

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND
Füüsika Instituut

Alo Peets

**PÄIKESESÜSTEEMI MUDELI TEHNILISTE
LAHENDUSTE VÄLJATÖÖTAMINE**

Magistritöö (30 EAP)

Juhendaja: professor Alvo Aabloo

Tartu 2010

Sisukord

1	Sissejuhatus	3
2	Ülevaade	4
2.1	Päikesesüsteemi ehitus	4
2.2	Olemasolevate Päikesesüsteemi mudelite ülevaade.....	5
2.3	Patendiuuring	6
2.4	Päikesesüsteemi andmed	7
3	Süsteemi kirjeldus ja nõuded tellija seisukohalt.....	8
3.1	Mudeli parameetrid (tellija soovid).....	9
3.2	Tehniline lahendus	10
3.3	Projekti edukuse hindamise kriteeriumid	10
4	Traadita ühenduse standardi valik	11
4.1	ZigBee	11
4.2	433 MHz transiiver.....	11
4.3	Võrdlus levinud standarditega.....	11
4.4	XBee™ ZigBee Moodul	12
5	Päikesesüsteemi mudeli tehnilised lahendused ja disain.....	13
5.1	Päikesesüsteemi mudeli komponendid.....	14
5.2	Tugistruktuur.....	15
5.3	Vanker	16
5.3.1	Vankri mehaanika	16
5.3.2	Vankri elektroonika	19
5.3.3	Vankri tarkvara	21
5.3.4	Peatsüklis sooritavad kontrollid	22
5.3.5	Vankri programmi kirjeldav diagramm	24
5.4	Server	26
5.4.1	Serveriga ühenduv USB andmesidemoodul	26
5.4.2	Serveri tarkvara.....	27
6	Planeetide asukoha arvutamine	29
6.1	Protseduur, kuidas arvutada heliotsentrilisi polaarkoordinaate.....	30
7	Testimine	31
8	Kokkuvõte	32
9	Viited	33
	The Solar System Model for Tartu Old Observatory.....	35
	Lisa 1 Dokumentatsioon	37
	Lisa 2 Elektroonika komponentide tabel	38
	Lisa 3 Planeedi asukoha arvutamiseks kasutatud parameetrid	39

1 Sissejuhatus

Inimesed nägid Päikesesüsteemi kaua aega geotsentrilisest vaatekohast ning sellest tulenevalt ei saanud nad selle loomusest ja ehitusest aru. Päikesesüsteemi objektide näivaid liikumisi Maalt vaadatuna peetigi nende tegelikeks liikumisteks ümber Maa, mida arvati paigal seisvat. Peale selle ei ole paljud Päikesesüsteemi objektid ja nähtused palja silmaga vaadeldavad. Nõnda nõudis adekvaatne arusaamine Päikesesüsteemist teoreetilisi ja tehnilisi saavutusi.

Kõige esimene ja põhjapanevam neist saavutustest oli Mikołaj Koperniku (1473-1543) teooria: Päikesesüsteemi heliotsentriline mudel, mille järgi kõik planeedid liiguvad ümber Päikese ringikujulistel orbiitidel. Juba sõna "Päikesesüsteem" ise eeldab niisugust vaateviisi. Ent kõige tähtsam oli see, et ümber Päikese tiirlev Maa osutus üheks planeetidest. Teiseks suuremaks saavutuseks on Kepleri seaduste formuleerimine (planeedid liiguvad mööda ellipsikujulisi orbiite) ja Isaac Newtoni (1643-1727) gravitatsiooniteooria kasutuselevõtt, mis võimaldas juba väga täpselt arvutada planeetide asukohti taevas.

Tartu Ülikooli tähetorn, omal ajal maailma astronoomia tähtsamaid keskusi, on osa Eesti teadusajaloost. Tähetorn rajati aastatel 1808-1810 ülikooli arhitekti Johann Wilhelm Krause projekti järgi Toomemäe kaguossa keskaegse piiskopilinnuse asukohale. 2011. aasta kevadel taasavatakse Tartu tähetorn muuseumina. Üheks soovitud muuseumieksponaadiks on Päikesesüsteemi mudel, mille ehitamiseks pöörduiti Tartu Ülikooli Tehnoloogia Instituudi poole. Mudeli ülesandeks on demonstreerida planeetide liikumist ja nende vastastikuste asendite (planeediseisude) kujunemist. Mudel peaks võimaldama esile kutsuda planeetide asendit kindlatel kuupäevadel ning vastavatest planeediseisudest alustades jälgida planeetide liikumist orbiitidel.

Käesolev töö sisaldab Tartu Ülikooli magistrandi Alo Peets välja pakutud tehnilisi lahendusi, skeeme, jooniseid ja arvamusi, kuidas vastavat mudelit kõige arukam valmistada oleks. Magistritöö lisades on olemas mudeli valmistamiseks soovitatud lahenduste dokumentatsioon (2010. aasta maikuu seisuga). Projekti lahendused kattuvad osaliselt Alo Peetsi bakalaureusetööga „Reaalaja tagasiside süsteemi väljaarendamine õppeprotsesside kvaliteedi tõstmiseks“ [1].

2 Ülevaade

2.1 Päikesesüsteemi ehitus

Päikesesüsteem koosneb Päikesest ning sellega seotud objektidest ja nähtustest. Tegemist on kõige paremini tuntud näitega planeedisüsteemist, mis üldjuhul koosneb ühest või mitmest tähest ning nendega gravitatsiooniliselt seotud aineist. Päikesesüsteemi põhikomponent on Päike, suhteliselt tavaline väikese massiga täht, mis siiski moodustab 99,86% Päikesesüsteemi massist ning on gravitatsiooniliselt domineeriv. Peale selle on Päikese sisemus tähe suure massi tõttu jõudnud termotuumareaktsiooni jaoks vajaliku tiheduseni ja temperatuurini ning vabastab tohutul hulgal energiat, millest enamus kiirgub kosmosesse elektromagnetkiirguse kujul.

Ülejäänud väike osa väljaspool Päikest asuvast massist hõlmab kaheksat planeeti (Merkuur, Veenus, Maa, Marss, Jupiter, Saturn, Uraan ja Neptuun) ning nende kaaslasi ja rõngaid. Peale selle on Päikesesüsteemis veel kääbusplaneedid (näiteks veel hiljuti planeediks peetud Pluuto), asteroidid, komeedid, Neptuuni-tagused objektid ja Kuiperi vöö objektid ning planeetidevaheline tolm ja gaas.

Väide, et tegu on just süsteemiga, mitte aga lihtsalt ümber Päikese tiirlevate taevakehade kogumiga, tugineb korrapärale planeetide suurustes ja liikumises. Neli esimest planeeti moodustavad Maa rühma. Nad on suure tihedusega ja suhteliselt väikesed. Neli välimist planeeti moodustavad hiidplaneetide (Jupiteri) rühma. Nad on tunduvalt suuremad ja väikese tihedusega. Kui kõige kaugem planeet Pluuto välja jätta, kehtivad järgmised väited.

1. Planeetide orbiidid on ligikaudu samas tasapinnas ja praktiliselt ringikujulised.
2. Planeedid tiirlevad ümber Päikese samas suunas Päikese pöörlemisega.
3. Orbiitide raadiused suurenevad kindla seaduspärasuse järgi.
4. Enamik planeete pöörleb tiirlemisega samas suunas.
5. Planeetide pöörlemistelg võib olla orbiidi tasandi suhtes kaldu.
6. Enamik planeetide kaaslastest tiirleb emaplaneedi ekvaatori tasandis ning planeedi pöörlemisega samas suunas.
7. Planeedid jagunevad kahte gruppi: neli väikest ja tihedat ning neli suurt väikese tihedusega planeeti [2].

Veel hiljaaegu oli Päikesesüsteem ainuke tuntud näide planeedisüsteemist, olgugi et laialt usuti teiste võrreldavate süsteemide olemasolusse. Nüüdseks on avastatud paarsada eksoplaneeti või nende süsteemi, kuigi nende täpsest olemusest teatakse võrdlemisi vähe. Üheks võimaluseks planeedisüsteemide kindlaks tegemiseks on analüüsida tähtede radiaalkiiruste perioodilisi muutusi, mis on tingitud planeetide ja tähe tiirlemisest ümber ühise masskeskme. Nii saab kindlaks teha ka nähtamatute planeetide masside alampiirid ja kaugused tähest. See meetod ei võimalda praegu siiski avastada Maaga võrreldava massi ja orbiidiga planeete, välja arvatud kolm planeeti, mis tiirlevad ühe pulsari ümber. Samuti on avastatud planeete teiste tähtede ümber, mõõtes pikka aega tähe heledust. Kui planeet liigub Maalt vaadates üle tähe ketta, siis tähe heledus väheneb väga natukene (maksimaalselt seni avastatud süsteemidel umbes 2%). Varjutuste kordumisel on võimalik määrata planeedi tiirlemisperiood ja ka mass. See meetod annab võimaluse määrata planeetide masse kõige suurema täpsusega, kuid eelistatult on vaadeldavad vaid need planeedid, mis on suured ja asuvad oma tähele väga lähedal [3].

2.2 Olemasolevate Päikesesüsteemi mudelite ülevaade

Päikesesüsteemi mudel on seade, mis illustreerib planeetide suhtelist positsiooni ja liikumist. Enamik mudeleid töötavad väga täpse ja keeruka hammasrataste süsteemi abil, kus keskel asuv kera tähistab Päikest, mille ümber liiguvad planeedid. Esimene teadaolev Päikesesüsteemi mudelit meenutav leid pärineb 2. sajandist e.m.a ja on tuntud ingliskeelses kirjanduses nime *Antikythera mechanism* all [4]. Esimene kaasaegne Päikesesüsteemi mudel valmis umbes 1704. aastal inglise teadlaste George Graham ja Thomas Tompion poolt. Esimene seade, mis ka tegelikult Päikesesüsteemi mudeli definitsioonile vastab valmis 1781. aastal hollandi astronoomiahuvilise Eise Eisingeri poolt ja on tuntud nime *Eisinga Planetarium* all. Mudeli liigutamiseks vajalik süsteem koosnes üheksast pendel-kella mehhanismist ja sinna juurde kuuluvatest raskustest ning asus lae kohal katuse all. Planeedid asusid toas lae all ja liikusid reaalselt, kuid käsitsi kompenseeriti asendeid liigaastate vahetumisel [5].

Seoses arvutisüsteemide kiire arenguga 20. sajandil on planeetide asukohtade arvutamine muutunud lihtsamaks ja ühtlasi on paranenud inimeste arusaam Päikesesüsteemist ning suurenenud huvi selle vastu. Sellest tulenevalt on Internetis lugematul arvul veebilehti ja programme, mis kujutavad tavakodaniku jaoks ülimalt täpsusega planeetide asendeid suvalisel kuupäeval, nende liikumist ja muid kosmoloogiaga seotud nähtusi. Näiteks John Walkeri

projekti *Solar System Live* kasutati ka käesoleva projekti mudeli testimisel, selgitamaks, kus miski planeet asuma peaks [6]. Programmeerimiskeeles zenon kirjutatud näitekood võeti aluseks planeetide asendite arvutamisel [7].

Lisaks võib leida lugematul arvul arvutusvalemeid ja õpetusi, kuidas ise ehitada Päikesesüsteemi mudelit. Eriti levinud on liikumatud mudelid, mis näitavad planeetide orbiitide kauguste ja planeetide suuruste erinevust [8,9]. Sellele vaatamata ei leidnud Tartu Ülikooli tähetorni töötajad enda vajaduste jaoks piisava funktsionaalsusega, odavat ja lihtsat mudelit, mille ostmine oleks olnud mõttekas. Sellest tulenevalt otsustati ehitada Päikesesüsteemi mudel Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituudis ja selleks vajaliku tehnoloogilised lahendused töötada välja lõputöö raames.

2.3 Patendiuring

Tartu Ülikooli aine Patendinduse alused (LOFY.02.022, 3 EAP, 2010 kevad) raames sooritas magistrant Alo Peets koos patendivolinik Sirje Kahuga patendiuringu olemasolevale Päikesesüsteemi mudelitele (seisuga 19. mai 2010). Patendiuringu otsing teostati Eesti Patendiameti kodulehel www.epa.ee ja otsiti järgmistest andmebaasidest: Eesti patenditaotluste ja patentide andmebaas; Eestis jõustamiseks esitatud Euroopa patentide andmebaas; Kasulike mudelite andmebaas. Otsingusõnadeks valiti „Päike“ ja „Päike*mudel“, kitsendavate parameetrite kasutamine ei osutunud vajalikuks arvestades väikest vastete hulka. Patendiuringu tulemusena selgus, et Eesti riigis ei ole kaitstud üksi Päikesesüsteemi mudeli ehitamiseks kasutatav lahendus.

2.4 Päikesesüsteemi andmed

Päikesesüsteemi mudeli ehitamiseks on kasutatud tabelis 2.1 olevaid astronoomilisi andmeid.

