

# LOPPURAPORTTI:AS-0.3200 AUTOMAATIO- JA SYSTEEMITEKNIIKAN PROJEKTITYÖT

## A13-10 RADIO-OHJATTAVAN PIENOISMALLIN OHJAUSJÄRJESTELMÄN JA KÄYTTÖLIITTYMÄN KEHITTÄMINEN

Aloituspäivämäärä	17.9.2013
Lopetuspäivämäärä	15.12.2013
Tekijät	Lasse Kortetjärvi, 230579, AUT. lasse.kortetjarvi@aalto.fi Toni Liski, 81911C, AUT. toni.liski@aalto.fi Konsta Hölttä, 79149S, AUT. konsta.holtta@aalto.fi
Valvoja	Arto Niskanen
Työohje	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ohjausjärjestelmä: ABS- ja ESC-toiminnot sisältävän ohjausjärjestelmän jatkokehitys<ul style="list-style-type: none"><li>– Mikrokontrollerikoodin ominaisuuksien kehittäminen</li><li>– Ajonvakautusalgoritmien toteutuksen parantelu</li></ul></li><li>• Käyttöliittymä: Matlab-pohjaisen käyttöliittymän jatkokehitys<ul style="list-style-type: none"><li>– Ennalta suunniteltujen ajosykliä ja ajotilanteiden suorittaminen</li><li>– Ajotietojen tallentaminen ja analysointi</li></ul></li><li>• Kauko-ohjaus: Manuaalisen kauko-ohjauksen toteutus.</li></ul>
Opintopisteet	Lasse Kortetjärvi: 4 Toni Liski: 4 Konsta Hölttä: 5

15. joulukuuta 2013

Radio-ohjattavan pienoismallin ohjausjärjestelmän ja  
käyttöliittymän kehittäminen  
Loppuraportti

AS-0.3200 Automaatio- ja systeemitekniikan projektityöt,  
ryhmä A13-10

Toni Liski, Konsta Hölttä, Lasse Kortetjärvi

15.12.2013

# Sisältö

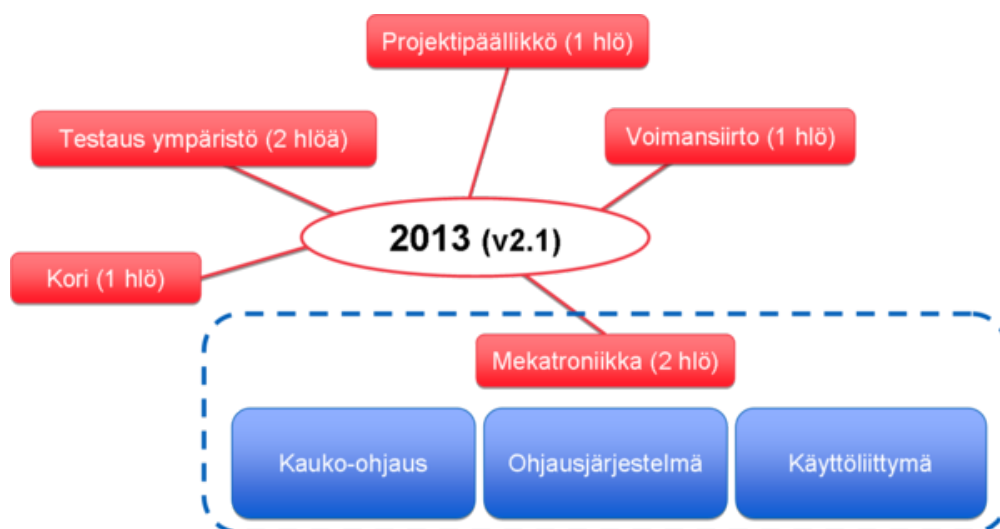
<b>1</b>	<b>Projektin tavoite</b>	<b>4</b>
1.1	Tausta . . . . .	4
1.2	Tehtävä . . . . .	4
1.3	Rajaus . . . . .	5
1.4	Tavoite . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Lähtötilanne</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Rakenne ja osa-alueet</b>	<b>6</b>
3.1	Jarrut . . . . .	6
3.2	ABS-järjestelmä . . . . .	6
3.3	ESP . . . . .	8
3.4	Auton elektroninen ohjaus (mikrokontrollerit) . . . . .	10
3.5	Pyörintänopeustiedon luku (Teensy) . . . . .	14
3.6	Käyttöliittymä . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Yhteenveto ja ajankäyttö</b>	<b>16</b>
4.1	Auton nykytilanne . . . . .	16
4.2	Ajankäyttö . . . . .	17
	<b>Viitteet</b>	<b>20</b>
	<b>Liite A Mikrokontrollerikoodin rakenne</b>	<b>21</b>
	<b>Liite B Käyttöliittymän rakenne</b>	<b>22</b>
	<b>Liite C Kalman-matriisit</b>	<b>23</b>
	<b>Liite D Protokollamäärittely</b>	<b>25</b>

<b>Liite E</b>	<b>ABS-simulaatiomalli</b>	<b>29</b>
<b>Liite F</b>	<b>ABS-simulaatioita</b>	<b>30</b>
<b>Liite G</b>	<b>ESP-simulaatiomalli</b>	<b>31</b>
<b>Liite H</b>	<b>ESP-simulaatioita</b>	<b>32</b>

# 1 Projektin tavoite

## 1.1 Tausta

Projektin taustana on Aalto-yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulun Koneenrakennustekniikan kurssi Kon-16.4081 Ajoneuvojen tuotekehitys. Kurssilla aloitettiin vuonna 2011 projekti, jonka tarkoituksena oli rakentaa radio-ohjattavan auton pienoismalli ajodynamiikan opetuskäyttöön. Syksyllä 2012 Automaatio- ja systeemitekniikan projektityökurssilla autoon tehtiin osaprojektina Matlab-käyttöliittymä ja rakennettiin ohjelmisto ABS- ja ESP-ohjauksille, ja samalla samana vuonna ajoneuvokurssilla kehitettiin auton mekatroniikkaa yleisellä tasolla. Molemmat projektit jäivät kuitenkin kesken, ja tänä vuonna niitä jatkettiin kummankin laitoksen osalta. Kon-16.4081-kurssin projektiryhmässä työskenteli vuoden ajan viisi henkilöä ja Automaatio- ja systeemitekniikan projektityökurssilla syksyn ajan kolme henkilöä. Kuvassa 1 alkuperäinen suunnitelma ryhmäjaoksi.



Kuva 1: Alkuperäinen ryhmäjakosuunnitelma.

## 1.2 Tehtävä

Projektin tehtävänä oli kehittää yllämainittuun kauko-ohjattavaan autoon toimivat lukkiutumattomien jarrujen (ABS) ja ajoneuvonhallintajärjestelmän (ESP) ohjaukset, kehittää auton käyttöliittymää ja toteuttaa automaattiohjaus etukäteen määriteltujen reittipisteiden avulla. Lisäksi autoon oli tarkoitus lisätä etäisyyssanturit helpottamaan paikoitusta testialustalla, eli tässä tapauksessa juoksumatolla. Samoja antureita oli tarkoitus hyödyntää myös ennaltaehkäisemään ajoneuvon törmäyksiä kiinteisiin kohteisiin. Lopuksi, jos projektissa jäisi aikaa, olisi tarkoituksena toteuttaa kauko-ohjaus esimerkiksi RC-auton kauko-ohjainta käyttäen, sekä käyttää etäisyyssantureita automatisoimaan kulku seinää tai monimutkaista rataa vasten.

## 1.3 Rajaus

Projekti rajattiin ohjaus- ja säätöjärjestelmien kehitykseen, käyttöliittymäkoodin parantamiseen ja muutamien testausta helpottavien antureiden lisäämiseen. Pyrimme minimaalisiin muutoksiin valmiissa komponenteissa ja elektroniikassa.

## 1.4 Tavoite

Tavoitteena oli projektin lopuksi päästä testaamaan autoa eri ympäristöissä siten, että auton ohjelmisto ja säätöjärjestelmät olisivat täysin kunnossa ja helposti jatkokehitettävissä. Tavoitteena oli myös auton helppo kauko-ohjaus joko Matlab-käyttöliittymän kautta näppäimistön avulla, tai erillisellä kauko-ohjaimella tai joystickillä.

# 2 Lähtötilanne

Kuten projektit yleensä, tämäkään ei mennyt - tai edes lähtenyt käyntiin - aivan niin kuin suunniteltiin. Hyvin pian projektin alussa huomasimme, että auton tilasta saadut lähtötiedot olivat vakavasti puutteellisia ja osittain jopa vääriä. Auto ei todellakaan ollut siinä tilassa, että ABS:ää olisi voinut testata tai käyttöliittymää olisi kannattanut lähteä laajentamaan nykyisestä tilastaan. Auto ei itseasiassa edes liikkunut, sillä siinä oli väärin mitoitettuna niin akut, moottorit, nopeudensäätimet kuin voimansiirtokin - jarruservoista puhumattakaan.

Auton ohjelmistokin oli kasattu monen projektin aikana pienistä palasista, eikä kokonaisuutta oltu koskaan oikein mietitty. Sen näki muun muassa siitä, että kaikki koodi - sekä käyttöliittymässä että mikrokontrollereissa - oli kirjoitettu yhteen tiedostoon prototyypinomaisesti "tällä se nyt toimi" -tyylillä, ilman minkäänlaista modulaarisuutta. Ohjelmistojen jatkokehittäminen tästä tilasta olisi ollut vähintään tyhmää ja tuskallista, eikä ainakaan reilua käyttäjille tulevaisuudessa.

Projektin alkuvaihe menikin, suunnitelmista poiketen, pitkälti auton nykytilan selvittämiseen ja mahdollisten korjausten suunnitteluun. Huomattiin nopeasti, että projekti ei tule valmistumaan suunnitelmien mukaisesti ajallaan, eikä kaikkia suunniteltuja ominaisuuksia pystytäkään toteuttamaan. Lisäksi Ajoneuvon tuotekehityskurssin ryhmän palaveriin osallistuttuamme meille selvisi, että heillä on tavoitteena saada auto ajokuntoon juuri ennen joulua, joten mekään emme pääsisi ajamaan autolla ennen sitä. Jouduimme siis muuttamaan suunnitelmia radikaalisesti ja keskittymään lähinnä auton simulointiin ja jo olemassaolevien ominaisuuksien korjaamiseen ja parantamiseen. Yksi tällaisista ominaisuuksista oli valmiina oleva protokolla ja sen koodi, jotka katsottiin joustamattomuutensa vuoksi hankalaksi jatkokehittää.

Alkuperäinen syy, minkä vuoksi tämä projekti AS-projektikurssille tuli, oli epäily ABS-jarrujen toimimattomuudesta. Tehtävänantona olikin ABSien ja ESP:n korjaaminen ja jatkokehittäminen. Epäily algoritmien toimimattomuudesta osottautui kuitenkin vääräksi, mutta mekaaniset rajoitteet tekivät suunnitellun säätimen käytöstä mahdotonta.

Projektin edetessä tuimme osaamisellamme toista ryhmää ja yhteistuumin päätimme tilata ajoneuvoon uudet moottorit, nopeudensäätimet ja akut. Lisäksi autoon tilattiin etäisyysanturit sivuille ja eteen. Uudet akut tulivatkin riittävän ajoissa siten, että saimme loppudemossa ajettua autolla muutamia metrejä käyttäen kuitenkin vanhaa voimansiirtoa, moottoreita ja nopeudensäätimiä. Toisen renkaan voimansiirtoon käytetty

kulmavaihde oli jo kulunut loppuun väärän mitoituksen vuoksi, mutta toisella renkaalla ajaminen onnistui kaikkien suureksi yllätykseksi kohtuullisen hyvin (metelistä ja valtavasta virrankulutuksesta huolimatta). Vaikka kytkin vielä säätöjenkin jälkeen luisti, kului toisenkin renkaan kulmavaihde pian olemattomaksi.

Tarkempi kuvaus auton alkutilasta löytyy syksyn 2012 projektiryhmän loppuraportista [9], sekä vuoden 2012 Ajoneuvon tuotekehitys -kurssin loppuraportin liitteestä 5 (mekatroniikka) [10].

