoimeksi valitaan riittävän suuri arvo.

Seuraavaksi simuloidaan järjestelmän käyttäytymistä lasketuilla kertoimien arvoilla. Muodostetaan tätä varten Simulink-malli, jonka avulla voidaan etsiä sopivia painokertoimia säätimen virittämiseksi. Palloa simuloitaessa on tarkasteltu tilannetta, jossa pallo ohjataan alkupaikasta $x(0) = 10$ keskelle. Kuten kuvasta 4.4 nähdään, säätäjä toimii hyvin ja pallo saadaan tasapainotettua lähelle keskipistettä kohtuullisen nopeasti.



Kuva 4.4. Pallon paikan kuvaaja

4.4.2 Suboptimaalinen säätäjä

Edellisessä kappaleessa esitetyistä yhtälöistä nähdään, että optimisäättäjä on tilatakaisinkytkentä, jossa vahvistusten kertoimet ovat ajasta riippuvia, vaikka järjestelmä on oletettu ajan suhteen muuttumattomaksi. Sovelluksen luonteesta johtuen muuttuvien kertoimien käyttäminen takaisinkytkennässä on hankalaa, ja sen vuoksi on mielenkiintoista tutkia, kuinka hyvin säädin toimisi vakiovahvistuksilla. Tämä tarkoittaisi sitä, että valittaisiin säädin, joka ei itse asiassa minimoisi optimisäättimen yhteydessä esitettyä kustannuskriteeriä, vaan olisi muotoa

$$u(t) = -Kx(t), \quad (4.16)$$

jossa K on ajasta riippumaton tilatakaisinkytkennän vahvistus.

Edellisessä kappaleessa huomattiin jo, että takaisinkytkennän vahvistukset lähenevät jotain tiettyä arvoa, kun aika lähestyy arvoa nolla. Tästä voim-

me päätellä, että sopivat ehdokkaat vakiovahvistuksien kertoimiksi voitaisiin saada optimisäädön kertoimista $K(t)$, kun loppuaika t_0 lähestyy ääretöntä tai vastaavasti $t \rightarrow -\infty$.

Kun yhtälö (4.12) sijoitetaan yhtälöön (4.13), saadaan Riccatin yhtälölle lauseke

$$P(t) = A^T[P(t+1) - P(t+1)B(B^T P(t+1)B + R)^{-1}B^T P(t+1)]A + Q. \quad (4.17)$$

Tämä yhtälö ratkaistaan ajassa takaisinpäin alkaen hetkestä t_0 . Kun $t \rightarrow -\infty$, voi $P(t)$ konvergoitua jatkuvan tilan matriisiksi P tai konvergoituminen voi epäonnistua. Mikäli $P(t)$ konvergoituu, on selvää, että suurilla t :n negatiivisilla arvoilla $P = P(t) = P(t+1)$. Tällöin yhtälöstä (4.17) tulee algebrallinen Riccatin yhtälö

$$P = A^T[P - PB(B^T PB + R)^{-1}B^T P]A + Q, \quad (4.18)$$

joka ei ole ajasta riippuva. Tämän yhtälön ratkaisuna saadaan haettu matriisi P .

Jos yhtälön (4.18) ratkaisu on olemassa saadaan tällöin vastaava jatkuvan tilan tilatakaisinkytkennän vahvistus yhtälöstä

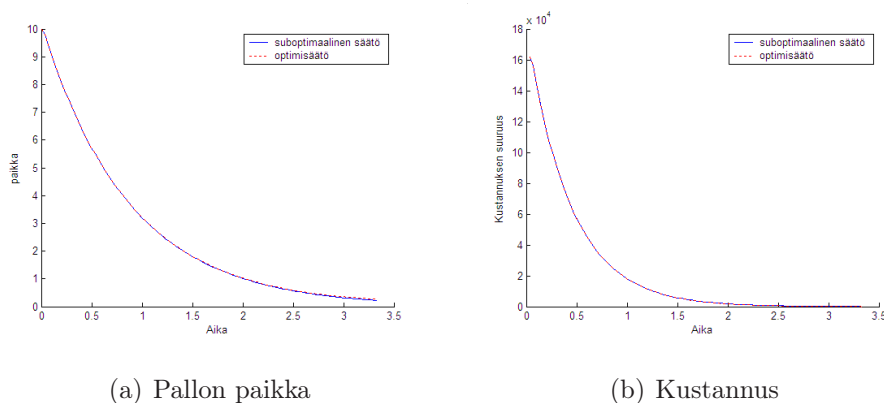
$$K = (B^T PB + R)^{-1}B^T PA. \quad (4.19)$$

Tämä johtaa vakiovahvistukseen ja sopivissa olosuhteissa voi olla hyväksyttävää käyttää ajasta riippumatonta takaisinkytkentää (4.16) optimisäädön sijasta.

Ajasta riippumattomilla säätimen parametreilla olisi demonstraatiolaitteen sovelluksessa kiistattomat edut, sillä ohjelmointityö selkeytyisi huomattavasti. Toisaalta kustannusfunktion suuruudella ei ole suurta merkitystä, vaan päätavoite on löytää säätö, jolla pallon tasapainotus onnistuu hallitusti ja varmasti. Tutkitaan tämän vuoksi, onko suboptimaalisen säätäjän käyttämisellä suuria eroja verrattuna optimaaliseen säätäjään.

Kun jatkuvan tilan kertoimet ratkaistaan käyttämällä samoja painokertoimia kuin optimaalisen säätäjän tapauksessa, saadaan tulokseksi kertoimet $K = [0.1103 \quad 0.0874]$, joita voidaan verrata kuvan 4.3 arvoihin. Tuloksesta huomataan, että nämä arvot vastaavat hyvin optimisäätäjän kertoimien arvoja, kun t on pieni. Matlab-ohjelmassa on helppoa käyttää suoraan komentoa `dlqr` säätimen laskemiseksi.

Verrataan tuloksia optimisäätäjän ja suboptimaalisen säädön välillä simuloimalla järjestelmää. Simuloinnin tuloksena saadaan kuvaajat 4.5, joista havaitaan, että säätimet käyttäytyvät hyvin samalla tavalla ja ainoastaan kuvassa 4.5(a) pallon loppupaikassa on havaittavissa pientä eroavaisuutta. Kuvassa 4.5(b) kuvaajat asettuvat niin päällekkäin, että niitä on vaikeaa erottaa toisistaan, mutta lähemmässä tarkastelussa on mahdollista huomata, että optimisäätäjän kustannus on pienempi kuin suboptimaalisen säätäjän.



Kuva 4.5. Suboptimaalisen säätäjän antamat tulokset verrattuna optimaaliseen säätäjään.

Tästä voidaan havaita, että pallon tasapainotustehtävässä aikaväli on niin pitkä, että merkittäviä eroja ei pääse syntymään optimaalisen ja suboptimaalisen säätäjän välillä. Pallon paikan säätämiseen voidaan käyttää yhtä hyvin suboptimaalista säätäjää, jonka toteuttaminen on huomattavasti helpompaa.

4.4.3 Servo-ongelma

LQ-säätäjän tapauksessa ei suljetun järjestelmän staattinen vahvistus ole välttämättä halutun suuruinen. Tällä on merkitystä, jos halutaan paikoittaa pallo muuhun kohtaan kuin levyn keskipisteeseen. Demonstraatiolaitteen tapauksessa halutaan, että pallo seuraa askelmaisesti muuttuvaa referenssiarvoa ja pallo voidaan paikoittaa mahdollisimman tarkasti mihin tahansa levyn pisteeseen. Tällöin säätäjälle täytyy valita seuraava rakenne, jonka avulla referenssisignaali saadaan skaalattua sopivan suuruiseksi.

$$u(t) = -Kx(t) + K_r r_{ref}(t), \quad (4.20)$$

jossa $r_{ref}(t)$ on referenssisignaali. Kerroin K lasketaan samalla tavalla kuin yhtälössä (4.19) ja K_r lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$K_r = ((BL - A)^{-1}B)^\dagger. \quad (4.21)$$

Yhtälössä merkillä $\dagger$ tarkoitetaan pseudoinverssiä. Tällä K_r :n valinnalla staattisen suljetun järjestelmän vahvistukseksi saadaan yksikkömatriisi. [5]

4.5 Radanseuranta

Optimisäätäjää laskettaessa on keskitytty ainoastaan tilanteeseen, jossa prosessi halutaan viedä alkutilasta lopputilaan minimikustannuksella. Projektin yhtenä tavoitteena oli kuitenkin, että palloa pystytään ohjaamaan alustan päällä tiettyjä ratakäyriä pitkin. Mikäli palloa yritetään ohjata pelkästään säätimen referenssipistettä muuttamalla, huomataan pian, että pallo ei pysy ohjearvon muutosten perässä ja liikkeiden amplitudi pienenee. Tämän vuoksi osoittautuu tarpeelliseksi tarkastella radanseurantaan liittyvää ohjausongelmaa.

Tarkoituksena on esittää säätömalli, jonka avulla pallo saadaan kulkemaan haluttua rataa pitkin käyttämällä suljetun silmukan säätölakia. Prosessi ole-

tetaan edelleen ajasta riippumattomaksi sekä lineaariseksi, jolloin se on yhtälössä (4.10) esitettyä muotoa. Tälle prosessille halutaan löytää diskreetti LQ-säätäjä, joka minimoi kustannuskriteerin

$$\begin{aligned} J(t_i) &= \frac{1}{2}(y(t_0) - r(t_0))^T P_{t_0}(y(t_0) - r(t_0)) \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{t=1}^{t_0-1} [(y(t) - r(t))^T Q x(y(t) - r(t)) + u(t)^T R u(t)] \quad (4.22) \end{aligned}$$

Tässä tapauksessa kustannuskriteeri on määritelty siten, että siinä otetaan huomioon tila, johon järjestelmä halutaan kullakin hetkellä ohjata. Kustannuksen suuruus riippuu käytetystä ohjauksesta painokertoimella R , poikkeamasta tavoitetilasta kertoimella Q ja lopputilan virheestä kertoimella P_{t_0} .

Viitteessä [6] on esitetty tarvittavat kaavat diskreetille LQ-radanseuraajalle, kun on oletettu, että $P_{t_0} \geq 0$, $Q \geq 0$ ja $R > 0$ sekä kaikki ovat symmetrisiä.

$$\begin{aligned} K(t) &= (B^T P(t+1)B + R)^{-1} B^T P(t+1)A, \\ P(t_0) &= C^T P_{t_0} C \quad (4.23) \end{aligned}$$

$$P(t) = A^T P(t+1)(A - BK(t)) + C^T Q C, \quad t < t_0 \quad (4.24)$$

$$\begin{aligned} v(t) &= (A - BK(t))^T v(t+1) + C^T Q r(t), \\ v(t_0) &= C^T P_{t_0} r(t_0) \quad (4.25) \end{aligned}$$

$$K_v(t) = (B^T P(t+1)B + R)^{-1} B^T \quad (4.26)$$

$$u(t) = -K(t)x(t) + K_v(t)v(t+1) \quad (4.27)$$

Kaavoista nähdään, että optimaalinen radanseuraaja koostuu affiinista tilatakaisinkytkennästä, eli se on summa kahdesta termistä, joista ensimmäinen on suoraan verrannollinen järjestelmän tilaan, ja toinen termi voidaan johtaa annetusta ratakäyrästä $r(t)$. Yhtälöissä $K_v(t)$ on radanseurannassa käytettävä ohjaussignaalin vahvistuskerroin ja $v(t)$ on ratakäyrästä riippuva ohjaussignaali.

Nämä yhtälöt johtavat säätimeen, jonka kertoimet riippuvat ajasta ja kuten jo aikaisemmin todettiin, on tällaisten säätimien toteuttaminen tarpeettoman

hankalaa verrattuna saavutettavaan hyötyyn. Tämän vuoksi on perusteltua käyttää suboptimaalista radanseuraaajaa.

4.5.1 Suboptimaalinen radanseuranta

Optimaalisen radanseuraajan yhtälöistä havaitaan, että Kalman-vahvistus lasketaan jälleen samalla tavalla kuin tavallisen optimisäättäjän tapauksessa. Aikaisemmin suboptimaalista säätäjää käsittelevässä kappaleessa huomattiin, että ajasta riippuvien Kalman-vahvistuksen kertoimien korvaaminen sopivilla vakiokertoimilla ei muuta säädön tulosta merkittävästi. Lisäksi aikaisempien laskujen perusteella tiedetään, että yhtälön (4.17) ratkaisuna saatava matriisi $P(t)$ konvergoituu ja Riccatin yhtälölle (4.18) on olemassa ratkaisu. Tämän vuoksi on edelleen perusteltua olettaa, että takaisinkytkennän vahvistuksena voitaisiin käyttää myös tässä tapauksessa ajasta riippumattomaa kerrointa K . Yhtälöstä (4.26) nähdään, että kerroin $K_v(t)$ on ajasta riippuva ainoastaan, jos $P(t+1)$ ei ole vakio. Samalla tavalla kuin takaisinkytkennän vahvistuksen tapauksessa tämän kertoimen laskemiseksi voidaan käyttää algebrallisen Riccatin yhtälön ratkaisua ja saadaan kerroin K_v , joka on vakio. Tällöin optimaalinen radanseuraaja voidaan kuvata seuraavilla yhtälöillä: [6],[7]

$$K = (B^T P B + R)^{-1} B^T P A \quad (4.28)$$

$$K_v = (B^T P B + R)^{-1} B^T \quad (4.29)$$

$$v(t) = (A - BK)^T v(t+1) + C^T Q r(t), \quad v(t_0) = C^T P_{t_0} r(t_0) \quad (4.30)$$

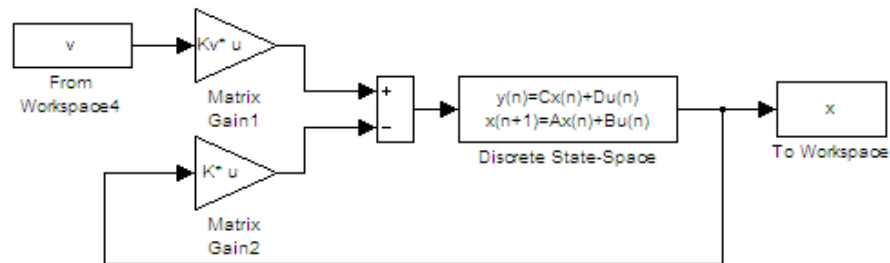
$$u(t) = -Kx(t) + K_v v(t+1), \quad k < t_0, \quad (4.31)$$

joissa P saadaan yhtälön (4.18) ratkaisuna.

Yhtälöistä nähdään, että nyt kertoimet K ja K_v ovat vakioita ja ne voidaan laskea etukäteen. Myös radasta riippuva ohjaussignaali $v(t)$ voidaan laskea ennalta ja se voidaan syöttää säätimelle ajon aikana. Säädintä käytettäessä tarvitsee ainoastaan laskea optimiohjaus yhtälön (4.31) mukaisesti.

Optimiohjausta laskettaessa halutaan vaikuttaa LQ-säätimen molempiin ker-toimiin ja tämän vuoksi täytyy tietää ratakäyrän lisäksi kappaleen haluttu nopeus jokaisessa ratapisteessä. Nopeus voidaan määrittää annetusta rata-käyrästä laskemalla sen aikaderivaatan arvo tarkasteltavissa pisteissä.

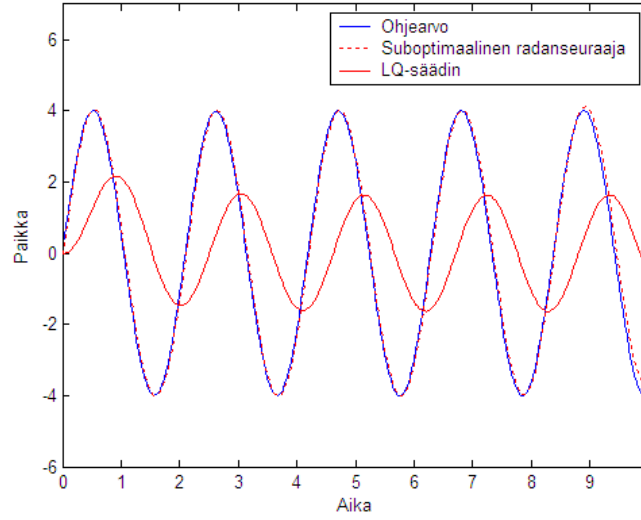
Tarkastellaan suboptimaalisen radanseuraajan toimintaa laskemalla ensin tarvittavat arvot ja simuloimalla sitten eri tapauksia. Muodostetaan radan-seuraajan kokeilua varten kuvassa 4.6 esitetty malli.



Kuva 4.6. Radanseurannan tutkimiseen käytetty simulointimalli.

Tuloksia voidaan havainnollistaa vertaamalla radanseurannan tuloksena saa-tua pallon paikan kuvaajaa ennalta määriteltyn ratakäyrään. Käyrät on esitetty kuvassa 4.7. Samaan kuvaan on vertailun vuoksi tulostettu LQ-säätimellä säädetyn prosessin vaste, kun referenssisignaali on syötetty ra-takäyrä.

Tuloksia vertailemalla huomataan, että radanseuraaja pystyy seuraamaan ennalta määritettyä rataa lähes täydellisesti. LQ-säätäjä ei puolestaan pysty seuraamaan referenssisignaalia: signaalien välille syntyy vaihe-eroa ja ampli-tudi pienenee.



Kuva 4.7. Radanseurannan vaste verrattuna tulokseen, joka saavutetaan LQ-säätäjän referenssipistettä muuttamalla.

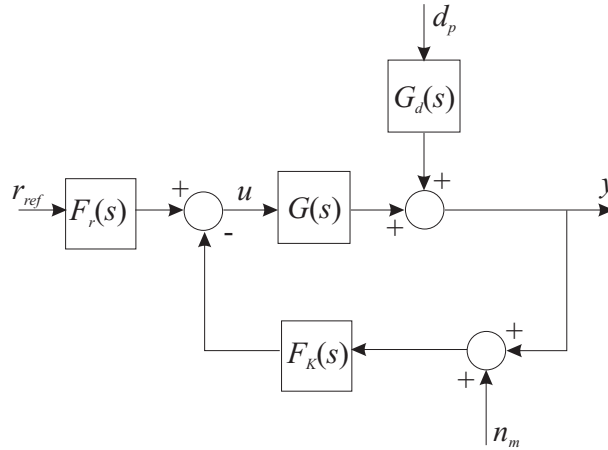
4.6 Tilatakaisinkytkentä rekonstruoiduista tiloista

Käytettäessä tilatakaisinkytkentää, joka on muodostettu rekonstruoiduista tiloista, ei järjestelmän stabiilisuudelle ole takeita. Vaikka kertoimet K ja L olisi valittu edellisissä kappaleissa esitettyjen periaatteiden mukaisesti, voi suljetun järjestelmän robustisuus olla kuinka huono tahansa.

Tämän vuoksi on tarpeen tarkastella tarkemmin suljetun järjestelmän ominaisuuksia, kun käytetään LQG-säätöä. Suljetun järjestelmän ominaisuuksia kuvaavat herkkyyshankintat, joiden avulla järjestelmän käyttäytymisestä voidaan päätellä keskeisiä piirteitä. Johdetaan seuraavaksi herkkyyshankintat käytetylle säätöratkaisulle ensin ilman tilaestimaattoria ja laajennetaan tämän jälkeen tarkastelu tilatakaisinkytkentään estimoiduista tiloista. Tarkastellaan järjestelmää, jonka lohkokkaavio on esitetty kuvassa 4.8.

Kaavion pohjalta voidaan johtaa yhtälö ohjaussignaaliin:

$$u = F_r(s)r_{ref} - F_K(s)(y + n_m), \quad (4.32)$$



Kuva 4.8. Säättöjärjestelmän lohkokkaavio.

jossa $F_K(s)$ on säätimen siirtofunktio ja n_m on mittaushäiriö. Järjestelmän ulostuloksi saadaan puolestaan:

$$\begin{aligned} y &= G(s)u + G_d(s)d_p \\ &= G(s)(F_r(s)r_{ref} - F_K(s)(y + n_m)) + G_d(s)d_p, \end{aligned} \quad (4.33)$$

jossa $G(s)$ on järjestelmän siirtofunktio, $G_d(s)$ on prosessihäiriön siirtofunktio ja d_p on prosessihäiriö. Kun tästä yhtälöstä ratkaistaan y , saadaan

$$\begin{aligned} y &= (I + GF_K)^{-1}GF_r r_{ref} + \underbrace{(I + GF_K)^{-1}G_d}_{S}d_p \\ &\quad - \underbrace{(I + GF_K)^{-1}GF_K}_{T}n_m. \end{aligned} \quad (4.34)$$

Yhtälössä (4.34) herkkyyshankintoksi $S(s)$ nimitetään termiä:

$$S(s) = (I + GF_K)^{-1} = (I + G_k(s))^{-1}, \quad (4.35)$$

jossa $G_k(s)$ on avoimen silmukan vahvistus. Yhtälö (4.35) määrittelee, kuinka suuri vaikutus prosessihäiriöillä on ulostulosuureeseen. Nimitys herkkyyshankintio on luonnollinen, koska se kuvaa takaisinkytkennän aiheuttaman järjestelmän herkkyyden vähenemisen. [8]

Komplementäärinen herkkyysfunktio $T(s)$ on puolestaan:

$$T(s) = (I + GF_K)^{-1}GF_K = (I + G_k)^{-1}G_k. \quad (4.36)$$

Kuten yhtälöstä (4.34) nähdään, komplementäärinen herkkyysfunktio (4.36) kuvaa mittaushäiriöiden vaikutusta säädetyn järjestelmän ulostuloon.