Planeet	Merkuur	Veenus	Maa	Marss	Jupiter	Saturn	Uraan	Neptuun
Läbimõõt (Maa läbimõõtu)	0,38	0,95	1,00	0,53	11,20	9,45	4,01	3,88
Keskmine kaugus tsentrast (aü) <i>semi-major axis</i>	0,39	0,72	1,00	1,52	5,20	9,54	19,19	30,07
Vähim kaugus tsentrast ($r_{per,aü}$) <i>perapsis</i>	0,31	0,72	0,98	1,38	4,95	9,05	18,38	29,80
Suurim kaugus tsentrast ($r_{apo,aü}$) <i>apoapsis</i>	0,47	0,73	1,02	1,67	5,45	10,12	19,23	30,40
<i>Semi-major axis</i> $0.5 \cdot (r_{apo} + r_{per})$	0,39	0,73	1,00	1,53	5,20	9,59	18,81	30,10
Keskmine ekstsentrilisus <i>eccentricity</i> $(r_{apo} - r_{per}) / (r_{apo} + r_{per})$	0,21	0,01	0,02	0,10	0,05	0,06	0,02	0,01
Orbiidi elliptilisus (e) <i>eccentricity</i>	0,21	0,01	0,02	0,09	0,05	0,06	0,04	0,01
<i>Semi-minor axis</i> $a \cdot \sqrt{1 - e^2}$	0,38	0,72	1,00	1,51	5,19	9,53	19,17	30,07
Periood (aastat) <i>periode</i>	0,24	0,61	1,00	1,88	11,86	29,45	84,0	164,80
Kalle (deg, tegelik) <i>inclination</i>	7,00	3,39	0,00	1,85	1,31	2,48	0,76	1,77
Periheeli argument (ω , deg) <i>argument of periapsis</i>	29,1	54,9	-	286,6	275,1	336,0	96,5	265,6
Tõususõlme pikkus (Ω , deg) <i>longitude of ascending node</i>	48,3	76,7	-	49,6	100,5	113,6	74,0	131,8

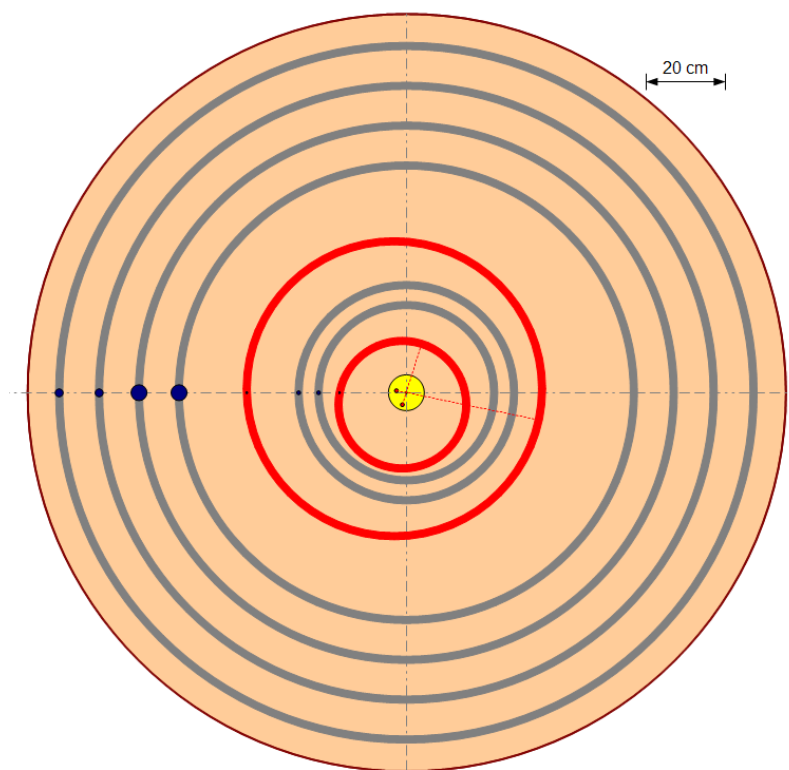
Tabel 2.1 Astronoomilised lähteandmed mudeli valmistamiseks. Tabeli koostas Jaak Jaaniste.

3 Süsteemi kirjeldus ja nõuded tellija seisukohalt

Mudeli eesmärgiks on demonstreerida planeetide liikumist ja nende vastastikuste asendite (planeediseisude) kujunemist. Mudel peaks võimaldama esile kutsuda planeetide asendit kindlatel kuupäevadel. Joonisel 3.1 on näha esialgne mudeli ülesehitus, kus punase värviga on tähistatud elliptilised orbiidid ja sinised täpid on vastavad planeedid.

Kui asendada Maa lambiga ja ümbritseda mudel tähekaardiga, vastab planeetide varjude liikumine nende näivale liikumisele taevasfääril, Maalt vaadatuna. Mudel on kvalitatiivse iseloomuga: teadlikult on ignoreeritud mastaapi, et mahutada kogu süsteem piiratud pinnale ning teha objektid jälgitavaks. Mudeli valmistamiseks ja planeerimiseks tehti järgmised kokkulepped:

- täpselt on edasi antud tiirlemisperioodid ja nurkkiirused
- planeetide kauguseid Päikesest on ühtlustatud, säilitades siseplaneetide orbiitide proportsioone ning lünka Marsi ja Jupiteri vahel
- orbiitide kaldenurki on suurendatud, et kompenseerida vähendatud kaugusi
- planeetide läbimõõtude erinevusi on vähendatud



Joonis 3.1 Tellijaga koostöös valminud esialgne Päikesesüsteemi mudeli joonis.

3.1 Mudeli parameetrid (tellija soovid)

Planeet	Merkuur	Veenus	Maa	Marss	Jupiter	Saturn	Uraan	Neptuun
Läbimõõt (cm)	0,5	1,0	1,0	0,5	4,0	4,0	2,0	2,0
Keskmine kaugus (a, cm) <i>semi-major axis</i>	16	22	27	37	57	67	77	87
Vähim kaugus tsentrast (r_{per} , cm) <i>perapsis</i>	13	22	27	34	57	67	77	87
Suurim kaugus tsentrast (r_{apo} , cm) <i>apoapsis</i>	19	22	27	40	57	67	77	87
Kalle (deg) <i>inclination</i>	9,0	4,5	0,0	3,5	2,5	5,0	1,5	3,5
Suurim kõrgus ekliptikast (cm) <i>Max height</i>	2,1	1,7	0,0	2,1	2,5	5,9	2,0	5,3
Vähim kõrgus ekliptikast (cm) <i>Min height</i>	-3,0	-1,7	0,0	-2,4	-2,5	-5,9	-2,0	-5,3
Kõrguste erinevus (cm) <i>Total distance</i>	5,1	3,5	0,0	4,5	5,0	11,7	4,0	10,6
Tõususõlme pikkus (Ω , deg) <i>longitude of ascending node</i>	48,3	76,7		49,6	100,5	113,6	74,0	131,8
Periheeli pikkus (Ω_p , deg)	78	132		336	16	90	171	37
Keskkooha nihe x-suunal (cm)	0,6			2,7				
Keskkooha nihe y-suunal (cm)	2,9			-1,2				
Periheeli argument (ω , deg)	29			287				
Perimeeter (cm)	106,8	144,5	175,9	239	364,4	427,3	490,1	552,9
Period T1 (s, välise režiim)	0,48	1,22	2,00	3,76	23,72	58,90	168,00	329,60
Kiirus @ T1 (cm/s)	221,6	118,1	88,0	63,5	15,4	7,3	2,9	1,7
Period T2 (s, seesmiste režiim)	2,41	6,12	10,00	18,80	118,60	294,50	840,00	1648,00
Kiirus @ T2 (cm/s)	44,3	23,6	17,6	12,7	3,1	1,5	0,6	0,3
Kiirus, kui T = T2, (cm/s)	v(R)	20,5	15,70	v(R)	2,9	1,4	0,56	0,32
Konstant μ	8862			4789				
Max kõrgus tasandist (cm)	2,7	1,7		2,2	2,4	5,7	2,0	5,2

Tabel 3.1 Tellija poolt ette antud soovituslikud mudeli parameetrid.

3.2 Tehniline lahendus

Valmistatav mudel peab vastama esitatud nõuetele (tabel 3.1), omama lihtsasti kasutatavat kasutajaliidest, olema vähest hooldust nõudev ning madalate püsikuludega. Planeetide asend peab vastama võimalikult hästi reaalsele asendile vastaval ajahetkel. Tellija ei sea Päikesesüsteemi mudelile tehniliste lahenduste kasutamisel muid piiranguid.

3.3 Projekti edukuse hindamise kriteeriumid

Projekti edukuse näitajaks on projekti eesmärkide saavutamine, mida on võimalik otseselt hinnata järgmiste kriteeriumite alusel:

1) Planeete liigutav süsteem on valmis ning töökorras

- Planeedid on võimalised üksteisest sõltumatult liikuma ja võtma sisse suvalise positsiooni orbiidil.
- Planeedid on võimalised liikuma etteantud kiirusega, mille määrab vastava planeedi tiirlemisperiood orbiidil.
- Planeetide liikumine toimub ühtlaselt, sünkroonselt ja mitte rohkem kui 2% erinevusega tegelikust asendist.

2) Planeetide juhtimiseks vajalik süsteem on valmis ja töökorras

- Süsteemi on võimalik lihtsa kasutajaliidese abil sisestada suvaline kuupäev ja planeedid võtavad sellele kuupäevale vastava asendi.
- Süsteem on võimaline kiiresti ja lihtsalt võtma hetke planeetideseisu, J2000-le vastav planeetide seis ja/või muu hiljem fikseeritav seis.
- Süsteem on testitud ja võimaline töötama igapäevaselt muuseumi eksponaadina Tartu Ülikooli tähetornis.

4 Traadita ühenduse standardi valik

4.1 ZigBee

ZigBee on traadita kohtvõrgu tehnoloogia, mis on mõeldud kasutamiseks kodudes, büroohoonetes ja tööstuses. See vastab väikese andmekiirusega võrkude standardile IEEE 802.15.4. **ZigBee** on traadita ühenduse standard nagu Wifi või Bluetooth. **XBee** on firma MaxStream konkreetne seade, mis kasutab ZigBee standardit teiste sama standardit kasutavate seadmetega suhtlemiseks [10]. XBee võrdluseks Wifi tehnoloogia juures oleks konkreetse firma Wifi kaart näiteks Trendnet TEW-441PC või Intel 4965AGN.

ZigBee projekteerimisel on silmas peetud eelkõige mitte suurt andmekiirust, vaid suurt samaaegselt kasutatavate seadmete arvu ja väikest toitevõimsuse tarvet, nii et selle maksimaalne andmekiirus 2,4 GHz kandesagedusel on ainult 250 kbit/s (mis on aeglasem kui WiFi või Bluetooth), kuid see-eest on sidepidamisel tarbitav elektriline võimsus väga väike. ZigBee tööraadius sõltub õhutemperatuurist, -niiskusest ja muudest parameetrist, kuid on keskmiselt umbes 70 meetrit.

4.2 433 MHz transiiver

Raadioside transiiverid sobivad hästi kahepoolseks andmesideks, et edastada järjestikliidese andmeid, juhtsignaale või muid käsuandmeid. Kasutatakse erinevaid sagedusi, kuid enimlevinud on sagedus 433 MHz. Levinud ühised omadused on suur vahekaugus, madal hind, lisakomponentide vajaduse puudumine, madal energiatarve, pindmontaaž ja voolusäästurežiim. Seadmete suurimaks miinuseks võib lugeda asjaolu, et enamasti ei ole neil sisse ehitatud raadioside protokoll, mille ise kirjutamine on keeruline ning ajamahukas [11, 12].

4.3 Võrdlus levinud standarditega

ZigBee eelis lähimate konkurentide ees on madal voolutarve, suhteliselt suur andmeside vahemaa ning suur võimalik võrguseadmete arv (tabel 4.1). Miinuseks on väike andmekanal ja pinu (*stacki*) suurus. Rakendused kuhu ZigBee on mõeldud vajavad just väikest voolutarvet ja ühendust paljude erinevate seadmetega, seega on ZigBeel turul oma nišš ja spetsiifilistesse rakendustesse on ta vägagi sobilik. ZigBeed saab kasutada kõikjal kus on vaja traadita ühendust, madalat voolutarvet, suhteliselt suurt vahemaad ja võrguseadmete arvu. ZigBeega suhteliselt sarnane omaduste ja sobilike rakenduste poolest on 433 MHz transiiver seadmed.

Päikesesüsteemi mudeli ehitamisel otsustati kasutada ZigBeed, sest temaga on TÜ robotiklubi liikmetel ja töö autoril positiivsed kogemused, seda on lihtne kasutada ja seadistada. Kuigi Xbee on kallim kui näiteks ISM band transiiver seade RFM12b, ei ole vaja kulutada aega raadioside protokollide kirjutamisele ja sellega saab kokkuvõttes projekti kulusid vähendada. Samuti ei osutunud RFM12b kolmandiku võrra väiksemad mõõtmed piisavaks asjaoluks, et vahetada välja töötavat ja varem katsetatud raadiosidelahendust [12,13].