## 3 Rakenne ja osa-alueet

### 3.1 Jarrut

Jarrujärjestelmä on toteutettu FG Modellsportin vaijerikäyttöisillä levyjarruilla joita säädetään pienoismalleista tutuilla analogisilla RC-auton servoilla ja omituisen löysillä palautusjousilla. Tällainen vaijerikäyttöinen mekanismi on hyvin altis välyksille, kitkalle sekä venymiselle, mistä muodostuu säätöpiiriin viiveitä ja epälinearisuuksia. Tällaiselle systeemille on mitattu 2,5 Hz:n taajuusvaste, kun sen tulisi olla yli 100 Hz jotta ABS-säätö olisi mahdollinen [7]. RC-auton servo on paikkaohjattu aktuaattori, jota ohjataan 50 Hz:n PWM-signaalilla. Paikkaohjaus tuo haasteita järjestelmässä missä ohjattavana suureena on jarruvoima. Tämä tarkoittaa sitä, että säätöjärjestelmä on erittäin herkkä muutoksille, ja jos järjestelmässä tulee esimerkiksi välystä niin samaan paikkaan ohjattu servo ei enää tuotakaan samaa voimaa. Tämän korjaamiseksi suunniteltiin servoihin uudet piirilevyt, joista on poistettu takaisinkytkentä ja servot toimivat normaaleina DC-moottoreina. Näin voidaan ohjata suoraan servomoottorin tuottamaa voimaa. Uusissa ohjaimissa käytettiin Vishayn Si9986 [8] H-siltaa, jolla voidaan ohjata moottorin kierroslukua ja pyörimissuuntaa PWM-signaalilla. Uudet piirilevyt ovat valmistusteknisistä seikoista johtuen vielä tällä hetkellä työn alla.

### 3.2 ABS-järjestelmä

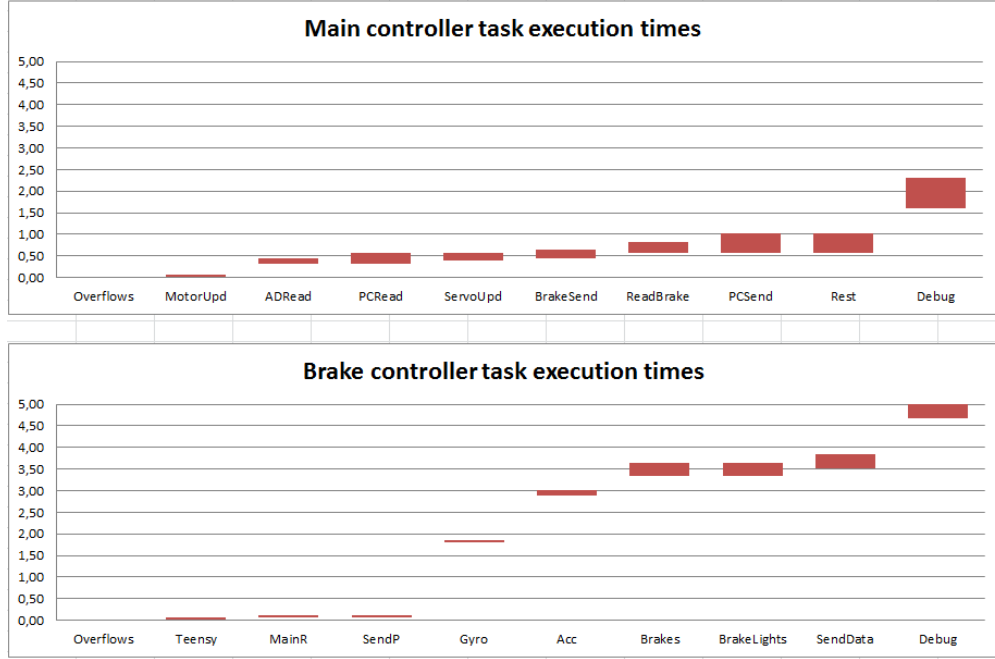
ABS- ja ESP-järjestelmien algoritmien laskutoimitusten epäiltiin olevan hitaita niissä käytettyjen laskutoimitusten vuoksi. Tätä tutkittiin lisäämällä algoritmien suoritusten väliin suoritusaikaa mittaavia laskureita. Kuvassa 2 on esitetty mikrokontrollereiden eri syklien kumulatiivisten suoritusaikojen vaihtelu. Huomataan, että molemmat kontrollerit suoriutuvat hyvin tehtävistään säädettyssä 10 ms:n suoritussyklissä. Yhtään ylivuotoakaan ei testiajon aikana ilmennyt, eli kaikki tehtävät tulivat jokaisella syklillä suoritettua.

Koska alunperin määriteltyä ABS-järjestelmän jatkekehittämistä ei päästy RC-auton testaamisen muodossa tekemään, simuloitiin mahdollisia vaihtoehtoisia säätöjärjestelmiä.

Ajoneuvon hidastuvuus määräytyy renkaan jarrutusvoiman

$$F_r = \mu G_p \quad (1)$$

mukaan, missä  $F_r$  on jarrutusvoima,  $\mu$  on tien ja renkaan välinen kitkakerroin ja  $G_p$  on renkaalla oleva paino. Simulaatioissa käytettiin neljännesajoneuvon massaa 9/4 kg. Käytettävissä oleva kitkakerroin tietyllä alustalla riippuu renkaan luistosta[1] ja optimoimalla luisto saavutetaan paras hidastuvuus. Esimerkki renkaan jarrutusvoiman tuotosta luiston funktiona on esitetty kuvassa 3.



Kuva 2: Alkuperäisten mikrokontrollerien syklien suoritusajat

Alkuperäinen ohjelmistokoodi perustui menetelmään, jossa renkaiden kiihtyvyyksien mukaan säädetään jarrutusvoimaa [2]. Tämä oli toteutettu siten, että parametrein säädettyjen rajakiihtyvyyksien mukaan vaihdeltiin tilaa eri jarrutusvaiheiden välillä. Tätä pyrittiin uudessa järjestelmässä parantamaan huomioimalla säädössä renkaan kiihtyvyyden lisäksi myös renkaan luisto. Tämä on määritetty seuraavan kaavan mukaan:

$$S = 1 - \frac{\omega_w}{\omega_v} \quad (2)$$

missä  $S$  on luisto,  $\omega_w$  on renkaan kulmanopeus ja  $\omega_v$  on ajoneuvon kulmanopeus. Jos luisto  $S$  on 0, renkaan ja ajoneuvon kulmanopeuksissa ei ole eroa, ja jos luisto  $S$  on 1, niin rengas on täysin lukittunut.

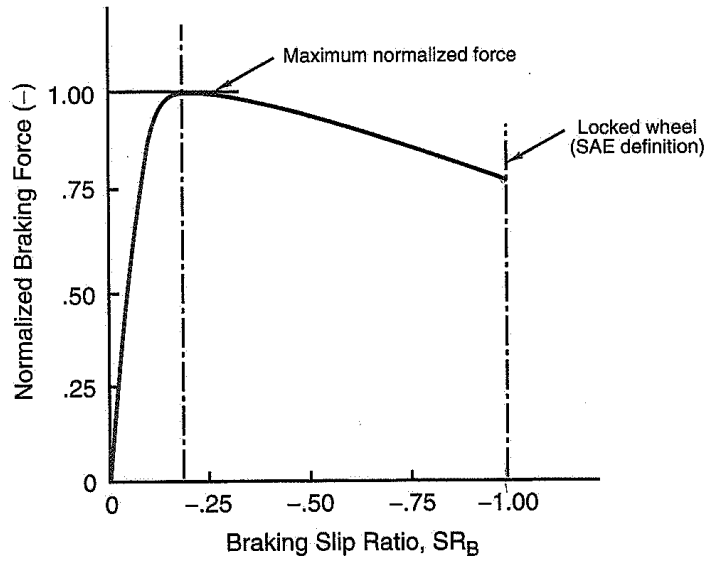
Renkaan luisto jarrutuksen aikana otettiin huomioon uuden säätimen suunnittelussa, ja näin pyrittiin optimoimaan ajoneuvon hidastuvuutta. Säätimen periaatekaavio on esitetty kuvassa 4. Etukäteen määritellyn rengasmallin mukaan määritellään optimaalinen luisto, jonka perusteella pyritään säätämään jarrutusvoimaa. Jos kuitenkin renkaan kiihtyvyys/hidastuvuus kasvaa yli säädettyjen maksimi- ja minimiarvojen, alkaa se muuttaa painotuskerrointa  $K$ , jolloin kiihtyvyyssäädin saa suuremman painoarvon. Tällöin pyritään äkilliset muutokset korjaamaan kiihtyvyyssäätimellä ja hienosäätämään jarrutustapahtumaa luiston perusteella.

Simulaatiomallissa jarrujärjestelmää kuvattiin mallilla

$$J_w \dot{\omega} = F_r R_w - \tau_{\text{brake}} \quad (3)$$

jossa  $J_w = 9 \cdot 10^{-4} \text{kgm}^2$ ,  $F_r$  kaavasta 1,  $R_w = 0.0625 \text{m}$ , sekä jarruttava momentti  $\tau_{\text{brake}} = \text{brakepos} \cdot 1.408 \cdot 10^{-4} \text{Nm}$ . Jarruttavan momentin kerroin on arvioitu olemassa olevasta jarrujärjestelmästä. Lisäksi mallissa otettiin huomioon viive, joka on olemassa ohjauspyynnön tulosta siihen että jarruvoimaa alkaa





**Figure 2.17** Typical braking—slip ratio curve; slip angle =  $0^\circ$ .

Kuva 3: Renkaan jarrutusvoiman tuotto luiston funktiona [1].

syntyä renkaalla. Täksi viiveeksi arvoitiin 100 ms. Tämän viiveen mittaaminen oli tarkoitus tehdä projektin aikana, mutta tarvittavia antureita ei ole vielä tätä raporttia kirjoittaessa tullut. Jarrujärjestelmän malli on esitetty kuvassa 5.

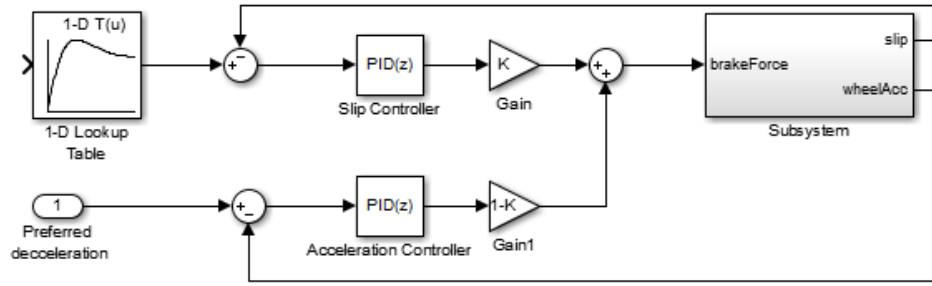
Rengasvoima  $F_r$  laskettiin jokaiselle syklille käyttäen alkunopeutta ja edellisen simulaatiokierroksen luistoa  $S$ . Koko simulaatiomalli on nähtävillä liitteessä E.

ABS-järjestelmän simulaatioita eri säätimien parametreilla on esitetty liitteessä F. Tässä kohtaa on kuitenkin hyvä muistaa, että simulaatiomalli on yksinkertaistettu ja sitä ei ole päästy missään vaiheessa verifioimaan autolla mitatusta datasta, joten parametrien säätö tulee tehdä uudelleen siinä vaiheessa kun RC-auto saadaan ajokuntoon.

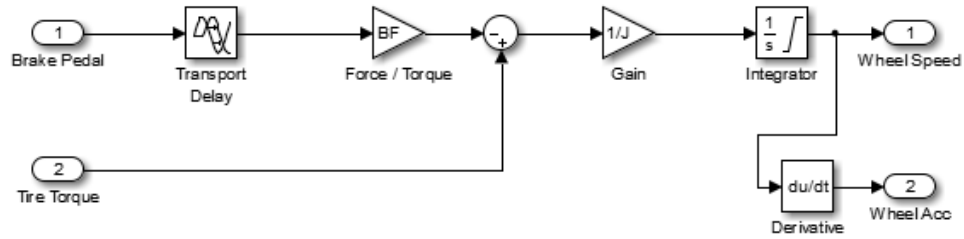
### 3.3 ESP

Ajonhallinnan vakautusjärjestelmän (ESP) tehtävänä on stabiloida ajoneuvon käytöstä lisäämällä tai vähentämällä kiertävää momenttia ajoneuvon massakeskipisteen ympäri, riippuen siitä yli- vai aliohjaako ajoneuvo [2]. Momenttia säädetään jarruttamalla yksittäistä rengasta riippuen tilanteesta; aliohjaavassa tilanteessa lisätään kiertävää momenttia ja yliohtavassa tilanteessa momenttia vähennetään.