Säädön toiminnan kannalta on keskeistä tarkastella kaistanleveyttä, jolla säätö toimii halutulla tavalla. Kaistanleveys voidaan määritellä taajuuskaistaksi $[\omega_1, \omega_2]$, jolla säätö on tehokasta. Yleensä halutaan, että jatkuvassa tilassa saavutetaan annettu asetusarvo, jolloin vaaditaan $\omega_1 = 0$ ja kaistanleveydeksi kutsutaan arvoa $\omega_2 = \omega_B$.

Jos valitaan $F_r(s) = F_K(s)$, saadaan virheeksi:

$$e = y - r_{ref} = -Sr_{ref} + SG_d - Tn_m, \quad (4.37)$$

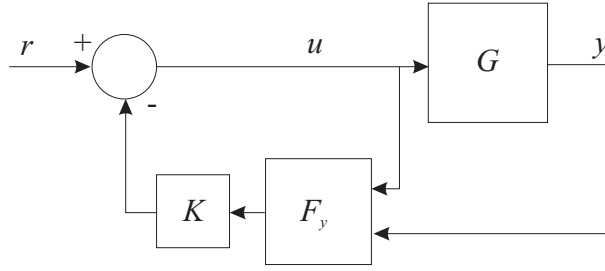
jossa on käytetty hyväksi yhtälöä $S + T = 1$. Yhtälöstä (4.37) nähdään, että asetusarvon seuranta toimii hyvin, mikäli suhteellinen virhe $e/r_{ref} = -S$ on pieni. Yleisesti suhteellisen virheen suuruudelle pidetään ylärajana arvoa $-3\text{dB} \approx 0.707$.

Mikäli halutaan tarkastella suurinta taajuutta, jolla referenssisignaali on merkittävää vaikutusta ulostuloon, voidaan laskea taajuus ω_{BT} . Tällä taajuudella komplementäärisen herkkyysfunktion suuruus on laskenut alle -3dB :n raja-arvon. [8]

Tarkastellaan seuraavaksi suljetun järjestelmän herkkyysfunktioita tapauksessa, jossa Kalman-suodatinta käytetään tilojen estimointiin. Kun Kalman-suodatin on lisätty tilaestimaattoriksi, säätöjärjestelmän lohkokaavio vastaa kuvassa 4.9 esitettyä tilannetta.

Kalman-suodattimen siirtofunktio on [5]

$$F_y(s) = K(sI - A + BK + LC)^{-1}L \quad (4.38)$$



Kuva 4.9. Takaisinkytkentä rekonstruoiduista tiloista.

ja avoimen silmukan vahvistukselle saadaan

$$G_k(s) = C(sI - A)^{-1}BF_y(s). \quad (4.39)$$

Näistä yhtälöistä voidaan edelleen laskea herkkyysherkkyysfunktio ja komplementäärinen herkkyysherkkyysfunktio. Herkkyysherkkyysfunktio on

$$\begin{aligned} S(s) &= (I + G_k)^{-1} \\ &= (I + (C(sI - A)^{-1}B)(K(sI - A + BK + LC)^{-1}L))^{-1} \end{aligned} \quad (4.40)$$

ja komplementääriseksi herkkyysherkkyysfunktioksi saadaan

$$\begin{aligned} T(s) &= (I + G_k)^{-1}G_k \\ &= (I + (C(sI - A)^{-1}B)(K(sI - A + BK + LC)^{-1}L))^{-1} \\ &\quad \cdot (C(sI - A)^{-1}B)(K(sI - A + BK + LC)^{-1}L). \end{aligned} \quad (4.41)$$

4.6.1 LTR-menettely

Edellisissä kappaleissa Kalman-suodatin ja säädin on suunniteltu toisistaan erillään. Tämä ei välttämättä johda haluttuun vasteeseen ja on syytä tarkastella, voidaanko Kalman-suodatin suunnitella siten, että avoimen silmukan vahvistuksesta saataisiin halutunlainen.

Aloitetaan valitsemalla K siten, että se on LQ-probleeman ratkaisu. Tarkoituksena olisi valita sellainen L , että avoimen silmukan vahvistus kalman-suodattimen kanssa vastaisi mahdollisimman hyvin ideaalisen tilatakaisin-

kytkennän avoimen silmukan vahvistusta. Tämä tarkoittaa, että

$$C(sI - A)^{-1}BK(sI - A + BK + LC)^{-1}L \approx K(sI - A)^{-1}B. \quad (4.42)$$

Yhtälö (4.42) pätee, mikäli valitaan $L = \rho B$ ja ρ on riittävän suuri arvo. [5] Käytännössä ρ :n arvoa voitaisiin kasvattaa, kunnes avoimen silmukan vahvistuksella on halutut herkkyyys- ja robustisuusominaisuudet. Kasvattamalla ρ :n arvoa riittävän suureksi, päästään mielivaltaisen lähelle ideaalista tapausta. Ehtona on kuitenkin, että järjestelmä on minimivaiheinen.

On olemassa myös toinen tapa päätyä tulokseen $L \approx \rho B$, kun ρ on suuri. Tällöin Kalman-suodattimen vahvistuksen laskemiseksi käytetään kaavoja: [5],[9]

$$L = PC^T R_2^{-1} \quad (4.43)$$

$$0 = PA^T + AP - PC^T R_2^{-1}CP + BR_1 B^T \quad (4.44)$$

ja valitaan $R_1 = \alpha R_2$, jossa α on suuri.

Tällöin yhtälöistä (4.43) ja (4.44) saadaan: [5]

$$PA^T + AP - LR_2 L^T + \alpha BR_2 B^T = 0 \quad (4.45)$$

Kun α :n arvoa kasvatetaan, dominoivat kaksi viimeistä termiä, joten $L \approx \sqrt{\alpha}B$ täytyy päteä, kun oletetaan, että tällä L :n valinnalla saavutetaan stabiili $A - LC$.

Tätä menettelyä kutsutaan avoimen silmukan siirtofunktion korjaamiseksi (engl. loop transfer recovery, LTR). LTR-menettelyssä on kaksi vaihetta. Ensimmäiseksi lasketaan K siten, että järjestelmälle saavutetaan halutut ominaisuudet painomatriiseita Q ja R muuttamalla. Seuraavaksi lasketaan optimaalinen tilahavaintajan vahvistus L , kun häiriöiden kovariansseiksi valitaan $R_1 = \alpha R_2$. Muuttujan α arvoa kasvatetaan niin paljon, että avoimen silmukan vahvistuksella on halutut ominaisuudet. Kun L lasketaan Kalman-

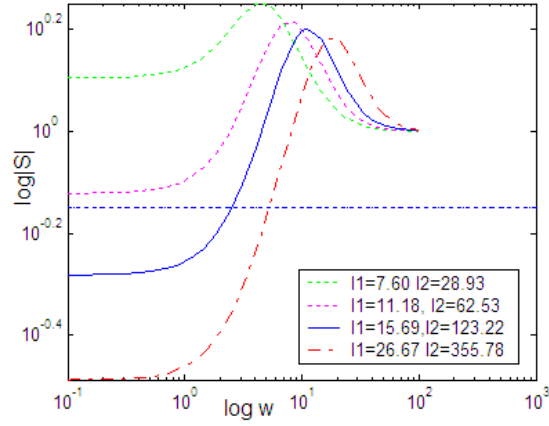
suodatinta käyttämällä, saavutetaan stabiili $A - LC$ millä tahansa α :n arvolla. [5]

Analysoidaan seuraavaksi kuvan 4.9 mukaista tilannetta demonstraatiolaitteen tapauksessa. Tilatakaisinkytkennän vahvistuksina käytetään arvoja $K = [0.1885 \quad 0.0887]$, jotka on todettu toimiviksi simulointien ja käytännön kokeiden perusteella. Tällöin järjestelmälle saadaan laskettua herkkyysfunktio kaavan (4.40) mukaisesti ja komplementäärinen herkkyysfunktio saadaan kaavasta (4.41). Lasketaan tämän jälkeen Kalman-suodattimia erilaisilla kohinasuhteilla ja tutkitaan, miten yhtälössä (4.45) esitetyn kertoimen α muuttaminen vaikuttaa herkkyysfunktioon.

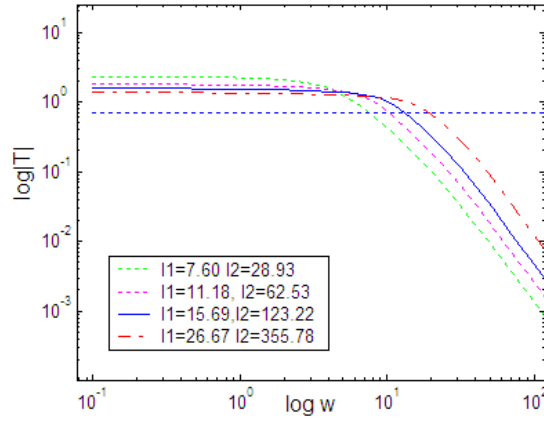
Kuvaajassa 4.10 on tulostettuna herkkyysfunktiot, kun α :aa kasvattamalla on saatu erilaisia Kalman-vahvistuksia. Samaan kuvaajaan on piirretty katkoviivalla -3dB :n taso. Kuvaajasta havaitaan selkeästi, että α :n arvoa kasvatettaessa järjestelmän kyky vastustaa matalataajuuksista prosessikohinaa paranee. Kuvaajasta nähdään myös, että pienempien kertoimien kuin $L = [11.18 \quad 62.53]$ käyttäminen johtaa ongelmiin ja säätö ei todennäköisesti toimi tällaisella virityksellä. Kuvasta voidaan myös päätellä, mikä on säädetyn järjestelmän kaistanleveys ω_B , kun kerrointa α kasvatetaan. Kertoimilla $L = [15.69 \quad 123.22]$ kaistanleveys on esimerkiksi noin 2.3Hz .

Tarkastellaan vielä komplementaarista herkkyysfunktiota, jotta voidaan päätellä Kalman-vahvistuksen kasvattamisen vaikutusta järjestelmän kykyyn vaimentaa mittauskohinaa. Kuvaajasta 4.11 nähdään, että vahvistusta kasvatettaessa mittauskohinan vaimennusominaisuudet heikkenivät. Tämä tulos oli ennalta odotettavissa ja käytännössä täytyy löytää kompromissi mittauskohinan vaimennuksen ja prosessihäiriöiden kompensointikyvyn välillä.

Sopivimmalta ratkaisulta näyttäisi kuvaajaan sinisellä yhtenäisellä viivalla tulostettu tapaus, jossa järjestelmän kaistanleveys on riittävän suuri, mutta mittauskohinan vaimennusominaisuuksista ei ole jouduttu tinkimään liikaa.



Kuva 4.10. Järjestelmän herkkyysfunktio S



Kuva 4.11. Komplementääriinen herkkyysfunktio T

4.6.2 Jatkuvan tilan virheen minimoiminen

LQ-säätimessä ei ole integroivaa termiä, joka kykenisi poistamaan prosessissa esiintyvän jatkuvan tilan virheen. Tällaista virhettä aiheutuu herkästi esimerkiksi silloin, jos laite asennetaan vinoon. Käytännön kokeiden perusteella osoittautui, että laitteen asentaminen täysin suoraan on työlästä ja vaatii tarkkuutta. Laitetta asennettaessa se jää käytännössä helposti sen verran vinoon, että siitä aiheutuu silmällä havaittava virhe pallon paikkaan.

Tämän ongelman poistamiseksi suoritetaan kalibrointi aina laitetta käynnistettäessä. Kalibrointi tehdään erityisellä LQ-säätimellä, johon on lisätty pieni

integroiva termi. Integroivan termin ansiosta laite kykenee tasapainottamaan pallon aina täsmällisesti levyn keskipisteeseen. Moottorien asemat nollataan tähän referenssipisteeseen, jolloin myös tavallinen LQ-säädin kykenee tasapainottamaan pallon tarkasti keskipisteeseen.

4.7 Lineaariservojen säätimen virittäminen

Prosessissa ei esiinny jatkuvia kuormitushäiriöitä, joten servosäätimessä ei tarvita integroivaa termiä. Servosäätimen P- ja D-termien kertoimet voidaan tämän vuoksi laskea LQ-probleeman (4.19) ratkaisuna, kun tilaesityksen matriiseiksi sijoitetaan moottorien dynamiikkaa kuvaavat matriisit (3.18).

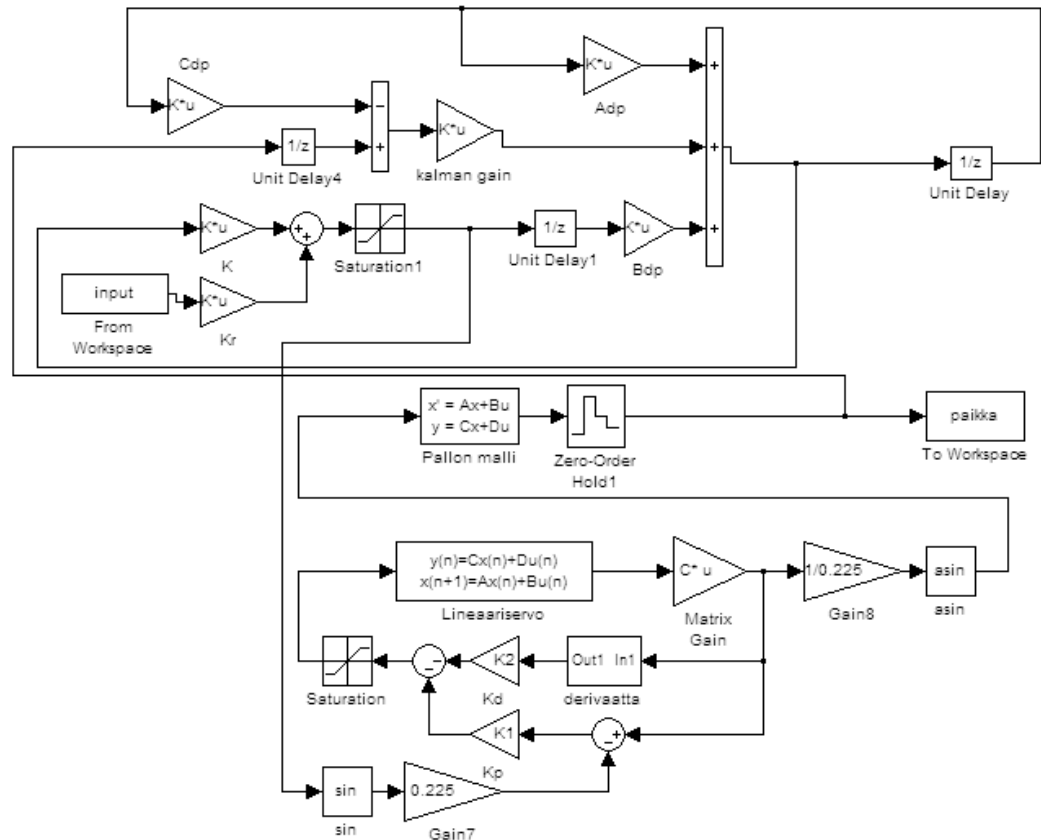
Sopivilla painomatriisien valinnoilla saadaan esimerkiksi vahvistuskertoimet P-termille $k_1 = 6275$ ja D-termille $k_2 = 242.5768$. On huomattava, että näitä kertoimia voi käyttää ainoastaan simuloitaessa järjestelmää. Mikäli vastaavat kertoimet halutaan asettaa servovahvistimelle, ne täytyy muuntaa sopiviksi kertomalla ne oikealla kertoimella. Tämä muunnos on käsitelty servosäätimen parametrien asetusta käsittelevässä kappaleessa.

4.8 Järjestelmän simulointi

Edellisissä kappaleissa on laskettu erikseen Kalman-suodattimelle, optimisäätäjälle ja lineaariservojen PID-säätimelle viritysparametrit. Simuloimalla saatujen tulosten perusteella todettiin, että kaikki näistä saatiin toimimaan halutulla tavalla. Todellinen järjestelmä on kuitenkin näiden kaikkien yhdistelmä ja siksi on syytä tutkia, voidaanko tähän asti toisistaan erillään suunnitellut osat yhdistää yhdeksi toimivaksi malliksi. Kootaan kaikki edellä esitetyt osat yhdeksi Simulink-malliksi, joka on esitetty kuvassa 4.12.

Simulointimallissa Kalman-suodatin on koottu erikseen matriisikertolaskuista ja viivelohkoista. Sen toteuttaminen tilaesityslohkolla olisi ollut mahdollis-

4.8 Järjestelmän simulointi



Kuva 4.12. Koko prosessia esittävä simulointimalli

ta, mutta ohjelmoitaessa Kalman-suodatinta säätöohjelmaan, se joudutaan toteuttamaan ilman valmiita lohkoja ja sen testaaminen on hyvä suorittaa jo tässä vaiheessa.

Mallista huomataan, että pallon paikkaa säätävältä tilasäätimeltä ei ole viety ohjausta suoraan pallon käyttäytymistä kuvaavalle tilalohkolle, vaan ohjaus menee alustalevyä kääntävän lineaarimoottorin kautta. Näin pyritään ottamaan huomioon dynamiikka, joka aiheutuisi moottoreista.

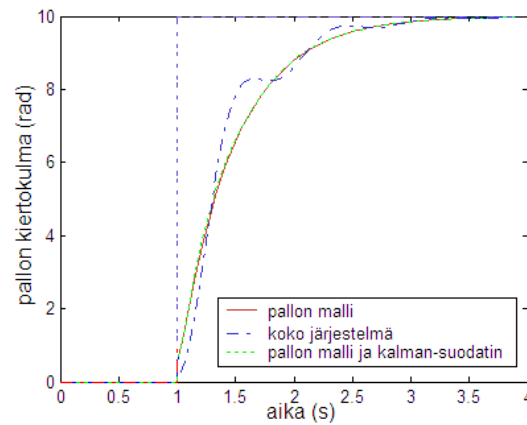
Seuraavaksi tutkitaan järjestelmän käyttäytymistä, kun sille tehdään askel-vastekoe. Simuloidaan tilannetta, jossa pallo ajetaan levyn keskeltä haluttuun paikkaan. Kuvasta 4.13 huomataan, että koko järjestelmän ja pelkän pallon mallin kuvaajat ovat aika lähellä toisiaan, mutta niiden välillä on havaittavissa lineaarimoottorien dynamiikasta johtuva ero. Tulosten perusteel-

4.8 Järjestelmän simulointi

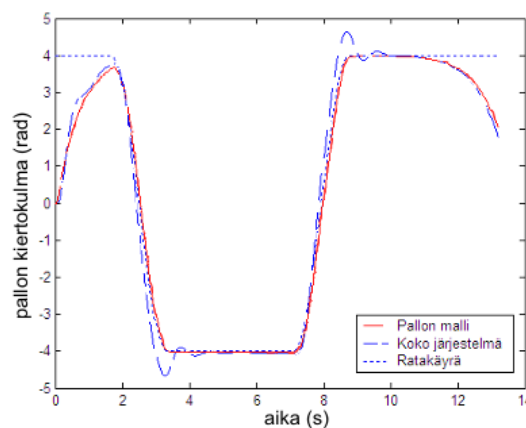
la voidaan silti olettaa, järjestelmä toimii riittävän hyvin, vaikka eri osien säätösuunnittelu suoritettiin toisista järjestelmän osista riippumatta.

Kokeillaan vielä, miten radanseuranta toimii, kun simuloinnissa käytetään koko järjestelmän mallia.

Simuloinnin perusteella voidaan todeta, että servojen mukaan ottaminen heikentää radanseurannan toimintaa. Näyttää joka tapauksessa siltä, että radanseurantaa kannattaa käyttää.



Kuva 4.13. Askelvasteet koko järjestelmälle ja pelkälle pallon mallille.



Kuva 4.14. Suboptimaalisen radanseurannan toiminta simuloitaessa koko järjestelmää.

Luku 5

Järjestelmän testaus ja koeajot

Edellisissä kappaleissa on esitetty säätösuunnittelussa käytetyt menetelmät sekä johdettu pallolle dynaaminen malli, jonka perusteella järjestelmälle on etsitty sopivaa säätöratkaisua. Erilaisten painokertoimien vaikutusta on tutkittu simuloimalla ja tutkimalla järjestelmän ominaisuuksia kuvaavia funktioita. Sovelluksesta johtuen tiukkoja rajoituksia järjestelmän suorituskyvylle ei ollut määritelty etukäteen, vaan säätösuunnittelussa täytyi ottaa huomioon, minkälainen käyttäytyminen on järkevää ja mitä ominaisuuksia pitäisi painottaa. Käytännössä tämä tarkoittaa esimerkiksi sitä, että asettumisajasta voidaan tinkiä, mikäli tuloksena on muuten rauhallisemmin ja luotettavammin toimiva säätö.

Ideaalista mallia simuloimalla saatiin hyviä tuloksia ja säädetyn järjestelmän käyttäytyminen vastasi asetettuja odotuksia. Järjestelmää simuloitiin eri tilanteissa, joissa Kalman-suodatin ja lineaarimoottorit lisättiin järjestelmän malliin. Säätö vaikeutui etenkin lineaarimoottorien lisäämisen jälkeen ja tämän perusteella todellisessakin järjestelmässä oli odotettavissa ongelmia hyvin käyttäytyvän ratkaisun löytämisessä.

Pallon dynaamista mallia laskettaessa tehtiin useita yksinkertaistuksia. Lähtökohtana mallin johtamiselle oli, että liikesuunnat eivät riipu toisistaan. Ei ole itsestään selvää, voidaanko tällaista oletusta tehdä etenkin tarkastel-

taessa dynaamista tilannetta, jossa palloa ohjataan ratoja pitkin. Järjestelmä oletettiin myös lineaariseksi ja levyn kulmanopeudesta ja -kiihtyvyydestä riippuvia termejä ei huomioitu mallissa.

Tässä luvussa tarkastellaan tuloksia, joita saatiin todellisen prosessin koeajoista. Tavoitteena on selvittää, onko prosessille johdettu malli riittävän tarkka ja voidaanko sitä käyttää perustellusti säätösuunnittelun lähtökohdiana. Ensimmäiseksi esitetään periaatteet, joiden pohjalta sopivat säätimen kertoimet määrättiin. Kun hyvät kertoimet löytyivät, suoritettiin järjestelmällä askelvastekokeita ja arvioitiin säätimen suorituskkyä.

