

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Infotehnoloogia teaduskond
Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituut

Priit Tänav 153762IVEM

**REAALAJA SARDSÜSTEEMIL PÕHINEV
OBJEKTI DETEKTEERIMIS- JA
JÄLGIMISSÜSTEEM**

magistritöö

Juhendaja: Olev Märten
tehnikateaduste doktor

Tallinn 2018

Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Priit Tänav

07.05.2018

Annotatsioon

Käesoleva lõputöö eesmärk on luua reaalaaja sardsüsteem, mis oleks võimeline videopildi alusel detekteerima mistahes kujuga objekte ning neid järgnevates kaadrites jälgima. Töö alguses antakse ülevaade levinumatest detekteerimis- ja jälgimisalgoritmidest. Seejärel kirjeldatakse antud rakenduse jaoks välja pakutud objekti detekteerimisalgoritmi ning põhjendatakse valitud jälgimisalgoritmi. Algoritmi väljatöötamiseks kasutati MATLAB tarkvara ning antud probleemi teostatavuse uurimiseks koostati Python programmeerimiskeeles detekteerimis- ja jälgimisalgoritmi ühendav programm. Töö viimases osas valiti seadme prototüübi jaoks vajalik riistvara: alustades sobilikust termokaamerast ja video protsessorist ning arvestades, et antud süsteem on mõeldud kasutamiseks mehitamata õhusõidukil, siis loodi ka vajalik elektroonika riistvara õhusõiduki juhtimiseks.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 41 leheküljel, 5 peatükki, 33 joonist, 2 tabelit.

Abstract

Object Detection and Tracking Based on a Real Time Embedded System

The purpose of this master's thesis is to develop an embedded system that is capable of detecting objects and tracking those using a live video feed. Such a system can be used by unmanned aerial vehicles to follow other aerial or ground vehicles without having to establish a two-way communication between those devices. It could also be used in systems that are designed to combat unauthorised flights of unmanned aerial vehicles.

As the system is supposed to be universal by means of detecting objects of whatever shape and size, in addition to being able to detect and track objects under low lighting conditions during nighttime, a thermal imaging camera is used for the video feed.

In the beginning of the thesis, an overview of popular detection and tracking methods is given, then a proposed detection algorithm and the choice of a suitable tracking algorithm is presented. MATLAB was used to develop the detection algorithm and a Python script was developed for testing the detection and tracking algorithm's feasibility. The last part of work consists of choosing the appropriate components for the prototype and creating electronic circuit boards for controlling the unmanned aerial vehicle with a microcontroller according to information received from video analyzing digital signal processor, inertial measuring unit and an RC-receiver.

The thesis is in Estonian and contains 41 pages of text, 5 chapters, 33 figures, 2 tables.

Lühendite ja mõistete sõnastik

CLE	<i>Center Location Error</i> , keskpunkti asukoha viga
DMP	<i>Digital Motion Processor</i> , InvenSense inertsiaalandurite protsessor
DP	<i>Distance Precision</i> , mõõde jälgimisalgoritmide täpsuse evalveerimisel
DSP	<i>Digital Signal Processor</i> , signaaliprotsessor
FPS	<i>Frames per Second</i> , kaadrisagedus
GPIO	<i>General Purpose Input Output</i> , üldotstarbeline sisend-väljund
I ² C	<i>Inter-Integrated Circuit</i> , kahe signaalijuhtmega jadasiin
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> , integreeritud programmeerimiskeskond
KCF	<i>Kernelized Correlation Filter</i> , masinnägemise jälgimisalgoritm
KLT	Kanade–Lucas–Tomasi
LDO	<i>Low Dropout</i> , lineaarne pingeregulaator; võimeline hoidma soovitud väljundpinget ka juhul kui sisendpinge ei ole sellest märkimisväärselt suurem
LPDDR	<i>Low Power Double Data Rate memory</i> , madala voolutarbega topeltkiirusel mälu
LQFP	<i>Low-profile Quad Flat Package</i> , madala profiiliga ruudukujuline pindliite komponent, millel on jalad kõigil neljal küljel
OPE	<i>One-pass Evaluation</i> , masinnägemise jälgimisalgoritmi suutlikkuse hindamine ühekordsel video läbimängimisel
PID	<i>Proportional-Integral-Derivative</i> , proportsionaal-integraal-diferentsiaal tagasisideskeem
QFN	<i>Quad Flat No-lead</i> , ruudukujuline ilma jalgadeta pindliite komponent
RC	<i>Radio Controlled</i> , raadioteel juhitud
SCL	<i>Serial Clock Line</i> , I ² C siini taktiliin
SDA	<i>Serial Data Line</i> , I ² C siini andmeliin
SDRAM	<i>Synchronous Dynamic Random Access Memory</i> , sünkroonne dünaamiline muutmälu

SIFT	<i>Scale-Invariant Feature Transform</i> , masinnagemise punktide detekteerimise algoritm
SO	<i>Small Outline</i> , pindliite komponent, millel on jalad kahel küljel
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> , nelja signaalijuhtmega järjestiksiin
SRE	<i>Spatial Robustness Evaluation</i> , ruumilise robustsuse hindamine
TO	<i>Transistor Outline</i> , korpus transistorite ja teiste väikese arvu väljaviikudega komponentidel kasutamiseks
TRE	<i>Temporal Robustness Evaluation</i> , ajalise robustsuse hindamine
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i> , universaalne asünkroonne vastuvõtja/saatja

Sisukord

1 Sissejuhatus	12
2 Tehnikatase	14
2.1 Objekti detekteerimisalgoritmid	14
2.1.1 Punktide detekteerimine	14
2.1.2 Tausta eemaldamine kaadrist	15
2.1.3 Kujutise segmenteerimine	15
2.1.4 Juhendatud õpe	16
2.2 Objekti trajektoori jälgimisalgoritmid	16
2.2.1 Punktide kaudu jälgimine	17
2.2.2 Kerneli abil jälgimine	17
2.2.3 Silueti jälgimine.....	18
3 Süsteemi tarkvara	19
3.1 Objekti detekteerimiseks koostatud algoritm	19
3.2 Objekti jälgimiseks sobiliku algoritmi valik	23
4 Prototüübi riistvara	28
4.1 Masinnägemise moodul.....	29
4.1.1 Termokaamera.....	29
4.1.2 ADZS-BF707-BLIP2 arendusplaat	32
4.2 Autopiloodi moodul.....	33
4.2.1 Inertsiaalandur	33
4.2.2 Autopiloodi mikrokontroller	34
4.2.3 Kaugjuhtimise võimekus	35
4.2.4 Andmete logimine	36
4.2.5 +3,3 V ja +5 V muundur.....	36
4.3 Toitemoodul.....	37
4.3.1 DC-DC muundur	37
4.3.2 Voolu ja akupinge mõõtmine	39
5 Kokkuvõte	41

Kasutatud kirjandus	42
Lisa 1 – Autopiloodi skeem.....	45
Lisa 2 – Toitemooduli skeem	47
Lisa 3 – Autopiloodi komponentide loetelu	48
Lisa 4 – Toitemooduli komponentide loetelu.....	49

Jooniste loetelu

Joonis 1. Harrise (a), KLT (b) ja SIFT detektorid [1]	14
Joonis 2. Tausta eemaldamine kaadrist [1].....	15
Joonis 3. Kaadri (a) segmenteerimine kasutades <i>mean-shift</i> (b) ja <i>normalized cuts</i> (c) meetodit [1]	16
Joonis 4. Valik objekti jälgimist raskendavaid juhte: keerulised, osadest koosnevad ja mitte jäigad objektid (a), kiiresti liikuv objekt (b), valgustuse muutus (c), osaliselt varjatud objekt (d) [4].....	17
Joonis 5. CamShift jälgimisalgoritm [6]	18
Joonis 6. Objekti kontuuri evolutsioon [1]	18
Joonis 7. Algne kaader (a) [10] ja Gaussi filtriga töödeldud kaader (b)	20
Joonis 8. Kaadri keskosale suurema kaalu andmiseks kasutatav Gaussi jaotus.....	21
Joonis 9. Kaadri keskosale on jäetud suurem kaal, ümbritsevale regioonile sujuvalt vähenev.....	21
Joonis 10. Kolmemõõtmeline graafik Laplace'i operaatorist rakendatuna Gaussi funktsioonile ning selle ristlõige [12].....	22
Joonis 11. Kaadri vähendamine erinevatel skaaladel [13]	22
Joonis 12. Detekteerimisalgoritmi poolt välja pakutud objekti kandidaat	23
Joonis 13. OPE meetodil leitud jälgimisalgoritmide täpsuse graafik [15]	24
Joonis 14. TRE meetodil leitud jälgimisalgoritmide täpsuse graafik [15]	25
Joonis 15. SRE meetodil leitud jälgimisalgoritmide täpsuse graafik [15]	25
Joonis 16. OPE meetodil leitud jälgimisalgoritmide edukuse graafik [15].....	25
Joonis 17. TRE meetodil leitud jälgimisalgoritmide edukuse graafik [15].....	26
Joonis 18. SRE meetodil leitud jälgimisalgoritmide edukuse graafik [15]	26
Joonis 19. Objekti detekteerimis- ja jälgimissüsteemi riistvara plokk skeem.....	28
Joonis 20. Autopiloodi- ja toitemooduli makett koos juhttüüride servode, aku ja programmaatoriga.....	29
Joonis 21. Elektromagnetkiirguse läbipaistvus atmosfääris [16]	30
Joonis 22. Kiirgusvõimsuse sõltuvus lainepikkusest [18].....	31
Joonis 23. Termokaamera HSC120A koos klaviatuuri, TS353 video saatja ning akuga 32	

Joonis 24. ADZS-BF707-BLIP2 arendusplaat [21]	32
Joonis 25. Autopiloodi mooduli fotod	33
Joonis 26. Inertsiaalandur MPU-9250 ühenduse skeem.....	34
Joonis 27. Mikrokontroller MSP430F5329 ühenduse skeem.....	35
Joonis 28. RC-vastuvõtja V8FR-II [27]	36
Joonis 29. +3,3 V ja +5 V pingemuunduri skeem	37
Joonis 30. Toitemooduli fotod.....	37
Joonis 31. DC-DC muunduri XL6009 ühenduse skeem	38
Joonis 32. Voolutarbe mõõtmise skeem	39
Joonis 33. Aku pinge mõõtmise skeem	39

Tabelite loetelu

Tabel 1. Levinud jälgimisalgoritmide suutlikkuse võrdlus [15]	27
Tabel 2. Servo DS-795iSHV liikumiskiiruse ja pöördemomendi sõltuvus toitepingest [29]	38

1 Sissejuhatus

Käesoleva magistritöö eesmärk on luua sardsüsteem, mille abil oleks võimalik videopildi kaudu valitud objekti detekteerida ning seda reaajas jälgida, olles seejuures piisavalt madalate riistvaraliste nõuetega, et süsteemi oleks võimalik laialdaselt kasutada ka lühikese kasutuseaga seadmetes.

Antud süsteem on mõeldud kasutamiseks eelkõige mehitamata õhusõidukite osana. See võimaldaks mehitamata õhusõidukil järgneda autonoomselt nii teistele õhusõidukitele kui ka maal ja vees liikuvatele objektidele. Seda saaks rakendada nii riigikaitse eesmärkidel jälitustegevuse korraldamisel kui ka spordivõistlustel, näiteks jalgratta- või autoralli võistlustel osalejate soorituse edastamiseks.

Lisaks on suurenenud mehitamata õhusõidukite kättesaadavus tarbijale. See aga omakorda loob olukorra, kus kas pahatahtlikkusest või teadmatuses rikutakse teiste inimeste privaatsust või jättes Lennuametilt taotlemata mehitamata õhusõiduki lennutamiseks vastavat luba ja kooskõlastamata seadme lennutamist, põhjustatakse ohtu lennuliiklusele. Loodavat süsteemi saaks kasutada ka mehitamata õhusõidukite lendude katkestamiseks, kasutades seda vastava süsteemi alamosana. 2017. a on sellele probleemile alternatiivset lahendust otsinud ka K. Pärilin oma magistritöös „Mehitamata õhusõidukite juhtimiseks kasutatavate hajaspekter sidesüsteemide segamine“.

Loodava süsteemi oluline kriteerium on olla universaalne, s.t et detekteeritava ja jälgitava objekti suuruse ja kuju kohta ei saa kasutada eelnevaid piiranguid seadmeid kriteeriume. Samuti peab olema süsteem kasutatav ka öösel, kui objekti valgustatus on madal.

Õhusõidukil kasutamiseks peab antud süsteem olema võimeline seda ka juhtima ning olema samas ka operaatori poolt kaugteel kontrollitav.

Õhusõidukite lennuaeg sõltub nii veetava koormuse massist kui ka ruumalast, seega võimalusel on soovitatav eelistada kergemaid ning väiksemate mõõtmetega komponente. Samuti, arvestades et osades rakendustes võib antud seadme kasutuskordade arv piirduda

ühaga, on soovitatav seadme tootmishinna vähendamiseks kasutada madalama jõudlusega ning seega odavamaid elektroonikakomponente.

Käesoleva töö teises peatükis antakse ülevaade enamlevinud masinnägemise detekteerimis- ja jälgimisalgoritmidest, kolmandas peatükis kirjeldatakse välja pakutud detekteerimisalgoritmi ning sobiva jälgimisalgoritmi valiku protsessi. Neljas peatükk keskendub protoüübi komponentide valikule ja projekteerimisele.