ESP-järjestelmän simuloinnissa käytettiin lineaarista 2-pyörämallia [1]. Malli toteutettiin yhtälöiden 4 mukaan



Kuva 4: ABS-säätimen lohkokaavio.



Kuva 5: Simulink-malli jarrujärjestelmästä.

$$\begin{aligned} I_z \dot{r} &= N_\beta \beta + N_r r + N_\delta \delta \\ mV(r + \dot{\beta}) &= Y_\beta \beta + Y_r r + Y_\delta \delta \end{aligned} \quad (4)$$

missä

- $N_\beta, N_r, N_\delta$  = sortokulmasta, kiertonopeudesta ja ohjauspyörän kääntökulmasta aiheutuvia kiertomomenteja
- $Y_\beta, Y_r, Y_\delta$  = sortokulmasta, kiertonopeudesta ja ohjauspyörän kääntökulmasta aiheutuvia sivuttaisvoimia
- $V$  = nopeus,  $m$  = massa,  $I_z$  = inertia

Simulink-malli on esitetty liitteessä G.

ESP-säädössä ajoneuvon hetkellistä kiertokulmanopeutta verrataan estimoituun kiertokulmanopeuteen 5

$$\begin{aligned} r_{est} &= \delta \frac{V}{l} \left(1 + \frac{V^2}{V_{ch}^2}\right) \\ v_{ch} &= \sqrt{\frac{gl}{K_{us}}} \\ K_{us} &= \frac{W_f}{C_{\alpha f}} - \frac{W_r}{C_{\alpha r}} \end{aligned} \tag{5}$$

missä

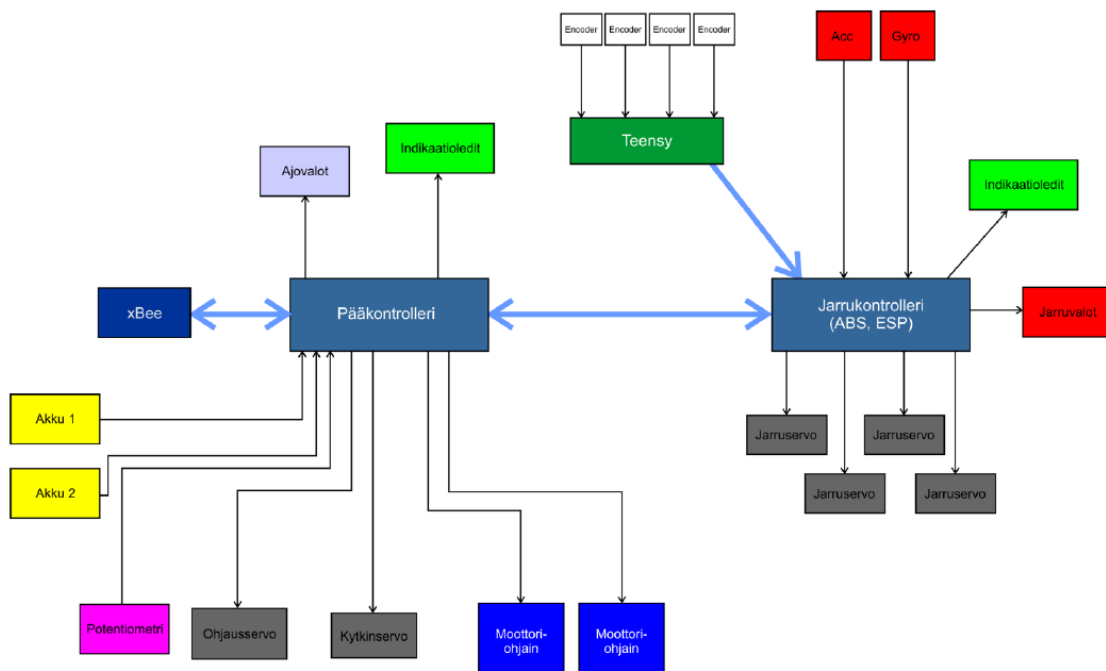
- $r_{est}$  = estimoitu kiertokulmanopeus
- $\delta$  = ratin kääntökulma
- $l$  = ajoneuvon akseliväli
- $V_{ch}$  on ajoneuvon karakteristinen nopeus
- $K_{us}$  = aliohjautuvuusgradientti
- $W_f$ ,  $W_r$  = etu- ja taka-akselin paino
- $C_{\alpha f}$ ,  $C_{\alpha r}$  = etu- ja taka-akselin kaartojäykkyys

ja todellisen (mallissa lasketun ja todellisessa ajoneuvossa mitatun) nopeuden erotusta estimoituun voidaan käyttää säätimen referenssinä. Simulaatiotuloksia on esitetty Liitteessä H. Parametreina ajoneuville simulaatioissa on käytetty:

- $m = 9$  kg
- $J_z = 0.5$  kgm<sup>2</sup>
- $l = 0.5$  m
- $C_{\alpha f} = 900$  N/rad
- $C_{\alpha r} = 600$  N/rad
- massakesipisteen etäisyys taka-akselilta = 0.3 m

### 3.4 Auton elektroninen ohjaus (mikrokontrollerit)

Ajoneuvon varsinainen ohjaus [10] sähköisesti oli toteutettu kolmen erillisen mikrokontrollerin (Atmel AVR) avulla, jotka ovat ketjutettu toisiinsa. Ohjaustieto käyttöliittymältä tulee XBee-moduulien läpi, jotka saavat langattoman linkin näyttämään tavalliselta sarjaportilta kumpaankin päähän (AVR ja PC:n USB). Mikrokontrollerien koodi oli kirjoitettu arduino-sketchinä; nykyversio on puhdasta C:tä siksi, että arduino-ympäristö ei ole kovin alustariippumaton, ja että projektin mikrokontrolleripuolen pääkoodaaja saa arduinosta näppylöitä. Auton kytkentöjä havainnollistetaan kaaviokuvalla 6. Tämä oli jo projektin alkaessa valmiina, ja päätettiin, ettei siihen ruveta tekemään muutoksia. Tämä vaatisi mm. pääpiirilevyn uudelleensuunnittelun, valmistuksen, ja testaamisen. Valmiissa toteutuksessa ei nähty varsinaisesti suurempia ongelmia.



Kuva 6: Mekatroniikkatiimin viimevuotinen piirros auton kytkennöistä yksinkertaistettuna; yksityiskohtaiset ominaisuudet saatavilla [10]

Hajautuksen ideana oli ilmeisesti pelko siitä, että algoritmit eivät kykene toimimaan riittävän tehokkaasti yhdellä mikrokontrollerilla. Kuten jo projektin alkuvaiheilla todettiin mittauksista, tästä ei tule olemaan pelkoa, ennen kuin arduinoille yrittää ohjelmoida jotain erittäin raskasta laskentaa.

Hajautus tuo kuitenkin mukanaan myös ongelmia. Koska eri anturit ja toimilaitteet ovat kiinni eri kontrolereissa, ohjauksen on pakko käyttää niitä kaikkia. Yksi ohjain kuuntelee renkaiden pyörintäenkoodereita, toinen ajaa jarruservoja, ja kolmas mittaa jännitteitä, lukee inertia-antureita ja ohjaa ajomoottoreita sekä rattiservoa. Ohjaimet ovat ketjutettu siten, että kahden välillä on aina yksi kaksisuuntainen sarjaliikenne (UART). Tämä nähdään myös elektroniikkakuvasta 6. Näin esimerkiksi renkaiden nopeudet siirtyvät antureilta käyttöliittymälle teensyn, jarruohjaimen, ajo-ohjaimen sekä lopulta langattoman XBee-linkin läpi. Tällaisen ketjun läpi on luonnollisesti hyvin haasteellista olettaa saada siirrettyä tasanopeuksista tietoa, kun se pitää käsitellä useassa paikassa ja lähettää edelleen eteenpäin. Myöskään kovin tarkkoja säätöalgoritmeja tuskin kannattaa tällä rakenteella lähteä tekemään nimenomaan viiveiden takia (tosin jo auton dynamiikan viiveet ovat monta kertaluokkaa pahempia). Pohdittiin mm. erillisen keskeytysnastan reitittämistä ajo-ohjaimelta kahdelle muulle ohjaimelle, sekä sarjaliikenteen uudelleenreititystä teensyltä suoraan pääohjaimelle, sekä tietenkin kaiken elektroniikan kytkemistä vain yhteen arduinoon hylkäämällä muut; tämä vaatisi mm. uuden piirilevykin.

Kuten aiemmin mainittu, alkuperäinen koodi oli prototyypinomaista, pötköön kirjoitettua ja vailla rakennetta. Se kyllä (luultavasti) toimisi, mutta lisäominaisuuksien koodaaminen vain monimutkistaisi koko systeemiä kohti kaaosta. Kommunikaatioprotokollan kaikkien eri viestityyppien käsittely oli kirjoitettu yhteen isoon peräkkäiseen switch-case-rakenteeseen, ja samaa formaattia oletettiin käytettävän monissa muissa paikoissa; tämä on riskialtista. Protokollan käsittelystä puuttui myös suurelta osin abstraktiot; viestintä oli pakettipohjaista, mutta tavuja kirjoitettiin puskuriin sellaisenaan kaikkialla. Jos protokolla muuttuisi oleellisesti, joka

paikka pitäisi muistaa korjata. Itse oheislaitteiden ohjaus on mikrokontrollereilla aina varsin matalan tason operaatioita (mm. kiinteisiin muistiosoitteisiin kirjoittamista), mikä estää kommunikaation ja ohjausalgoritmien testaamisen ilman suurta simulaattorisetupia tai copypastea. Haluttiin, että auton ohjauskoodia voisi simuloida Matlabilla suoraan sekä joustavuuden että bugienmetsästyksen helpottamiseksi.

Itse pakettipohjainen viestintämuoto pysyi pitkälti samannäköisenä; alkuperäisen datan sisältö ja tunniste-numerot pidettiin sellaisenaan, sillä niiden muuttamiselle ei nähty tarvetta. Samaa muotoa käytetään sekä käyttöliittymän ja pääkontrollerin välillä että autossa eri kontrollerien välillä; ne jakavat suurelta osin saman ohjelmakoodin (jossa on tuskin riviäkään alkuperäisestä).

Viestipaketti alkaa otsikolla, johon kuuluu pituus (yksi tavu) ja tunnistenumbero (yksi tavu). Näiden jälkeen tulee pituustavun verran itse hyötykuormaa (pituuteen ei sisälly otsikkotiedon kahta tavua). Koodissa näiden käsittely hoidetaan lähetys- ja vastaanottofunktioilla, joille annetaan osoitin puskuriin ja datan pituus tavuina. Käyttöliittymäkoneen ja pääkontrollerin välillä on vielä ylimääräinen taso datansiirrossa, joka helpottaa ohjelman käynnistytksen synkronointia; käyttöliittymältä lähetetään ennen joka pakettia tavu 255 (heksana 0xFF); sarjaliikenteen vastaanottokoodissa on tälle käsittely, joka odottaa aluksi tällaista tavua paketin alkuun ennen datan hyväksymistä ja edelleenvälittämistä. Jos itse datassa on tavu 255, se lähetetään kahdesti peräkkäin. Paketin ensimmäinen tavu, pituus, on sovittu olemaan aina korkeintaan 254 (kovin suuria paketteja ei tarvita) - tästä päätellään, että 255 ja jokin pienempi luku tarkoittaa paketin alkua. Näin käyttöliittymäkoneen potentiaalisesti vahingossa lähettämä paketti, jonka kontrolleri vastaanottaa vain osittain, ei häiritse synkronointia. Ylimääräiset synkronointitavut jätetään huomiotta tavuja välittäessä itse paketinhallinnalle.