Kalman-suodattimen virittämisellä on myös tärkeä merkitys järjestelmän käyttäytymiselle. Koeajojen pohjalta kävi ilmi, että Kalman-suodattimen ja säätimen virittäminen on parasta tehdä yhtä aikaa. Tällöin voidaan vähentää ohjaussuureen värähtelyjä ja säätöjärjestelmän käyttäytymisestä saadaan miellyttävän näköistä.

Lopuksi tavoitteena on tarkastella kysymystä järjestelmässä mahdollisesti ilmenevistä ristikkäisvaikutuksista. On mielenkiintoista verrata toisen liikesuunnan lisäämisen vaikutusta ensimmäiseen liikesuuntaan. Voitaisiin esimerkiksi tarkastella sitä, pystytäänkö x -suunnan kuvaaajan perusteella päättelemään, ajetaanko palloa ympyrärataa pitkin, vai onko liike sinimuotoista ainoastaan x -akselin suhteen.

5.1 LQ-säätäjän virittäminen

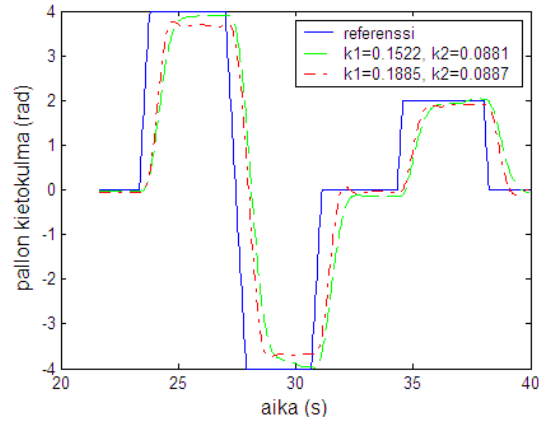
Säätösuunnittelua tehtäessä laskettiin useilla eri painomatriiseilla LQ-säätimiä ja vertailtiin niiden käyttäytymistä toisiinsa. Herkkyysfunktioiden ja askelvastekokeiden perusteella pääteltiin, millä alueella LQ-probleeman painomatriisien kertoimien haluttiin olevan. Tuloksena saatiin joukko säätimiä, jotka täyttivät asetetut tavoitteet suljetun järjestelmän käyttäytymiselle. Simulointien perusteella voitiin arvioida, miten säätimet toimivat, kun lineaarimoottorien dynamiikka ja Kalman-suodatin lisättiin malliin.

Ei olisi kuitenkaan perusteltua tehdä säätimen valintaa kokonaan matemaattisen mallin ja simulointien pohjalta. Tämän vuoksi laskettiin joukko LQ-säätimiä, joiden kertoimet voitiin siirtää pallon säätöä tekevälle tietokoneohjelmalle. LQ-säätimien painokertoimet valittiin siten, että niiden pohjalta ratkaistut säätimet erosivat riittävästi toisistaan, jotta ei jouduttu ongelmiin liian suuren valikoiman kanssa. Saadut kertoimet ladattiin tekstitiedostosta säätöohjelman taulukkoon, josta niitä voitiin valita indeksoimalla. Erityisen tärkeää tässä vaiheessa oli, että eri kertoimien valinta tehtiin mahdollisimman helpoksi ja säädön toimintaa voitiin nopeasti kokeilla eri vaihtoehdoilla.

Ensimmäiseksi säätimien eri kertoimia testattiin askelvastekokeilla. Koeajon aikana erisuuruisia askeleita syötettiin säätimen referenssiksi ja järjestelmästä tallennettiin tekstitiedostoon kaikki oleelliset suureet sellaisessa muodossa, että ne voitiin myöhemmin ladata Matlab-ohjelmaan analysoitavaksi.

Askelvastekokeita suoritettaessa tarkkailtiin samanaikaisesti järjestelmän suorituskkyä sekä ohjaussuureen värähtelyä. Käytännössä lähdettiin liikkeelle liian pienistä säätimen kertoimista, joilla tasapainotus oli hidasta ja referenssipaikkaa ei saavutettu riittävän tarkasti. Tämän jälkeen säätimen kertoimia ryhdyttiin kasvattamaan ja tarkkailtiin, milloin suljetun järjestelmän vaste täyttää odotukset. Mikäli kertoimet kasvatettiin liian suureksi, alkoi järjestelmässä esiintyä värähtelyä ja käyttäytyminen muuttui levottomaksi. Kertoimiksi valittiin arvot, joilla ohjaussuureen värähtely pysyi pienenä, mutta samalla saavutettiin mahdollisimman nopea askelvaste.

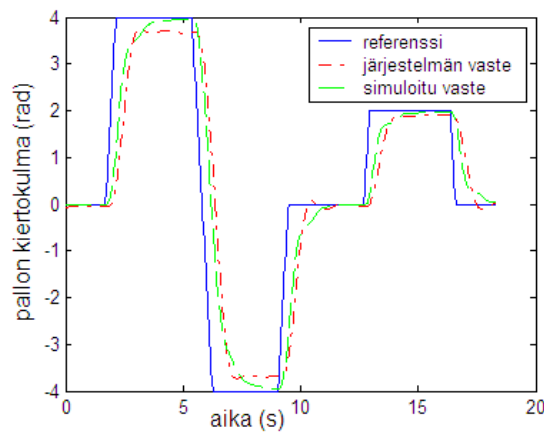
Kuvasta 5.1 nähdään, että pienemmillä säätimen kertoimilla järjestelmän askelvaste nousee hitaammin ja säädin ei saa palloa pysähtymään aivan paikalleen. Kertoimia kasvatettaessa askelvasteen nousuaika pienenee ja samalla säädöstä tulee tarkempi. Kuvaajassa 5.1 punaisella pisteviivalla on merkitty suuremmalla vahvistuksella saatua säätötulosta. Kuvaajasta havaitaan, että pallo saadaan ajettua nopeasti lähelle tavoitetilaa ja se pysähtyy lähes paikalleen.



Kuva 5.1. Mitatut askelvasteet eri painokertoimilla lasketuilla LQ-säätimillä.

Kokeiden perusteella päädyttiin valitsemaan säätimelle vahvistuskertoimet $K = [0.1885 \quad 0.0887]$. Näillä kertoimilla saavutetaan nopea ja kohtuullisen tarkka vaste, mutta ohjaussuureessa ei esiinny häiritsevää värähtelyä. Suurempien kertoimien valitseminen parantaisi vielä tiettyyn rajaan asti säädön tarkkuutta, mutta ohjaussuureen käyttäytyminen muuttuu levottomammaksi.

Verrataan simuloidun järjestelmän vastetta vielä todellisen järjestelmän vasteeseen valituilla kertoimilla ja tarkastellaan, ovatko ne samanlaiset. Seuraavassa kuvassa näkyvät tulokset, kun simulink-mallille ja todelliselle järjestelmälle on tehty samalla syötteellä askelvastekokeet.



Kuva 5.2. Järjestelmän vaste verrattuna simuloituun tulokseen.

Kuvaajista 5.2 nähdään, että prosessit käyttäytyvät hyvin samalla tavalla, vaikka pientä eroa on nähtävissä. Ero on niin pieni, että se voidaan selittää epälineaarisuuksien huomioimatta jättämisellä. Vertailun perusteella vaikuttaa siltä, että malli toimii hyvin ja sen pohjalta voidaan tehdä säätösuunnittelua. Tulokset ovat hyvin samanlaisia molempien akselien suhteen. Pieniä eroja esiintyy, mutta esimerkiksi levyn pinnanmuoto ei ole täysin säännöllinen ja se osaltaan selittää eroavaisuuksia.

5.2 Kalman-suodattimen virittäminen

Tarkasteltaessa Kalman-suodatinta simulointimallin yhteydessä todettiin, että Kalman-vahvistuksen kasvattaminen lisää värähtelyjä järjestelmässä. Sopivan kertoimen etsiminen on jälleen kompromissi tavoitellun suorituskyvyn ja pehmeän käyttäytymisen välillä. Mikäli kerroin kasvatetaan liian suureksi, aiheutuu kameran mittauskohinasta häiriöitä ja säädöstä tulee nykyä. Mikäli vahvistus on taas liian pieni, on säätö konservatiivinen tai säätö ei välttämättä onnistu ollenkaan.

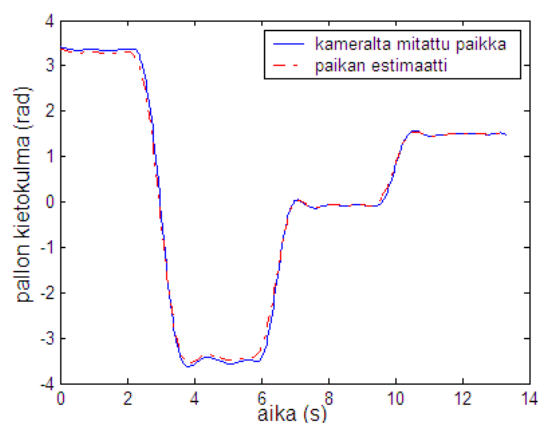
LTR-tekniikkaa käsittelevässä kappaleessa todettiin, että Kalman-suodattimen ominaisuuksia muokkaamalla voidaan vaikuttaa suljetun järjestelmän ominaisuuksiin. Kappaleessa todettiin, että mittauskohinan ja prosessikohinan varianssien suhdetta muuttamalla voidaan avoimen silmukan siirtofunktiota muokata niin, että se vastaa mahdollisimman hyvin ideaalista tapausta. Analysoimalla herkkyyshankintoja voitiin päätellä suurin piirtein sopivat kohinan varianssien arvot suodattimen laskemiseksi.

Kalman-suodatinta viritettäessä menetellään samalla tavalla kuin tilasäätäjän tapauksessa. Kohinan varianssien arvoksi päätellään ensin teorian pohjalta sopiva alue, joilta hyvän suodattimen uskotaan löytyvän. Tämän jälkeen suodattimien parametrit tallennetaan taulukkoon ja ladataan säätöä tekevä ohjelmalle. Nyt LTR-tekniikkaa päästään soveltamaan käytäntöön, kun taulukossa on järjestyksessä suodattimen kertoimia ja indeksiä kasvattamal-

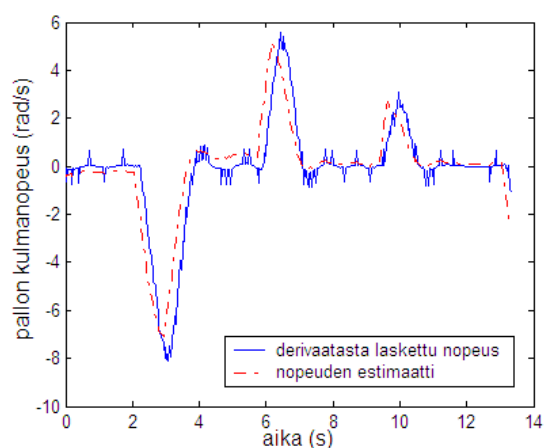
la voidaan muuttaa kohinaparametrien suhdetta. Indeksillä ollessa liian pieni, suodatin toimii konservatiivisesti ja säätö ei onnistu hyvin. Kun indeksiä kasvatetaan, säätö alkaa toimia nopeammin ja saavutetaan parempi tarkkuus. Liian suurilla arvoilla kohinasta aiheutuva värähtely lisääntyy. Sopiva arvo löytyy kohdasta, jossa säätö toimii riittävän hyvin, mutta suodatin vaimentaa tehokkaasti häiriöitä.

Kuvassa 5.3 on esitetty Kalman-suodattimelta saatu paikan estimaatti ja kameralta mitattu todellinen paikka. Kuvan perusteella voidaan todeta, että paikan estimointi onnistuu hyvin ja suuria eroja estimaatin ja mittauksen välille ei pääse syntymään.

Paikan estimoinnin lisäksi Kalman-suodatinta käytetään pallon nopeuden estimointiin. Tarkastetaan vielä nopeuden estimoinnin onnistuminen vertaamalla sitä paikan derivaatasta laskettuun nopeuteen. Kuvaajasta 5.4 nähdään jälleen, että suodatin estimoii hyvin pallon nopeuden ja tuloksena saadaan sileä kuvaaja. Mikäli säätöä tehtäisiin suoraan derivaatasta lasketun nopeuden pohjalta, aiheuttaisivat terävät piikit häiriöitä ohjaussuureeseen ja se näkyisi levyn nykimisenä. Suodatin on onnistunut poistamaan häiriöpiikit hyvin nopeuden estimaatista ja säätö onnistuu huomattavasti pehmeämmin. Koska suodattimelle on syötetty suoraan säätimen laskema ohjaus, kasvaa nopeuden estimaatti hiukan nopeammin kuin todellinen nopeus. Tämä ero on selitettävissä lineaarimoottorien dynamiikan aiheuttamalla pienellä viiveellä.



Kuva 5.3. Kalman-suodattimen estimoima paikka verrattuna kameran saatavaan mittaukseen.



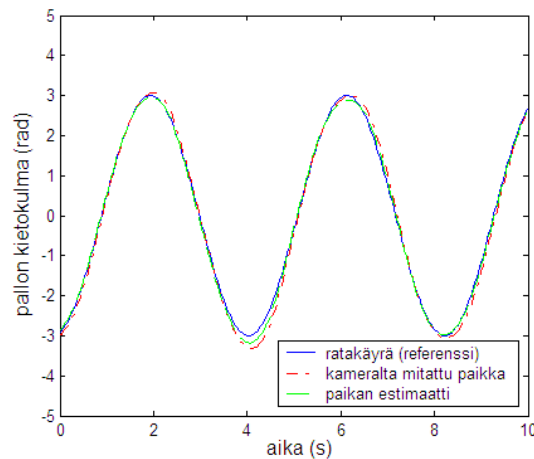
Kuva 5.4. Kalman-suodattimen estimoima nopeus verrattuna derivaatasta laskettuun nopeuteen.

5.3 Radan seuranta

Työn yhtenä tavoitteena oli, että palloa voidaan ohjata erilaisia ratoja pitkin levyn pinnalla. Kuten jo simulointien yhteydessä todettiin, ratojen ajaminen onnistuu LQ-säätimen referenssipistettä muuttamalla, mutta sillä tavalla ei saavuteta kovin tarkkaa vastetta: referenssikäyrän ja pallon paikan välille muodostuu vaihe-eroa ja liikkeen amplitudit pienenevät.

Sinänsä radan seurannan tarkkuudella ei ole suurta merkitystä tässä sovelluksessa, mutta on mielenkiintoista testata laitteiston suorituskykyä vaati-

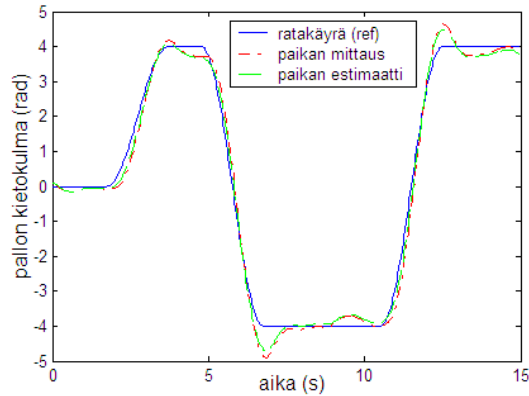
vammassa säätöongelmassa. Radanseuranta käsiteltiin aikaisemmassa kapaleessa ja tällöin päädyttiin tulokseen, jossa etukäteen määritetystä rata-
käyrästä laskettiin ohjaussuureeseen yhdistettävä signaali. Seuraavaksi laske-
taan tämä signaali halutuille radoille ja tarkastellaan toimiiko radanseuranta
odotetulla tavalla. Radanseuranta laskettaessa käytetään samoja säätimen
viritysparametreja kuin LQ-probleemassa.



Kuva 5.5. Radanseurannan vaste, kun referenssinä on sinisignaali.

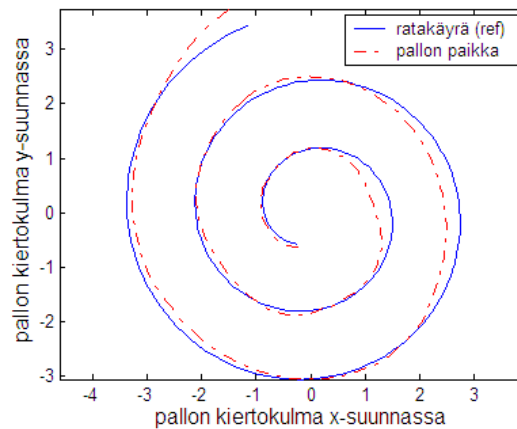
Kuvasta 5.5 voidaan todeta, että radanseurannalla saavutettu tulos sini-
muotoista rataa pitkin ajettaessa on hyvä. Voidaan todeta, että laite pystyy
seuraamaan lähes täydellisesti ratakäyrää, eikä vaihe-eroa tai eroa amplitudin
suuruudessa esiinny juuri ollenkaan. On mielenkiintoista havaita, että laite
pystyy tekemään radanseuranta tarkasti, vaikka askelvastekokeissa esiintyi
pientä värähtelyä. Suoritetaan koeajo vielä toiselle akselille ja erimuotoiselle
referenssikäyrälle.

Kuvasta 5.6 nähdään, että pientä värähtelyä tapahtuu aina liikkeen ääria-
sentoon tultaessa. Simulointien perusteella tämä oli kuitenkin odotettavissa
ja sama ilmiö näkyi simuloidun järjestelmän vasteessa. Vastetta neliöradalle
voitaisiin yrittää parantaa pehmentämällä ratakäyrän reunoja vielä enem-
män ja muuttamalla säätimen viritysparametreja.



Kuva 5.6. Radanseurannan vaste, kun referenssinä on neliösignaali. Vastetta on tarkasteltu tässä vain yhden akselin suhteen.

Tulostetaan vielä lopuksi xy -koordinaatistossa pallon paikan kuvaaja, jolloin näkyy pallon kulkema ratakäyrä. Referenssinä on tässä tapauksessa ollut spiraalin muotoinen ratakäyrä.



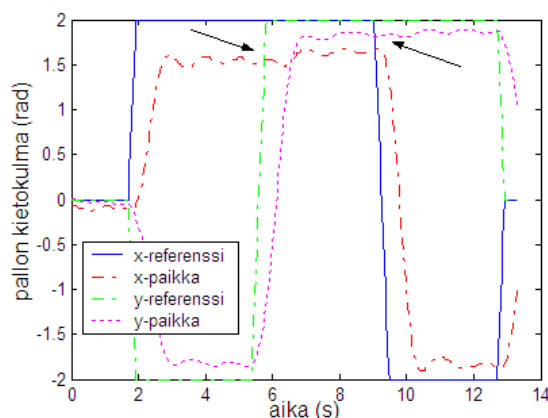
Kuva 5.7. Referenssikäyrä ja pallon ratakäyrä tulostettuna xy -koordinaatistoon.

5.4 Ristikkäisvaikutukset

Tässä kappaleessa tarkastellaan pallon eri liikesuuntien välillä ilmeneviä ristikkäisvaikutuksia. Mallinnuksessa lähtökohtana oli, että liikesuunnat oletettiin toisistaan riippumattomiksi. On tärkeää testata tämän oletuksen paik-

kansapitävyys, ennen kuin voidaan todeta, että säätö toimii tyydyttävällä tavalla. Mikäli koetulosten pohjalta osoittautuisi, että järjestelmässä on havaittavissa liikesuuntien välillä merkittävää riippuvuutta, tulisi mallia tarkentaa ja suunnitella säätäjää, joka pystyy kompensoimaan ristikkäisvaikutukset.

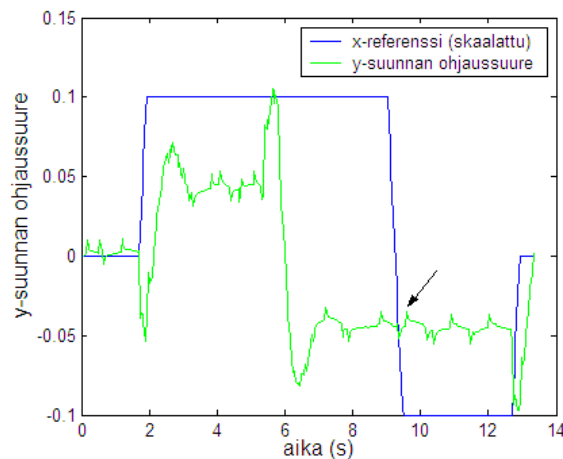
Tarkastelemalla koeajojen tuloksia, voidaan päätellä, onko ristikkäisvaikutuksilla merkitystä pallon säädön kannalta. Kokeellinen ristikkäisvaikutusten selvittäminen aloitetaan siirtämällä palloa levyn reunalle päin ja ajamalla toisella akselilla askelvastekokeita. Kun toista palloa liikutetaan paikasta toiseen, tarkkaillaan pystytäänkö toinen liikesuunta pitämään täysin paikallaan. Kuvassa 5.8 on kuvattu tilannetta, kun toisessa suunnassa pallo on ajettu paikkaan 2rad ja toisessa suunnassa ajetaan askelvastekokeita.



Kuva 5.8. x - ja y -suunnan kuvaajat tulostettuna samaan kuvaan.

Mielenkiintoisinta kuvasta 5.8 on tarkastella kohtia, joissa toisessa liikesuunnassa tapahtuu referenssin muutos ja toisessa suunnassa pallo yritetään pitää paikallaan. Kuvassa on osoitettu nuolilla nämä kohdat, joissa referenssin muutokset tapahtuvat. Tarkastelemalla ratakäyriä huomataan, että juuri minkäänlaista muutosta ei voida havaita paikallaan pidettävän pallon tilassa, kun toisessa suunnassa ajetaan askelvastekoe. Pieni siirtymä voidaan selittää levyn pinnan virheillä ja mekaniikan epäideaalisuuksilla. Kokeen perusteella voidaan päätellä, että ainakin tällaisissa tapauksissa säätö toimii riittävän hyvin ja ei ole perusteltua tarvetta ottaa ristikkäisvaikutuksia huomioon.