2 Tehnikatase

2.1 Objekti detekteerimisalgoritmid

Objekti jälgimisalgoritmid vajavad objekti detekteerimismehhanismi kas iga kaadri analüüsimisel või vähemalt esimesel korral kui objekt ilmub kaadrisse. Üldjuhul kasutatakse objekti detekteerimiseks ühtainust kaadrit kuid mõned detektsioonimeetodid võrdlevad valepositiivsete tulemuste vähendamiseks ka järjestikuseid kaadreid. Erinevused järjestikes kaadrites kerkivad sel juhul muutustena esile [1].

2.1.1 Punktide detekteerimine

Punktide detektoreid kasutatakse huvipakkuvate punktide leidmiseks väljapaistva tekstuuriga kujutiste vastavates piirkondades. Soovituslikult ei sõltu kõnealused punktid muutustest valgustuses ega kaamera vaatenurgast. Levinumad punktide detekteerimisalgoritmid on Harrise, KLT ja SIFT detektor (vt Joonis 1) [1].



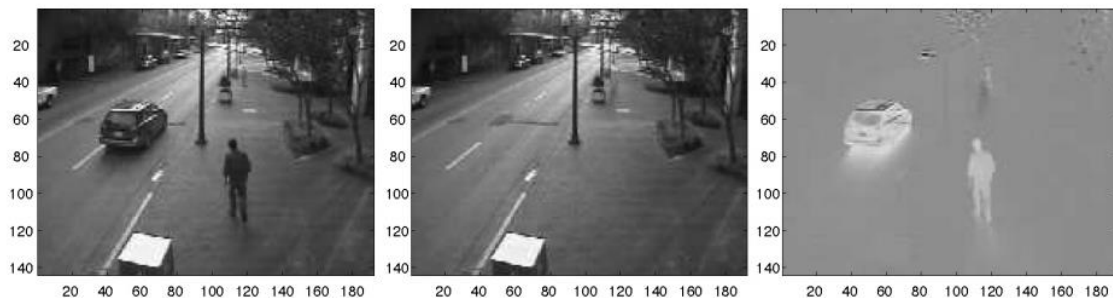
Joonis 1. Harrise (a), KLT (b) ja SIFT detektorid [1]

Harrise ja KLT algoritmid leiavad huvipakkuvaid punkte sarnaselt, nimelt nihutatakse kaadrit moodustavaid väikseid regioone algse kaadri suhtes ning esile tuuakse vaid punktid, kus selle operatsiooni käigus muutus kaader oluliselt nii vertikaal- kui horontaalsuunal. See on oluline eristamiseks nurki joontest. KLT detektor kasutab lisakriteeriumit, mis määrab minimaalse detekteeritud punktide omavahelise kauguse. SIFT eristub selle poolest, et kasutab huvipakkuvate punktide määramisel funktsiooni, kus Laplace'i operaator on rakendatud Gaussi funktsioonile ning samuti kasutatakse

erinevaid skaalasi kaadrist (vt Joonis 11), mille tõttu leitakse ka märgatavalt rohkem punkte [1].

2.1.2 Tausta eemaldamine kaadrist

Liikuvat objekti on võimalik detekteerida luues esmalt stseenist taustamudel ning seejärel leides erinevusi järgneva kaadri ja mudeli vahel. Iga märkimisväärne kujutise muutus taustamudelitest tähistab liikuvat objekti [1]. Joonisel 2 on kujutatud kaader koos eesplaani asuvate objektidega, taustamudel ning eristatud kujutis.



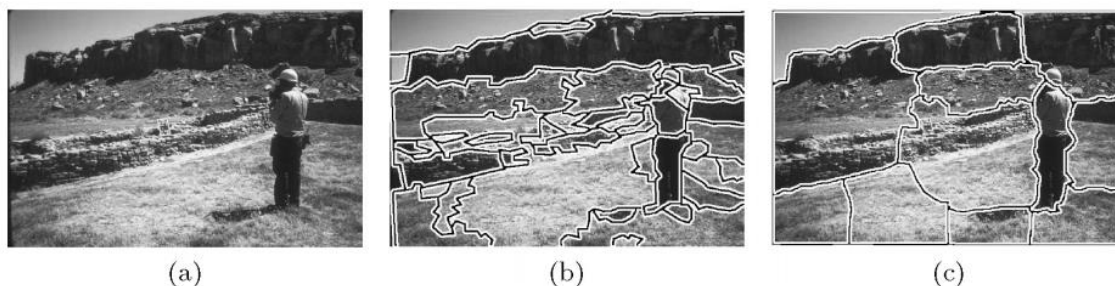
Joonis 2. Tausta eemaldamine kaadrist [1]

Praktilises kasutuses võimaldab tausta eemaldamine paljudel juhtudel detekteerida liikuvat objekti vaid osaliselt või jaotuna mitmeks regiooniks, sest objekt ei pruugi taustast tingimata täies ulatuses erineda. Tausta eemaldavate algoritmide suurim piirang on siiski statsionaarse vaatepunkti vajadus [2].

2.1.3 Kujutise segmenteerimine

Segmenteerimisalgoritmide eesmärk on jagada kujutis tajutavalt ühetaolisteks piirkondadeks. Iga segmenteerimisalgoritm tegeleb kahe probleemiga: heaks jaotamiseks vajalike kriteeriumitega ning tõhusaks segmenteerimiseks vajaliku meetodiga [1].

Mean-shift meetodi korral segmenteeritakse kujutis vastavalt pikslite intensiivsustele, kuid valitud intensiivsuste vahemikud on nihutatud vastavalt kaadris olevate intensiivsuste hulgale (vt Joonis 3). *Normalized cuts* meetod vajab vähem manuaalselt valitud parameetreid, kuid seevastu on ressursimahukam [1].



Joonis 3. Kaadri (a) segmenteerimine kasutades *mean-shift* (b) ja *normalized cuts* (c) meetodit [1]

2.1.4 Juhendatud õpe

Objektide detekteerimine on võimalik ka kasutades juhendatud õppe mehhanisme, mille abil automaatselt õpitakse erinevad vaated huvipakkuvast objektist. Vastavalt õpitavatele näidetele koostab juhendatud õppe meetod funktsiooni, mis seab sisendid vastavusse soovitud väljunditega. Regressiooni korral on väljund pidev väärtus, kuid klassifikatsiooni korral klassi märgend. Juhendatud õppe meetodi vajavad enamasti igast klassist suurt näidiste kogu ning lisaks peab see kogu olema manuaalselt kategoriseeritud. Levinud juhendatud õppe algoritmid on näiteks närvivõrgustiku mudel ja tugivektor-masinad [1].

2.2 Objekti trajektoori jälgimisalgoritmid

Käesoleva töö kontekstis võib objekti jälgimist defineerida kui sihtmärgi asukoha kindlaks tegemist video kaadrite jadas alustades esimest kaadrist, kus objekt piirid on defineeritud ristkülikuga [3]. Objektide jälgimise muudavad keeruliseks kolmemõõtmelise maailma kahemõõtmelisena kujutamisel kaotatud informatsioon, objekti liikumise keeruline trajektoor, mitte jäigad või keerulised ning osadest koosnevad objektid, objekti osaline või täielik varjatus, videopildi müra, valgustuse muutused, kiiresti liikuv kaamera või objekt ning reaalaja videotöötamise nõuded (vt Joonis 4) [1].



(a)



(b)



(c)



(d)

Joonis 4. Valik objekti jälgimist raskendavaid juhte: keerulised, osadest koosnevad ja mitte jäigad objektid (a), kiiresti liikuv objekt (b), valgustuse muutus (c), osaliselt varjatud objekt (d) [4]

Põhilised jälgimisalgoritmid keskenduvad kas objekti jälgimisele iseloomulike punktide abil, kerneli abil või objekti siluetti kasutades [1].

2.2.1 Punktide kaudu jälgimine

Jälgimist võib sõnastada ka kui objekti punktide vastavusse seadmist video järjestikustel kaadritel. Sellised meetodid vajavad aga lisaks mehhanismi, mis igas kaadris punkte detekteeriks. Punktide vastavusse seadmise muudavad keeruliseks eelkõige objekti varjatus, väärtuvastused, objekti kaadrist sisenemised ja väljumised. Objekti jälgimiseks kehtestatakse punktide vastavusse seadmiseks mitmed piirangud ja eeldused: objekti asukoht ei erine märgatavalt järjestikustel kaadritel, objektile maksimaalsele kiirusele on määratud piir, kiiruse muutused on sujuvad, lähestikku asuvad punktid omavad sarnast liikumist ning punktide omavaheline kaugus jääb muutumatuks [1].

2.2.2 Kerneli abil jälgimine

Pilditöötluses mõistetakse kerneli all kui väikest maatriksit, mida kasutatakse konvolutsiooni leidmiseks [5].

Samuti võib kerneli abil kirjeldada objekti kuju ja väljanägemist. Näiteks võib kernel olla ristküliku kujuline šabloon või elliptiline kuju (vt Joonis 5) koos vastava histogrammiga. Objektide jälgimisel leitakse kerneli asukoha muutus järjestikes kaadrites ning tihti kasutatakse lisaks liikumise hindamiseks kas Kalmani või muud sarnast filtrit [1].



Joonis 5. CamShift jälgimisalgoritm [6]

2.2.3 Silueti jälgimine

Jälgitav objekt võib koosneda keerukatest osadest, näiteks kätest, peast ja õlgadest, mida ei ole võimalik kirjeldada lihtsate geomeetriliste kujunditega. Silueti-baasil loodud meetodid loovad nendele objektidele täpse kujundi kirjelduse. Silueti jälgivate algoritmide eesmärk on varasemate kaadrite abil koostatud objekti mudeli abil leida igas kaadris objekti regioon. Mudelit võidakse väljendada kui värvi histogrammi, objekti servi või kontuuri. Silueti abil objekte jälgivaid algoritme jagatakse kaheks: kujundit sobitavad meetodid üritavad kaadris leida objekti silueti, kuid kontuuri jälgivad meetodid (vt Joonis 6) on võimelised muutma algset kontuuri, et leida kaadris muutunud kujuga objekti asukoht [1].



Joonis 6. Objekti kontuuri evolutsioon [1]

3 Süsteemi tarkvara

Masinnägemise algoritmi teostatavuse uurimiseks loodi Python programmeerimiskeeles detekteerimis- ja jälgimisalgoritme ühendav programm. Detekteerimisalgoritmi loomisel on kasutatud OpenCV [7] teeki ning valitud jälgimisalgoritmi KCF implementeerimisel MIT litsentsiga avaldatud koodi [8]. Joonisel 12 on näidatud kuvatõmmis süsteemist detekteerimisrežiimis, kus sinise ringiga on märgitud algoritmi poole välja pakutud objekti kandidaat. Detekteerimisalgoritmi välja töötamiseks kasutati MATLAB tarkvara.

3.1 Objekti detekteerimiseks koostatud algoritm

Detekteerimisalgoritmi eesmärk on leida jälgitava objekti keskpunkt ning suurus kaadris. Arvestades, et üheks lähtetingimuseks oli nõue, et objekte peab olema võimalik detekteerida ja jälgida ka öösel, siis selleks kasutatakse termokaamerat. Erinevalt nähtava valguse kaameratest, ei koosne termokaamera kaadri piksel punase, roheline ja sinise värvi intensiivsustest vaid ainult piksli intensiivsusest, ehk kaader ainult halltoonides pildist. Eelduseks võetakse, et objekt erineb taustast kõrgema temperatuuri tõttu.

Samuti oli lähtetingimuseks universaalsus, mis tähendab et puudub info detekteeritava objekti väliskuju kohta, mis välistab ka eelnevat õpetamist vajavad algoritmid. Detekteerimisalgoritmi ülesanne on leida tingimustele enim vastav objekt ning selle tuvastamise kohustus on seadme operaatoril. Arvesse võttes, et operaatoril on võimalik suunata kaamerat detekteeritava objekti suunas, siis seetõttu on algoritmil võimalik eelistada kaadri keskosas olevaid objekte äärtes olevatele.

Detekteerimisalgoritm koosneb neljast osast: müra vähendamiseks kaadris Gaussi madalpääsfiltrist, kaadri keskosale suurema kaalu andmisest, kõrgeima intensiivsusega punkti leidmisest kaadris ning seda punkti ümbritseva objekti suuruse määramisest.

