Tampereen yliopisto

Mimmi Matalamäki

REAALIAIKAISTEN LENTÄVIEN KAPPALEIDEN RATA- JA ASENTOALGORITMIEN VALINTA JA TOTEUTUS

Diplomityö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Hannu-Matti Järvinen
Tarkastaja: Markus Kettunen
Maaliskuu 2022

TIIVISTELMÄ

Mimmi Matalamäki: Reaaliaikaisten lentävien kappaleiden rata- ja asentoalgoritmien valinta ja toteutus
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Tietotekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Maaliskuu 2022

Tässä diplomityössä vertaillaan olemassa olevia lentävän kappaleen sijainnin ja asennon ennustamiseen käytettyjä algoritmeja toisiinsa ja valitaan sopivat. Lisäksi työssä toteutetaan ja otetaan käyttöön prototyyppi geneerisestä ohjelmistokomponentista, joka ennustaa lentäville kappaleille lentorataa paikka ja asentoennusteiden avulla. Työssä vertailtavat algoritmit jaetaan kahteen eri luokkaan: sijainnin ennustamisen algoritmeihin ja asennon ennustamisen algoritmeihin. Vertailtavat sijainnin ennustamisen algoritmit ovat lineaarinen ja neliöllinen polynomisovite, splinisovite, Kalman-suodin ja GM(1,1)-malli. Vertailtavat asennon ennustamisen algoritmit ovat jäykän kappaleen asennon liikeyhtälöt sekä hiukkassuodin.

Työn taustana oli tarve löytää sopivat algoritmit, joilla reaaliaikaisten lentävien kappaleiden sijaintia ja asentoa voitaisiin mahdollisimman hyvin ennustaa simulaatiossa. Lentävien kappaleiden liikkeiden ennustamista tarvitaan simulaatiossa, koska simulaattori saa osan datastaan ulkoisesta datalähteestä ja tämän ulkoisen datalähteen tuottama data päivittyy välillä hitaammin kuin mitä simulaattorissa lentävien kappaleiden simulointi tarvitsee.

Kirjallisuuskatsauksesta selvisi, että lentävien kappaleiden sijainnin ja asennon ennustamiseen ei ole olemassa vielä mitään yksiselitteistä ratkaisua. Tässä työssä ennustuskomponentti käyttää sijainnin ennustamiseen splini-sovitetta ja asennon ennustamiseen kaavoja, jotka perustuvat jäykän kappaleen asennon liikeyhtälöihin. Toteutettu ennustuskomponentti liitettiin osaksi simulaattoria, joka simuloi lentävien kappaleiden liikettä.

Työssä mitataan toteutetun ratkaisun toimivuutta neljällä eri lentävän kappaleen lentoreittityypillä: teoreettisella suoralla reitillä, jyrkästi kääntyvällä reitillä, reitillä, jolla kappaleen korkeus muuttui ja reitillä, jolla kappaleen nopeus muuttui. Tulokseksi saatiin, että toteutettu ratkaisu on käyttökelpoinen ennusteilla, jotka tehdään maksimissaan yhden sekunnin päähän reittipisteestä, jos ennustetun sijainnin tarkkuus halutaan pitää maksimissaan noin sadassa metrissä. Paras ennustustarkkuus saatiin teoreettisella suoralla reitillä ja huonoin ennustustarkkuus oli jyrkällä kääntyvällä reitillä.

Työ rakentuu seitsemästä eri luvusta. Ensimmäisenä lukuna on johdanto, toisessa luvussa käsitellään simulaatioita ja mallintamista, kolmannessa luvussa esitellään, vertaillaan ja valitaan käytettävät ennustusalgoritmit. Neljännessä luvussa esitellään mittauksissa käytettävä mittausdata ja viides luku kuvaa toteutetun ennustuskomponentin rakenteen ja liittämisen simulaattoriin. Kuudennessa luvussa on mittaustulokset esiteltynä erikseen jokaiselle neljälle eri lentoreittityypille ja seitsemäs luku on yhteenvetoluku.

Avainsanat: sijainnin ennustaminen, asennon ennustaminen, ennustuskomponentti, lentävä kappale, radan ennustaminen, algoritmit, reaaliaikainen simulointi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Mimmi Matalamäki: Choosing and implementing real time flying objects' location and pose algorithms
Master of Science Thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Information Technology
March 2022

In this thesis, location and pose prediction algorithms of flying object are compared and based on comparision the most suitable algorithms are chosen. In this thesis, generic software component prototype for predicting trajectory of flying object based on chosen algorithm was implemented. Prediction algorithms that are compared in this thesis are splitted into two different groups: location prediction algorithms and pose prediction algorithms. Location prediction algorithms are: linear and quadratic polynomial fitting, spline fitting, Kalman filter and GM(1,1) model. Pose prediction algorithms are: six degrees of freedom equations of motion of a rigid body and particle filter.

Background of this thesis was to find out suitable algorithms for predicting flying objects location and pose in realtime simulation. The target simulator required a location prediction and pose prediction of flying objects because simulator gets some of its' data from outside datasource and this datasource updates data less frequently than simulator needs data for simulating movement of flying objects.

During literature review it was founded out that there is not yet discovered what is the best way to predict flying objects' location and pose. In this thesis, implemented software component uses spline algorithm for predicting location and algorithms that are based on six degrees of freedom equations of motion of rigid body for pose prediction. Implemented software component was merged as a part of a simulator that simulates movement of flying objects.

The ability of the implemented software component to predict flying objects' fly trajectories for different routes: theoretical straight route, steep turning route, route where altitude of flying object changes and route where speed of flying object changes was measured in this thesis. Implemented software component can be used to predict flying objects' location and pose between zero and one second forward if wanted accuracy of location prediction is maximum about one hundred meters. The best prediction accuracy was on theoretical straight route and the worst prediction accuracy was on steep turning route.

This thesis consists of seven different chapters. The first chapter is introduction, and the second chapter covers simulation and modelling. The third chapter presents prediction algorithms and contains comparison of the algorithms and the selection of the most suitable algorithm for prediction problem. The fourth chapter contains data which is used on measurements and the fifth chapter covers how prediction software component is implemented and merged in simulator. The sixth chapter contains measurement results for all four different routes and the seventh chapter is a summary chapter.

Keywords: location prediction, pose prediction, prediction component, flying object, trajectory prediction, algorithms, real-time simulation

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Kiitokset Insta Advance Oy:lle mielenkiintoisesta diplomityöaiheesta ja mahdollisuudesta tehdä diplomityö. Suuri kiitos kuuluu Insta Advance Oy:n Markus Kettuselle tämän diplomityön ohjaamisesta ja avuliaista kommenteista kirjoitusprosessin aikana. Kiitos myös Tampereen yliopiston puolelta Hannu-Matti Järviselle työn ohjaamisesta. Lopuksi vielä kiitos ystäville ja perheenjäsenille, joiden henkinen tuki on ollut korvaamatonta tämän diplomityön kirjoittamisen aikana ja erityiskiitos menee vielä nuorimmalle veljelleni Veikko Järvenpäälle yleisestä energiatasoni seuraamisesta.

Tampereella, 12.03.2022

Mimmi Matalamäki

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. SIMULAATIOT JA MALLINTAMINEN 3
2.1 Matemaattinen mallintaminen 4
2.2 Lentävän kappaleen liikeyhtälöt 5
2.3 Kappaleiden liikkeiden ennustaminen 7
2.4 Harmaiden järjestelmien teoria 8
2.5 Lähes reaaliaikaisen simuloinnin haasteet 10
3. ENNUSTUSALGORITMIEN ESITTELY, VERTAILU JA VALINTA 13
3.1 Sijaintiennustealgoritmeja 13
3.1.1 Lineaarinen ja neliöllinen polynomisovite 14
3.1.2 Splini-sovite 15
3.1.3 Kalman-suodin 16
3.1.4 GM(1,1)-malli 18
3.2 Asentoennustealgoritmit 20
3.2.1 Jäykän kappaleen asennon liikeyhtälöt 20
3.2.2 Hiukkassuodatin 21
3.3 Algoritmien vertailu ja valinta 23
3.3.1 Sijainnin ennustamisalgoritmien vertailu ja valinta 23
3.3.2 Asennonennustamisalgoritmien vertailu ja valinta 26
4. MITTAUSDATA 29
4.1 Ensimmäinen reitti: Teoreettinen suora 29
4.2 Toinen reitti: Jyrkästi kääntyvä reitti 30
4.3 Kolmas reitti: Reitti, jossa korkeus muuttui 32
4.4 Neljäs reitti: Reitti, jossa nopeus muuttui 33
5. TOTEUTUS 35
5.1 Käytetyt teknologiat 35
5.2 Ennustuskomponentin toiminta ja rakenne 36
5.3 Ennustuskomponentin integrointi osaksi suurempaa järjestelmää 38
6. MITTAUKSIEN TULOKSET 41
6.1 Ensimmäinen reitti: Teoreettinen suora 41
6.2 Toinen reitti: Jyrkästi kääntyvä reitti 43
6.3 Toinen reitti: Jyrkästi kääntyvän reitin reittipisteitä eri päivitystahdilla 52
6.4 Kolmas reitti: Reitti, jossa korkeus muuttui 57
6.5 Neljäs reitti: Reitti, jossa nopeus muuttui 65
6.6 Mittaustuloksien arviointi 70
7. YHTEENVETO 75
LÄHTEET 77
LIITE A: ENNUSTUSKOMPONENTIN SEKVENSSIKAAVIO 79

KUVALUETTELO

Kuva 1. Käsitteellisen mallin yhteys oikean maailman ilmiöön [4, alikohta 1.1.1]. 3
Kuva 2. Runkokoordinaatisto [7, kohta 1.1]. 7
Kuva 3. Maailmakoordinaatisto (NED) [7, kohta 1.1]. 7
Kuva 4. Ei-reaaliaikainen simulaatio, jossa simulointi tapahtuu oikeaa aikaa nopeammin [3]. 11
Kuva 5. Ei-reaaliaikainen simulaatio, jossa simulointi tapahtuu oikeaa aikaa hitaammin [3]. 12
Kuva 6. Reaaliaikainen simulaatio, jossa simulointi on synkronoitu oikean ajan kanssa samaan tahtiin [3]. 12
Kuva 7. Kalman-suodin algoritmin peruskuvaus [15]. 17
Kuva 8. Lentokoneen kääntymis-, kallistumis- ja pituuskallistuskulmat [18]. 20
Kuva 9. Ennustuskomponentin tärkeimmät luokat. 36
Kuva 10. Ennustuskomponentin sekvenssikaavio. 37
Kuva 11. Simulaattorin koosteluokkakaavio. 39
Kuva 12. Olion simuloinnin sekvenssikaavio. 39
Kuva 13. Suoran reitin oikeat ja ennustetut reittipisteet sekunnin välein. 42
Kuva 14. Suoran reitin oikeat ja ennustetut reittipisteet 100 millisekunnin välein 2. 42
Kuva 15. Jyrkän reitin oikeita ja ennustettuja reittipisteitä 10 sekunnin ajalta. 44
Kuva 16. Jyrkän reitin oikeita ja ennustettuja reittipisteitä 4 sekunnin ajalta. 45
Kuva 17. Jyrkän ennustettuja reittipisteitä 100 millisekunnin välein. 47
Kuva 18. Ennustettuja reittipisteitä luotuna kolmesta eri oikean reitin reittipisteestä sadan millisekunnin välein. 48
Kuva 19. Etäisyys metreissä ennustettujen pisteiden ja oikean pisteen välillä. 49
Kuva 20. Korkeuserot metreissä ennustettujen pisteiden ja oikean pisteen välillä. 49
Kuva 21. Ennustettujen pisteiden etäisyydet oikeaan pisteeseen verrattuna 10 sekuntiin asti. 50
Kuva 22. Ennustettujen pisteiden korkeuserot oikeaan pisteeseen verrattuna 10 sekuntiin asti. 52
Kuva 23. Jyrkän reitin oikeita ja ennustettuja reittipisteitä puolen sekunnin välein. 53
Kuva 24. Jyrkän reitin oikeita ja ennustettuja reittipisteitä sekunnin välein. 54
Kuva 25. Jyrkän reitin oikeita ja ennustettuja reittipisteitä kahden sekunnin välein. 55
Kuva 26. Etäisyys metreissä ennustettujen ja oikeiden reittipisteiden välillä. 56
Kuva 27. Oikeiden ja ennustettujen pisteiden korkeus metreinä kappaleen korkeuden kasvaessa. 58
Kuva 28. Oikean reitin ja ennustettujen reittien sijaintipisteet latitude-longitude –tasossa kappaleen korkeuden kasvaessa. 59
Kuva 29. Ennustettujen pisteiden etäisyys metreissä oikeaan reittipisteeseen nähden kappaleen korkeuden kasvaessa. 60
Kuva 30. Oikeiden ja ennustettujen pisteiden korkeus metreinä kappaleen korkeuden laskiessa. 62
Kuva 31. Oikean reitin ja ennustettujen reittien sijaintipisteet latitude-longitude –tasossa korkeuden laskiessa. 63
Kuva 32. Ennustettujen pisteiden etäisyys metreissä oikeaan reittipisteeseen nähden korkeuden laskiessa. 64
Kuva 33. Oikean reitin ja ennustettujen reittien sijaintipisteet latitude-longitude –tasossa kappaleen nopeuden kasvaessa. 65

Kuva 34. Oikean reittipisteen etäisyys ennustettuihin reittipisteisiin metreinä kappaleen nopeuden kasvaessa. 66
Kuva 35. Oikean reitin ja ennustettujen reittien sijaintipisteet latitude-longitude –tasossa kappaleen nopeuden laskiessa. 68
Kuva 36. Oikean reittipisteen etäisyys ennustettuihin reittipisteisiin metreinä kappaleen nopeuden laskiessa. 69

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1. Harmaiden järjestelmien perusperiaatteet [5, alikohta 1.2.2]. 9
Taulukko 2. Sijainnin ennustamisalgoritmien hyvät ja huonot puolet. 24
Taulukko 3. Asennon ennustamisalgoritmien hyvät ja huonot puolet. 27
Taulukko 4. Teoreettisen suoran reitin oikeat reittipisteet. 30
Taulukko 5. Jyrkästi kääntyvän reitin oikeat reittipisteet. 31
Taulukko 6. Toisesta kaarroksesta jyrkän reitin oikeat reittipisteet. 31
Taulukko 7. Nousu liikkeessä olevan kappaleen reitin oikeat reittipisteet. 32
Taulukko 8. Laskeutuvassa liikkeessä olevan kappaleen reitin oikeat reittipisteet. 33
Taulukko 9. Oikeat reittipisteet reitillä, jolla nopeus kasvoi. 34
Taulukko 10. Oikeat reittipisteet reitillä, jolla nopeus laski. 34
Taulukko 11. Oikean ja ennustetun reittipisteen välinen etäisyys ja kulmaerot. 43
Taulukko 12. Oikeiden ja ennustettujen reittipisteiden etäisyydet. 45
Taulukko 13. Jyrkän reitin oikeiden ja ennustettujen reittipisteiden kulmaerot. 46
Taulukko 14. Ennustettujen pisteiden etäisyydet oikeaan pisteeseen 10 sekuntiin asti. 51
Taulukko 15. Oikean ja ennustetun pisteen välinen etäisyys metreinä. 53
Taulukko 16. Oikean ja ennustetun pisteen välinen etäisyys metreinä. 54
Taulukko 17. Oikean ja ennustetun pisteen välinen etäisyys metreinä. 55
Taulukko 18. Oikean ja ennustetun pisteen väliset kulmaerot puolen sekunnin päivitystahdilla. 56
Taulukko 19. Oikean ja ennustetun pisteen väliset kulmaerot sekunnin päivitystahdilla. 56
Taulukko 20. Oikean ja ennustetun pisteen väliset kulmaerot kahden sekunnin päivitystahdilla. 57
Taulukko 21. Oikeiden ja ennustettujen pisteiden korkeuserot metreinä kappaleen korkeuden kasvaessa. 58
Taulukko 22. Kulmien erot oikeiden ja ennustettujen reittipisteiden välillä kappaleen korkeuden kasvaessa. 61
Taulukko 23. Oikeiden ja ennustettujen pisteiden korkeuserot metreinä kappaleen korkeuden laskiessa. 62
Taulukko 24. Kulmien erot oikeiden ja ennustettujen reittipisteiden välillä kappaleen korkeuden laskiessa. 64
Taulukko 25. Korkeuserot oikeiden reittipisteiden ja ennustettujen reittipisteiden välillä kappaleen nopeuden kasvaessa. 66
Taulukko 26. Kulmien erot oikeiden ja ennustettujen reittipisteiden välillä kappaleen nopeuden kasvaessa. 67
Taulukko 27. Korkeuserot oikeiden reittipisteiden ja ennustettujen reittipisteiden välillä kappaleen nopeuden laskiessa. 68
Taulukko 28. Kulmien erot oikeiden ja ennustettujen reittipisteiden välillä kappaleen nopeuden laskiessa. 69
Taulukko 29. Etäisyyden maksimivirhe oikean ja ennustetun reittipisteen välillä metreinä. 71
Taulukko 30. Suuntakulman maksimivirhe oikean ja ennustetun reittipisteen välillä asteina. 72
Taulukko 31. Pituuskallistuskulman maksimivirhe oikean ja ennustetun reittipisteen välillä asteina. 72
Taulukko 32. Kallistuskulman maksimivirhe oikean ja ennustetun reittipisteen välillä asteina. 73

LYHENTEET JA MERKINNÄT

°	aste
∞	ääretön
≥	suurempi tai yhtä suuri kuin
$\mathbb{E}(x)$	x:n odotusarvo
ε	epsilon
φ	Eulerin kulma runkokoordinaatistossa
$\dot{\varphi}$	kääntymiskulmanopeus runkokoordinaatistossa
θ	Eulerin kulma runkokoordinaatistossa
$\dot{\theta}$	kallistuskulmanopeus runkokoordinaatistossa
Ψ	Eulerin kulma runkokoordinaatistossa
$\dot{\Psi}$	nousukulmanopeus runkokoordinaatistossa
δ	Diractin deltafunkio
$\sum x$	summa funktio
$\int x$	integraalifunktio
a	kiihtyvyys
α	kohtauskulma
B	matriisi
β	sivuliukukulma
dof	vapaan liikkeen aste
ECEF_X	maakeskeisen koordinaattijärjestelmän X-koordinaatti
ECEF_Y	maakeskeisen koordinaattijärjestelmän Y-koordinaatti
ECEF_Z	maakeskeisen koordinaattijärjestelmän Z-koordinaatti
f(x)	muuttujan x funktio
GM(1,1)	harmaan järjestelmän teorian perusmalli
g(x)	muuttujan x funktio
m	metri
m/s	metriä sekunnissa
NED	pohjois-itä-alas (norht-east-down), koordinaatistotyyppi
p	kulmanopeusvektorin komponentti runkokoordinaatistossa
p_0	kappaleen nykyinen sijainti
p(t)	kappaleen paikka ajan hetkellä *t*
p_w	kulmanopeusvektorin komponentti tuulikoordinaatistossa
q	kulmanopeusvektorin komponentti runkokoordinaatistossa
q_w	kulmanopeusvektorin komponentti tuulikoordinaatistossa
R	reaaliluku
r	kulmanopeusvektorin komponentti runkokoordinaatistossa
r_w	kulmanopeusvektorin komponentti tuulikoordinaatistossa
s	sekunti
s(x)	muuttujan x funktio
t	tulevaisuuden aikainstanssi
u	painovoimakeskipisteen inertiaalisen nopeusvektorin komponentti
μ	Eulerin kulma tuulikoordinaatistossa
$\dot{\mu}$	Eulerin kulman muutos tuulikoordinaatistossa
V	painovoimakeskipisteen inertiaalinen nopeusvektori
v	painovoimakeskipisteen inertiaalisen nopeusvektorin komponentti
v_0	kappaleen nykyinen nopeus
w	painovoimakeskipisteen inertiaalisen nopeusvektorin komponentti
ω	kulmanopeusvektori
$x^{(0)}$	datasarjan alkio
$X^{(0)}$	datasarja

X^E	NED-koordinaatiston x-akseli
x_i	splini-funktion solmukohta
$\dot{\chi}$	Eulerin kulman muutos tuulikoordinaatistossa
$x_{0:t}^{(i)}$	yksittäinen hiukkanen
$x_{0:t}$	objektin tila
xml	extensible markup language (merkintäkielien standardi)
Y	matriisi
Y^E	NED-koordinaatiston y-akseli
y_i	funktion y-piste
γ	Eulerin kulma tuulikoordinaatistossa
$\dot{\gamma}$	Eulerin kulman muutos tuulikoordinaatistossa
$Z^{(1)}$	keskiarvojen datasarja
Z^E	NED-koordinaatiston z-akseli

.

1. JOHDANTO

Viimeisten vuosikymmenien aikana kappaleiden liikkeiden ennustamiseksi on tehty paljon tutkimusta, jotta kappaleiden sijaintia ja asentoa pystyttäisiin ennustamaan mahdollisimman tarkasti. Liikkeiden ennustamista on tutkittu monilla erilaisilla kappaleilla. Esimerkiksi on tutkittu, miten saataisiin parhaiten ennustettua laivojen liikkeitä meriväylillä, lentokoneiden liikkeitä ilmassa ja autojen liikkeitä tieverkostoissa. Kappaleiden liikkeiden ennustamisen tärkeys on kasvanut koko ajan viimeisten vuosikymmenien aikana. [1]

Kappaleiden liikkeiden ennustamisessa haastavin tehtävä on luoda kappaleen liikkeiden historiadatasta käyttökelpoista dataa kappaleen tulevaisuuden tilasta. Ennustettaessa kappaleen tulevaisuuden sijaintia tai asentoa, on hyvä tarkastella, onko ennustettu liike kappaleelle tavanomaista vai epänormaalia ja kannattaako ennustusta tehdä lyhyellä vai pitkällä aikavälillä. Reaaliaikaisten lentävien kappaleiden sijainnin ja asennon ennustamisessa on huomioitava se, että uusia sijaintitietoja saadaan koko ajan, jolloin ennusteet ovat lyhyen aikavälin ennusteita ja ennustuksen laskenta on tällöin aikakriittistä. Ennustuksen laskenta on aikakriittistä, koska ennustuksen on oltava valmiina ennen kuin uusi sijainti saadaan, muutoin ennustettu sijaintipiste on vanhentunutta tietoa. Jos kappaleesta ei saada enää uusia sijaintitietoja, kappaleen liikeradan sanotaan olevan suljettu, muutoin kappaleen liikerata on avoin. [1]

Työn taustana oli tarve löytää sopivat algoritmit, joilla reaaliaikaisten lentävien kappaleiden sijaintia ja asentoa voitaisiin mahdollisimman hyvin ennustaa simulaatiossa. Mitä paremmin reaaliaikaisten lentävien kappaleiden liikettä pystytään ennustamaan simulaatiossa, sitä reaaliaikaisemmaksi simulaatio saadaan. Lentävän kappaleen sijainnin ja asennon ennustaminen mahdollistaa simulaation muille olioille mahdollisuuden nähdä lentävän kappaleen seuraava todennäköinen sijainti ja asento jo ennen kuin sen oikeat tiedot on saatu.

Tässä diplomityössä vertaillaan olemassa olevia lentävän kappaleen sijainnin ja asennon ennustamisessa käytettyjä algoritmeja toisiinsa. Algoritmi on äärellinen joukko askelmia, joita järjestyksessä suorittamalla saadaan algoritmille annetusta syötteestä muodostettua haluttu ratkaisu [2, luku 1]. Algoritmien vertailun jälkeen algoritmeista valitaan sopivimmat. Algoritmien vertailu ja valinta toteutetaan kirjallisuuskatsauksena. Lisäksi

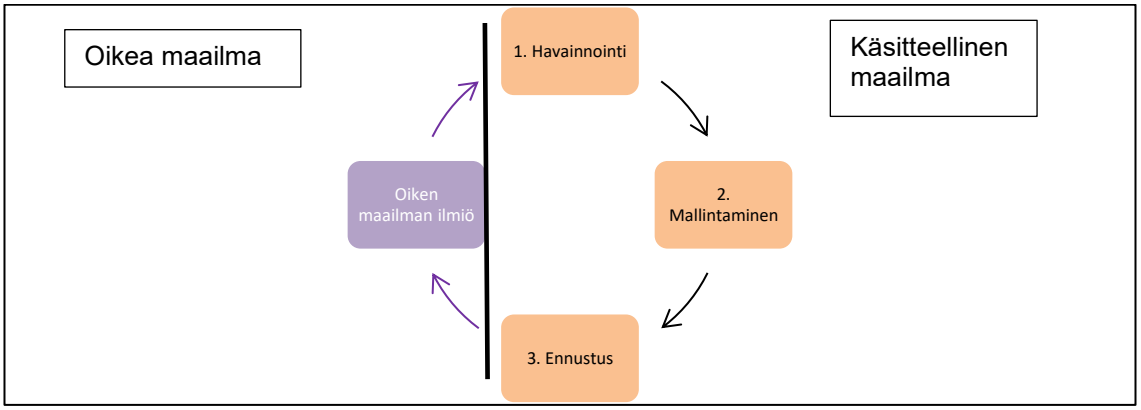
tässä työssä toteutetaan ja otetaan käyttöön prototyyppi geneerisestä ohjelmistokomponentista, joka ennustaa lentäville kappaleille lentorataa paikka- ja asentoennusteiden avulla. Algoritmien valinnan ja toteutettavan ohjelmistokomponentin avulla pyritään ennustamaan lentävän kappaleen liikettä reaaliaikaisessa simulaatiossa. Työssä käytetään konstruktiivista tutkimusmenetelmää.

Työ rakentuu yhteensä seitsemästä luvusta, joista ensimmäisenä lukuna toimii johdanto. Luvussa kaksi käsitellään yleisesti simulaatioita ja mallintamista. Luvussa kolme esitellään ensin sijainnin ennustamiseen käytettyjä algoritmeja ja niiden jälkeen asennon ennustamiseen käytettyjä algoritmeja. Luvun kolme lopussa vertaillaan ennustusalgoritmien hyviä ja huonoja puolia ja valitaan sopivat algoritmit. Luku neljä esittelee mittauksissa käytettävät lähtödatat. Luvussa viisi on esiteltynä toteutettu geneerinen ennustuskomponentti ja luvussa kuusi mittaustulokset, jotka on saatu ennustuskomponenttia käyttämällä. Luvussa kuusi mittaustuloksia esitelleen neljälle eri lentoreittityypille: teoreettiselle suoralle reitille, jyrkästi kääntyvälle reitille, reitille, jossa lentävän kappaleen korkeus muuttui ja reitille, jossa lentävän kappaleen nopeus muuttui. Lisäksi luvussa kuusi on mittaustuloksien arviointi. Luku seitsemän on yhteenvetoluku, jossa on esiteltynä myös jatkokehitysideoita.

2. SIMULAATIOT JA MALLINTAMINEN

Simulaatioissa matemaattisten mallien ja yhtälöiden avulla mallinnetaan toisen systeemin operaatioita [3]. Malleja luodaan kuvaamaan mielenkiinnon kohteena olevien kappaleiden tai laiteiden käyttäytymistä. Kappaleiden ja laitteiden käyttäytymistä voidaan kuvailla esimerkiksi sanallisesti, piirroksien avulla, luomalla fysikaalisia tai matemaattisia malleja sekä tietokoneohjelmien avulla. Mallin voi määritellä useammallakin tavalla: pienikokoinen kuvaus tai esitys jostakin, kuvaus jostakin, jota emme muuten voisi nähdä (esimerkiksi atomi), datan, oletuksien ja rajapintojen systeemi, joka kuvataan matemaattisena oliona tai tilana. Matemaattinen malli on määritelty oikeiden laiteiden ja kappaleiden käyttäytymisen kuvaamiseksi matemaattisien termien avulla. Malleja käytetään usein ennustamaan mitä tulevaisuudessa tulee tapahtumaan ja miten jokin tilanne kehittyy ajan kuluessa. [4, luku 1]

Mallintaminen on yksi kolmesta vaiheesta, jota käytetään, kun luodaan käsitteellistä maailmaa oikeaan maailman perustuen. Käsitteellinen maailma pyrkii ymmärtämään oikean maailman tapahtumia mallintamisen lisäksi havainnoimalla ja ennustamalla ilmiöiden kulkua. Havainnointivaiheessa oikeasta maailmasta kerätään tietoa tapahtumasta, kuten kappaleen liikkeestä. Havainnointi voi olla joko suoraa tai epäsuoraa. Suora havainnointi perustuu ihmisen itse tekemiin havainnointeihin, kun taas epäsuorassa havainnoissa tietoa tapahtumasta saadaan mittauksien avulla. Kuvassa 1 on esitettynä tieteellisen metodin peruskuvausta oikean maailman ilmiön luomisesta käsitteellisessä maailmassa. [4, alikohta 1.1.1]



Kuva 1. Käsitteellisen mallin yhteys oikean maailman ilmiöön [4, alikohta 1.1.1].