Mikrokontrollerien koodi on hajautettu pariinkymmeneen erilliseen osaan (kuva 7, liite A abstraktioperiaatteen mukaisesti ja varsinkin viestinkäsittelyssä on useita abstraktiotasoja; itseään toistavaa duplikaattikoodia ei juurikaan ole paitsi siellä missä se on perusteltua tehokkuuden vuoksi. Tämähän on yksi ylläpidettävyyden kannalta tärkeimmistä ominaisuuksista, ja ottaen huomioon projektin jatkuvan luonteen, on hyvä että seuraavat käyttäjät voivat laajentaa ohjaustyyliä minimivaivalla (jota ohjelman hajautettu rakenne tosin hieman hankaloittaa). Eri kontrollerit jakavat monet viestintäkoodit yms., ja esim. enkooderikoodi ylipäättään sisällytetään vain siihen, joka menee enkooderimittauskontrollerille. Tämä logiikka hoidetaan Makefile-tiedostossa [5] ja config.h-otsikkotiedostossa. (Kääntämistä on testattu vain linux-koneella, mutta minimaalisin muutoksin saman pitäisi toimia muillakin alustoilla.)

adc.c	config.h	initTeensy.c	motors.h	servos_avr.c
adc.h	controller.c	initTeensy.h	msgs.c	servos.c
adc_sim.c	controller_cli.c	lsq.c	msgs.h	servos.h
analog.c	core_avr.c	lsq.h	parse_buffer.m	test_ringbuf.sh
analog.h	core_avr.h	main_brakes.c	parse_item.m	uart_avr.c
buf2num.m	core_brakes.c	main_driver.c	protocol.h	uartbuf.c
comm_avr.c	core_common.c	main_encoders.c	pwm_avr.c	uartbuf.h
comm.c	core_driver.c	main_matlab.c	pwm.h	uart.h
comm.h	core_encoders.c	Makefile	pwm_sim.c	uart_stdio.h
comm_sim.c	core.h	Makefile.avr	ringbuf.c	wheelSpeeds.c
comm_sim.h	encoders.c	motors_avr.c	ringbuf.h	wheelSpeeds.h
commtest.m	encoders.h	motors.c	ringbuftest.c	

Kuva 7: Mikrokontrolleripuolen yleiskoodia. Rivejä on huomattavasti enemmän kuin alkuperäisessä pohjassa; ohjelma on monipuolisempi mutta toisaalta myös suurempi.

Erillisiä pieniä “moduuleita” eli .c/.h-tiedostopareja on erillisille yksittäisille antureille ja toimilaitteille, viestinnän abstraktiolle, sekä itse päälogiikalle joka yhdistää tämän kaiken. Antureihin ja toimilaitteisiin kuu-

luvut esim. servot (kontrollereissa PWM-ohjain) ja akkujännitteet ja ratin asento (kontrollereissa suoraan A/D-muunnin). Tätä moduulirakennetta voisi verrata vaikka olio-ohjelmointiin; C tosin ei sitä helposti tue, eikä sitä tässä varsinaisesti tarvita. Moduuleita ja niiden välistä vuorovaikutusta sekä datan liikkumista voi seurata edelleen elektroniikkarakenteen selittävistä kuvista 6, sillä se on varsin saman muotoinen.

Kommunikaation eri tasot ovat jokseenkin seuraavat: XBeen musta laatikko - fyysinen johto - AVR:n rauta - `uart_avr` - `ringbuf` - `uartbuf` - `comm` - `msgs` - viestikohtainen käsittelyfunktio. Käytetty AVR-arkkitehtuuri vastaanottaa sarjaväylältä tavun kerrallaan, ja sinne voi lähettää kerrallaan tavun; tämä hoidetaan keskeytyksillä. Tälle keskustellaan rajoitetun kokoisen puskurin avulla, joka on toteutettu suhteellisen käyttöagnostisina rengaspuskureina (bufferia sisään, bufferia ulos). Puskuriin voi yrittää kirjoittaa pitkän viestin, josta sinne kirjoitetaan kaikki mitä mahtuu; `uartbuf` hoitaa sen, että pakettia lähettäessä odotetaan puskurin tyhjentymistä sen verran, että koko paketti mahtuu sinne (samalla keskeytykset käsittelevät datansiirtoa eri suuntiin buffereissa). Vastaanotto menee vastaavasti niin, että `uartbuf` täyttää annettuun puskuriin toivotun tavumäärän, blokaten jos vastaanottopuskuri on tyhjä. `Comm`-moduuli (communication) helpottaa pakettipohjaisen datan ja yksittäisten tavujen käsittelyä, mitkä ovat yleisin käyttökohteita `uartin` viestintäfunktioille.

Joka AVR-kontrollerilla on omat piirikohtaiset raaoilla numeroilla määrittävät sarjaväylät, joita viestintään käytetään suuntaan ja toiseen, mutta tämä piilotetaan abstraktion taakse ja kaikkialla koodissa termillä `host` tarkoitetaan lähempänä käyttöliittymää olevaa kontrolleria ja termillä `slave` taas kauempana olevaa; esim. jarruohjaimen `host` on pääohjain ja `slave` enkooderiohjain.

`Msgs`-moduuli on oma kokonaisuutensa, joka käsittelee paketit ja jakaa ne eteenpäin koodille, jota tietty paketti-id kiinnostaa. Viestien tavujen veivaaminen apufunktioilla ei varsinaisesti hidasta toteutusta alkuperäiseen arduino-sketchiin "bruteforce-tyyliin" (tavukirjoituksia puskuriin kaikkialla, switch-case-rakenne id-käsittelylle) verrattuna oleellisesti, mutta tämä viestinkäsittely voisi olla pullonkaulana jos haluttaisiin (suhteessa) valtavaa tiedonsiirtonopeutta; tässäkin on valittu koodin siisteys ykkösprioriteetiksi.

Alustuksessa - ohjelman alussa - viesti-id:lle rekisteröidään hallintafunktio, joka annetaan `msgs`-viestinkäsittelyn tiedoksi funktiopointterina datan pituuden ja viesti-id:n kera. Funktiota `msgs_work` kutsutaan jatkuvalla tahdilla; se tarkistaa, onko vastaanottopuskurissa viestiä. Jos sellainen löytyy, ja lähettäjän kuvaamat tyyppi ja pituus täsmäävät rekisteröityyn tietoon, niin suoritus siirtyy hallintafunktiolle, joka lukee puskurista viestin itse hyötykuorman. Jos otsaketiedot eivät täsmää, käyttöliittymälle lähetetään tiedoksi virhekoodi. Tämä virheenkäsittely osoittautui heti koodia kehittäessä hyödylliseksi ominaisuudeksi, sillä käyttöliittymä ja auton ohjelmisto eivät välttämättä ole aina ajan tasalla keskenään. Viestinkäsittely tällaisilla callback-kutsuilla on tavallaan moninkertaisesti kompleksimpi rakenne kuin verrokki raaka switch-case tai if-lauseläjä koodin kulun kannalta, mutta itse käytön pitäisi olla helpompaa ja joustavampaa, kun taustalla systeemin runko toimii automaattisesti.

Modulaarinen rakenne mahdollistaa suhteellisen triviaalisti sen, että suuren osan kontrollereilla ajettavaa koodia voi kääntää myös perus-PC:lle Matlabissa ajettavaksi (ohjausloopista viestinkäsittelyineen tehdään ns. `mex`-funktio Matlabia varten). Tämä paitsi uudelleenkäyttää valmista koodia, myös mahdollistaa tuotantokoodin debuggaamisen isommilla työkaluilla. Erona on viestinnän käsittely (ei tule fyysiseltä sarjaväylänastalta vaan Matlabin vektorista) ja anturitietojen huijaaminen varsinaisen mittaamisen sijaan. Matlab-simulaation testailu jäi projektissa viime tinka; sen pitäisi silti olla helposti kehitettävissä. Sen käytöstä on esimerkki-m-tiedostot; itse käyttöliittymään on myös koodattu simulaatiomoodi, mutta siinä on jokin pieni bugi eikä se suostu käynnistymään oikein. (Tämä onkin hyvä paikka aloittaa jatkokehitys ja tutustua koodiin.) Iso ero oikeaan järjestelmään on se, että tässä kaikkia antureita ja toimilaitteita tulisi simuloida yhdessä pääohjelmassa sen sijaan, että ne olisivat kolmessa osassa. Erona on vain se, mitkä osat käännetään mukaan, ja se, mitä viestejä ja anturipäivityksiä pääohjelma alustaa käyttöön.

Muutamat viestit kulkevat mikrokontrollerilta toiselle ja taas takaisin päin. Alkuperäinen ohjaus jäi lähes

aina jumiin satunnaisen oloiseksi ajaksi (sekunteja tai minuutin luokkaa). Jäi selvittämättömäksi, johtuiko tämä auton koodista vai käyttöliittymästä. On joka tapauksessa ongelma, jos renkaat voivat jäädä pyörimään yhteyden katketessa. Nykyisellään joka kontrollerilla on vahtikoira (watchdog) joka pysäyttää ohjauksen ja kytkee jarrut päälle, mikäli ping-viestiä ei tule ennalta määrättyyn aikaan (puoli sekuntia on sopiva). Pingiin vastataan pongilla, jossa on paketin hyötykuormana tieto lähettäjäkontrollerista. Ping lähetetään eteenpäin muille kontrollereille kun pääohjain vastaanottaa sen käyttöliittymältä, ja vastaavasti kontrollerit välittävät pongit eteenpäin: jarrulta enkooderien viesti pääohjaimelle; pääohjaimelta enkooderien ja jarrujen viestit käyttöliittymään. Ohjainten heartbeat-ledit välkkyvät eri taajuuksella riippuen siitä, onko vahtikoira lauennut vai ei; hidas vilkku tarkoittaa idletilaa, ja nopea vilkku aktiivista, jossa pingviesti on saatu pienen ajan sisällä. Vahtikoiran laukeaminen pääkontrollerilla resatoi myös kommunikaation synkkaustilan siten, että pakettireunat tunnistetaan taas oikein, kun käyttöliittymä käynnistetään seuraavan kerran.

Koodissa on pieniä puutteita alkuperäiseen nähden: kaikkea ohjausta ei ehditty testata kunnolla, eikä esim. inertia-antureille ehditty tehdä koodia; muu priorisoitiin, koska niitäkään ei voi helposti testata jos auto ei aja (alkuperäisessä oli valmiit arduinokirjastot käytössä; mittaustiedolla ei kuitenkaan tehty paljoakaan). Anturit ovat yleisesti suosittuja, ja niille löytyy internetistä valmiita toteutuksia, eikä kaikkea tarvitse tehdä alusta itse [4] [3].

A/D-muunnokset tehdään viiden voltin käyttöjännitteeseen vertaamalla; tässä on sen verran häiriötä, että vastusjaot kannattaa laskea ja kolvata uudelleen siten, että voidaan käyttää AVR:ien sisäistä 2.56 voltin tarkkaa referenssiä.

Koodi käyttää kriittisten virhetilanteiden tarkisteluun `assert()`ia joka tulostaa virhetilanteen sarjaporttiin ja pysäyttää ohjelman (ja ledivilkut), sekä käytössä on muutenkin `avr-libc:n` standardijuttuja [11] kun vain mahdollista.

### 3.5 Pyörintänopeustiedon luku (Teensy)

Jokaisen renkaan akselille asennetut enkooderit on kytketty Teensy-mikrokontrollerin keskeytys-sisääntuloihin, tällöin jokainen enkooderilta tuleva pulssi luo keskeytyksen kontrollerilta ja näitä laskemalla saadaan mitattua renkaan pyörintänopeus.

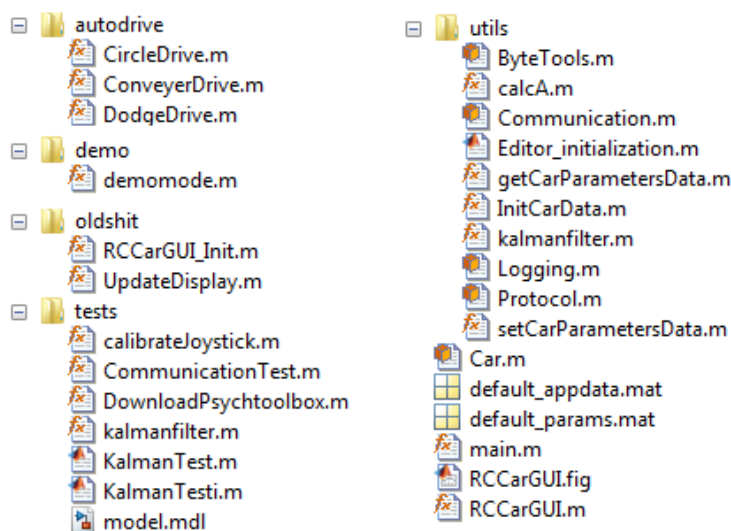
Aikaisemmassa toteutuksessa Teensy-kontrolleri laski keskeytysten määrän 10ms:n aikana, josta laskettiin keskiarvo kahden edellisen mittauksen kanssa ja tämä tieto lähetettiin jarrukontrollerille missä suoritettiin pyörintänopeuden laskeminen ABS-algoritmia varten. Keskiarvoistuksen takia anturitiedon mittaussykli oli hitaampi kuin säätöalgoritmin.