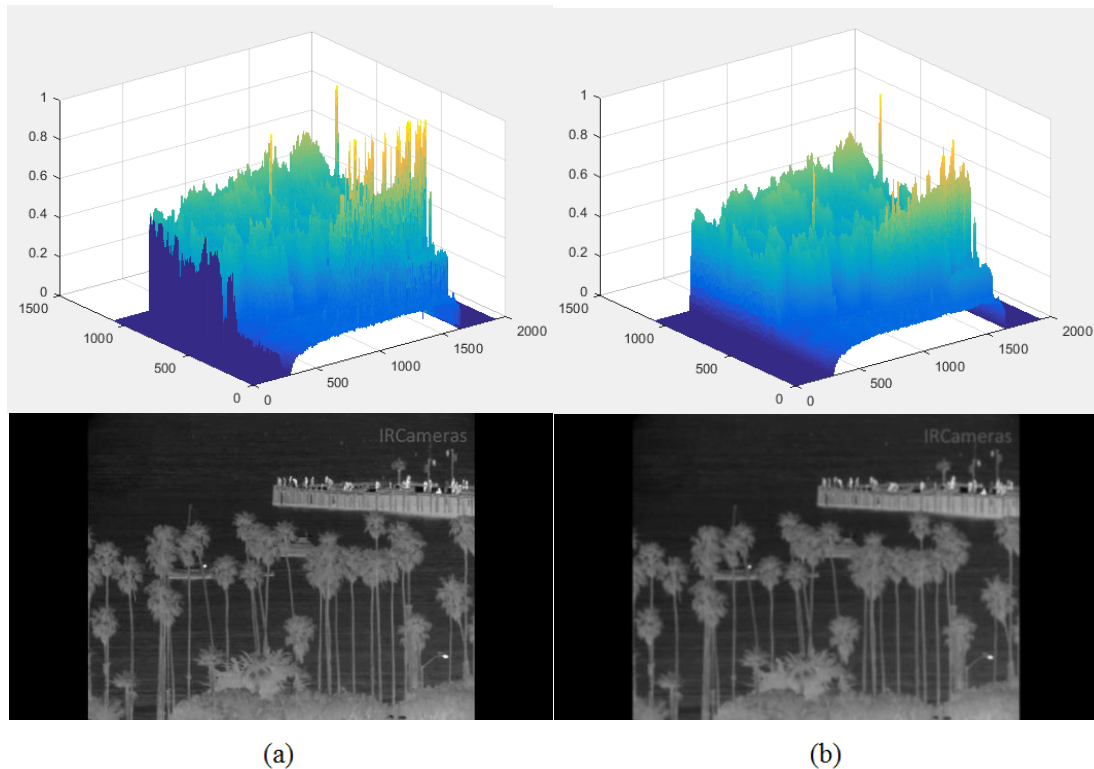
Ühte kaadrit kujutatakse maatriksina, kus iga elemendi väärtus määrab intensiivsuse antud punktis. Selleks, et vältida olukorda, kus mürast tingitud üksikud kõrge intensiivsusega punktid võiksi algoritmi hüplikuks muuta, töödeldakse kaadrit esmalt

Gaussi filtriga. Antud filter kasutab kaadri ähmastamiseks kahemõõtmelise Gaussi jaotuse funktsiooni:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}},$$

kus x – kaugus alguspunktist horisontaalteljes,
 y – kaugus alguspunktist vertikaalteljes,
 σ – standardhälve [9].

Filtri rakendamiseks leitakse algse kaadri ja Gaussi jaotuse funktsiooni abil leitud maatriksi konvolutsioon (vt Joonis 7). Standardhälbe väärtuseks on kasutatud arvu kolm.



Joonis 7. Algne kaader (a) [10] ja Gaussi filtriga töödeldud kaader (b)

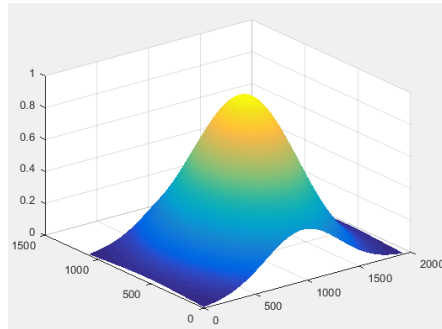
Järgmise sammuna antakse kaadri keskosale suurem kaal. Ka siin on võimalik ära kasutada kahemõõtmelist, kellukese kujulist Gaussi funktsiooni kujul:

$$f(x, y) = Ae^{-\left(\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right)},$$

kus A – amplituud,
 x_0 – keskpunkt horisontaalteljes,

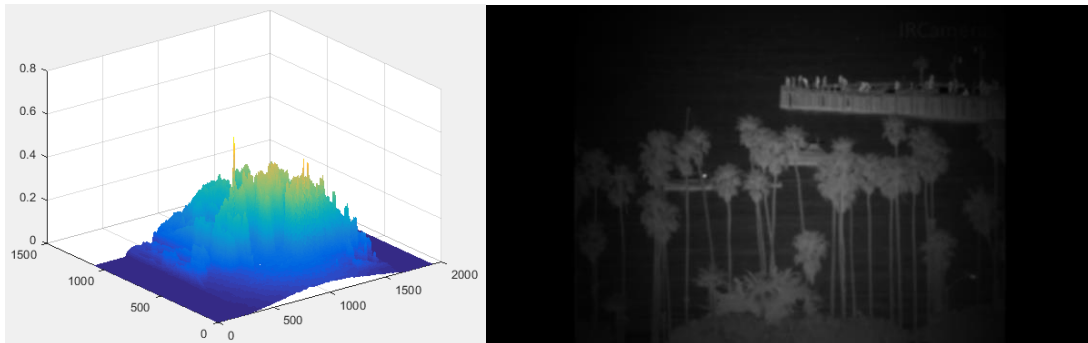
y_0 – keskpunkt vertikaalteljes,
 σ_x – standardhälve horisontaalteljes,
 σ_y – standardhälve vertikaalteljes [9].

Võttes amplituudiks arvu üks ning standardhälbe väärtuseks kaadri pikslite arv horisontaalteljes jagatud kolmega saadakse vastav maatriks (vt Joonis 8). Muutujate x ja y vahemik on vastavalt horisontaal- ja vertikaalteljes olev pikslite hulk.



Joonis 8. Kaadri keskosale suurema kaalu andmiseks kasutatav Gaussi jaotus

Korrutades kaadri pikslite väärtused läbi vastavate Gaussi funktsiooni järgi leitud maatriksi väärtustega saadakse joonisel 9 olev kujutis.



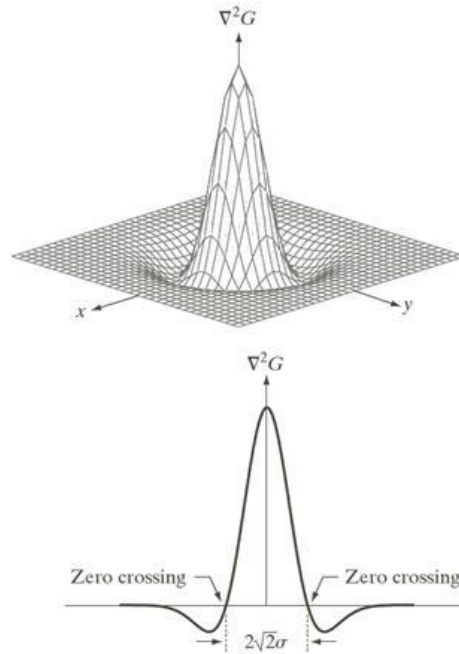
Joonis 9. Kaadri keskosale on jäetud suurem kaal, ümbritsevale regioonile sujuvalt vähenev

Kolmanda sammuna leitakse kaadri kõrgeima intensiivsusega piksli asukoht. Viimase sammuna leitakse seda punkti ümbritseva objekti suurus. Selleks kasutatakse Laplace'i operaatorit rakendatuna Gaussi funktsioonile (Joonis 10) sarnaselt SIFT detektorile.

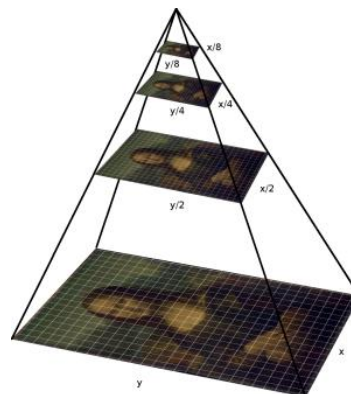
Antud funktsiooni kaudu leitud diskreetse kerneli $\begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix}$ [11] ja kaadri

konvolutsioon arvutatakse mitmel erineval skaalal (vt Joonis 11). See skaala, kus konvolutsiooni ühe punkti väärtus on suurim, määrab ka objekti suuruse. Objekti suuruse hüpliku muutumise vähendamiseks muudetakse seda ainult juhul, kui neljal järjestikusel

kaadril on leitud ühtiv objekti suurus. Arvutusvõimsuse kokku hoidmiseks puudub vajadus leida konvolutsioon tervest kaadrist, vaid piisab intensiivseima punkti ümbritsevast kerneli suurusest alast. Joonisel 12 on kujutatud operaatorile kuvatav videopilt ilma vahepealsete pilditöötlustetappideta, kuid koos sinise ringiga, mis tähistab välja pakutud objekti kandidaati.



Joonis 10. Kolmemõõtmeline graafik Laplace'i operaatorist rakendatuna Gaussi funktsioonile ning selle ristlõige [12]



Joonis 11. Kaadri vähendamine erinevatel skaaladel [13]



Joonis 12. Detekteerimisalgoritmi poolt välja pakutud objekti kandidaat

3.2 Objekti jälgimiseks sobiliku algoritmi valik

Masinnägemise jälgimisalgoritmide suutlikkuse hindamisel kasutatakse mitmeid moodsikuid ning tihti ka ühtset kogumit videotest, kus on esindatud erinevad keerukad olukorrad, näiteks valgustuse muutused, objekti varjatus, kaamera või objekti kiire liikumine, objekti pöördlemine kaameraga samas tasandis või sellest väljas jne [14].

Täpsuse graafik näitab protsentuaalselt kaadrite hulka, mille seas objekti hinnatud asukoht ühtib teatud läve piires asukohaga, mis eelnevalt on defineeritud korrektsena. Täpsuse hindamine sellisel meetodil on eelistatud meetodile, kus leitakse igas kaadris mõõdetud jälgitava objekti keskpunkti ja manuaalselt määratud objekti keskpunkti omavahelise kauguse keskvääratus (*center location error* - CLE), sest sel juhul, kui jälgimisalgoritm peaks jälgitava objekti kaotama, hinnatakse jälgimisalgoritmi suutlikkust ebamõistlikult madalaks [14].

Edukuse graafikul kajastatakse, mis määral ühtivad jälgimisalgoritmi pool hinnatud objekti ümbritseva ristküliku ja tõesena määratud ristküliku alad. Ristkülikute üle kattumist S leitakse kui hulkade r_t ja r_a ühisosa jagatud nende ühendiga:

$$S = \frac{|r_t \cap r_a|}{|r_t \cup r_a|}$$

kus r_t – jälgimisalgoritmi hinnatud objekti piirav ristkülik,

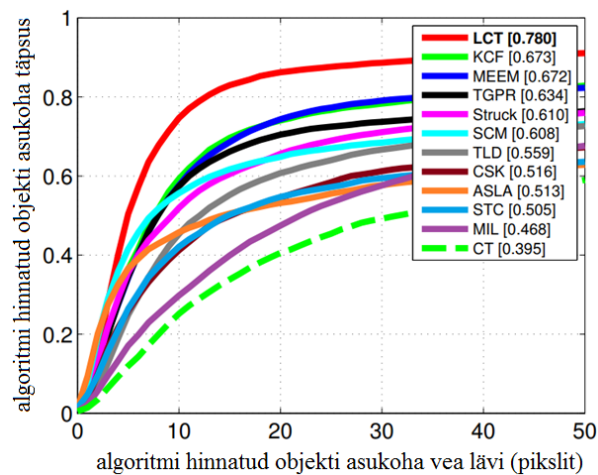
r_a – tõesena määratud objekti piirav ristkülik [14].

Suutlikkuse hindamisel määratakse kattuvusele lävi, näiteks 0,5 ning kõik kaadrid, kus jälgimisalgoritm suudab seda läve ületada, lahterdatakse edukateks. Protsentuaalselt edukate kaadrite hulk kogu kaadrite hulka saab kasutada kokkuvõttena antud meetodi

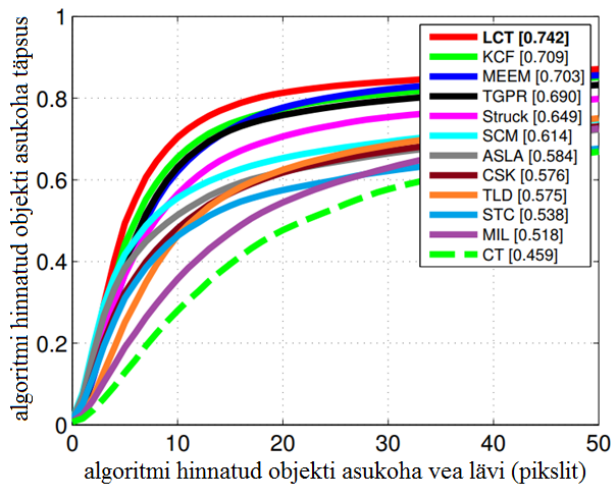
kasutamisel jälgimisalgoritmi suutlikkuse hindamisel. Eelistatum oleks fikseeritud läve asemel luua graafik, kus läve varieeritakse vahemikus 0...1. Soovides kokkuvõtlikult andmeid esitada, on võimalik leida graafikult joone alust pindala, mis iseloomustab jälgimisalgoritmi paremini, kui tulemuse leidmine fikseeritud läve korral [14].

Jälgimisalgoritmi robustsuse hindamiseks kasutatakse kolme erinevat meetodit. Esimese, *one-pass evaluation* (OPE), korral määratakse video esimeses kaadris tõesena määratud objekti piirav riskülik ning seejärel hinnatakse suutlikkust vastavalt täpsuse ja edukuse graafiku alusel. Küll aga peaaegu alati, kui detekteerimisel määratakse erinev objekti piirava risküliku asukoht ja suurus, on ka jälgimisalgoritmi sooritus erinev. Reaalseid detekteerimisalgoritmide ebatäpsuste kaasamiseks kasutatakse *temporal robustness evaluation* (TRE) ja *spatial robustness evaluation* (SRE) meetodeid. TRE, ehk ajalise robustsuse hindamise meetodi korral initsialiseeritakse jälgimisalgoritm esimesest erinevatel kaadritel ning SRE, ehk ruumilise robustsuse hindamise korral alustatakse küll esimesest kaadrist, kuid varieeritakse objekti piirava risküliku suurust ning asukohta [14].