Mallien avulla pyritään analysoimaan tehtyjä havaintoja. Tieteellisen metodin peruskuvauksessa mallien avulla analysointia tehdään kolmesta eri syystä: halutaan kuvata ha-

vainnoitua olioita, selittävää olioiden tai ilmiöiden käyttäytymistä tai ennustaa havainnoidun olion tai ilmiön käyttäytymistä tulevaisuudessa. Mallin luonnin jälkeen ennustamisvaiheessa mallia käytetään ennustamaan, miten ilmiö tai olio käyttäytyy oikeassa maailmassa. Ennustamisvaiheen avulla nähdään, onko malli sopiva mallintamaan kyseistä ilmiötä vai onko mallia muokattava johonkin suuntaan, jotta se kuvaisi paremmin ilmiötä. Näitä kolmea vaihetta iteroiden voidaan luoda mahdollisimman oikea kuva oikean maailman ilmiöstä tai tapahtumasta käsitteelliseen maailmaan. [4, alikohta 1.1.1]

Aina yksi malli ei välttämättä riitä kuvaamaan systeemin toimintaa tarkasti, varsinkin jos systeemissä on paljon yhteen liittyviä tekijöitä tai itsenäisesti toimivia muuttujia. Jotta systeemin käyttäytymistä voidaan ennustaa tarkemmin, niin tällaisissa tilanteissa tulisi käyttää muutamaa eri mallia tai malliryhmää. [5, alikohta 4.5.5.2]

Mallintamisessa käytetty data ei aina ole täysin virheetöntä ja usein se saattaa sisältää useanlaisia virheitä. Data sisältää virheitä, koska niin monenlaisia eri virheitä saattaa esiintyä datan keräämisvaiheessa. Näitä virheitä ovat esimerkiksi se, että datan luonteesta riippuen datan keräysympäristössä saattaa tapahtua muutoksia mittauksien välillä, ja koska data tulee esittää numeerisessa muodossa, niin siitä aiheutuu pyöristysvirheitä dataan. [6, alikohta 1.3.2]

Jos virheellinen data alkio poistetaan, tulee huomata sen vaikutus datajoukkoon ja päättää, miten poistettu data-alkio korvataan datajoukossa [5, alikohta 2.3.1]. Korvataanko se keskiarvolla viereisistä data-alkioista vai jätetäänkö poistetun data-alkion paikka vain tyhjäksi [5, alikohta 2.3.1]. Virheellisten data-alkioiden poistaminen tekee datajoukosta osittain puutteellisen [5, alikohta 2.3.1]. Kerätty data voi olla myös osittain puutteellista jo keräysvaiheen aikana, jos dataa ei ole saatu halutulla päivitystahdilla kerätyksi [5, alikohta 2.3.1]. Datan ollessa epätarkkaa tai puutteellista, täysin tarkkojen mallien luominen ei ole enää kannattavaa, koska systeemien koon ja monimutkaisuuden kasvaessa ihmisen kyky kuvailla asioita tarkasti laskee. [5, alikohta 1.1.3.4]

2.1 Matemaattinen mallintaminen

Matemaattisia malleja käytetään paljon kasvattamaan ihmisten ymmärrystä monissa erilaisissa ongelmissa. Esimerkiksi päivittäisessä tilanteessa, jossa henkilö ajaa autolla ja haluaa tietää, mikä on minimietäisyys edelle menevään autoon, jotta hän itse kerkeää pysähtyä, jos edelle menevä auto pysähtyy. Minimietäisyys autojen välillä riippuu auton nopeudesta ja sen muutoksesta, jolloin tarvitaan yksinkertainen matemaattinen malli kuvaamaan tilannetta, jotta etäisyys saadaan lasketuksi. [6, luku 1]

Matemaattisessa mallintamisessa on tarkoituksena löytää yksinkertainen funktio tai funktioiden joukko, joka luo olemassa olevista havainnoista laadullista tai määrällistä ymmärrystä. Mallintamisongelmassa halutaan luoda mahdollisimman yksinkertainen malli havainnoista. Oikeanlaisen matemaattisen mallin avulla pystytään reagoimaan halutulla tavalla saatuihin havaintoihin. Matemaattinen mallintaminen sisältää neljä eri vaihetta: ensimmäinen vaihe on esittää ongelma niin yksinkertaisessa muodossa kuin mahdollista, toinen vaihe on luoda useampi tilanteeseen sopiva matemaattinen malli, kolmas vaihe on valita optimaalisin malli luoduista malleista ja neljäs vaihe on kertoa, mitä hyötyä malli toi, koska mallin tulisi aina tuoda jotain lisähyötyä havainnoista. [6, luku 1]

Luodessa mallia on tärkeää myös arvioida mallin pätevyyttä tilanteeseen. Havaintojen laatu ja määrä luovat perusedellytykset sille, millainen matemaattisen mallin tulisi olla. Mallin tulisi aina tuottaa enemmän tietoa tarkasteltavasta systeemistä, kun mitä pelkät havainnot pystyvät systeemistä tuottamaan. Jos näin ei ole, mallia ei ole järkevää käyttää mallintamaan systeemiä. [6, luku 1.4.3]

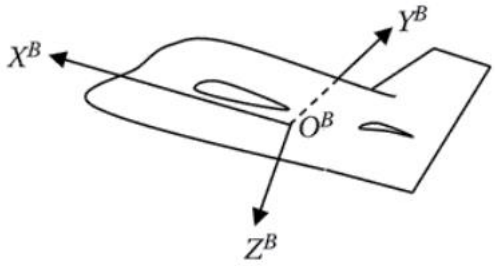
2.2 Lentävän kappaleen liikeyhtälöt

Lentäville kappaleille yhtenäistä on se, että ne noudattavat samoja liikeyhtälöitä. Vaikka esimerkiksi avaruusraketti, lentokone ja ilmalaiva eroavat toisistaan todella paljon muilta ominaisuuksiltaan, niin ne noudattavat samoja jäykän kappaleen kuuden asteen liikeyhtälöitä, joista yleisesti käytetään lyhennettä 6 dof (degree of freedom) yhtälöt. Jäykkien lentävien kappaleiden lentojen aikana kuuden asteen liikeyhtälöitä voidaan käyttää ennustamaan kappaleen lentorataa sekä asentoa. Ilmailun keskeisimpänä alana on lentodynamiikka, joka sitoo yhteen lentävien aluksien muut komponentit ja tieteenhaarat. Lentodynamiikka muodostuu jäykän kappaleen kuuden asteen liikeyhtälöiden analyyttisestä, laskennallisesta ja fysikaalisesta tutkimuksesta ja se on perustana kaikkien lentävien kappaleiden analysoimisessa ja suunnittelussa. [7, luku 1]

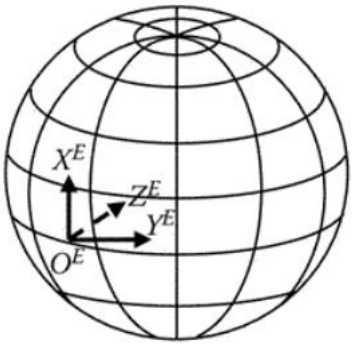
Koska lentävät kappaleet ovat erilaisia, niihin vaikuttavat voimat ja lentävän kappaleen hallintatavat ovat myös toisistaan poikkeavia. Esimerkiksi lentokoneet lentävät aika matalilla nopeuksilla verrattuna avaruusraketteihin, jotka kykenevät lentämään sekä alle äänen nopeudella, että yli viisinkertaisella äänen nopeudella. Lisäksi lentokoneiden ja avaruusrakettien nostopinta-alat ja moottorit eroavat toisistaan suuresti. Lentokoneilta ja avaruusraketeilta odotetaan erilaisia ominaisuuksia nopeuden, tuulen sietokyvyn, lentoaikojen ja monen muun asian suhteen, mutta silti niiden lentoa voidaan kuvailla samoilla jäykän kappaleen kuuden asteen liikeyhtälöillä. [7, luku 1]

Lentävän kappaleen painovoiman keskipisteen inertiaalinen nopeusvektori ja painovoiman keskipisteen inertiaalinen kulmanopeusvektori kuvaavat täysin lentävän kappaleen liikkeen [7, luku 1]. Inertiaalinen liike tarkoittaa liikettä, joka liikkuu vakionopeudella [8]. Integroimalla nämä kaksi vektoria saadaan kappaleen hetkellinen sijainti ja asento selville. Nopeusvektorin integrointi antaa kappaleen hetkellisen sijainnin ja kulmanopeusvektorin integroiminen antaa kappaleen hetkellisen asennon. Sekä nopeusvektorin että kulmanopeusvektorin esitysmuoto riippuu siitä, missä koordinaatistossa ne esitetään. Kulmanopeusvektorin komponentit voidaan esittää minkä tahansa kolmen eri koordinaatiston: runkokoordinaatiston, maailmakoordinaatiston tai tuulikoordinaatiston avulla, mutta kulmanopeusvektori on silti aina kulmanopeus runkokoordinaatistossa. [7, luku 1]

Yleisestikin jäykän lentävän kappaleen liikeyhtälöitä voidaan muodostaa kolmessa eri koordinaatiossa: runko-, maailma- ja tuulikoordinaatistossa. Runkokoordinastossa akselit ovat lentävän kappaleen rungossa niin kuin kuvasta 2 nähdään. Maailman inertiaalikoordinaatisto on esitettynä kuvassa 3 ja sen avulla voidaan määrittää lentävän kappaleen, esimerkiksi lentokoneen, sijainti ja asento. Inertiaalikoordinaatistona voisi toimia jokin muukin koordinaatisto kuin maailmakoordinaatisto. Maailmakoordinaatisto on kuvattuna NED (north-east-down) koordinaatistona, mikä tarkoittaa sitä, että X^E-akseli osoittaa pohjoiseen, Y^E-akseli osoittaa itään ja Z^E-akseli osoittaa kohtisuoraan alaspäin $X^E Y^E$-tasosta. Kolmas koordinaatisto on tuulikoordinasto, jossa määritellään lentävän kappaleen asento ja kulmanopeudet suhteelliseen tuuleen verrattuna. Tämä tarkastelu tehdään lentävästä kappaleesta. Alla kuvat sekä runkokoordinaatistosta että maailmakoordinaatistosta. [7, luku 1]



Kuva 2. Runkokoordinaatisto [7, kohta 1.1].



Kuva 3. Maailmakoordinaatisto (NED) [7, kohta 1.1].

2.3 Kappaleiden liikkeiden ennustaminen

Ennustamisessa tieteellisten metodien ja tekniikoiden avulla pyritään mahdollisimman tarkasti ennakoimaan jonkin tapahtuman kulkua tulevaisuudessa, tässä tapauksessa kappaleen liikettä ja asentoa. Ennustaminen tehdään saatavilla olevan historiadatan sekä nykyhetken tilanteen avulla. Tarkka ennustus kuvaa tietyn tapahtuman kehitystä ajan suhteen. Yleinen ennustus koostuu kahdesta eri osasta: staattisesta ja dynaamisesta rajapinnasta. Staattinen rajapinta tarkoittaa sitä, että päätellään asioita niiden tietojen perusteella mitä kyseisellä ajanhetkellä tapahtuu, ja dynaaminen rajapinta puolestaan ottaa tarkastelussa huomioon nykyhetken lisäksi myös historiassa tapahtuneet muutokset. [5, kohta 4.5, sivut 133-135]

Harmaa ennustaminen on ennustamista, jossa pyritään ennustamaan systeemin, joka koostuu osittain tunnetusta ja osittain tuntemattomasta tiedosta, tilaa tulevaisuudessa [5, kohta 4.5, sivut 133-135]. Harmaalla ennustamisella on tarkoitus luoda tieteellistä ja määrällistä ennustetta [5, kohta 4.5, sivut 133-135]. Harmaa ennustaminen perustuu siihen, että yritetään ymmärtää systeemin epävarmaa luonnetta käyttämällä hyväksi alkuperäistä osittain tunnettua datajoukkoa, jotta tulevaisuus olisi ennustettavissa [5, kohta 4.5, sivut 133-135]. Datasarjan perusteella tehtävässä ennustamisessa GM(1,1)-mallia

käytetään ennustamaan systeemin käyttäytymistä tulevaisuudessa systeemin muuttujien avulla [5, kohta 4.5, sivut 133-135]. Harmaan ennustamisen avulla voidaan luoda katastrofiennustetta, jossa tarkoituksena on löytää se ajankohta, jossa systeemi rupeaa käyttäytymään täysin epänormaalisti, jotta tällaiseen käyttäytymiseen osataan varautua etukäteen. [5, alikohta 4.5.3]

Jos järjestelmässä on monia toisiinsa liittyviä tekijöitä ja itsenäisesti muuttuvia muuttujia, voi olla järkevää harkita mallijärjestelmän luomista. Mallijärjestelmä koostuu useammasta mallista yhden mallin sijaan. Tällöin mallijärjestelmällä saadaan ennustettua paremmin järjestelmän tulevaisuuden käyttäytymistä kuin yksittäisellä mallilla. [5, alikohta 4.5.5.2]

2.4 Harmaiden järjestelmien teoria

Tiedon selkeyttä kuvaamaan käytetään usein kolmea eri väriä: valkoista, mustaa ja harmaata. Valkoinen väri tarkoittaa täysin selkeää tietoa, musta tarkoittaa sitä, että kaikki tieto on tuntematonta ja harmaa tieto on näiden kahden välissä sisältäen osittain tunnettua ja osittain tuntematonta tietoa. Tästä seuraa se, että harmaat järjestelmät ovat järjestelmiä, jotka sisältävät osittain tunnettua ja osittain tuntematonta tietoa, valkoiset järjestelmät ovat järjestelmiä, jotka sisältävät vain tunnettua tietoa ja mustat sisältävät vain tuntematonta tietoa. [5, alikohta 1.2.1]

Harmaan järjestelmän teoria keskittyy tutkimaan ja ratkaisemaan ongelmia, jotka sisältävät heikosti tietoa ja vähän otantapisteitä. Systeemeistä saatu tieto sisältää aina monenlaista epävarmuutta, koska tutkittaessa systeemejä, niihin vaikuttavat ulkoiset ja sisäiset häiriötekijät sekä ihmisen oma ymmärrys asiasta. Häiriötekijät ja ihmisen ymmärryksen rajallisuus vaikuttavat systeemistä saadun tiedon laatuun. Harmaista järjestelmistä saadaan vain osittain varmaa tietoa ja loput tiedot järjestelmästä luodaan ja laajennetaan harmaan teorian avulla, jolloin järjestelmän tilan kehitystä ja käyttäytymistä pystytään arvioimaan ja seuraamaan tehokkaasti. Harmaiden järjestelmien teorialla on monia sovellusalueita, koska epävarmoja järjestelmiä on olemassa paljon. Taulukkoon 1 on koottuna kuusi harmaiden järjestelmien perusperiaatetta selityksineen. [5, kohta 1.2]

Taulukko 1. Harmaiden järjestelmien perusperiaatteet [5, alikohta 1.2.2].

Peruslause	Selitys
Tiedon erilaisuuden periaate	Jokaisen tietoalkion tulee olla jollain tavalla erilainen kuin muut tietojoukossa mukana olevat tietoalkiot.
Yksikäsitteisyyden puuttumisen periaate	Tiedon ollessa puutteellista ja epämääräistä ei ongelmalla ole yksiselitteistä ratkaisua.
Minimaalisen tiedon määrän periaate	Minimaalisen tiedon määrä hyödynnetään harmaan systeemin teoriassa parhaalla mahdollisella tavalla.
Tunnistettavuuden perustan periaate	Ihmiset ymmärtävät ympäröivää maailmaa tiedon avulla ja tieto toimii ymmärryksen pohjana.
Uuden tiedon priorisoinnin periaate	Uudesta tiedosta on enemmän hyötyä kuin alkuperäisestä tiedosta.
Kiistattoman harmauden periaate	Tiedon puutteellisuutta ei voida kiistää.

Epävarmoilla järjestelmillä on kaksi peruspiirrettä: tiedon puutteellisuus ja saatavilla olevan tiedon epätarkkuus. Järjestelmästä saatu tieto voi olla puutteellista neljällä eri tavalla: järjestelmän elementeistä saatu tieto on puutteellista, järjestelmän rakenteesta saatu tieto on puutteellista, järjestelmän rajoista saatu tieto on puutteellista tai järjestelmän käyttäytymisestä saatu tieto on puutteellista. Saatavilla olevan tiedon epätarkkuus tarkoittaa sitä, että tietoarvot ovat virheellisiä tai muihin tietoarvoihin nähden poikkeavia. Tiedon epätarkkuuden aiheuttajat voidaan luokitella kolmeen eri kategoriaan: tiedon käsitteellisyyteen, tutkimus tai havainnointi tason muutoksiin ja ennustettuun tietoon. Kun tiedon laatua kuvaillaan käsitteillä ”vähän”, ”paljon”, ”korkea” tai ”hyvä” tieto on epätarkkaa, koska sen määritelmät ovat epätarkkoja. [5, alikohta 1.1.3.]

Toinen tiedon epätarkkuutta aiheuttaja on sen tutkimus ja havaintotasojen muutokset. Havaintotasojen muutoksilla tarkoitetaan sitä, että ensin tietoa tutkitaan esimerkiksi mikroskooppisella tasolla ja sitten samaa tietoa tutkitaan makroskooppisella tasolla. Se, mikä voitiin laskea tarkaksi tiedoksi mikroskooppisella tasolla, ei olekaan enää tarkkaa, kun samaa asiaa tutkitaan makroskooppisella tasolla. Esimerkiksi jos ihmisen pituutta

mitataan ensin senttimetrien tarkkuudella ja sitten haluttaisiinkin mitata kymmenien tuhansien senttimetrien tarkkuudella, ei ensiksi mitattua tietoa voitaisi enää pitää tarkkana. [5, alikohta 1.1.3.2]

Kolmas tiedon epätarkkuuden aiheuttaja on sen tulevaisuuden käyttäytymisen ennustaminen ja arviointi. Vaikka olisi käytössä kaikkein paras ennustus- tai arvioimismenetelmä, niin silti mikään ennustus ei ole täysin tarkka ja tällä tavalla luotu tieto sisältää aina epävarmuutta. Esimerkiksi tilastotieteessä luodaan dataa keräämällä otantapisteitä ja niiden perusteella arvioimalla järjestelmän tai kohteena olevan datan tilaa. Tällaisesta arvioinnista johtuu se, että tieto on usein epätarkkaa. [5, alikohta 1.1.3.2]

2.5 Lähes reaaliaikaisen simuloinnin haasteet

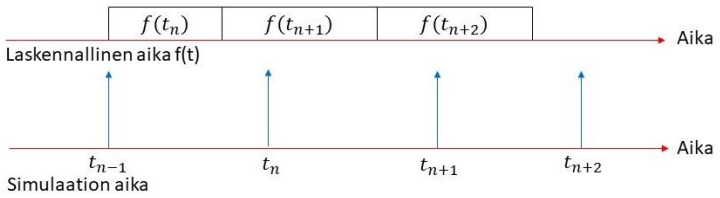
Reaaliaikaista simulointia käytetään laajasti reaaliaikaisten järjestelmien testaamisessa ja järjestelmien suunnittelussa [3]. Käytämme yhä enenevissä määrin reaaliaikaisia järjestelmiä päivittäisessä elämässämme kuten esimerkiksi automatisoitua terveydenhuoltoa, autonomisia kulkuneuvoja sekä neuroverkkoja [3]. Reaaliaikaisten järjestelmien tulee läpäistä tiukat määräykset sekä olla luotettavia ja turvallisia käyttää [3]. Tässä työssä pyritään ratkaisemaan lentävien kappaleiden sijainnin ja asennon ennustamiseen liittyvää ongelmaa reaaliaikaisessa simulaatiossa. Kappaleiden reaaliaikainen simuloiminen simulaattorissa tuo mukanaan kuitenkin erilaisia ongelmia kuin kappaleiden ei-reaaliaikainen simuloiminen. Tässä luvussa esitellään kaksi reaaliaikaisen simuloinnin päähaastetta.

Reaaliaikainen simulointi eroaa ei-reaaliaikaisesta simuloinnista siten, että simulaation tulos riippuu myös simuloinnin suoritusajasta, eikä pelkästään matemaattisten yhtälöiden tai mallien tuloksista. Simuloinnin suoritusajalla tarkoitetaan sitä aikaa, joka todellisuudessa kuluu matemaattisten yhtälöiden tai mallien ratkaisemiseen. Reaaliaikaisen simuloinnin kaksi päähaastetta ovat ajan synkronointi ja datan integrointi simulaation mallien välillä. [3]

Simulaatioissa aika voi liikkua eteenpäin kahdella eri tavalla. Aika voi liikkua eteenpäin ennalta määrätyillä tasaisilla aika-askelmilla tai vaihtoehtoisesti aika-askelmien pituus voi olla muuttuva. Riippuu täysin simulaatiosta, kumpaa ajan etenemistapaa simulaatiossa käytetään. Tasaiset aika-askelmat soveltuvat paremmin lineaarisien systeemien simuloimiseen ja muuttuvat aika-askelmat soveltuvat paremmin ei-lineaaristen systeemien simuloimiseen. Jokaisella simulaation aika-askelmalla ratkaistaan joukko matemaattisia yhtälöitä ja malleja. [3]

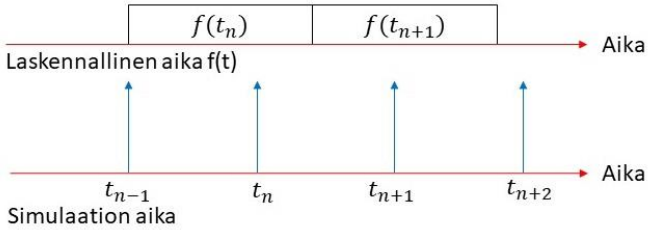
Ei-reaaliaikaisissa simulaatioissa simulaation aika-askelma voi olla pidempi tai lyhempi kuin aika, joka kuluu matemaattisten yhtälöiden ja mallien ratkaisemiseen. Vastaavasti reaaliaikaisissa simulaatioissa simulaation aika-askelman tulee olla pidempi kuin mitä matemaattisten yhtälöiden ja mallien ratkaisemiseen kuluu aikaa. Jos näin ei ole, simulaatio ei ole enää reaaliaikainen. Esimerkiksi jos vesitankin täyttämiseen kuluu oikeassa maailmassa kymmenen minuuttia, tulee siihen simulaatiossakin kulua kymmenen minuuttia. Jos tankin täyttymiseen kuluisi simulaatiossa jokin muu aika, olisi simulaatio virheellinen. Tällaista virhettä kutsutaan ylitysvirheeksi. Lisäksi simulaation muut mallit ja yhtälöt, jotka ovat riippuvaisia tankin täyttymisestä, jäisivät myös jälkeen ja simulaatio ei olisi enää reaaliaikainen. [3]

Reaaliaikaisen simulaation tulee kyetä suorittamaan neljä eri vaihetta jokaisen aika-askelman aikana: lukea edellisen aika-askelman aikana tuotetut syötteet ja generoida tuloksia seuraavalle aika-askelmalle, ratkaista matemaattisia yhtälöitä ja malleja, vaihtaa tietoa muiden simulaatiossa olevien olioiden ja mallien kanssa, jos tarpeellista, ja viimeisenä odottaa seuraavan aika-askelman alkamista. Koska reaaliaikaiset simulaatiot koostuvat usein useista oikean maailman ilmiöistä, joita kaikkia mallinnetaan eri tavalla ja jokaisen mallintamiseen kuluu eri aika, niin jotta simulaatio saadaan pysymään vakaana, on virheetön simulaatiomallien synkronointi välttämätöntä. Jos ajan synkronoinnissa tulee ongelmia tai virheitä, on reaaliaikainen simulaatio nopeasti täysin käyttökelvoton. Kuvat 4, 5 ja 6 kuvaavat matemaattisten mallien ja yhtälöiden ratkaisemiseen kuluneen ajan suhdetta oikeaan aikaan. [3]



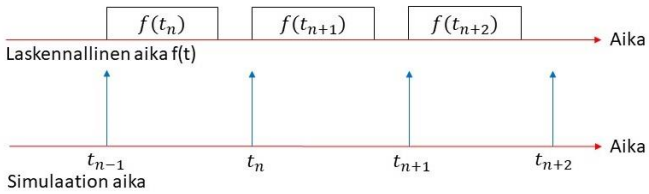
Kuva 4. Ei-reaaliaikainen simulaatio, jossa simulointi tapahtuu oikeaa aikaa nopeammin [3].

Kuvassa 4 on esitettynä tilanne, jossa matemaattisten yhtälöiden ja mallien laskemiseen kulunut aika on lyhempi kuin oikea aika. Tällaista simulaatiota kutsutaan nopeutetuksi simulaatioksi. [3]



Kuva 5. Ei-reaaliaikainen simulaatio, jossa simulointi tapahtuu oikeaa aikaa hitaammin [3].

Vastaavasti kuvassa 5 on kuvattuna tilanne, jossa matemaattisten yhtälöiden ja mallien laskemiseen kulunut aika on pidempi kuin oikea aika. Tällaista simulaatiota kutsutaan hidastetuksi simulaatioksi. Kuvat 4 ja 5 kuvaavat tilannetta ei-reaaliaikaisen simuloinnin tapauksessa, jossa yhtälöiden ja mallien ratkaisuun kuluvalla ajalla ei ole merkitystä. [3]



Kuva 6. Reaaliaikainen simulaatio, jossa simulointi on synkronoitu oikean ajan kanssa samaan tahtiin [3].

Kuvassa 6 kuvataan tilannetta reaaliaikaisen simulaation tapauksessa, jossa matemaattiset mallit ja yhtälöt on kyettävä ratkaisemaan yhden aika-askelman aikana, jotta vältytään ylitysvirheeltä ja simulaatio pysyy reaaliaikaisena sekä käyttökelpoisena. [3]

3. ENNUSTUSALGORITMIEN ESITTELY, VERTAILU JA VALINTA

Tässä luvussa vertaillaan sekä sijainnin ennustamiseen käytettyjä algoritmeja että asennon ennustamiseen käytettyjä algoritmeja. Algoritmilla tarkoitetaan äärellistä joukkoa askelmia, joita järjestyksessä suorittamalla saadaan algoritmille annetusta syötteestä muodostettua haluttu ratkaisu. Algoritmin määritelmän mukaan sillä on oltava viisi seuraavaa ominaisuutta, jotta algoritmi on pätevä: syötteiden määrän on oltava rajallinen, algoritmin on tuotettava vähintään yksi ratkaisu, jokaisen algoritmin askelman tulee olla selkeä ja jokaisella askelmalla tulee olla järkevä lopputulos askelman suorituksen jälkeen. Viimeisempänä algoritmin on päätyttävä suoritettuaan kaikki askelmansa ilman, että algoritmi jää loputtomaan silmukkaan suorittamaan askelmiaan tai osaa askelmistaan. Algoritmit voidaan jakaa kahteen eri kategoriaan sen mukaan, tiedetäänkö algoritmeista etukäteen, kuinka monta askelmaa niiden tulee suorittaa ennen kuin ne palauttavat ratkaisunsa. Algoritmeja, joiden suoritettavien askelmien määrää ei tunneta, kutsutaan epäsuoriksi algoritmeiksi. Suoriksi algoritmeiksi kutsutaan puolestaan algoritmeja, joiden suoritettavien askelmien määrä on etukäteen tiedossa. [2, luku 1]

Kirjallisuudesta löytyi huomattavasti vähemmän vaihtoehtoja kappaleen asennon ennustamiseksi kuin sen sijainnin ennustamiseksi. Kohdassa 3.1 esiteltävät sijainnin ennustamisessa käytetyt algoritmit ovat lineaarinen ja neliöllinen polynomisovite, splini-sovite, Kalman-suodin ja GM(1,1)-malli. Kohdassa 3.2 esiteltävät asennon ennustamisessa käytetyt algoritmit ovat jäykän kappaleen asennon liikeyhtälöt ja hiukkassuodin. Kyseiset algoritmit ovat valittuna mukaan vertailuun, koska kirjallisuuden perusteella niitä tai niiden johdannaisia käytetään tällä hetkellä lentävien kappaleiden liikkeiden ennustamiseen. Muutama tällainen lähde löytyy lähdeluettelosta numeroilla: [7], [9], [10], [11], [12]. Kirjallisuudesta löytyi todella paljon erinäisiä vaihtoehtoja lentävien kappaleiden sijaintien ennustamiseksi. Kirjallisuuden perusteella selvisi myös, että eri koneoppimiseen pohjautuvia malleja sekä mallijärjestelmiä voidaan käyttää kappaleiden liikkeiden ennustamiseksi.

3.1 Sijaintiennustealgoritmeja

Liikkuvan kappaleen liikerataa ennustettaessa lineaarinen ennustusmalli laskee radan interpolointifunktioiden avulla. Yleensä nämä funktiot ovat joko polynomifunktioita tai polynomisia splini-funktioita ja interpolointi tapahtuu ajan suhteen. Lineaarinen ennustusmalli voi ennustaa kappaleen sijainnin tarkasti silloin, kun kappaleen liike on esimerkiksi

lineaarista tai polynomista ja saadut otantapisteet, joiden avulla ennustusta luodaan, ovat luotettavia. [10]

Monesti kappaleiden liike on kuitenkin epävarmaa ja otantapisteissä saattaa olla virheitä [10]. Epävarmaliike ja otantapisteiden virheet rajoittavat lineaarisen ennustusmallin soveltuvuutta vapaasti liikkuvien kappaleiden sijaintipisteiden ennustamisessa [10]. Kalman-suodin on yksi yleisimmistä systeemien tilojen arvioinnista käytetyistä algoritmeista [12]. Kalman-suodin luo epätarkkojen ja epävarmojen mittaustuloksien avulla arvioita ja ennustetta systeemin seuraavasta tilasta [12]. Harmaaseen teoriaan perustuvan GM(1,1)-mallin on todettu olevan hyödyllinen mallintamaan systeemejä, joiden kaikkia osia ei tunneta ja joissa otantapisteitä on vähän [10]. Harmaata mallintamista on käytetty ennustamiseen laajasti insinööritieteissä, sosiaalisissa tieteissä, tehonkulutuksessa ja monilla muilla aloilla. [11]

3.1.1 Lineaarinen ja neliöllinen polynomisovite

Kappaleiden liike on harvoin lineaarista, mutta silti kappaleiden seuraavien sijainti pisteiden ennustamiseen käytetään usein lineaarisia sovitteita. Lineaaristen sovitteiden käyttöä kappaleiden liikkeiden ennustuksessa perustellaan kahdella eri tavalla. Ensimmäisenä perusteluna on, että lineaaristen sovitteiden avulla vältytään satunnaisen liikkeen monimutkaisuudesta johtuvien ongelmien sekä aika avaruuden mukaan tuomien monenlaisien ongelmien ratkaisemiselta. Toiseksi lineaaristen sovitteiden käyttöä perustellaan sillä, että jokainen käyrä koostuu lineaarisista segmenteistä, jolloin lineaaristen sovitteiden avulla voidaan ennustaa kaikenlaiset liiketyypit. [13]

Vaikka käyrät koostuvat lineaarisista segmenteistä, niin lineaariset sovitteet eivät kuitenkaan ole sopivia ennustamaan kappaleen liikettä pitkällä aikavälillä, koska ennustuksen virheellisyys kasvaa sitä suuremmaksi, mitä kauemmaksi ennustetta tehdään lineaarista sovitetta pitkin. Esimerkiksi jos kappale on kääntyvässä liikkeessä ja käytetään lineaarista sovitetta, niin sovitteen antama sijainti neljän aikaleiman päästä olisi jo aika kaukana kappaleen oikeasta sijainnista. [13]

Monet vektoreihin perustuvat lineaariset ennusteet käyttävät hyväkseen seuraavaa liikkeen yhtälöä

$$p(t) = v * t + p_0 \qquad (1)$$

Liikkeen yhtälössä p_0 kuvaa kappaleen nykyistä sijaintia, *v* on kappaleen nykyinen nopeus ja *t* on tulevaisuuden aika instanssi. [1]

Toinen kappaleen lineaarisen liikkeen ennustamiseen käytetty kaava on Newtonin toisesta laista johdettu neliöllinen polynomifunktio, [9]

$$p(t) = p_0 + v_0 * t + \frac{1}{2} * a * (t)^2 , \qquad (2)$$

jossa kappaleen sen hetkisen nopeuden ja kiihtyvyyden avulla lasketaan kappaleelle uusi paikka [9]. Polynomiset mallit ovat lineaaristen mallien jälkeen yksinkertaisin mallintamisvaihtoehto. Polynomisten mallien avulla voidaan minimoida mallintamiseen käytetty vaiva, koska ne toimivat monenlaisille datajoukoille tarkasti. Moniin käytännön ongelmiin kuitenkaan korkeammat kuin kolmannen asteen polynomit eivät sovellu, koska ne ovat herkkiä datajoukossa tapahtuville muutoksille ja poikkeamille. Käytettäessä matalamman asteen polynomifunktiota on oltava tarkkana datajoukosta, jonka avulla mallia luodaan. [6, alikohta 1.3.2]

Polynomisten mallien eduksi voidaan laskea se, että ne ovat helposti derivoitavissa sekä integroitavissa. Tällä tavoin voidaan helposti löytää esimerkiksi muuttujien minimi ja maksimiarvoja. Jokaisen datapisteen kautta kulkeva polynominen malli on mahdollista luoda silloin, kun alkuperäisiä havainnoituja datapisteitä on tarpeeksi. Polynomiset mallit ovat kuitenkin virheherkkiä ja jo pienikin virhe alkuperäisissä datapisteissä voi vaikuttaa malliin huonontaen mallin käyttökelpoisuutta. [6, alikohta 1.3.2]

Esitetyt kaavat (1) ja (2) ennustavat kappaleen paikan hyvin vain lineaarisessa liikkeessä olevalle kappaleelle. Liikettä, jossa kappaleen nopeus on suuri tai joka ei ole lineaarista, ei voida tarkasti ennustaa kyseisten kaavojen avulla. [9]

3.1.2 Splini-sovite

Splini-funktio on paloittain määritelty funktio, jonka jokainen pala on määritelty yksiselitteisellä polynomifunktiolla. Käytettäessä splini-funktioita ratkaisemaan käyrien sovite ongelmia yhdelle muuttujalle, aloituskohtina käytetään yhden muuttujan rajallista määrä pisteitä (x_i, y_i), jossa *i* = 1,2,…,m ja jossa pisteet x_i kuvaavat tuntematonta funktionaalista riippuvuutta y = g(x). Pisteiden eli splini-funktion solmukohtien x_i arvot ovat kasvavassa järjestyksessä x_1<x_2<x_3<…< x_{m-1}<x_m. Splini-funktio s(x) asteluvulle n on yhtenäinen käyrä, jonka arvot x_1, x_2,…, x_{m-1}, x_m ovat tiukasti kasvavassa järjestyksessä olevia kokonaislukuja ja jonka määrittelyjoukko on s: R -> R. Splini-funktiolla on seuraavat kaksi ominaisuutta: [14, luku 2]

1. s(x) on asteen *n* tai pienemmän asteen polynomifunktio jokaisella välillä (-∞, x_1], [x_1, x_{i+1}], *i* = 1,2,…,m-1, ja [x_m, +∞].