On olemassa mahdollisuus, että säätö pystyisi nopeasti kompensoimaan mahdolliset ristikkäisvaikutukset ja niitä ei sen takia huomattaisi edellisessä koeksessa pallon paikan muutoksena. Tarkastellaan y -suunnan ohjaussuuretta, kun x -suunnassa tapahtuu askelvastekoe. Kuvassa 5.9 on kuvattu samaa tilannetta kuin kuvassa 5.8. Nyt kuvaajaan on kuitenkin tulostettu skaalattu x -suunnan referenssisignaali ja y -suunnan ohjaussuure. x -suunnan referenssisignaali on tulostettu samaan kuvaan, jotta nähdään, milloin y -suunnan ohjaussignaalin pitäisi näkyä ristikkäisvaikutuksia korjaavaa vaihtelua.

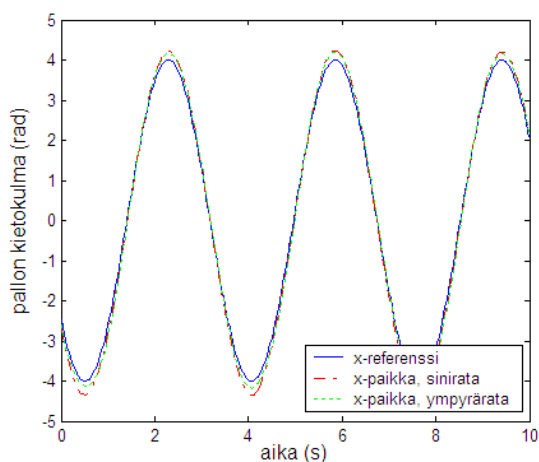


Kuva 5.9. y -suunnan ohjaussignaali, kun x -suunnassa ajetaan askelvastekoe.

Kuvassa 5.9 on osoitettu nuolella kohta, jossa ohjaussignaalin pitäisi näkyä muutos, mikäli säätöjärjestelmän täytyy korjata ristikkäisvaikutusten aiheuttamaa virhettä. Mitään havaittavaa muutosta ohjaussignaalin ei kuitenkaan tapahdu ja tämän perusteella voidaan päätellä, että ristikkäisvaikutusten merkityksen täytyy ainakin tässä tapauksessa olla merkityksettömän pieni.

Analysoidaan vielä viimeiseksi tilannetta, jossa tarkastellaan ristikkäisvaikutuksia pallon ollessa liikkeessä molempien akselien suhteen. Koeajot suoritettiin liikuttamalla palloa ensin sinimuotoista rataa pitkin ainoastaan yhdessä liikesuunnassa. Tämän jälkeen myös toiseen liikesuuntaan lisättiin sinimuotoista liikettä ja tarkasteltiin, aiheuttaako tämä muutoksia ensimmäiseksi tarkastellun liikesuunnan rataa. Kuvassa 5.10 on x -suunnan ratakäyrä il-

man y -suunnan liikettä ja sitten y -suuntaisen siniliikkeen kanssa. Kuten kuvasta voidaan havaita, rata ei muutu käytännössä yhtään y -suunnan liikkeen lisäämisen tuloksena.



Kuva 5.10. y -suunnan ohjaussignaali, kun x -suunnassa ajetaan askelvastekoe.

Kokeiden perusteella ei voitu havaita käytännössä minkäänlaisia ristikkäisvaikutuksia eri liikesuuntien välillä. Tästä voidaan päätellä, että myöskään niitä mallintamalla ja säätösuunnittelussa huomioimalla ei saavutettaisi havaittavaa parannusta säädön suorituskyvyssä. Oletusta, että akselit ovat toisistaan riippumattomia, voidaan pitää perusteltuna ja pallolle muodostetun dynaamisen mallin voidaan todeta olevan riittävän tarkka.

Osa II

Tekninen toteutus

Luku 6

Demonstraatiolaitteen ohjausjärjestelmä

Tämän kappaleen tarkoituksena on esitellä demonstraatiolaitteen ohjauksessa käytetty tietokone ja servojärjestelmän tärkeimmät komponentit. Myös laitteen ohjauksessa käytettyyn ohjelmointikieleen ja ohjelmistoon tutustutaan lyhyesti, jotta ohjausohjelman toiminnan perusteet voidaan ymmärtää.

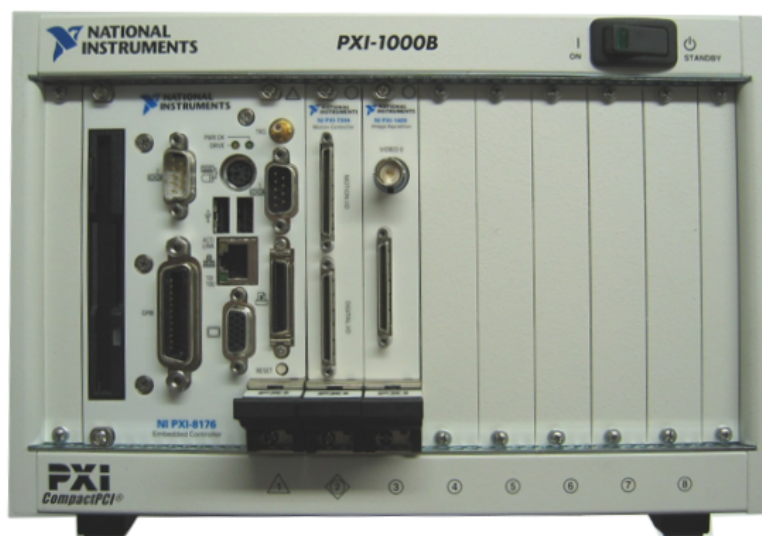
6.1 Ohjaustietokone

Järjestelmää ohjaavaksi tietokoneeksi valittiin National Instrumentsin PXI-1000B teollisuus-PC, joka vastaa käytännössä lähes tavallista tietokonetta, mutta se on suunniteltu käytettäväksi vaativammissa olosuhteissa. Kuva 6.1 esittää ohjaustietokoneen etupaneelia. Koneen tärkeimmät ominaisuudet ovat:

- 1.26 GHz Pentium III prosessori
- PCI-väylän nopeus 132 MB/s, PXI-väylä
- 512 MB SDRAM päivityksillä

6.1 Ohjaustietokone

- 512KB välimuisti
- Windows 2000 -käyttöjärjestelmä
- NI PXI-7344 servokortti
- NI PXI-1409 kuvankaappauskortti



Kuva 6.1. PXI-1000B ohjaustietokone.

Ohjaustietokoneen valinnassa päädyttiin teollisuustietokoneeseen, jotta pystytään varmistamaan järjestelmän häiriötön toiminta. Teollisuustietokoneissa järjestelmän komponentit on valittu huolellisesti ja ne on testattu tarkemmin kuin normaaleissa tietokoneissa. Toimittajilla on yleensä omat testatut ajurinsa lisälaitteille. Näin pystytään varmistumaan parhaalla mahdollisella tavalla siitä, ettei tietokonejärjestelmän käytössä esiinny häiriöitä, eikä järjestelmä pääse kaatumaan kesken prosessin suorituksen.

Teollisuustietokoneiden haittapuolena on yleisesti pidettävä niiden korkeaa hintaa. Yleisesti ottaen voidaan sanoa, että teollisuus-PC maksaa noin kymmenen kertaa enemmän kuin vastaava kotikäyttöön tarkoitettu tietokone.

Mikäli sovellukselta vaaditaan kuitenkin suurta luotettavuutta, ei sitä voida normaaleilla laitteilla taata ja tämä hinta on maksettava.

6.2 LabVIEW

LabVIEW on National Instrumentsin graafinen ohjelmointikieli, joka on tarkoitettu erilaisten mittaus- ja laadunvalvontasovellusten kehittämiseen. LabVIEW:ssa ohjelmointi tapahtuu graafisessa ympäristössä lohkokaavioiden avulla. Tämä tekee siitä helpomman oppia sellaisille ihmisille, jotka eivät ole koskaan aikaisemmin ohjelmoineet tietokoneella. Niille, joille esimerkiksi Matlabin Simulink-ympäristö on tuttu, LabVIEW'n perusteiden omaksuminen on vielä helpompaa.

LabVIEW-ympäristöön on hyvin saatavilla ajureita eri laitteille ja sen avulla voidaan käyttää monenlaisia eri mittakortteja. Korttien ominaisuudet voidaan yhdistää LabVIEW-ohjelmassa ja mittauksille voidaan tehdä matemaattista analyysiä.

LabVIEW sisältää ohjelmakirjastot datan keräämiseksi, analysoimiseksi ja esittämiseksi. Ohjelmistoon voidaan liittää myös ulkopuolista koodia monella eri tavalla, joista esimerkkejä ovat DLL ja Active-X.

6.2.1 LabVIEW-ohjelmointi

LabVIEW-ohjelmia kutsutaan virtuaali-instrumenteiksi (virtual instrument, VI), koska niiden ulkonäkö ja toiminta matkivat fyysisiä instrumentteja, kuten oskilloskooppeja tai yleismittareita.

Virtuaali-instrumentti sisältää kolme komponenttia, joita ovat:

- Etupaneeli, joka toimii käyttöliittymänä
- Lohkokaavio, joka sisältää ohjelman graafisen lähdekoodin

- Ikoni ja kytkentätaulukko, joka Identifioi VI:n siten, että sitä voidaan käyttää muissa VI:ssa. VI:tä toisen VI:n sisällä kutsutaan aliVI:ksi ja se vastaa aliohjelmaa tekstipohjaisessa ohjelmointikielessä.

Etupaneeli on VI:n käyttöliittymä. Etupaneeli rakennetaan ohjauksista ja näytöistä, jotka ovat interaktiivisia VI:n sisään- tai ulostuloja. Ohjaukset voivat olla esimerkiksi kytkimiä tai numerovalitsimia. Näyttöjä ovat esimerkiksi merkkivalot, kuvaajat ja mittarinäytöt. Ohjauksien on tarkoitus simuloida mittalaitteen hallintanäppäimiä ja niiltä voidaan lukea tietoa ohjelman käyttöön. Näytöt puolestaan simuloivat mittalaitteen ulostuloja ja ne esittävät datan, jota lohkolta saadaan.

Etupaneelin suunnittelun jälkeen voidaan lisätä lähdekoodi graafista ohjelmointiympäristöä käyttämällä. Etupaneeliin lisätyt ohjaukset tai näytöt näkyvät nyt päätteinä lohkokaaviossa ja ne voidaan yhdistää johdoilla haluttuun kohtaan lähdekoodissa.

Lähdekoodia muodostettaessa voidaan erilaisista paleteista poimia haluttuja funktioita johdoissa liikkuvan datan käsittelemiseksi. Näitä funktioita yhdistelemällä peräjälkeen saadaan datalle tehdyksi halutut operaatiot, jonka jälkeen se voidaan ohjata näytölle tai käyttää dataa esimerkiksi toimilaitteen ohjaamiseen.

6.3 Säättöohjelma

Demonstraatiolaitetta ohjaa ohjelma, joka on kirjoitettu LabVIEW-kielellä. Ohjelma huolehtii käynnistyksen yhteydessä tarvittavista toimenpiteistä ja suorittaa laitteen kalibroinnin.

Demonstraatiolaitteen ollessa toiminnassa säättöohjelma lukee 30 kertaa sekunnissa kameralta uuden kuvan ja tunnistaa siitä pallon. Säättöohjelma käyttää pallon paikkatietoa Kalman-suodattimen päivittämiseen, jotta pallon tilasta saadaan ajan tasalla oleva estimaatti. Estimoidun tilan perusteella las-

ketaan, mihin kulmaan alustalevy kannattaa kääntää. Tämä tieto lähetetään edelleen servo-ohjaimelle, joka säätää moottorit oikeaan paikkaan.

Säätöohjelmassa on huolehdittu myös laitteen toimintaan liittyvistä rajoituksista, koska näyttelykäytössä on tarpeen varmistaa, ettei käyttäjä voi saada laitetta rikki virheellisellä käytöllä. Rajoituksien avulla on varmistettu esimerkiksi, että käyttäjä ei voi suorittaa kahta toimenpidettä samaan aikaan tai pudottaa palloa levyltä.

Tarkempi kuvaus ohjelman rakenteesta ja sen sisältämistä funktioista on kuvattu liitteessä A.

6.4 Servojärjestelmä

Laitetta suunniteltaessa kiinnitettiin erityisesti huomiota toimilaitteiden valintaan ja servojärjestelmään. Tavoitteena oli saavuttaa suuri toimintavarmuus, hyvä tarkkuus ja pieni huollontarve. Tämän vuoksi toimilaitteiksi haettiin ratkaisua, joilla mekaniikka saatiin mahdollisimman yksinkertaiseksi ja luotettavaksi. Valintaprosessin aikana käytiin läpi monia eri vaihtoehtoja, joita olivat esimerkiksi lineaarimoottorit, servomoottorin ja kuularuuvin sekä servomoottorin ja servovaihteen yhdistelmät.

Pyörivää servoa käytettäessä olisi jouduttu aina hankkimaan jokin ylimääräinen vaihde moottorin ja liikuteltavan osan väliin ja tämä olisi taas puolestaan lisännyt toimintahäiriöiden mahdollisuutta. Pyörivää servoa käytettäessä olisi myös mekaniikasta tullut monimutkaisempi ja vaikeampi toteuttaa. Näistä syistä pyrittiin löytämään ratkaisu, jolla saatiin poistettua edellä mainitut ongelmat.

6.5 Lineaarimoottorit

Toimilaitteiksi valittiin lineaarimoottorit, koska ne tarjosivat tähän sovellukseen sopivat ominaisuudet. Lineaarimoottorit edustavat uutta teknologiaa ja ne ovat myös sen vuoksi kiinnostavia. Lineaarimoottorien perusideana on tarjota mahdollisuus lineaariliikkeiden toteuttamiseen ilman vaihteita, kuu-laruuveja tai hihnakäyttöjä.

Sovellukseen valitut LinMot-moottorit muistuttavat lähinnä pneumatiikkasyylintereitä ja ne koostuvat ainoastaan kahdesta pääosasta, jotka ovat paikallaan pysyvä staattori ja liikkuva liukukara. Koska lineaarimoottorit saavat aikaan lineaariliikkeen ilman mekaanista välitystä, ovat ne käytännössä lähes kulumattomia ja välyksettömiä. Moottorit on suunniteltu teollisuuskäyttöön ja ne kestävät huomattavasti vaativampia olosuhteita kuin tässä tapauksessa tarvittaisiin. Moottorien huollon tarve on myös vähäinen ja niiden huoltotoimenpiteet ovat yksinkertaisia. Lisäksi moottoreilla on erittäin hyvät dynaamiset ominaisuudet ja niillä päästää jopa 200m/s^2 kiihtyvyyksiin.



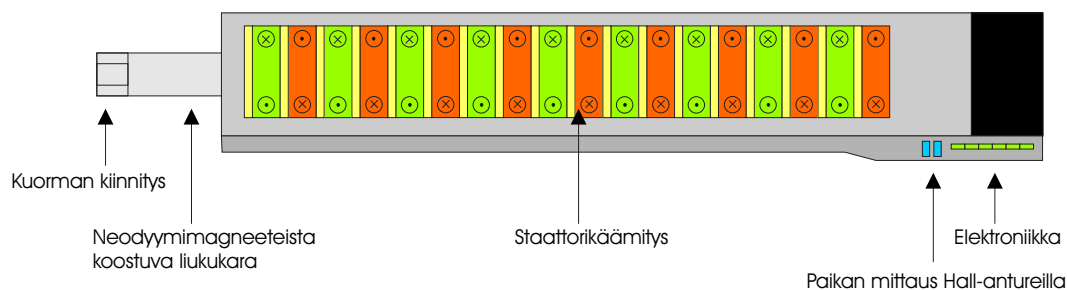
Kuva 6.2. LinMot-lineaarimoottori. [15]

LinMot-lineaarimoottoreita käytetään tavallisesti sovelluksissa, joissa tarvitaan nopeita asetus-, nosto- tai liukuliikkeitä. Tällaisia tarpeita on esimerkiksi kappaleetavarateollisuudessa käytettävissä laitteissa. Monimutkaisemmissa servosovelluksissa moottoreita voidaan käyttää korvaamaan pneumaattiset

sylinterit. Tällöin paineilmaa ei tarvita ja paikoitus saadaan aikaan yksinkertaisesti. [15]

6.5.1 Lineaarimoottorien toimintaperiaate

Lineaarimoottorit koostuvat staattorista ja liukukarasta. Staattorissa sijaitsevat metalliputkeen integroidut käämitykset, liukulaakerit sekä paikka- ja lämpötila-anturit. Kuvassa 6.3 näkyvät tärkeimmät lineaarimoottorin rakennosat. Kaikki osat on valettu staattorirunkoon ja ne ovat sen vuoksi hyvin suojassa vahingoittumiselta ja lialta. Liukukara koostuu ruostumattomasta teräksestä tehdystä putkesta, johon magneetit on kiinnitetty. Liukukaran molemmissa päissä on kierteitetty reikä kuorman kiinnittämistä varten. Moottorin rakenteesta johtuen staattorin ja liukukaran välillä ei ole sähköistä kytkentää. Myös paikanmittaus tehdään kosketuksetta käyttämällä magneettikenttää mittaavia Hall-antureita.



Kuva 6.3. Lineaarimoottorin rakenne [15]

6.5.2 Lineaarimoottorien servovahvistin

Lineaarimoottorien ohjaus ei onnistu yhtä yksinkertaisesti kuin tavallisten pyörivien servomoottorien ja ne tarvitsevat saman valmistajan servovahvistimen. Servovahvistimeksi valittiin LinMotin toimittama E2010-VF, joka pystyy antamaan moottoreille riittävän suuren virran maksimitehon saavuttamiseksi. Servovahvistin on esitetty kuvassa 6.4. Vahvistimessa itsessään ei ole servosäätöä, vaan sen avulla voidaan moottoreille antaa haluttu nopeus-

tai voimaohje, joka syötetään vahvistimelle jänniteviestinä. Takaisinkytkentää varten servovahvistimelta saadaan simuloituna enkooderilähtönä paikatieto. Moottorien ohjaamiseksi haluttuun paikkaan tarvitaan kolmannen osapuolen valmistama servo-ohjain tai tietokoneeseen liitettävä servokortti.



Kuva 6.4. Lineaarimoottorien servovahvistin

6.5.3 Servovahvistimen asetusten valitseminen

Servovahvistimelle tulee valita oikeat asetukset, jotta ne vastaavat käytettävien moottorien vaatimuksia. Vahvistimen parametrit asetetaan LinMot Commander-ohjelmalla ja asetukset ladataan vahvistimelle tietokoneen COM-portin kautta. Tällä tavalla asetetut parametrit on tarkoitus asettaa servovahvistimen käyttöönoton yhteydessä ja niitä ei ole tarkoitus muuttaa jatkuvasti vahvistimen käytön aikana. Tässä sovelluksessa tarvittavien parametrien asetukset on kuvattu liitteessä B.

Servovahvistin tarkkailee myös koko ajan eri akselien tilaa sekä kriittisiä arvoja. Mikäli jokin sallituista raja-arvoista ylitetään, aiheutuu siitä huomautus tai virheilmoitus. Nämä tilanteet tallentuvat vahvistimen muistiin aika-leiman kanssa, jolloin ne voidaan myöhemmin lukea sieltä. Mikäli jostain

syystä aiheutunut häiriö on niin vakava, että se tulkitaan virheeksi, katkaisee vahvistin tämän akselin virran syötön. Virhe voidaan poistaa LinMot Commander-ohjelmalla tai sammuttamalla vahvistin.

6.6 Rotaatioenkooderit

Demonstraatiolaitteen tärkeä ominaisuus on, että käyttäjät voivat itse osallistua peliin ja päästä ohjaamaan palloa kuperan tason päällä. Tätä tarkoitusta varten tarvitaan käsiohjaimet, joiden avulla levyä voidaan kallistella haluttuihin asentoihin. Käsiohjaimet oli yksinkertaisinta toteuttaa käyttämällä rotaatioenkoodereita, joilta voidaan lukea niiden pyörimiskulman muutokset kahtena eri pulssisignaalina ja näiden signaalien vaihe-erosta voidaan päätellä enkooderin pyörimissuunta.

Rotaatioenkoodereita valittaessa huomioitiin mahdollinen laitteen kovakourainen käyttö. Tämän vuoksi enkoodereiksi hankittiin Siko:n valmistamat IG07-rotaatioenkooderit, jotka soveltuvat vaativiin ympäristöihin.

IG07-rotaatioenkooderi on esitetty kuvassa 6.5.



Kuva 6.5. Siko IG07 rotaatioenkooderi.