Nyt haluttiin muuttaa niin että mittaustaajuus olisi suurempi kuin säätötaajuus, jotta säätimen saama anturidata olisi ajan tasalla. Tämän vuoksi siirrettiin pyörintänopeuslaskenta Teensy-kontrollerille, josta lähetetään 10 ms:n keskiarvo pyörintänopeustiedosta, sekä samaan aikaan mitattu renkaan kiihtyvyystiempo jarrukontrollerille.

Pyörintänopeusantureiden mittaustaajuus kasvatettiin 800Hz:iin, josta keskiarvoistettiin 100hz:n signaali. Mittaustaajuuden valinta tehtiin sillä perusteella, että se olisi ainakin 2 kertaa suurempi kuin säätötaajuus, ja 8:n moninkerralla on helppo suorittaa jakolasku yksinkertaisesti siirtämällä bittejä oikealle. Renkaiden kiihtyvyydet lasketaan sovittamalla suora jokaiseen 100Hz:n aikana mitattuun nopeustietoon (eli siis kahdeksan mitattua näytettä 10 ms:n aikana). Tässä tulikin ongelmaksi kasvaneen näytteenottotaajuteen tuoma ongelma nopeusresoluution pienenemisestä, mutta enkooderien pulssimäärää per kierros (PPR) saatiin kasvatettua 512:sta pulssista 2048:aan.

### 3.6 Käyttöliittymä

Käyttöliittymä vaikutti projektin alussa kohtuullisen viimeistellyltä ja päälisin puolin toimivalta. Koodikatselemuksen jälkeen hyvin nopeasti selvisi, että käyttöliittymä oli toteutettu vähitellen pienistä osista - kokonaisuutta juuri miettimättä. Nopeasti selvisi myös, että niin sanotun asynkronisen tiedonsiirron ongelma oli oikeasti se, että sarjaporttia luettiin eri säikeistä (Matlabin ajastimilla laukastuista funktioista) samanaikaisesti, jolloin osa packageista tietysti luettiin väärään toimilohkoon ja osa packageista katkesi kesken luettaessa. Tästä perustavanlaatuisesta ongelmakohdasta lähdettiinkin käyttöliittymän koodia kehittämään eteenpäin modulaarisemmaksi ja geneerisemmäksi. Loppujen lopuksi yhteen tiedostoon kirjoitettu 2000-rivinen koodi jaettiin (kirjoitettiin käytännössä uudestaan) useammaksi luokaksi, apufunktioksi ja tiedostoksi, kuten kuvassa 8 on esitetty. Eri luokista ja niiden toiminnallisuudesta on kerrottu tarkemmin liitteessä B.



Kuva 8: Käyttöliittymä jaettu modulaarisempiin luokkiin ja apufunktioihin.

Kuten kuvasta huomataan, sarjaliikennekommunikointi ja tarkoitusta varten kehittämämme protokolla on määritetty omissa tiedostoissaan, jolloin ne on käytännössä helppo korvata millä tahansa muulla kommunikointimenetelmällä tai protokollalla. Lisäksi kaikki autoon liittyvät parametrit, käyttöliittymän tiedot ja ajotiedot säilytetään Car-nimisessä luokassa, jolloin luokka voidaan tallentaa kokonaisena tiedostoon ja auton senhetkistä tilaa päästään analysoimaan siten myöhemmin helposti.

Vanhaa käyttöliittymäkoodia tutkimalla huomattiin myös, että auton paikan estimointi päänäköymässä toteutetaan pelkillä kiihtyvyyssantureilla. Koska kiihtyvyyssanturit olivat (ja ovat edelleen) kiinnitettynä löysästi auton ”katolle” massakeskipisteen sijaan, niiden avulla ei kovin tarkkaa arviota auton paikasta tulla koskaan saamaan. Sen lisäksi pelkkien renkaiden pyörimisnopeuksien integroinnin katsottiin olevan sopimatonta, sillä meillä on kuitenkin käytössä myös kiihtyvyyssanturi ja gyroskooppi. Päätettiin toteuttaa Kalman-suodin estimoidaan auton paikkaa käyttäen apuna mitattua ohjauskulmaa, renkaiden pyörimisnopeuksien keskiarvoa sekä kiihtyvyyssantureita. Kiihtyvyyssantureita ei ole tämän raportin kirjoitushetkellä kiinnitetty tukevasti, joten tällä hetkellä Kalman-suodin ei käytä kiihtyvyyssantureiden mittausdataa hyödyksi.

Liitteessä C on esitetty Kalman-suotimen matriisit. Matriisit on johdettu yleiselle nelipyöräajoneuvolle ja itse Kalman-suotimen toiminta on toteutettu Michael Klederin Learning the Kalman filter [6] -oppaan pohjalta ja sitä hieman mukaillen. Huom! Kalman-suotimen parametrit eivät ole täysin optimoidut ja ne on arvioitu pääosin simuloimalla, mutta koska autolla ei ole raportin kirjoitushetkellä päästy ajamaan, tulee parametrit



säätää kohdalleen myöhemmin.

Yhtenä käyttöliittymään liittyvänä tehtävänä oli alunperin automaattiajon toteuttaminen. Auton tila huomioon ottaen automaattiajoa ei voinut pitää kovinkaan suurella prioriteetilla, ja sen toteutus jäikin aivan viimehetkeen. Käyttöliittymään on nyt toteutettu pohja (uusi välilehti) automaattiajolle, ja pohjan päälle on luotu kolme eri testitilannetta. Testitilanteista on toteutettu ainoastaan liukuhihna-ajo, joskin etäisyysantureiden puuttumisen johdosta tätäkään ajoa ei olla päästy testaamaan oikean auton kanssa. Testin käynnistäminen piirtää näyttöön tällä hetkellä vain satunnaista etäisyysmittausdataa, eikä toimi todellisuudessa. Muut testit on kohtuullisen helppo toteuttaa valmiille pohjalle, joskin ne saattavat vaatia joitain uusia ominaisuuksia myös mikrokontrollereihin.

Automaattiajon lisäksi toiveena oli näppäimistöohjauksen rinnalle saada toimiva joystick-ohjaus. Joystick-ohjaus on nyt toteutettu, mutta vaatii manuaalista kalibrointia aina joystick-kohtaisesti. Kalibrointi onnistuu tests-kansiosta löytyvällä `calibrateJoystick`-funktiolla ja tämän jälkeen asettamalla saatu ääriarvovektori `UpdateDisplay`-funktion alkuun joy-muuttujaan. Huomioi, jos käyttämäsi joystick eroaa testeissä käytetystä monikanavaisesta helikopteriohjaimesta, voit joutua kalibrointifunktiossa lukemaan joystickilta arvoja mitausvektorin eri indekseistä, samoin kun `UpdateDisplay`-funktiossakin.

Käyttöliittymä vaati ennen toimiakseen (kohtuuttoman kattavan) `PsychToolbox`in Matlabiin, jotta näppäimistöpainalluksia auton ohjaamiseksi voitiin lukea. Päätimme kuitenkin toteuttaa näppäimistön lukemisen Matlabin ja GUIDEn sisäänrakennetuilla ominaisuuksilla, jolloin erillistä toolboxia ei tarvita. Haittapuoleksi tässä on kuitenkin se, että käyttöliittymän ”tausta” eli `figure1` tulee olla aktiivisena, jotta ohjaus toimii. Tämä tarkoittaa sitä, että ”Start manual drive” napin painamisen jälkeen täytyy muistaa klikata hiirellä käyttöliittymän tyhjää kohtaa.

Käyttöliittymää on ajettu enimmäkseen windowsilla, mutta Linuxillakin on todettu se pikaisesti toimivaksi. Linuxilla voi tulla ongelmia mm. sarjaporttien laitenodeasetusten tai -oikeuksien kanssa; katso, että käyttäjä on oikeassa ryhmässä (`ls -l /dev/ttyUSB0; groups`) ja säädä matlabille työhakemistoon tiedosto `java.opts`, johon sisällöksi esim.

```
-Dgnu.io.rxtx.SerialPorts=/dev/ttyS0:/dev/ttyS1:/dev/ttyUSB0:/dev/ttyACMO
```

Laitteen on oltava koneessa kiinni Matlabia käynnistäessä.

## 4 Yhteenveto ja ajankäyttö

### 4.1 Auton nykytilanne

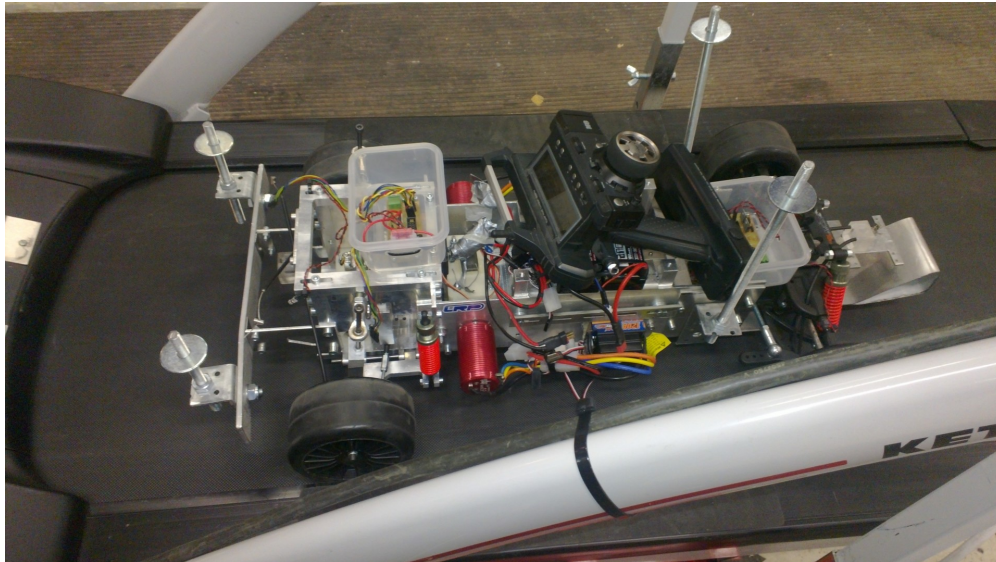
Raportin kirjoitushetkellä ajoneuvokurssin ryhmä on saanut autoon uuden voimansiirron ja päässyt ajamaan (toisella moottorilla) joitain metrejä. Uusien akkujen virranantokyky riittää, toisin kuin alkuperäisen, jonka jännite kyykkäsi aivan liikaa heti liikkeelle lähtiessä. Tällä hetkellä mikrokontrollerit ovat autosta kuitenkin irti, ja sitä on muutenkin purettu jonkin verran (kuva 9). Autoon on tehty myös kori (kuva 10); ohjauselektroonikan mahtuminen alkuperäisessä laatikossa korin alle ei ole varmaa. Voimansiirtomekaniikkaa tehdessä ei ilmeisesti oltu otettu huomioon siinä aiemmin olleita enkoodereita, joten eturenkaista ei tällä hetkellä saada paikkaa tai pyörimisnopeutta mitattua. Suositellaan jatkajille, että niille etsitään jokin paikka. Mikrokontrollerien paikalle on kiinnitetty uusien ajomoottorien akut nippusiteillä ilmeisesti mekaniikkatiimin

loppudemoa varten; autolla voinee ajaa perinteistä RC-auton radiota käyttäen, eli ilman mikrokontrolleriohjausta. Mikrokontrollerilaatikon kiinnitystä pitää viilata, jotta sen saisi paikalleen, ja joitakin johdotuksia pitää uusia.

Voimansiirron moottoripää oli alunperin suuren vaihteiston ja kytkimen kautta renkaissa, mikä aiheutti monimutkaisuutta (kytkin ei toiminut) ja moottorijarrutusta (jota alunperin pyrittiin välttämään kytkimellä). Uudessa voimansiirrossa on suora hihnaveto välityksellä 1:1.