2. s(x) ja sen derivaatat *n-1* astelukuun asti ovat jatkuvia kaikkialla. [14, luku 2]

Se, että derivaattojen n-1 astelukuun asti tulee olla jatkuvia, takaa sen, että splini-funktiot valituilla solmujoukoilla eivät sisällä vain sopivaa monikulmiota. Splini-funktio s(x) on luonnollinen splini-funktio, jos n = 2k-1, jossa k on kokonaisluku, ja s(x) on k-1 tai sitä pienemmän asteen polynomifunktio väleillä (-∞, x_1] ja [x_m, +∞]. Splini-funktioiden ja polynomifunktioiden erona on vain se, että splini-funktioilla on vaatimuksena jatkuvat derivaatat asteluvuille n-1 asti. [14, luku 2]

Luonnollinen kuutiollinen splini-funktio määritellään funktioksi s(x), jonka solmut ovat kasvavassa järjestyksessä toisiinsa nähden eli $x_1 < x_2 < x_3 < \ldots < x_m$. Funktio on kahdesti jatkuvasti derivoituvissa reaalijoukossa. Lisäksi splini-funktion ulkopuolella funktio voidaan esittää joko suorana viivana tai polynomifunktiona, jonka aste luku on maksimissaan 3. Splini-funktio s(x) koostuu kasvavassa järjestyksessä olevista solmuista $x_1 < x_2 < x_3 < \ldots < x_m$. On todistettu [14, luku 3], että luonnollisien *n* = k-1 asteen splini-funktioiden interpolointi s(x_i) = y_i, jossa *i* = 1,2,…,m≥2, tuottaa vain yhden yksiselitteisen ratkaisun. [14, luku 3]

DeBoorin teorian mukaan oletetaan funktio $s(x) = P_{k-1}(x) + \sum_{i=1}^{m} c_i(x - x_i)^{2k-1}$ 2k-1 asteen luonnolliseksi spili-funktioksi, joka on yksiselitteisesti määritelty ja jolla on ratkaisu interpolointiin s(x_i) = y_i, *i* = 1,2,…,m. Tällöin jokaisella suljetulla välillä [a,b], jossa a ≤ x_i ja b ≥ x_m pätee kaikille funktioille f(x), jotka ovat *k* kertaa derivoituvissa ja jotka toteuttavat yhtälön f(x_i) = y_i, *i* = 1,2,…,m, seuraava kaava, jossa yhtäsuuruus on tosi vain silloin kun k>1 ja f(x) ≡ s(x) on välillä [a,b]: [14, luku 2]

$$\int_a^b [f^{(k)}(x)]^2\, dx \;\geq\; \int_a^b [s^{(k)}(x)]^2\, dx \qquad (3)$$

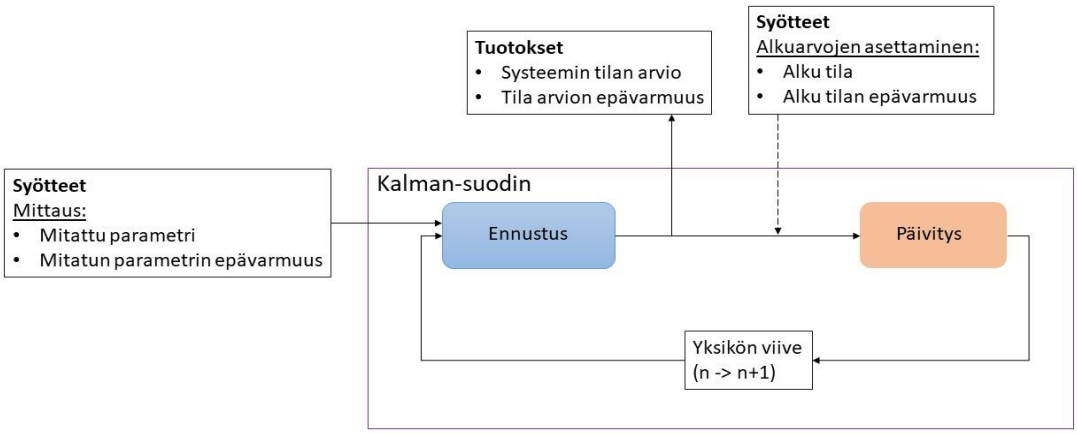
Kokonaiskaarevuuden määritelmä funktiolle f(x) toteaa, että f(x):n ollessa kahdesti derivoituvissa suljetulla välillä [a,b] f(x):n kokonaiskaarevuus on integraali $\int_a^b [f''(x)]^2 dx$. Näin ollen DeBoorin teorian mukaan pisteille (x_i, y_i), *i* = 1,2,…,m luonnollisen kuutiollisen splini-funktion s(x) interpolointi tuottaa pienimmän mahdollisen kokonaiskaarevuuden kaikille funktioille f(x), jotka toteuttavat interpolointiehdon f(x_i) = y_i ja ovat kahdesti jatkuvasti derivoituvissa. [14, luku 3]

3.1.3 Kalman-suodin

Yksi yleisimmistä systeemien tilojen arvioinnista käytetyistä algoritmeista on Kalman-suodin, joka epätarkkojen ja epävarmojen mittaustuloksien avulla luo arvioita ja ennus-

tetta systeemin seuraavasta tilasta käyttäen hyväkseen luomiaan systeemin aikaisempien tilojen arvioita. Kalman-suotimia käytetään arvioimaan ja ennustamaan systeemien tiloja esimerkiksi sijainti- ja navigointisysteemeissä, tutkissa kohteiden seuraamiseen ja tietokonegrafiikoissa. [12]

Kalman-suotimen alkuarvot annetaan suotimelle vain kerran. Alkuarvoina ovat suotimen alkutila ja alkutilan epävarmuus, jotka voivat tulla toisesta prosessista tai systeemistä, tai alkutilat voivat olla Kalman-suotimen alustajan tekemä hyvä arvaus siitä, mitkä arvot sopivat tilanteeseen alkuarvoiksi. Alkutilojen ei tarvitse olla täysin tarkkoja, mutta mitä tarkempia alkutilat ovat, sitä vähemmän iterointi kierroksia Kalman-suodin joutuu tekemään päästäkseen lähelle oikeaa arvoa. Mittauksien arvoina ovat mitattu systeemin tila ja mitatun tilan epävarmuus. Toisin kuin alkuarvojen asettaminen, mittaus suoritetaan jokaisella kierroksella. Mittauksen epävarmuus on usein ilmoitettuna mittalaitteiston kalibroinnissa tai tieto on saatavissa mittalaitteiston myyjältä. Suodin tuottaa tulokseksi kaksi eri arvoa: systeemin tilan arvion ja tilan arvion epävarmuuden. Kuvassa 7 on esitettynä Kalman-suotimen kierros ja kierroksen syötteet ja tuotokset. Syötteinä ovat ensimmäisellä kierroksella sekä alkuarvot että mittausarvot ja muilla kierroksilla vain mittausarvot. [15]



Kuva 7. Kalman-suodin algoritmin peruskuvaus [15].

Kalman-suotimessa on viisi eri yhtälötyyppiä: tilan päivitysyhtälöt, tilan extrapolointiyhtälöt, Kalmanin vahvistuksen yhtälöt, kovarianssin päivitysyhtälöt ja kovarianssiextrapolointiyhtälöt. Kalmanin vahvistuksen arvo on aina 0 ja 1 välillä ja se kertoo sen, kuinka paljon arvioita halutaan muuttaa saadun mittaustuloksen avulla. Mitä lähempänä nollaa

ollaan, sitä enemmän algoritmi luottaa arvioituun arvoon ja mitä lähempänä ykköstä ollaan, sitä enemmän algoritmi luottaa mitattuun arvoon. Kovarianssin päivitysyhtälöitä kutsutaan myös korjausyhtälöiksi ja kovarianssiextrapolointiyhtälöitä kutsutaan myös ennusteen kovarianssiyhtälöiksi. [15]

Kuvassa 7 näkyvässä ennustuskohdassa Kalman-suodin extrapoloi syötteenä saamansa tilan ja tämän tilan epävarmuuden Kalman-suotimelle määritetyillä käyttötapauskohtaisilla extrapolointiyhtälöillä. Päivitys vaiheessa Kalman-suodin ensin laskee Kalmanin vahvistuksen arvon ja sen jälkeen päivittää arvionsa saadun mittaustuloksen avulla sekä päivittää arvion epävarmuuden. [16]

Koska oikean maailman ilmiöt ovat harvoin lineaarisia, niin Kalman-suodinta tulee muokata hieman, jotta se soveltuisi oikean maailman ilmiöiden mallintamiseen. Tällaista muokattua Kalman-suodinta kutsutaan laajennetuksi Kalman-suotimeksi. Normaali Kalman-suodin toimii vain lineaarisilla yhtälöillä ja normaalijakaumalla, mutta laajennettu Kalman-suodin toimii ei-lineaarisilla yhtälöillä. Nämä ei-lineaariset yhtälöt linearisoidaan laajannetussa Kalman-suotimessa käyttämällä Taylorin sarjaa apuna. Taylorin sarjan ensimmäistä derivaattaa kutsutaan Jacobin matriisiksi ja matriisia käyttämällä approksimoidaan ei-lineaariset yhtälöt lineaarisiksi yhtälöiksi. Kalman-suotimien ennustusvaihe pysyy samana sekä lineaaristen yhtälöiden että ei-lineaaristen yhtälöiden kohdalla, mutta päivitysvaihe on erilainen, koska ei-lineaarisien yhtälöiden tapauksessa yhtälöt linearisoidaan lineaarisiksi yhtälöiksi. [17]

3.1.4 GM(1,1)-malli

Harmaiden järjestelmien teoriaan perustuvan GM(1,1)-mallin on todettu olevan hyödyllinen mallintamaan systeemejä, joiden kaikkia osia ei tunneta ja joissa otantapisteitä on vähän [10]. Harmaata mallintamista ja sen GM(1,1)-mallia sekä mallin johdannaisia on käytetty ennustamiseen laajasti insinööritieteissä, sosiaalisissa tieteissä, tehonkulutuksessa ja monilla muilla aloilla. [11] GM(1,1)-mallin symboli GM(1,1) tarkoittaa yhden muuttujan ensimmäisen asteen harmaata mallia [5, alikohta 4.1.1]. GM(1,1)-mallin alkuperäinen muoto on:

$$x^{(0)}(k) + ax^{(1)}(k) = b, \qquad (4)$$

kun merkitään käsittelemättömän datan sarjaa $X^{(0)} = \left(x^{(0)}\right)(1), \left(x^{(0)}\right)(2), \dots, \left(x^{(0)}\right)(n)$ ja tämän data sarjan akkumulaatiosarjaa $X^{(1)} = \left(x^{(1)}\right)(1), \left(x^{(1)}\right)(2), \dots, \left(x^{(1)}\right)(n)$ [5, alikohta 4.1.1]. Akkumuloidun sarjan vierekkäisten arvojen keskiarvo saadaan laskettua kaavalla [5, alikohta 4.1.1]

$$z^{(1)}(k) = \frac{1}{2}(x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)), \quad (5)$$

jossa k = 2,3,..,n, jolloin voidaan merkitä akkumuloidusta sarjasta luotua keskiarvojen sarjaa $Z^{(1)} = (z^{(1)})(2), (z^{(1)})(3), \dots, (z^{(1)})(n)$ [5, alikohta 4.1.1]. GM(1,1) mallin perusmuoto on:

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b \text{ [5, alikohta 4.1.1].} \qquad (6)$$

Jotta GM(1,1)-malli voidaan luoda data joukolle $X^{(0)}$, tulee sen olla lähes sileä ja toteuttaa kvasiexponenttiehto. Datajoukko $X^{(0)}$ on lähes sileä, kun sen toteuttaa seuraavat ehdot:

1. $\frac{\rho(k+1)}{\rho(k)} < 1; k = 2,3, \dots, n-1$
2. $\rho(k) \epsilon [0, \varepsilon]; k = 3,4, \dots, n$
3. $\varepsilon < 0.5$

Datajoukko toteuttaa kvasiexponenttiehdon, kun sen harmaan exponentin -laissa olevan muuttujan δ arvo on pienempi kuin 0,5. Harmaan exponentin laki on seuraavan: $\forall$k, σ(k) ∈ [a,b], b – a = δ, jossa a ja b ovat kokonaislukuja [5, kohta 2.4] ja $\sigma(k) = \frac{x(k)}{x(k-1)}, k = 2,3, \dots, n$ [5, alikohta 2.3.3].

Teoreettinen pohja harmaan teorian mallintamiselle on teoreema, jossa todetaan, että $X^{(1)}$ sarja täyttää lähes sileyden -lain, kun se on lähes sileän epänegatiivisen data joukon $X^{(0)}$ kertaalleen akkulumoitu sarja [5, alikohta 4.1.1].

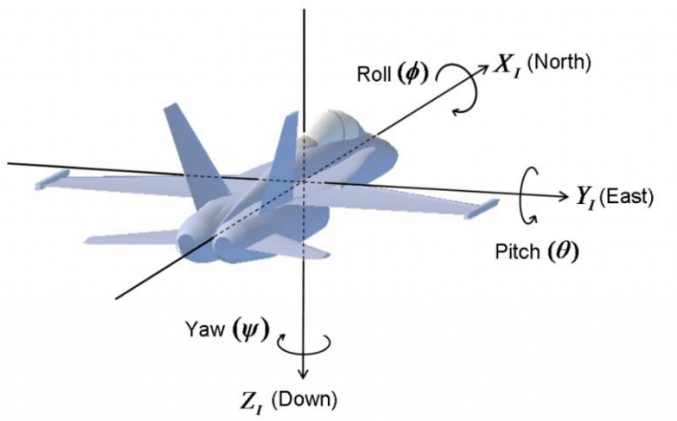
Jos $Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ . \\ . \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}$ ja $B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ . & . \\ . & . \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}$ ja $\hat{a} = (a, b)^{(T)}$ on sarja parametreja, niin silloin mallin GM(1,1) pienimmän neliön arvioitu sekvenssi toteuttaa yhtälön $\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y$. [5, alikohta 4.1.1] GM(1,1)-mallin valkaisu- tai kuvayhtälö on muotoa:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b \qquad (7)$$

jos $[a, b]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y$ [5, alikohta 4.1.1]. Kuvayhtälö tuottaa ratkaisun $x^1(t) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right) e^{-ak}, k = 1,2, \dots, n$, jos $\hat{a} = [a, b]^T$. Tätä ratkaisua kutsutaan ajan vastausfunktioksi ja funktion avulla saatu ajan vastaussarja on muotoa ^$x^{(1)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right) e^{-ak} + \frac{b}{a}, k = 1,2, \dots, n$. [5, alikohta 4.1.1]

3.2 Asentoennustealgoritmit

Lentävän jäykän kappaleen asento kuvataan kolmella eri kulmalla ja näitä kulmia kutsutaan Eulerin kulmiksi tai kääntymiskulmaksi, pituuskallistuskulmaksi ja kallistuskulmaksi. Kääntymiskulma (kuvassa 8 yaw-kulma) kuvaa kappaleen kulmaa Z-akselin ympäri ja määriteltynä välillä 0-360 astetta, pituuskallistuskulma (kuvassa 8 pitch-kulma) kuvaa kappaleen kulmaa Y-akselin ympäri ja on määriteltynä välille -90 – 90 astetta ja kallistuskulma (kuvassa 8 roll-kulma) kuvaa kappaleen kulmaa X-akselin ympäri ja on määritelty välille -180 – 180 astetta. Positiivinen pituuskallistuskulma tarkoittaa sitä, että lentävän kappaleen, eli kuvassa olevan lentokoneen, nokka on horisontin yläpuolella ja negatiivinen pituuskallistuskulma sitä, että koneen nokka on horisontin alapuolella. Kallistuskulman ollessa positiivinen, lentokoneen oikea siipi on painuneena alaspäin ja kallistuskulman ollessa negatiivinen, lentokoneen vasen siipi on painuneena alaspäin. [7, luku 1]



Kuva 8. Lentokoneen kääntymis-, kallistumis- ja pituuskallistuskulmat [18].

Tässä luvussa esitetään kaksi eri tapaa ennustaa jäykän kappaleen asentoa. Ensimmäinen esitetty tapa on jäykän kappaleen asennon liikeyhtälöt ja toinen on hiukkassuodatin.

3.2.1 Jäykän kappaleen asennon liikeyhtälöt

Jäykkien lentävien kappaleiden lentojen aikana kuuden asteen liikeyhtälöitä voidaan käyttää ennustamaan kappaleen lentorataa sekä asentoa. Jäykän lentävän kappaleen asentoa mielivaltaisessa liikkeessä voidaan simuloida kahdella eri tavalla. Ensimmäinen tapa laskea jäykän lentävän kappaleen asento on esitetty kaavassa:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mu} \\ \dot{\gamma} \\ \dot{\chi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & tan\gamma sin\mu & tan\gamma cos\mu \\ 0 & cos\mu & -sin\mu \\ 0 & sec\gamma sin\mu & sec\gamma cos\mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_w \\ q_w \\ r_w \end{bmatrix} \tag{8}$$

Kaavassa γ ja μ ovat tuulikoordinaatistossa olevat Eulerin kulmat. [7, luku 1] Symbolit $\mu^{\cdot}$, $\gamma^{\cdot}$ ja $\chi^{\cdot}$ ovat Eulerin kulmien muutokset tuulikoordinaatistossa. Tuulikoordinaatiston inertiaalisen suhteellisen kulmanopeusvektorin ω komponentit p_w, q_w ja r_w kaavassa 8 voidaan kirjoittaa muotoon:

$$p_w = (pcos\alpha + rsin\alpha)cos\beta + (q - \alpha)sin\beta \quad (9)$$

$$q_w = -(pcos\alpha + rsin\alpha)sin\beta + (q - \alpha)cos\beta \quad (10)$$

$$r_w = (-psin\alpha + rcos\alpha) + \beta \quad (11)$$

jossa p, q ja r ovat runkokoordinaatissa olevan inertiaalisen kulmanopeusvektorin komponentit [7, luku 1]. α ja β ovat aerodynaamiset kulmat. α on kohtauskulma, joka lasketaan kaavalla

$$\alpha = tan^{-1}\left(\frac{w}{u}\right) \quad (12)$$

ja β on lentävän kappaleen sivuliukukulma, joka lasketaan kaavalla

$$\beta = sin^{-1}\left(\frac{v}{V}\right), \quad (13)$$

jossa $V = \sqrt{(u^2 + v^2 + w^2}$ ja *u*, *v* ja *w* ovat lentokoneen painovoimankeskipisteen inertiaalisen nopeusvektorin komponentit. [7, luku 1]

Toinen tapa laskea jäykän lentävän kappaleen asento on esitettynä kaavassa:

$$\begin{bmatrix} \varphi^{\cdot} \\ \theta^{\cdot} \\ \Psi^{\cdot} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & tan\theta sin\varphi & tan\theta cos\varphi \\ 0 & cos\varphi & -sin\varphi \\ 0 & sec\theta sin\varphi & sec\theta cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (14)$$

Runkokoordinaatistossa Eulerin kulmia merkitään symboleilla φ, θ ja Ψ. Yhtälössä olevat symbolit $\varphi^{\cdot}$, $\theta^{\cdot}$ ja $\Psi^{\cdot}$ kuvaavat kääntymiskulmanopeutta, kallistuskulmanopeutta ja nousukulmanopeutta. Integroimalla kulmanopeusvektori saadaan kappaleen asento selville. [7, luku 1]

3.2.2 Hiukkassuodatin

Hiukkassuodattimen ideana on löytää se tila-avaruus kohteen ympäriltä, missä kohteen seuraava tila todennäköisesti sijaitsee. Kohteen tila voi olla kohteen sijainti tai tässä tapauksessa kohteen asento. Tila-avaruus luodaan hiukkasten avulla. Jokainen hiukkanen kuvaa kohteen seuraavaa asentoa ja nämä hiukkaset saavat painoarvon sen mukaan, millä todennäköisyydellä ne olisivat kohteen seuraava asento. Todennäköisempien hiukkaisten koko kaksinkertaistetaan ja epätodennäköisempiä hiukkasia pudotetaan pois tila-avaruudesta, näin lopulta löytäen hiukkanen, joka kuvaa kohteen tilaa parhaiten.

Hiukkassuodin on sitä hitaampi, mitä enemmän se luo hiukkasia yhdellä kierroksella, mutta mitä enemmän hiukkasia on, sen tarkempi on sen arvio kohteen seuraavasta tilasta. [19]

Hiukkassuodatinta käytetään ei-lineaarisissa ja ei-normaalijakautuneissa systeemeissä laajasti hiukkassuotimen hyvän multimodaalisen prosessointikyvyn takia. Ei-lineaarisia ja ei-normaalijakautuneissa systeemejä, joissa hiukkassuodinta sovelletaan, löytyy monilta eri aloilta. Esimerkiksi taloudessa hiukkassuodinta käytetään tekemään talouden kehityksen ennusteita, liikenteessä monitoroimaan videoiden kautta autoja ja jalankulkijoita, robotiikassa globaaliin asenointiin sekä tutkissa lentävien kappaleiden seurantaan. [20]

Hiukkasia luodaan hiukkasuodattimessa kolmessa eri vaiheessa: ensimmäisessä vaiheessa monistetaan hiukkasia suodattimelle annetun painotusarvofunktion avulla, toisessa vaiheessa arvioidaan luotujen hiukkasten laatua eli tilanteeseen sopivaa oikeudellisuutta ja lasketaan hiukkasille uudet painoarvot sen mukaan, mikä on hiukkasten todennäköisyys olla tilanteeseen sopivin. Kolmannessa vaiheessa valitaan sopivin hiukkanen. [21, alikohta 1.2.2.2]

Aikainstanssien *t-1* ja *t* välinen geneerinen hiukkassuodattimen algoritmi sisältää viisi eri vaihetta, josta viides vaihe, uudelleen näytteistäminen, on vaihtoehtoinen, koska sitä ei tarvita sillä iterointikierroksella, jolla oikea hiukkanen on löydetty. Muilla iterointikierroksilla viideskin vaihe tarvitaan. Hiukkasia kutsutaan välillä myös näytteiksi. Ensimmäisessä vaiheessa joukolle hiukkasia $\left\{x_{0:t-1}^{(i)},\ w_{t-1}^{(i)}\right\}, i = 1, \dots, N$ esitellään suodattimen tiheys $p(x_{0:t-1}|y_{1:t-1})$. Suodattimen tiheys voidaan merkitä olemaan noin

$$p(x_{0:t-1}|y_{1:t-1}) \approx \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} w_t^{(i)}\, \delta_{x_{0:t}^{(i)}}(x_{0:t}), \quad (15)$$

missä N on painotettujen hiukkasten lukumäärä, $x_{0:t}^{(i)}$ yksittäinen hiukkanen, $x_{0:t}$ objektin tila ja δ Diracin deltafunktio, joka kuvaa tila-avaruutta. Ensimmäisellä iterointi kierroksella ensimmäisessä vaiheessa jokainen hiukkanen on yhtä todennäköisesti mahdollinen ratkaisu. [21, alikohta 1.2.2.2]

Toinen vaihe on tutkia tila-avaruus painotusarvofunktion avulla käyttäen kaavaa:

$$x_t^{(i)} \sim q(x_t|x_{0:t-1}^{(i)}, y_{t:1}). \quad (16)$$

Kolmasvaihe on arvioida tai korjata hiukkasten painoarvoja [21, alikohta 1.2.2.2]. Painoarvoja korjataan, jos hiukkasilla on jo laskettuina jotkin painoarvot. Hiukkasten painoarvot lasketaan kaavalla:

$$w_t^{(i)} = \frac{p(x_{0:t}^{(i)}|y_{1:t})}{q(x_{0:t}^{(i)}|y_{1:t})} \propto \frac{p(y_t|x_t^{(i)})p(x_t^{(i)}|x_{t-1}^{(i)})p(x_{0:t-1}^{(i)}|y_{1:t-1})}{q(x_{0:t}^{(i)}|y_{1:t})} \quad (17)$$

Kun merkitään $q\left(x_{0:t}^{(i)}\middle|y_{1:t}\right) = q\left(x_t^{(i)}\middle|x_{0:t-1}^{(i)}, y_{1:t}\right) q\left(x_{0:t-1}^{(i)}\middle|y_{1:t-1}\right)$, saadaan yhtälö muotoon:

$$w_t^{(i)} \propto \frac{p\left(y_t\middle|x_t^{(i)}\right)p\left(x_t^{(i)}\middle|x_{t-1}^{(i)}\right)p\left(x_{0:t-1}^{(i)}\middle|y_{1:t-1}\right)}{q\left(x_t^{(i)}\middle|x_{0:t-1}^{(i)}, y_{1:t}\right)q\left(x_{0:t-1}^{(i)}\middle|y_{1:t-1}\right)} \propto w_{t-1}^{(i)} \frac{p\left(y_t\middle|x_t^{(i)}\right)p\left(x_t^{(i)}\middle|x_{t-1}^{(i)}\right)}{q\left(x_t^{(i)}\middle|x_{0:t-1}^{(i)}, y_{1:t}\right)} \quad (18)$$

Kolmannen vaiheen lopuksi, painoarvot tulee vielä normalisoida kaavalla:

$$\tilde{w}_t^{(i)} = \frac{w_t^{(i)}}{\sum_{j=1}^{N} w_t^{(j)}} \quad (19)$$

Neljännessä vaiheessa arvioidaan suodatusjakauman odotusarvo kaavalla:

$$\mathbb{E}\left(F(x_{0:t})\right) \approx \frac{1}{N}\tilde{w}_t^{(i)} F(x_{0:t}^{(i)}) \ . \quad (20)$$

Viides vaihe on uudelleennäytteistys, jos se on tarpeellista. Hiukkassuodin on esiteltynä asennon ennustamisessa, mutta tätä algoritmia voi käyttää myös sijainnin ennustamiseen. Käytännössä tällä algoritmilla voi tehdä sekä sijainnin ennustamisen että asennon ennustamisen. [21, alikohta 1.2.2.2]

3.3 Algoritmien vertailu ja valinta

Tässä luvussa vertaillaan sijainnin ennustamisalgoritmien ominaisuuksia toisiinsa sekä asennon ennustamisalgoritmien ominaisuuksia toisiinsa. Vertailtavat algoritmit ovat esiteltyinä kohdissa 3.1 ja 3.2. Algoritmien vertailua tehdään, jotta selviää, mikä algoritmi olisi paras lentävän kappaleen sijainnin sekä asennon ennustamiseen. Vaikka olisi käytössä kaikki paras ennustus- tai arvioimismenetelmä, niin silti mitään ennustusta ei saada täysin tarkaksi [5, alikohta 1.1.3.2].

3.3.1 Sijainnin ennustamisalgoritmien vertailu ja valinta

Tässä alikohdassa vertaillaan kohdassa 3.1. esitettyjä neljää eri sijainti ennustusalgoritmia: lineaarista sovitetta, polynomisovitetta, splini-sovitetta, Kalman-suodinta sekä harmaata mallia GM(1,1). Taulukossa on vertailu kyseisiä algoritmeja mainitussa järjestyksessä.

Taulukko 2. Sijainnin ennustamisalgoritmien hyvät ja huonot puolet.

Algoritmi	Hyvät puolet	Huonot puolet
Lineaarinen sovite	- Voi ennustaa kappaleen sijainnin tarkasti silloin kun kappaleen liike on esimerkiksi lineaarista tai polynomista ja saadut otantapisteet, joiden avulla ennustusta luodaan, ovat luotettavia [10]. - Lineaaristen sovitteiden avulla vältytään satunnaisen liikkeen monimutkaisuudesta johtuvien ongelmien sekä aika avaruuden mukaan tuomien monenlaisien ongelmien ratkaisemiselta [13]. - Jokainen käyrä koostuu lineaarisista segmenteistä, jolloin lineaaristen sovitteiden avulla voidaan ennustaa kaikenlaiset liiketyypit [13].	- Lineaariset sovitteet eivät ole sopivia ennustamaan kappaleen liikettä pitkällä aikavälillä, koska ennustuksen virheellisyys kasvaa sitä suuremmaksi, mitä kauemmaksi ennustetta tehdään lineaarista sovitetta pitkin. Esimerkiksi jos kappale on kääntyvässä liikkeessä ja käytetään lineaarista sovitetta, niin sovitteen antama sijainti neljän aikaleiman päästä olisi jo aika kaukana kappaleen oikeasta sijainnista. [13]
Polynominen sovite	- Lineaaristen mallien jälkeen yksinkertaisin mallintamisvaihtoehto [6, alikohta 1.3.2]. - Voidaan minimoida mallintamiseen käytetty vaiva, koska toimivat monenlaisille data joukoille tarkasti [6, alikohta 1.3.2]. - Helposti derivoitavissa sekä integroitavissa. Tällä tavoin voidaan helposti löytää esimerkiksi muuttujien minimi- ja maksimiarvoja. [6, alikohta 1.3.2] - Jokaisen datapisteen kautta kulkeva polynominen malli on mahdollista	- Moniin käytännön ongelmiin kuitenkaan korkeammat kuin kolmannen asteen polynomit eivät sovellu, koska ne ovat herkkiä datajoukossa tapahtuville muutoksille ja poikkeamille [6, alikohta 1.3.2]. - Käytettäessä matalamman asteen polynomifunktiota on oltava tarkkana datajoukosta, jonka avulla mallia luodaan [6, alikohta 1.3.2]. - Virheherkkiä, ja jo pienikin virhe alkuperäisissä datapis-

	luoda silloin, kun alkuperäisiä havainnoituja datapisteitä on tarpeeksi [6, alikohta 1.3.2].	teissä voi vaikuttaa malliin huonontaen mallin käyttökelpoisuutta [6, alikohta 1.3.2].
Splini-sovite	- Toimisi hyvin, jos loppupiste olisi tiedossa ja ennustettaisiin liikettä alku- ja loppupisteen välissä. (interpoloinnissa siis) [14, luku 2] - Koska splini koostuu jokaisen pisteen välilisistä yksiselitteisistä polynomifunktioista [14, luku 2] ennustamalla liikettä eteenpäin viimeistä polynomia pitkin, polynomi on kuutiollinen ja saadaan samat hyödyt ja haitat, jotka ovat esitettynä tässä taulukossa polynomisen sovitteen kohdalla.	- Interpolointi funktio [14, luku 2]. - Splini-funktiota käytetään ratkaisemaan käyrien soviteongelmia [14, luku 2].
Kalman-suodin	- Mittaustulokset, joiden pohjalta systeemin tilan arviointia ja seuraavan tilan ennustamista tehdään, voivat olla epätarkkoja ja epävarmoja [12]. - Pystyy arvioimaan systeemin tilaa, vaikka annetut alkuarvot olisivat kaukana todellisesta arvosta [15]. - Laajennettu Kalman-suodin sopii myös ei-lineaaristen systeemien mallintamiseen [16].	- Normaali Kalman-suodin toimii vain lineaaristen systeemien mallintamiseen [16].
GM(1,1) malli	- Hyödyllinen mallintamaan systeemejä, joiden kaikkia osia ei tunneta ja joissa otantapisteitä on vähän [10]. - Voidaan käyttää ennustamaan kappaleen liikettä, silloin kun liike on vapaata eikä sillä ole selvää liikkeenmallia [10].	- Mallille annettavan data joukon tulee olla eksponentiaalisesti kasvava [22]. - Tiedon epänormaali väheneminen mallille annettavassa datajoukossa vaikuttaa negatiivisesti mallin ennustustarkkuuteen [22].

	-Tarvitsee vähintään neljä havaintoa [22].	

Jos järjestelmässä on monia toisiinsa liittyviä tekijöitä ja itsenäisesti muuttuvia muuttujia, voi olla järkevää harkita mallijärjestelmän luomista, mikä koostuu useammasta mallista yhden mallin sijaan [5, alikohta 4.5.5.2]. Tällöin mallijärjestelmällä saadaan ennustettua paremmin järjestelmän tulevaisuuden käyttäytymistä kuin yksittäisellä mallilla [5, alikohta 4.5.5.2]. Mallijärjestelmiä voidaan hyödyntää sekä sijainnin että asennon ennustamisessa.

Lentävän kappaleen radan ennustamiseen ei kirjallisuudesta löytynyt yksiselitteistä vastausta, miten kyseinen ongelma kannattaisi ratkaista. Tällä hetkellä aihetta tutkitaan ilmeisesti aika paljonkin, koska erilaisista tavoista ennustaa lentävän kappaleen rataa on parin viime vuoden aikana laitettu maailmalla patenttihakemuksia sisään, jotta ratkaisuja on saatu patentoitua. Lähteet 23, 24, 25, 26 ja 27 ovat tällaisia patentteja.