Standard	ZigBee® 802.15.4	Wi-Fi™ 802.11b	Bluetooth™ 802.15.1	433 MHz transiiver
Suurim tööraadius (meetrites)	100	1 – 100	1 – 10	200
Võrgu suurus (seadmete arv)	250	32	7	~250
Rakendus	Jälgimine ja juhtimine	Internet, video	Kaabli asendaja	Jälgimine ja juhtimine
Vahemälu suurus (KB)	4 – 32	1 000	250	2
Andmekanal (kb/s)	20 – 250	11 000	720	115,2

Tabel 4.1 ZigBee võrdlus levinud traadita võrgu standarditega

4.4 XBee™ ZigBee Moodul

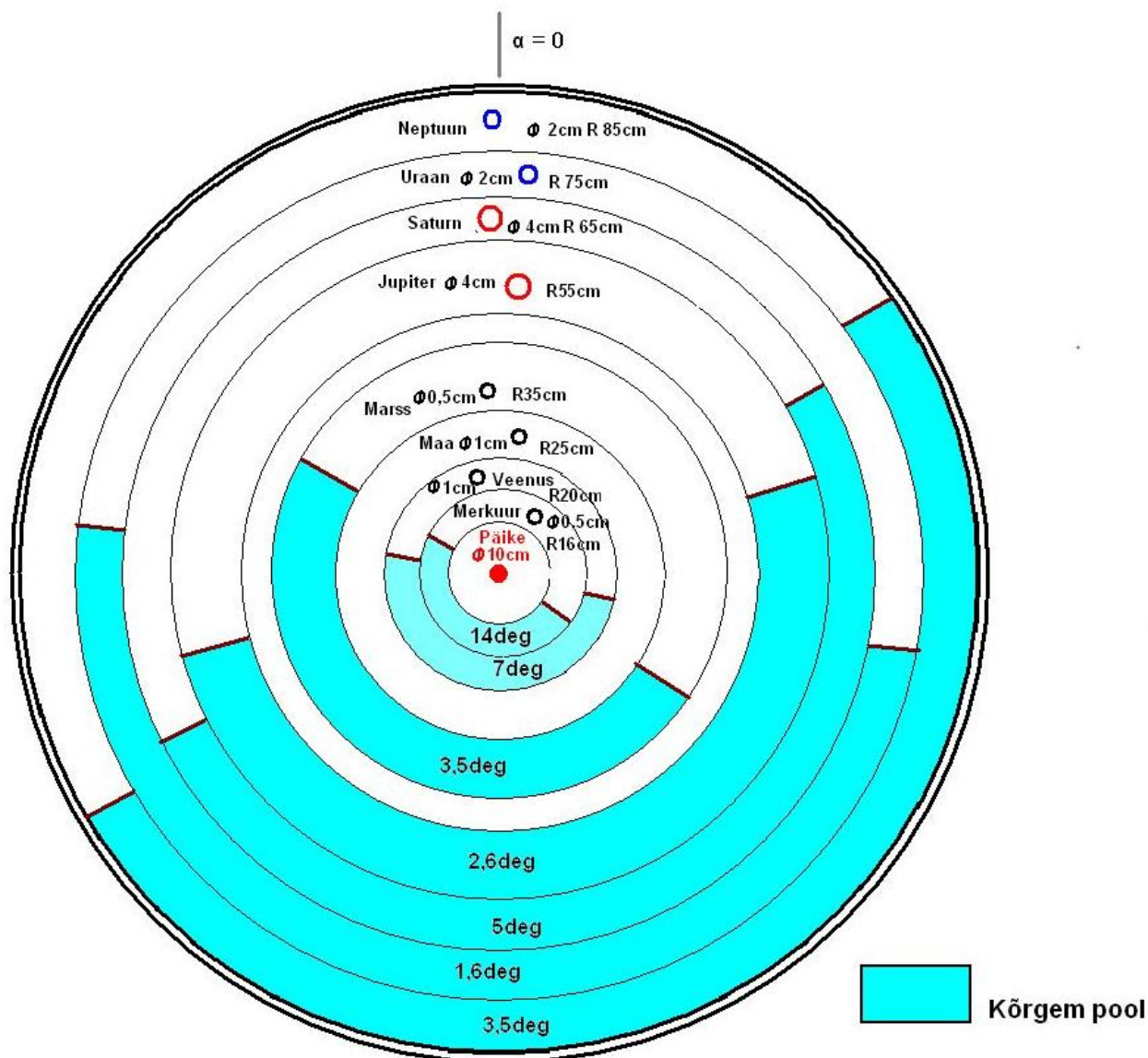
XBee on firma MaxStream toodetud ZigBee moodul, mida mudeli ehitamiseks kasutati. Katsetuste ajal osutusid XBee eelisteks töökindlus, seadistatavus, lihtsus ja madal voolutarve.

XBee lühiülevaade [13]:

- hind: 400 krooni,
- tööraadius kuni 100 meetrit,
- USARTi abil kergesti ühendatav 8-bitise Atmel mikroprotsessoriga ja/või arvutiga,
- kuni 250 seadet võrgutopoloogiat kasutamata,
- andmevahetuskirius kuni 250 kbps krüpteeritult,
- veakontroll: kordussaatmine ja saateraportid,
- voolutarve aktiivses olekus: 50 mA,
- voolutarve ooterežiimis: 100 µA,
- füüsilised mõõtmed: 2,44 cm x 3,29 cm.

5 Päikesesüsteemi mudeli tehnilised lahendused ja disain

Koostöös professor Alvo Aabloo, TÜ Robotiklubi ja TÜ tähetorniga arutati mitmeid erinevaid võimalikke projekti lahendusi. Pärast mõningast lisa uurimist ja katsetamist osutus parimaks võimalikuks ja kõige realistlikumaks lahenduseks ehitada Päikesesüsteemi mudel, kus mööda fikseeritud planeetide relsse liiguvad isehitatud vankrid (joonis 5.1). Iga vankri külge on kinnitatud temale vastav planeet, mille suurus ja värv on ette antud tellija poolt.



Joonis 5.1 Päikesesüsteemi mudeli parameetrid: planeetide orbiidid, orbiitide kalle ning asend, orbiitide raadiused ja planeetide suurus

5.1 Päikesesüsteemi mudeli komponendid

Päikesesüsteemi mudeli võib jagada järgmisteks alamosadeks:

- **Tugistruktuur** – Peamiselt mudeli liikumatud ja muutumatud osad: mudeli alusplaat, planeetide orbiidid, planeedid ja Päike.
- **Vankrid** – isehitatud vankrid, mis liigutavad vastavaid planeete.
- **Server** – keskne juhtimissüsteem (arvuti), mis jagab vankritele käske ja koordineerib süsteemi tööd ning omab kasutajaliidest.

Tehnilist lahendust välja töötades osutus, et tellijate soove pole võimalik täies mahus täita. Planeetide liikumiskiirusi tuli vähendada kaks korda, et mootorite kiirusest piisaks ja süsteem stabiilne oleks. Mudeli valmistamiseks kasutatud kohandatud parameetrid on tabelis 5.1, ülejäänud parameetrite muutmise ei osutunud vajalikuks ja nendega saab tutvuda tabelis 3.1.

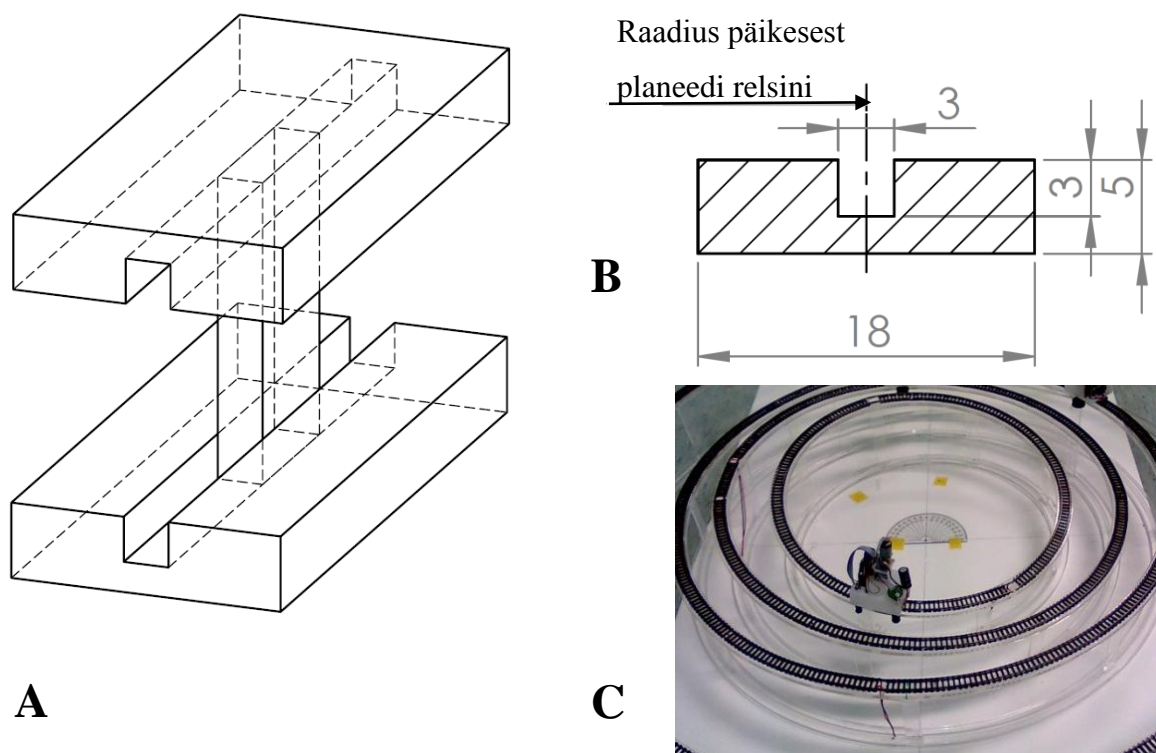
Tegelikud võimalused:								
Planeet	Merkuur	Veenus	Maa	Marss	Jupiter	Saturn	Uraan	Neptuun
Vedava ratta ümbermõõt (cm)	5,18	4,71	4,71	4,71	4,71	4,71	4,71	4,71
Orbiidi sisemine ümbermõõt (cm)	100,5	138,2	169,6	232,5	358,1	421,0	483,8	546,6
Mootori pöördeid minutis	350,0	350,0	350,0	350,0	350,0	95,0	95,0	95,0
Mootori pöördeid sekundis	5,83	5,83	5,83	5,83	5,83	1,58	1,58	1,58
Kiirus cm/s maksimaalne	30,24	27,49	27,49	27,49	27,49	7,46	7,46	7,46
Periood T2 (s, seismiste režiim)	4,82	12,24	20,00	37,60	237,20	589,00	1680,00	3296,00
Kiirus @ T2 (cm/s) (ideaalne)	22,16	11,81	8,80	6,35	1,54	0,73	0,29	0,17
Periood T1 (s, väliste režiim)	1,4	3,7	6,0	11,3	71,2	176,7	504,0	988,8
Kiirus @ T1 (cm/s)	73,87	39,36	29,32	21,17	5,12	2,42	0,97	0,56

Tabel 5.1 Päikesesüsteemi mudeli valmistamisel kasutatud tehnilistele võimalustele kohandatud parameetrid.

5.2 Tugistruktuur

Mudeli liikumatud ja muutumatud osad (mudeli alusplaat, planeetide orbiidid, planeedid ja Päike) moodustavad mudeli tugistruktuuri. Mudeli alusplaadiks valiti tumedat värvi 20 mm paksune vineerplaat mõõtmetega kaks korda kaks meetrit. Alusplaadi mõõtmed tulenevad lähteandmetest ja tellijapoolsest soovist, et mudel oleks transportitav. Kuna mudel ei karda väljalülitatud olekus kallutamist ja külje peale keeramist, on vastavate mõõtmetega mudelit võimalik transportida, ning mudel mahub keskmise suurusega tuppa ning on vajadusel mikrobussiga transportitav.

Aluse peale on kruvidega kinnitatud planeetide relsid ja tsentrisse Päike. Päike on 10 cm suurusega kera. Päikese ja planeetide keskkoha keskmine kõrgus alusplaadi tasandist on 25 cm. Planeete tähistavad peenikese (2 mm) varda otsa kinnitatud värvilised kerad. Varras kinnitub vankri keskkoha ja vankri liikumise tulemusena liiguvad ka planeedid. Planeetide relsid moodustavad läbipaistavast polükarbonaadist välja lõigatud kaks ringi, mis on omavahel kinnitatud erineva pikkusega postide abil (joonis 5.2). Postide ja ringide vaheline kinnitus on lahendatud spetsiaalse polükarbonaadi liimi kasutamisega.



Joonis 5.2 A - relsi väljalõige, B - planeedi relsi moodustava ringi läbilõige, C - sisemiste planeetide relsid kinnitatuna alusele.

Planeetide relsside ringid telliti ettevõttest Meteci Valduse OÜ, kus need valmistati automaatpingis laserlõikuriga. Vaheühendused valmistati käsitsi TÜ Tehnoloogiainstituudi mehaanika labori käsifreespinki kasutades. Iga planeedi relsil asub üks infrapuna valgusdiiod, millest üle sõites saab vanker parendada oma asendi infot ja tuvastada absoluutset asendit relsil. Infrapuna diiodi asukoht pole oluline, selle asend on määratav vankri tarkvaras vastavate konstantidega.

Pealmisele relsi ringile on kinnitatud kahepoolse teibiga mudelraudtee relss, mille abil toimub energia ülekanne planeete liigutavaile vankritele. Päikesepoolne toiterada on ühendatud toiteploki miinusklemmiga ja välimine rada on ühenduses toiteploki +12 V väljundiga. Ühendus on realiseeritud eri värvi juhtmete abil, mis ühenduvad teiste planeetide vastavate juhtmetega kokku alusplaadi all ning toiteploki tuleb ühendada ainult üks peamine punane (plussklemm) ja üks must juhe (miinusklemm). Toiteploki kasutatakse labori tingimustes testimisel muudetava väljundpingega ja väljundkoormuse piiranguga labori toiteploki. Väljaspool laborit kasutamiseks ostetakse eraldi toiteplokk, mille parameetrid peavad olema: alalispinge +12 V; väljundvool 5 A või –võimsus 60 W; toiteplokk peab olema stabiliseeritud väljundiga.