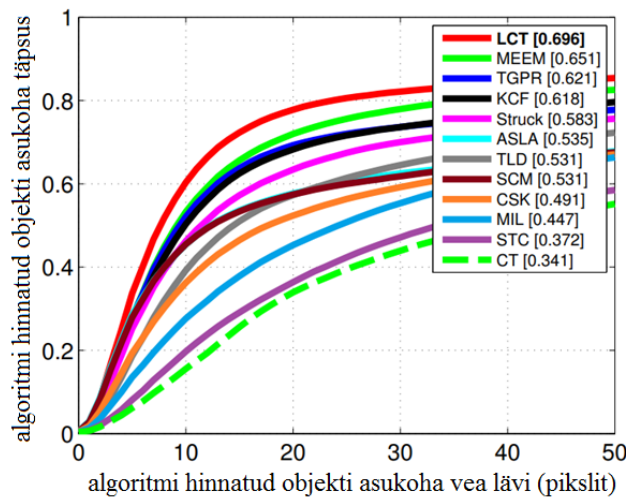
Joonistel 13-15 on kujutatud OPE, TRE ja SRE meetodil levinud jälgimisalgoritmide täpsuse graafikud ning joonistel 16-18 edukuse graafikud.



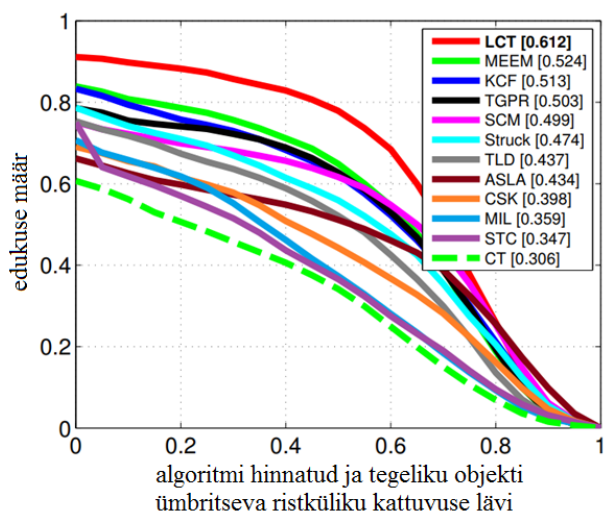
Joonis 13. OPE meetodil leitud jälgimisalgoritmide täpsuse graafik [15]



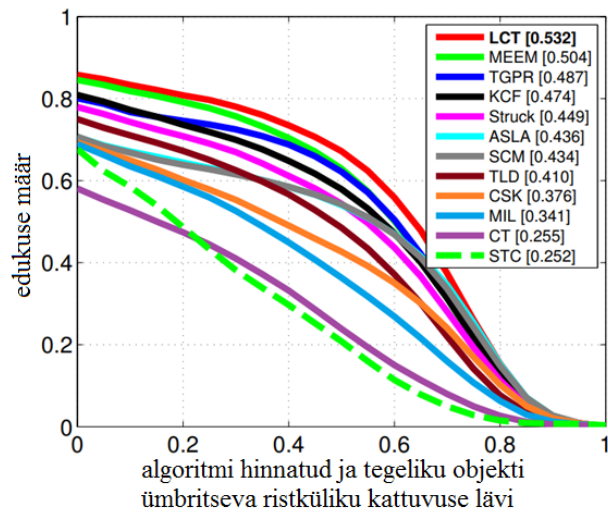
Joonis 14. TRE meetodil leitud jälgimisalgoritmide täpsuse graafik [15]



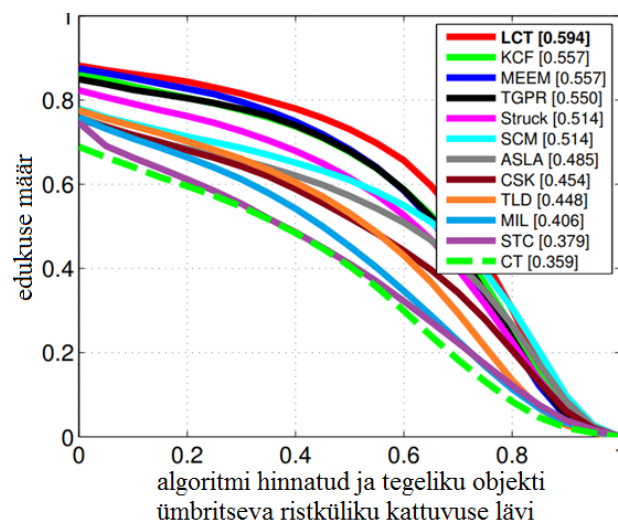
Joonis 15. SRE meetodil leitud jälgimisalgoritmide täpsuse graafik [15]



Joonis 16. OPE meetodil leitud jälgimisalgoritmide edukuse graafik [15]



Joonis 17. TRE meetodil leitud jälgimisalgoritmide edukuse graafik [15]



Joonis 18. SRE meetodil leitud jälgimisalgoritmide edukuse graafik [15]

Tabelis 1 on välja toodud levinud jälgimisalgoritmide kvantitatiivsed erinevused. Täpsuse hindamisel (*distance precision* - DP) on läveks valitud 20 pikslit ning objekti asukohta määrava ristküliku ülekattuvuse edukuse määramisel (*overlap success* - OS) läveks 0,5 [15].

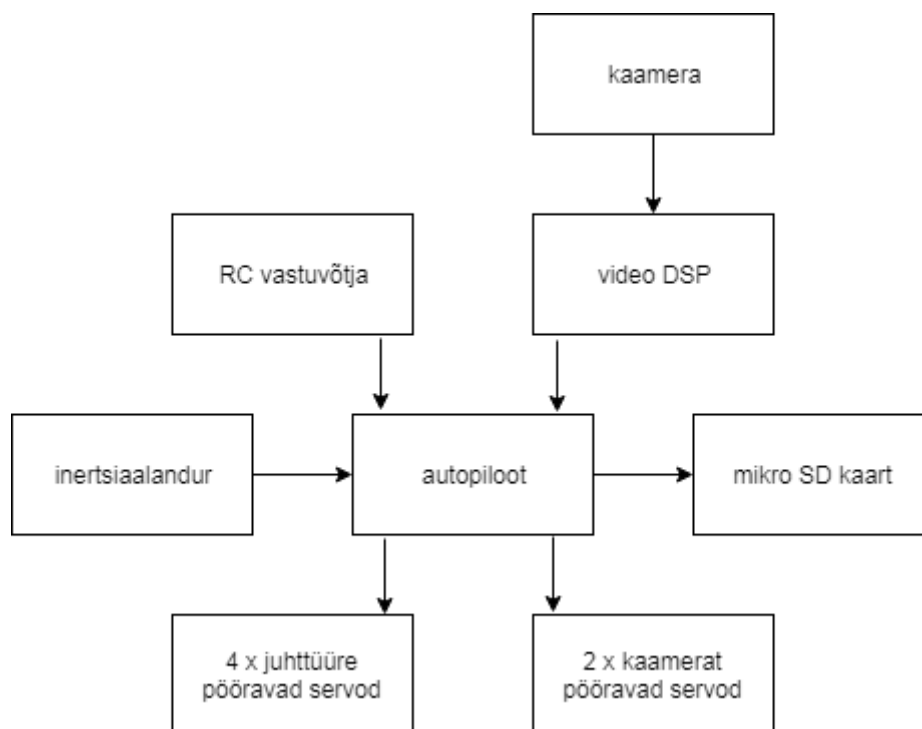
Tabel 1. Levinud jälgimisalgoritmide suutlikkuse võrdlus [15]

	LCT	CSK	STC	KCF	MIL	Struck
DP (%)	85,4	54,5	54,7	74,1	47,5	65,6
OS (%)	76,9	44,3	36,5	62,2	37,3	55,9
CLE (piksel)	25,8	88,8	80,5	35,5	62,3	50,6
FPS	27,4	269	232	39,1	28,1	10,0
	CT	ASLA	TLD	SCM	MEEM	TGPR
DP (%)	40,6	53,2	60,8	64,9	74,4	70,5
OS (%)	34,1	51,1	52,1	61,6	64,9	62,8
CLE (piksel)	78,9	73,1	48,1	54,1	41,6	51,3
FPS	38,8	7,5	21,7	0,4	19,4	0,7

Tabelis eristuvad suure kaadrisageduse (FPS) poolest küll kaks algoritmi: CSK ja STC, kuid mõlemad jäävad täpsuse poolest märgatavalt alla eelkõige LCT, KCF ja MEEM algoritmidele. Suurima täpsuse ja objekti ümbritseva risküliku ülekatte saavutas LCT algoritm, kuid arvestades, et KCF on umbes 40% kiirem, siis hinnati sobilikumaks viimane algoritm.

4 Prototüübi riistvara

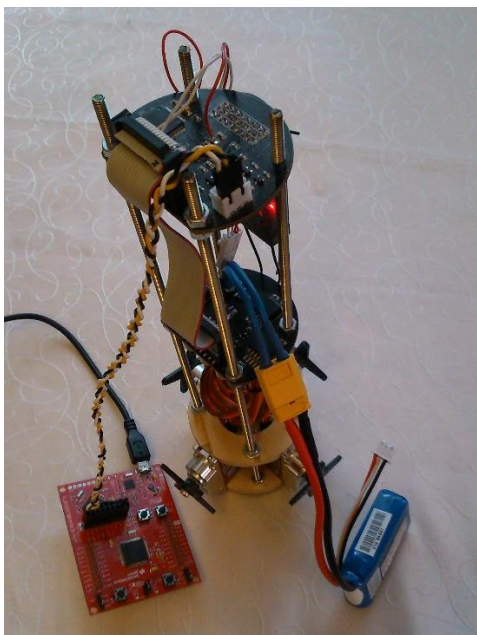
Käesoleva lõputöö raames projekteeritud objekti detekteerimis- ja jälgimissüsteem on mõeldud kasutamiseks eelkõige mehitamata õhusõidukitel ning sellest tulenevalt on valitud ka prototüübile vajalik riistvara. Süsteemi lihtsustatud plokkskeemil (vt Joonis 19) on toodud põhilised autopiloodi sisendid: RC-vastuvõtja, inertsiaalandur, video protsessori poolt infrapunakaameralt saadud kaadrist tuvastatud objekti nurk kaamera keskpunkti ja objekti vahel ning väljundid: neli servot õhusõiduki juhtimiseks, kaks servot kaamera kardaanriputi kallutamiseks ning mälukaardi pesa lennuparameetrite salvestamiseks ja nende hilisemaks analüüsiks.



Joonis 19. Objekti detekteerimis- ja jälgimissüsteemi riistvara plokkskeem

Praktikas on kogu süsteem jagatud kolmeks mooduliks: toitemoodul, autopiloodi moodul ning masinnägemise moodul (vt Joonis 20). Süsteemi jaotamine väiksemateks osadeks lihtsustab arenduse käigus nii seadme testimist kui ka võimaldab riistvara paranduste

sisse viimisel kasutada edasi neid süsteemi osasid, mille muutmisel puudub vajadus, selle asemel et iga uue revisjoni korral kõigi osade jaoks uus trükkplaat projekteerida.



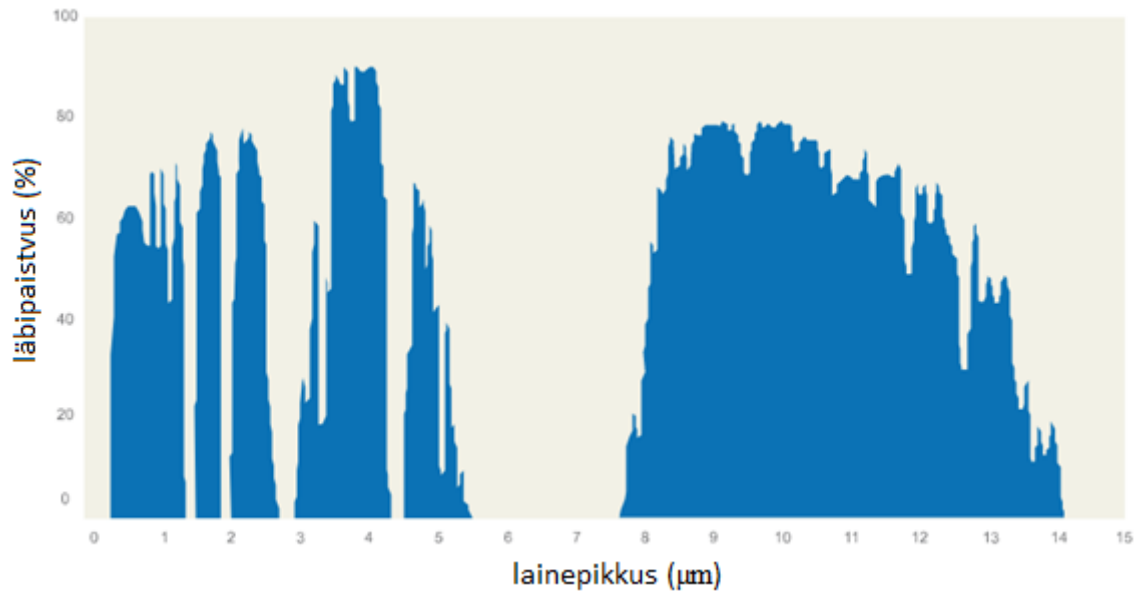
Joonis 20. Autopiloodi- ja toitemooduli makett koos juhttüüride servode, aku ja programmaatoriga

4.1 Masinnägemise moodul

Masinnägemise mooduli ülesanne on kaamera videopildi kaudu detekteeritud ja jälgitava objekti „asukoht“ edastada autopiloodi moodulile, mis selle info põhjal saab juhtida nii kaamerat pööravaid servosid kui ka õhusõiduki juhtpindu pööravaid servosid. Objekti asukoha mõiste on siinkohal tinglik, sest tegelikult mõeldakse selle all horisontaal- ja vertikaalteljes nurki kaamera keskpunkti läbiva pikitelje ja jälgitava objekti keskpunkti vahel.