Koska kirjallisuudesta ei löytynyt yksiselitteistä vastausta siihen, mikä olisi paras algoritmi lentävän kappaleen sijainnin ennustamiseen, niin tässä työssä testataan splini-algoritmin soveltuvuutta sijainnin ennustusalgoritmiksi. Lisäksi, koska splini-algoritmi ratkaisee käyrien soviteongelmia, niin on mielenkiintoista nähdä, miten se toimii ennustettaessa sijaintia eteenpäin jo luotua käyrää pitkin.

3.3.2 Asennonennustamisalgoritmien vertailu ja valinta

Taulukossa 3 on vertailtu kohdassa 3.2. esitettyjä lentävän kappaleen asennon ennustamiseen käytettäviä algoritmeja. Vertailtavat algoritmit ovat jäykän lentävän kappaleen kolmannen asteen liikeyhtälöt ja hiukkassuodatin.

Taulukko 3. Asennon ennustamisalgoritmien hyvät ja huonot puolet.

Algoritmi	Hyvät puolet	Huonot puolet
Liikeyhtälöt	- Lentävät kappaleet noudattavat samoja liikeyhtälöitä, olivat kappaleet minkä muotoisia tahansa [7, luku 1]. - Kappaleen liike voi olla täysin mielivaltaista [7, luku 1]. - Kolmen asteen liikeyhtälöitä voidaan käyttää lennon aikana ennustamaan kappaleen asentoa. Lisäksi käytettäessä kuuden asteen liikeyhtälöitä voidaan ennustaa sekä asentoa että lentorataa. [7, luku 1]	- Vaatii ymmärrystä eri koordinaatioista ja niiden suhteista toisiinsa [7, luku 1].
Hiukkassuodatin	- Mitä enemmän hiukkasia hiukkassuodatin luo yhdellä kierroksella, sitä tarkemman arvion se pystyy luomaan kohteen seuraavasta tilasta [19]. - Seuraava tila, joka hiukkassuotimella arvioidaan, voi olla minkälainen tahansa, joten hiukkassuodatin on todella monikäyttöinen [19]. - Hyvä multimodaalinen prosessointikyky. Soveltuu sen takia hyvin ei-lineaaristen ja ei-normaalijakautuneiden systeemien seuraavien tilojen arviointiin. [19] - Hiukkassuodinta sovelletaan monilla eri aloilla, joissa on ei-lineaarisia ja ei-normaalijakautuneita systeemejä [19]. - Voidaan mallintaa myös kappaleiden ei-lineaarista liikettä [19].	- Hiukkassuodin on sitä hitaampi, mitä enemmän se luo hiukkasia yhdellä kierroksella [19].

Näistä kahdesta vaihtoehdosta valitsisin liikeyhtälöt lentävän kappaleen asennon arviointiin ja ennustamiseen, koska kappaleen liike voi olla täysin mielivaltaista ja silti sen mallintaminen onnistuu liikeyhtälöiden avulla [7, luku 1]. Lisäksi liikeyhtälöillä voi mallintaa erilaisten jäykkien lentävän kappaleiden asentoa riippumatta niiden muista ominai-

suuksista [7, luku 1]. En valitsisi hiukkassuodinta, koska mahdollisimman tarkan ennustuksen luomiseksi hiukkassuodin voi joutua tekemään iteraatiokierroksien aikana paljon hiukkaisia [19]. Mitä enemmän hiukkasia hiukkassuotimen on tehtävä iteraatiokierroksien aikana, sitä raskaampi operaatio hiukkassuotimen ennustuksesta tulee, jolloin se ei ole enää kovin sovelias reaaliaikaiseen ennustamiseen [19].

4. MITTAUSDATA

Mittauksissa käytetty lähtödata tuotettiin simulaattorilla, jolla simuloitiin lentävän kappaleen lentorataa ja asentoa. Lähtödataa tuotettiin neljälle eri reitille: teoreettiselle suoralle reitille, kääntyvälle reitille, reitille, jossa korkeus muuttui ja reitille, jossa nopeus muuttui. Lähtödatan avulla lentävän kappaleen reitin seuraavia pisteitä ennustettiin toteutetulla ennustuskomponentilla.

Tässä luvussa esitetyt taulukot kuvaavat oikean reitin reittipisteitä, joita on käytetty lähtödatana luodessa ennusteita. Näitä oikeita reittipisteitä on käytetty vertailupisteinä mittaustulokset-luvussa, jossa esitetään reitin ennustettujen pisteiden eroja reitin oikeisiin pisteisiin. Jokaisen reitin reittipisteestä esitetään taulukko muodossa seuraavat tiedot: aika sekunteina mittausdatan alusta eteenpäin, leveysasteen koordinaatti, pituusasteen koordinaatti, korkeus, nopeus, ECEF-koordinaatiston x, y ja z koordinaatit, suuntakulma, pituuskallistuskulma ja kallistuskulma.

4.1 Ensimmäinen reitti: Teoreettinen suora

Taulukossa 4 on esitettynä teoreettisen suoran mittauksessa käytetty lähtödata. Taulukossa 4 neljälle ensimmäiselle pisteelle ei ole koordinaatteja muutettu ECEF-koordinaatistoon, koska näitä pisteitä käytetään pelkästään ennustuksen luonnissa, jolloin pisteitä ei tulla vertailemaan ennustettuihin pisteisiin. Neljäs piste on merkitty nollapisteeksi, mikä tarkoittaa sitä, että siitä eteenpäin pisteillä on myös ennustettuja pisteitä luvussa mittaustulokset. Taulukossa 4 olevat reittipisteet ovat oikean reitin reittipisteistä. Suuntakulma, pituuskallistuskulma ja kallistuskulma olivat kaikki 0 jokaisella reitin reittipisteellä, niin niitä ei ole erikseen taulukkoon merkitty.

Taulukko 4. Teoreettisen suoran reitin oikeat reittipisteet.

Aika s	Leveys-aste	Pituus-aste	Korkeus m	Nopeus m/s	ECEF_X	ECEF_Y	ECEF_Z
-3	63	23	3000	250	-	-	-
-2	63,0001	23	3000	250	-	-	-
-1	63,0002	23	3000	250	-	-	-
0	63,0003	23	3000	250	nolla piste	-	-
1	63,0004	23	3000	250	2673755	1134942	5662671
2	63,0005	23	3000	250	2673746	1134938	5662676
3	63,0006	23	3000	250	2673736	1134934	5662682
4	63,0007	23	3000	250	2673727	1134930	5662687
5	63,0008	23	3000	250	2673718	1134926	5662692
6	63,0009	23	3000	250	2673709	1134922	5662697
7	63,001	23	3000	250	2673700	1134918	5662702
8	63,0011	23	3000	250	2673691	1134914	5662707
9	63,0012	23	3000	250	2673682	1134910	5662712
10	63,0013	23	3000	250	2673672	1134906	5662717

4.2 Toinen reitti: Jyrkästi kääntyvä reitti

Taulukoissa 5 ja 6 on esitettynä jyrkästi kääntyvän reitin mittauksissa käytetty lähtödata. Jyrkästi kääntyvällä reitillä suuntakulma muuttui 16,7 astetta sekunnissa. Lähtödataa on kahdessa eri taulukossa. Taulukossa 5 on esitettynä jokaisen oikean reitin reittipisteen aika sekunteina reitin alusta, leveysaste, pituusaste, korkeus, nopeus, suuntakulma, pituuskallistuskulma, kallistuskulma ja ECEF-koordinaatiston koordinaatit x, y ja z.

Taulukko 5. Jyrkästi kääntyvän reitin oikeat reittipisteet.

Aika s	Leveys-aste	Pituus-aste	Korkeus m	Nopeus m/s	Suunta-kulma asteina	Pituuskal-listus-kulma as-teina	Kallistus-kulma asteina	ECEF X	ECEF_Y	ECEF_Z
1	61,781	25,837	3000	250	186	0	82,3	2722743	1318395	5599660
2	61,779	25,836	3000	250	202,7	0	82,3	2722943	1318434	5599554
3	61,777	25,833	3000	250	219,4	0	82,3	2723189	1318377	5599449
4	61,776	25,829	3000	250	236,1	0	82,3	2723370	1318229	5599396
5	61,775	25,824	3000	250	252,9	0	82,3	2723573	1318034	5599343
6	61,775	25,819	3000	250	269,6	0	82,3	2723688	1317797	5599343
7	61,776	25,815	3000	250	286,3	0	82,3	2723692	1317564	5599396
8	61,777	25,811	3000	250	303	0	82,3	2723695	1317331	5599449
9	61,779	25,808	3000	250	319,7	0	82,3	2723587	1317103	5599554
10	61,781	25,806	3000	250	336,4	0	82,3	2723456	1316922	5599660
11	61,783	25,805	3000	250	353,1	0	82,3	2723302	1316789	5599765
12	61,785	25,806	3000	250	9,8	0	82,3	2723102	1316751	5599870
13	61,787	25,808	3000	250	26,5	0	82,3	2722880	1316761	5599976
14	61,789	25,811	3000	250	43,3	0	82,3	2722634	1316818	5600081
15	61,79	25,816	3000	250	60	0	82,3	2722430	1317012	5600134
16	61,791	25,82	3000	250	76,7	0	82,3	2722250	1317160	5600187

Lähtödataa mitattiin myös puolen sekunnin välein toisesta kaarroksesta. Taulukossa 6 on esitettynä seitsemän puolen sekunnin välein olevaa reittipistettä, joita käytetään mittauksissa lähtödatana.

Taulukko 6. Toisesta kaarroksesta jyrkän reitin oikeat reittipisteet.

Aika s	Leveysaste	Pituus-aste	Korkeus m	Nopeus m/s	Suun-ta-kulma asteina	Pituus-kallis-tus-kulma asteina	Kallis-tus-kulma asteina	ECEF_X	ECEF_Y	ECEF_Z
0	62,3579	23,5092	3000	250	152,3	0	82,3	2721932	1184049	5629789
0,5	62,3569	23,5102	3000	250	160,6	0	82,3	2722002	1184136	5629737
1	62,3558	23,5108	3000	250	169	0	82,3	2722089	1184208	5629680
1,5	62,3547	23,511	3000	250	177,4	0	82,3	2722184	1184261	5629623
2	62,3535	23,5109	3000	250	185,7	0	82,3	2722295	1184303	5629561
2,5	62,3524	23,5105	3000	250	194,1	0	82,3	2722403	1184328	5629504
3	62,3514	23,5097	3000	250	202,4	0	82,3	2722510	1184329	5629452

4.3 Kolmas reitti: Reitti, jossa korkeus muuttui

Taulukossa 7 on lähtödata lentävän kappaleen lähtiessä nousu liikkeeseen ja taulukossa 8 on lähtödata lentävän kappaleen ollessa laskeutuvassa liikkeessä. Oikean reitin reittipiste, jonka ajanhetki on nolla sekuntia, on piste, josta eteenpäin pisteillä on myös ennustettuja pisteitä luvussa mittaustulokset. Kaikki tämän luvun taulukoissa esitetyt pisteet ovat oikean reitin reittipisteitä. Taulukoissa 7 ja 8 neljälle ensimmäiselle pisteelle ei ole koordinaatteja muutettu ECEF-koordinaatistoon, koska näitä pisteitä käytetään ainoastaan ennustuksen luonnissa, jolloin näitä neljää pisteitä ei tulla vertailemaan ennustettuihin pisteisiin luvussa mittaustulokset.

Taulukko 7. Nousu liikkeessä olevan kappaleen reitin oikeat reittipisteet.

Aika s	Leveys-aste	Pituus-aste	Korkeus m	Nopeus m/s	Suunta-kulma asteina	Pituus-kallistus-kulma asteina	Kallistus-kulma as-teina	ECEF_X	ECEF_Y	ECEF_Z
-1,5	62,3617	23,5177	3000	250	86,1	0	0	-	-	-
-1	62,3618	23,5201	3000	250	86,1	0	0	-	-	-
-0,5	62,3618	23,5226	3000	250	86,1	0	0	-	-	-
0	62,3619	23,525	3000	250	86,1	1	0	-	-	-
0,5	62,362	23,5274	3010	250	86,1	8,3	0	2721188	1184754	5630010
1	62,3621	23,5297	3036	250	86,1	15,6	0	2721143	1184864	5630038
1,5	62,3621	23,532	3077	249	86,1	23	0	2721113	1184981	5630074
2	62,3622	23,5342	3130	249	86,1	25,3	0	2721081	1185091	5630126
2,5	62,3623	23,5363	3183	249	86,1	25,3	0	2721051	1185197	5630178
3	62,3624	23,5385	3236	249	86,1	25,2	0	2721019	1185307	5630231
3,5	62,3624	23,5407	3289	249	86,1	25,1	0	2720996	1185422	5630278
4	62,3625	23,5429	3341	249	86,1	25	0	2720963	1185532	5630329
4,5	62,3626	23,545	3394	249	86,1	24,9	0	2720933	1185637	5630381

Taulukko 8. Laskeutuvassa liikkeessä olevan kappaleen reitin oikeat reittipisteet.

Aika s	Leveys-aste	Pituus-aste	Korkeus m	Nopeus m/s	Suunta-kulma as-teina	Pituus-kallis-tus-kulma asteina	Kallis-tus-kulma asteina	ECEF_X	ECEF_Y	ECEF_Z
-1,5	62,3735	23,8854	3814	270	86,1	-33,2	0	-	-	-
-1	62,3735	23,8876	3742	271	86,1	-31,4	0	-	-	-
-0,5	62,3736	23,8899	3673	271	86,1	-29,7	0	-	-	-
0	62,3737	23,8921	3608	271	86,1	-27,9	0	-	-	-
0,5	62,3738	23,8945	3546	271	86,1	-26,3	0	2712703	1201793	5631095
1	62,3738	23,8968	3488	271	86,1	-24,7	0	2712630	1201891	5631043
1,5	62,3739	23,8992	3438	270	86,1	-18,6	0	2712550	1201991	5631004
2	62,374	23,9017	3401	268	86,1	-13,1	0	2712473	1202099	5630977
2,5	62,3741	23,9042	3377	266	86,1	-8,2	0	2712401	1202209	5630961
3	62,3742	23,9068	3353	264	86,1	0	0	2712327	1202323	5630944
3,5	62,3742	23,9093	3353	263	86,1	0	0	2712275	1202441	5630944
4	62,3743	23,9118	3353	261	86,1	0	0	2712213	1202556	5630950
4,5	62,3744	23,9143	3353	259	86,1	0	0	2712152	1202670	5630955

4.4 Neljäs reitti: Reitti, jossa nopeus muuttui

Taulukossa 9 on lähtödata lentävän kappaleen kasvattaessa nopeuttaan ja taulukossa 10 on lähtödata lentävän kappaleen laskiessa nopeuttaan. Oikean reitin reittipiste, jonka ajanhetki on nolla sekuntia, on piste, josta eteenpäin pisteillä on myös ennustettuja pisteitä luvussa mittaustulokset.

Taulukko 9. Oikeat reittipisteet reitillä, jolla nopeus kasvoi.

Aika s	Leveys-aste	Pituus-aste	Korkeus m	No-peus m/s	Suunta-kulma as-teina	Pituus-kallistus-kulma as-teina	Kallistus-kulma as-teina	ECEF_X	ECEF_Y	ECEF_Z
-1,5	62,3611	23,4994	3000	251,7	86	0	0	-	-	-
-1	62,3612	23,5019	3000	253,8	86	0	0	-	-	-
-0,5	62,3613	23,5043	3000	255,8	86	0	0	-	-	-
0	62,3613	23,5068	3000	257,9	86	0	0	-	-	-
0,5	62,3614	23,5093	3000	259,9	86	0	0	2721613	1183916	5629970
1	62,3615	23,5118	3000	262	86	0	0	2721552	1184031	5629975
1,5	62,3616	23,5144	3000	264	86	0	0	2721489	1184150	5629980
2	62,3617	23,5169	3000	266	86	0	0	2721428	1184265	5629985
2,5	62,3617	23,5195	3000	268	86	0	0	2721375	1184389	5629985
3	62,3618	23,5221	3000	269,9	86	0	0	2721312	1184508	5629990
3,5	62,3619	23,5247	3000	271,9	86	0	0	2721249	1184628	5629996
4	62,362	23,5273	3000	273,9	86	0	0	2721186	1184747	5630001
4,5	62,3621	23,53	3000	275,8	86	0	0	2721121	1184872	5630006
5	62,3622	23,5326	3000	277,7	86	0	0	2721058	1184991	5630011

Taulukko 10. Oikeat reittipisteet reitillä, jolla nopeus laski.

Aika s	Leveys-aste	Pituus-aste	Korkeus m	Nopeus m/s	Suun-ta-kulma asteina	Pituus-kallis-tus-kulma asteina	Kallis-tus-kulma asteina	ECEF_X	ECEF_Y	ECEF_Z
-1,5	62,3658	23,6448	3000	312,1	86	0	0	-	-	-
-1	62,3659	23,6478	3000	310	86	0	0	-	-	-
-0,5	62,366	23,6508	3000	307,9	86	0	0	-	-	-
0	62,3661	23,6537	3000	305,7	86	0	0	-	-	-
0,5	62,3662	23,6567	3000	303,6	86	0	0	2718123	1190724	5630218
1	62,3662	23,6596	3000	301,6	86	0	0	2718063	1190861	5630218
1,5	62,3663	23,6625	3000	299,5	86	0	0	2717994	1190995	5630223
2	62,3664	23,6654	3000	297,4	86	0	0	2717925	1191128	5630228
2,5	62,3665	23,6682	3000	295,4	86	0	0	2717857	1191257	5630234
3	62,3666	23,671	3000	293,4	86	0	0	2717790	1191386	5630239
3,5	62,3667	23,6739	3000	291,3	86	0	0	2717721	1191520	5630244
4	62,3668	23,6767	3000	289,3	86	0	0	2717653	1191649	5630249
4,5	62,3669	23,6794	3000	287,3	86	0	0	2717588	1191773	5630254
5	62,367	23,6822	3000	285,4	86	0	0	2717521	1191901	5630259

5. TOTEUTUS

Työssä toteutettiin prototyyppinä geneerinen ohjelmistokomponentti, joka ennustaa lentäville kappaleille niiden sijaintia ja asentoa. Lentävän kappaleen sijainnin ennustamiseen ennustuskomponentissa on käytetty Javalla toteutettua Apache commons math3 kirjaston splini-funktiota ja asennon ennustamiseen kaavat saatiin valmiina. Asennon ennustamisessa käytetyt kaavat perustuvat teorialuvussa esitettyihin jäykän kappaleen asennon liikeyhtälöihin. Ennustuskomponentti on geneerinen, joten sen rajapinnan kautta sijainti- ja asentoennustetta voi pyytää minkälaiselle lentävälle kappaleelle tahansa ja sen toteutus ei ole sidottu yksittäisen lentävän kappaleen ominaisuuksiin. Rajapinnan kautta ennustuskomponentille tulee ensin lisätä lentävän kappaleen oikeita sijaintipisteitä, joiden pohjalta käyttäjä haluaa saada kappaleelle sijainti- ja asentoennusteita. Sijaintipisteiden lisäämisen jälkeen rajapinnan kautta voi pyytää sijainti- ja asentoennusteita lentävälle kappaleelle.

5.1 Käytetyt teknologiat

Ohjelmistotuoteympäristö, johon ennustuskomponentti liitettään osaksi, asetti teknologisia vaatimuksia ennustuskomponentille. Teknologisten vaatimusten takia ennustuskomponentti on toteutettu Java-ohjelmointikielellä ja ohjelmistokomponentin liittämiseksi osaksi suurempaa järjestelmää käytettiin Spring-viitekehystä. Spring-viitekehyksen perusperiaate on ulkoistaa ohjelmien komponenttien riippuvuuksien hallinta ja luonti. Java-ohjelmointikieli on oliosuuntautunut ja se luotiin tarpeeseen saada alustariippumaton ohjelmointikieli, jota voisi suorittaa erilaisilla CPU:lla ja jota voisi käyttää eri alojen ohjelmistojen valmistamiseen. Java ohjelmointikieli kehitettiin 1992 ja kieli nimettiin Javaksi 1995. Alunperin ohjelmointikielen nimi oli Oak. Javasta tuli suosittu ohjelmointikieli, koska se ratkaisi ongelman alustariippumattomien ohjelmistojen tuottamiseen ja tämä ratkaisu oli tarpeellinen Internetin kehityksen kannalta. Java vaikutti Internetin kehitykseen laajasti, sillä se muutti koko tavan miten online-maailmassa sisältöä tuotettiin sekä onnistui ratkaisemaan Internetin kannalta keskeisiä turvallisuuteen ja siirrettävyyteen liittyviä ongelmia. [28, luku 1]

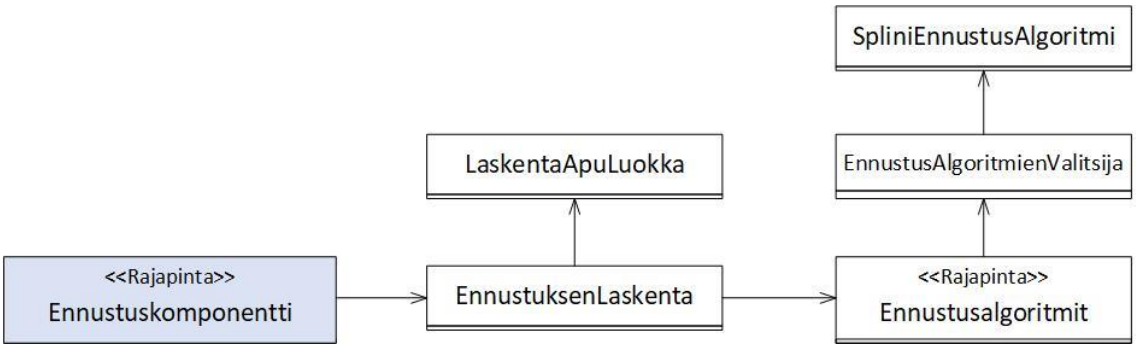
Javan kääntäjä ei suorita Java koodia itse, vaan tuottaa tulokseksi tavukoodia. Java virtual Machine (JVM), joka on osa Javan ajonaikaista ympäristöä, suorittaa Java-kääntäjän tuottaman tavukoodin. Se, että Javan kääntäjä tuottaa tavukoodia, mahdollistaa Java-ohjelmien tuottamisen monissa eri ympäristöissä, koska jokaisessa ympäristössä

oleva JVM ymmärtää tavukoodia ja osaa tuottaa siitä suoritettavan ohjelman. [28, luku 1]

Lentävän kappaleen sijainnin ennustamisessa käytettävä splini-funktio on toteutettu Apachen matemaatikkakirjaston PolynomialSplineFunctiona [29]. Jokainen PolynomialSplineFunction polynomifunktio luodaan Apachen matematiikkakirjaston SplineInterpolator-luokan avulla. SplineInterpolation laskee luonnollisen kuutiollisen splini-interpoloinnin halutulle datajoukolle. [30]

5.2 Ennustuskomponentin toiminta ja rakenne

Toteutetun ennustuskomponentin keskeisimmät luokat ovat esiteltynä kuvassa 9. Kuvassa 9 ennustuskomponentin rajapinta on vasemmassa reunassa. Ennustuskomponenttirajapinta on se rajapinta, jonka kautta ulkoiset järjestelmät pystyvät ennustuskomponenttia käyttämään. Rajapinnan kautta ennustuskomponentille voidaan lisätä sijaintipisteitä, joiden pohjalta käyttäjä haluaa ennustuksen tehdä. Sijaintipisteiden lisäyksen jälkeen rajapinnasta voi pyytää ennusteen haluamansa ajanhetken päähän. Rajapinnan kautta pyydetty ennuste palauttaa yhden ennustepisteen. Ennustepiste sisältää tiedot ennustetusta sijainnista ja asennosta.



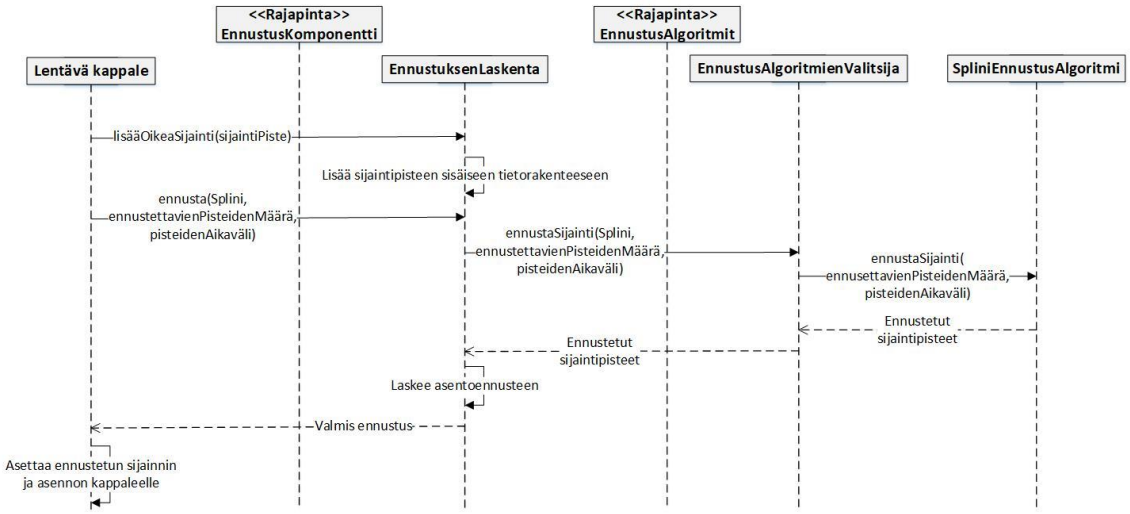
Kuva 9. Ennustuskomponentin tärkeimmät luokat.

Ennustuksen varsinainen laskenta tapahtuu EnnustuksenLaskenta-luokassa. EnnustuksenLaskenta-luokka käyttää apunaan LaskentaApu-luokkaa, jossa on yleisempiä ennustuskomponentin tarvitsemia laskutoimituksia. LaskentaApu-luokassa lasketaan myös lentävän kappaleen asentoennuste. Ennustuskomponentti sisältää Ennustusalgoritmit-rajapinnan, jonka kautta se saa kappaleen sijaintiennustetta. Ennustusalgoritmit-rajapinnan kautta voi kertoa, millä ennustusalgoritmilla haluaa sijaintiennustuksen ja kuinka monta ennustettua sijaintipistettä palautetaan. Lisäksi voidaan määrittää ennustettujen pisteiden välinen aikaväli. Esimerkiksi voitaisiin haluta splini-algoritmilla toteutettua ennustetta 10 pistettä eteenpäin siten, että ennustetut pisteet olisivat 0,1 sekunnin välein.

EnnustusAlgoritmienValitsija-luokka toteuttaa EnnustusAlgoritmit-rajapinnan ja valitsee toteutetuista sijainninennustusalgoritmeista ennustuksessa käytettävän algoritmin. EnnustusAlgoritmienValitsija-luokka pitää sisällään kaikkien toteutettujen sijainnin ennustamiseen tarkoitettujen algoritmien algoritmioliot. Algoritmin valinta tapahtuu rajapinnan kautta parametrina annetun algoritmin tyypin perusteella. Ennustusalgoritmi palauttaa ennustetut sijaintipisteet. Ennustusalgoritmeille on toteutettuna oma rajapinta, jotta ennustuskomponentin kehittäminen tulevaisuudessa olisi kätevämpää. Ennustusalgoritmit-rajapinnan taakse on mahdollisuus lisätä sijainninennustukseen tarkoitettuja ennustusalgoritmeja siten, että muita osia ennustuskomponentin toiminnasta ei tarvitse muuttaa.

Splini-algoritmista ennustuskomponentti käyttää Javalla toteutettua Apache commons math3 -kirjaston PolynomialSplineFunction-luokkaa. Splini-algoritmilla tehty ennuste huomioi ennustusta luodessaan vain kolme viimeisintä oikeaa sijaintipistettä. Tällainen ennustustapa sopii hyvin tilanteisiin, joissa pitkällä historia datalla ei voida ennustaa tulevaisuutta luotettavasti. Pitkänä historiana voidaan tässä tapauksessa esimerkiksi datapisteitä, joita on saatu viiden viimeisimmän minuutin ajalta. Liikettä, jota on hankala ennustaa pitkällä historiadatalla, on esimerkiksi kappaleen liike, jossa nopeus vaihtelee, nopeus on suuri tai kappale tekee jyrkkiä käännöksiä.

Kuvassa 10 on ennustuskomponentin sekvenssikaavio. Suuremmilla teksteillä seksvenssikaavio on saatavilla liitteessä A. Skevenssikaaviosta näkyy, miten lentävän kappaleen tekemä ennustuspyyntö etenee ennustuskomponentin sisällä sijaintiennusteen osalta.



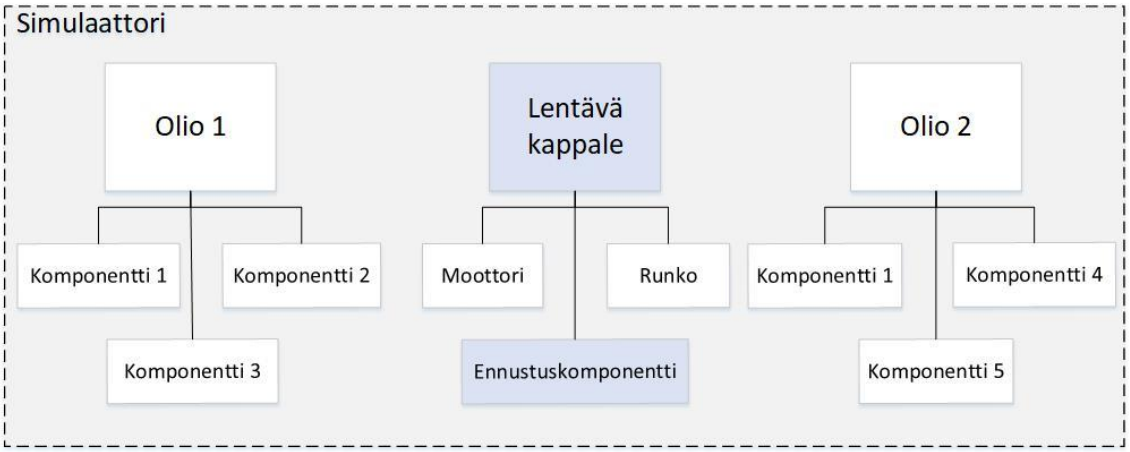
Kuva 10. Ennustuskomponentin sekvenssikaavio.

Ennustuskomponentti olettaa saamansa sijaintidatapisteet oikeiksi. Datapisteiden tulee olla ennustuskomponentin hyväksymiä dataolioita. Ennustuskomponentti ei käsittele sijaintidataolioiden tietoja mitenkään, vaan käyttää niitä suoraan sijainnin ennustamisessa.

Koska sijaintidataolioita ei käsitellä mitenkään suhteessa toisiin sijaintidataolioihin, pisteitä, joiden sijainti on kaukana muiden datapisteiden sisältämistä sijainneista, ei huomata ja ne voivat aiheuttaa virhettä dataolioiden pohjalta luotuun ennustukseen. Ennustuskomponenttiin ei tämän työn yhteydessä toteutettu kykyä korjata pieleen mennyttä ennustetta. Pieleen menneellä ennusteella tarkoitetaan ennustetta, joka on ennustuskomponentin käyttäjän asettamien sallittujen raja-arvojen ulkopuolella. Pieleen menneen ennustuksen tapauksessa olisi hyvä olla suunniteltu toimintatapa, miten silloin menetellään. Esimerkiksi siirretäänkö kappale vain seuraavaan oikeaan sijaintiin tai asentoon vai yritetäänkö kappaletta liikuttaa kohti oikeaa sijaintia tai asentoa tasaisemmin. Pieleen mennyt ennustus voi aiheuttaa esimerkiksi tilanteita, joissa simuloitavan lentävän kappaleen suuntakulma on 180 astetta väärin kappaleen oikeaan suuntakulmaan nähden.