5.3 Vanker

Süsteemis on kokku kaheksa liikuvat vankrit, üks iga planeedi jaoks. Vanker koosneb kolmest suuremast osast: mehaanika, elektroonika ja programm. Detailsed mehaanika ja elektroonika joonised leiab töö lisast 1.

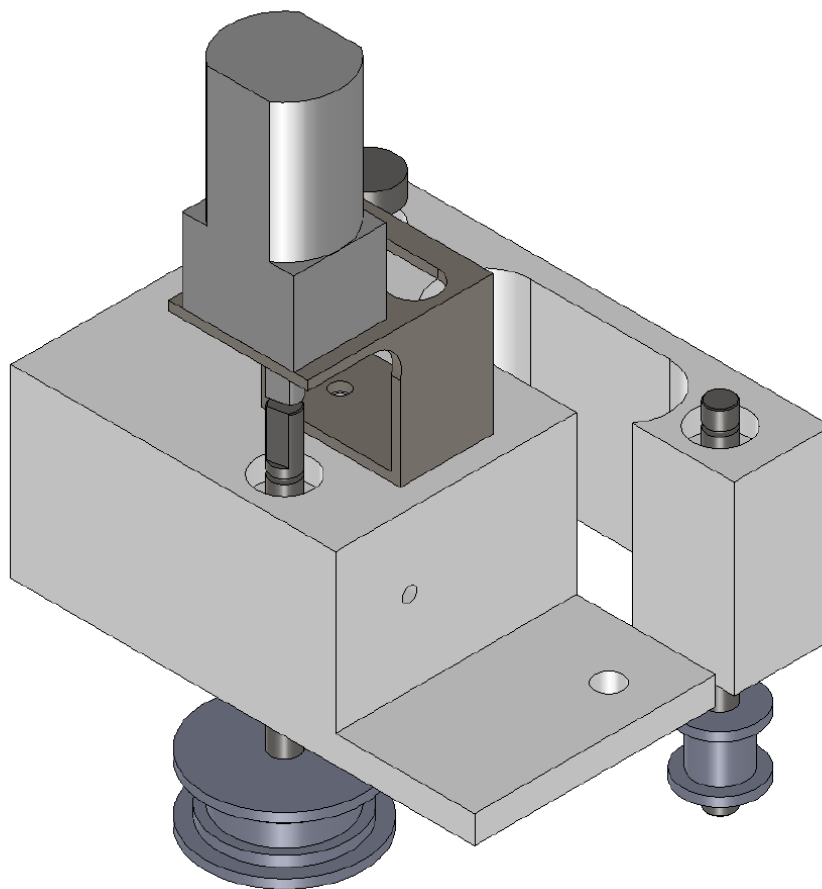
5.3.1 Vankri mehaanika

Vankri mehaanika lahenduse välja töötamine, katsetamine ja realiseerimine osutus esialgsest hinnangust oluliselt keerukamaks ja sellest tulenevalt on projekti valmimine viibinud. Osutus, et Tartu Ülikooli robotiklubi meeskonnal sarnaste lahenduste mehaanika kogemused puuduvad, millest tulenevalt ei olnud võimalik ideede teostatavust ja kasutavust hinnata ilma igat lahendust eraldi katsetamata. Disainimisel esinenud suuremad probleemid olid: relsi ringi erinevus ideaalsest ringist (ebareeglipärasus); rataste haardumine ja kinnitumine orbiidile; energia ülekande raudteelt vankrile ja suuruse kitsendused. Lõpplahendus tuli aga autori arvates hea ja edasi kirjeldame pideva parendusprotsessi toimetel valminud mehaanika lõpp-lahendust. Vankri disainimisel kasutati programmi SolidWorks Premium 2009. Joonisel 5.3

on näha roboti 3D mudel ja joonisel 5.4 on näha illustreerivat koostejoonist roboti mehaanikast ilma elektroonikata.

Vankri mehaanika koosneb kerest, mootori kinnitusest, kolmest teljest ja telgedele kinnituvatest ratastest. Vankri paneb liikuma üks mootor, mis on kinnitatud võlli otsa muhviga. Kere on valmistatud käsifreespingil valgest polükarbonaadist. Kere välimisse külge on tehtud sisselõige nii, et allesjäänud 2,5 mm sein töötab vedruna ning koos ratastel olevate kummirõngastega aitab tasakaalustada orbiitide ebareeglipärasust. Kere ülemisse ja alumisse külge on tehtud sisselõiked kuuele kuullaagrile, millele kinnituvad kolm võlli.

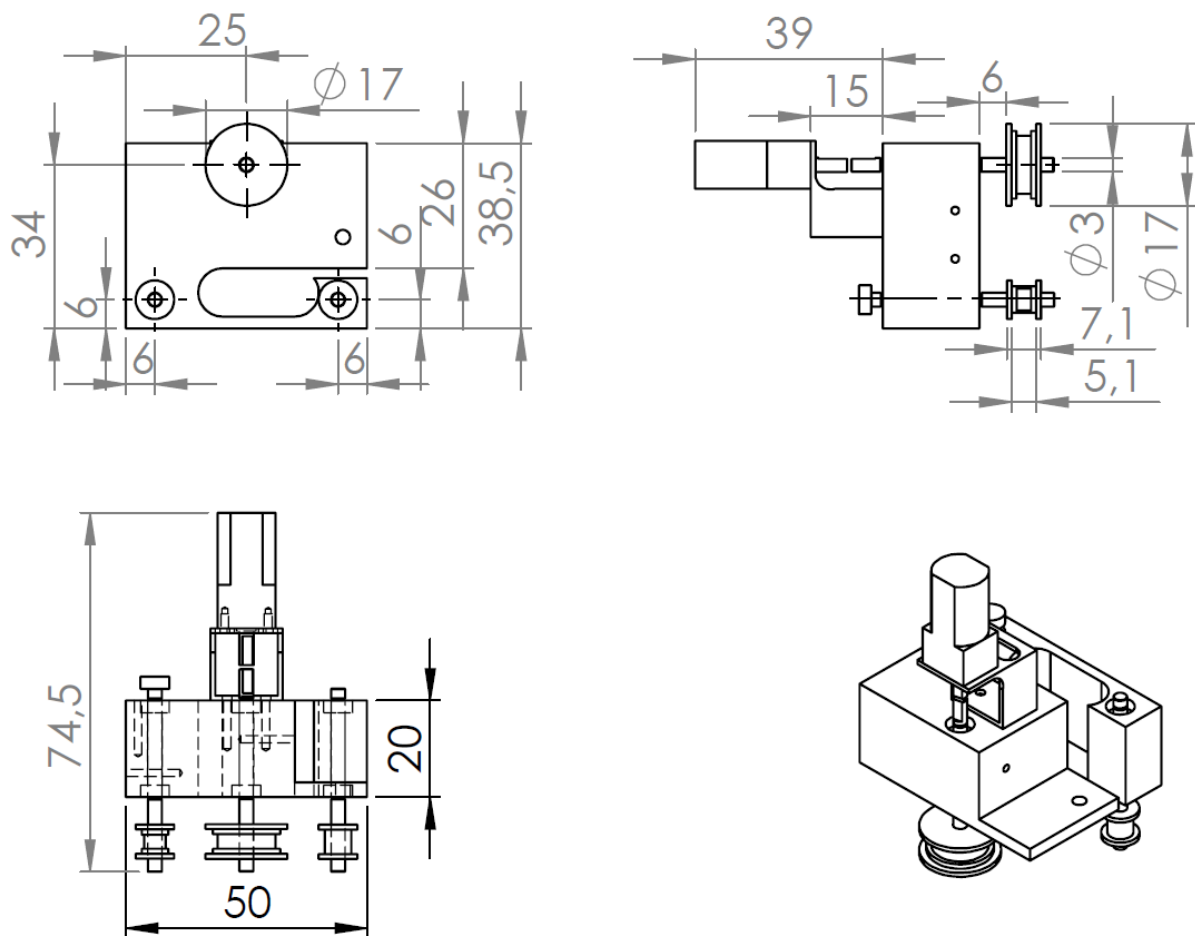
Võllid on valmistatud 3 mm kalibreeritud terasest ja neil on kaks üksteisest 20,5 mm kaugusel olevat treitud sisselõiget, kuhu kinnitub telgi paigal hoidev stopperrõngas. Telgede alumisse otsa kinnituvad kolm erinevat ratast, millest suurim on veoratas, mis asub relsist seespool. Väljaspool asuvatest üks on kasutusel asendi tagasiside saamiseks ja teine on toetava funktsiooniga. Tagasisideks on võlli ülemisse otsa kinnitatud 6 mm diameetriga 2,5 mm kõrgune vertikaalne polarisatsiooniga silindermagnet, mida kasutatakse magnetanduri lugemite saamiseks.



Joonis 5.3 Vankri mehaanika disaini 3D mudel

Magnetanduri kinnitamiseks on kasutatud keermestatud roostevabast terasest M2 mõõdus keermelatti ja M2 mutreid. Roostevaba lati eeliseks tavaterasest poldi või keermelati ees on asjaolu, et roostevaba metall ei ole kergesti magnetuv ning ei sega magnetanduri tööd ega takista tagasiside magneti vaba liikumist. Vankri liigutamiseks on kasutusel 12 V alalisvoolu mikromootor, millel on 1:50 ülekanne. Maksimaalse efektiivsuse juures on selle väljundkiiruseks 350 min^{-1} . Mootori edasimüüjaks Euroopas on firma Precision Microdrives [14]. Mootori kinnitamiseks on disainitud spetsiaalne detail, mis kinnitub kere külge kahe M2 x 6 mõõdus ümarpeakruviga. Kõigi keermestatud avade, poldide ja keermelattide juures on kasutatud paremkeeret.

Vankri põhja alla kinnituvad vasest liugkontaktid, mille sädelemise vähendamiseks ja kompenseerimiseks on vankrile paigaldatud 1 mF mahtuvusega 25 V nimipingega kondensaator. Veel kinnitub kere tagumisse otsa (arvestades roboti liikumise suunda) elektroonikaplaat, mis kinnitub ühe M2 x 6 kruviga.



Joonis 5.4 Vankri koostejoonis, mõõdud informatiivsed.

5.3.2 Vankri elektroonika

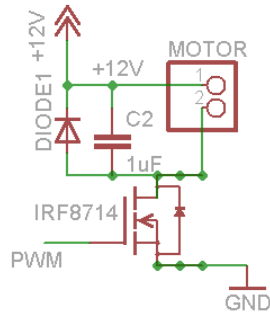
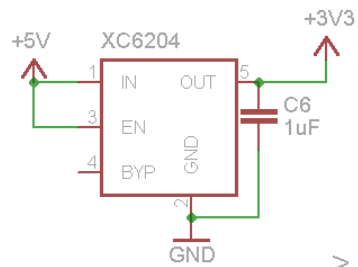
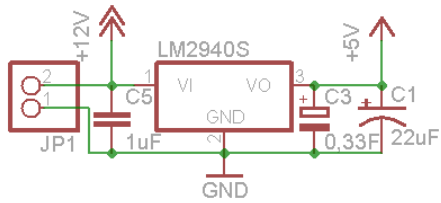
Vankri elektroonika disainimisel on silmas peetud suuruse piiranguid, madalat energiatarvet, suurt töökindlust ja odavat hinda. Vankri elektroonikat kirjeldab joonis 5.5, disainitud trükkplaati joonis 5.6 ning kasutatud komponentide nimekiri on lisa 2. Vankri elektroonika on disainitud programmiga EAGLE (Kasutatud versioon: Version 5.6.0 for Windows, Light Edition). Vankri elektroonika koosneb viiest suuremast osast: toitest, keskne mikroprotsessor, Xbee raadioside moodulist ehk ZigBee'ist, mootori kontrollist (IRF8714) ja magnet anduri pistikust (PRGM_CON). Vankri elektroonika toite sisendiks on +12 V alalispinget vankri liugkontaktidelt.

Sisendpingega toidetakse läbi väljatransistori IRF8714 mootorit [15]. Sisendpinge muundatakse DC/DC muunduriga LM2940 +5 V pingeks, mida kasutab suurem osa elektroonikast. +5 V toitele on paigaldatud mitu väikest pinget stabiliseerivat 0,1 μ F ja 1 μ F suurust kondensaatorit ja üks suurem 0,33 F suurune tagavara kondensaator. Lisaks muundatakse +5 V pinge omakorda Xbee raadiomoodulile +3,3 voldini, sest raadiomoodul ei tööta +5 V pingega. Maaühendus on kõigil pingetel ühine.

Arvutuskeskusena on kasutatud mikroprotsessorit Atmega88, mis on piisavalt väike, lihtsa arhitektuuriga, piisava funktsionaalsusega, madala voolutarbega ja mõistliku hinnaga [16]. Atmega 88-s töötav programm kontrollib kõigi väliste andurite tööd. Atmegaga on ühendatud fototransistor, väline valgusdiod (skeemil LED1), Xbee raadioside moodul, mootori kontroll transistor ja väline resonator. Atmega töötab välise resonatori sagedusel, milleks on valitud 20 MHz (skeemil RESON). Fototransistor kontrollib orbiitidel asuvate infrapuna valgusdiodide abil vankri absoluutset positsiooni. Fototransistor ühendub kontaktidesse JP3 ja on ühendatud kasutades lüliti režiimi ja ühiskollektoriga võimendi ühendust (switch mode; common-collector amplifier). Fototransistori PT204 emitter on läbi 5,6 $k\Omega$ takisti (skeemil R2) ühendatud maa kontaktiga ja kollektor on ühendatud +5 V [17].