6.7 Servo-ohjain

Servo-ohjaimeksi hankittiin National Instrumentsin PXI-7344, joka on neliakselinen servo/askelmoottoriohjainkortti. Tällä kortilla on mahdollista oh-

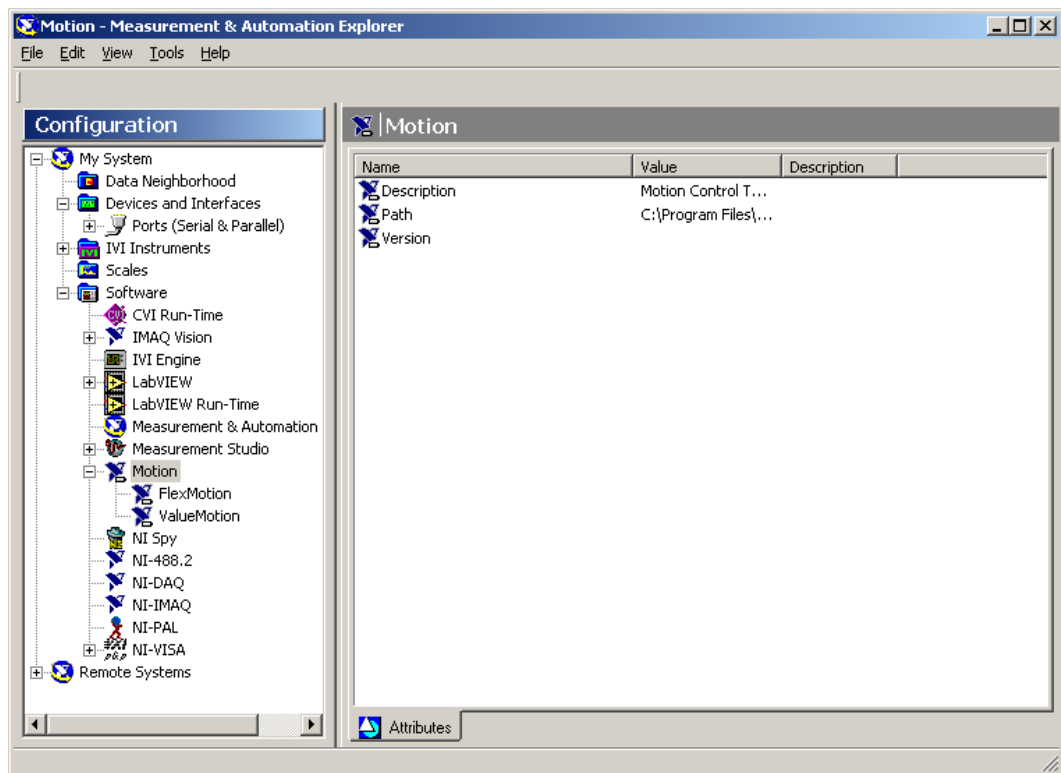
jata kahta lineaariservoa sekä lukea paikkatietoa kahdelta rotaatioenkooderilta, joita käytetään käsiohjauksen toteuttamiseen. Servo-ohjainkortti liittyy suoraan järjestelmää ohjaavan tietokoneen PXI-väylään ja sille voidaan antaa komentoja tietokoneen ohjelmistolla. Servokortilla on oma prosessorinsa, jonka avulla se pystyy tekemään PID-säätöä huomattavasti nopeammin kuin järjestelmää ohjaava tietokone pystyy antamaan sille uusia ohjeita. Tämä mahdollistaa sen, että käytännössä servosäätö tapahtuu kokonaan PXI-7344-kortilla ja tietokoneelta annetaan vain uusia referenssipisteitä, joihin moottorit halutaan ajaa. Servosäädön jaksonaika on $250\mu s$, kun käytössä ovat kaikki kortin neljä akselia ja säädössä esiintyvät viiveet ovat niin pieniä, että niitä on ihmisen käytännössä mahdotonta huomata.

Servokortti liittyy servo-ohjaimeen kytkentärasian kautta. Lineaarimoottorien servovahvistimelta tulevat signaalit ja sinne lähtevät signaalit johdetaan UMI-7764-kytkentärasiaan, joka liitetään servokortille omalla kaapelillaan. Kytkentärasiaan liitetään myös kaikki muut laitteet kuten rotaatioenkooderit ja mahdolliset rajakytkimet. Kytkentärasiaassa on lisäksi muutamia ylimääräisiä digitaalisia ja analogisia I/O-lähtöjä omien sovellusten toteuttamiseksi. Näillä voidaan tarvittaessa ohjata esim. merkkivaloja tai lukea ohjauspainikkeen tila.

6.8 Servo-ohjaimen asetusten valitseminen

National Instrumentsin PXI-7344-servo-ohjain on tarkoitettu mahdollisimman yleiskäyttöiseksi siten, että sillä voidaan ohjata monien eri valmistajien servokäyttöjä. Tämän vuoksi servo-ohjaimelle on valittava asetukset aina tapauskohtaisesti, jotta ne vastaavat siihen liitettävien laitteiden vaatimuksia. Servo-ohjaimen asetusten valitsemiseen käytetään Measurement & Automation Explorer-ohjelmaa, jonka avulla voidaan asettaa kaikki tarvittavat parametrit. Samalla ohjelmalla voidaan myös suorittaa servosäätimen PID-parametrien virittäminen ja järjestelmän testaus. Kuva 6.6 esittää asetusten valintaympäristöä.

6.8 Servo-ohjaimen asetusten valitseminen



Kuva 6.6. NI Measurement & Automation Explorer.

6.8.1 PID-säätimen virittäminen

Servo-ohjain on eri toimittajan valmistama kuin lineaarimoottorit ja niiden servovahvistin. Tämän vuoksi ei tarvittavia PID-säätimen viritysparametreja ole suoraan saatavilla sovelluksessa käytettävälle moottorityypille.

Servokortille voidaan valita sopivat asetukset eri moottorityypeille käyttämällä siihen tarkoitettua ohjelmaa. Samalla asetetaan myös moottorien PID-säätimen viritysparametrit. On syytä huomata, että viritysparametrien vääränlaiset arvot saattavat johtaa moottoreiden epästabiiliin käyttäytymiseen.

Sopivat PID-säätimen parametrit täytyy etsiä ennen kuin moottoreita voidaan ohjata järkevästi. Parametrien virittäminen on kuitenkin työlästä pelkästään kokeilemalla. Tämän vuoksi servojen mallintaminen on tarpeen, jonka jälkeen niille voidaan hakea sopivat viritysparametrit simulointien ja LQ-probleeman ratkaisun pohjalta (katso luku 4).

Kun säätimen kertoimet on saatu laskettua, on ensin selvitettävä, miten ne muunnetaan oikeaan muotoon. On esimerkiksi huomioitava, että moottoreille ei voida suoraan kertoa halutun voiman suuruutta, vaan voimaohje annetaan jännitteenä. Oikeanlaisten kertoimien laskemiseksi tarvitsee selvittää, millaisia muunnoksia ohjaussuurelle täytyy tehdä. Servovahvistimen ohjeessa kerrotaan esimerkiksi, millä arvolla jänniteohje täytyy kertoa, että siitä saataisiin moottorin antama voima. Servokortin käyttöohjeessa puolestaan kuvataan, miten PID-säätimen eri termit riippuvat luetusta enkooderitiedosta. Näitä tietoja yhdistelemällä voidaan muodostaa yhtälöt servokortille syötettävien viritysparametrien laskemiseksi.

Säätimessä P-termi määrittelee palauttavan voiman, joka on suoraan verrannollinen paikkavirheeseen. Servosäädin laskee joka näytteenottovälillä uuden paikkavirheen ja siitä edelleen P-termin suuruuden. P-termin kertoimen johtamiseksi tarvitaan servokortin ohjeesta löytyvä kaava ulostulojännitteen laskemiseksi. [16]

$$V_p = \frac{20V}{2^{16}} K_p e_{lm}, \quad (6.1)$$

jossa K_p on P-termin vahvistuskerroin ja e_{lm} on paikkavirhe enkooderilukemana. Lisäksi tiedetään, että LinMotin servo-ohjain ottaa sisään jänniteohjeen joka on välillä $[-10V, 10V]$. Suurimmalla mahdollisella ohjausjännitteellä saadaan moottoreilta voima, joka on 204N. Näistä voidaan laskea, että vahvistus jännitteen ja voiman välillä on $G_v = \frac{204N}{10V}$.

On myös otettava huomioon, että paikkavirhettä laskettaessa käytetään paikkavirheen yksikkönä enkooderilta saatuja askelia. Lineaarimoottorin servovahvistimen parametreja aseteltaessa on määriteltävä yhden askeleen pituudeksi $50\mu m$. Jos halutaan muuntaa askeleet metrijärjestelmään, täytyy enkooderilta saatu paikkatieto kertoa askeleen pituudella.

Selkein tapa muodostaa yhteys laskettujen kertoimien ja servo-ohjaimelle ohjelmoitavien kertoimien välille on kirjoittaa yhtälö ohjausvoiman suuruudesta. Tästä yhtälöstä voidaan ratkaista, miten P-termin kerroin on muunnettava.

$$\frac{20V}{2^{16}} G_v K_p e_{lm} = k_1 e_{lm} d_s \quad (6.2)$$

Yhtälössä k_1 on Matlab-ohjelmalla laskettu P-termin kerroin ja d_s on lineaarimoottorin enkooderin askeleen pituus. Kun tästä yhtälöstä ratkaistaan K_p , saadaan:

$$K_p = \frac{2^{15}}{204N} k_1 d_s. \quad (6.3)$$

Samalla tavalla täytyy menetellä, kun lasketaan kerroin D-termille. Servokortin ohjeissa on määritelty, että jänniteohje riippuu seuraavan yhtälön mukaisesti servon nopeudesta: [16]

$$V_d = \frac{20V}{2^{16}} K_d (s_{lm}(t_0 + T_d) - s_{lm}(t_0)), \quad (6.4)$$

jossa K_d on D-termin vahvistuskerroin, T_d on derivaatan laskentaväli ja $s_{lm}(t)$ on lineaarimoottorin karan paikka. Yhtälön (6.4) pohjalta voidaan kirjoittaa vastaava yhtälö kuin P-termiä laskettaessa ja siitä voidaan edelleen ratkaista, miten laskettu D-termin vahvistus tulee muuntaa, kun se syötetään servokortin PID-säätimelle. Muunnos voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$K_d = \frac{2^{15}}{T_d 204N} d_s k_2. \quad (6.5)$$

Yhtälössä (6.5) k_2 on Matlab-ohjelmalla laskettu derivaattatermin kerroin. T_d :n arvoa voidaan muuttaa servokortin parametreja asetettaessa ja sen avulla voidaan pienentää D-termin aiheuttamia häiriöitä.

Kun tiedetään, miten lasketut kertoimet voidaan muuntaa sopivaan muotoon, kirjoitetaan ohjelma kertoimien laskemiseksi. Ennen kertoimien syöttämistä servo-ohjaimelle, muodostetaan simulointimalli, jolla voidaan tarkastella järjestelmän käyttäytymistä lasketuilla kertoimilla. Kertoimien arvoiksi saadaan $K_p = 61.7$ ja $K_d = 528.9$. Parametrien virittäminen todellisuudes-

6.8 Servo-ohjaimen asetusten valitseminen

sa aivan edellä esitettyjä arvoja vastaavaksi johtaa hyvään vasteeseen, mutta haittana on, että suuri derivaattatermi aiheuttaa moottoreissa narisevaa ääntä ja sen vuoksi sitä halutaan käytännössä vähän pienentää.

Luku 7

Konenäkö

Sovelluksesta johtuen pallo voi liikkua tason päällä vapaasti joka suuntaan. Tämä tekee pallon paikantamisesta vaikean tehtävän ilman visuaaliseen paikantamiseen perustuvia menetelmiä. Konenäköön perustuva pallon paikan määrittäminen osoittautui toimivaksi ratkaisuksi ja sen avulla pallo voidaan luotettavasti tunnistaa levyn pinnalta. Tässä kappaleessa perehdytään pallon paikan mittaamisessa käytettyyn konenäköjärjestelmään ja sen eri komponentteihin.

7.1 Kamera

Kameraksi valittiin konenäkösovelluksiin tarkoitettu Sony XC-55, joka pystyy ottamaan kuvia 30HZ:n taajuudella. Kamera on esitetty kuvassa 7.1. Tärkeää kameraa valittaessa oli, että kamera on progressiivinen: se pystyy tallentamaan koko kuvamatriisin informaation kerralla talteen ja lähettämään sen kuvankaappauskortille. Mikäli tällaista ominaisuutta ei olisi, vääristyisi pallon muoto nopeassa liikkeessä ja pallon tunnistaminen vaikeutuisi. Kameran muita hyviä puolia ovat sen pieni koko ja kevyt paino.

Kameran liittämiseksi tietokoneen kuvankaappauskorttiin tarvitaan kytkentälaatikko. Kytkentälaatikko on tyyppiä JB-77 ja se on myös Sonyn valmista-

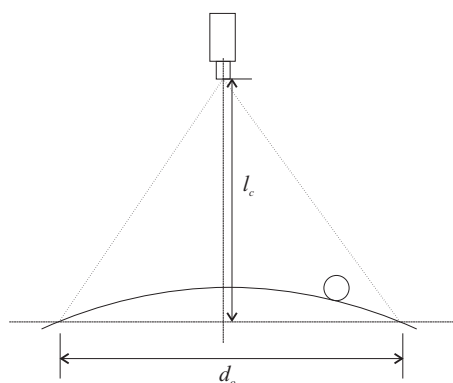


Kuva 7.1. Sony xc-55 konenäkökamera.

ma. Kamera liitetään kytkentälaatikkoon suoraan 12-napaisella kaapelilla ja videosaanaali voidaan viedä kytkentälaatikolta kuvankaappauskortille tavallisella BNC-kaapelilla. Kytkentälaatikossa on myös liittimet kameral tarvitseman käyttöjännitteen syöttämiseksi. Kameran virtalähteenä toimii 24 voltin virtalähde, jonka jännite pudotetaan DC-DC-muuntimella 13,5 volttiin.

7.2 Linssi

Sony XC-55 kamerassa ei tule vakiona linssiä mukana, vaan sopiva linssi on valittava sovelluksen mukaan. Linssin valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat mm. kuvattavan kohteen etäisyys ja halkaisija. Tässä tapauksessa halutaan kuvata pallo alustalta, jonka halkaisija on 70cm. Kameran etäisyys kuvattavasta kohteesta on noin 100cm ja koko kohteen tulee näkyä samalla kertaa kuvassa. Kuva 7.2 havainnollistaa tilannetta.



Kuva 7.2. Linssin mitoitus.

Kuvan 7.2 mukaisessa tilanteessa tarvittava linssin polttoväli voidaan laskea seuraavalla kaavalla [13]

$$f = \frac{l_c h_i}{d_o}. \quad (7.1)$$

Yhtälössä (7.1) l_c on objektiivin etäisyys kuvattavasta kohteesta, h_i on CCD-kennon koko pystysuunnassa ja d_o on alustan halkaisija. Tässä tapauksessa $l = 1000\text{mm}$, $h_i = 3.6\text{mm}$ ja $d = 700\text{mm}$, jolloin halutuksi linssin polttoväliksi saadaan $f = 5.14\text{mm}$. Linssin valinnassa on hyvä ottaa huomioon, että myös kuvattavan kohteen ympäristöä tulisi näkyä hiukan kuvassa. Tällöin kameran kohdistaminen ei vaadi liian suurta tarkkuutta ja haluttu kuva-ala voidaan rajata ohjelmallisesti.

Linssiksi valittiin Rainbow'n valmistama kiinteällä polttovälillä oleva linssi S4.8 1.8, joka on esitetty kuvassa 7.3. Tällä valinnalla kuvattavan alueen kooksi tulee $d = 750\text{mm}$, jolloin alustan molemmille puolille jää sopivasti reuna-aluetta.



Kuva 7.3. Rainbow S4.8 1.8 linssi.

Säädettävän polttovälin linssin käyttö olisi myös mahdollista ja tällöin polttoväli olisi voitu säätää juuri halutun suuruiseksi. Tällaiset linssit ovat kuitenkin suurikokoisempia ja kalliimpia kuin kiinteän polttovälin linssit. Linssiä valittaessa on myös hyvä ottaa huomioon mahdollinen valaistusolosuhteiden vaihtelu. Mikäli ulkopuolisen valaistuksen intensiteetti olisi vaihdellut liian paljon, olisi automaattisella iiriksellä varustettu linssi ollut todennäköisesti hyvä ratkaisu.

7.3 Valaistus

Valaistuksen huolellinen suunnittelu osoittautui tärkeäksi, jotta laitteen toiminta voitiin taata vaihtelevissa ympäristöissä. On mahdollista, että laite viedään hämärästä nurkasta kattoikkunan alle, josta tulee aurinkoisena päivänä paljon valoa. Tavoitteena oli, että laite pystyy toimimaan häiriöttömästi molemmissa ympäristöissä.

Valaistuksen toteuttamisessa harkittiin monia eri vaihtoehtoja, joista voidaan mainita esimerkiksi loisteputkivalaistus, halogeenivalot ja valodiodivalaistus. Tärkeimpinä valintakriteereinä olivat riittävä valoteho, pitkä huoltoväli, valaisimen pieni koko ja pieni lämmön tuotto. Tasainen valon tuotto on myös tärkeä ominaisuus, koska kameran suljinaika joudutaan pitämään pienenä kuvattaessa nopeasti liikkuvaa palloa. Lisäksi valaisin tuli olla mahdollista sijoitella siten, että kamera voidaan asentaa suoraan levyn keskipisteen yläpuolelle.

Halogeenivalojen hyvänä puolena on niiden monipuolinen tarjonta ja suhteellisen pieni koko, mutta niitä olisi todennäköisesti tarvittu useampia tasaisen valon saamiseksi. Halogeenilamppujen kestoikä on tyypillisesti vain 2000-3500 tuntia ja se on jatkuvaan käyttöön tarkoitettuna liian lyhyt. [14] Muita haittoja ovat huono hyötysuhde ja polttimoiden suuri toimintalämpötila.

Konenäkökomponentteja toimittavat yritykset markkinoivat valodiodivalaisimia, joissa on asennettuna useita valodiodeja renkaaksi. Valodiodivalaisimien hyviä puolia olisivat olleet niiden pitkä kestoikä ja hyvä hyötysuhde, mutta ne ovat tarkoitettu lyhyemmille etäisyyksille ja ne eivät pysty vielä tarjoamaan riittävää valotehoa. Riittävän valotehon saavuttamiseksi valodiodeja olisi tarvittu suuri määrä ja valaisin olisi käytännössä jouduttu valmistamaan itse.

Eri vaihtoehtojen vertailun jälkeen päädyttiin korkeataajuiseen loisteputkivalaisimeen, jossa normaaleille loisteputkille ominainen välkkyminen poistetaan elektronisella liitäntälaitteella. Valaisimeksi valittiin Sitecon valmistama, muodoltaan pyöreä Lunis-R valaisin. Valaisimessa on Osramin valmis-

tama rengasmainen loistelamppu, jonka teho on 55 W ja käyttöikä 12000 tuntia. Kuvassa 7.4 näkyy pyöreä loisteputkivalaisin kattoon asennettuna, jolloin siitä näkyy ainoastaan alapuoli.



Kuva 7.4. Lunis-R valaisin.

Valaisimen matalan rakenteen vuoksi se sopii hyvin kattorakenteiden sisään ja sille ei tarvitse erikseen varata suurta tilaa. Valaisin on suunniteltu siten, että sen keskelle jäävään tyhjään tilaan voidaan asentaa erilaisia laitteita. Tämän vuoksi kamera saatiin asennettua kuvattavan kohteen keskipisteen yläpuolelle ja kameran ympärillä oleva valaisin tarjoaa tasaisen valon.

7.4 Pallon tunnistaminen

Jotta kameran kuvasta saatavaa tietoa voidaan käyttää säädössä hyväksi, täytyy pallo tunnistaa jollakin menetelmällä kuvassa näkyvästä taustasta. Tunnistamisen helpottamiseksi taustan väri valittiin vaaleaksi ja pallo tumman siniseksi, jolloin kontrasti on hyvä. Haluttiin kuitenkin, että laitteen ulkonäkö olisi viimeistelty ja tämän vuoksi alustalevyn pinta lakattiin kiiltäväksi. Kiiltävä lakkapinta aiheutti odotetusti heijastuksia ja ne oli otettava huomioon pallon tunnistusmenetelmää valittaessa.

Labview-ohjelmistoon hankittiin konenäön toteuttamista varten IMAQ Vision paketti, jossa ovat tarjolla yleisimmät konenäkösovelluksissa käytettävistä menetelmistä. Eri menetelmien kokeileminen ja vertailu onnistui tällä

ohjelmistolla hyvin. Vertailemalla eri menetelmien nopeutta ja tunnistuksen luotettavuutta voitiin tutkia, millä tavoin palloa kannattaa etsiä alustalta.

Tunnistusmenetelmistä luotettavimmaksi osoittautui hahmonsovitusalgoritmiin perustuva menetelmä, koska sitä käytettäessä ulkopuolisen valaistuksen aiheuttamat intensiteetin vaihtelut eivät vaikuta huomattavasti tunnistuksen onnistumiseen. Hahmonsovitusalgoritmin kykyä tunnistaa pallo kameran kuvasta testattiin hämärässä valaistuksessa sekä kirkkaassa päivän valossa ja molemmissa tapauksissa laite toimi lähes yhtä hyvin.

Laitteen toimintavarmuus voidaan kuitenkin säätää mahdollisimman hyväksi, mikäli tiedetään ulkopuoliset valaistusolosuhteet. Kameran iiriksen suuruus tulee tällöin asettaa valaistusolosuhteiden mukaan ja tunnistettavasta kohteesta tulee ottaa uusi kuva hahmonsovitusta varten.

7.5 Hahmonsovitusalgoritmin toiminta, IMAQ Vision

Hahmonsovitusmenetelmällä identifioidaan kuvasta piirteitä, jotka vastaavat pienempää mallikuvaa. Hahmonsovituksella pystytään kohtalaisen hyvin erottelemaan mallikuvaa vastaavat kohdat huonosta valaistuksesta, kohinasta, sumeudesta, rotaatiosta tai siirtymästä riippumatta. Hahmonsovitus on varsin monikäyttöinen menetelmä konenäkösovelluksissa sen muunneltavuuden vuoksi. Samaa algoritmia käyttämällä voidaan useimmiten erotella täysin erilaisia kappaleita tai tehdä tarkastusmittauksia.