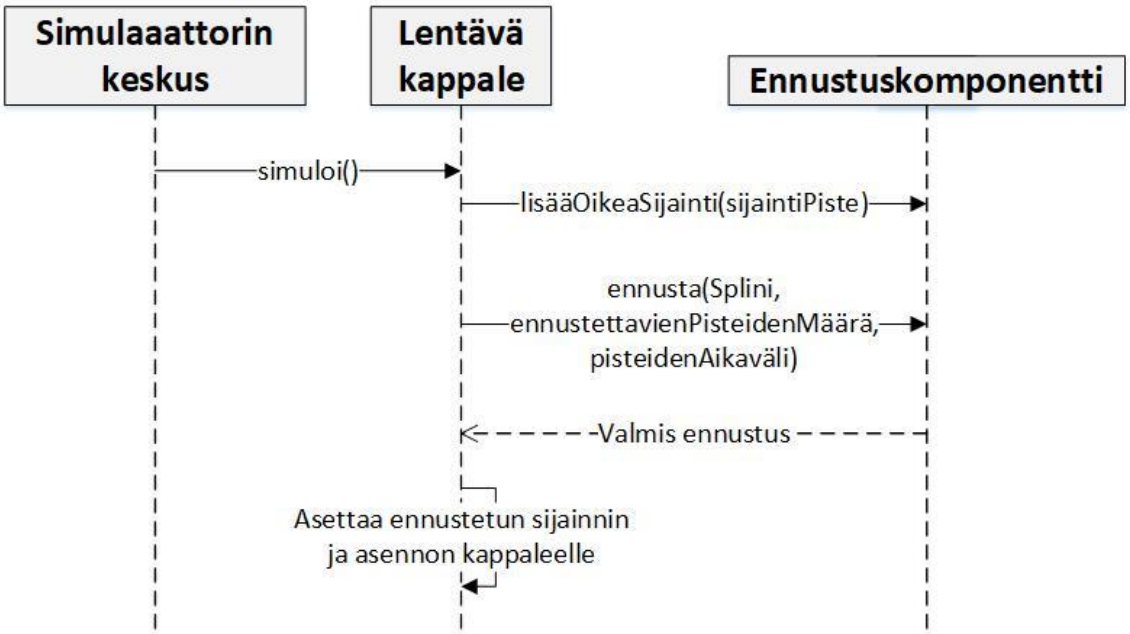
5.3 Ennustuskomponentin integrointi osaksi suurempaa järjestelmää

Ennustuskomponentti liitettiin osaksi suurempaa simulaattoria, joka simuloi lentäviä kappaleita. Simulaattorissa tarvitaan ennustuskomponenttia, koska osa simulaattorin saamasta ulkoisen datalähteen datasta päivittyy hitaammin kuin mitä simulaattorin lentävien kappaleiden simuloinnin tarkkuus vaatii. Simulaattori koostuu useista erilaisista olioista. Lentävä kappale on yksi tällainen olio. Jokainen olio koostuu komponenteista. Jokaista komponenttia simuloidaan erikseen ja oliot voivat koostua kokonaan erilaisista komponenteista tai osittain samoista komponenteista, kuten kuvassa 11 oliot 1 ja 2 koostuvat sekä komponentista 1 että omista yksilöllisistä komponenteistaan. Kuvassa 11 näkyy, että ennustuskomponentti on yksi niistä komponenteista, joista lentävä kappale olio - koostuu.



Kuva 11. Simulaattorin koosteluokkakaavio.

Simulaattorin käynnistyessä simulaattori kutsuu kaikkien olioidensa simuloi-metodia, jolloin olioita aletaan simuloida. Simulaattorin kutsuu olioidensa simuloi-metodia jokaisen simulaation aika-askelman alussa. Aika-askelman pituus on simulaattorissa vakio. Kuvasta 12 nähdään, miten simulaattorin keskus käskee lentävän kappaleen aloittamaan simulointi. Kun simulointi on alkanut, jokaisen aika-askelman aikana lentävä kappale suorittaa kuvassa 12 näkyvät toiminnallisuudet. Kuvaan 12 on kuvattu vain ennustuskomponentin käyttäminen, mutta samalla tavalla lentävän kappaleen simuloinnin alettua, se ryhtyy simuloimaan ja käyttämään sen muitakin komponentteja.



Kuva 12. Olion simuloinnin sekvenssikaavio.

Ennustuskomponentti-olio määriteltiin Spring-viitekehyksen XML-konfigurointitiedostossa simulaattoriin lentävän kappaleen käyttöön [31, luku 1]. Spring-viitekehystä voi-

daan käyttää monenlaisten Java ohjelmistojen rakentamiseen [31, luku 1]. Spring-viitekehyksen avulla ohjelmistojen kehittäjät pystyvät joustavasti määrittelemään olioiden välisiä riippuvuuksia ohjelmistossa esimerkiksi käyttäen XML-tiedostoja olioiden määrittelemiseen [31, luku 1]. Ohjelma 1 on esimerkki yksinkertaisesta XML-konfigurointitiedostosta.

```
<?xml version=”1.0” encoding=”UTF-8”>
<beans xmlns=”http://www.springframework.org/schema/beans”
   xmlns:xsi=”http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance”
   xsi:scemaLocation=” http://www.springframework.org/schema/beans
   http://www.springframework.org/schema/beans/spring-beans.xsd”>
      <bean id=”ennustuksenLaskenta” class=” fi.esimerkki.koodi.Ennustuk-
      senLaskenta”>
         <constructor-arg ref=”esimerkkiOlio”/>
       </bean>
   .
   .
   .
</beans>
```

Ohjelma 1. Esimerkki olion luonnista XML-tiedostossa [31, luku 3].

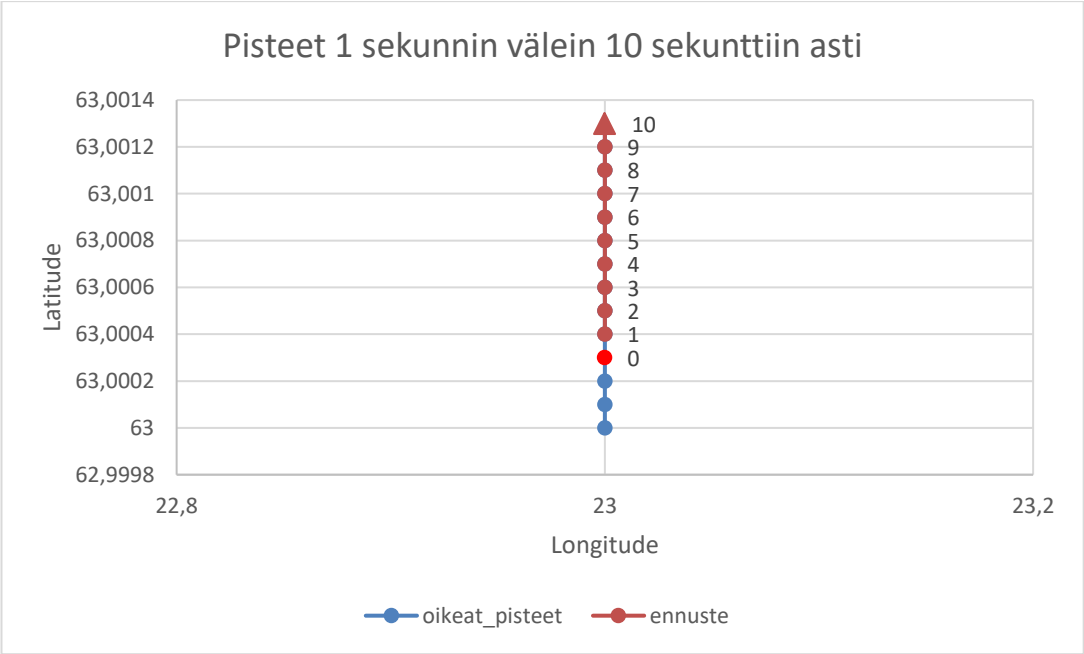
Jotta XML-tiedostossa voisi määritellä olioita, englanniksi bean, kuten yllä olevassa esimerkissä, tulee XML-tiedoston alussa ottaa käyttöön Springin käyttämä beans-nimiavaruus [31, luku 3]. Oliot määritellään XML-tiedostossa bean-tagien avulla [31, luku 3]. Spring-viitekehys tarjoaa useita muitakin nimiavaruuksia beans-nimiavaruuden lisäksi [31, luku 3]. XML-tiedostossa määritellyille olioille voi antaa alustusparametreja constructor-arg-tagin avulla [31, luku 3]. Ohjelmassa 1 beanille ennustuksenLaskenta on annettu alustusparametriksi viite toiseen samassa XML-tiedostossa sijaitsevaan olioon.

6. MITTAUKSIEN TULOKSET

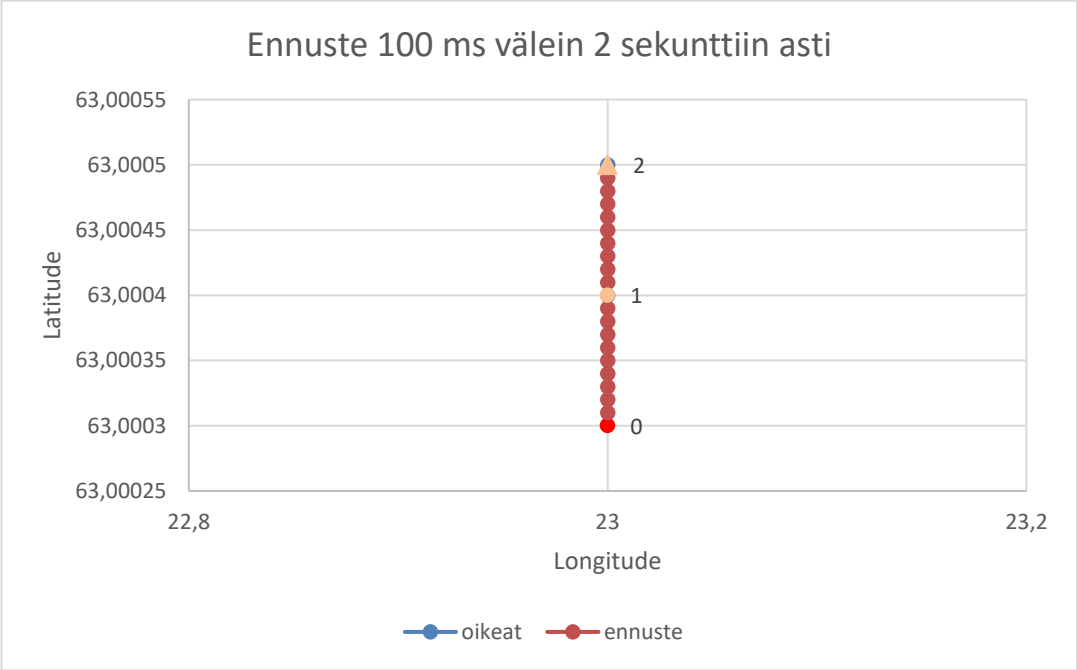
Työssä mitattiin splini-algoritmin toimivuutta lentävän kappaleen sijainnin ennustamisessa. Sijainnin ennustamisen yhteydessä mitattiin oikean reitin reittipisteen sijainnin eroa ennustetun pisteen sijaintiin. Lisäksi mitattiin lentävän kappaleen asennon virheellisyyttä toteutetun asennon ennustuksen ja kappaleen simuloidun asennon välillä eri reittipisteissä. Mittauksia tehtiin neljälle eri reitille: teoreettiselle suoralle reitille, kääntyvälle reitille, reitille, jossa korkeus muuttui ja reitille, jossa nopeus muuttui. Kääntyvälle reitille mitattiin myös ennustuksen toimivuutta lähtödatan eri päivitystahdeilla, kun lähtödataa saatiin puolen, yhden ja kahden sekunnin välein. Tässä luvussa esitellään jokaisen lentoreitin mittauksien tulokset reittikohtaisesti.

6.1 Ensimmäinen reitti: Teoreettinen suora

Teoreettisesta suorasta lentoreitistä on alla kaksi eri kuvaa, kuvat 13 ja 14. Kuvassa 13 on sekä oikea reitti että ennustettu reitti siten, että reittipisteitä on sekunnin välein 10 ennustettuun pisteeseen saakka. Kuvassa 14 ennustetta on kuvattuna nollapisteestä kaksi sekuntia eteenpäin 100 millisekunnin välein. Kuvaan 14 on merkattuna yhden ja kahden sekunnin kohdalla olevat pisteet numeroin. Ennustettu ja oikea reittipiste ovat lähes samat yhden ja kahden sekunnin kohdalla, mikä nähdään taulukosta 11, jossa on esitettynä pisteiden etäisyydet toisiinsa nähden. Nollapiste on kuvissa 13 ja 14 merkittynä punaisella.



Kuva 13. Suoran reitin oikeat ja ennustetut reittipisteet sekunnin välein.



Kuva 14. Suoran reitin oikeat ja ennustetut reittipisteet 100 millisekunnin välein 2.

Taulukossa 11 on esitettynä oikean ja ennustetun reittipisteen etäisyydet toisistaan, kun ennustetta on luotu 10 sekuntia eteenpäin sekunnin välein nollapisteestä alkaen. Taulukossa 11 on myös suunta-, pituuskallistus- ja kallistuskulman erot oikean ja ennustetun reittipisteen välillä. Taulukosta 11 nähdään, että teoreettista suoraa pitkin ennustettaessa ennustuksen tarkkuus 10 sekunnin päässä on todella hyvä, koska pisteiden välinen etäisyys on tällöin puoli senttimetriä ja asennon kulmien erot ovat käytännössä nollassa,

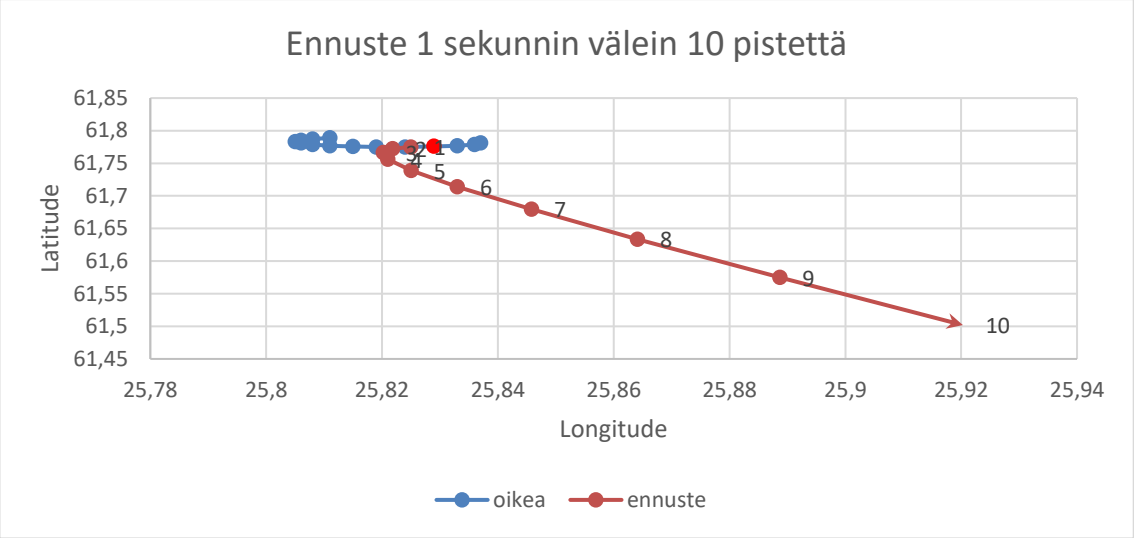
pituuskallistuskulmaa lukuun ottamatta, mutta siinäkin ero on vain muutaman asteen verran. Pituuskallistuskulman ero johtuu asennonennustamisen tavasta, jolla pituuskallistuskulmaa on ennustettu.

Taulukko 11. Oikean ja ennustetun reittipisteen välinen etäisyys ja kulmaerot.

Aika s	Etäisyys metreinä	Suuntakulman erot asteina	Pituuskallistuskulman erot asteina	Kallistuskulman erot asteina
1	2,1453E-05	360	3,000134	82,02982
2	9,00319E-05	1,75E-10	3,000275	6,36E-09
3	0,000231487	4,55E-09	3,000456	4,27E-09
4	0,000471515	1,06E-08	3,000676	4,40E-09
5	0,000835847	1,88E-08	3,000936	4,78E-09
6	0,001350194	2,93E-08	3,001236	5,03E-09
7	0,002040271	4,15E-08	3,001576	5,56E-09
8	0,002931796	5,62E-08	3,001956	5,81E-09
9	0,00405048	7,25E-08	3,002376	6,27E-09
10	0,005422047	9,10E-08	3,002836	6,78E-09

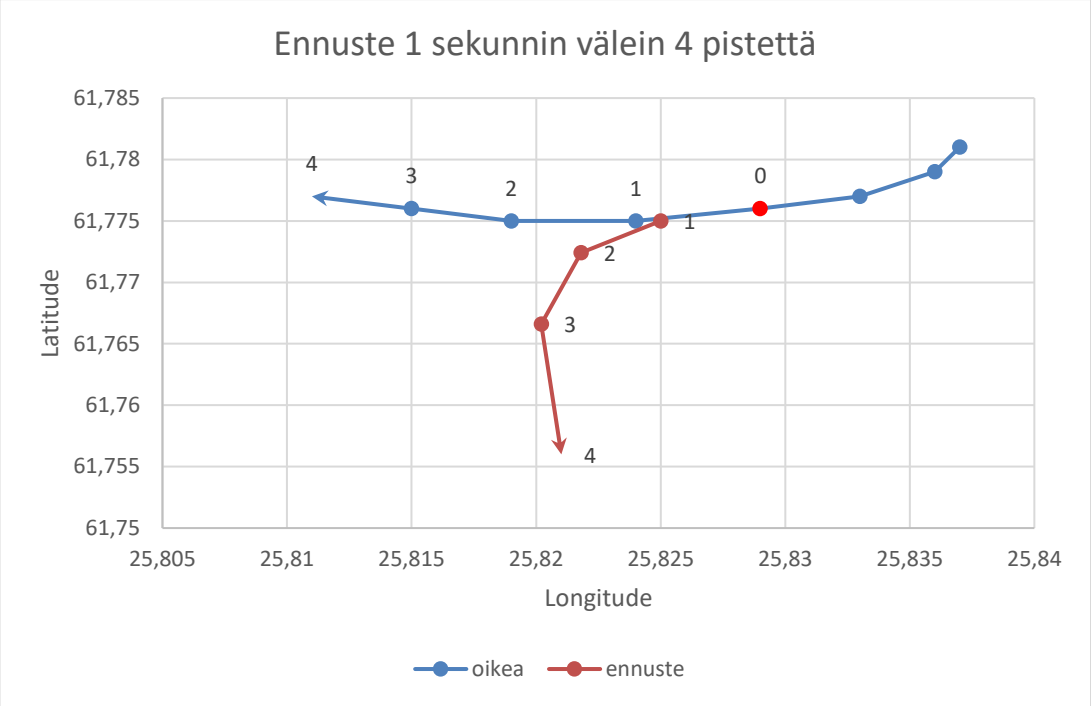
6.2 Toinen reitti: Jyrkästi kääntyvä reitti

Jyrkän käännöksen reitillä kappaleen suuntakulma muuttui 16,7 astetta sekunnissa. Tässä luvussa on ensin esitettynä ennustusta yhdestä oikeasta reittipisteestä sekunnin välein sekä 10 pistettä että 4 pistettä eteenpäin. Sen jälkeen esitellään mittaustuloksia, kun kolmesta eri reittipisteestä ennustettiin 100 millisekuntia eteenpäin kahden sekunnin päähän. Lopuksi on mittaustuloksia lähtödatan eri päivitystahdeilla. Tällöin ennustetta luotiin aina lähtödatan päivitystahdin verran eteenpäin ja verrattiin oikean ja ennustetun reittipisteen tietoja toisiinsa. Lisäksi on esitettynä kaavio, josta näkyy oikean ja ennustetun reittipisteen etäisyydet toisiinsa nähden, kun ennustetta tehdään puoli, sekunti ja kaksi sekuntia eteenpäin viidestä eri reittipisteestä.



Kuva 15. Jyrkän reitin oikeita ja ennustettuja reittipisteitä 10 sekunnin ajalta.

Kuvassa 15 ennustetta on tehty sekunnin välein 10 sekuntia eteenpäin. Punaiset pisteet ovat ennustettuja reittipisteitä. Kuvasta 15 nähdään, että jyrkästi kääntyvällä reitillä 10 sekunnin päähän tehty ennuste on kaukana ja väärässä suunnassa alkuperäiseen reittiin nähden. Kuvassa 15 nuolen kärki on ennustettu piste 10 sekunnin kohdalla. 10 sekunnin päässä olevan ennustetun pisteen etäisyys on noin 32 kilometriä väärässä paikassa oikeaan sijaintiin nähden. Kuvassa 16 on sama ennustus, mutta siinä on 10 ennustetun pisteen sijaan esitettynä neljä ennustettua pistettä. Kuvasta 16 nähdään, että neljän sekunnin aikanakin ennustus lähtee kaartamaan täysin eri suuntaan, kun mihin oikea reitti jatkaa. Ennustettu reitti ja oikea reitti etenevät nuolen osoittamaan suuntaan. Neljäs ennustettu piste on punaisen nuolen kärjen kohdalla. Taulukosta 12 nähdään, että neljän sekunnin kohdalle ennustus on jo 2400 metriä siitä paikasta, jossa kappale neljän sekunnin päästä oikeasti oli. Kolmenkin sekunnin päästä kappaleen sijainti eroaa noin kilometrin verran oikeasta sijainnista. Etäisyys taulukon ja kuvien 15 ja 16 perusteella jyrkällä käännöksellä ennustetta ei kannata tehdä kahta sekuntia kauemmaksi, jos halutaan sijaintitarkkuuden olevan alle kilometrin.



Kuva 16. Jyrkän reitin oikeita ja ennustettuja reittipisteitä 4 sekunnin ajalta.

Taulukko 12. Oikeiden ja ennustettujen reittipisteiden etäisyydet.

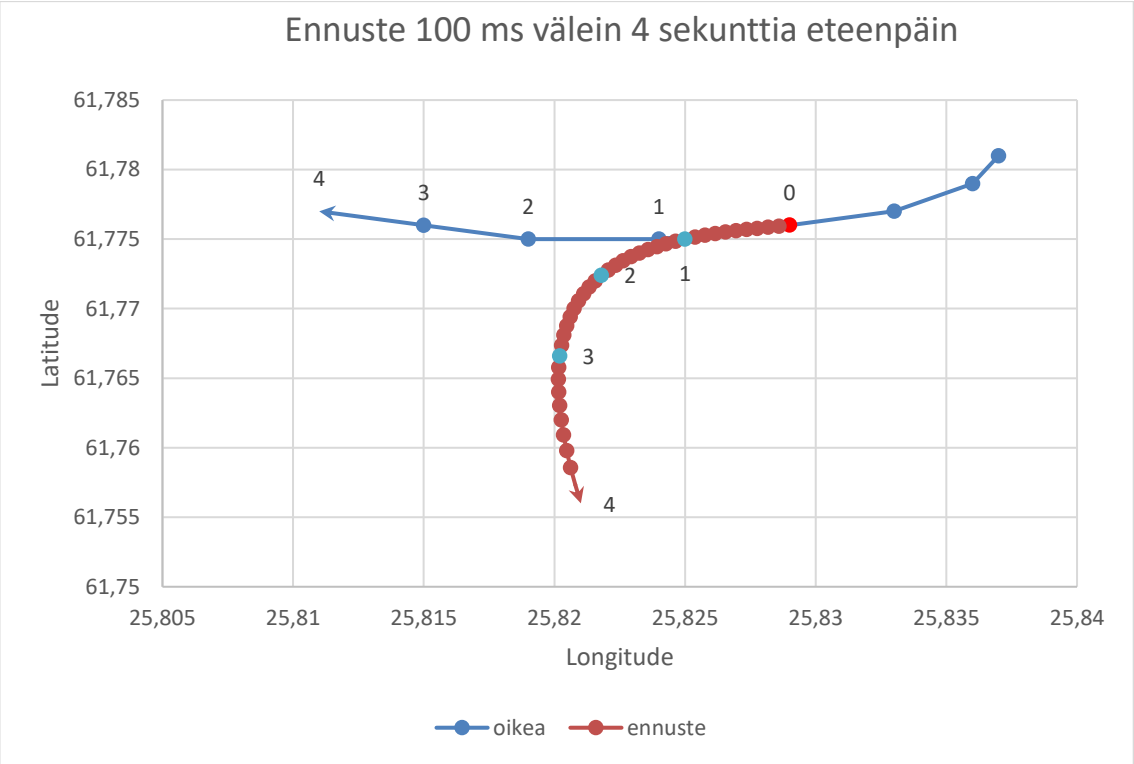
Aika s	1	2	3	4
Etäisyys m	52,82	325,51	1038,61	2400,56

Taulukossa 13 on esiteltynä asentokulmien erot oikean ja ennustetun reittipisteen välillä sekunnin välein kymmeneen sekuntiin saakka. Pituuskallistuskulman eroissa ei tapahdu suuria muutoksia. Koska pituuskallistuskulman muutokset tapahtuvat kappaleen laskiessa tai nostaessa korkeutta, niin tasaisella korkeudella olevalla kappaleella siinä ei kuuluisikaan tapahtua muutosta. Suuntakulman ero kasvaa nopeasti mitä kauemmaksi ennustetaan. Koska ennustettu reitti lähtee kaartumaan eri suuntaan kuin oikea reitti, niin kappaleen suuntakulman välisenkin eron on oltava huomattava, mikä taulukosta 13 on nähtävissä. Koska oikea ja ennustettu reitti lähtevät eri suuntiin, niin kappale kallistuu oikealla reitillä eri puolelle kuin ennustetulla reitillä mitä kauemmaksi pisteestä ennustetaan, jolloin kallistuskulman ero oikean pisteen ja ennustetun pisteen välillä luonnollisesti kasvaa.

Taulukko 13. Jyrkän reitin oikeiden ja ennustettujen reittipisteiden kulmaerot.

Aika s	Suuntakulman ero asteina	Pituuskallistuskulman ero asteina	Kallistuskulman ero asteina
1	4,899005	3,00272	7,064696839
2	35,94009	3,006622	1,377915733
3	73,37777	3,013359	3,3300254
4	106,6226	3,024338	8,741645776
5	133,4508	3,041443	14,47220733
6	156,1278	3,066606	20,13492965
7	176,5007	3,101592	25,52531641
8	164,4233	3,148085	30,57551943
9	146,115	3,207741	35,31313595
10	128,1862	3,282205	39,82766326

Alla olevassa kuvassa on esitettynä 100 millisekunnin välein tehtyä ennustetta samat neljä sekuntia eteenpäin kuin kuvassa 16. Tiheämmällä ennustustahdilla saadaan ennustustarkkuutta paremmaksi ja välillä voi olla tarve ennustaa vain 100 millisekuntia eteenpäin kappaleen sijaintia. Esimerkiksi jos halutaan hieman ennakoida kahden eri kappaleen kohtaamista simulaatiosta, niin voi olla järkevämpää ennustaa sijaintia vain muutama sata millisekuntia eteenpäin.

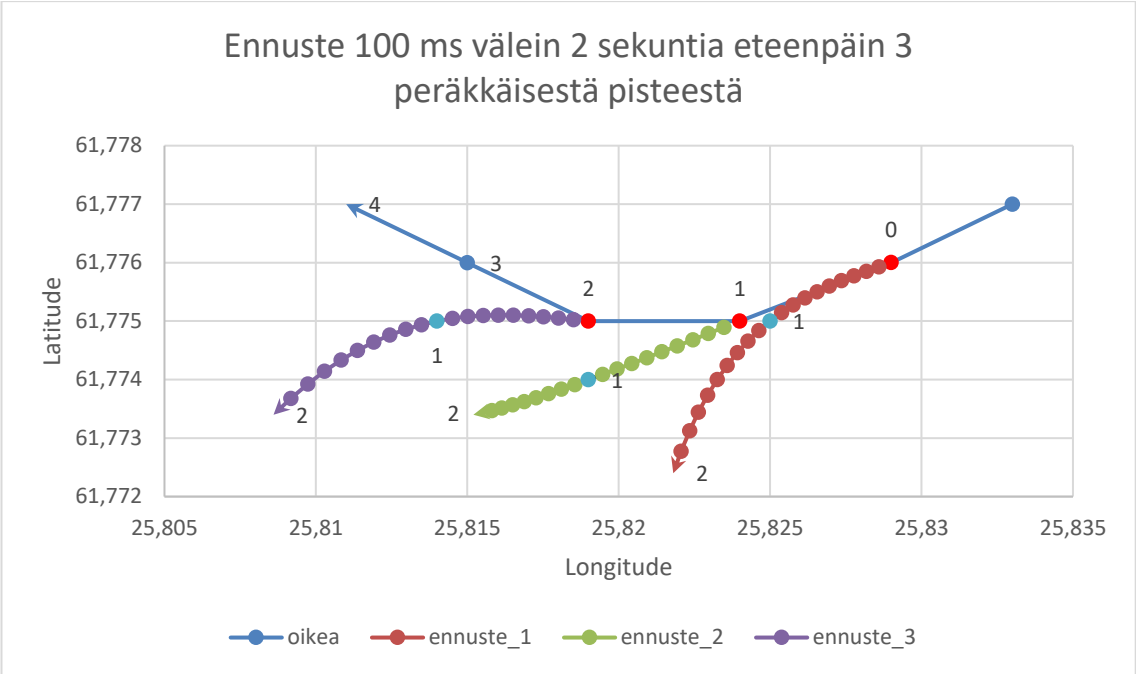


Kuva 17. Jyrkän ennustettuja reittipisteitä 100 millisekunnin välein.

Kuvassa 17 oikean ja ennustetun reitin reittipisteet ovat numeroituna sekunnin välein. Lisäksi ennustetulla reitillä numeroidut pisteet ovat väriltään sinisiä, jotta ne erottuvat tiheästi olevista ennustetuista reittipisteistä.

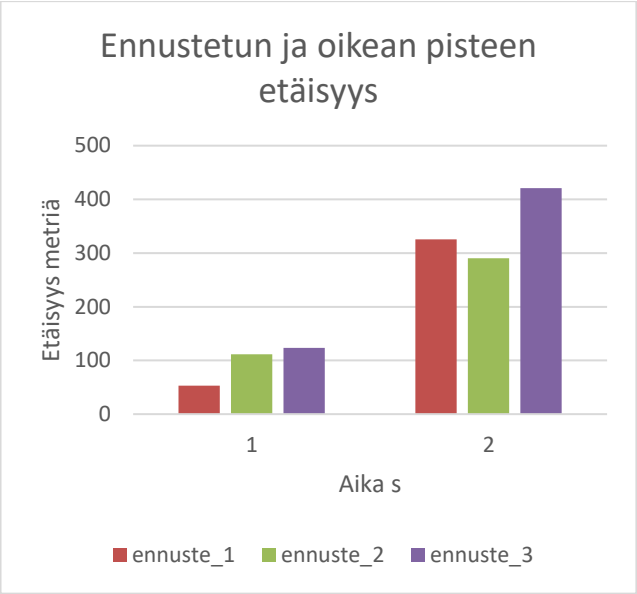
Ennusteita kolmesta eri reittipisteestä 100 millisekunnin välein kaksi sekuntia eteenpäin

Koska jyrkässä käännöksessä kappaleen sijainti oikean ja ennustetun pisteen välillä on jo kolmen sekunnin kohdalla kilometrin päässä, niin kuvassa 18 on ennustettuna kappaleen sijaintia vain kaksi sekuntia eteenpäin. Ennustetta on luotuna kolmesta eri reitti pisteestä sadan millisekunnin välein. Kuvasta 18 näkyy hyvin se, että riippuen ennustuksen aloitus pisteestä, ennustettu reitti tulee olemaan erilainen. Ennustuksen erilaisuus eri aloituspisteistä johtuu siitä, että ennustusta extrapoloidaan viimeisimmän kahden pisteen välistä kolmannen asteen polynomifunktiota pitkin.