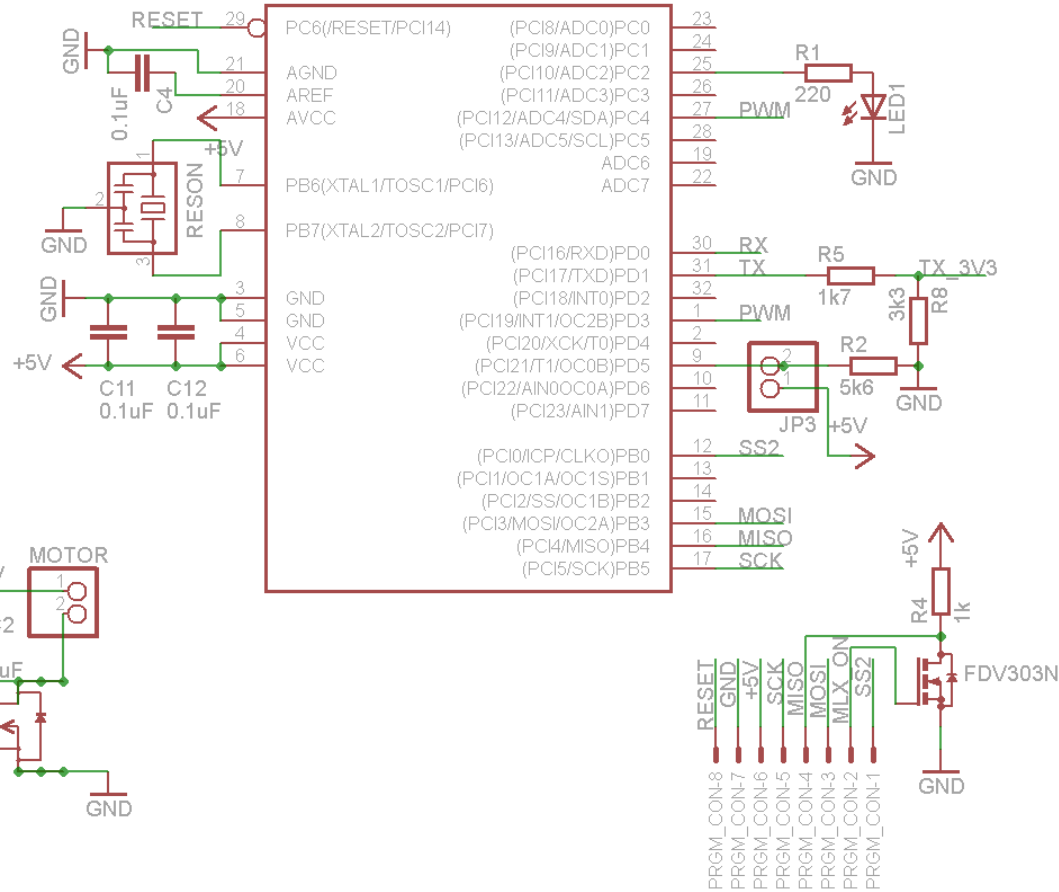
Xbee raadioside moodul kasutab + 3,3 V pingeniivoosid. Selleks on takistite R5 ja R8 abil koostatud pingejagur, mis alandab Atmega USART liidese väljundsignaali korrektsetele niivoodele. Vastupidine pingemuundamine pole vajalik, kuna Atmega loeb sisendsignaali üle 2,7 V loogiliseks üheks. Xbee raadiosidemoodul on ühendatud veel toite ja miinusjuhtmetega.

Toide

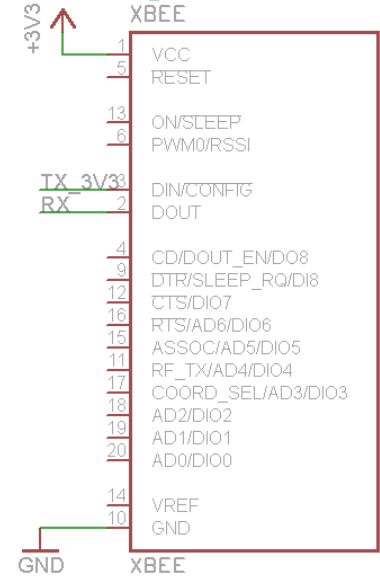


Mikroprosessor

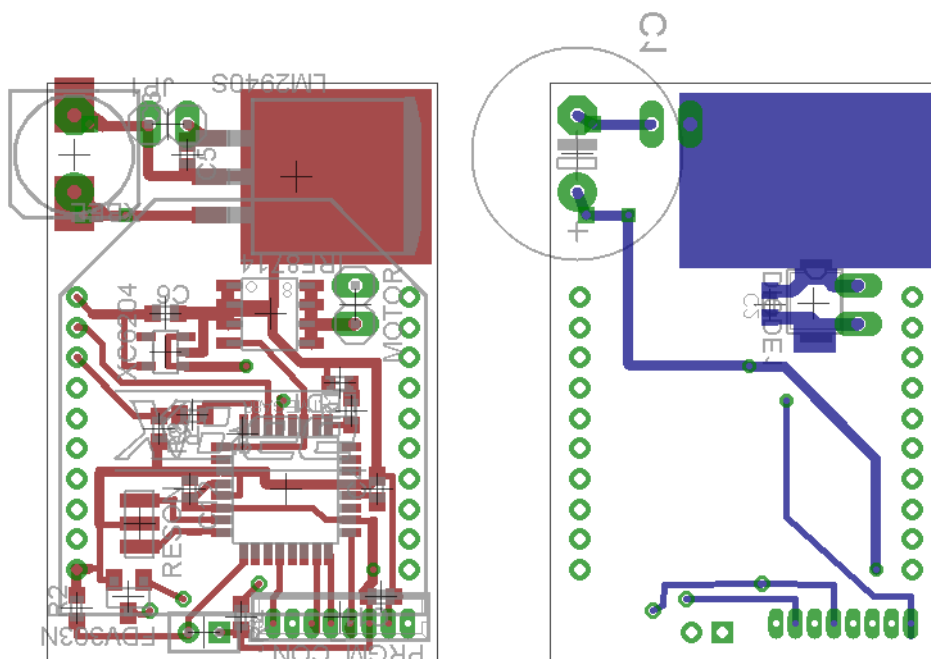
ATMEGA88-20A



ZigBee



Joonis 5.5 Vankri elektronika skeem



Joonis 5.6 Disainitud trükkplaat, vasakul pealne kiht (top) ja paremal alumine kiht (bottom).

5.3.3 Vankri tarkvara

Programmi kirjeldav diagramm on näha joonisel 5.7 ja 5.8. Programmi täitmine algab momendil kui Atmega88 saab toite ja lõpetab esmase riistvara seadistamise. Esimesena lülitatakse välja mittekasutatavad liidesed (TWI ja ADC), et vähendada Atmega88 volutarvet. Lisaks lubatakse ühendamata viikudel *pull-up* takistid. Järgmisena initsialiseeritakse USART - seatakse paika XBeega ühendamise parameetrid ning saatmise ja vastuvõtmise puhvrid. Veel tuleb seadistada taimerid (sisemised kellad), timer0 on kasutusel koordinaadi arvutamisel (coord.c) ja timer2 on kasutusel mootorile PWM-i tekitamiseks. PCINT katkestus registreerib signaali muutuse jalal PD5, mis annab märku absoluutse asukoha tuvastamiseks ja korrigeerimiseks. Viimase asjana lubatakse katkestused ja siirdutaks peatsüklisse (*main loop*). Programmi edasine täitmine seisneb peamiselt peatsükli sisu kordamises, kontrollimises, kas vahepeal on midagi muutunud, ja muutustele reageerimises.

Koodi kirjutamisel on katkestusi teenindavad programmid üritatud hoida võimalikult lühikesed ja enamasti toimub katkestuste käigus ainult muutujate väärtustamine, mida peaprogramm hiljem kontrollib. Sellega tagatakse, et aeg, mille jooksul katkestustele reageerimine on keelatud, on minimaalne. Katkestusi on üritatud kasutada võimalikult palju, et tagada kiire reageerimine muutustele. Neid kasutatakse absoluutse positsiooni tuvastamisel

(PCINT katkestus), andmevahetuseks (USART ja SPI) ning kindla perioodiga tegevuste kordamiseks (timerid ja PWM). Kuna Atmega toites võib esineda ebastabiilsusi, mida põhjustab enamasti liugkontaktide halb ühendus, kasutatakse pingelanguse tuvastust (*brownout*), et vajadusel tarkvaraliselt programm alglaadida.

Koodile seab lisanõudeid asjaolu, et mudelis peavad olema kõik kaheksa vankrit võimelised tegutsema sünkroniseeritult ning juba ühe vankri rike segab oluliselt süsteemi väljundit ja vaadatavust. Selle olukorra tuvastamiseks ja parandamiseks on kasutusel valvetaimer (*watchdog*), mis kontrollib, et programm on tähtjaks tegevused lõpetanud.

5.3.4 Peatsükli sooritavad kontrollid

Programmi täitmine seisneb peamiselt peatsükli sisu kordamises ehk kontrollimises, kas vahepeal on midagi muutunud, ja muutustele reageerimises. Peatsükli sooritatakse valvetaimeri nullimine ja kaks kontrolli (joonis 5.7):

Kas on uus magnetanduri näit?

Timer0 on seadistatud esile kutsuma magnetanduri näidu lugemist 61 Hz sagedusega. Magnetanduri näidu lugemiseks alustatakse SPI katkestuste jada, mis võtab aega kuus SPI katkestust. Eduka näidu lugemise korral salvestatakse magnetanduri näit globaalsesse muutujasse ja väärtustatakse muutuja, mis ütleb, et on uus magnetanduri näit. Uue magnetanduri näidu korral kutsutakse peatsükli esile esiteks koordinaatide arvutamise funktsioon ning seejärel PID arvutamine.

Koordinaadi arvutamise juures tehakse sisemise koordinaadi (suhteline koordinaat, magnetanduri lugem) ja välimise koordinaadi (absoluutne koordinaat, fototransistori lugem) vaheline tasearveldus (*translation*), et sisemise koordinaadi parandus välimise koordinaadi järgi toimiks sujuvalt. Välist koordinaati muudetakse PCINT katkestuse abil ja selle väärtustamine toimub sõltumatult muu koodi tööst. PID algoritm kontrollib kõigepealt, kas liikumine ehk PID on üldse lubatud. Kui on lubatud, arvutatakse liikumisfunktsiooni põhjal soovitud asukoht järgmisel ajahetkel, arvutatakse selleks vajalik PWMi täituvus ning väärtustatakse vastav parameeter PWMi kella juures.

Kas server on midagi öelnud?

Kontrollitakse, kas server on vahepeal käsklusi jaganud, ning eduka kontrolli korral sooritatakse käsklusele vastav tegevus. Vanker tunneb järgmisi käsklusi: hakka liikuma (G),

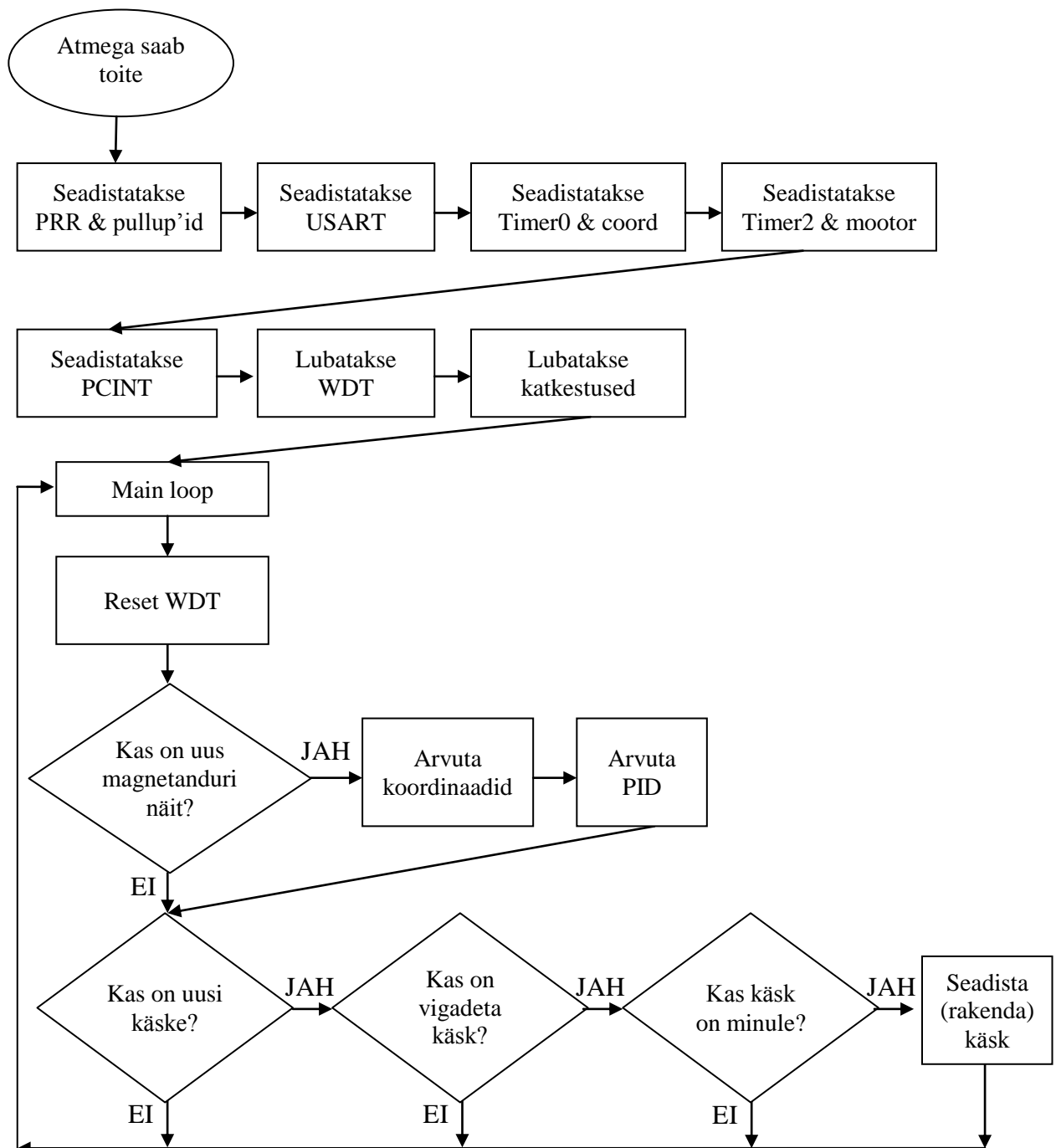
peatu (S), liikumise kiiruse seadistamine (V), sihtpunkti seadmine (T). Raadiosidest tulenevate vigade parandamiseks ja tuvastamiseks ei eeldata andmete terviklikku kohalejõudmist ja tervikpakettide analüüsi. Kogu vastuvõetud andmejada sirvitakse läbi ja otsitakse käsu muustrile vastavat jada.