Jarruservoille suunnitellut H-siltojen piirilevyt oli tarkoitus valmistaa kaksipuolisina AS-laitoksen piirilevyjyrsimellä; tämä jäi kuitenkin projektin loppupuolelle, ja jyrsimen kanssa tuli odottamattomia kalibrointiongelmia, eikä aikataulu antanut myöten kokeilla uusiksi. Auton levyjarrut ovat siis toistaiseksi poissa käytöstä. H-sillan yksinkertaisempi ohjaus myös vaatisi yhden ekstrajohdon vetämistä jarrukontrollerilta kullekin servolle, ellei servoihin suunnittele mukaan myös omaa mikrokontrolleria kullekin, jotta yksi signaali johto riittäisi. Jarruja kun pitää ohjata kiinni ja auki, eli moottoria tulee ohjata eri suuntiin.

Tällä kurssilla ei siis tultu eikä tulla ajamaan autolla tätä pidempiä matkoja; kun testaaminen jäi tästä syystä kesken, projektikurssin kannattaa jatkaa tämän auton kanssa painimista, jotta hyvin aloitettu ohjaus saataisiin viimeisteltyä. Myöskään tilatut etäisyysanturit eivät koskaan saapuneet, joten niidenkin kiinnittäminen ja käyttöönotto jää seuraavien ryhmien tehtäväksi.



Kuva 9: Auto uuden voimansiirron testaamisen ja koritukien asennuksen jälkeen

## 4.2 Ajankäyttö

Kuten projektitöissä yleensä, tässäkin voidaan jälkiviisastella, että tokihan olisi kannattanut aloittaa aikaisemmin. Auton epävarmuudet saivat projektin alun vähän ontumaan, ja vauhtiin päästiin vasta lähempänä loppua (kuva 11), kun varmistui, että vanha voimansiirto tulee pysymään kurssin demotilaisuuteen asti kiinni. Tätä varten tehtiin pikaisesti ohjauksen yleinen rakenne loppuun ja lukittiin alkuperäisen voimansiirron kytkin pysyvästi lukkoon ruuvaamalla sinne pultti (mikä sekään ei riittänyt estämään kytkimen luistamista). Uudessa voimansiirrossa kytkintä ei ole.



Kuva 10: Kori auton rungon päällä

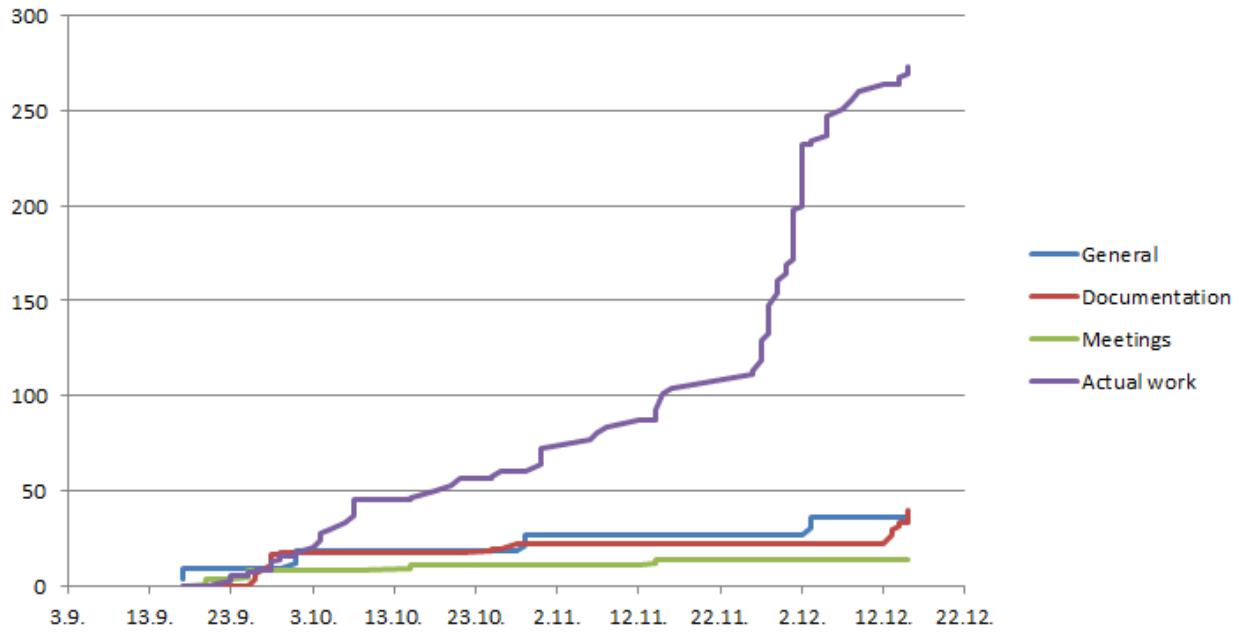
Taulukko 1: Projektin ajankäyttö karkeisiin osakokonaisuuksiin jaettuna.

Yleiset kurssin asiat, tapaamiset	80 h
Projektiin tutustuminen	22 h
Protokollan uudelleenkirjoittaminen	28 h
ABS ja ESP	31 h
Käyttöliittymä	62 h
Jarrujen kehitystyö	30 h
Mikrokontrollerien yleinen säätö	60 h
Kommunikaatiokoodin debuggaus	20 h
Muu autoon liittyvä kehitystyö	24 h
Lopun dokumentointi ja bugisäätö	20 h

Työ jaettiin alunperin kolmeen osaan, siten että Lasse keskittyi ABS:n ja ESP:n toimintaan, Konsta mikrokontrollereiden uudelleenohjelmointiin ja Toni käyttöliittymään. Projektin edetessä ja uusien työtehtävien ilmaantuessa kukin teki jonkin verran töitä myös toistensa osa-alueisiin. Kaikki tekivät tasapuolisesti työtä myös auton yleisen kunnon selvittämiseen, sekä kaikkiin yleisiin kurssiin liittyviin tehtäviin. Yhteistyö toimi mainiosti IRC:n välityksellä, ja Git-versionhallinta auttoi huomattavasti koodin hajautetussa kehityksessä; näitä suositellaan tulevillekin.

Seurasimme ajankäyttöämme työtehtäväkohtaisesti, päiväkohtaisesti ja projektin osa-aluekohtaisesti. Koska projekti (kuvan 11) oli jaettu 16 eri työtehtävään, ja työtehtäviä tuli useita lisää myös projektin edetessä (ja toisaalta vanhat tehtävät jätettiin mahdolltomana tekemättä), emme saaneet eri työtehtäviin kulunutta aikaa esitettyä informatiivisesti yhdessä kuvaajassa. Sen sijaan ajankäyttö jaettiin karkeampiin osakokonaisuuksiin, jotka ovat esitettyinä taulukossa 1. Satunnaista organisoimatonta keskustelua ja ajattelua, jota kukin teki luultavasti kymmenisen tuntia projektin aikana, ei pystynyt seuraamaan mitenkään järkevästi.

Yhteensä koko projektiin aikaa on kulunut noin 380 tuntia. Henkilöittäin tämä jakautuu taulukon 2 mukaan.



Kuva 11: Kumulatiivinen ajankäyttö työn eri osa-alueiden välillä siitä työstä, mitä enimmäkseen seurattiin. General tarkoittaa kurssin luentoja ja tapaamisia, actual work on varsinaista autoon liittyvää kehitystyötä.

Taulukko 2: Projektin ajankäyttö henkilöittäin.

Lasse	110 h
Toni	124 h
Konsta	144 h

Aallon politiikan mukaan yhtä opintopistettä vastaa noin 27 tuntia töitä, joten tämän mittarin mukaan Lasse ja Toni olisivat ansainneet kurssista neljä opintopistettä ja Konsta viisi. Uskomme, että kaikki ovat projektin vaikeuksista huolimatta tehneet ansioituneesti töitä näiden tuntien eteen.

# Viitteet

- [1] Milliken W.F., Milliken D.L, Race Car Vehicle Dynamics, 1994, SAE International
- [2] Robert Bosch GmbH, Bosch Handbook for Safety, Comfort and Convenience Systems, 2007, Bentley Publishers
- [3] Sparkfun, Triple-Axis Digital-Output Gyro ITG-3200 Breakout, <https://www.sparkfun.com/products/9801>, viitattu 15.12.2013
- [4] Sparkfun, Triple Axis Accelerometer Breakout - ADXL345, <https://www.sparkfun.com/products/9836>, viitattu 15.12.2013
- [5] [http://en.wikipedia.org/wiki/Make\\_\(software\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Make_(software)), viitattu 15.12.2013
- [6] Michael Kleder, Learning the Kalman filter <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/5377-learning-the-kalman-filter>
- [7] Patil C. B., Anti-lock Brake System Re-design and Control Prototyping using a One-Fifth Scale Vehicle Experimental Test-bed, 2003, Thesis, [http://www.me.utexas.edu/~longoria/research/svcl/theses/Patil\\_2003.pdf](http://www.me.utexas.edu/~longoria/research/svcl/theses/Patil_2003.pdf), viitattu 13.12.2013
- [8] Vishay, Si9986 Buffered H-Bridge, Datasheet, <http://www.vishay.com/docs/70007/si9986.pdf>, viitattu 14.12.2013
- [9] Kevään 2012 mekatroniikkaryhmän loppuraportti, [http://autsys.aalto.fi/intranet/as-0.3200/attach/A12-09/A12-09\\_RC-auton\\_kehitys\\_Loppuraportti\\_wiki.pdf](http://autsys.aalto.fi/intranet/as-0.3200/attach/A12-09/A12-09_RC-auton_kehitys_Loppuraportti_wiki.pdf), viitattu 15.12.2013
- [10] Ajoneuvon tuotekehitys -kurssin 2012 Mekatroniikan loppuraportti, [https://wiki.aalto.fi/download/attachments/77115783/raportti\\_liite\\_Storsjo.pdf](https://wiki.aalto.fi/download/attachments/77115783/raportti_liite_Storsjo.pdf), viitattu 15.12.2013
- [11] AVR-libc, <http://www.nongnu.org/avr-libc/user-manual/modules.html>, viitattu 15.12.2013

## A Mikrokontrollerikoodin rakenne

Kooditiedostot ovat yhdessä läjässä; tässä esitellään ne lyhyesti aakkosjärjestyksessä. Otsikkotiedostoja on jätetty irrelevantteina pois; ne liittyvät oleellisesti vastaaviin .c-tiedostoihin.

**adc.c** AVR-spesifistä A/D-muuntimen koodia; käytetään mm. akkujännitteiden mittaamiseen ja ratin suunnan havaitsemiseen, joka on toteutettu potentiometrillä.

**adc\_sim.c** Simulaation adc-huijauskoodi, säilöo ohjaukset myöhempiä huijauksia varten

**analog.c** Analogisten mittausten abstraktio. Kun adc:stä tekisi matlabillekin pwm:n kaltaisen (kuvattu alla) simulaation, ohjelma ei ota kantaa siihen, missä mittaaminen suoritetaan.

**buf2num.m** Esimerkki raakabufferin muuntamisesta numeerisiksi arvoiksi matlabilla.

**comm\_avr.c** AVR-puolen kommunikointi; käyttää uartia.

**comm.c** Yleisiä alustariippumattomia kommunikaatiofunktioita.

**comm.h** Kommunikoinnin perusmäärittelyt; viestinumero ja pari apumakroa.

**comm\_sim.c** Simulaattorin eli matlabin kanssa kommunikointi; puuhaa viestinnän yhden suuren taulukon läpi, joka annetaan valmiiksi matlabista kutsuttaessa.

**commtest.m** Lyhyt esimerkki kommunikaation matalan tason hallinnasta matlabilla.

**config.h** Asetuksia, jotka vaihtelevat laitekohtaisesti; esim. kommunikaatioon käytettyjen sarjaporttien numerot.

**controller.c** Matlabin controller-funktion kirjasto-api.

**controller\_cli.c** Komentoriviltä ajettava pikainen testi demonstroimaan modulaarisuuden joustavuutta.

**core\_avr.c** Mikrokontrollereille yhteistä pääkoodia, mm. alustukset ja ajastukset.

**core\_brakes.c** Pääohjelma jarrukontrollerille, joka ajaa abs-algoritmeja, ohjaa niillä jarruja ja välittää viestejä edelleen enkooderikontrollerille.

**core\_common.c** Yleisiä kontrolleririippumattomia pääohjelmasta kutsuttavia funktioita.

**core\_driver.c** Pääohjelma ohjaimelle, joka säättää moottoreita ja rattia ja on suoraan kytköksissä pc:hen radiolla sekä välittää viestit eteenpäin.