National Instrumentsin Imaq Vision-paketissa mukana tuleva hahmonsovitusprosessi sisältää kaksi eri vaihetta. Ensimmäinen vaihe on ns. opetusvaihe, jossa tunnistettava kohde valitaan ja tästä otettu mallikuva käsitellään. Tämä voidaan suorittaa off-line-toimintona. Toinen vaihe on hahmonsovitus ja se suoritetaan yleensä reaaliajassa. [17]

7.5.1 Opetusvaihe

Opetusvaiheessa kohteesta otettu mallikuva analysoidaan, jotta löydetään sellaiset piirteet, joita voidaan käyttää tehokkaaseen hahmonsovitukseen. Opetusvaiheessa mallikuva voidaan näytteistää uudelleen ja samalla pudottaa merkittävästi tarvittavien laskutoimitusten määrää. Tämän vaiheen ansiosta saavutetaan huomattavasti parempi suorituskky kuin perinteisillä harmaasävyjen korrelaatiomenetelmillä. Perinteisissä menetelmissä ei ole olleenkaan oppimisvaihetta ja niissä mallikuvaa verrataan suoraan jokaiseen tutkittavan kuvan eri kohtaan 2D-korrelaatiota käyttämällä.

Hahmonsovitusalgoritmin tehokkaan käytön kannalta on hyvä ymmärtää periaatteet, joiden mukaan algoritmi toimii. National Instrumentsin hahmonsovitusalgoritmissa käytetään opetusvaiheessa seuraavia menetelmiä:

- Pseudo-random-näytteistäminen: Jos mallikuva näytteistettäisiin käyttämällä tasaista ruudukkoa, voisi joitakin tärkeitä piirteitä, esimerkiksi vaak- tai pystysuoria reunoja, jäädä huomioimatta. Täysin satunnaisella näytteistämällä on se huono puoli, että välillä sillä asetetut pisteet saattavat kasaantua ja mallikuvaan jää suuria näytteistämättömiä alueita. Pseudo-random-menetelmä mahdollistaa näytepisteiden tasaisen sijoittumisen ilman säännöllistä taulukkoa.
- Stabiilisuusanalyysi: Pseudo-random-menetelmällä valittujen pisteiden ympäristö tutkitaan ja verrataan ympäröivien pisteiden samankaltaisuutta näytepisteeseen. Jokainen piste luokitellaan sen mukaan kuinka suuri sen stabiili ympäristö on (esim. 3×3 tai 5×5 , jne.). Tätä tietoa voidaan käyttää hyväksi laskutoimitusten määrän vähentämiseksi vertailuvaiheessa.
- Piirteiden tunnistaminen: Viimeiseksi mallikuvalle tehdään vielä reunantunnistusoperaatio. Reunojen sijaintia käytetään hyväksi paikkatiedon tarkentamisessa.

- Rotaatiosta riippumaton analyysi: Jos tutkittavasta kuvasta täytyy löytää kääntynyt versio alkuperäisestä mallikuvasta, opetusvaiheessa hankitaan tietoa, jota voidaan käyttää tähän tarkoitukseen. Tämä tarkoittaa, että mallikuvasta otetaan ympyrämäisiä intensiteettiprofiileita. Pyörähtäneellä kappaleella on tämä sama profiili, mutta se on siirtynyt pyörähdyskulmasta riippuvan määrän.

Opetusvaihe on suhteellisen monimutkainen ja kuvan opettelu saattaa kestää monimutkaisilla ja suurilla kohteilla useita sekunteja. Tämä vaihe täytyy tehdä kuitenkin vain kerran ja tulokset voidaan tallentaa tiedostoon myöhempää käyttöä varten. [17]

7.5.2 Sovitusvaihe

Sovitusvaiheessa käytetään hyväksi opetusvaiheessa kerättyä tietoa, jotta saadaan poistetuksi mahdollisimman paljon turhia laskutoimituksia. Kun paikannettavaa kohdetta etsitään konenäkökameralta saatavasta kuvasta, käytetään seuraavaa menettelyä:

1. Ensimmäisessä vaiheessa lasketaan korrelaatio käyttämällä pseudo-random-menetelmällä näytteistettyjä pisteitä. Stabiilisuusanalyysin tuloksia käytetään tässä vaiheessa hyväksi, jotta tiedetään kuinka monta pikseliä voidaan kerrallaan siirtyä ilman, että menetetään mitään tärkeää tietoa. Ensimmäisen vaiheen tuloksena saadaan hahmoehdokkaiden joukko ja niiden karkea paikkatieto.
2. Toisessa vaiheessa tutkitaan ensisijaisesti vain ensimmäisessä vaiheessa saatuja hahmoehdokkaita. Opetusvaiheessa tehdyn reunantunnistuksen tuloksien avulla tarkennetaan jokaisen kohteen paikkatieto ja lopuksi lasketaan vielä pisteytys, joka kuvaa tunnistuksen hyvyttä. Pisteytyksen laskeminen perustuu korrelaatioon ja sen avulla käyttäjä voi määritellä rajan, jota huonommat tulokset hylätään. [17]

7.5.3 Tunnistettavan kohteen valinta

Tunnistettavan kohteen valinnalla voi olla suuri merkitys tunnistuksen nopeudelle sekä tarkkuudelle. Joitakin tärkeitä seikkoja on hyvä huomioida, kun käytetään yllä mainittuja algoritmeja.

- Tunnistettavan kohteen tulisi olla riittävän epäsymmetrinen, mikäli sen paikkatiedon lisäksi halutaan määrittää myös sen kulma.
- Jos mallikuva on liian yksinkertainen, saadaan harhaanjohtavia tunnistuksia. Tämän vuoksi mallikuvassa tulee olla riittävästi yksityiskohtia, jotta kohde voidaan yksiselitteisesti paikantaa.
- Mallikuvan tulee sisältää riittävästi informaatiota, jotta kohteen x - ja y -suuntainen paikka voidaan määrittää. Tämän vuoksi mallikuvan tulee sisältää piirteitä sekä vaaka- että pystysuunnassa. [17]

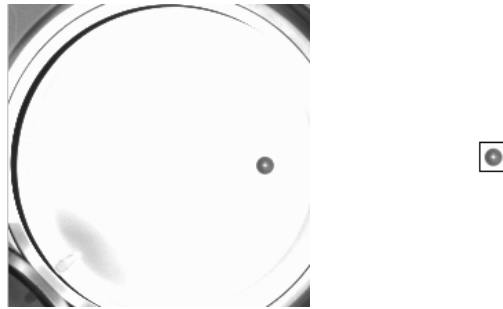
7.6 Korrelaatiomenetelmä

Tarkastellaan vielä vertailun vuoksi pallon paikantamista pelkän korrelaatiomenetelmän perusteella, jossa ei käytetä tunnistettavan kuvan piirteitä hyväksi. Matlabilla voidaan havainnollistaa, miten pallon tunnistaminen onnistuu tätä menetelmää käyttämällä. Korrelaatiomenetelmässä etsitään kuvasta aluetta, joka antaa parhaan korrelaation etsittävän kohteen kanssa. 2D-korrelaatio lasketaan kaavalla [10]

$$r = \frac{\sum_i \sum_j (E_{ij} - \bar{E})(F_{ij} - \bar{F})}{\sqrt{\left(\sum_i \sum_j (E_{ij} - \bar{E})^2\right) \left(\sum_i \sum_j (F_{ij} - \bar{F})^2\right)}}, \quad (7.2)$$

jossa E_{ij} ja F_{ij} ovat matriiseja, joiden välinen korrelaatio halutaan laskea. Korrelaatiomenetelmän kokeilemista varten voidaan kirjoittaa ohjelma, joka käy koko kuvan läpi ja laskee 2D-korrelaation jokaiselle kuvan eri kohdalle.

Tarkastellaan esimerkkinä kuvaa, jossa pallo on kuvattu konenäkökameralla. Kuva 7.5(a) on alkuperäinen kuva, josta on rajattu pallon mallikuva korrelaation laskemista varten. Kuva 7.5(b) esittää alkuperäisestä kuvasta rajattua aluetta, jota käytetään korrelaation laskemisessa.



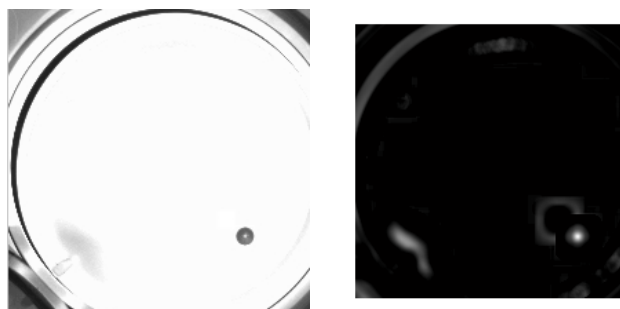
(a) Alkuperäinen kuva

(b) Mallikuva

Kuva 7.5. Alkuperäinen kuva, josta on valittu tunnistettava kohde.

Yritetään seuraavaksi paikantaa pallo eri ajanhetkellä otetusta kuvasta 7.6(a). Kun kuville suoritetaan korrelaation laskenta, saadaan tulokseksi matriisi, joka kuvaa korrelaatioita tutkittavan kuvan eri pisteissä. Tulosta voidaan havainnollistaa piirtämällä siitä kuva, jossa tummat sävyt vastaavat pientä korrelaatiota ja vaaleat sävyt kuvaavat suurta korrelaatiota. Tulokseksi saadaan kuva 7.6(b), josta nähdään, että suurin korrelaatiopiikki osuu kuvassa 7.6(a) näkyvän pallon kohdalle.

Korrelaation laskeminen kuvan jokaiselle pisteelle on laskennallisesti raskas operaatio ja osoittautuukin, että tällä menetelmällä ei päästä tavoiteltuun näytteenottotaajuuteen ilman muutoksia. Tässä tapauksessa laskenta kesti 96,5 sekuntia ja se on huomattavasti liian pitkä aika. Tehokkaampi tapa tehdä sovitusta olisi käyttää 2D-FFT-muunnosta.



(a) Kuva, josta palloa etsitään (b) Korrelaation kuvaaja

Kuva 7.6. Kohteen tunnistaminen uudesta kuvasta.

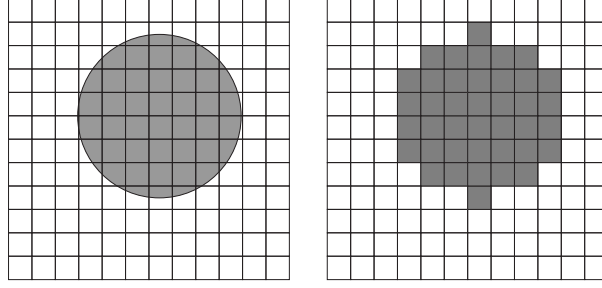
7.7 Pallon paikannuksen tarkkuus

Kuten edellisessä kappaleessa todettiin, käytetään pallon paikantamiseen National Instrumentsin valmista hahmonsovitusalgoritmia. Koska algoritmi on monivaiheinen ja siitä ei ole tarkempaa kuvausta saatavilla, on käytännössä hankalaa arvioida virhettä, joka aiheutuu pallon paikan mittaukseen.

Viitteessä [12] on esitetty, että yksidimensioisen tarkastelun pohjalta voidaan johtaa yksinkertainen arvio pallon paikan mittauksen tarkkuudelle. Tätä arviota virheen suuruudesta voidaan käyttää ylärajana ja hahmonsovitusalgoritmin käytöstä aiheutuvan virheen voidaan ajatella sisältyvän tähän arvioon.

Karkea arvio virheen suuruudesta voidaan esittää tekemällä oletus, että pallon paikannus tapahtuu binäärisestä kuvasta, jossa vaaleat pisteet vastaavat taustaa ja tummat pisteet niitä ruutuja, joissa tumman pallon peittämä alue ylittää annetun kynnsarvon. Kuvassa 7.7 on esimerkki binäärikuvan muodostumisesta.

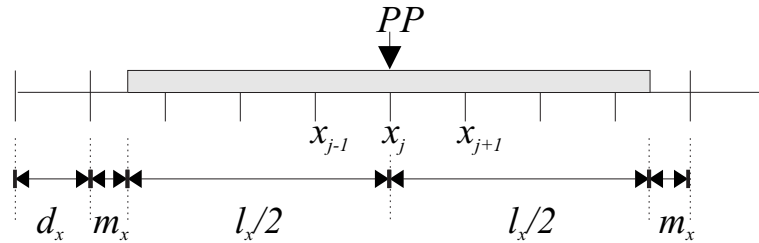
Kun kappaleen painopiste lasketaan binäärikuvasta, aiheutuu tästä satunnaisvirhettä kappaleen paikan määrittymiseen. Tarkasteltava kappale on tässä tapauksessa pallon muotoinen, jolloin on selvää, että x - ja y -akselien virhejakaumat ovat identtiset ja virheen x - ja y -komponentit eivät korreloi.



Kuva 7.7. Binäärikuvan muodostuminen. Kynnysarvoksi on oletettu 50%.

Viitteessä [12] on johdettu tulos, jossa esitetään, että kappaleen mittauksen tarkkuus paranee, mikäli mittaus tehdään kahdessa dimensiossa. Demonstraatiolaitteen tapauksessa halutaan kuitenkin vain laskea karkea arvio virheen ylärajalle, jota voidaan käyttää lähtökohtana Kalman-suodatinta suunniteltaessa. Tarkastellaan sen vuoksi kappaleen painopisteen mittausvirhettä yksidimensioisessa tapauksessa.

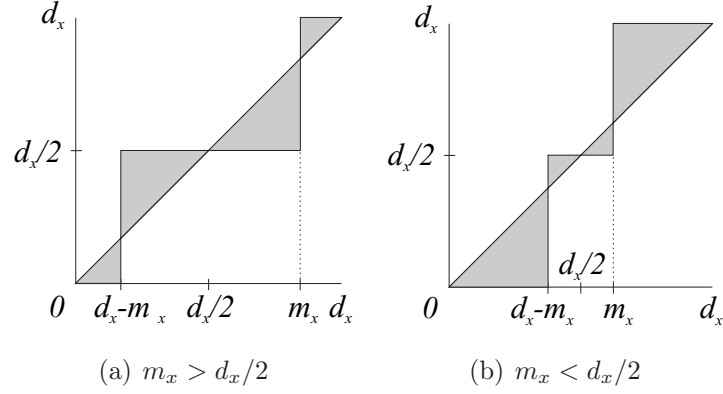
Tarkastelun lähtökohdaksi otetaan sauva, jonka pituus on l_x ja joka voi sijaita mielivaltaisesti akselilla x . Akseli on diskretoitu d_x :n pituisiin väleihin. Jos sauva peittää jostakin välistä yli $p\%$, tulkitaan tämä väli kuuluvaksi kappaleeseen. Merkintöjen yksinkertaistamiseksi valitaan $p = 0$, joka ei kuitenkaan rajoita tarkastelun yleisyyttä. Mittausvirheen jakaumaan vaikuttaa tällöin se, kuinka lähellä sauvan pituus on jotain diskreetointivälin monikertaa. Oteetaan käyttöön merkintä $m_x = nd - l_x/2$, missä kokonaisluku n on valittu siten, että $0 \leq m_x < d_x$. Kuva 7.8 havainnollistaa tilannetta.



Kuva 7.8. Sauvan pituuden suhtautuminen diskreetointivälin monikertaan.

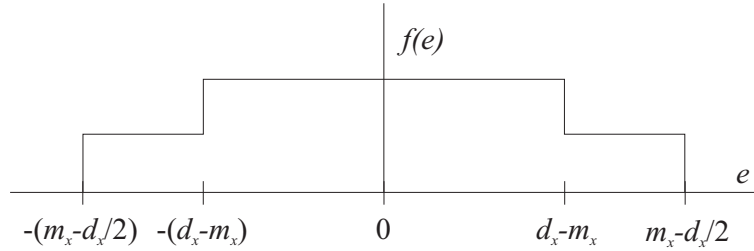
Painopisteen mittausvirheen jakauma saadaan nyt selville seuraavalla tarkastelulla. Asetetaan sauvan painopiste ensin pisteeseen x_j . Siirretään pai-

nopistettä yhden rasterivälin ylitse pisteeseen x_{j+1} ja lasketaan mitatun, eli binäärikuvasta saatavan ja todellisen painopisteen erotus kussakin pisteessä tällä tarkasteluvälillä. Tarkastelu on esitetty graafisesti seuraavissa kuvissa.



Kuva 7.9. Todellinen painopiste liikkuu yhden diskreetointivälin yli 0:sta pisteeseen d_x . Mitattua painopistettä esittää kuvissa näkyvä murtoviiva. Mittausvirhe on esitetty kuvissa tummennettuna.

Kuvan 7.9 perusteella nähdään, että yleisessä tapauksessa virhejakauma on kahden tasaisen jakauman yhdistelmä. Kuvan 7.9(a) tilannetta vastaava virhejakauma on esitetty kuvassa 7.10.

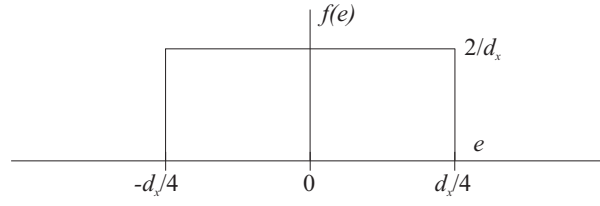


Kuva 7.10. Painopisteen mittausvirheen jakauma.

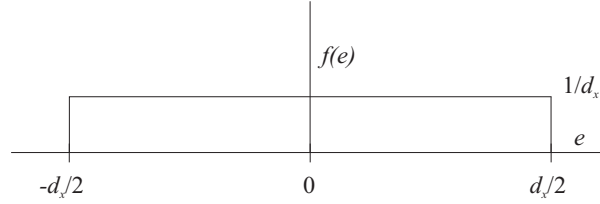
Edelleen voidaan päätellä, että edullisin virhejakauma saadaan, kun $m_x = d_x/4$ tai $m_x = 3d_x/4$ ja epäedullisin tapaus saadaan, kun $m_x = 0$ tai $m_x = d_x/2$. Seuraavissa kuvissa on havainnollistettu epäedullisimman sekä edullisimman tapauksen virhejakaumat. [12]

Virheen varianssi saadaan kaavasta:

$$\sigma^2 = E[X^2] - (E[X])^2. \quad (7.3)$$



(a) Paras virhejakauma



(b) Huonoin virhejakauma

Kuva 7.11. Paras ja huonoin mahdollinen virhejakauma

Odotusarvo lasketaan puolestaan kaavalla:

$$E[X] = \int_{-\infty}^{\infty} X f(x) dx, \quad (7.4)$$

jossa X on satunnaismuuttuja. [11]

Nyt voidaan laskea, että parhaassa tapauksessa virheen varianssi on $\sigma^2 = d_x^2/48$ ja keskihajonta $\sigma = d_x/(2\sqrt{12}) \approx 0.144d_x$. Huonoimmassa tapauksessa varianssi on $\sigma^2 = d_x^2/12$ ja keskihajonta $\sigma = d_x/\sqrt{12} \approx 0.289d_x$. [12]

Todellisessa järjestelmässä kuvattavan kohteen halkaisija on 700 mm. Kuvattava kohde mahtuu kokonaan 472×472 pikselin kokoiselle alueelle, jolloin yhtä pikseliä vastaa todellisuudessa mitta $d_x \approx 1.48\text{mm}$. Tällöin variansseille saadaan vastaavasti arvot $\sigma_{max}^2 \approx 0.183\text{mm}^2$ ja $\sigma_{min}^2 \approx 0.045\text{mm}^2$, joista maksimiarvoa voidaan pitää Kalman-suodattimen suunnittelussa mittauskohinan varianssin lähtöarvona. On kuitenkin hyvä huomata, että tässä tarkastelussa johdettu virhejakauma on tasaisesti jakautunut. Tarkasti ottaen virhejakauman tulisi olla Gaussisesti jakautunut, jotta Kalman-suodatin antaisi optimaalisen tilaestimaatin.

Luku 8

Laitteen viimeistely

Diplomityön tavoitteena oli myös viimeistellä laite näyttelykuntoon. Vaikka projekti oli edennyt ensimmäisen vaiheen aikana hyvin, oli demonstraatiolaitteessa vielä paljon yksityiskohtia, joista piti huolehtia, ennen kuin laite oli valmis. Tässä kappaleessa on tarkoitus käsitellä muita kuin säätötekniikkaan ja konenäköön suoraan liittyviä asioita, jotka veivät kuitenkin huomattavan osan työajasta.

8.1 Mekaniikka

Suurin osa viimeistelyä vaativista kohteista liittyi laitteen mekaniikkaan. Huolellisella viimeistelyllä pyrittiin varmistamaan demonstraatiolaitteen häiriötön toiminta ja kestävyys. Seuraavaksi käsitellään lyhyesti tärkeimmät kohdat, jotka vaativat viimeistelyä.

8.1.1 Mekaaniset rajat

Laitetta testattaessa sen mekaanisessa puolessa havaittiin muutamia kohtia, jotka tarvitsivat parantelua. Ensimmäinen huomio oli, että moottoreille tulisi lisätä mekaaniset alarajat, jotta alustalevyn reuna ei pääse missään tilantees-

sa ottamaan kiinni moottorien runkoon. Rajat tehtiin teflonmuovista ja ne asennettiin moottorien karojen ja moottorin rungon yläpään väliin. Muoviset rajoittimet toimivat samalla iskunvaimentimina, kun laite sammutetaan ja moottorien karat pääsevät putoamaan vapaasti alas.

8.1.2 Keskinivel

Projektin alkuvaiheissa pidettiin tärkeänä, että keskinivel saataisiin mahdollisimman lähelle alustalevyn keskipistettä. Tämän vuoksi keskiniveleksi valittiin ensin pienehkö nivel, joka alkoi kulua huolestuttavasti muutaman kymmenen tunnin käytön jälkeen. Kasvanut vällys oli havaittavissa lisääntyneenä levyn heilahteluna ja vaikutti siltä, että pieni nivel ei kestä näyttelykäytössä riittävän pitkään.