4.1.1 Termokaamera

Objektide jälgimiseks madala valgustuse tingimustes on võimalik kasutada termo- ehk infrapunakaamerat. Kui nähtavaks valguseks loetakse elektromagnetkiirgust lainepikkuse vahemikus 380-780 nm, siis infrapuna kiirgusvahemik on sellest pikema lainelise, ehk kuni 1000 μm . Praktilistes rakendustes on infrapuna kiirgusvahemik jagatud lühikiirguse (0,9-1,7 μm), kesk- (3-5 μm) ja pikalaineliseks (8-14 μm) infrapuna kiirguseks. Antud vahemike vahele jäävad tühimikud, milles atmosfääri läbipaistvustegur on madal ning seetõttu on ka kiirguse detekteerimine keerulisem (vt Joonis 21) [16].



Joonis 21. Elektromagnetkiirguse läbipaistvus atmosfääris [16]

Lühilaine infrapunakaamerate kasutamiseks peab vaadeldav objekt siiski olema valgustatud öisel ajal kas siis näiteks kuult peegelduva või tähtedelt kiiratud elektromagnetkiirguse poolt. Kesk- ja pikalaine infrapunakaameratega on seevastu võimalik vaadelda objekti kiiratud soojuskiirgust, mitte ainult objektilt peegeldunud kiirgust [16].

Vastavalt Plancki kiirgusseadusele objekti temperatuuri kasvades suureneb objekti poolt kiiratud elektromagnetkiirguse hulk kuid väheneb kiirguse haripunkti lainepikkus [16]:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1},$$

kus B – kiirguse energiavoo tugevus,

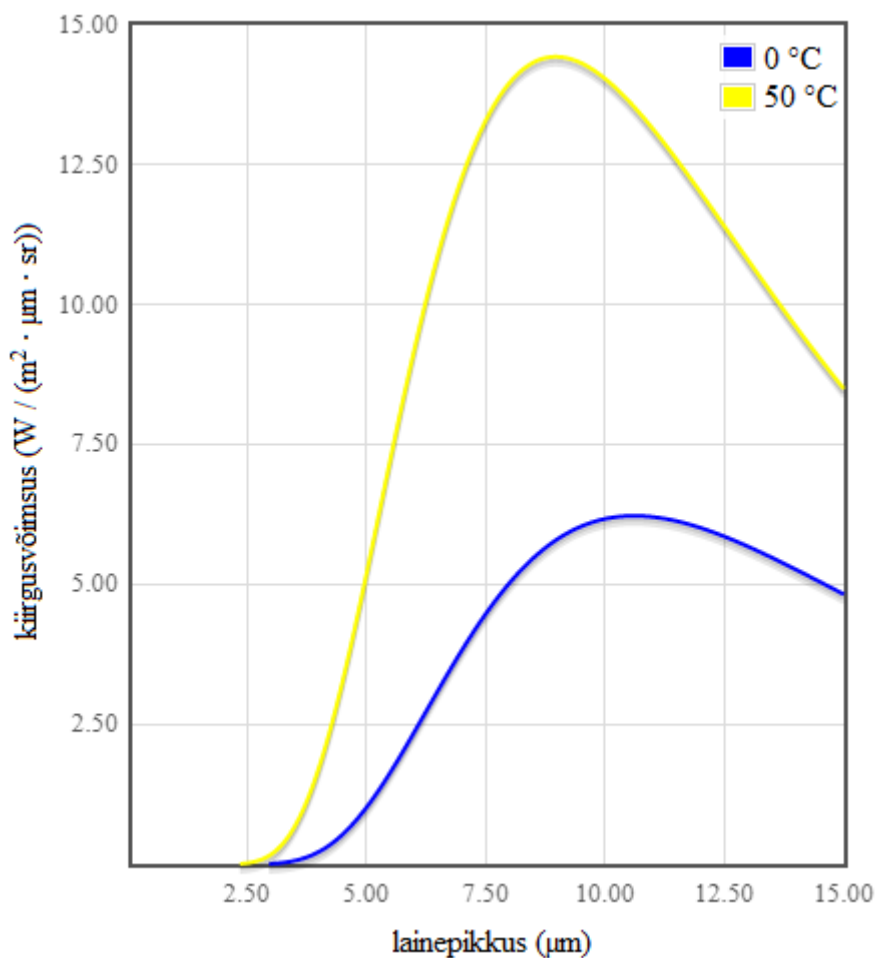
h – Plancki konstant,

c – valguse kiirgus vaakumis,

k_B – Boltzmanni konstant,

λ – lainepikkus,

T – keha absoluutne temperatuur [17].

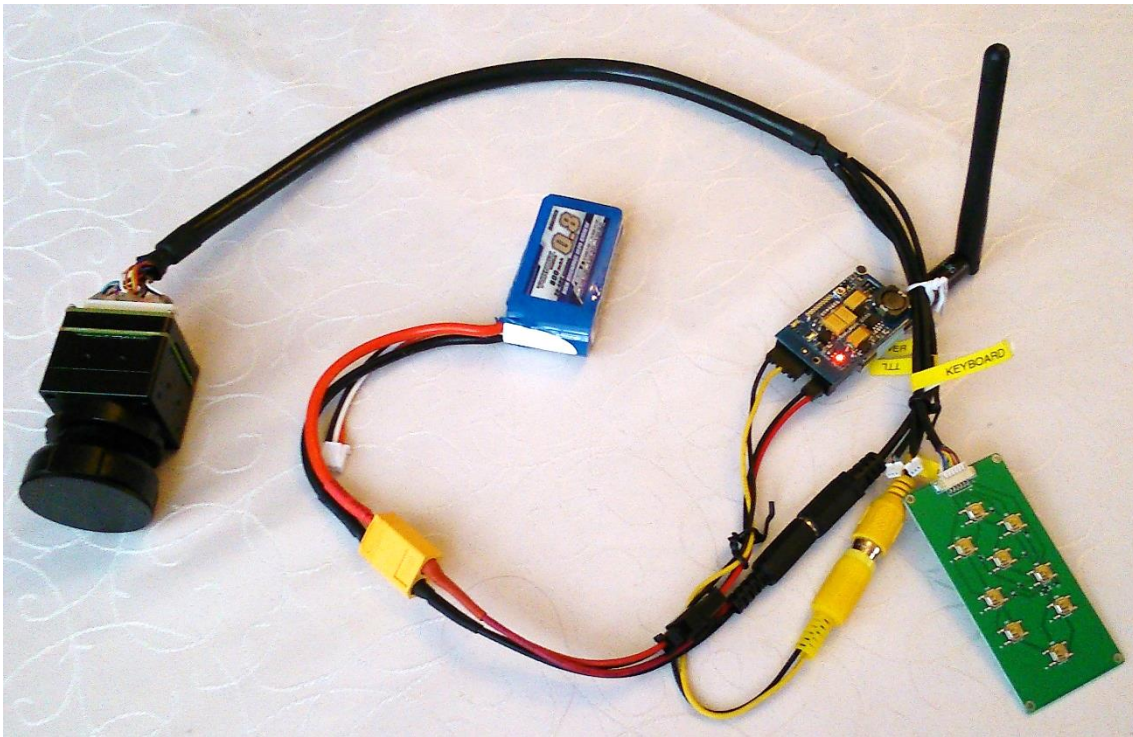


Joonis 22. Kiirgusvõimsuse sõltuvus lainepikkusest [18]

Joonisel 22 on kujutatud kollase joonega temperatuuril 50 °C oleva keha kiirguse sõltuvus lainepikkusest ning sinine joon kujutab temperatuuril 0 °C olevat tausta (maapinda). Kuigi näites kasutatud keha temperatuuri korral kiirguse haripunkt on lainepikkusel 8,97 μm, on sellel lainepikkusel jälgitava objekti kiirgus taustast ainult 2,49 korda suurem. Kesklaine infrapunakiirguse vahemikus, näiteks lainepikkusel 4 μm on jälgitava objekti kiirgus küll 8,47 korda väiksem kui lainepikkusel 8,97 μm, kuid suhe 0 °C olevasse tausta on suurem; 7,67 korda. Seega antud näite kohaselt oleks objekti maksimaalseks eristuseks taustast eelistatud kasutada kesklaine infrapuna kiirguse vahemikus töötavat kaamerat, kuid madalama kiirguse koguse tõttu vajavad sellised kaamerad valdavalt sensori jahutust, mille abil on võimalik nende tundlikkust tõsta. Samuti lisavad jahutussüsteemid kaamerale massi, muudavad seadme kallimaks ning energiakulukamaks [16].

Eelnevat arvesse võttes on prototüübile valitud HIVINTEK HSC120A lainepikkuste vahemikus 8-14 μm töötav jahutamata sensoriga termokaamera (vt Joonis 23). Antud

kaamera resolutsioon on 640×480 pikslit ning sellel on nii analoog komposiitvideo väljund kui ka digitaalne 16-bitine töötlemata ja 8-bitine BT.656 väljund [19].



Joonis 23. Termokaamera HSC120A koos klaviatuuri, TS353 video saatja ning akuga

4.1.2 ADZS-BF707-BLIP2 arendusplaat

Masinnägemise mooduli testimiseks valiti ADZS-BF707-BLIP2 arendusplaat, millel on Analog Devices BF707 DSP, 256 MB Micron LPDDR SDRAM ning kaks VGA resolutsiooniga kaamera sensorit (vt Joonis 24) [20].



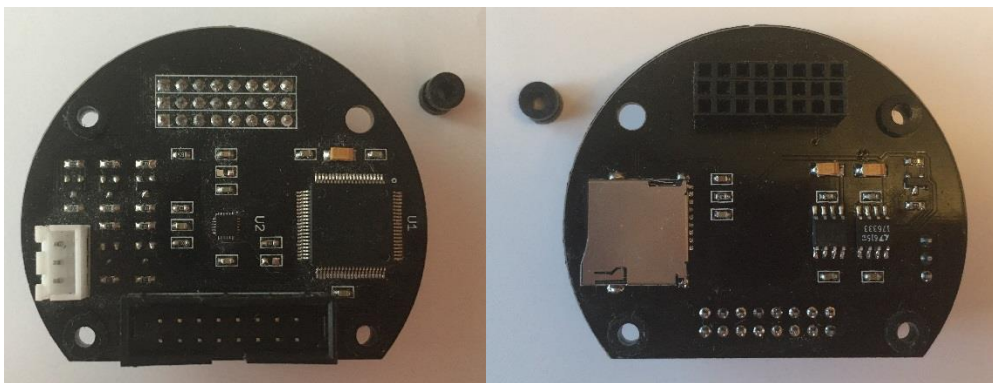
Joonis 24. ADZS-BF707-BLIP2 arendusplaat [21]

Selle protsessori valikul osutus määravaks asjaolu, et Analog Devices pakub Blackfin seeria protsessoritele tarkvara moodulit *Blackfin Vision Analytics Toolbox*, kus on juba implementeeritud pilditöötlemiseks vajalikud madala taseme funktsioonid, nagu näiteks

kaadri skaleerimine, konvolutsioon, korrelatsioon, värvilise kaadri taandamine mustvalgeks ja histogrammi leidmise võimalus [22].

4.2 Autopiloodi moodul

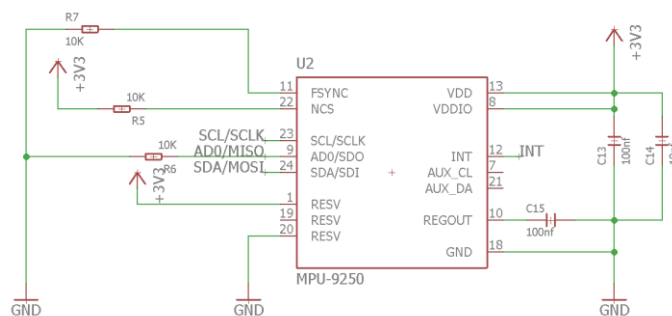
Autopiloodi moodul koosneb inertsiaalandurist, mikrokontrollerist, +3,3 V ja +5 V pingeregulaatorist, mikro-SD kaardi pesast, kuue servo juhtimiseks +5 V signaaliga vajalikest nmos transistoritest ning pistikutest. Kasutatud on kahekihilist, 1,6 mm paksust standardset trükkplaati, mõlemapoolse komponentide paigutusega. Autopiloodi mooduli täielik skeem on toodud Lisas 1 ja selle tootmisnimekiri Lisas 3. Trükkplaadi läbimõõt on 58 mm ning selle paigaldamiseks on neli 4 mm läbimõõduga auku, kuhu on võimalik paigaldada 3 mm siseläbimõõduga kummist vibratsioonisummutid (vt Joonis 25).