**core\_encoders.c** Pääohjelma enkooderikontrollerille (teensy). Mittaa enkooderien pyörimisnopeutta ja arvioi kiihtyvyyksiä; välittää ne käyttöliittymälle.

**encoders.c** Enkooderien abstraktio käytettäväksi joka kontrollerissa.

**initTeensy.c** Enkooderille spesifiset alustusrutiinit (mm. keskeytykset ja ajastimet).

**lsq.c** Käyrän sovitus viimeksi mitattuihin pisteisiin.

**main\_brakes.c** Jarrukontrollerin alustuskoodit yms.

**main\_driver.c** Pääkontrollerin alustuskoodit yms.

**main\_encoders.c** Enkooderikontrollerin alustuskoodit yms.

**main\_matlab.c** Matlabin vastaavat; ei ole saanut erityisesti huomiota.

**Makefile** Make-ohjeet matlab-version kääntämiseksi. Tämä on kopioitu ja siistitty matlabin tarjoamasta tiedostosta ja kokeiltu koulun linux-koneilla.

**Makefile.avr** Make-ohjeet mikrokontrollereille (kaikille kolmelle). Tässä asetetaan myös kullekin makro, joka määrittää erinäisiä asetuksia.

**measdisp.py** Testikoodia viestintään. Ei toimi aina kovin luotettavasti pitkän aikaa.

**motors\_avr.c** Moottoriohjaimen avr-toteutus; välittää ohjaukset pwm:lle.

**motors.c** Ajomoottorien abstraktio.

**msgs.c** Tärkeimmät viestinnän korkean tason pakettien käsittelyt.

**parse\_buffer.m** Matlabin puolen viestipuskurinkäsittelyesimerkki.

**parse\_item.m** Yliyksinkertaistettu esimerkki yksittäisen viestipaketin käsittelystä.

**protocol.h** Kommunikointiprotokollan numerot (sisällytetään comm.h:hon).

**pwm\_avr.c** AVR-puolen varsinainen pwm-toteutus.

**pwm\_sim.c** PWM-huijaus matlabsimulaatiolle; muistaa ohjatut arvot siltä varalta, että niiden perusteella simuloitaisiin jotakin.

**ringbuf.c** Geneerinen rengaspuskuri.

**ringbuftest.c** Yksikkötestejä rengaspuskurille; testattu aluksi pienemmillä puskuilla eikä enää merkityksellinen.

**servos\_avr.c** Servojen toiminta AVR-puolella.

**servos.c** Servoabstraktio jarruille sekä myös mahdollisesti moottorinohjaimille, sillä niitä ohjataan samalla tekniikalla.

**test\_ringbuf.sh** Apuskripti rengaspuskuritestien ajamiseksi.

**uart\_avr.c** Viestinkäsittely avr:lle matalimmalla tasolla eli tavuina rautapuskuriin.

**uartbuf.c** Uartin helpottamiseksi viestittelyabstraktio, joka puskee viestejä rengaspuskuriin kunnes kaikki data on perillä; lukee vastaavasti.

**uart\_stdio.h** Arduinojen uartia käytetään myös standardikirjaston stdio-stderr-virtoina, jolloin kaapataan assert()in debugviestit.

**wheelSpeeds.c** Enkooderin rengasnopeuksien mittauksen yksityiskohdat.

## B Käyttöliittymän rakenne

Tässä liitteessä käydään läpi kuvan X listauksessa esitetyt käyttöliittymän luokat ja funktiot pääpiirteittäin. Tarkemmin toiminta selviää lukemalla luokkien lähdekoodin seassa olevia kommentteja.

### Autodrive-hakemisto

Autodrive-hakemistossa on pohjat suunniteille automaattitilanteille. Testeistä on toteutettu ainoastaan liukuhina-ajo ConveyerDrive funktiossa.

### Demo-hakemisto

Demo-hakemistosta löytyvä demo-moodi on tarkoitettu auton demoamiseen eri tilanteissa. Demo-moodissa on tällä hetkellä visualisoitu “ratin” kulma, eri renkaiden pyörimisnopeudet, auton kiihtyvyys ja jarru.

### Oldshit-hakemisto

Oldshit-hakemisto, kuten nimi kertoo, sisältää vanhasta koodista jääneitä rippeitä, joita on ollut vaikea jakaa pienempiin lohkoihin tai joita ei ole katsottu tarpeelliseksi kirjoittaa uudestaan. UpdateDisplay-funktio noudattelee vanhaa rakennetta, mutta sen sisältö on käytännössä kirjoitettu uudestaan.

### Tests-hakemisto

Tests-hakemistossa sijaitsevat auton kehittämisessä käytetyt testifunktiot ja joystickin kalibroimiseen tarkoitettu työkalu.

### Utils-hakemisto

Utils-hakemistoon on pyritty sijoittamaan aiemmin RCCarGUI-tiedostossa olevia kopioituja lohkoja. Lisäksi sinne on luotu useita uusia luokkia niin logitukseen, sarjaliikennekommunikointiin kuin protokollankin käsittelyyn.

### Juurihakemisto

Juurihakemistossa on vanhan käyttöliittymän “taustakoodin” lisäksi main-funktio, jolla koko ohjelma on tarkoitus käynnistää. Sen lisäksi hakemistosta löytyy oletusasetustiedostot, jotka ladataan ohjelman käynnistyksessä. Lisäksi hakemistossa on Car-luokka, joka pitää sisällään käytännössä kaiken ajon aikaisen tiedon autosta ja käyttöliittymästä.

## C Kalman-matriisit

Auton paikan estimoinnissa käytetyn Kalman-suotimen matriisit.

Järjestelmän dynamiikkamatriisi

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta t \cos \theta & \frac{1}{2} \Delta t^2 \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \Delta t \sin \theta & \frac{1}{2} \Delta t^2 \sin \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\Delta t}{L} \tan \phi & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Prosessin kohina

$$Q = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2^2 \end{pmatrix}$$



Mittausten kohina

$$R = \begin{pmatrix} 2^2 & 0 & 0 \\ 0 & 2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0.05^2 \end{pmatrix}$$

Tulomatriisi  $\mathbf{B}$ , tulovektori  $\mathbf{u}$ , tilavektori  $\mathbf{x}$  ja tilavektoriestimaatin kovarianssi  $\mathbf{P}$  alustetaan nolllaksi.

$$B = 0$$

$$u = 0$$

$$x = 0$$

$$P = 0$$

Havainnointivektori

$$z = \begin{pmatrix} v_{total} \\ a_{max} \\ \phi \end{pmatrix}$$

## D Protokollamäärittely

- Jotkut abs- ja esp-parametrit vanhentuneita, säilytettiin alkuperäisten algoritmikoodien sekavuuden vuoksi
- Raaka puskuri muotoa <0xFF> <datasize> <ID> <16bit numeroita>
- FF datassa korvataan kahdella FF:llä
- Bootissa tai watchdog-timeoutin jälkeen auton puolella odotellaan että tulee paketin alku (hosti streamaa dataa koko ajan), eli FF ja jotain muuta kuin FF, koska sovitaan että datasize ei ole koskaan 255
- Servojen rajaparametrit säilytetty ennallaan; tulee muuttumaan tulevaisuudessa servojen modifiointien takia

ID	Matlab-parametri, jos oleellinen	Parametri	Selitys
0	Ping	-	Ping request
1	Pong	pongaaajan id	Ping response (Pong)
2	GUIRequestParams	-	GUI pyytää auton parametrejä
3	CarRequestParams	-	Auto pyyltää GUI:lta parametrejä (täh?)
4	Error	id, lähettäjä, parametri	Virheviesti, esim. viestin koko tai id ei täsmää
5			
6			
7			
8			
9			
10	frontAxleLeftBrakeServos NeutralPositions	500-2500	Etuakselin vasemman jarruservon nolla-asento
11	frontAxleRightBrakeServos NeutralPositions	500-2500	Etuakselin oikean jarruservon nolla-asento
12	rearAxleLeftBrakeServos NeutralPositions	500-2500	Taka-akselin vasemman jarruservon nolla-asento
13	rearAxleRightBrakeServos NeutralPositions	500-2500	Taka-akselin oikean jarruservon nolla-asento
14	frontAxleLeftBrakeServos MaximumPositions	500-2500	Etuakselin vasemman jarruservon maksimiasento
15	frontAxleRightBrakeServos MaximumPositions	500-2500	Etuakselin oikean jarruservon maksimiasento
16	rearAxleLeftBrakeServos MaximumPositions	500-2500	Taka-akselin vasemman jarruservon maksimiasento
17	rearAxleRightBrakeServos MaximumPositions	500-2500	Taka-akselin oikean jarruservon maksimiasento
18			
19			
20	absEnabled	1/0	ABS on/off

21	absLowThres	0-255	ABS low threshold
22	absMiddleThres	0-255	ABS middle threshold
23	absHighThres	0-255	ABS high threshold
24	finalPhaseLengthLift	0-255	Viimeisen vaiheen pituus jarruvoiman vaiheittaisessa nostossa (1=10ms, ..)
25	finalPhaseLengthHolding	0-255	Viimeisen vaiheen pituus jarruvoiman vakioarvon pitämisessä (1=10ms, ...)
26	slopeFirstPhaseCalcBrake	0-255	Ensimmäisen vaiheen kulmakerroin jarruvoimaa laskettaessa
27	thirdPhaseReleaseBrake	0-255	Kolmannen vaiheen kulmakerroin jarruvoimaa nostettaessa
28	lastPhaseReleaseBrake	0-255	Viimeisen vaiheen kulmakerroin jarruvoimaa nostettaessa (liittyy param. 24)
29			
30	slipTolerance	0-100	Sallittu luiston poikkeama maksimiluistosta, prosentteja
31	enabled	0/1	abs päällä vai ei
32	cutOffSpeed	0-255	miniminopeus missä abs on aktiivinen VALUE*0.6134 m/s
33	minAcc	0-255	säädön minimikiikthyvyys
34	maxAcc	0-255	säädön maksimikiikthyvyys
35	muSplitThreshold	0-100	sallittu luiston poikkeama akselilla, prosentteja
36			
37			
38			
39			
40	espEnabled	1/0	ESP on/off
41	espSensitivityControlAngVel	0-255	ESP herkkyys kulmanopeussäädössä
42	espSensitivityAdjSlipAngle	0-255	ESP herkkyys sortokulmasäädössä
43	espBrakeForceFactor	0-255	ESP jarruvoiman kerroin (muut paitsi säädettävä pyörä)
44	espBrakeForceDist	0-255	ESP jarruvoiman jako (muut paitsi säädettävä pyörä)
45	espAngularVelContPCoeff	0-255	ESP kulmanopeussäätö, PD säätimen vahvistus P
46	espAngularVelContDCoeff	0-255	ESP kulmanopeussäätö, PD säätimen derivaatta D
47	espDriftAngleContrPCoeff	0-255	ESP sortokulmasäätö, PD säätimen vahvistus P