Käytännön kokeiden perusteella osoittautui, että nivelkohtaa ei välttämättä tarvitse saada kovinkaan lähelle levyn alapintaa vaan säätö toimii yhtä hyvin suurempaa niveltä käytettäessä. Nivel korvattiin varmuuden vuoksi huomattavasti isommalla versiolla, joka on kestänyt 150 tunnin koekäytön ilman havaittavia kulumia.

8.1.3 Painonapit

Laitteen ohjaamiseksi tarvitaan rotaatioenkoodereiden lisäksi kaksi eri nappia, joiden avulla käyttäjä voi halutessaan tasapainottaa pallon keskelle ja antaa laitteelle käskyn ajaa erilaisia ratoja. Painonappien valinnassa kiinnitettiin erityistä huomiota niiden kestävyys- sekä ulkonäköön. Tavoitteena oli löytää napit, jotka kestävät kulutusta ja joita ei saa rikki. Tähän tarkoitukseen valittiin napit, jotka on erityisesti suunniteltu kovaan käyttöön.

8.1.4 Sähkötyöt

Mekatroniikan projektin aikana laitteeseen tehtiin sähkökaappi, johon asennettiin suurin osa tarvittavista sähkölaitteista. Kameraa ja valaistusta ei kuitenkaan tässä vaiheessa ollut hankittu ja sähkötyöt niiden osalta voitiin tehdä vasta hankinnan jälkeen. Sähkötöihin kuului myös jokaisen metallisen osan maadoittaminen, koska se on erityisen tärkeää näyttelylaitteen turvallisuuden kannalta.

8.1.5 CE-hyväksyntä

Näyttelylaitteen tulee täyttää CE-merkinnän vaatimukset, jotta se voidaan viedä yleisölle esiteltäväksi. Vastaavaa laitetta ei ole rakennettu aikaisemmin ja tämän vuoksi sen CE-hyväksynnästä täytyi huolehtia erikseen. Projektin aikana jokaisesta hankitusta sähkölaitteesta kerättiin talteen niiden hyväksymismerkinnät ja näin voitiin osoittaa, että demonstraatiolaitteessa on käytetty turvallisiksi todettuja komponentteja. Koko laitteelle CE-merkinnän myöntää Heureka, jos laitteen todetaan olevan turvallinen, eikä se aiheuta häiriöitä ympäristöönsä.

Heureka vaatii CE-merkinnän edellyttämät täydelliset sähköpiirustukset laitteesta ja tämän vuoksi sähkökuvien päivittäminen kuului myös laitteen viimeistelyyn. Laitteen sähköistyksestä laadittiin piirustukset CAD-pohjaisella ohjelmalla.

8.1.6 Ulkopinnan levyt

Alkuperäiset laitteeseen hankitut levyt eivät vastanneet laadultaan ja ulkonäöltään laitteelle asetettuja tavoitteita ja ne vaihdettiin uusiin. Sivulevyt suunniteltiin uudelleen ja materiaaliksi valittiin savunväriäinen polykarbonaattilevy. Uudet levyt ovat läpinäkyviä, joten kiinnostuneille näyttelyvieraille tarjoutuu mahdollisuus tarkastella laitteen mekaanista rakennetta

ja toimintaa. Samasta materiaalista tilattiin myös laitteen katon peitelevyt sekä laitteen sisälle tulevat peitelevyt.

8.1.7 Katon suunnittelu

Katon suunnittelussa lähdettiin liikkeelle siitä, että laitteen ulkonäöstä haluttiin mahdollisimman sopusuhtainen ja kaunis. Katon muotoilussa päätettiin säilyttää sama kahdeksankulmainen linja, joka jo aikaisemmin valittiin laitteen alarunkoon. Lisäksi haluttiin, ettei katosta pääse muodostumaan liian hallitsevaa osaa ja se pyrittiin pitämään mahdollisimman ohuena ja kevyen näköisenä.

Muotoilussa päädyttiin ratkaisuun, joka on hiukan epäsymmetrisen kahdeksankulmion muotoinen. Katto on halkaisijaltaan pienempi kuin rungon alaosaa, ettei se korostu liikaa. Katon korkeuden määrittivät lampun tarvitsema tila sekä kameran ja linssin korkeus.

Katto mallinnettiin ProEngineering-ohjelmalla ja siitä tehtiin 3D-CAD-malli. Kun katosta oli tehty täydellinen 3D-malli, oli huomattavasti helpompaa etsiä sopiva toimittaja jyrättävälle kappaleelle. Katon materiaaliksi valittiin MDF, josta suurten kappaleiden jyräminen onnistuu. Katto teetettiin 3D-mallin pohjalta 5 akselisella NC-jyrsinkoneella yrityksessä, joka on erikoitunut vastaavanlaisiin töihin. Kun osa oli jyrsitty valmiiksi, sen sovittamisessa paikoillensa ei ollut ongelmia.

Katon sisälle tulevien rungon osien ja kameran kiinnikkeiden suunnittelussa käytettiin myös 3D-mallinnusta. Kameran sijoittelussa oli tärkeää, että se saadaan asennettua alustalevyn keskikohdan yläpuolella ja 3D-mallintamisen avulla oikea paikka voitiin määrittää tarkasti. Kamera kiinnitettiin runkoon erityisellä nivelrakenteella, joka sallii sen kääntelemisen eri suunnissa. Kiinnikkeiden kohdan laskeminen oli huomattavasti helpompaa, kun koko laite oli mallinnettu ja mallista voitiin suoraan määrittää haluttu paikka.

8.1.8 Pintakäsittely ja maalaus

Viimeistellyn ulkonäön saavuttamiseksi kaikki näkyvät metalli- ja puuosat pintakäsiteltiin. Pintakäsittelymenetelminä käytettiin anodisointia ja maalausta. Anodisointia käytettiin alumiinisten käsipyörien viimeistelyyn ja menetelmällä saatiin näyttävä ja halutun värinen pinta. MDF:stä valmistettujen osien maalaaminen oli haastavaa ja huolellisiin pohjatöihin kului paljon aikaa.

Luku 9

Yhteenveto

Tässä diplomityössä kehitettiin säätötekniikan perusasioita ja epästabiilin prosessin säätöä havainnollistava demonstraatiolaite. Työ tehtiin Teknillisen korkeakoulun Systeemitekniikan laboratoriossa. Työhön kuului laitteen säätösuunnittelu, konenäköjärjestelmän suunnittelu ja toteuttaminen, säätöohjelmiston kehittäminen sekä laitteen viimeistely ja dokumentointi.

Säätösuunnittelu aloitettiin muodostamalla prosessille dynaaminen malli, joka kuvasi sen käyttäytymisen riittävällä tarkkuudella. Mallin pohjalta järjestelmän ominaisuuksia analysoitiin sekä arvioitiin säätöjärjestelmälle asetettavia vaatimuksia. Dynaaminen malli oli myös lähtökohta säätösuunnittelulle ja sen pohjalta laskettiin järjestelmän ohjaukseen tarvittavat säätimet.

Epästabiilin prosessin säädössä on säätimen riittävän suuri kaistanleveys tärkeä edellytys hyvälle tulokselle. Tässä tapauksessa säätöohjelmisto kehitettiin niin nopeaksi, että laitteistosta on mahdollista saada paras mahdollinen suorituskky. Rajoittavaksi tekijäksi muodostui kameran kyky ottaa uusia kuvia 30Hz:n taajuudella, mutta tämä riittää käytännössä takaamaan hyvän suorituskvyn.

Säätimenä järjestelmässä käytettiin LQ-säätäjää, jonka kertoimet laskettiin dynaamisen mallin pohjalta. Kertoimia laskettaessa säätimen suorituskkyä analysoitiin eri menetelmillä ja tällä tavalla pyrittiin löytämään sopivalta

vaikuttavat parametrit. Suunnittelun tuloksena toimivat ratkaisut rajattiin tietylle vaihteluvälille. Simulointien avulla testattiin säätöratkaisujen toimivuus, ennen kuin niitä sovellettiin varsinaisen laitteen ohjaukseen.

Kertoimien viimeinen hienosäätö tehtiin ajamalla todellisella laitteella rata-ajo- ja askelvastekokeita. Valittaessa sopivimpia säätimen kertoimia, kiinnitettiin eniten huomiota hallittuun käyttäytymiseen ja riittävän nopeaan vasteeseen. Tavoitteena oli, että laite pystyy tasapainottamaan pallon levyn keskipisteeseen huomattavasti nopeammin kuin ihminen, mutta samaan aikaan säädön tuli käyttäytyä rauhallisen ja hallitun näköisesti. Käytännössä suurimmasta saavutettavissa olevasta suorituskyvystä tingittiin vähän, jotta miellyttävän näköinen käyttäytyminen ja hyvä toimintavarmuus saavutettiin.

Pallon tilan estimointiin sovellettiin Kalman-suodatinta. Kalman-suodattimen avulla kameralta saatavasta mittaustiedosta ja ohjaussuureesta voitiin estimoida pallon paikka ja nopeus hyvällä tarkkuudella. Riittävän hyvien estimaattien muodostaminen on tärkeä edellytys hyvän säätötuloksen saavuttamiseksi. Suodattimen virityksessä käytettiin LTR-tekniikkaa, jonka avulla avoimen silmukan siirtofunktiota muokattiin sellaiseksi, että se täyttää vaatimukset suorituskyvystä. Herkkyysfunktioita analysoimalla voitiin päätellä sopiva alue, jolla kohinan varianssien tuli olla. Kalman-suodattimen hienosäätö tehtiin todellisella prosessilla tehtyjen koeajojen perusteella.

Yhtenä projektin tavoitteena oli pallon ohjaaminen erilaisia ratoja pitkin. Simulointien perusteella todettiin, että LQ-säätimen referenssipistettä muuttamalla ei päästä kovin hyviin vasteisiin, etenköön kun pallon piti liikkua nopeasti. Paremman tuloksen saavuttamiseksi tarkasteltiin radanseurantaan liittyvää ongelmaa ja ratkaistiin ennalta tiedetylle radalle ohjaussuure, jonka avulla radan seuraaminen onnistuu.

Säätöjärjestelmän suorituskyyä analysoitiin tekemällä sille askelvastekokeita ja testaamalla radanseuranta erilaisten ratakäyrien tapauksissa. Verrattaessa todellisesta järjestelmästä saatuja vasteita simulointimallin perusteella laskettuihin vasteisiin, voitiin päätellä, että järjestelmän mallintaminen ja

säätösuunnittelu olivat onnistuneet hyvin. Todellisesta järjestelmästä mitatut askelvasteet vastasivat hyvin simuloituja tuloksia ja mallin todettiin kuvaavan prosessin tärkeimmät ominaisuudet. Teorian pohjalta lasketut tulokset olivat suoraan sovellettavissa todelliseen järjestelmään ja voitiin todeta, että matemaattinen malli ja säätöteoria antavat vahvan pohjan säätöratkaisun suunnittelulle.

Järjestelmän toimintaa testattaessa mielenkiinnon kohteena olivat myös mahdolliset ristikkäisvaikutukset pallon eri liikesuuntien välillä, koska dynaamisen mallin lähtökohtana oli oletus, että liikesuunnat ovat toisistansa riippumattomia. Koeajojen perusteella pyrittiin selvittämään, voidaanko tämä oletus tehdä, vai aiheuttavatko mahdolliset ristikkäisvaikutukset häiriöitä säätöpiirissä. Tuloksia tarkasteltaessa ei kuitenkaan pystytty löytämään mitään tähän viittaavaa ja säätö toimi yhtä hyvin määritellyssä liikesuunnassa riippumatta tätä suuntaa vastaan kohtisuoran suunnan liiketilasta. Esitettyjen tulosten pohjalta voidaan perustellusti väittää, että olennaista parannusta säätötulokseen ei voitaisi saavuttaa ristikkäisvaikutusten mallintamisella.

Toimiva säätö edellyttää riittävän hyvän mittauksen pallon paikasta. Pallon paikan mittaaminen toteutettiin konenäön avulla. Kameralta saatavasta kuvasta pallo tunnistetaan hahmonsovitusta käyttämällä ja tämä menetelmä osoittautui luotettavaksi. Pallo pystytään tunnistamaan, vaikka ulkoiset valaistusolosuhteet vaihtelisivat kirkkaasta päivänvalosta lähes pimeään. Konenäön toiminnan varmistamiseksi oma valaisin oli kuitenkin tarpeen ja valaistusratkaisuksi valittiin korkeataajuuksinen loisteputkivalaisin.

Tärkeä edellytys projektin onnistumiselle oli luotettavan ohjelmiston kehittäminen näyttelykäyttöä varten. Ohjelmointityössä huomioitiin mahdolliset väärinkäyttötilanteet ja ohjelmasta kehitettiin sellainen, ettei sitä voi käyttää tavalla, josta olisi haittaa laitteelle. Ohjelmistoa ja käyttöliittymää suunniteltaessa kiinnitettiin erityisesti huomiota käytettävyyteen ja tavoitteena oli, että laitteen toiminnan pystyy ymmärtämään ilman käyttöohjeita.

Laitteen mekaniikan ja ulkonäön viimeistelyyn käytettiin myös paljon työaika. Tavoitteena oli tehdä Teknillisen korkeakoulun osaamista edustava näyttelykohde, jolloin teknisten ratkaisujen miettimisen ja säätösuunnittelun lisäksi viimeistely ulkonäkö ja tarkoitukseen sopiva muotoilu ovat tärkeitä kriteereitä lopputulosta arvioitaessa. Laitteen viimeistelystä huolehdittiin sillä tarkkuudella, ettei siihen jäänyt yhtään kohtaa, joka olisi tarvinnut tehdä paremmin.

Projektia voidaan pitää onnistuneena kaikista näkökulmista tarkasteltuna. Laite saatiin toteutettua suunnitellun aikataulun ja budjetin puitteissa ja se täyttää sille asetetut odotukset suorituskyvyn ja edustavuuden suhteen. Laite on osoittautunut kiinnostavaksi kohteeksi ja sen avulla pystytään selkeästi demonstroimaan takaisinkytketyn säädön perusideoita. Koekäytössä laite on osoittautunut varmatoimiseksi ja sen huollon tarve on vähäinen.

Projektia voidaan pitää myös oppimistavoitteiden kannalta onnistuneena. Projekti oli monialainen ja se tarjosi haasteita mekaniikan suunnittelusta säätöteorian soveltamiseen ja konenäköön asti.

Lähdeluettelo

- [1] Jaakko Pöyhönen, Terhi Ylöstalo: *Outoja vempelitä Heurekassa, Automaatioväylä 6/2003*, Automaatioväylä OY (2003)
- [2] Roger Sandell: *Tietokonepohjaisten näyttelykohteiden laatuvaatimukset*, Heureka (2003)
- [3] Halliday Resnick Walker: *Fundamentals of Physics*, Wiley & Sons (2001)
- [4] Ferdinand P. Beer and E. Russell Johnston, Jr.: *Statics and Dynamics*, McGraw-Hill (1962)
- [5] Torkel Glad and Lennart Ljung: *Control Theory*, Taylor & Francis (2000)
- [6] Frank L. Lewis and Vasilis L. Syrmos: *Optimal Control*, John Wiley & Sons (2000)
- [7] A.E. Bryson and Y.C. Ho: *Applied Optimal Control*, Hemisphere (1975)
- [8] Sigur Skogestad and Ian Postlethwaite: *Multivariable Feedback Control*, John Wiley & Sons (2000)
- [9] Mohinder S. Grewal and Angus P. Andrews: *Kalman Filtering*, Prentice-Hall (1993)
- [10] The MathWorks, Inc: *Matlab, Image Prosessing Toolbox 4.1*, The MathWorks, Inc (2003)
- [11] J.S. Milton and Jesse C. Arnols: *Introduction to Probability and Statistics*, McGraw Hill (1995)
- [12] Kari Koskinen: *Liikkuvan kappaleen kiinniottaminen visuaalisella sensorilla varustetulla robotilla*, Teknillinen korkeakoulu, Sääätötekniikan laboratorio (1977)

- [13] Rainbow CCTV: <http://www.rainbowcctv.com/tech/index.htm>, (24.9.2003)
- [14] Oy Osram Ab: <http://www.osram.fi/lamps/halogen.html>, (24.9.2003)
- [15] LinMot: *LinMot lineaarimoottorit*, (2003)
- [16] National Instruments: *PXI-7344 Motion Controller Reference Manual*, (24.9.2003)
- [17] National Instruments: <http://zone.ni.com/devzone/conceptd.nsf/webmain/>, (7.10.2003)
- [18] Mikko Sääskilahti: *Demonstraatiolaitteen hahmotelma*, (2003)

Liite A

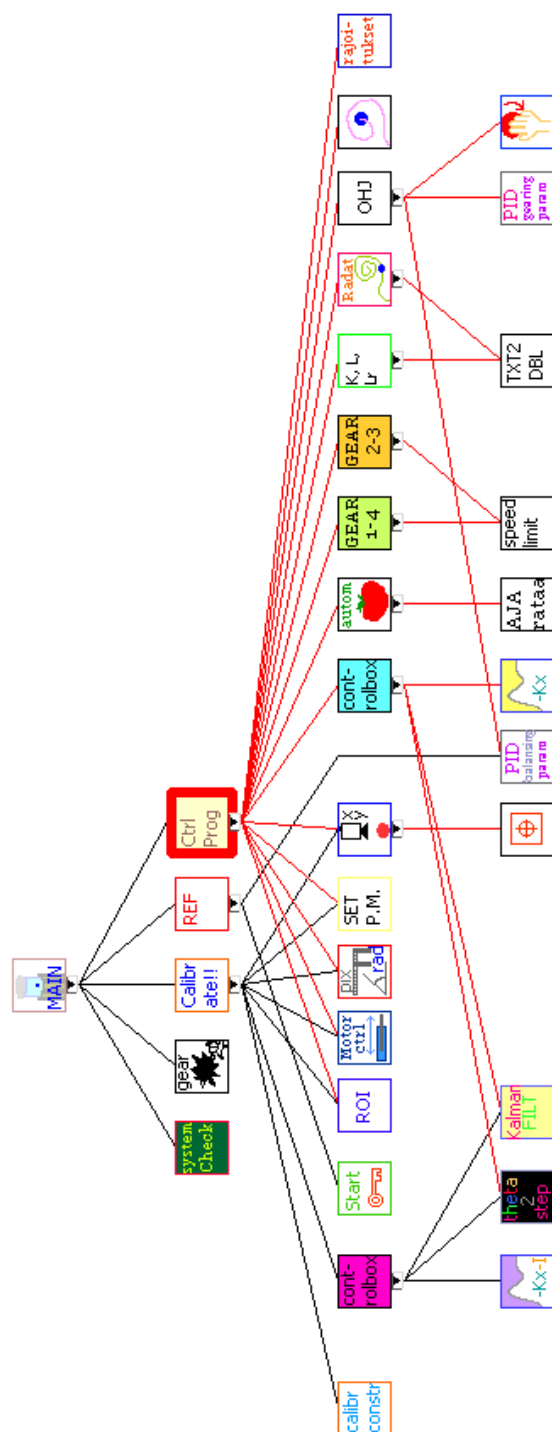
Säätöohjelma

Pallon tasapainotuslaitetta ohjaa ohjelma, joka on kirjoitettu LabVIEW'lla. Tässä liitteessä käsitellään pääpiirteittäin demonstraatiolaitetta ohjaavan ohjelmiston rakenne ja toiminta.

A.1 Ohjelman rakenne

Ohjelman rakenteen selkeyttämiseksi LabVIEW'ssa on mahdollista muodostaa aliohjelmia, joita voidaan kutsua pääohjelmasta. Näin voidaan käyttää hyödyksi rakenteisen ohjelmoinnin tarjoamia etuja ja ohjelmointi voidaan jakaa pienempiin, erillisiin osiin.

LabVIEW osaa tulostaa muodostetusta ohjelmasta rakennekaavion, josta näkyy, miten eri funktiot liittyvät toisiinsa. Tällaisen hierarkkisen kuvauksen avulla on helpompaa hahmottaa ohjelman rakenne ja ymmärtää ohjelman toiminta. Kuvassa A.1 on esitetty demonstraatiolaitteen säätöohjelman rakennekaavio.



Kuva A.1.1. Ohjelman rakenne esitettyinä puumaisen kaavion avulla.

A.2 Aliohjelmat

Rakennekaaviosta nähdään, että ohjelma koostuu pääohjelmasta ja 33 eri aliohjelmasta. Laitteen toiminnan ymmärtämisen kannalta on oleellista tietää, mitkä aliohjelmien tehtävät ovat. Käsitellään seuraavaksi lyhyesti jokainen aliohjelma.



Pääohjelma

Pääohjelma koostuu sekvenssistä, jossa on neljä eri vaihetta. Ensimmäisessä vaiheessa suoritetaan servojärjestelmän alustus ja moottorit ajetaan referenssiin. Tämän vaiheen lopuksi tarkastetaan konenäöllä, että kaikki näyttää olevan kunnossa ja referenssiin ajo on onnistunut. Toisessa vaiheessa suoritetaan laitteen kalibrointi, jonka tarkoituksena on poistaa jatkuvan tilan virhe. Kolmanneksi alustetaan gearing-toiminto, jota tarvitaan käsiohjauksen toteuttamiseksi ja viimeisessä vaiheessa siirrytään suorittamaan pallon tasapainotuksen tekevää säättöohjelmaa.



Käynnistys

Aliohjelmalla alustetaan servo-ohjain Measurement & automation explorer-ohjelmalla asetettujen parametrien mukaisesti. Käynnistysohjelma huolehtii myös siitä, että servovahvistimen enable-tulo käytetään kerran ei-aktiivisessa tilassa. Tämä on turvallisuustoimenpide, jonka servovahvistin vaatii aina kun siitä katkaistaan virta.