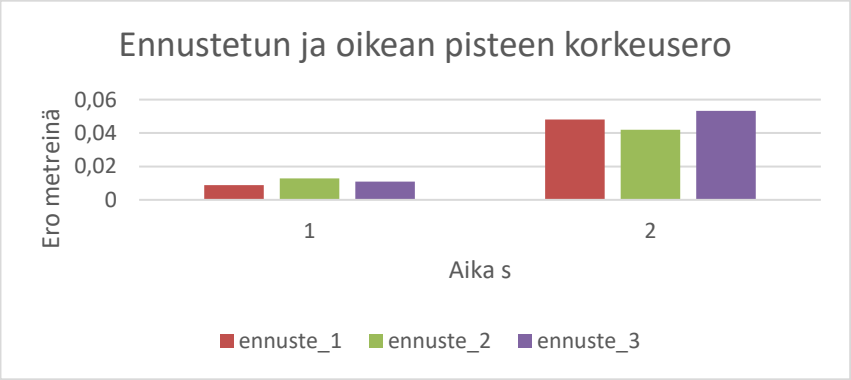


Kuva 18. Ennustettuja reittipisteitä luotuna kolmesta eri oikean reitin reittipisteestä sadan millisekunnin välein.

Kuvassa 19 esitetään ennustetun ja oikean pisteen etäisyys toisiinsa yhden ja kahden sekunnin kohdalla kaikista kolmesta eri reittipisteestä ennustettuna. Kuvasta 19 nähdään, että eri kohdasta ennustettuna pisteiden etäisyydet oikean ja ennustetun pisteen välillä vaihtelevat sekä yhden että kahden sekunnin kohdalla. Sekunnin kohdalla vaihtelua on 70 metriä, riippuen siitä mistä pisteestä ennustusta luodaan ja kahden sekunnin kohdalla vaihtelua etäisyyksissä on jo 130 metriä. Kuvassa 20 esitetään ennustetun ja oikean pisteen välinen korkeusero. Korkeusero on maksimissaan noin 0,05 metriä kahden sekunnin päässä. Oikealla reitillä lentävän kappaleen korkeus pysyi tasaisena reittipisteiden välillä.

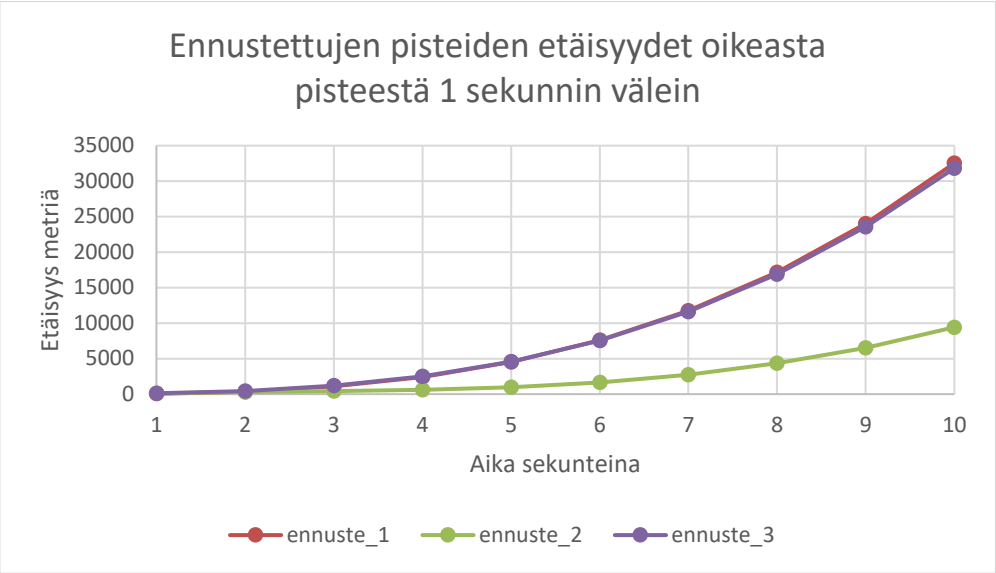


Kuva 19. Etäisyys metreissä ennustettujen pisteiden ja oikean pisteen välillä.



Kuva 20. Korkeuserot metreissä ennustettujen pisteiden ja oikean pisteen välillä.

Kuvassa 21 on kuvattuna ennustettujen pisteiden etäisyydet oikeaan pisteeseen yhden sekunnin välein, kun ennustusta tehtiin kymmenen sekuntia eteenpäin.



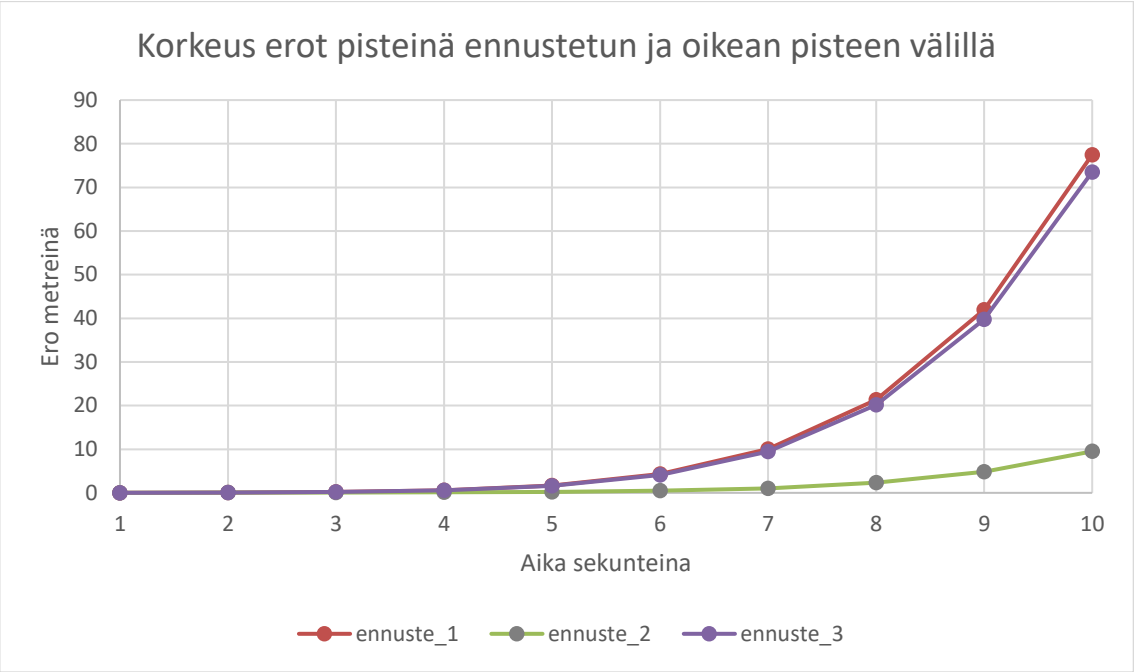
Kuva 21. Ennustettujen pisteiden etäisyydet oikeaan pisteeseen verrattuna 10 sekuntiin asti.

Kuvasta 21 ja alla olevassa taulukossa on esitettynä oikean pisteen ja ennustetun pisteen välinen etäisyys, kun ennustetta on tehty sekunnin välein 10 sekuntia eteenpäin kolmesta eri pisteestä. Koska sovite, joka pitkin ennustetaan, vaihtelee jokaisen pisteen välillä, niin samoin vaihtelevat pisteiden etäisyydet toisiinsa verrattuna myös. Kuvassa 21 ensimmäisen ennustuksen ja kolmannen ennustuksen käyrät osuvat lähes päällekkäin. Taulukosta ja kuvasta 21 nähdään, että mitä kauemmaksi alkupisteestä ennustetaan, sitä suuremmiksi kasvaa erot ennustetun ja oikean pisteen välillä. Ensimmäisessä ja kolmannessa ennustuksessa, jos ennustetaan neljä sekuntia eteenpäin, ollaan jo kahden ja puolen kilometrin päässä pisteestä, jossa kappale oikeasti oli neljän sekunnin kuluttua. Toisessa ennustuksessa neljän sekunnin kohdalla kappale oli noin 600 metriä väärässä paikassa. Koska kappale voi olla neljän sekunnin kohdalla 2500 metriä väärässä paikassa, ei splinellä tällä tavalla toteutettuna kannata jyrkkää käännöstä ennustaa kolmea sekuntia pidemmälle, jolloin ennustuksen virhe on noin 1000 metrin luokkaa. Mitä lähemmäksi ennustetta tehdään, sitä pienempi virhe siinä on.

Taulukko 14. Ennustettujen pisteiden etäisyydet oikeaan pisteeseen 10 sekuntiin asti.

Aika s	Ennuste_1 m	Ennuste_2 m	Ennuste_3 m
1	53	112	123
2	326	290	421
3	1084	407	1197
4	2401	615	2521
5	4550	958	4572
6	7606	1637	7540
7	11751	2719	11591
8	17160	4330	16907
9	24023	6538	23567
10	32525	9421	31828

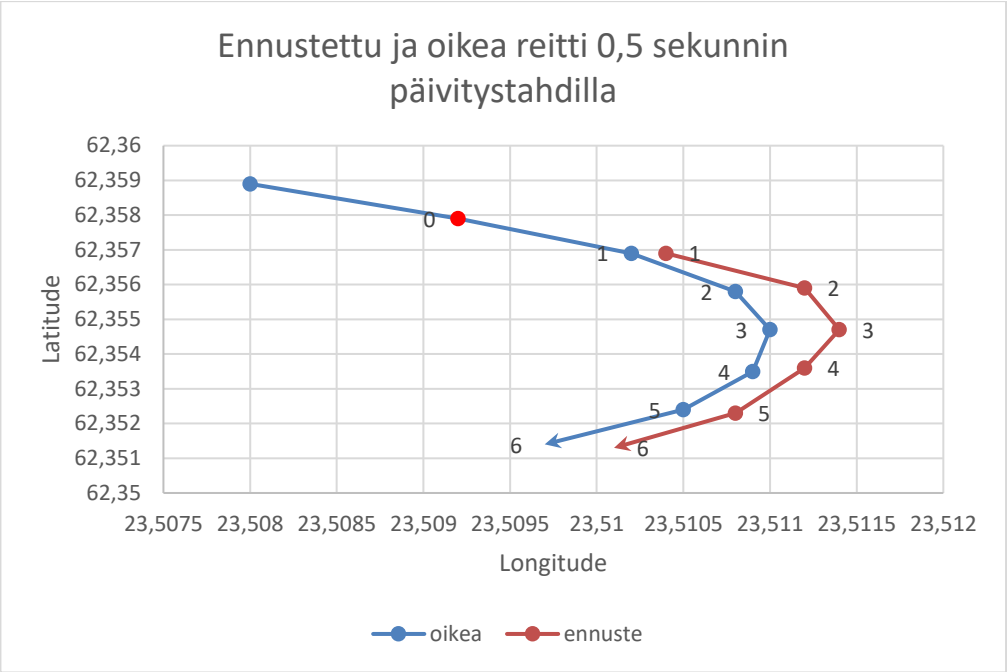
Kuvasta 22 nähdään korkeus erot ennustetun ja oikean reittipisteen välillä, kun ennustusta on luotu kymmenen pistettä sekunnin välein kaikista kolmesta aloituspisteestä. Mitä kauemmaksi aloituspisteestä ennustusta tehdään, sitä suuremmaksi kasvavat korkeuserot ennustetun ja oikean sijainnin välillä. Oikealla reitillä reittipisteiden korkeus pysyi vakiona koko ajan. Kuvaajasta nähdään, että seitsemään sekuntiin asti korkeusennustus pysyy alle kymmenessä metrissä kaikilla kolmella eri ennusteella tasaisella lennolla. Seitsemän sekunnin jälkeen korkeuserot pisteiden välillä kasvavat huomattavaa vauhtia, joten sen pidemmälle ei korkeuden puolesta kannata yhdestä pisteestä ennustaa. Huomioiden sekä korkeus että paikka leveys- ja pituusastetasolla, ennustusta ei kuitenkaan kannata tehdä seitsemän sekunnin päähän, koska yllä olevasta taulukosta 14 nähdään, että etäisyys oikean ja ennustetun reittipisteen välillä voi seitsemän sekunnin kohdalla olla jopa 11 kilometriä.



Kuva 22. Ennustettujen pisteiden korkeuserot oikeaan pisteeseen verrattuna 10 sekuntiin asti.

6.3 Toinen reitti: Jyrkästi kääntyvän reitin reittipisteitä eri päivitystahdilla

Seuraavissa kuvissa on kuvattu reittipisteitä eri päivitystahdilla, ja ennustetta on luotu aina päivitystahdin verran eteenpäin jokaisesta reittipisteestä. Kuvissa reittien suuntanuolien kärkien kohdalla on viimeinen sekä oikea että ennustettu reittipiste. Kuvassa 23 on kuvattuna leveys- ja pituusastetasossa reittipisteitä, joita on tullut puolen sekunnin päivitystahtia ja näistä pisteitä luotuja ennusteita. Ennustetta on luotu jokaisesta pisteestä, punaisesta pisteestä alkaen ja viimeinen piste pois lukien, puoli sekuntia eteenpäin.



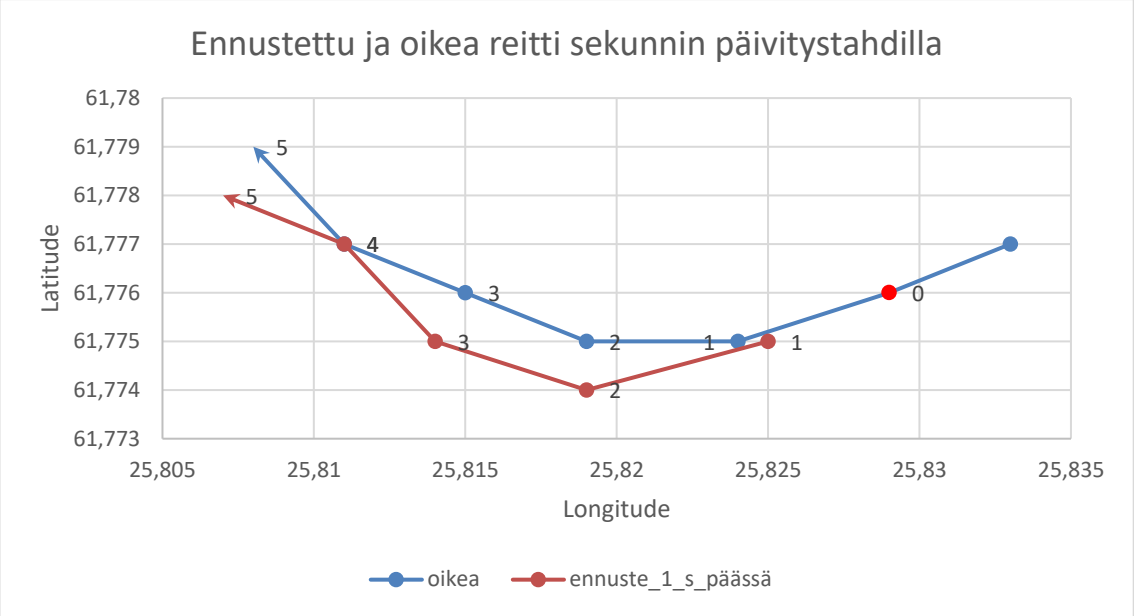
Kuva 23. Jyrkän reitin oikeita ja ennustettuja reittipisteitä puolen sekunnin välein.

Taulukkoon 15 on merkittynä ennustetun ja oikean reittipisteen etäisyydet toisiinsa metreinä. Ennustettaessa puoli sekuntia eteenpäin ensimmäistä ennustusta lukuun ottamatta ennustetun ja oikean pisteen etäisyys on ollut noin 20 metriä.

Taulukko 15. Oikean ja ennustetun pisteen välinen etäisyys metreinä.

Piste	1	2	3	4	5
Etäisyys m	10	24	21	19	19

Kuvassa 24 on kuvattuna leveys- ja pituusaste tasossa reittipisteitä, joita on tullut sekunnin päivitystahtia ja näistä pisteitä luotuja ennusteita. Ennustetta on luotu jokaisesta pisteestä, punaisesta pisteestä alkaen ja viimeinen piste pois lukien, sekunti eteenpäin.



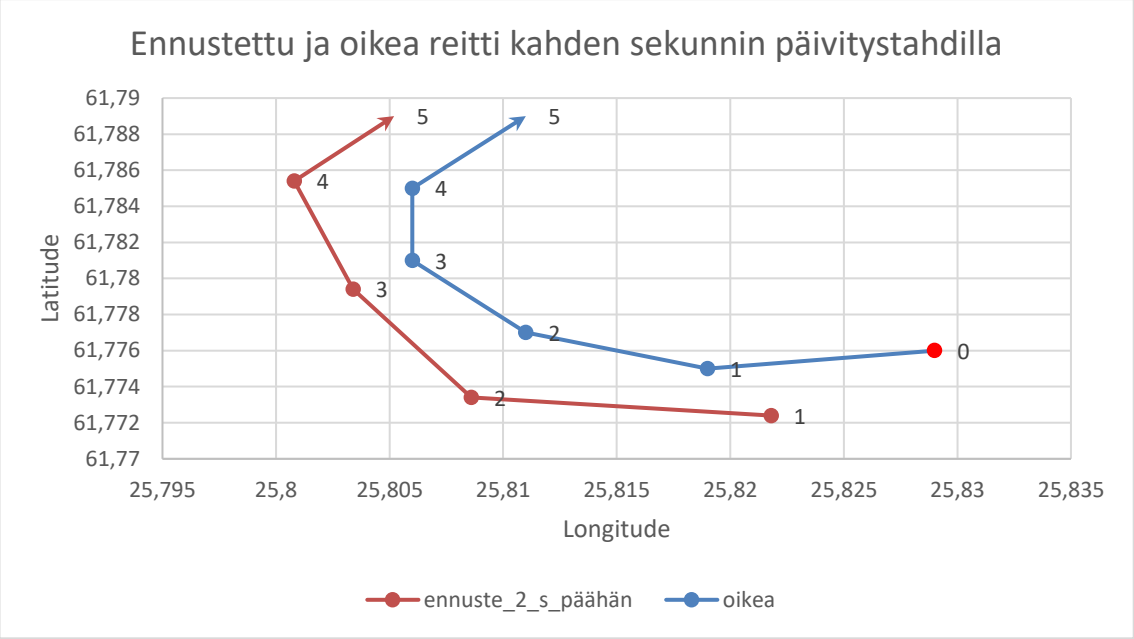
Kuva 24. Jyrkän reitin oikeita ja ennustettuja reittipisteitä sekunnin välein.

Taulukkoon 16 on merkittynä ennustetun ja oikean reittipisteen etäisyydet toisiinsa metreinä. Ennustettaessa sekunti eteenpäin kolmessa kohdassa ennustetun ja oikean pisteen välinen etäisyys on ollut reilu 100 metriä. Kuvassa 24 ja taulukossa 16 näkyvä etäisyyksien vaihtelu johtuu siitä, että jokaista pistettä ennustetaan erilaista sovitetta pitkin. Neljännen ennustetun ja oikean pisteen etäisyys on ollut lähellä nollaa, mikä on aikaisemmin esitettyjen tuloksien perusteella harvinaista muutoin kuin suoran reitin tapauksessa.

Taulukko 16. Oikean ja ennustetun pisteen välinen etäisyys metreinä.

Piste	1	2	3	4	5
Etäisyys m	53	112	123	0	123

Kuvassa 25 on kuvattuna leveys- ja pituusastetasossa reittipisteitä, joita on tullut kahden sekunnin päivitystahtia ja näistä pisteitä luotuja ennusteita. Ennustetta on luotu jokaisesta pisteestä, punaisesta pisteestä alkaen ja viimeinen piste pois lukien, kaksi sekuntia eteenpäin.



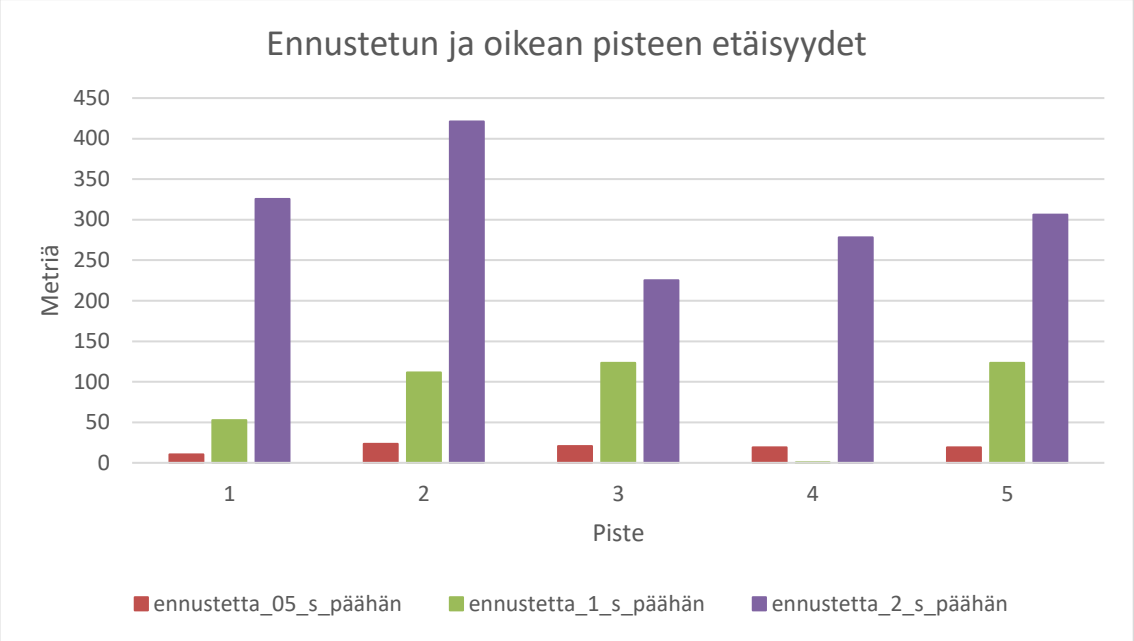
Kuva 25. Jyrkän reitin oikeita ja ennustettuja reittipisteitä kahden sekunnin välein.

Taulukkoon 17 on merkittynä ennustetun ja oikean reittipisteen etäisyydet toisiinsa metreinä. Ennustettaessa kaksi sekuntia eteenpäin pisteiden etäisyydet toisiinsa vaihtelevat 200 ja 400 metrin välillä, riippuen siitä minkälaista sovitetta pitkin ennustamista on tehty.

Taulukko 17. Oikean ja ennustetun pisteen välinen etäisyys metreinä.

Piste	1	2	3	4	5
Etäisyys m	326	421	225	278	306

Kuvaan 26 on koottuna ennustettujen pisteiden etäisyydet oikeasta reittipisteestä, kun pisteistä on ennustettu puoli sekuntia, yksi sekunti ja kaksi sekuntia eteenpäin. Kuvasta 26 nähdään, että neljättä pistettä lukuun ottamatta mitä kauemmaksi ennustetta tehdään pisteestä, sitä suuremmaksi kasvavat erot oikean sijainnin ja ennustetun sijainnin välillä. Kuvasta 26 nähdään, että pisteiden väliset etäisyydet vaihtelevat riippuen siitä, mistä pisteestä ennustusta on tehty. Vaihtelusta seuraa se, että suoraan ei voida aina sanoa, että jyrkästi kaartuvalla reitillä sekunnin päässä olevan ennustetun pisteen ero oikeaan pisteeseen olisi aina esimerkiksi sata metriä, koska se voi olla sekä alle että yli sadan metrin.



Kuva 26. Etäisyys metreissä ennustettujen ja oikeiden reittipisteiden välillä.

Taulukossa 18 on esitettynä erot kulmissa puolen sekunnin päivitystahdilla, kun seuraava piste ennustettiin aina puolen sekunnin päähän.

Taulukko 18. Oikean ja ennustetun pisteen väliset kulmaerot puolen sekunnin päivitystahdilla.

Piste	Suuntakulman ero asteina	Pituuskallistuskulman ero asteina	Kallistuskulman ero asteina
1	7,10973488	3,001552463	7,488944051
2	13,6822478	3,001454761	7,509004254
3	9,671460356	3,00153437	7,492393334
4	8,996927584	3,001464725	7,478149854
5	10,98924345	3,00163459	7,523716306

Taulukossa 19 on esitettynä erot kulmissa sekunnin päivitystahdilla, kun seuraava piste ennustettiin aina sekunnin päähän.

Taulukko 19. Oikean ja ennustetun pisteen väliset kulmaerot sekunnin päivitystahdilla.

Piste	Suuntakulman ero asteina	Pituuskallistuskulman ero asteina	Kallistuskulman ero asteina
1	4,899004646	3,00271966	7,064696839
2	22,92337084	3,003553453	7,390219138
3	11,07991534	3,003065742	7,177732994
4	0,088060153	3,002831967	7,136232609
5	23,46295371	3,002872903	7,252932191

Taulukossa 20 on esitettynä erot kulmissa kahden sekunnin päivitystahdilla, kun seuraava piste ennustettiin aina kahden sekunnin päähän.

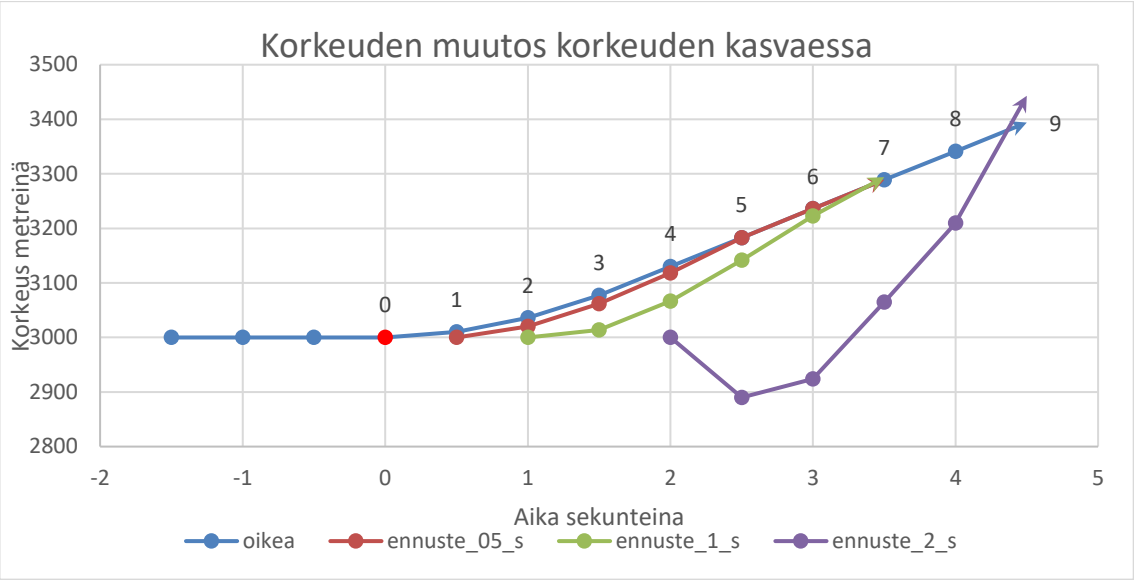
Taulukko 20. Oikean ja ennustetun pisteen väliset kulmaerot kahden sekunnin päivitystahdilla.

Piste	Suuntakulman ero asteina	Pituuskallistuskulman ero asteina	Kallistuskulman ero asteina
1	35,94008653	3,006622346	1,377915733
2	40,93045868	3,006968597	2,063524744
3	36,113322	3,005905218	8,198604703
4	36,901978	3,006841049	17,58777971
5	37,70281737	3,005434278	2,080005982

Koska reitillä korkeus pysyi samana, niin pituuskallistuskulman erot ovat pysyneet kolmessa asteessa kaikilla eri väleillä tehdyissä ennusteissa. Ennustettaessa puolen sekunnin päähän ja datan päivittyessä puolen sekunnin välein suuntakulman erot olivat noin 10 astetta jokaisessa viidessä pisteessä, josta ennustetta luotiin. Suuntakulman eroissa on nähtävissä 20 asteen vaihtelua ennustettaessa sekunnin päähän datan päivittyessä sekunnin välein. Suuntakulmassa on kahden sekunnin päähän ennustetuilla pisteillä noin 40 asteen virhe. Kallistuskulmien erot oikean ja ennustetun pisteen välillä pysyivät sekä puolen sekunnin että sekunnin tapauksessa noin seitsemässä asteessa. Kahden sekunnin ennustuksen kohdalla kallistuskulmissa on nähtävissä heittelyä lähes 20 asteen verran riippuen siitä, mistä pisteestä ennustetta tehtiin.

6.4 Kolmas reitti: Reitti, jossa korkeus muuttui

Reitillä, jossa korkeus muuttui, lähtödataa saatiin puolen sekunnin välein ja lentävän kappaleen suuntakulma pysyi samana. Kuvissa on numeroituna oikean reitin pisteet. Nousu liikkeeseen lähtevän kappaleen sijainti- ja asentoennustusta tehtiin lähtöpisteestä puolen sekunnin, sekunnin ja kahden sekunnin päähän. Puolen sekunnin päähän ennustetta luotiin lähtöpisteestä ja kuudesta seuraavasta pisteestä ja sekunnin ja kahden sekunnin päähän ennustetta luotiin lähtöpisteestä ja viidestä seuraavasta pisteestä. Kuvissa puolen sekunnin päähän tehtyä ennustetta kuvaa punainen käyrä, sekunnin päähän tehtyä ennustetta vihreä käyrä ja kahden sekunnin päähän tehtyä ennustetta violetti käyrä.



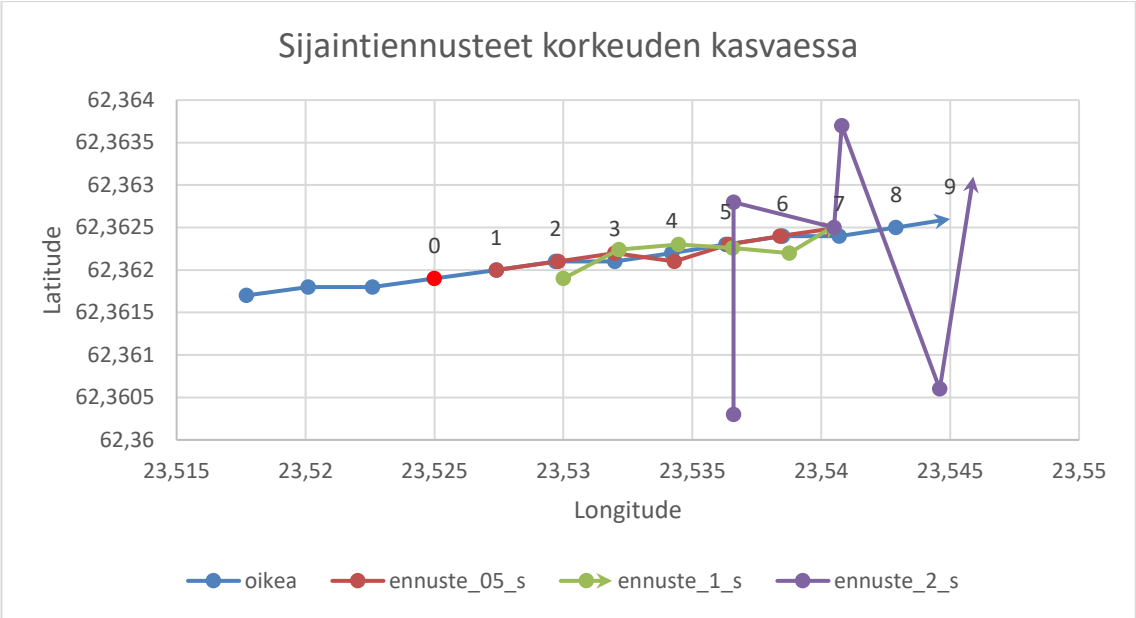
Kuva 27. Oikeiden ja ennustettujen pisteiden korkeus metreinä kappaleen korkeuden kasvaessa.

Kuvasta 27 nähdään, että mitä lähemmäksi korkeusennustetta tehdään, sitä paremmin lentävän kappaleen korkeuden ennustaminen onnistuu. Kuvasta 27 ja taulukosta 21 nähdään, että ennustuskäyrä, joka on luotu puolen sekunnin välein, sisältää pisteitä, joiden korkeusero oikeisiin pisteisiin nähden on alle 20 metriä ja kolmen viimeisen pisteen välinen korkeusero on 0 metriä. Sekunnin päähän luotujen ennusteiden korkeus erot vaihtelevat enemmän kuin puolen sekunnin päähän tehtyjen ennusteiden. Sekunnin päähän ennustettujen pisteiden korkeuserot vaihtelevat kymmenillä metreillä ja kahden sekunnin päähän ennustettujen pisteiden korkeuserot vaihtelevat sadoilla metreillä. Näin ollen lentävän kappaleen korkeuden noustessa ennustusta ei kannata tehdä sekuntia kauemmaksi.