Joonis 25. Autopiloodi mooduli fotod

4.2.1 Inertsiaalandur

Õhusõiduki asendi määramiseks on vajalik kasutada inertsiaalandurit. Valitud InvenSense MPU-9250 inertsiaalandur sisaldab 3-teljelist güroskoopi, 3-teljelist kiirendusandurit ja 3-teljelist magnetomeetrit. Nimetatud inertsiaalanduri eeliseks on integreeritud *Digital Motion Processor*, mis lisaks tavapärastele mõõdetud kiirenduse, nurkkiiruse ja magnetvälja väärtustele suudab automaatselt arvutada ka kvaternioonid. Kvaternioonide kasutamine asendi määramisel võimaldab vältida Euleri nurkade kasutamisel tuleneva telgede ühtimisel tekkivat määramatuse ehk vabadusastme kaotamise probleemi [23]. Küll aga on vajalik DMP programm mikrokontrolleri poolt igal sisse lülitamisel uuesti MPU-9250-sse laadida, sest seda ei salvestata püsimällu [24].



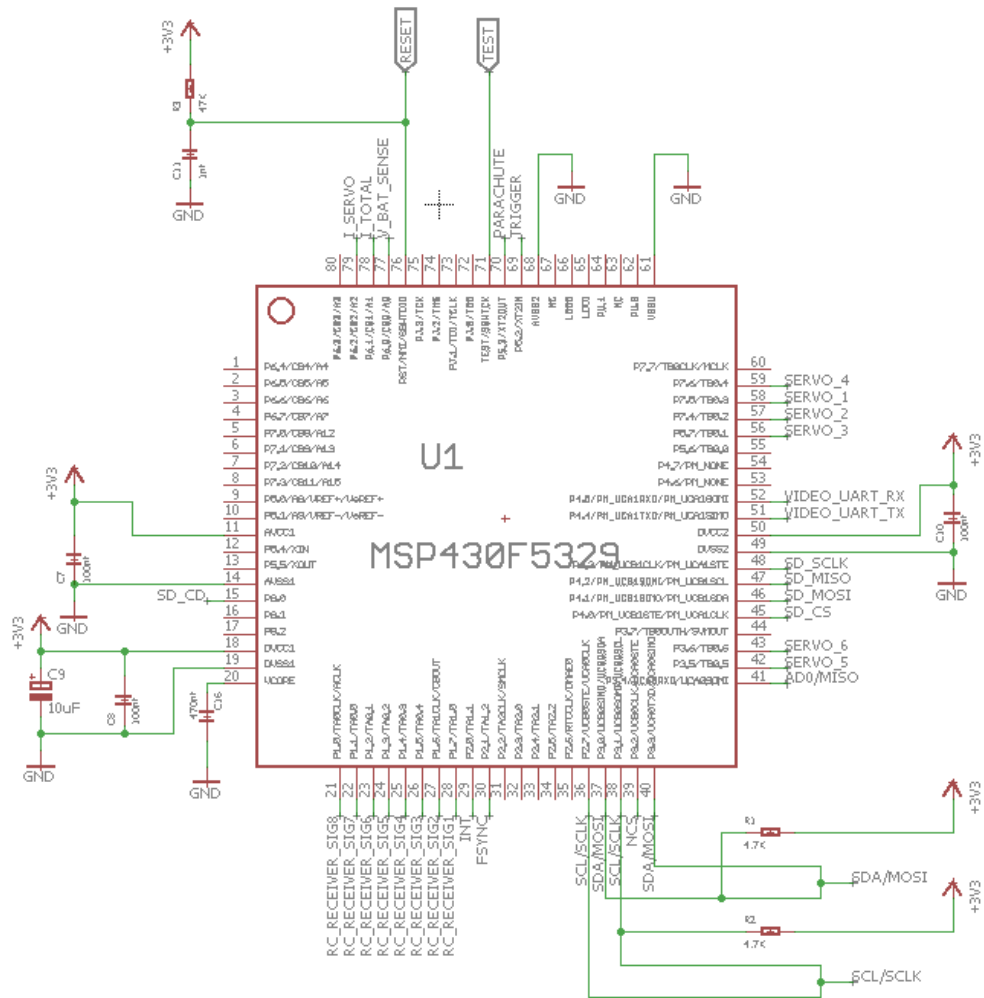
Joonis 26. Inertsiaalidur MPU-9250 ühenduse skeem

MPU-9250 on saadaval 3x3x1 mm suuruses QFN korpuses. Autopiloodi moodulil on mikrokontrolleri ja inertsiaaliduri vahelise suhtluse testimiseks ühendatud nii SPI kui ka I²C viigud, kuid SCL ja SDA liini *pull-up* takistid jäetud paigaldamata, sest eelistatud on kasutada SPI liidest, mis võimaldab kasutada anduri väärtuste lugemisel suuremat boodikiirust, 20 MHz, võrreldes I²C 400 kHz-ga (vt Joonis 26 ja Lisa 1) [24].

4.2.2 Autopiloodi mikrokontroller

Prototüübi juhtimiseks on kasutatud Texas Instrumentsi mikrokontrollerit MSP430F5329. Mikrokontrolleri programmeerimiseks C-keeles kasutati Code Composer Studio IDE-d ning MSP-EXP430F5529LP arendusplaadil olevat eZ-FET Lite emulaatorit. MSP430F5329 on saadaval 80-viiguga LQFP korpuses [25]. Antud mikrokontroller valiti Texas Instrumentsi parameetrilise otsingu abil. Texas Instrumentsi mikrokontrollerid eelistati valikus selle tõttu, et autor on varasemalt nendega tuttav ning on olemas ka vajalikud arendusvahendid.

MSP430F5329 mikrokontrolleril on 128 kB välmälu programmi salvestamiseks ning 10 kB muutmälu. Mikrokontrolleri primaarseks ülesandeks on vastavalt RC-vastuvõtjalt, inertsiaalidurilt ja masinnägemise moodulilt saadud andmete põhjal juhtida tüüride ja kaamera juhtimiseks kasutatavaid servomootoreid. Kuue pulsilaiusmodulatsiooniga juhitava servomootori juhtimiseks on sobiv kasutada 16-bitist, seitsme *capture/compare* registriga Timer_B-d. Inertsiaaliduriga suhtlemiseks on ühendatud nii I²C kui ka SPI liinid ning mälukaardile andmete salvestamiseks eraldi SPI liinid. Masinnägemise mooduliga suhtlemiseks on pistikusse välja toodud UART liinid. Aku pinge, kogu seadme ning eraldi ühe tüüriservo voolutarbe mõõtmiseks on kasutusel 12-bitine analoog-digitaalmuundur (vt Joonis 27) [26].



Joonis 27. Mikrokontroller MSP430F5329 ühenduse skeem

Lisaks on pistikusse välja toodud kaks GPIO-d, millest üks on mõeldud mootori käivitamiseks ning teisega päästetakse juhitava õhusõiduki rikke korral välja langevari.

4.2.3 Kaugjuhtimise võimekus

Arvestades, et projekteeritav süsteem on mõeldud kasutamiseks mehitamata õhusõidukil, on vajalik ka kaugjuhtimise võimekus. Selleks on võimalik ühendada autopiloodi mooduli külge harilik RC-vastuvõtja. Käesoleval juhul on kasutatud V8FR-II 2,4 GHz sagedusel töötavat 8-kanaliga vastuvõtjat (vt Joonis 28).



Joonis 28. RC-vastuvõtja V8FR-II [27]

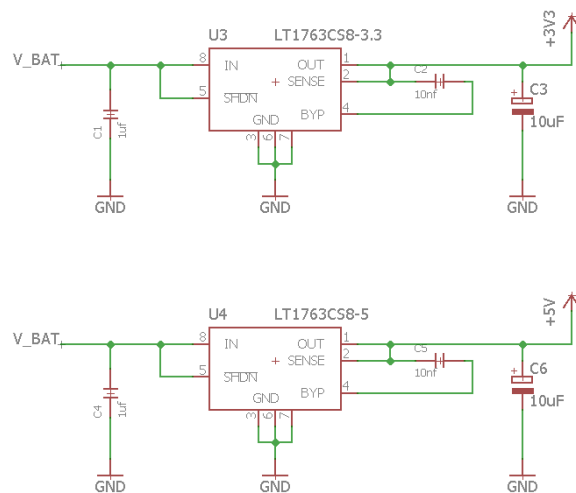
Vastuvõtja signaali väljud on tüüpiline servode juhtimiseks kasutatav pulsilaiusmodulatsiooniga signaal, mille pikkust on lihtne mikrokontrolleriga mõõta. Vastavalt vajadusele on võimalik kanaleid kasutada kas seadme käivitamiseks, manuaalseks juhtimiseks või näiteks hädaabi langevarju välja päästmiseks.

4.2.4 Andmete logimine

Lennuparameetrite hilisemaks analüüsiks on autopiloodi moodulil mikro SD-kaardi pesa (vt Joonis 25). Mälukaardile on võimalik salvestada koos ajatempliga näiteks juhttööriide asendid, kaamerat pööravate servomootorite asendid, nurga jälgitava objekti ja õhusõiduki pikitelje vahel, õhusõiduki asendi valitud koordinaatsüsteemi suhtes, õhusõiduki nurkkiirused ning kiirenduse, aku pinge ja tarbitava voolutugevuse. Parameetrite analüüs on oluline õhusõiduki juhttööriide PID tagasiside konstantide määramisel.

4.2.5 +3,3 V ja +5 V muundur

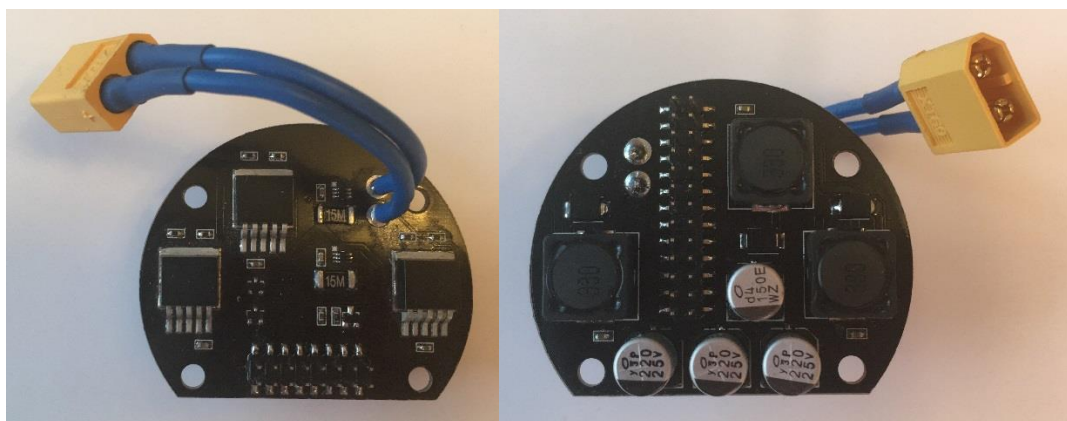
Ruumipuuduse tõttu toitemoodulil on +3,3 V ja +5 V pingeregulaatorid paigutatud autopiloodi moodulile. Mõlemal juhul on kasutusel on Linear Technology LT1763 SO-8 korpuses LDO, mille maksimaalne väljundvool on 500 mA (vt Joonis 29) [28].



Joonis 29. +3,3 V ja +5 V pingemuunduri skeem

4.3 Toitemoodul

Toitemooduli trükkplaat on samade mõõtmetega kui autopiloodi trükkplaat (vt Joonis 30). Moodul koosneb DC-DC muunduritest, aku pinget ja tarbitavat voolu mõõtvatest ahelatest, XT-60 pistikust 2-elementse LiPo aku ühendamiseks ning pistikutest servo mootorite ühendamiseks ning toitemooduli ühendamiseks autopiloodi trükkplaadiga.



Joonis 30. Toitemooduli fotod

Toitemooduli täielik skeem on toodud Lisas 2 ja selle tootmisnimekiri Lisas 4.

4.3.1 DC-DC muundur

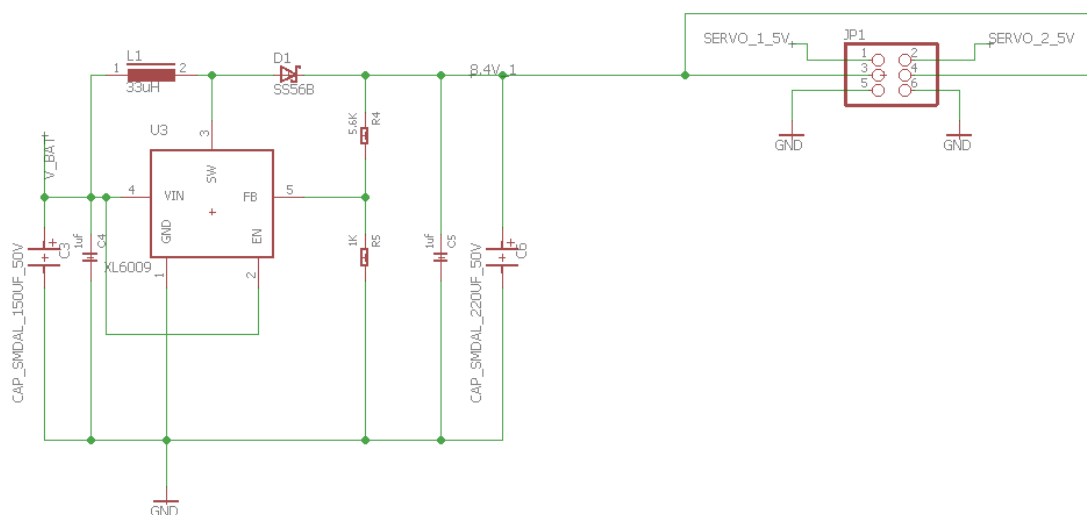
Prototüüp on projekteeritud kasutama juhtpindade ja kaamera pööramiseks Servo King servosid DS-795iSHV. Antud servomootorite lubatud toitepinge on vahemikus +6 V kuni

+8,4 V, küll aga on kõrgema pinge kasutamisel suurem nii mootori liikumiskiirus kui ka pöördemoment (vt Tabel 2) [29].