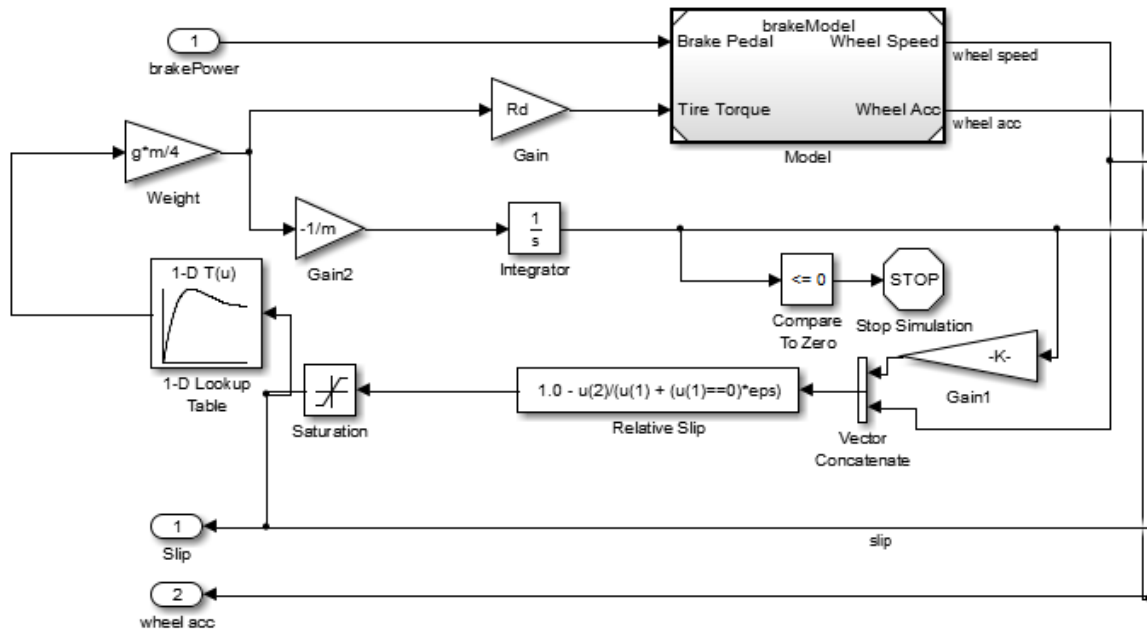
48	espDriftAngleContrDCoeff	0-255	ESP sortokulmasäätö, PD säätimen derivaatta D
49	espThresValAngular VelToSli- pAngleContrl	0-255	ESP sortokulmasäädön ja kulmanopeussäädön raja-arvo
50	dynamicWheelRollRadius	0-255	Pyörän dynaaminen vierintäsäde
51	wheelbase	65535/10 <sup>5</sup>	Akseliväli (m)
52	vehicleMass	65535/10 <sup>3</sup>	Ajoneuvon massa (kg)
53	distanceFrontAxleCoG	65535/10 <sup>5</sup>	Etäisyys etuakselin painopisteestä (11)
54	distanceRearAxleCoG	65535/10 <sup>5</sup>	Etäisyys taka-akselin painopisteestä (12)
55	frontAxleTurnStiffness	max 65536	Etuakselin kaartojäykkyys C1
56	rearAxleTurnStiffness	max 65536	Taka-akselin kaartojäykkyys C2
57			
58			
59			
60			
99	paramsSent	-	Kaikki parametrit lähetetty, "EOF"
110	car measurement vector	-	Auto lähettää tilatietoa GUI:lle
120	Throttle	-1000..1000	Throttle
121	Steering wheel direction	-1000..1000	Steering wheel direction
122	Brake	4 * 0..1000	Neljän renkaan jarrut
123	Horn	1/0	Töötti
124			
125	Stop automatic drive	-	
126	Conveyor drive: Keep distance to front	distance	
127			
128			

Mittaustietojen välitys autolta käyttöliittymälle (meas vector, id 110)

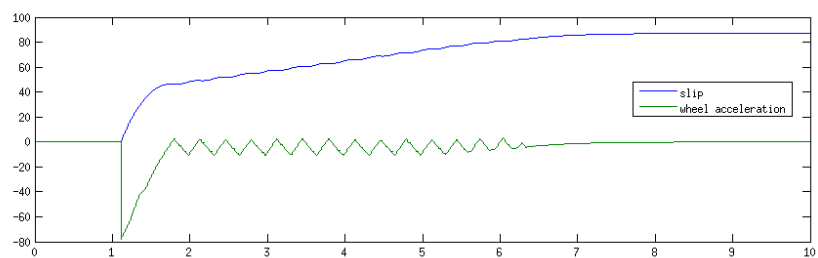
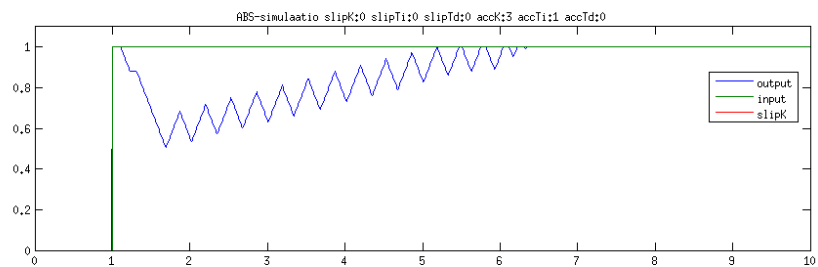
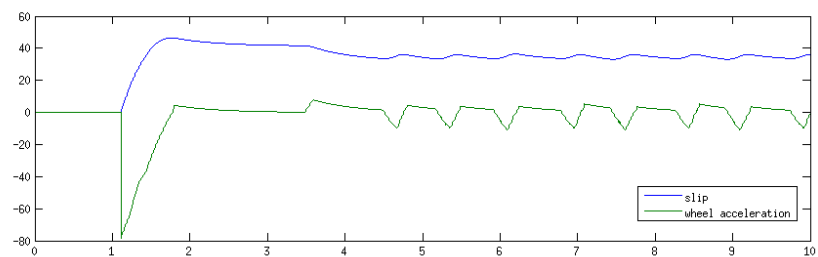
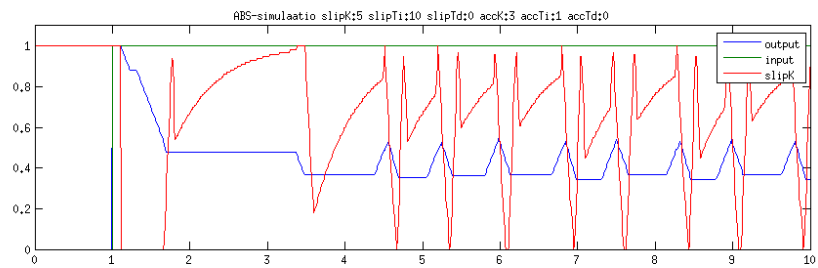
Indeksi	Arvo	Vakiokerroin jolla fysikaaliseksi yksiköksi
0	Wheelspeed 1	$m * 2 * \pi * 62.5 / 1000 * ((1/2048) / 0.00125) / 16 = 9.5874 * 10^3$
1	Wheelspeed 2	$m * 2 * \pi * 62.5 / 1000 * ((1/2048) / 0.00125) / 16 = 9.5874 * 10^3$
2	Wheelspeed 3	$m * 2 * \pi * 62.5 / 1000 * ((1/2048) / 0.00125) / 16 = 9.5874 * 10^3$
3	Wheelspeed 4	$m * 2 * \pi * 62.5 / 1000 * ((1/2048) / 0.00125) / 16 = 9.5874 * 10^3$
4	x-acceleration	$m * 32.0 / 1024.0 * 9.81$
5	y-acceleration	$m * 32.0 / 1024.0 * 9.81$

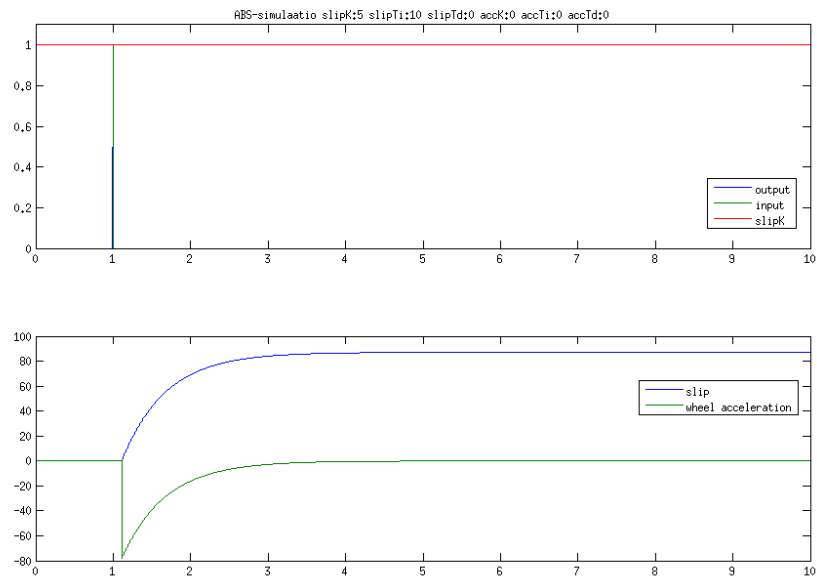
6	z-acceleration	$m * 32.0 / 1024.0 * 9.81$
7	x-gyro	$m * 1 / 14.38$
8	y-gyro	$m * 1 / 14.38$
9	z-gyro	$m * 1 / 14.38$
10	wheel direction	$[-?, ?]$
11	motor battery voltage	$m * (1 / 1023 * 8.4)$
12	controller battery voltage	$m * (1 / 1023 * 12.6)$
13	distance sensor, side 1 (ei vielä käytössä)	
14	distance sensor, side 2 (ei vielä käytössä)	
15	distance sensor, front (ei vielä käytössä)	

## E ABS-simulaatiomalli

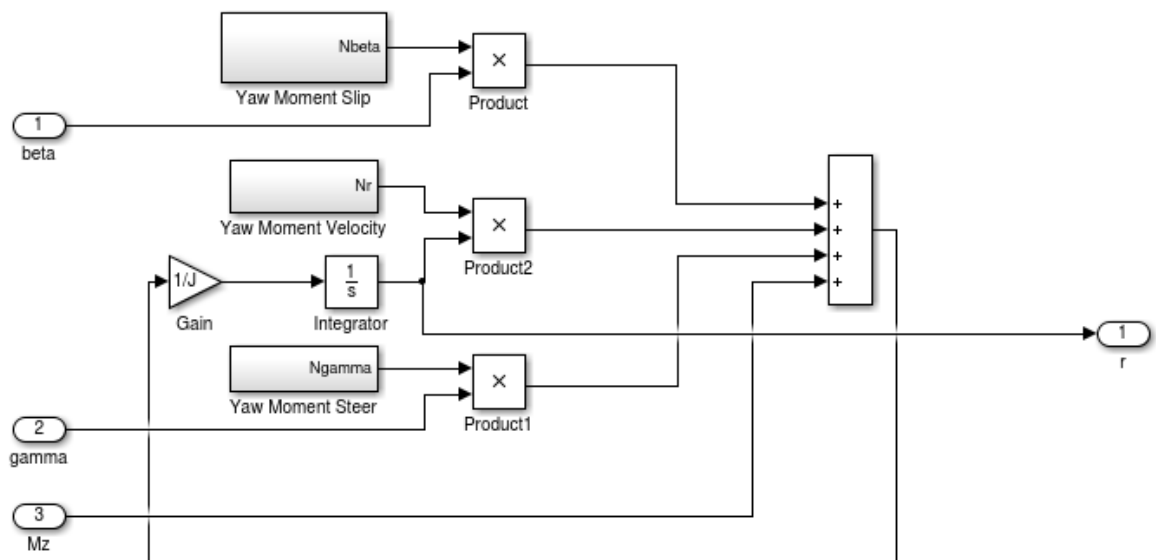


## F ABS-simulaatioita

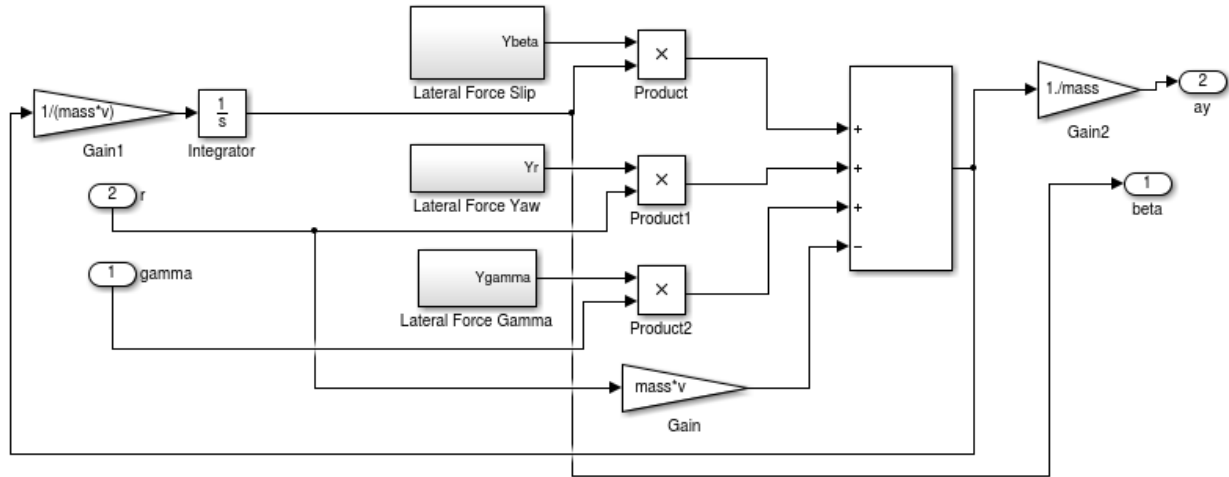




## G ESP-simulaatiomalli







## H ESP-simulaatioita