Taulukko 21. Oikeiden ja ennustettujen pisteiden korkeuserot metreinä kappaleen korkeuden kasvaessa.

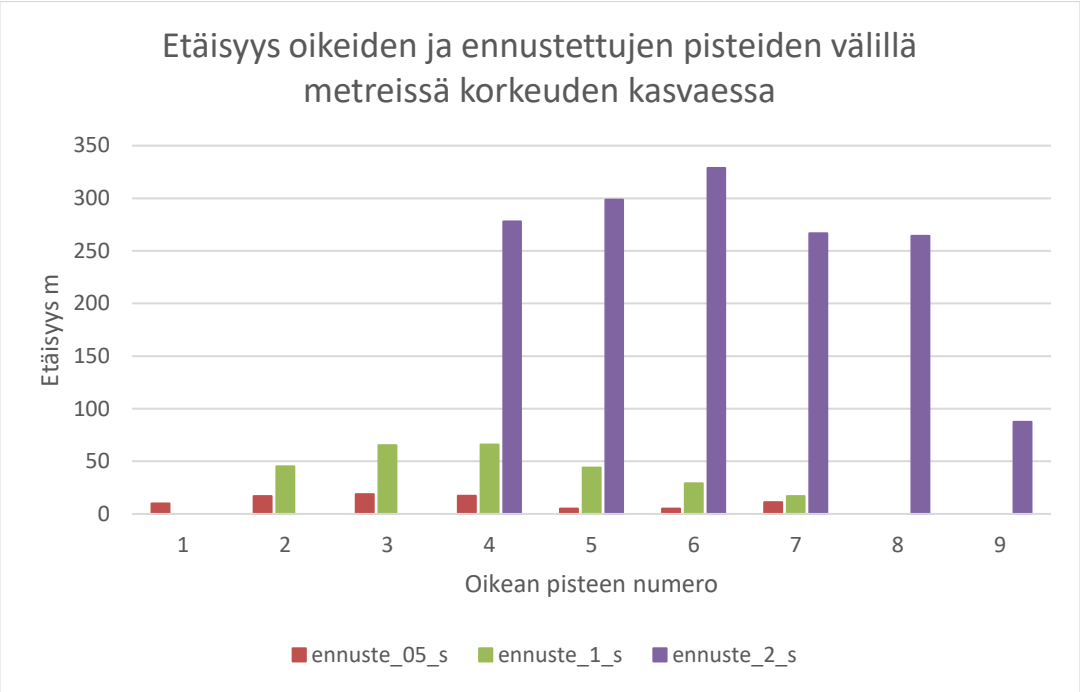
Aika s	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
Ennuste_05_s	10 m	16 m	15 m	12 m	0 m	0 m	0 m	-	-
Ennuste_1_s	-	36 m	63 m	64 m	42 m	13 m	5 m	-	-
Ennuste_2_S	-	-	-	130 m	293 m	312 m	224 m	131 m	49 m

Kuvasta 28 nähdään, että kappaleen sijaintiennusteen tarkkuus laskee, mitä kauemmaksi pisteistä sijaintia ennustetaan.



Kuva 28. Oikean reitin ja ennustettujen reittien sijaintipisteet latitude-longitude –tasossa kappaleen korkeuden kasvaessa.

Kuvasta 29 nähdään, että kappaleen etäisyys oikean ja ennustetun pisteen välillä pysyy noin 20 metrissä ennustettaessa puoli sekuntia eteenpäin, sekunnin päähän tehty ennuste on suurimmaksi osaksi noin 50 metrin päässä oikeasta pisteestä ja kahden sekunnin päähän ennustettu piste on noin 250 – 350 metrin päässä oikeasta pisteestä. Koska lähtödataa tuli puolen sekunnin välein kuvan 29 alkupäässä ei kaikilla pisteillä ole ennustettua arvoa ja kuvan 25 kahdella viimeisellä pisteellä on vain 2 sekunnin päähän tehty ennustusero.



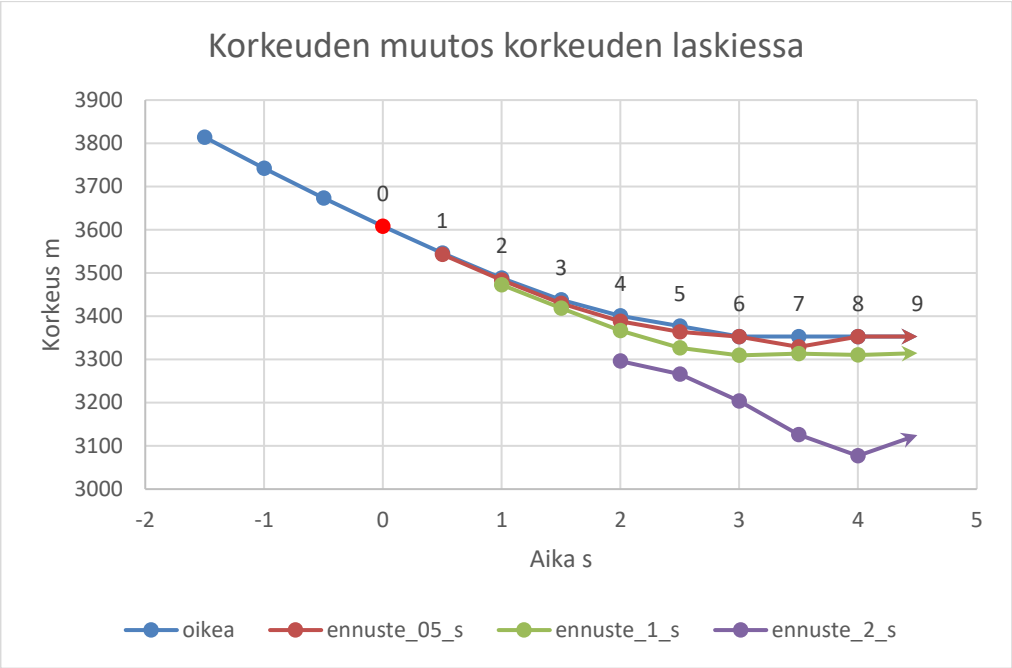
Kuva 29. Ennustettujen pisteiden etäisyys metreissä oikeaan reittipisteeseen nähden kappaleen korkeuden kasvaessa.

Taulukosta 22 nähdään, että suuntakulman erot vaihtelevat nollasta viiteen asteeseen ennustetun pisteen ollessa puolen sekunnin tai sekunnin päässä oikeasta pisteestä. Suurempaa vaihtelua suuntakulmissa on havaittavissa silloin, kun ennustettu piste on kahden sekunnin päässä oikeasta pisteestä. Tällöin vaihtelua on nollasta melkein 20 asteeseen. Pituuskallistuskulman eroissa oikean ja ennustetun pisteen välillä on nähtävissä sitä suurempi ero, mitä kauemmaksi ennustetta on oikeasta pisteestä tehty. Kallistuskulman eroissa on nähtävissä sekunnin ja kahden sekunnin ennustettujen pisteiden kohdalla vaihtelua kymmenestä asteesta 80 asteeseen. Puolen sekunnin päähän tehdyllä ennusteella kallistuskulman erot pysyvät vakiona. Se, että puolen sekunnin kohdalla ennustetun ja oikean pisteen kallistuskulman erot ovat lähes 90 astetta, on nähtävissä sijaintiennustekuvasta 28. Kuvasta 28 nähdään, että sijainnin ennustuksen tarkkuus laskee sitä enemmän, mitä kauemmaksi sijaintia ennustetaan. Ennustettujen sijaintipisteiden tarkkuus vaikuttaa asentoennusteisiin, koska asentoennusteet lasketaan aina kahden seuraavan ennustetun sijaintipisteen avulla.

Taulukko 22. Kulmien erot oikeiden ja ennustettujen reittipisteiden välillä kappaleen korkeuden kasvaessa.

	Suuntakulman erot asteina			Pituuskallistuskulman erot asteina			Kallistuskulman erot asteina		
Aika_s	ennuste 05_s	ennuste 1_s	ennuste 2_s	ennuste 05_s	ennuste 1_s	ennuste 2_s	ennuste 05_s	ennuste 1_s	ennuste 2_s
0,5	2,66	-	-	5,3	-	-	89,78	-	-
1	0,94	0,97	-	7,05	12,6	-	89,82	80,88	-
1,5	1,49	1,67	-	6,3	16,94	-	89,82	54,07	-
2	5,05	1,36	16,02	2,35	12,26	22,3	89,8	12,37	76,33
2,5	3,24	2,1	5,31	3,41	4,85	31,67	89,78	79,79	51,25
3	1,68	0,7	0,82	3,57	1,24	28,39	89,81	81,67	9,15
3,5	1,62	2,36	12,34	2,48	3,9	18,35	89,82	49,19	76,62
4	-	-	17,31	-	-	10,06	-	-	76,68
4,5	-	-	5,3	-	-	5,05	-	-	41,11

Seuraavaksi esitellään laskeutuvassa liikkeessä olevan lentävän kappaleen sijainti- ja asentoennusteita. Kappaleen sijainti- ja asentoennustusta luotiin seuraavalla tavalla: puolen sekunnin päähän ennustetta luotiin lähtöpisteestä ja kahdeksasta seuraavasta pisteestä, sekunnin päähän ennustetta luotiin lähtöpisteestä ja seitsemästä seuraavasta pisteestä ja kahden sekunnin päähän ennustetta luotiin lähtöpisteestä ja viidestä seuraavasta pisteestä.



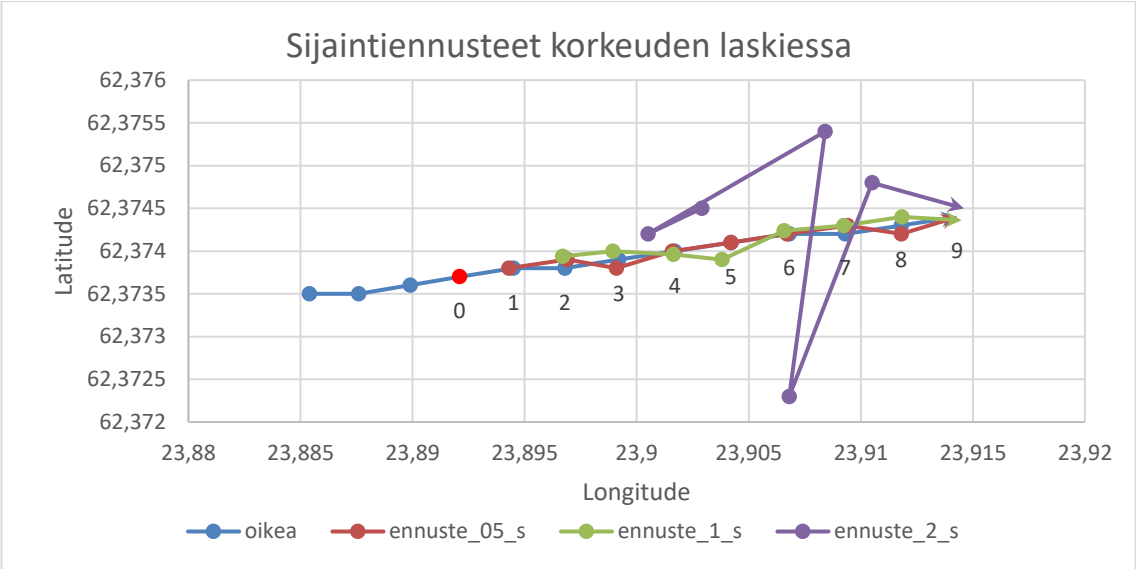
Kuva 30. Oikeiden ja ennustettujen pisteiden korkeus metreinä kappaleen korkeuden laskiessa.

Kuvasta 30 nähdään, että mitä lähemmäksi korkeusennustetta tehdään kappaleen korkeuden laskiessa, sitä paremmin lentävän kappaleen korkeuden ennustaminen onnistuu, samoin kuin oli nähtävissä korkeuden kasvaessa kuvassa 27. Kuvassa 30 ja taulukosta 23 nähdään, että ennustuskäyrä, joka on luotu puolen sekunnin välein, sisältää pisteitä, joiden korkeusero oikeisiin pisteisiin nähden on alle 15 metriä, yhtä pistettä lukuun ottamatta. Kahden viimeisen pisteen välinen korkeusero on nolla metriä. Oikealla reitillä neljä viimeistä pistettä olivat samalla korkeudella. Sekunnin päähän luotujen ennusteiden korkeuserot vaihtelevat enemmän kuin puolen sekunnin päähän tehtyjen ennusteiden. Sekunnin päähän ennustettujen pisteiden korkeuserot vaihtelevat kymmenillä metreillä ja kahden sekunnin päähän ennustettujen pisteiden korkeuserot vaihtelevat sadoilla metreillä. Näin ollen lentävän kappaleen korkeuden laskiessa ennustusta ei kannata tehdä sekuntia kauemmaksi. Samansuuruisia vaihteluita oli nähtävissä lentävän kappaleen korkeuden noustessa.

Taulukko 23. Oikeiden ja ennustettujen pisteiden korkeuserot metreinä kappaleen korkeuden laskiessa.

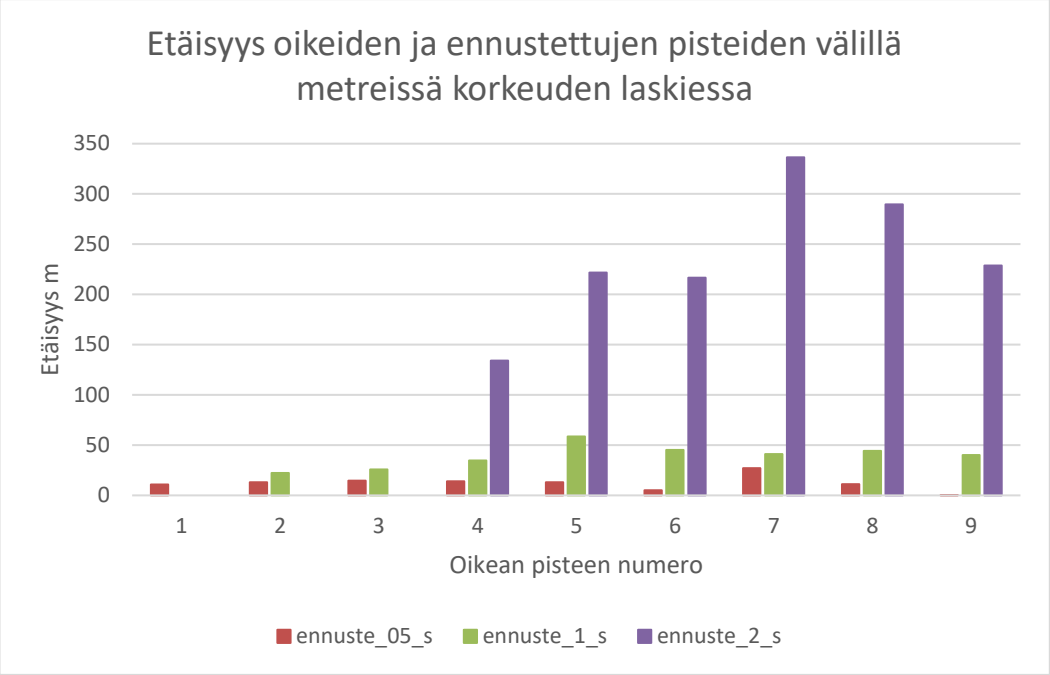
Aika s	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
Ennuste_05_s	3 m	4 m	8 m	13 m	13 m	0 m	24 m	0 m	0 m
Ennuste_1_s	-	15 m	19 m	34 m	50 m	44 m	40 m	43 m	39 m
Ennuste_2_s	-	-	-	105 m	111 m	149 m	227 m	276 m	228 m

Kuvasta 31 nähdään, että kappaleen sijaintiennusteen tarkkuus heikkenee sitä mukaan, mitä kauemmaksi pisteistä sijaintia ennustetaan.



Kuva 31. Oikean reitin ja ennustettujen reittien sijaintipisteet latitude-longitude –tasossa korkeuden laskiessa.

Kuvasta 32 nähdään, että kappaleen etäisyys oikean ja ennustetun pisteen välillä pysyy noin 20 metrissä ennustettaessa puoli sekuntia eteenpäin, sekunnin päähän tehty ennuste on noin 25-50 metrin päässä oikeasta pisteestä ja kahden sekunnin päähän ennustettu piste on noin 140 – 340 metrin päässä oikeasta pisteestä. Koska lähtödataa tuli puolen sekunnin välein, niin kuvaajan alkupäässä olevilla pisteillä ei ole ennustettua arvoa.



Kuva 32. Ennustettujen pisteiden etäisyys metreissä oikeaan reittipisteeseen nähden korkeuden laskiessa.

Taulukkoon 24 on koottuna suuntakulman, pituuskallistuskulman ja kallistuskulman erot oikean ja ennustetun pisteen välillä lentävän kappaleen korkeuden laskiessa. Kulmissa tapahtuu vaihtelua samalla tavalla kuin sitä tapahtui lentävän kappaleen noustessa. Siitä syystä tämän taulukon yhteyteen ei ole kirjoitettuna samaa analyysia kuin mitä oli kulmaerotaulukon 22 yhteydessä korkeuden noustessa.

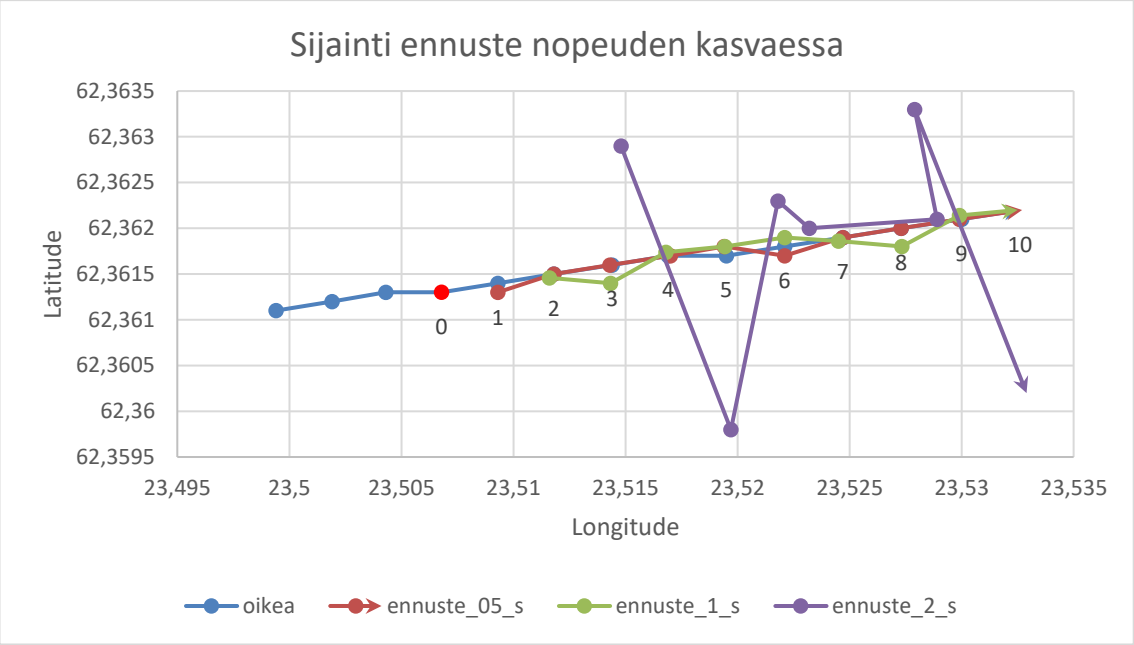
Taulukko 24. Kulmien erot oikeiden ja ennustettujen reittipisteiden välillä kappaleen korkeuden laskiessa.

	Suuntakulman erot asteina			Pituuskallistuskulman erot asteina			Kallistuskulman erot asteina		
Aika s	ennuste 05_s	ennuste 1_s	ennuste 2_s	ennuste 05_s	ennuste 1_s	ennuste 2_s	ennuste 05_s	ennuste 1_s	ennuste 2_s
0,5	1,46	-	-	0,33	-	-	89,82	-	-
1	1,12	2,04	-	1,88	1,82	-	89,84	46,12	-
1,5	5,07	1,39	-	4,4	5,8	-	89,8	33,55	-
2	2,52	2,15	4,42	4,88	9,79	12,9	89,82	79,01	36
2,5	0,73	0,87	3,22	3,64	11,97	25,92	89,83	82,48	51,4
3	1,03	1,48	9,35	6,59	14,54	21,84	89,83	58,23	73,18
3,5	0,79	1	20,32	7,28	8,81	30,05	89,84	3,38	82,31
4	4,97	0,89	5,51	5,3	6,74	27,44	89,8	12,04	60,3
4,5	2,44	2,28	0,86	2,44	0,49	18,74	89,8	78,15	2,94

6.5 Neljäs reitti: Reitti, jossa nopeus muuttui

Reitillä, jossa nopeus muuttui, lähtödataa saatiin puolen sekunnin välein ja lentävän kappaleen suuntakulma pysyi samana. Reiteillä nopeus muuttui 2 metriä sekunnissa. Kuvissa on numeroituna oikean reitin pisteet. Nopeuden muuttuessa kappaleen sijainti- ja asentoennustusta tehtiin lähtöpisteestä puolen sekunnin, sekunnin ja kahden sekunnin päähän. Puolen sekunnin päähän ennustetta luotiin lähtöpisteestä ja yhdeksästä seuraavasta pisteestä, sekunnin päähän ennustetta luotiin lähtöpisteestä ja kahdeksasta seuraavasta pisteestä ja kahden sekunnin päähän ennustetta luotiin lähtöpisteestä ja kuudesta seuraavasta pisteestä. Kuvissa puolen sekunnin päähän tehtyä ennustetta kuvaa punainen käyrä, sekunnin päähän tehtyä ennustetta vihreä käyrä ja kahden sekunnin päähän tehtyä ennustetta violetti käyrä.

Kuvasta 33 nähdään, että kappaleen sijaintiennusteen tarkkuus laskee mitä kauemmaksi pisteistä sijaintia ennustetaan. Kuvaan 33 on numeroitu oikean reitin reittipisteet.



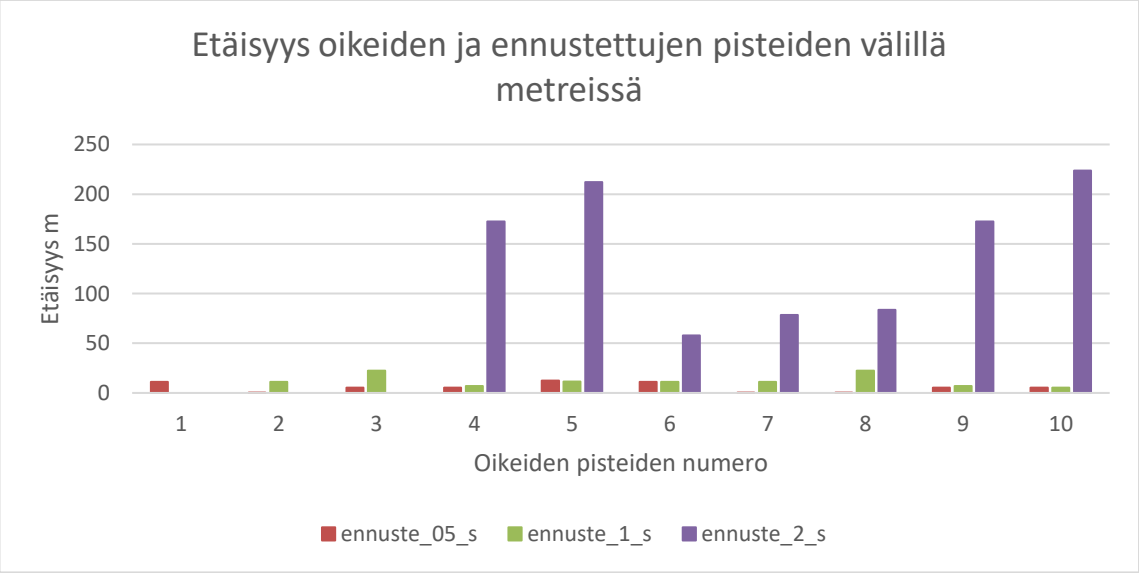
Kuva 33. Oikean reitin ja ennustettujen reittien sijaintipisteet latitude-longitude –tasossa kappaleen nopeuden kasvaessa.

Taulukosta 25 nähdään, että korkeus ennustus on eronnut oikean pisteen korkeudesta vain alle 10 senttimetriä jokaisella ennustetulla pisteellä.

Taulukko 25. Korkeuserot oikeiden reittipisteiden ja ennustettujen reittipisteiden välillä kappaleen nopeuden kasvaessa.

Aika s	Ennuste 05_s m	Ennuste 1_s m	Ennuste 2_s m
0,5	0	-	-
1	0	0,01	-
1,5	0	0,01	-
2	0	0,01	0,05
2,5	0	0,01	0,06
3	0	0,01	0,06
3,5	0	0,01	0,05
4	0	0,01	0,07
4,5	0	0,01	0,05
5	0	0,01	0,07

Kuvasta 34 nähdään, että kappaleen etäisyys oikean ja ennustetun pisteen välillä pysyy noin 10 metrissä ennustettaessa puoli sekuntia tai yksi sekunti eteenpäin ja kahden sekunnin päähän ennustettu piste on noin 50 – 230 metrin päässä oikeasta pisteestä. Koska lähtödataa tuli puolen sekunnin välein kuvaajan alkupäässä ei kaikilla pisteillä ole ennustettua arvoa.



Kuva 34. Oikean reittipisteen etäisyys ennustettuihin reittipisteisiin metreinä kappaleen nopeuden kasvaessa.

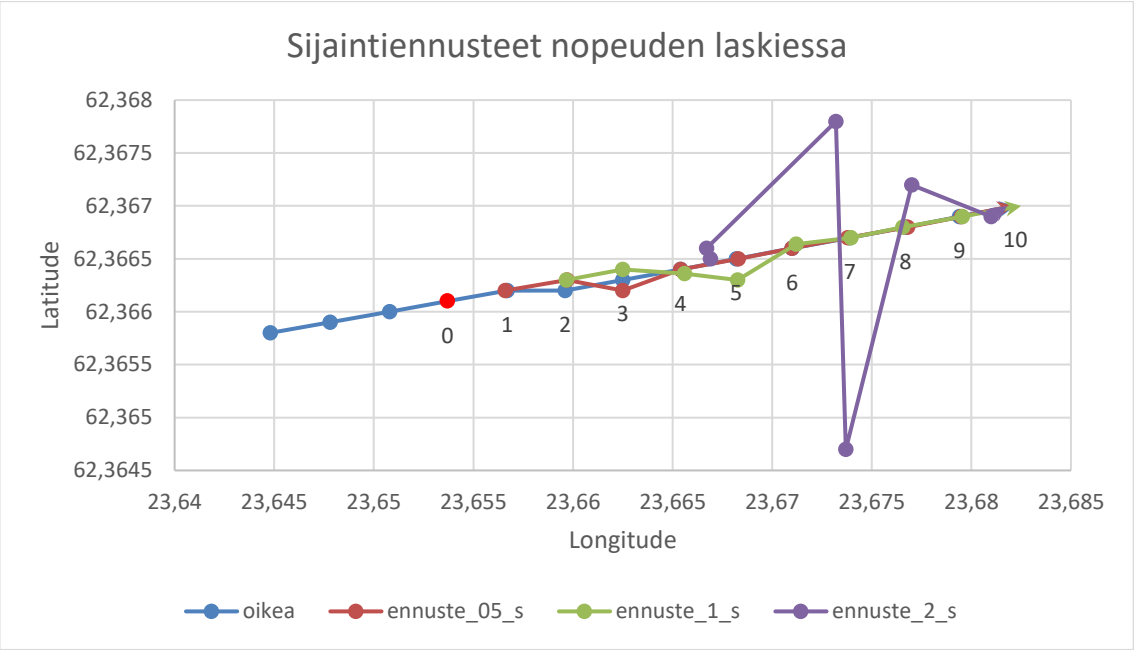
Taulukosta 26 nähdään, että suuntakulman erot vaihtelevat nollasta kolmeen asteeseen, kahta pistettä lukuun ottamatta, jolloin erot olivat viisi astetta ennustetun pisteen ollessa puolen sekunnin tai sekunnin päässä oikeasta pisteestä. Suurempaa vaihtelua suuntakulmissa on havaittavissa silloin, kun ennustettu piste on kahden sekunnin päässä oikeasta pisteestä. Tällöin vaihtelua on nollasta 17 asteeseen. Pituuskallistuskulman erot pysyvät 3 asteessa oikean ja ennustetun pisteen välillä, kun ennustus on luotu puolen

sekunnin, sekunnin tai kahden sekunnin päähän. Kallistuskulman eroissa on nähtävissä sekunnin ja kahden sekunnin ennustettujen pisteiden kohdalla vaihtelua kymmenestä asteesta 80 asteeseen. Puolen sekunnin päähän tehdyllä ennusteella kallistuskulman erot pysyvät vakiona. Se, että puolen sekunnin kohdalla ennustetun ja oikean pisteen kallistuskulman erot ovat lähes 90 astetta on nähtävissä kuvasta 33. Kuvasta 33 nähdään kallistuskulman erot samoin kuin ne olivat korkeuden kasvaessa nähtävissä kuvasta 28.

Taulukko 26. Kulmien erot oikeiden ja ennustettujen reittipisteiden välillä kappaleen nopeuden kasvaessa.

	Suuntakulman erot asteina			Pituuskallistuskulman erot asteina			Kallistuskulman erot asteina		
Aika s	Ennuste 05_s	Ennuste 1_s	Ennuste 2_s	Ennuste 05_s	Ennuste 1_s	Ennuste 2_s	Ennuste 05_s	Ennuste 1_s	Ennuste 2_s
0,5	5,05	-	-	3	-	-	89,81	-	-
1	2,24	2,33	-	3	3	-	89,8	80,09	-
1,5	0,66	1,15	-	3	3	-	89,82	81,25	-
2	0,69	1,32	12,98	3	3	3,01	89,84	52,37	79,38
2,5	0,97	0,79	17,04	3	3	3,01	89,82	11,87	78,24
3	5,01	0,83	4,57	3	3	3,01	89,82	13,82	47,95
3,5	2	2,39	1,34	3	3	3,01	89,81	80,06	12,64
4	0,48	1,23	0,26	3	3	3,01	89,83	81,25	10,14
4,5	0,73	1,12	12,25	3	3	3,01	89,83	52,38	79,4

Seuraavaksi esitellään lentävän kappaleen sijainti- ja asentoennusteita kappaleen nopeuden laskiessa. Kuvasta 35 nähdään, että kappaleen sijaintiennusteen tarkkuus laskee mitä kauemmaksi pisteistä sijaintia ennustetaan kappaleen nopeuden laskiessa.



Kuva 35. Oikean reitin ja ennustettujen reittien sijaintipisteet latitude-longitude –tasossa kappaleen nopeuden laskiessa.