Tabel 2. Servo DS-795iSHV liikumiskiiruse ja pöördemomendi sõltuvus toitepingest [29]

Servo toitepinge (V)	Pöörlemiskiirus (s/60°)	Pöördemoment (kg·cm)
6	0,03	4.16
7,4	0,035	5
8,4	0,04	5,5

Servo mootorite toiteks on kasutatud TO263-5L korpuses XLSEMI XL6009 DC-DC muundureid pinget tõstvas konfiguratsioonis, sest kahe paralleelse elemendiga LiPo aku nimipinge on maksimaalsest lubatust väiksem, 7,4 V. Iga kahe servo kohta on üks toitemuundur. Seega kokku kolm analoogset skeemi (vt Joonis 31).



Joonis 31. DC-DC muunduri XL6009 ühenduse skeem

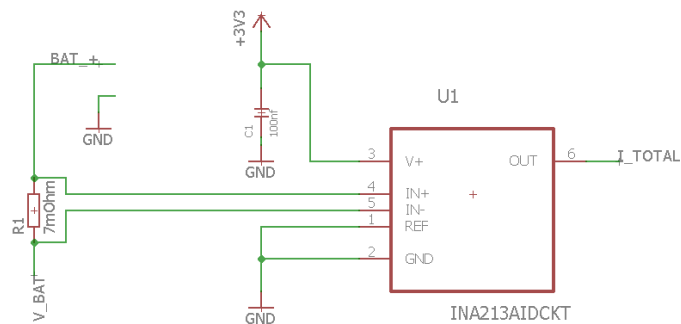
Muunduri XL6009 väljundpinge määravad takistid R4 ja R5 vastavalt seosele:

$$V_{out} = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{R4}{R5}\right) [30].$$

Valitud takistid $R4 = 5,6 \text{ k}\Omega$ ja $R5 = 1 \text{ k}\Omega$ annavad väljundpingeks 8,25 V. Arvestades, et XL6009 maksimaalne lubatud voolugevus on 4 A ja efektiivsus 92 %, saab muunduri maksimaalseks lubatud väljundvooluks aku 7,4 V pinge korral 3,3 A [30].

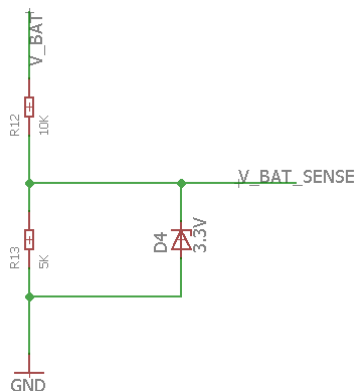
4.3.2 Voolu ja akupinge mõõtmine

Arvestades, et kogu projekteeritud seadme suurima voolutarbega komponentide, servode, voolutarve sõltub neile rakendatud mehaanilisest koormusest, ega ole projekteerimise hetkel teada, siis on sobiva aku mahtuvuse ja lennuaja planeerimiseks lisatud toitemooduli trükkplaadile nii kogu seadme voolutarvet mõõtev skeem (vt Joonis 32) kui ka analoogselt ühe juhttüüri servo voolutarvet mõõtev skeem (vt Lisa 2). Voolu mõõtmiseks kasutatakse SC70 korpuses Texas Instrumentsi 50 kordse võimendusega INA213 voolu monitori ning MSP430F5329 mikrokontrolleril olevat analoog-digitaal muundurit [31].



Joonis 32. Voolutarbe mõõtmise skeem

Aku ootamatu tühjenemine õhusõidukil lõpeb tõenäoliselt selle purunemisega. Selle vältimiseks on toitemoodulil aku pinge mõõtmise võimekus. Aku pinge langemisel alla määratud piiri on võimalik avada hädaabi langevari. Samuti väldib see akude sügavat tühjenemist, mis on nende mahutavuse säilimisele kahjulik.



Joonis 33. Aku pinge mõõtmise skeem

Kuigi maksimaalselt täis laetud kahe jadamisi elemendiga LiPo aku pinge on 8,4 V, mis pingejaguri väljundis (vt Joonis 33) annaks pingeks 2,8 V on MSP430F5329 mikrokontrolleri ADC sisendi kaitseks lisatud ka 3,3 V nimipingega Zeneri diod.

5 Kokkuvõte

Töö eesmärgi, sardsüsteemi, mille abil oleks võimalik videopildi kaudu valitud objekti detekteerida ning seda reaajas jälgida, täitmiseks koostati nelja sammuline detekteerimisalgoritm, mis suudab termokaamera videopildi alusel välja pakkuda tõenäolisema objekti kandidaadi asukohta ja suuruse kaadris ning seadme operaatori kanda jääb objekti tuvastamise roll. Masinnägemise jälgimisalgoritmidest osutus sobilikuks *Kernelized Correlation Filter* algoritm, mis on arvutuslikult efektiivne kui ka piisavalt täpne. Detekteerimisalgoritmi välja töötamiseks kasutati MATLAB tarkvara ning selle teostatavuse kontrolliks loodi Python programmeerimiskeeles antud detekteerimisalgoritmi ja KCF jälgimisalgoritmi ühendav tarkvara, mis kasutaja valitud videost või reaalaaja videopildist kuvab detekteerimisrežiimis tõenäolise objekti asukohta ja suuruse ning jälgimisrežiimis jälgib valitud objekti liikumist kaadris.

Prototüübi riistvara koostamisel jagati seade kolmeks mooduliks: masinnägemise, autopiloodi ja toitemoodul. Masinnägemise mooduliks valiti Analog Devices DSP BF707 arendusplaat ADZS-BF707-BLIP2, millel on arenduse lihtsustamiseks ka kaks kaamerat. Selleks, et objekte oleks võimalik detekteerida ja jälgida ka öösel, valiti kaameraks HIVINTEK HSC120A 8-14 μm lainepikkuste vahemiks töötav jahutamata sensoriga termokaamera. Arvestades, et seadme põhiline kasutusvaldkond on mehitamata õhusõidukitel, siis projekteeriti Autodesk EAGLE tarkvara abil autopiloodi ja toitemooduli skeemid ja trükkplaadid. Loodud autopiloodi moodul on võimeline vastavalt masinnägemise mooduli, inertsiaalanduri ja RC-vastuvõtjalt saadud info põhjal õhusõiduki juhttüüre juhtima ning toitemoodul muundab 2-elementide LiPo aku pinget servomootoritele ja teistele moodulitele sobivaks ning samuti võimaldab mõõta hetke voolutarvet ja aku pinget.

Antud seadme terviklikuks katsetamiseks oleks edasine töö valitud videotöötuse DSP ADZS-BF707-BLIP2 arendusplaadi põhjal projekteerida ning valmistada rakenduse spetsiifiline trükkplaat.