Referenssiin ajo

Paikkatieto saadaan lineaarimoottoreilta suhteellisena enkooderilukemana, joka tarkoittaa sitä, että moottorit on aina järjestelmän käynnistyttyä ajettava referenssipisteeseen. Vasta tämän jälkeen voidaan tietää luotettavasti liikkuvien karojen paikat.

Referenssiin ajettaessa moottorien karoja ajetaan ensin hitaasti ulospäin, jonka jälkeen molemmat moottorit ajetaan erikseen kovaan alarajaan. Rajan saavuttaminen huomataan moottorien nopeutta tarkkailemalla. Kun nopeus menee nolaksi, ollaan saavutettu alaraja ja paikkalaskuri nollataan.



Alustuksen tarkastus

Kun servojärjestelmä on alustettu, tarkastetaan onnistuiko tämä toimenpide. Tämä tehdään ajamalla aliohjelma alustuksen_tarkastus, joka ottaa kameralla kuvan melkein koko alustalevyn suuruisesta alueesta ja vertaa sitä aikaisemmin otettuun kuvaan. Tässä vaiheessa huomataan, mikäli servojen alustus on epäonnistunut ja levy on jäänyt vinoon asentoon. Samalla tulee tarkastettua myös konenäköjärjestelmä.



Levyn kulman kalibrointi

Levyn kulman kalibrointi on yksinkertaistettu versio varsinaisesta säättöohjelmasta. Aliohjelman tarkoituksena on toimia ympäristönä kalibrointimittaukselle, jolla pallo säädetään aivan levyn keskipisteeseen. Ohjelmaa kutsutaan ainoastaan laitetta käynnistettäessä ja sen suoritus päättyy, kun pallo on saatu riittävän hyvin keskitettyä.



Gearing alustus

Käsiohjaus voidaan toteuttaa gearing-toiminnolla, joka on sähköinen ”vaihdelaatikko” kahden akselin välille. Toimintoa varten täytyy määritellä yhteys rotaatioenkooderien ja lineaarimoottorien välille sekä välityssuhde enkooderien ja lineaarimoottorien liikkeiden välille. Nämä parametrit asetetaan aliohjelmalla gearing_alustus ja samassa ohjelmassa asetetaan myös akseleille ohjelmarajat. Ohjelmarajat tarvitaan, jotta moottorit pysähtyisivät niihin, ennen kuin ne törmäävät mekaanisiin rajoihin.



Säättö

Kun järjestelmän alustus on suoritettu onnistuneesti, voidaan siirtyä prosessin säätöön. Tämän aliohjelman tarkoituksena on toimia ympäristönä, jossa säätöä tehdään ja se kutsuu muita säätöön tarvittavia aliohjelmia.



Tunnistuksen alustus

Ennen kuin säätöä voidaan ryhtyä tekemään, täytyy konenäköjärjestelmä alustaa nopeaa kuvankaappausta ja hahmonsovitusta varten. Konenäköjärjestelmä alustettiin jo kerran aikaisemmin laitteen kunnon tarkastusta varten, mutta siinä yhteydessä käytetyt asetukset eivät sovellu nopeaan kuvan kaappaukseen. Uudet asetukset voidaan ottaa käyttöön aliohjelmalla tunnistuksen_alustus ja sen avulla voidaan määritellä mm. kameralta otettavan kuva-alueen koko ja kuvan tyyppi. Samalla funktiolla voidaan myös määritellä, mistä tiedostosta ladataan pallon mallikuva hahmonsovitusta varten.

Konenäköjärjestelmän alustukseen liittyvät toimenpiteet ovat raskaita ja niiden suorittamiseen kuluu paljon prosessoritehoa. Tämän vuoksi on tärkeää, että kaikki alustustoimenpiteet suoritetaan säätöä tekevän silmukan ulkopuolella ja siksi tätä funktiota kutsutaan ennen kuin siirrytään säätöohjelman sisään.



Lataa radat

Rata-ajoa varten on laskettu etukäteen pisteitä, joiden kautta pallon halutaan kulkevan. Nämä pisteet on laskettu Matlab-ohjelmalla ja ne on tallennettu tekstitiedostoon. Tekstitiedostosta nämä radat ladataan säätöä tekevän ohjelman käyttöön lataa_radat-aliohjelmalla. Tämä aliohjelma lataa kerralla kaikki tallennetut ratatiedostot tietokoneen muistiin.



Muuta txt2dbl

Numeroarvojen lukemiseksi tekstitiedostosta tarvitaan sopiva aliohjelma. Muuta_txt2dbl lukee Matlabilla tallennetun pysty vektorin, kun se on tallennettu ASCII muodossa.

Aliohjelma lukee tekstitiedostosta kaikki numeroarvot ja palauttaa niistä muodostuvan taulukon sekä tiedon siitä, kuinka monta numeroa luettiin. Parametrina tälle funktiolle annetaan luettavan tiedoston nimi. Ratakäyrät tallennetaan LabVIEW'n muistiin ja niistä voidaan poimia yksittäisiä ratapisteitä indeksoimalla.



Pallon tunnistus

Pallon säätäminen perustuu kameralta saatavaan pallon paikan mittaukseen. Jotta säätöä voidaan ryhtyä tekemään, täytyy pallosta ottaa kameralla kuva ja tunnistaa siitä pallo.

Tämä aliohjelma odottaa ensin, että kameran välimuistiin on saatu luettua uusi kuva CCD-kennolta. Kun uusi kuva on tullut, luetaan se konenäkökortin avulla tietokoneen käsiteltäväksi. Seuraavaksi kuvasta etsitään palloa hahmonsovitusta käyttämällä. Mikäli pallo on tunnistettu edellisestä kuvasta, rajoitetaan pallon etsiminen viimeisen havaintopisteen ympärille. Kun pallo on tunnistettu kuvasta, tulostetaan näytölle vielä kameran ottama kuva sekä punaisella ruudulla merkitty piste, josta pallo on löytynyt.



Piirrä ristikko

Aliohjelma piirrä_ristikko piirtää punaisen neliön havaitun kohteen ympärille ja merkitsee tunnistetun kohteen keskipisteen ristillä. Piirtäminen tapahtuu latomalla määritetyt kuvat kameran ottaman kuvan päälle.



Laske ROI

Mikäli pallo on tunnistettu edellisestä kuvasta, voidaan perustellusti odottaa, että se löytyy seuraavasta kuvasta läheltä edellistä tunnistuspistettä. Hakualuetta rajaamalla voidaan säästää huomattavasti pallon etsimiseen tarvittavaa prosessoritehoa. Tämä aliohjelma rajaa pallon ympäriltä 100×100 pikselin kokoisen alueen, joka syötetään seuraavalla kerralla hahmonsovitusalgoritmin hakualueeksi.



Pallon kiertokulma

Dynaaminen malli pienelle pallolle on laskettu käyttämällä pallon kiertokulmaa, jonka yksikkö on radiaani. Tämä ei suoraan vastaa kameralta saatavaa paikkatietoa, joka saadaan pikseleinä. Yksikköjen muuntamista varten tarvitaan aliohjelma, jonka avulla kameran kuvasta laskettu paikka voidaan muuntaa pallon pyörähdyskulmaksi. Pyörähdyskulman laskemiseksi on käytetty kaavaa (3.14).



Moottorien ohjaus

Säätoalgoritmilta saadaan tieto, mihin kulmaan alustalevy halutaan kallistaa. Kun kulmatieto on muutettu moottorien enkooderilukemaksi, täytyy moottorit ajaa haluttuun pisteeseen. Moottorien ohjausta varten on kirjoitettu aliohjelma moottorien_ohjaus, jolle syötetään sisään x - ja y -suuntien moottorien haluttu asema. Tämän jälkeen aliohjelma antaa servo-ohjaimelle käskyn ajaa moottorit haluttuun pisteeseen. Uusia käskyjä annetaan jokaisella säätöväylillä, kun käsiohjaus ei ole käytössä.



Enkoodereita pyöritetään

Kun käyttäjä haluaa itse pelata peliä, täytyy laitteen tunnistaa tämä jollain tavalla. Luonnollisimmalta ratkaisulta tilanteen havaitsemiseksi

tuntui tarkkailla, pyörittääkö käyttäjä käsipyöriä ja yrittää näin ohjata laitetta. Ohjelma enkoodereita_pyöritetään tarkkailee koko ajan rotaatioenkoodereiden pyörimisnopeutta ja lopettaa tietokonesäädön heti, kun havaitaan, että joku yrittää ohjata laitetta.



Säätäjä

Säätäjä on aliohjelma, joka kokoaa selkeyden vuoksi kaikki pallon säätöön tarvittavat aliohjelmat yhteen. Tähän kuuluvat aliohjelmat tilaestimaatin, säädön sekä moottorien ohjauksen laskemiseksi.



Kalman suodatin

Kalman-suodatin on ohjelma, jolla on toteutettu tilaestimointi säätösuunnittelua käsittelevässä kappaleessa esitettyjen periaatteiden mukaisesti. On huomattava, että tämä funktio tarvitsee toimiakseen tiedon pallon edellisestä tilasta sekä käytetystä ohjauksesta. Nämä tiedot täytyy tuoda siirtorekisterin kautta, jotta ne säilyvät uudelle säätövälikille.

Kalman-suodattimella kestää muutaman näytteenottovälin pituinen aika, ennen kuin se pystyy estimoimaan tunnistetun kohteen paikan riittävän hyvin. Tämän vuoksi aliohjelmassa tarkkaillaan, että pallo tunnistetaan riittävän usein hyvän säätötuloksen takaamiseksi. Mikäli palloa ei voida tunnistaa, estimaatti heikkenee ja sen pohjalta ei voida enää tehdä säätöä. Tällöin moottoreille annetaan ohje ajaa levy vaakatasoon ja odotetaan, että pallo voidaan tunnistaa taas riittävän luotettavasti.



Tilasäädin

Tilasäädin laskee pallon tilaestimaatin perusteella, mihin kulmaan levy kannattaa kääntää, jotta pallo saadaan tasapainotettua levyn keskipisteeseen parhaalla mahdollisella tavalla. Säädin on laskettu säätö-

suunnittelua käsittelevässä kappaleessa esitettyjen periaatteiden mukaisesti.



Kalibrointi tilasäädin

Kalibroinnissa tarvitaan säätäjässä integroiva termi, jotta pysyvän tilan virhe saadaan poistettua. Kalibroinnissa käytettävä säädin on muuten rakenteeltansa vastaava kuin varsinaisen prosessin ohjauksessa käytetty säädin, mutta siihen on lisätty pieni integroiva termi, jonka ansiosta pallo saadaan tasapainotettua levyn keskipisteeseen.



Muuta theta2step

Kun säätimeltä saadaan haluttu levyn kulma, on ohjaussuure radiaaneissa. Jotta tiedetään, mihin paikkaan moottorit täytyy ajaa, on levyn kulmaohje muunnettava lineaarimoottorien enkooderilukemaksi. Muunnos tehdään kaavan (3.20) mukaisesti.



Rajoitukset

Järjestelmää testattaessa osoittautui, että stabiilin toiminnan takaamiseksi kaikissa mahdollisissa tilanteissa tarvitaan tiettyjä rajoituksia. Rajoitukset-aliohjelman tarkoituksena on estää pallon säätäminen, mikäli sen nopeus nousee liian suureksi, tai pallosta ei saada riittävän hyvää tunnistusta. Tällöin moottoreille annetaan ohjeeksi ajaa levy vaakatasoon ja järjestelmä jää odottamaan, että tilanne rauhoittuu.



Kalibrointi rajoitukset

Kalibroinnissa pyritään ajamaan pallo levyn keskipisteeseen. Kalibrointirajoitusten avulla tarkkaillaan, milloin pallo on riittävän keskellä ja jatkuvan tilan virhe on saatu poistetuksi.



Automaattiohjaus

Automaattiohjaus-aliohjelman avulla valitaan jo aikaisemmin taulukoihin luetuista ratakäyristä ne, joita halutaan ajaa. Tämän aliohjelman avulla voidaan lisätä uusia ratakäyriä ja muualle säättöohjelman sisään ei tarvitse tehdä muutoksia.



Aja rataa

Ratapisteiden lukemiseksi taulukosta tarvitaan oma aliohjelma, joka indeksoi taulukosta ratapisteitä ja syöttää nämä arvot eteenpäin säättölohkolle. Tämä ohjelma hoitaa myös sen, että rata-ajo päättyy, kun rata on saatu ajetuksi.



Gearing1_4

Sähköisen ”vaihdelaatikon” toteuttaminen on periaatteessa yksinkertaista valmiilla funktioilla. Tätä gearing-toimintoa varten täytyy kuitenkin kirjoittaa oma aliohjelmansa, sillä valmiit funktiot eivät sisällä minkäänlaisia rajoituksia ja ne eivät sovellu suoraan tähän tarkoitukseen.

Aliohjelmat gearing1_4 ja gearing2_3 huolehtivat siitä, että käyttäjä ei voi ajaa moottoreita haluttuja rajoja pidemmälle ja näin aiheuttaa haittaa demonstraatiolaitteelle. Lisäksi täytyy estää ns. wind-up-ilmiö, joka muodostuisi häiritseväksi silloin, kun rotaatioenkoodereita pyöritettäisiin edelleen, vaikka lineaarimoottori olisi jo törmännyt rajaan. Tällöin rotaatioenkooderia täytyisi pyörittää yhtä paljon vastakkaiseen suuntaan, jotta moottori lähtisi taas liikkeelle.



PID alustus gearing

Lineaarimoottoreilla on taipumus pitää gearing-toimintoa käytettäessä narisevaa ääntä, mikäli servosäätimen PID-parametreja ei virite-

tä eri tavalla kuin palloa tasapainotettaessa. Tämän vuoksi gearing-toimintoa käytettäessä PID-säätimen parametrit alustetaan uudelleen.



Gearing nopeusrajoitus

Nopeusrajoituksella pyritään estämään käsipyörien liian nopea pyörittäminen. Nopeiden liikkeiden seurauksena pallo saattaisi lentää pois alustalta ja aiheuttaa häiriön laitteen toimintaan. Mikäli käsipyöriä pyöritetään liian nopeasti, kytketään gearing-toiminto hetkeksi pois päältä.



Ohjaus

Ohjaus hoitaa järjestelmän toimintojen ohjaamisen. Ohjelman tarkoituksena on tehdä tarvittavat toimenpiteet vaihdettaessa toimintoa ja huolehtia, että käyttötarkoitukseen sopivat servojen parametrit on ladattu ohjaimelle.



Pallon piirto

Laitteen toimintaa havainnollistetaan piirtämällä kuvaruudulle pallon paikka xy -koordinaatistossa. Ohjelma pitää muistissa viimeisen tiedon pallon paikasta ja piirtää liikerataa kuvaavan viivan pallon kulkureitille. Tällä tavalla voidaan havainnollistaa säädön toimintaa ja laitteen kykyä seurata erilaisia ratakäyriä.

Liite B

Servovahvistimen asetusten valitseminen

Servovahvistimelle tulee valita oikeat asetukset, jotta sitä voidaan ohjata tietokoneessa olevalla servo-ohjaimella. Tässä liitteessä on kuvattu niiden asetusten valitseminen, jotka ovat tärkeitä servojärjestelmän toiminnan kannalta.

B.1 Parametrit

Parametrit voidaan asettaa ohjaustietokoneessa olevalla LinMot Commander-ohjelmistolla. Ohjaustietokone on yhdistetty servo-vahvistimeen RS-232-piuhalla, jonka avulla vahvistimelle voidaan lähettää tai siltä voidaan vastaanottaa tietoa. Seuraavat parametrit tulee asettaa, mikäli vahvistimen muisti pääsee jostain syystä tyhjentymään.

Configuration/Drive x/Motor Type:

Samaa servovahvistinta voidaan käyttää useiden erityyppisten lineaarimoottorien ohjaamiseen ja sillä voidaan ohjata myös askelmoottorikäyttöjä, DC-moottoreita tai magneetteja. Tämän vuoksi vahvisti-

melle tulee kertoa oikea moottorin tyyppi. Tässä sovelluksessa käytettävät toimilaitteet ovat lineaarimoottoreita, joiden tyyppi on P01-37x240/360x560. Tämän vuoksi kohtaan Motor Type tulee valita vaihtoehto LinMot P0x-37.

Configuration/Drive x/Amplifier setup/Amplifier mode:

Servovahvistin voi toimia kahdessa eri toimintatilassa jotka ovat nopeus- tai kiihtyvyysohjaus. Tämä tarkoittaa sitä, että vahvistimelle annettava jänniteohje voidaan tulkita joko nopeus- tai kiihtyvyysohjeeksi. Toimintatilan valinta riippuu ensisijaisesti servo-ohjaimen ominaisuuksista. Tässä tapauksessa servo-ohjain pystyisi ohjaamaan moottoreita molemmilla tavoilla, mutta kiihtyvyysohjeen käyttäminen on selkeämpää ja sitä suositellaan käytettäväksi myös laitteen käyttöohjeessa. Tämä on myös edullista siksi, että tällöin kaikki olennaiset säätimen toimintaan vaikuttavat parametrit voidaan muuttaa pelkästään servo-ohjaimen asetuksia valittaessa. Valitaan kohtaan Amplifier mode: Force.

Configuration/Drive x/Amplifier setup/Control parameters:

Riippuen moottorityypin valinnasta voidaan valita erilaisia parametreja. Näillä parametreilla voidaan esimerkiksi rajoittaa moottoreilta saatavaa maksimivoimaa pienentämällä suurinta sallittua virtaa. Tällaiset rajoitukset ovat tärkeitä esimerkiksi testausvaiheessa, jolloin halutaan turvallisuussyistä pitää moottorien antamat voimat kaikissa tilanteissa pienenä. Tärkeimmät kohdat ovat:

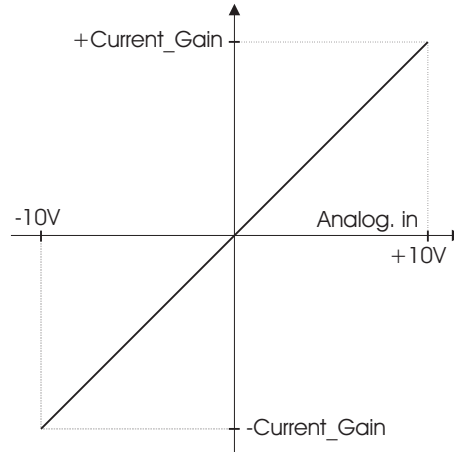
- Maximum current: Asettaa virtarajoituksen moottoreille ja määrää samalla moottoreilta saatavan maksimivoiman. Valittava virta-alue riippuu moottorin tyypistä sekä vahvistimesta. Näillä laitteilla virta voidaan valita väliltä 0-6A ja tässä tapauksessa rajoituksena käytetään arvoa 3A.
- Current offset: Offset-virtaa käytetään kompensoimaan staattisia voimia kuten esimerkiksi painovoimaa. Kun moottorit asennetaan

pystyasentoon, offset-virta voidaan laskea kaavalla (B.1).

$$I_{offset} = \frac{mg}{c_f} \quad (\text{B.1})$$

Jossa m on kannateltava massa, g on gravitaatiovakio ja c_f on moottorin tyypistä ja vahvistimesta riippuvan kerroin, joka löytyy moottorien ohjekirjasta. Tässä on käytetty arvoja $m = 1,53\text{kg}$, $g = 9.81\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ja $c_f = 40\frac{\text{N}}{\text{A}}$. Tällöin tulokseksi saadaan $I_{offset} \approx 0.38\text{A}$.

- Current gain: Tällä kertoimella määritellään suhde sisääntulojännitteen ja moottoreille lähtevän virran välillä. Yleisesti ottaen tälle parametrille olisi hyvä asettaa sama arvo kuin maksimivirrälle, jotta saturaatioilmiötä ei tapahtuisi. Tässä tapauksessa poiketaan tästä säännöstä, koska se selkeyttää muita laskuja ja moottorien maksimivirran muuttaminen on mahdollista ilman säätimen parametrien muuttamista. Kuva B.1 selvittää tämän kertoimen määrittämistä.



Kuva B.1. Current gain-kertoimen määrittäminen.

Asetetaan kertoimelle arvo $Currentgain = 6\text{A}$, jolloin 10V sisääntulojännitteellä vahvistin antaisi moottoreille maksimivirran 6A , mikäli maksimivirtaa ei olisi rajoitettu. Aikaisemmin määritetyillä arvoilla maksimivirta rajoittuu kolmeen ampeeriin ja se saavutetaan 5V sisääntulojännitteellä.

Configuration/Drive x/Amplifier setup/Advanced settings:

Ainoa parametri, jota tässä kohtaa voidaan muuttaa on Analog in offset. Tähän tulee valita arvo 0V, koska servo-ohjaimelta saatava jännite vaihtelee välillä -10V - 10V ja nollakohta on 0V:ssa.

Configuration/Drive x/Encoder simulation:

Tämä parametri asettaa simuloidun enkooderilähdön resoluution. Simuloitu enkooderilähtö perustuu aina LinMot-linearimoottorin sisäiseltä paikka-anturilta saatuu tietoon ja moottorin maksiminopeus riippuu tästä valinnasta. Vaihtoehdot simuloidun enkooderilähdön resoluutioksi vaihtelevat välillä $1\mu\text{m} - 50\mu\text{m}$. On huomattava, että tästä valinnasta riippumatta moottoreilla saavutetaan maksimissaan 0.1mm toistotarkkuus paikoituksessa, joten suurta hyötyä ei saavuteta valitsemalla enkooderien resoluutioksi pienempää arvoa kuin $50\mu\text{m}$. Resoluution kasvattaminen lisää ainoastaan häiriöitä paikkasignaaleissa ja tuloksena on moottorien äänekäs käyttäytyminen.

Configuration/Drive x/I/O logic definition:

I/O-signaalien polariteetti voidaan erikseen määritellä tässä kohdassa. Oletusarvot kelpaavat tämän kohdan valinnoiksi ja Kaikkien signaalien tulee tässä kohdassa olla invertoimattomia.