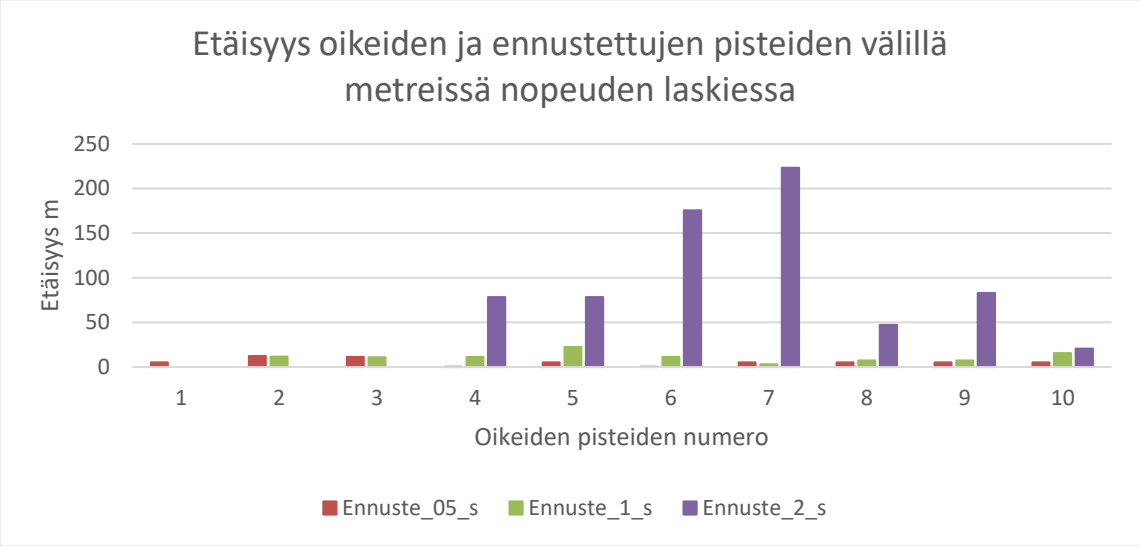
Taulukosta 27 nähdään, että korkeus ennustus on eronnut oikean pisteen korkeudesta vain maksimissaan 10 senttimetriä jokaisella ennustetulla pisteellä kun kappaleen nopeus on laskenut. Erot ovat samansuuruisia kuin taulukossa 25 esitetyt erot reitille, jolla nopeus kasvoi.

Taulukko 27. Korkeuserot oikeiden reittipisteiden ja ennustettujen reittipisteiden välillä kappaleen nopeuden laskiessa.

Aika s	Ennuste 05_s m	Ennuste 1_s m	Ennuste 2_s m
0,5	0	-	-
1	0	0,02	-
1,5	0	0,01	-
2	0	0,02	0,09
2,5	0	0,01	0,07
3	0	0,01	0,1
3,5	0	0,01	0,08
4	0	0,01	0,08
4,5	0	0,01	0,08
5	0	0,01	0,07

Kuvasta 36 nähdään, että kappaleen etäisyys oikean ja ennustetun pisteen välillä pysyy noin 10 metrissä ennustettaessa puoli sekuntia tai yksi sekunti eteenpäin, ja kahden sekunnin päähän ennustettu piste on noin 50 – 230 metrin päässä oikeasta pisteestä. Koska lähtödataa tuli puolen sekunnin välein, kuvan 36 alkupäässä ei kaikilla pisteillä

ole ennustettua arvoa. Pisteiden väliset etäisyydet ovat samaa kokoluokkaa kuin lentävän kappaleen nopeuden kasvaessakin.



Kuva 36. Oikean reittipisteen etäisyys ennustettuihin reittipisteisiin metreinä kappaleen nopeuden laskiessa.

Taulukossa 28 esitetään asentokulmien erot oikean ja ennustetun pisteen välillä lentävän kappaleen nopeuden laskiessa. Kulmissa tapahtuu vaihtelua samalla tavalla kuin sitä tapahtui lentävän kappaleen nopeuden noustessa, pois lukien kallistuskulman vaihtelua. Kallistuskulma vaihteli kahden ja kahdeksan kymmenen asteen välillä sekunnin ja kahden sekunnin päähän ennustettaessa.

Taulukko 28. Kulmien erot oikeiden ja ennustettujen reittipisteiden välillä kappaleen nopeuden laskiessa.

	Suuntakulman erot asteina			Pituuskallistuskulman erot asteina			Kallistuskulman erot asteina		
Aika s	Ennuste 05_s	Ennuste 1_s	Ennuste 2_s	Ennuste 05_s	Ennuste 1_s	Ennuste 2_s	Ennuste 05_s	Ennuste 1_s	Ennuste 2_s
0,5	0,27	-	-	3	-	-	89,85	-	-
1	0,06	0,19	-	3	3	-	89,86	10,12	-
1,5	4,92	0,16	-	3	3	-	89,83	12,83	-
2	1,36	2,6	0,17	3	3	3,01	89,83	78,29	7,75
2,5	0,02	1,53	0,68	3	3	3,01	89,85	81,42	13,97
3	0,43	0,59	7,18	3	3	3,01	89,84	52,38	73,53
3,5	0,39	0,34	15,9	3	3	3,01	89,85	10,4	79,42
4	0,21	0,4	3,4	3	3	3,01	89,85	2,27	48,07
4,5	0,44	0,29	0,05	3	3	3,01	89,84	10,46	7,94
5	0,58	0,33	0,5	3	3	3,01	89,84	12,63	2,13

6.6 Mittaustuloksien arviointi

Mittauksia tehtiin neljälle eri lentävän kappaleen reitille. Mittaustuloksista nähdään, että teoreettisesti suoraan lennettäessä sijainti- ja asentoennusteet toimivat parhaiten ja tällöin on mahdollista ennustaa lentävän kappaleen sijaintia jopa 10 sekunnin päähän luotettavasti. Ennustetun pisteen etäisyys 10 sekunnin päässä erosi oikeasta paikasta vain puoli senttiä. Muilla mitatuilla reiteillä ei 10 sekunnin päähän tehty ennuste ole mitenkään käyttökelpoinen, koska pahimmillaan jyrkän käännöksen reitin tapauksessa etäisyys oikean reittipisteen sijainnin ja ennustetun reittipisteen sijainnin välillä olisi tällöin jopa 32 kilometriä, mikä on nähtävissä taulukossa 29.

Muilla kuin teoreettisen suoran reiteillä ennustetun reittipisteen etäisyys oikean reittipisteen sijainnista riippuu paljon siitä, minkälaista sovitetta pitkin ennustetaan. Teoreettisella suoralla saatu sovite on aina suora, mutta muissa tapauksissa sovitteen kaarevuus vaihtelee sen mukaan, minkä reittipisteiden pohjalta ennustusta tehdään. Mitä kaartuvampaa sovitetta pitkin ennustetaan sijaintia, sitä kauemmaksi ennustettu sijainti näytti menevän. Reiteillä sijaintiennusteen virheellisyyden kasvaessa kasvoi myös asentoennusteiden virheellisyys. Asentoennusteiden virheellisyys ei kuitenkaan kasvanut sitä suuremmaksi mitä suuremmaksi sijaintiennusteen virhe kasvoi, vaan välillä sijaintiennusteen virheen kasvaessa asentoennusteiden virheet pienenivät. Asentoennusteiden virheiden suuruus johtuu siitä, mihin suuntaan oikean reitin reittipiste ja ennustettu reittipiste ovat milläkin ajanhetkellä menossa. Esimerkiksi kaarevalla reitillä saattaa käydä niin, että ennustettaessa muutaman ajanhetken päähän, reitit saattavat kaartua hetkellisesti samaan suuntaan, jolloin luonnollisesti asentoennusteiden erot oikean ja ennustetun reittipisteen välillä pienenevät.

Reiteillä, joilla korkeus ja nopeus muuttuivat, pisteiden eroja mitattiin useasta pisteestä puolen sekunnin, sekunnin ja kahden sekunnin välein. Samanlainen mittaus tehtiin kääntyvällä reitillä ja lisäksi kääntyvällä reitillä tehtiin mittaus, jossa mitattiin ennustetun ja oikean pisteen eroa 10 sekunnin päähän. Teoreettisella suoralla mitattiin pisteitä sekunnin välein, koska erot oikean ja 10 sekunnin päässä olevalla pisteellä olivat niin pienet, että ei olisi ollut mielekästä mitata puolen sekunnin intervallilla oikean ja ennustetun pisteen eroa. Koska eri mittauksissa käytetty mittausväli on osittain erilainen, taulukoissa 29, 30, 31 ja 32 osalla reiteistä osa arvoista on tyhjiä. Taulukossa 29 on esitettynä etäisyyden maksimivirheitä oikean ja ennustetun reittipisteen välillä.

Taulukko 29. Etäisyyden maksimivirhe oikean ja ennustetun reittipisteen välillä metreinä.

Aika s	Suora reitti	Kääntyvä reitti	Korkeus muuttui reitti	Nopeus muuttui reitti
0,5	-	24 m	27 m	12,3 m
1	2,1453E-05 m	123 m	66 m	22,5 m
2	9,00319E-05 m	421 m	336,4 m	223,7 m
3	0,000231487 m	1197 m	-	-
4	0,000471515 m	2521 m	-	-
5	0,000835847 m	4572 m	-	-
6	0,000835847 m	7606 m	-	-
7	0,002040271 m	11751 m	-	-
8	0,002931796 m	17160 m	-	-
9	0,00405048 m	24023 m	-	-
10	0,005422047 m	32525 m	-	-

Koska kääntyvän reitin mittauksista nähtiin, että jo kolmen sekunnin kohdalla kappaleen oikean ja ennustetun reittipisteen etäisyyksissä on yli kilometri virhettä, niin reiteillä, joilla korkeus ja nopeus muuttuivat, laskettiin useista pisteistä puolen sekunnin, sekunnin ja kahden sekunnin päähän ennustetta, sen sijaan, että olisi ennustettu oikeasta pisteestä ajallisesti kauemmaksi. Reiteillä, joilla korkeus ja nopeus muuttuivat, kappale lensi suoraan. Jos kappale olisi ollut kaartuvassa liikkeessä, olisi suoran reitin ja kääntyvän reitin mittaustuloksien perusteella etäisyydet kappaleen oikean ja ennustetun reittipisteen välillä suuremmat kuin nyt mitatut.

Lentävän kappaleen korkeuden muuttuessa erot oikean ja ennustetun reittipisteen välillä olivat kullakin ennustetulla aikayksiköllä samaa suuruusluokkaa. Myöskään kappaleen nopeuden muuttuessa ei ollut suuruusluokissa nähtävissä eroja liikkeen, jossa nopeus kasvoi ja liikkeen, jossa nopeus laski, välillä.

Taulukko 30. Suuntakulman maksimivirhe oikean ja ennustetun reittipisteen välillä asteina.

Aika s	Suora reitti	Kääntyvä reitti	Korkeus muuttui reitti	Nopeus muuttui reitti
0,5	-	13,68°	5,07°	5,01°
1	360°	23,46°	2,36°	2,39°
2	0°	40,93°	20,32°	17,04°
3	0°	73,38°	-	-
4	0°	106,62°	-	-
5	0°	133,45°	-	-
6	0°	156,13°	-	-
7	0°	176,50°	-	-
8	0°	164,42°	-	-
9	0°	146,12°	-	-
10	0°	128,19°	-	-

Taulukon 30 perusteella suuntakulman maksimivirhe on keskimäärin alhaisempi reiteillä, joilla korkeus tai nopeus muuttuivat, kuin kääntyvällä reitillä. Virhettä on kuitenkin huomattavasti enemmän suoraan lentäneellä kappaleella, kun sen korkeus tai nopeus muuttuivat kuin teoreettisella suoralla reitillä, jossa kappale lensi suoraan tasaisella korkeudella ja tasaisella nopeudella.

Taulukko 31. Pituuskallistuskulman maksimivirhe oikean ja ennustetun reittipisteen välillä asteina.

Aika s	Suora reitti	Kääntyvä reitti	Korkeus muuttui reitti	Nopeus muuttui reitti
0,5	-	-	7,28°	3°
1	3°	3,00°	16,94°	3°
2	3°	3,01°	31,67°	3,01°
3	3°	3,01°	-	-
4	3°	3,02°	-	-
5	3°	3,04°	-	-
6	3°	3,07°	-	-
7	3°	3,10°	-	-
8	3°	3,15°	-	-
9	3°	3,21°	-	-
10	3°	3,28°	-	-

Taulukosta 31 nähdään, että pituuskallistuskulma muuttui huomattavasti vain reitillä, jolla kappaleen korkeus muuttui. Muilla reiteillä pituuskallistuskulman erot oikean ja ennustetun reittipisteen välillä pysyivät tasaisina, noin kolmessa asteessa. Taulukosta 32 nähdään, että lentävän kappaleen kallistuskulmassa eniten vaihtelua maksimivirheissä tapahtui kääntyvällä reitillä. Reiteillä, joilla nopeus ja korkeus muuttuivat, kallistuskulman erot ennustetun ja oikean pisteen välillä olivat suuret. Suuret erot johtuvat siitä, että näillä

reiteillä kappaleen ennustettu sijainti heitteli jo kahden sekunnin kohdalla, jolloin kun asentoa ennustetaan kahden seuraavan ennustetun pisteen avulla, suuret vaihtelut sijainti ennusteissa heijastuvat asentoennusteisiinkin.

Taulukko 32. Kallistuskulman maksimivirhe oikean ja ennustetun reittipisteen välillä asteina.

Aika s	Suora reitti	Kääntyvä reitti	Korkeus muuttui reitti	Nopeus muuttui reitti
0,5	-	-	89,84°	89,84°
1	82°	7,39°	82,48°	81,25°
2	0°	17,59°	82,31°	79,4°
3	0°	3,33°	-	-
4	0°	8,74°	-	-
5	0°	14,47°	-	-
6	0°	20,13°	-	-
7	0°	25,53°	-	-
8	0°	30,58°	-	-
9	0°	35,31°	-	-
10	0°	39,83°	-	-

Mittaustuloksien perusteella pelkästään splini-algoritmia hyödyntävää lentävän kappaleen sijaintiennustetta kannattaa käyttää vain maksimissaan kahden sekunnin päähän tehtyihin reittipiste ennusteisiin, jos halutaan pitää ennusteen tarkkuus alle kilometrissä. Jyrkässä käännöksessä kahden sekunnin kohdalla asentoennusteissa suuntakulman osalta rupeaa näkymään jo kymmenissä asteissa mitattavaa eroa kappaleen oikean ja ennustetun suuntakulman välillä. Korkeuden ja nopeuden ennustuksissa kahden sekunnin kohdalla kallistuskulmien erot ovat mitattavissa kymmenissä asteissa. Korkeuden ennustuksessa kahden sekunnin kohdalla pituuskallistuskulman ero on kaksikertaistunut sekunnin päähän tehtyyn ennusteeseen verrattuna ja on noin 30 astetta. Splini-algoritmilla tehtyä ennustetta voisi saada tarkemmaksi, jos sijaintiennustuksen luonnissa huomioitaisiin lentävän kappaleen suuntakulma ja kiihtyvyydet eri koordinaattisuunnissa.

Splini-algoritmi käy reaaliaikaisessa simulaatiossa paikan ennustamiseen, silloin kun paikkaa ennustetaan alle sekunnin päähän. Maksimissaan sekunnin päähän oikeasta paikasta ennustettaessa sijainnin ero oikean ja ennustetun paikan välillä eri mittaustilanteissa oli noin 20 – 120 metriä. Toisissa tilanteissa tuo 120 metrin erokin voi olla merkittävä, jos halutaan esimerkiksi ennakoida, osuuko lentävä kappale 20 * 20 metrin kokoiseen kappaleeseen seuraavaan sekunnin aikana. Todella lyhyen matkan eli maksimissaan sekunnin päähän ennustamiseen splini-algoritmia voi käyttää reaaliaikaisessa simulaatiossa, mutta heti jos halutaan ennustaa yli sekunnin päähän tai ei olla valmiita

sietämään ennustuksessa muutaman kymmenen metrin eroja oikeaan paikkaan verrattuna, niin splini-algoritmi ei ole enää käyttökelpoinen lentävän kappaleen sijainnin ennustamiseksi reaaliaikaisessa simulaatiossa.

Myös asentoennusteet toimivat parhaiten maksimissaan sekunnin päähän tehtynä. Eri tilanteissa suuntakulman ja pituuskallistuskulman ennusteita voi käyttää reaaliaikaisessa simulaatiossa sekunnin päähän tehdyille ennusteille, mutta kallistuskulmissa on jo sekunnin ja alle sekunnin kohdalla nähtävissä suurta virhettä. Nämä kallistuskulman suuret virheet johtuvat siitä, että asentoa ennustetaan kahden seuraavan ennustetun sijainti pisteen avulla, jolloin virheet sijainnin ennustuksessa heijastuvat suoraan asentoennusteisiin.

Mittaustuloksia voidaan pitää suuntaa antavina siinä, miten hyvin ennustuskomponentin ennustus toimii splini-algoritmilla ja toteutetuilla asentoennusteilla. Mittaustulokset ovat suuntaa antavia, sillä ennustuksen luontia mitattiin vain tiettyä nopeutta lentävälle kappaleelle, paitsi reitillä, jolla kappaleen nopeus muuttui. Koska muilla reiteillä nopeus pysyi vakiona, mittaustuloksista ei voida sanoa, että ennusteen eroavaisuudet oikean reittipisteen ja ennustetun reittipisteen välillä olisivat aina mitattua suuruusluokkaa. Mitattu suuruusluokka voi vaihdella sen mukaan millä vauhdilla kappale liikkuu. Eri vauhdilla ennustukset saattavat olla tarkempia tai epätarkempia. Mittauksia kuitenkin tehtiin eri lentävän kappaleen reittityypeille, jolloin saatiin yleiskuvaa siitä, kuinka kauas ennustettaessa ennustusvirheet kasvavat suuriksi. Tosin jokaisesta reittityypistä oli vain yksi reitti, josta tehtiin mittauksia, jolloin saadut mittaustulokset eivät ole niin tarkkoja kuin ne olisivat, jos jokaisesta reittityypistä olisi luotu useampi eri reitti ja näistä reiteistä olisi mitattu virheitä oikeiden ja ennustettujen reittipisteiden välillä ja laskettu reittityypeittäin keskiarvoiset virheet.

7. YHTEENVETO

Työn alussa käsiteltiin ensin simulaatioita ja mallintamista yleisesti sekä esiteltiin myös mitä haasteita reaaliaikaisessa simuloinnissa voi esiintyä. Tämän jälkeen esiteltiin vertailtavat sijainnin ja asennon ennustamisen algoritmit. Sijainnin ennustamisen osalta esiteltiin seuraavat algoritmit: lineaarinen- ja polynominen-sovite, splini-sovite, Kalman-suodin ja harmaan teorian perusmalli GM(1,1). Asennon ennustamisalgoritmeista esiteltiin jäykän kappaleen asennon liikeyhtälöt ja hiukkassuodin. Algoritmien esittelyn jälkeen algoritmeja vertailtiin toisiinsa ja tarkoituksena oli valita sopivimmat algoritmit, joilla reaaliaikaisten lentävien kappaleiden sijaintia ja asentoa voitaisiin mahdollisimman hyvin ennustaa reaaliaikaisessa simulaatiossa. Sijainnin ennustamiseen ei kirjallisuudesta löytynyt yksiselitteistä tapaa, millä algoritmilla ennustaminen kanttaisi tehdä, joten tässä työssä sijainnin ennustaminen toteutettiin splini-algoritmilla. Asennon ennustamisen algoritmeja löytyi huomattavasti vähemmän kirjallisuudesta kuin sijainnin ennustamisessa käytettyjä algoritmeja. Kahdesta esitellystä vaihtoehdosta valitsisin jäykän kappaleen asennon liikeyhtälöt. Tässä työssä asennon ennustamisen käytettävät algoritmit saatiin valmiina ja algoritmit perustuvat jäykän kappaleen asennon liikeyhtälöihin.

Mittauksissa käytetty mittausdata tuotettiin simulaattorilla, jolla simuloitiin lentävän kappaleen lentorataa ja asentoa. Lähtödataa ja mittauksia tehtiin neljälle eri lentoreittityypille: teoreettiselle suoralle reitille, kääntyvälle reitille, reitille, jossa korkeus muuttui ja reitille, jossa nopeus muuttui. Työssä toteutettu geneerinen ohjelmistokomponentti lentävien kappaleiden lentoradan ennustamiseksi oli prototyyppi. Ennustuskomponentti liitettiin osaksi simulaattoria, jolloin sen kykyä ennustaa lentäville kappaleille sijaintia ja asentoa pystyttiin mittaamaan. Luvussa 5 esiteltiin, miten ennustuskomponentti liitettiin osaksi simulaattoria. Mittaustuloksien perusteella reaaliaikaisessa simulaatiossa pelkästään splini-algoritmia hyödyntävää lentävän kappaleen sijaintiennustetta kannattaa käyttää vain maksimissaan yhden sekunnin päähän tehtyihin reittipiste ennusteisiin, jos halutaan pitää ennustuksen virheen suuruus maksimissaan noin 100 metrissä. Myös asentoennustealgoritmeja yhdessä splini-algoritmin kanssa ei kannata käyttää yli sekunnin päähän ennustamiseen reaaliaikaisessa simulaatiossa.

Työn ensimmäisenä tavoitteena oli vertailla olemassa olevia ennustamisessa käytettyjä algoritmeja toisiinsa ja valita vertailtavista algoritmeista sopivimmat. Työn ensimmäinen tavoite saavutettiin, vaikka tulokseksi sijainnin ennustamisen osalta saatiinkin, että ei ole vielä yleispätevää ratkaisua siihen, miten sijainnin ennustamisen ongelma kannattaisi

ratkaista. Työn toisena tavoitteena oli toteuttaa ja ottaa käyttöön prototyyppi geneerisestä ohjelmistokomponentista, joka ennustaa lentäville kappaleille lentorataa paikka ja asentoennusteiden avulla. Työn toinen tavoite saavutettiin toteuttamalla ennustuskomponentin prototyyppi, joka liitettiin osaksi simulaattoria.

Koska toteutettu ennustuskomponentti oli prototyyppi, niin toteutuksen ja mittauksien jälkeen esiin nousi jatkokehitysideoita. Ensimmäiseksi jatkokehitysideaksi nousi se, että sijainnin ennustamista voisi saada tarkemmaksi, jos huomioitaisiin lentävän kappaleen kiihtyvyydet käytetyn koordinaatiston eri akselisuunnissa ennustusta luodessa. Toteutetussa ennustuskomponentin versiossa ei kiihtyvyyksiä huomioitu. Toiseksi sekä sijainti- että asentoennuste voisi olla tarkempi, jos huomioitaisiin kappaleen suuntakulma ennustusta luodessa. Tällöin vältyttäisiin äkillisiltä suuntakulman muutoksilta, joita prototyypin ennusteissa välillä oli. Kolmanneksi ennustuskomponentissa ei ole nyt mitään kykyä korjata virheellistä ennustusta. Tällaisen kyvyn toteuttaminen lisäisi ennustustarkkuutta, koska ennustuksen ollessa todella virheellinen ennustus voitaisiin vain hylätä eikä lentävää kappaletta siirrettäisi virheelliseen ennustettuun sijaintiin ja asentoon simulaattorissa.

Neljäntenä jatkokehitysideana on vaihtaa sijainnin ennustamisessa käytetty algoritmi splini-algoritmista toiseen algoritmiin. Koska asentoennustealgoritmin tulos oli todella riippuvainen tehdyistä sijainnin ennustuksista, niin pelkän sijainnin ennustamiseen käytetyn algoritmin vaihtaminen voi vaikuttaa positiivisesti asentoennusteisiin. Sijainnin ennustamisessa käytetyn algoritmin vaihtaminen on aiheellista, jos on tarve luoda ennustusta kauemmaksi kuin yhden sekunnin päähän, esimerkiksi ennustaa sijaintia ja asentoa kahden tai kolmen sekunnin päähän. Työssä toteutettu ennustuskomponentin prototyyppi antoi hyvän pohjan lähteä tulevaisuudessa jatkokehittämään reaaliaikaisten lentävien kappaleiden sijainnin ja asennon ennustamista simulaattoriympäristössä.

LÄHTEET

[1] G. Harris, S. Karagiorgou, Y. Kontoulis, N. Pelekis, P. Petrou, D. Scarlatti, Y. Theodoridis, Moving Objects Analytics: Survey on Future Location & Trajectory Prediction Methods, Cornell University, 2018. Saatavissa: https://arxiv.org/abs/1807.04639 (Viitattu 28.01.2022)

[2] S. Singhal, Analysis and Design of Algorithms: A Beginner's Hope, BPB Publications, 2018.

[3] X. Zheng, Real-Time Simulation in Real-Time Systems: Current Status, Research Challenges and A Way Forward, Cornell University, 2019. Saatavissa: https://arxiv.org/abs/1905.01848 (Viitattu 10.12.2021)

[4] C. Dym, Principles of Mathematical Modeling, Elsevier Science & Technology, 2004.

[5] S. Liu, Y. Lin, Grey Systems, Theory and Applications, Springer, 2011.

[6] S. Heinz, Mathematical Modeling, 2011, Springer.

[7] N. Sinha, N. Ananthkrishnan, Advanced Flight Dynamics with Elements of Flight Control, CRC Press, 2017.

[8] Suhteellisuusteorian perusteet kevät 2014 kalvot, Helsingin yliopisto, 2014. Saatavissa: http://www.courses.physics.helsinki.fi/teor/stp/stp_2014_1.pdf (Viitattu: 03.12.2021)

[9] Z. Qu, H. Gao, Y. Zhu, Research on High-accuracy Position Prediction Algorithm in Online Game, 2008 International Symposium on Electronic Commerce and Security Conference, 2008.

[10] Y-Y. Xiao, H. Zhang, H-y. Wang, Location Prediction for Tracking Moving Objects Based on Grey Theory, Fourth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2007.

[11] T-L. Tien, A new grey prediction model FGM(1,1), Elsevier, Volume 49, Issues 7-8, 2008, 1416-1426 p.

[12] A. Becker, Overview, About the Kalman filter, kalmanfilter.net, 2021. Saatavissa: https://www.kalmanfilter.net/default.aspx (Viitattu: 12.11.2021)

[13] Y. Tao, C. Faloutsos, D. Papadias, B. Liu, Prediction and Indexing of Moving Objects with Unknown Motion Patterns, ACM, 2004, 611-622 p.

[14] K. Biebler, M. Wodny, Splines And Compartment Models: An Introduction, Springer, 2013.

[15] A. Becker, Kalman filter in one dimension, kalmanfilter.net, 2021. Saatavissa: https://www.kalmanfilter.net/kalman1d.html (Viitattu: 12.11.2021)

[16] A. Becker, Summary, kalmanfilter.net, 2021. Saatavissa: https://www.kalmanfilter.net/multiSummary.html (Viitattu: 12.11.2021)

[17] H.S. Chadha, Extended Kalman Filter: Why do we need an Extended Version?, Towards data science, 2018.

[18] Kuvalähde: https://aviation.stackexchange.com/questions/16531/what-is-the-relation-between-roll-angle-and-pitch-angle (Viitattu 11.10.2021)

[19] D. Juric, Object Tracking: Particle Filter with Ease, Code project, 2015. Saatavissa: https://www.codeproject.com/Articles/865934/Object-Tracking-Particle-Filter-with-Ease (Viitattu 19.09.2021)

[20] S. Srinivasan, Particle Filter: A hero in the world of Non-Linearity and Non-Gaussian, Towards data science, 2019.

[21] S. Dubuisson, S. Dubuisson, Tracking with Particle Filter for High-Dimensional Observation and State Spaces, John Wiley & Sons, 2015.

[22] H. Bilgil, New grey forecasting model with its application and computer code, AIMS Mathematics, Volume 6, Issue 2, 2021, p. 1497-1514.

[23] Z. Kun, S. Haotian, Z. Zhenchong, L. Zekun, L. Ke. Aircraft maneuvering trajectory prediction method based on GRU, European Patent Office, 2020.

[24] Z. Kun, S. Haotian, L. Ke, H. Shuai, Aircraft maneuvering trajectory prediction method based on Morifier-BiGRU, European Patent Office, 2020.

[25] H. Yunxiang, Z. Jingbo, L. Guangjun, Aircraft trajectory prediction method, European Patent Office, 2017.

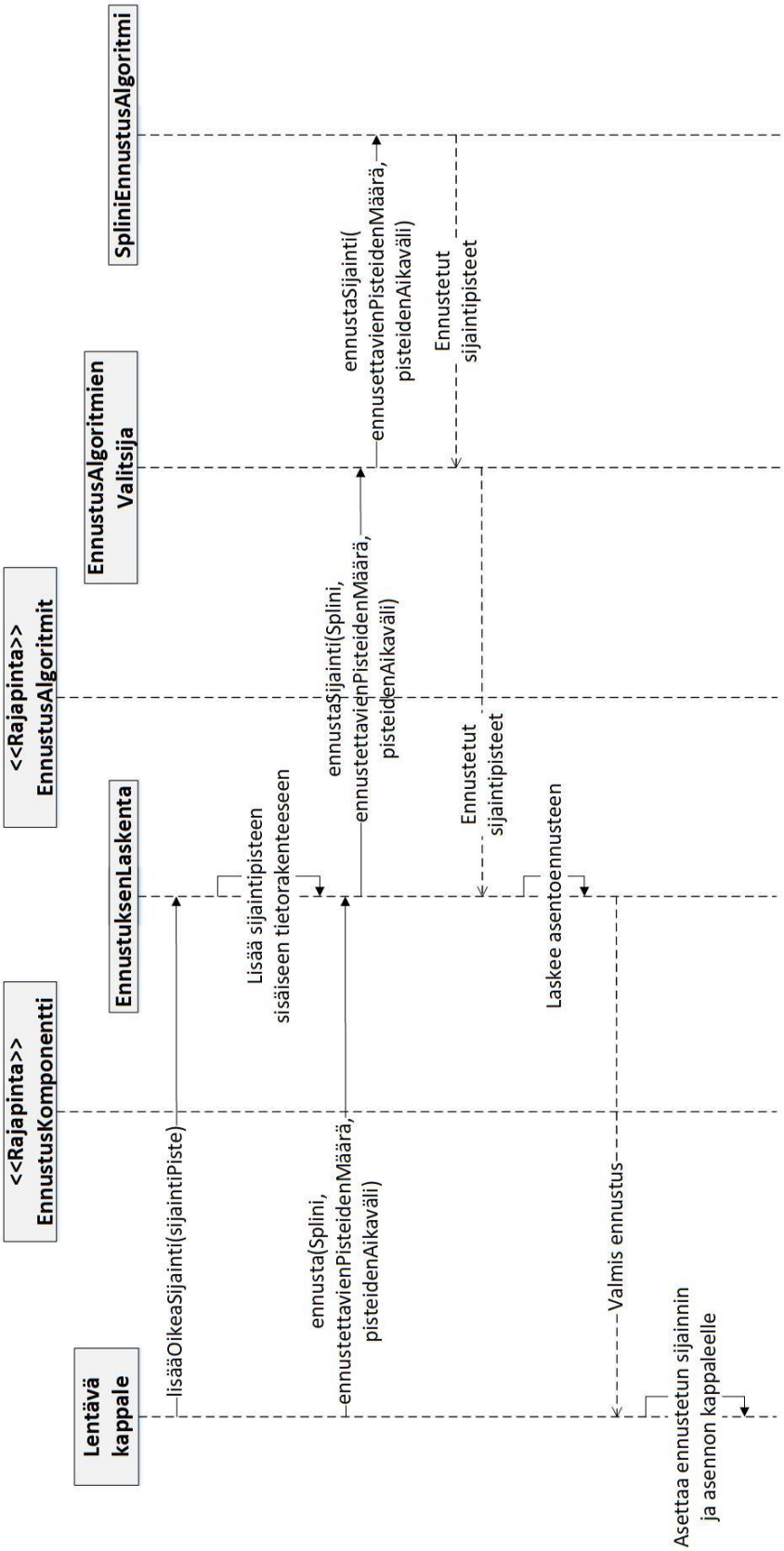
[26] L. Xiulei, T. Qiang, C. Ruoyu, C. Jianzhi, C. Yuli, Civil aircraft trajectory prediction method, electronic equipment and storage medium, European Patent Office, 2020.

[27] L. Bo, Y. Mengfei, H. Tao, Aircraft surface trajectory prediction method based on long-short term memory (LSTM) neural network, European Patent Office, 2018.

[28] H. Schildt, Java, McGraw-Hill Education, 2021.

[29] Class PolynomialSplineFunction, Apache Commons Math 3.6 API. Saatavissa: https://commons.apache.org/proper/commons-math/javadocs/api-3.6/org/apache/commons/math3/analysis/polynomials/PolynomialSplineFunction.html (Viitattu 02.02.2021)

[30] Class SplineInterpolator, Apache Commons Math 3.6 API. Saatavissa: https://commons.apache.org/proper/commons-math/javadocs/api-3.6/org/apache/commons/math3/analysis/interpolation/SplineInterpolator.html (Viitattu 02.02.2021)

[31] C. Ho, R. Harrop, C. Schaefer, Pro Spring, Berkeley, CA:Apress, 2014.

LIITE A: ENNUSTUSKOMPONENTIN SEKVENSSIKAAVIO