Käsu muster algab baidiga 0x55, millele järgneb aadressibait 0x00-0xFF, kus madalaim bitt vastab Päikesepoolseimale planeedile (Merkuur) ja kõrgeim bitt kaugeimale (Neptuun) (tabel 5.2). Edasi saadetakse käsu identifikaator, milleks on ASCII tähemärk G, S, V või T, millele järgneb 2 baidine käsuparameeter. Käsk lõppeb baidiga 0xAA. Labori tingimustes katsetamiseks pole osutunud otstarbekaks kasutada paarsusbaiti käsu lõpus, mille kasutamisel oleks võimalik tuvastada ka bitivigu. Hetkel pole bitivigade esinemist tuvastatud, kuid vajadusel saab vastava kontrolli lihtsasti koodi lisada.

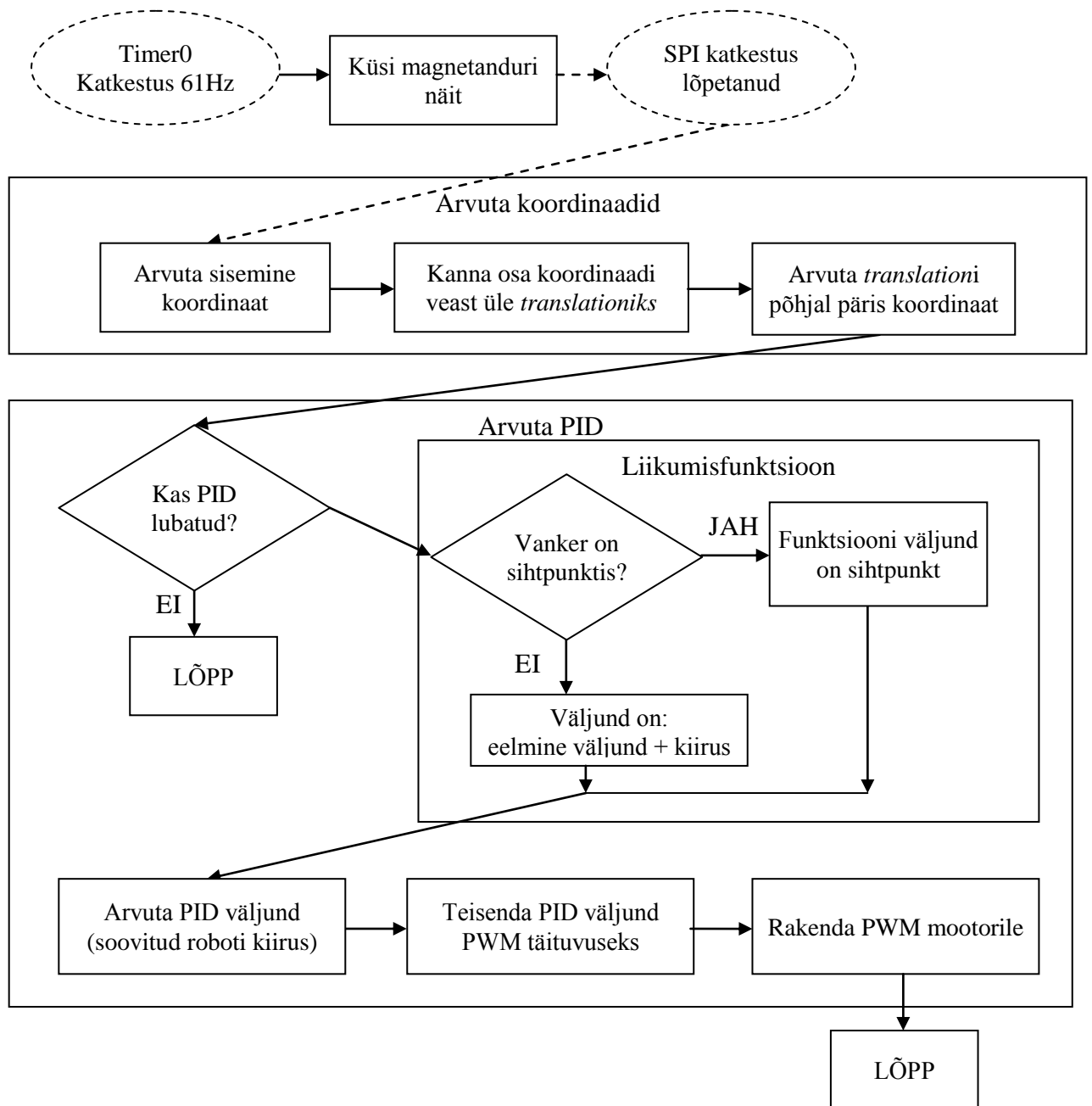
Sõida (kõik)	0x55	0xFF	0x47	0xFF	0xFF	0xAA
Peatu (4 sisemist)	0x55	0x0F	0x53	0xFF	0xFF	0xAA
Maa kiiruse seadmine	0x55	0x04	0x56	0x00	0x4F	0xAA
Jupiter nurga seadmine	0x55	0x10	0x54	0x01	0xFF	0xAA

Tabel. 5.2 Serveri poolt saadetavate käskluste näide.

5.3.5 Vankri programmi kirjeldav diagramm



Joonis 5.7 Vankri programmi üldine struktuur.



Joonis 5.8 Vankri koordinaadi määramine ning soovitud asendi ja liikumise arvutamine

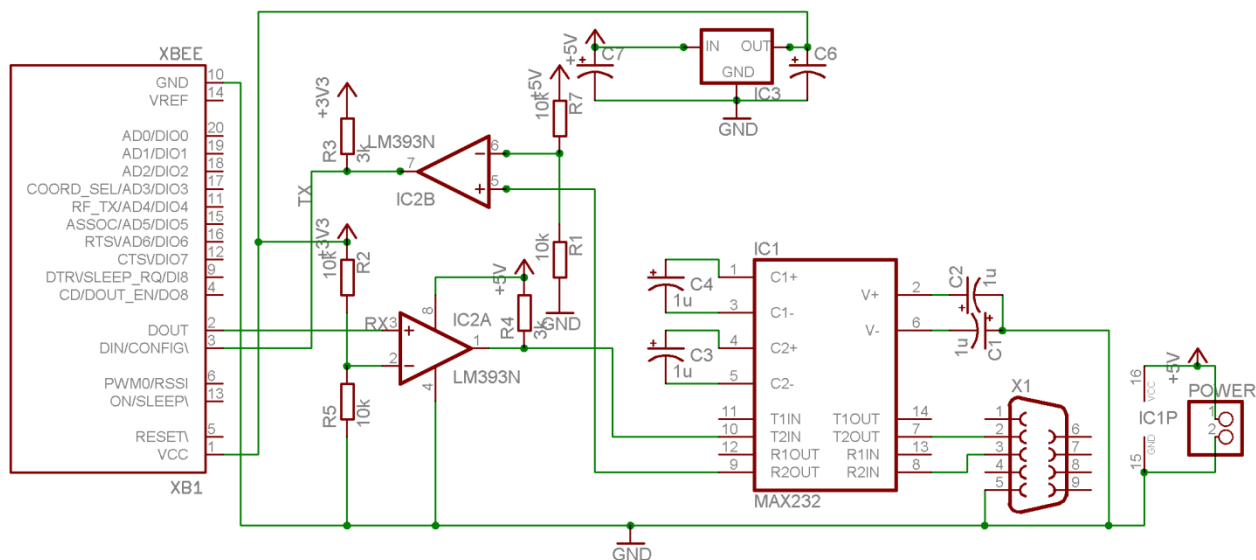
5.4 Server

Serveriks sobib iga kaasaegne arvuti, millel on taktsagedust vähemalt 1 GHz, graafikamälu 128 MB ja omab kahte vaba USB liidest. Soovituslik operatsioonisüsteem on Ubuntu, kuid sobivad ka muud Linuxi distributsioonid. Projekti testimisel kasutati arvutina Asus Eee PC 900 sülearvutit ja Ubuntu 8.04 operatsioonisüsteemi. Serveriga tuleks ühendada spetsiaalne USB porti ühenduv lisaseade, mis võimaldab raadiosidet vankrite ja serveri vahel. Lisaks valmib serverile spetsiaalne tarkvara, mis vastab projektis esitatud nõuetele. Serveri tarkvara disainis ja kasutajaliidese kavandas Alo Peets ning Jüri Aedla realiseerib vastavad lahendused C programmeerimiskeeles.

5.4.1 Serveriga ühenduv USB andmesidemoodul

Vastuvõtja kõige olulisem komponent on ZigBee moodul XBee, mille ülesandeks on tagada kahepoolne side vankritega ja see esitada digitaalsel kujul (USART standardile vastavalt). Kuna XBee kasutab pingeniivoosid vahemikus 0-3,3 V, aga arvuti COM pordi standard RS-232 kasutab kõrgemaid pingeniivoosid on vaja kasutada nivoo muundamisi. Kõigepealt muundame pinge amplituudi +3,3 V pealt +5,0 V-ni. Selleks kasutame komparaatorit LM393N. Edasi kasutame mikroskeemi MAX 232, mis teeb vajalikud muundamised, et signaal oleks ühenduv arvutiga. Kuna COM port on suhteliselt lihtne ja töökindel liides, aga enamikul kaasaegsetel arvutitel vastav liides puudub, on vastuvõtja sisse peidetud ka firma Aten *USB-to-serial* üleminek. Joonisel 5.9 on näha vastuvõtja elektroonikaskeem ilma *USB-to-serial* üleminekuta.

Töö autor on teadlik ka mikroskeemidest, mille korral ei ole nii palju komponente vaja, kuid vastav lahendus on korduvalt TÜ Tehnoloogiainstituudis kasutatud ja testitud, ning näiteks seade MM232R kasutati ja testiti aine LOFY.03.033 Robotika praktikum raames korduvalt ja enamikel juhtudel osutus seade ebausaldusväärseks. Peamiseks mureks osutus signaali hilistumine, mis tekitas häireid andmevahetuse kiiruses, ja lisaks esinesid bitivead muundamistel. Lisaks osutus eelneva lahenduse kasuks asjaolu, et komponendid olid kõik laboris olemas.



Joonis 5.9 Vastuvõtja elektroonikaskeem

5.4.2 Serveri tarkvara

Serveri tarkvara ei ole töö kirjutamise hetkel veel valmis ja sellest tulenevalt on see osa pigem teoreetiline lahendus. Arvestades asjaolu, et mudel peab olema võimeline töötama iseseisvalt muuseumi eksponaadina ja samuti võimaldama sooritada muid keerukamaid ülesandeid ja funktsioone, siis valmib serveri tarkvarale kaks kasutajaliidest. Hetkel on valmis disain muuseumi eksponaadina kasutamiseks (joonis 5.10). Kõrgetasemelisema kasutajaliidese juurde peaksid tulema võimalused sättida planeetide liikumise kiirust, rohkem eelnevalt salvestatud kuupäevi ja võimalus juhtida planeete ükshaaval või väiksemate gruppina. Täpsed funktsioonid ja lahendused tuleb veel tellijaga läbi rääkida, kui on teada lõpliku riistvara võimalused ja täpsus.

Muuseumi eksponaadi kasutajaliides on disainitud eeldusega, et see oleks kasutatav ka ilma klaviatuuri ja hiireta, mida asendaks näiteks spetsiaalne puutetundlik ekraan, mille ostmine ja tehniline lahendus ei kuulu vastava projekti raamesse. Klaviatuuri peitmine lõppkasutaja eest tagab süsteemi piiratud kasutamise ja ei võimalda neil süsteemi rikkuda. Seni saab kasutada ja testida vastavat kasutajaliidest hiire abil. Lisaks on üritatud kasutajaliides hoida minimalistlikuna, et mitte ajada kasutajat segadusse erinevate nuppudega.