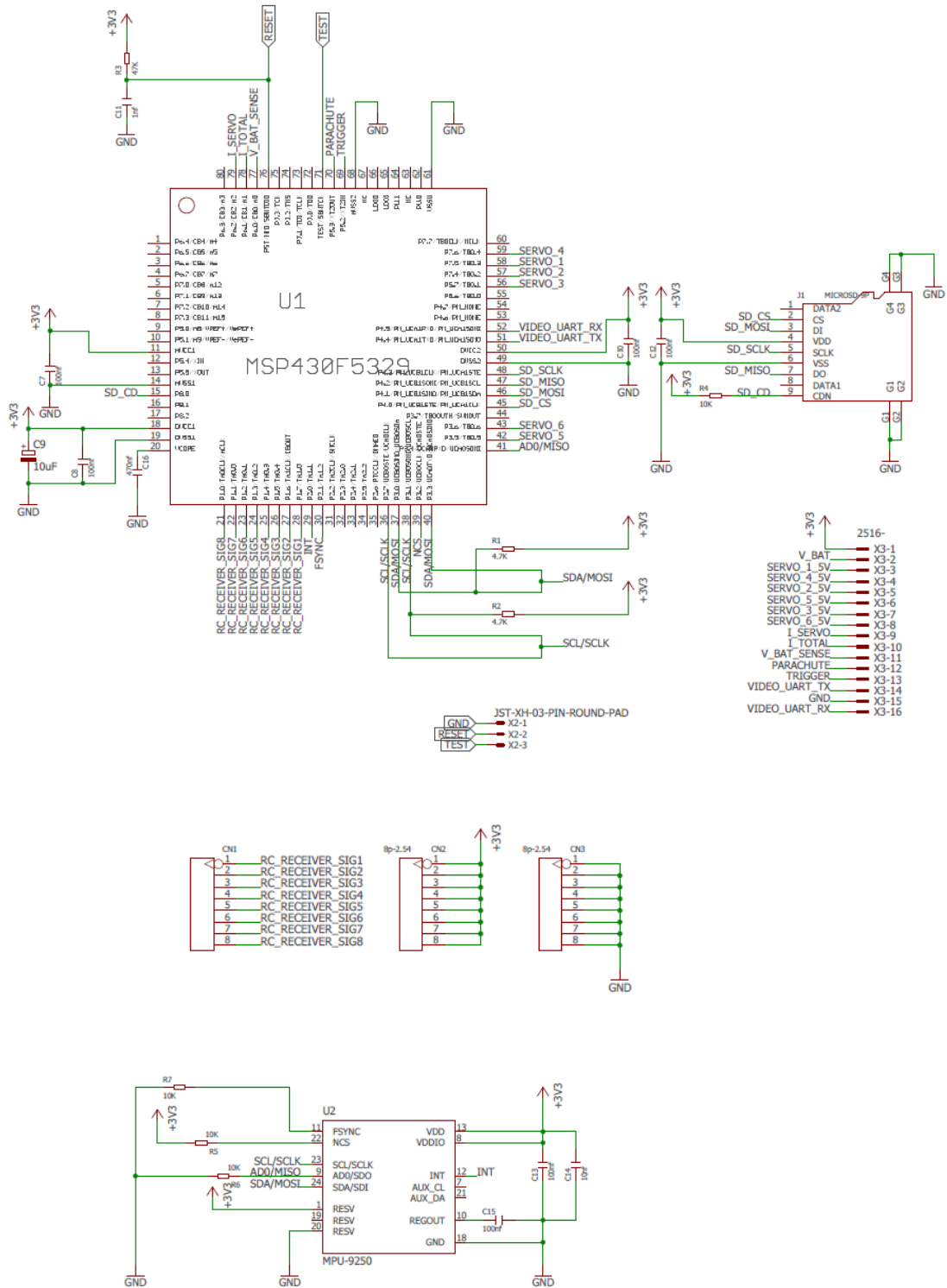
Kasutatud kirjandus

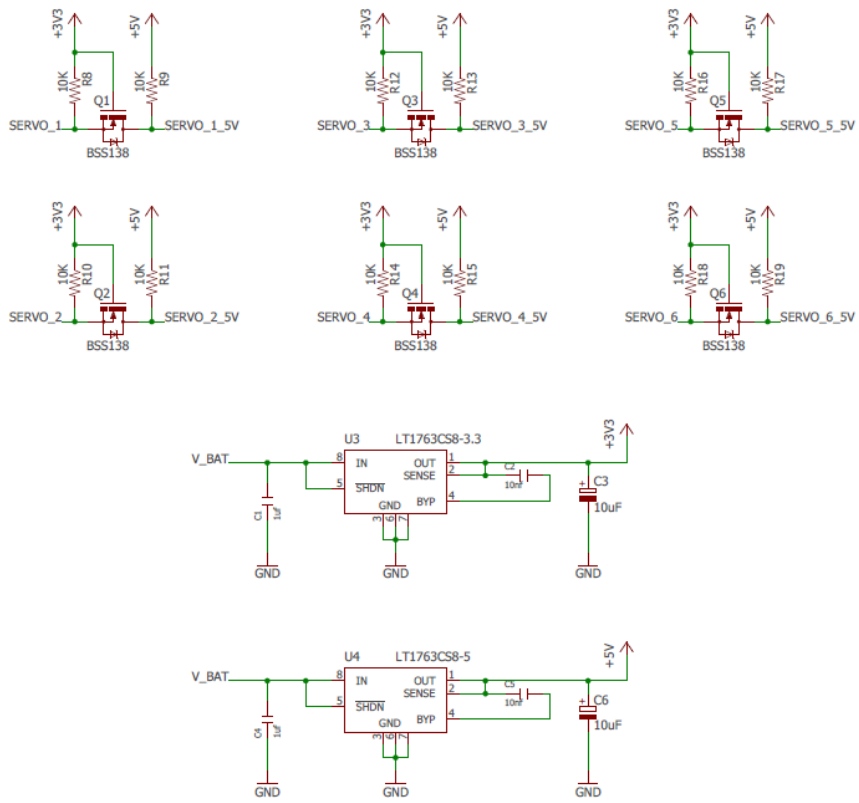
- [1] A. Yilmaz, O. Javed ja M. Shah, „Object Tracking: A Survey,“ *ACM Computing Surveys*, kd. 38, nr 4, 2006.
- [2] Y. Zhao ja H. Shi, „An Overview of Object Detection and Tracking,“ *Proceeding of the 2015 IEEE International Conference on Information and Automation*, Lijiang, 2015.
- [3] A. W. M. Smeulders, D. M. Chu, R. Cucchiara, S. Calderara, A. Dehghan ja M. Shah, „Visual Tracking: An Experimental Survey,“ *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, kd. 36, pp. 1442-1468, 2014.
- [4] „Visual Tracker Benchmark Datasets,“ [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: http://cvlab.hanyang.ac.kr/tracker_benchmark/datasets.html. [Kasutatud 27. aprill 2018].
- [5] „Ludwig_ImageConvolution.pdf,“ [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: http://web.pdx.edu/~jduh/courses/Archive/geog481w07/Students/Ludwig_ImageConvolution.pdf. [Kasutatud 27. aprill 2018].
- [6] J. J. Athanios ja P. Suresh, „Implementation and Comparison of Kernel and Silhouette Based Object Tracking,“ *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology*, kd. 2, nr 3, pp. 1298-1303, 2013.
- [7] „OpenCV library,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://opencv.org/>. [Kasutatud 27. aprill 2018].
- [8] „GitHub KCF tracker in Python,“ [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <https://github.com/uoip/KCFpy>. [Kasutatud 27. aprill 2018].
- [9] „Gaussian Function -- from Wolfram Mathworld,“ [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <http://mathworld.wolfram.com/GaussianFunction.html>. [Kasutatud 27. aprill 2018].
- [10] „Harbor - 1280x1024 15µm pixel pitch HD Stirling Cooled MWIR InSb camera - YouTube,“ [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <https://www.youtube.com/watch?v=segXb5FmBiE>. [Kasutatud 27. aprill 2018].
- [11] „Spatial Filters - Laplacian/Laplacian of Gaussian,“ [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/log.htm>. [Kasutatud 27. aprill 2018].
- [12] „MUST Creative Engineering Laboratory,“ [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: [http://lab.must.or.kr/\(S\(2iatfs55hncsa455z1rxqt55\)\)/GetFile.aspx?File=/DIP/edge/log2.png](http://lab.must.or.kr/(S(2iatfs55hncsa455z1rxqt55))/GetFile.aspx?File=/DIP/edge/log2.png). [Kasutatud 27. aprill 2018].
- [13] „pyramid.png,“ [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <http://iipimage.sourceforge.net/images/pyramid.png>. [Kasutatud 27. aprill 2018].
- [14] Y. Wu, M.-H. Yang ja J. Lim, „Online Object Tracking: A Benchmark,“ *2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Portland, 2013.

- [15] C. Ma, X. Yang, C. Zhang ja M.-H. Yang, „Long-term Correlation Tracking,“ *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Boston, 2015.
- [16] „Introduction to infrared vision,“ [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <https://www.opto-engineering.com/index.php?/resources/infrared-theory>. [Kasutatud 27.aprill 2018].
- [17] „Musta keha kiirgus ja Plancki kvantühüpootees (valikkursus) Digiõppevaramu,“ [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <https://vara.e-koolikott.ee/node/2986>. [Kasutatud 27. aprill 2018].
- [18] „USGS Astrology Science Center Radiance Calculator,“ [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <https://astrogeology.usgs.gov/tools/thermal-radiance-calculator/>. [Kasutatud 27. aprill 2018].
- [19] *HSC20/HSC120A Thermal Imaging Core User manual*, 2016.
- [20] „ADZS-BF707-BLIP2 Board Evaluation System Manual, Revision 1.0, April 2015,“ [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <http://www.analog.com/media/en/news-marketing-collateral/product-highlight/ADZS-BF707-BLIP2-Board%20Evaluation-System-Manual.pdf>. [Kasutatud 27. aprill 2018].
- [21] „ADZS-BF707-BLIP2,“ [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <http://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/adzs-bf707-blip2.html#eb-overview>. [Kasutatud 27. aprill 2018].
- [22] „Image Processing Toolbox, Blackfin | Analog Devices,“ [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: http://www.analog.com/en/design-center/processors-and-dsp/evaluation-and-development-software/bf_iptbx_00.html#dsp-overview. [Kasutatud 27. aprill 2018].
- [23] „Understanding Quaternions | CH Robotics,“ [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <http://www.chrobotics.com/library/understanding-quaternions>. [Kasutatud 27. aprill 2018].
- [24] „MPU-9250 Product Specification Revision 1.1,“ [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>. [Kasutatud 27. aprill 2018].
- [25] „MSP430F532x Mixed Signal Microcontroller (Rev. D),“ [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f5329.pdf>. [Kasutatud 27. aprill 2018].
- [26] „MSP430x5xx and MSP430x6xx Family User's Guide (Rev. Q),“ [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <http://www.ti.com/lit/ug/slau208q/slau208q.pdf>. [Kasutatud 27. aprill 2018].
- [27] „FrSKY V8FR-II,“ [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <https://www.frsky-rc.com/wp-content/uploads/2017/04/V8ER-2-02.jpg>. [Kasutatud 27. aprill 2018].
- [28] „LT1763 Series – 500mA, Low Noise, LDO Micropower Regulators,“ [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/1763fh.pdf>. [Kasutatud 27. aprill 2018].
- [29] „RB1-RC, DS-795iSHV,“ [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <https://www.rb1-rc.com/en/servoking/1123-ds-795-ishv.html>. [Kasutatud 27. aprill 2018].
- [30] „400KHz 60V 4A Switching Current Boost / Buck-Boost / Inverting DC/DC Converter,“ [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <https://www.sunrom.com/get/283300>. [Kasutatud 27. aprill 2018].

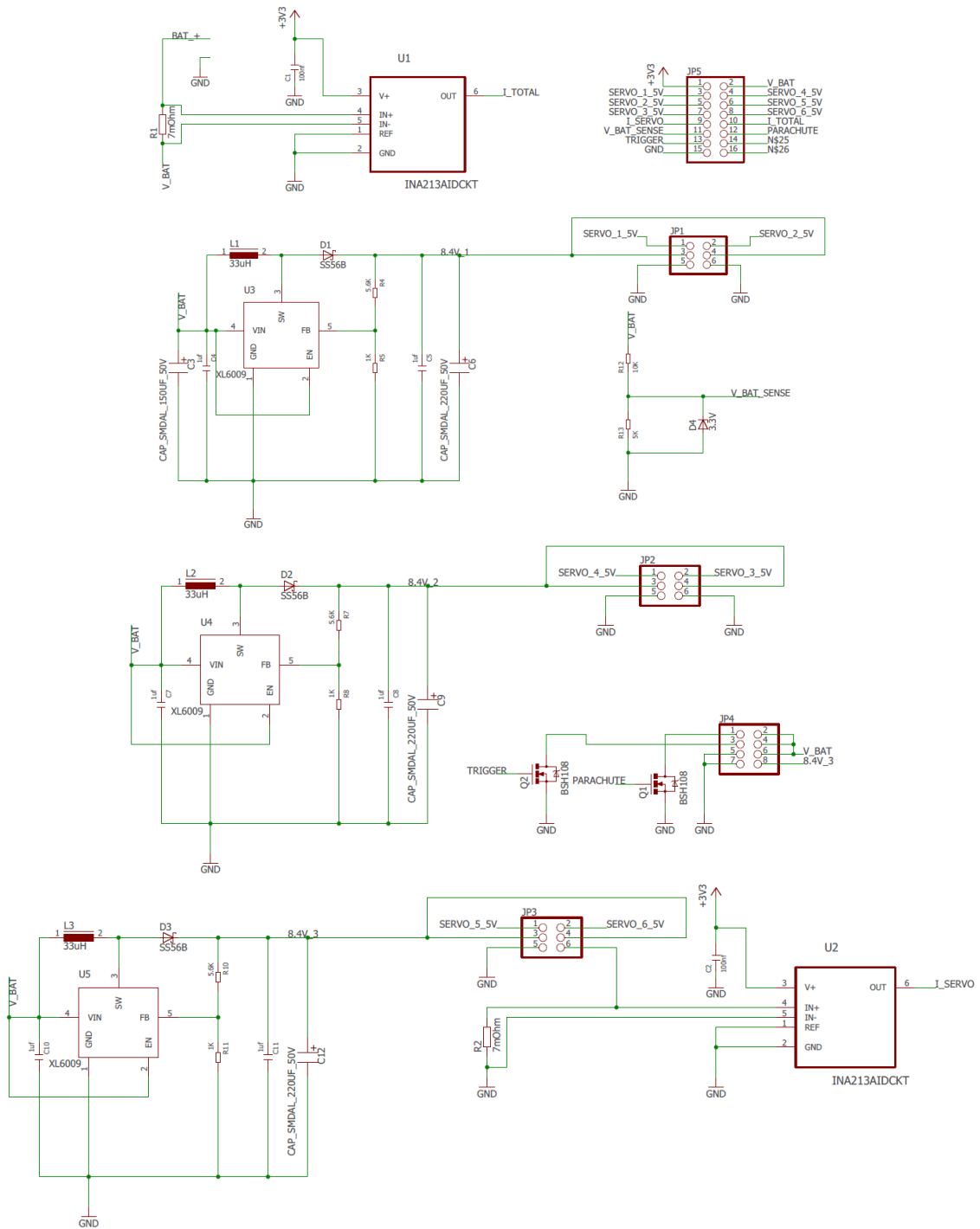
- [31] „Voltage Out, Low- or High-Side Meas, Bidir, Zero-Drift, Current-Shunt Monitors datasheet (Rev. J),“ [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina212.pdf>. [Kasutatud 27. aprill 2018].

Lisa 1 – Autopiloodi skeem





Lisa 2 – Toitemooduli skeem



Lisa 3 – Autopiloodi komponentide loetelu

Kogus	Viide	Komponendi nimetus	Tootja	Tootja kood
DNP	R1, R2	0603 4k7	Vishay	CRCW06034K70FKEA
1	R3	0603 47k	TE Connectivity	CRG0603F47K
16	R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10, R11, R12, R13, R14, R15, R16, R17, R18, R19	0603 10k	TE Connectivity	CRG0603F10K/10
2	C1, C4	0603 1uF	AVX	0603YD105KAT2A
3	C2, C5, C14	0603 10nF	AVX	06033C103KAT2A
3	C3, C6, C9	3216 10uF	KEMET	T491A106K010AT
6	C7, C8, C10, C12, C13, C15	0603 100nF	AVX	0603YC104KAT2A
1	C11	0603 1nF	AVX	06035C102JAT2A
1	C16	0603 470nF	TDK	C1608X7R1C474K080AC
6	Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6	BSS138	ON Semiconductor	BSS138
1	U1	MSP430F5329	Texas Instruments	MSP430F5329IPNR
1	U2	MPU-9250	InvenSense	MPU-9250
1	U3	LT1763CS8-3.3	Linear Technology	LT1763CS8-3.3#PBF
1	U4	LT1763CS8-5	Linear Technology	LT1763CS8-5#PBF
1	J1	micro SD socket	MOLEX	503182-1853
3	CN1, CN2, CN3	8x1 socket	Samtec	SSQ-108-01-G-S
1	X2	JST XH B3B	JST	B3B-XH-A(LF)(SN)
1	X3	8x2 header	Amphenol	T821116A1S100CEU

Lisa 4 – Toitemooduli komponentide loetelu

Kogus	Viide	Komponendi nimetus	Tootja	Tootja kood
2	R1, R2	2512 7mR	Bourns	CRE2512-FZ-R007E-2
2	R3, R12	0603 10k	TE Connectivity	CRG0603F10K/10
2	R4, R7, R10	0603 5k6	Vishay	CRCW06035K60FKEA
3	R5, R8, R11	0603 1k	TE Connectivity	CRG0603F1K0
1	R13	0603 4k99	Vishay	CRCW06034K99FKEA
2	C1, C2	0603 100nF	AVX	0603YC104KAT2A
1	C3	8mm 150uF	Nichicon	UWT1E151MNL1GS
6	C4, C5, C7, C8, C10, C11	0603 1uF	AVX	0603YD105KAT2A
3	C6, C9, C12	8mm 220uF	Nichicon	UWT1E221MNL1GS
2	Q1, Q2	BSH108	Nexperia	BSH108,215
2	U1, U2	INA213	Texas Instruments	INA213AIDCKT
3	U3, U4, U5	XL6009	XLSEMI	XL6009
3	D1, D2, D3	SS56B	HY Electronic Corp	SS56B
1	D4	SOT-23 3v3	Fairchild	BZX84C3V3
3	L1, L2, L3	33 uH	Würth Elektronik	7447709330
1	JP1, JP2, JP3, JP4	13x2 SMD header	Würth Elektronik	61002621121
1	JP5	8x2 SMD header	Amphenol	95278-101-16LF
1	-	XT60 male	AMASS	XT60