Kõigepealt peaks kasutaja sisestama soovitud kuupäeva ja soovi korral ka kellaaja, kuigi enamikel juhtudel ei muuda kellaaja sättimine eriti mudeli väljundit. Nende mitte sisestamisel ja programmi esmasel käivitamisel valitakse sisendiks hetke kuupäev ja kellaeg. Sisestamiseks saab kasutada kerimise nuppe või klaviatuuri. Kuupäeva kinnitamiseks peaks kasutaja vajutama nupule „VÕTA VALITUD KUUPÄEVALE VASTAV ASEND“, mille

peale mudel võtab vastava planeetide seisu. Kui kasutaja soovib, võib ta sisestada järgmise kuupäeva, samuti võib ta valitud planeetide seisust alustades käivitada planeetide liikumise, mille korral planeedid sõidavad oma orbiidil. Maa perioodiks on valitud 20 sekundit ja ülejäänute perioodid arvatud vastavalt. Planeetide orbiidil liikumise ajal kuvatakse kuupäeva lahtrites vastavat kuupäeva ja kellaaja lahtrites on 00:00. Nupu „PEATA PLANEEDID“ abil saab peatada planeetide liikumise. Lisaks on kasutajaliideses olemas kolm nuppu, mille vajutamise korral süsteem peatab poolelioleva tegevuse ja võtab sisse vastava planeetideasendi.

VALI KUUPÄEV ja KELLAAEG

AASTA ↑ 2010 ↓ KUU ↑ 05 ↓ PÄEV ↑ 03 ↓ TUND ↑ 12 ↓ MINUT ↑ 00 ↓

VÕTA VALITUD KUUPÄEVALE VASTAV ASEND

NÄITA PLANEETIDE LIKUMIST ORBIIDIL

PEATA PLANEEDID

TÄNANE PLANEETIDE ASEND **J2000 (MILLEENIUMI) ASEND** **(VABA)**

Joonis 5.10 Serveri tarkvara muuseumi eksponaadina kasutamise kasutajaliides.

6 Planeetide asukoha arvutamine

1563. aastal, jälgides Jupiteri ja Saturni kohtumist taevaotuses, märkas noor astronoom Tycho Brahe, et astroloogilistes tabelites on planeetide liikumine kirjeldatud vigaselt. Soov tabeleid parandada viis Brahe aastatepikkuste taevavaatluste juurde. Kolmkümmend aastat kestnud tolle aja kohta ülitäpsete planeedivaatluste tulemused parandas ta oma õpilasele Johannes Keplerile. 1609. ja 1619. a. ilmunud teostes "*Astronomia Nova*" ning "*Harmonica Mundi*" formuleeris Kepler (1571 - 1630) planeetide liikumise kolm seadust [18]:

1. Planeedi liikumistee (orbiit) on ellips, mille ühes fookuses on Päike.
2. Planeedi raadiusvektor (lõik Päikesest planeedini) katab võrdsetes ajavahemikes võrdsed pindalad.
3. Planeetide tiirlemisperioodide ruudud suhtuvad nagu nende orbiitide pikemate pooltelgede kuubid.

Planeetide liikumine koosneb kahest komponendist: pöörlemine ümber oma telje ning tiirlemine ümber Päikese, mis peamiselt muudab planeedi asendit orbiidil. Planeetide tiirlemise määrab peamiselt Päikese gravitatsiooniväli.

Planeedi orbiidi ja asukoha määramiseks on vaja kuute parameetrit, millega on võimalik täielikult kirjeldada ringi-, ellipsi- ja hüperpoolikujulisi orbiite [19]. Orbiidi suuruse ja planeedi asukoha määravad: keskmine kaugus tsentrist (tähis - a , ühik - AU, *mean distance*), ekstsentrilisus (tähis - e , ühik - AU, *eccentricity*) ja keskmine kaugus (tähis - L , ühik - deg, *mean longitude*). Orbiidi asendi ruumis määravad ülejäänud kolm: kalle (tähis - i , ühik - deg, *inclination*), tõususõlme ekliptiline pikkus (tähis - Ω , ühik - deg, *longitude of ascending node*) ja periheeli pikkus (tähis - w , ühik - deg *longitude of perihelion*) [20, 21]. Vastavad parameetrid on ajas muutuvad ning nad esitatakse kokkulepitud ajamomendi (epohhi) suhtes. Käesolevas projektis valiti epohhiks J2000 ehk 1. jaanuar 2000. a. kell 12.00 maailmaaja järgi. Planeetideseisu arvutamiseks kasutatud andmed pärinevad NASA JPL veebilehelt (lisa 3) [22].

Lihtsama arvutamise eesmärgil on projektis valitud ekliptika tasanadiks Maa orbiidi tasand, koordinaadisüsteemi alguspunktiks Päike ja fikseeritud suunaks Maa kevadpunkti ehk tõususõlme ekliptiline pikkus epohhis. Järgmisena tuleks paigutada orbiidid ruumi. Igal orbiidil tuleks leida nüüd ekliptika tasandi suhtes tõususõlm ning siis seada õigeks nurk Maa kevadpunkti ja tõususõlme vahel (tõususõlme pikkus). Periheeli pikkus näitab nurka ekliptika

tasandil fikseeritud suuna ja planeedi orbiidi tasandil asuva periheeli vahel. Murdepunktiks on valitud tõususõlm. Planeetidel on vankrite null-kohaks vastava planeedi periheel. Arvestades, et kaldenurgad on väikesed saame matemaatiliselt liita-lahutada eri tasanditel olevaid nurki. Kepleri seadusi aluseks võttes saame planeedi asendit orbiidil kirjeldada kui funktsiooni ajast.

6.1 Protseduur, kuidas arvutada heliotsentrilisi polaarkoordinaate

1. Leia Juuliuse päeva number T.
2. Leia mitu sajandit on möödas valitud epohhist, J2000 korral saame:

$$cy = \left(\frac{T_{\text{epohh}} - 2451545,0}{36525} \right).$$

3. Arvuta planeedi orbiiti ja asendit iseloomustavad korrigeeritud elemendid $x = x_0 + \Delta x * cy$,

kus x on parandatav muutuja, näiteks Marsi korral oleksid valemid

$$\begin{aligned} \text{➤ } e &= 0,09339410 + 0,0000788 * cy \\ \text{➤ } w &= -23,9436295 + 0,4444108 * cy \\ \text{➤ } L &= -4,55343205 + 19140,303 * cy. \end{aligned}$$

4. Arvuta keskmine anomaalia (*mean anomaly*)

$$M = L - w + b * T^2 + c * \cos(fT) + s * \sin(fT)$$

5. Arvuta ekstsentriline anomaalia E lahendades Kepleri võrrandi [22].

$$M = E - e * \sin E.$$

6. Leia tõeline anomaalia (nurk planeedi asendi ja periheeli vahel) [23]

$$\theta = 2 * \arctan \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} * \tan \frac{E}{2}.$$

Saadud nurk θ ehk tõeline anomaalia on nurk planeedi periheeli ja soovitud asendi vahel ehk soovitud vankri asukoht kindlal kuupäeval.

7 Testimine

Ühegi korraliku süsteemi disain ja arendus ei kulge ilma vigade ja testimiseta. Süsteemi testimine toimus liikudes väiksematelt osadelt suurematele. Alguses kontrolliti erinevad vankri mehaanika võimalikke lahendusi, kus praagiti välja näiteks ise ehitada raudtee ja samuti mudelrongide kasutamine raudtee peal. Samuti ei osutunud mõttekaks treida roboti rataste servad kalde alla, mis tundus alguses hea mõte, aga samas lahendus, kus nad on risti vedava pinnaga osutus paremaks. Katsetati ka erinevaid liugkontaktide asendamise viise, kuid ükski ei osutunud piisavalt stabiilseks lahenduseks.

Vankri elektroonikat ja programmi osi testiti ühiselt. Eriti pakkus huvi liugkontaktide stabiilsus ja ühenduse kvaliteet, mis alguses tekitas probleeme, kuid kondensaatorite lisamisel ja kontaktide asendi muutmisel enamik probleeme lahenes. Magnetanduri tagasisideratta libisemine oli ka küsimärgi all ja osutus, et viga ei ole suurem ühest protsendist võrreldes tegelikuga ringi kohta, mis rahuldab projekti tingimusi. Elektroonika koha pealt katsetati veel erinevaid fototransistore ja infrapuna valgusdioode ning neist valiti parimad ja lihtsamini kasutatavad seadmed. Testimisel üritati süsteemi eri osadele korraldada võimalikult palju erinevaid korduvkatseid, et maksimaalselt vigu üles leida. Põhilised vahendid testimisel olid multimeeter, ostsillograaf ja vankri elektroonikaplaadil olev valgusdiod.

Tarkvaras esines kaks raskesti leitavat viga. Esimene oli seotud madala pinge tuvastuse korral mikroprotsessori alglaadimise ajal viikude seadistuse ja väärtustamisega, mille korral jäi mootorit juhtiv transistor aeg-ajalt avatuks. Teine viga oli seotud silumisinfo saatmisel täisarvu muundamisel baitideks, kus ületati sihtpuhvri suurust ühe baiti võrra ja sellest tulenevalt rikuti kogu ülejäänud tarkvara normaalne töö.

Kui vankrite põhifunktsionaalsus oli saavutatud ja testitud, sai hakata testimise süsteemi üldisemalt ja informatiivsemate vahenditega (USART ja visuaalne kontroll). Osutus, et raadioside pole päris ideaalne ja vankrite samaaegse suhtluse korral võib esineda pakettide kadu. Vastav viga esines eriti siis, kui üritati kõigilt vankritelt samaaegselt saata serverile suurel hulgal silumisinfot, mida lõpplahenduses ei saadeta. Samas otsustati, et vankri tarkvara peab serverile saatma vastuse, kui ta on edukalt käsu kätte saanud, vastasel korral eeldab server, et käsk on kaduma läinud ja saadab käsu uuesti. Eelnevast võime teha järelduse, et süsteemi disainis ja arendustegevusel ei ole suuremaid vigu tehtud ja vastavat süsteemi on piisavalt ja edukalt testitud enne arenduse lõppu.

8 Kokkuvõte

Töö tulemusena valmis tehniline lahendus Päikesesüsteemi mudelile, mida valmides saab kasutada TÜ tähetornis seletamaks Päikesesüsteemi toimimist ja muuseumi eksponaadina. Hetkeseisuga on valmis kaheksa vankri mehaanika ja elektroonika tehnilised lahendused ning mõlemad osad on ka dokumenteeritud (lisa 1 Dokumentatsioon). Mehaanika ja elektroonika lahenduste testimisel pole esinenud hetkeseisuga suuri puudusi. Vankri tarkvara vajab veel lisa testimist ja täiendamist vastavalt serveri tarkvara arendusele ja funktsionaalsusele, kuid olemasolev kood on põhjalikult kommenteeritud ning kirjutatud arvestades mudeli lõplikke nõudeid ning süsteemi vajadusi.

Serveri tarkvarast on realiseeritud planeetideseisu arvutamine ja järjestikpordi suhtlus. Lisaks tuleb realiseerida kasutajaliides nii muuseumi eksponaadi kui ka ekspertkasutaja jaoks. Tugistruktuur on suuremas osas valmis. Täiendamist vajab nelja välimise planeedi relsside paigutamise ja mudelile atraktiivse välimuse andmine. Kokkuvõtvalt on projekt hetkeseisuga umbes kaks kuud oma eeldatavast graafikust maas, mis tuleneb peamiselt mehaanika lahenduste väljatöötamise ajamahu olulisest suurenemisest.

Töö käigus leiti lahendusi, mis lubaksid etteantud nõuetega Päikesesüsteemi mudelit valmistada, kasutati kaasaegseid tehnoloogiaid (ZigBee, Atmega88, automaatpingid) ning läbiti erinevad etapid ideest kuni valmistootte testimiseni. Suurem osa projektis kasutatavatest osadest ja komponentidest valmisid TÜ Tehnoloogiainstituudi Arukate Materjalide ja Süsteemide Laboris käsitööna. Käesoleva magistritöö raames kasutati õpitud teadmisi reaalse infotehnoloogilise toote valmistamiseks. Eritulemina valmib juuni lõpuks aastal 2010 töötav muuseumi eksponaat, mis on võimeline töötama iseseisvalt ka väljaspool laboritingimusi.

Minu osa projektis oli tegelda süsteemi disainiga; töötada välja tehniline lahendus mehaanikale, elektroonikale ja tarkvarale; realiseerida mehaanika, elektroonika ning suurem osa vankri tarkvarast; juhendada kaasprojektiliiget Jüri Aedlat ning tegelda projekti koordineerimise ja juhtimisega. Töö autor tänab tarkvaralahenduste osalise realiseerimise eest Jüri Aedlat, lahenduste väljatöötamisel konsultatsioonide eest TÜ Robotiklubi liikmeid, juhendajat professor Alvo Aabloot ning kõiki teisi, kes on töö valmimisele kaasa aidanud.

9 Viited

1. Peets, A. *Reaalaja tagasiside süsteemi väljaarendamine õppeprotsesside kvaliteedi tõstmiseks*. bakalaureusetöö, Tartu, 2008.
2. Jaaniste, J. *Füüsika XII klassile: kosmoloogia*. Tallinn : Koolibri, 1999. a. lk. 25-52. ISBN 9985008235.
3. Päikesesüsteem. *Vikipeedia, vaba entsüklopeedia*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 17.05.2010] <http://et.wikipedia.org/wiki/P%C3%A4ikeses%C3%BCsteem>.
4. Orrery, *Wikipedia, the free encyclopedia*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 17.05.2010] <http://en.wikipedia.org/wiki/Orrery>.
5. Carlisle, R. *Scientific American Inventions and Discoveries*. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 2004.a., lk 189. ISBN 0471244104.
6. Walker, J. *Solar System Live*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 17.05.2010] <http://www.fourmilab.ch/cgi-bin/uncgi/Solar>.
7. Schmitt, S. R. Mean orbital elements. *Abecedarical Systems*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 17.05.2010] http://mysite.verizon.net/res148h4j/zenosamples/zs_planetorbits.html.
8. Solar System Model crafts. *Enchanted Learning*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 17.05.2010] <http://www.enchantedlearning.com/crafts/astronomy/solarsystemmodel/>.
9. Solar system model, *Wikipedia, the free encyclopedia*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 17.05.2010] http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_system_model.
10. XBee & XBee-PRO 802.15.4 OEM RF Modules. *Digi International*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 17.05.2010] <http://www.digi.com/products/wireless/point-multipoint/xbee-series1-module.jsp>.
11. *Product overview guide*, Linx Technologies. [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 10.05.2010] http://www.linxtechnologies.com/Documents/linx_overview_guide.pdf.
12. *RF12B Universal ISM Band FSK Transceiver*, Hope RF. [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 10.05.2010] <http://www.hoperf.com/upfile/RF12B.pdf>.
13. *XBee™/XBee-PRO™ OEM RF Modules*, MaxStream. [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 10.05.2010] http://ftp1.digi.com/support/documentation/manual_xb_oem-rf-modules_802.15.4_v1.xAx.pdf.
14. Precision Miniature Motors, Gearmotors & DC motor control. *Precision Microdrives*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 17.05.2010] https://secure.precisionmicrodrives.com/product_info.php?products_id=56.

15. MOSFET as a Switch. *Electronics-Tutorial*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 17.05.2010]
http://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran_7.html.
16. *ATmega88 - 8-bit Microcontroller with 8K Bytes In-System Programmable Flash*. Atmel Corporation. [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 10.05.2010]
http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2545.pdf.
17. *Design Fundamentals for Phototransistor Circuits*. Fairchild Semiconductor. [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 10.05.2010]
<http://www.fairchildsemi.com/an/AN/AN-3005.pdf>.
18. Jaaniste, J., Eenmäe, T., Jaaniste, J., *Astronoomia*, Elektroonilised õppematerjalid. [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 10.05.2010] <http://hdl.handle.net/10062/14616>.
19. Orbital elements. *Wikipedia, the free encyclopedia*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 17.05.2010] http://en.wikipedia.org/wiki/Orbital_elements.
20. Schlyter, P. *Computing planetary positions*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 17.05.2010]
<http://stjarnhimlen.se/comp/tutorial.html>.
21. Eelsalu, H. *Astronoomialeksikon*. Eesti Entsüklopeediakirjastus, 1996. a. lk 49-57. ISBN 5899000414.
22. Standish, M., Williams, J., *Orbital Ephemerides of the Sun, Moon, and Planets*. [Võrgumaterjal] [Viimati alla laetud: 17.05.2010] <http://iau-comm4.jpl.nasa.gov/XSChap8.pdf>
23. Kepler's laws of planetary motion, *Wikipedia, the free encyclopedia*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 17.05.2010]
http://en.wikipedia.org/wiki/Kepler%27s_laws_of_planetary_motion.

The Solar System Model for Tartu Old Observatory

ALO PEETS

Summary

The Sky, full of stars, has interested humans for many centuries. On the one hand, most of the fundamental discoveries have been discovered by now; on the other hand, there are many people who still need to be educated about how our solar system works and what it consists of. There are numerous books about space and the solar system, but they are too time consuming and too difficult to understand for the beginner. Therefore, Robotics Club of Tartu University was asked to build a solar system model for Tartu Old Observatory.

The main goal of the project is to build the solar system model that can represent movement of planets in their orbits and can take an estimated planet placement on different dates. Since the model is planned as a museum exhibit, it should be semi-autonomous and must be easy to use. It is going to be used for teaching how the celestial bodies move in the planetary system. In this document I give an overview of how the model is built and what technical solutions have been used.

There are four smaller inner planets: Mercury, Venus, Earth and Mars. They are also called the terrestrial planets and are primarily composed of rock and metal. The four outer planets, Jupiter, Saturn, Uranus and Neptune, also called the gas giants, are composed largely of hydrogen and helium and are far more massive than the terrestrials. All the planets have to be able to move freely in their orbits. In the model, the orbits are replaced with a mono-railway, on which the specially designed carts move. The astronomical data and model parameters are slightly adjusted for the better observatory. In figure *joonis 5.1* on page 13, there are the orbits of planets, size of the planets, and angle of orbits compared to the earth's orbit. The Sun and the orbits are fixed and are not able to move.

There are 8 moving carts in the model; each of them is moving a corresponding planet. A central computer is used to control the carts' movements and for the user console. Nevertheless, the carts must have a central processing unit (CPU) and are quite sophisticated in order to keep up with the tasks. The project consists of four different, but equally important, parts that have to work together in order to work correctly and without

breakdowns or errors. The parts are: project management, mechanics, electronics, and programming.

Mechanics of the cart is quite simple, but many solutions have been tested to solve problems like: irregularity of the monorail, friction of the wheels, power transmission and size restrictions. After endless designing and testing, the body consist of: main body (polycarbonate); motor fastening (aluminium); three axes (stainless steel); wheels (polycarbonate, rubber). The cart is powered by one motor that drives the larger inner wheel. Speeds up to 30 cm per second are achieved. There are also two smaller (outer) wheels, which can move freely. All axes are mounted on ball bearings in order to reduce friction. Wheels themselves are covered with rubber rings in order to increase friction between monorail and wheels. Irregularities of the monorail are fixed with rubber on the wheels and with a notch, cut to the body of the cart, so the left 0.1 inch material acts as a spring. The overall width of the cart is 40 mm and length 50 mm. Sliding contacts give power to the moving cart.

The electronics of the carts consists of: main CPU (Atmega 88); two DC/DC voltage converters (LM2940S for 5V, XC6204 for 3.3V); wireless module (XBee); rotary sensor (LMX90316); transistor (IRF8714); photo-transistor (PT204). The heart of the system is the CPU that controls the system's work and manages the wireless communication with server. Three voltage levels are used: 12V for the motor, 5 V for the CPU and the rotary sensor, and 3.3V for the wireless module. Feedback for the cart is gathered by the rotary sensor (differential movement) and by the photo transistor – diode pair (absolute position).

The program for the carts and the server is written in C-language. The cart's program manages the wireless connection, reads data from the feedback sensors and controls movement of the cart. The server's program allows the user to switch use cases, starts or stops the system and gives orders to carts.

During the project management I communicated with different companies in order to get best solutions and price for the needed tasks and parts. I also managed communication with customers and found out system requirements. In order to complete the project several solutions were invented; modern technologies like ZigBee and ATmega88 were used. Different phases from idea to application were successfully completed when building the system. At the moment project is not finished, but estimated deadline is the end of June.

Lisa 1 Dokumentatsioon

- Elektroonika: kaust *Elektroonika*.
- Mehaanika joonised: kaust *Mehaanika*.
- Exceli tabel lähte ja süsteemi andmetega: fail *Planet_Data.xls*.
- Vankri programm: kaust *programm_vanker_beta*.
- Serveri programm: kaust *programm_server_alpha*.
- Käesolev magistritöö: fail *alo_peets_magister.pdf*.
- Digitaalse töö versiooni korral leiab failid aadressilt:
<http://digi.physic.ut.ee/mw/images/5/55/Dokumentatsioon.rar>.

Lisa 2 Elektroonika komponentide tabel

	toote nimetus	kogus	tootekood	pood	hind/tk	skeemil
1	ATMEGA88-20AU uC TQFP32	1	73-646-98	ELFA	44,9	ATMEGA88
2	Back-up cap. 0.33F 5.5 VDC (-2)	1	67-049-70	ELFA	46,8	C3
3	CAPACITOR, 1UF, 0603, 16V, X5R	3	1463388	Oomipood	1,0	C2, C5, C6
4	CAPACITOR, MLCC, 0603, 50V, 0.1UF	3	1692286	Oomipood	1,0	C4, C11, C12
5	CAPACITOR, OXICAP, 22UF, 6.3V	1	7565135	Oomipood	10,5	C1
6	Diode, 1N4007 1000 V 1 A DC PBF	1	70-104-65	ELFA	6,3	DIODE1
7	ELSIR91-21C/F9 IR diode	1	75-022-63	ELFA	13	-
8	Epoxy lam. 75x100 1mm DS (1743-3)	1	49-575-51	ELFA	69,1	-
9	FDV303N FET trans N-ch 25V 0.68A SOT23	1	71-096-55	ELFA	4,1	FDV303N
10	Header 1,27mm 1x32p	1	43-912-07	ELFA	13,0	PRGM_CON
11	HSMH-C190. - LED, SMD, RED	1	8554641	Oomipood	1,9	LED1
12	IRF8714PBF - MOSFET, N SO-8	1	1551901	Oomipood	14,3	IRF8741
13	Lintkaabel 10 soont AWG28 1.27mm	1	AWG28/10	Oomipood	7,6	PRGM_CON
14	LM2940S-5.0 - V REG LDO +5.0V	1	9494448	Oomipood	16,9	LM2940S
15	MLX90316KDC-SPI Rotary pos. sensor SPI	1	73-215-32	ELFA	83,8	PRGM_CON
16	PT204-6B 3 mm phototrans	1	75-203-15	ELFA	4,1	JP3
17	RESISTOR, 0603 1K	1	9330380	Oomipood	0,6	R4
18	RESISTOR, 0603 1K78	1	1170811	Oomipood	0,3	R5
19	RESISTOR, 0603 220R	1	9330801	Oomipood	0,6	R1
20	RESISTOR, 0603 3K3	1	9331026	Oomipood	0,6	R8
21	RESISTOR, 0603 5K6	1	9331352	Oomipood	0,6	R2
22	RESONATOR, SM, 20MHZ, CW	1	1448147	Oomipood	9,5	RESON
23	Socket 1,27mm 1x32p	1	43-912-15	ELFA	34,7	PRGM_CON
24	Socket strip 2,0 stra.1x10	2	43-701-44	ELFA	12,4	XBEE
25	XB24-ACI-001	1	1337913	Oomipood	384,8	XBEE
26	XC6204B332MR 3.3V V-regulator	1	73-498-55	ELFA	11,3	XC6204
				Kokku	793,2	

- 1) Tabelis olevad hinnad Eesti kroonides ja seisuga 18.05.2010
- 2) Ühe vankri valmistamiseks kuluvate komponentide hind umbes 780 EEK.

Lisa 3 Planeedi asukoha arvutamiseks kasutatud parameetrid

	a [au, au/cty]	e [rad, rad/cty]	I [deg, deg/cty]	L [deg, deg/cty]	ϖ [deg, deg/cty]	Ω [deg, deg/cty]
Mercury	0.38709843	0.20563661	7.00559432	252.25166724	77.45771895	48.33961819
	0.00000000	0.00002123	-0.00590158	149472.67486623	0.15940013	-0.12214182
Venus	0.72332102	0.00676399	3.39777545	181.97970850	131.76755713	76.67261496
	-0.00000026	-0.00005107	0.00043494	58517.81560260	0.05679648	-0.27274174
EM Bary	1.00000018	0.01673163	-0.00054346	100.46691572	102.93005885	-5.11260389
	-0.00000003	-0.00003661	-0.01337178	35999.37306329	0.31795260	-0.24123856
Mars	1.52371243	0.09336511	1.85181869	-4.56813164	-23.91744784	49.71320984
	0.00000097	0.00009149	-0.00724757	19140.29934243	0.45223625	-0.26852431
Jupiter	5.20248019	0.04853590	1.29861416	34.33479152	14.27495244	100.29282654
	-0.00002864	0.00018026	-0.00322699	3034.90371757	0.18199196	0.13024619
Saturn	9.54149883	0.05550825	2.49424102	50.07571329	92.86136063	113.63998702
	-0.00003065	-0.00032044	0.00451969	1222.11494724	0.54179478	-0.25015002
Uranus	19.18797948	0.04685740	0.77298127	314.20276625	172.43404441	73.96250215
	-0.00020455	-0.00001550	-0.00180155	428.49512595	0.09266985	0.05739699
Neptune	30.06952752	0.00895439	1.77005520	304.22289287	46.68158724	131.78635853
	0.00006447	0.00000818	0.00022400	218.46515314	0.01009938	-0.00606302
Pluto	39.48686035	0.24885238	17.14104260	238.96535011	224.09702598	110.30167986
	0.00449751	0.00006016	0.00000501	145.18042903	-0.00968827	-0.00809981

Planeedi asukoha arvutamiseks kasutatud andmed [22].

	b [$^{\circ}/cty^2$]	c [$^{\circ}$]	s [$^{\circ}$]	f [$^{\circ}/cty$]
Jupiter	-0.00012452	0.06064060	-0.35635438	38.35125000
Saturn	0.00025899	-0.13434469	0.87320147	38.35125000
Uranus	0.00058331	-0.97731848	0.17689245	7.67025000
Neptune	-0.00041348	0.68346318	-0.10162547	7.67025000
Pluto	-0.01262724			

Välimise nelja planeedi keskmise anomaalia arvutamiseks kasutatud lisaparameetrid. Seesmistepuhul võib nad lugeda nulliks [22].