

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Tehnoloogiainstituut

Rudolf Põldma

Tartu linna Narva maantee ringristmiku digikaksik

Bakalaureusetöö (12 EAP) arvutitehnika erialal

Juhendaja:

robotika kaasprofessor Karl Kruusamäe

Tartu 2021

Resüme

Tartu linna Narva maantee ringristmiku digitaalse kaksiku loomine

Digikaksikud võimaldavad meil füüsilisi esemeid, seadmeid, hooneid ja keskkonda tarkvaraliselt simuleerida ja selle abil arendada, ennetada probleeme ja optimeerida vastavalt vajadusele. Hetkel puudub tasuta kättesaadav digitaalne keskkond Tartu Narva maantee ringristmikust ja selle ümbrusest, mida oleks võimalik kasutada isejuhtivate sõidukite arenduseks. Töö eesmärgiks oli luua digikaksik ringristmikust mida on võimalik integreerida Gazebo simulaatoril isejuhtivate sõidukite arenduseks. Töös kasutatakse Eesti Maa-ameti aerolaserskaneerimise kõrguspunkte, et saavutada võimalikult täpne teisik. Tulemusena valmis Narva maantee ringristmikust digikaksik, mida on võimalik implementeerida Gazebo isejuhtivate sõidukite arenduseks.

CERCS: T120 Süsteemitehnoloogia, T125 robotika

Märksõnad: Digikaksik, Gazebo, robotika, keskkonnamudel, Blender

Abstract

Digital twin for Narva street roundabout in Tartu

Digital twins allow us to represent physical entities as software simulation to develop, help prevent problems and optimize entities as needed. At the moment a freely available digital twin of the Tartu Narva road roundabout and its surroundings, that could be used for autonomous vehicle development, does not exist. The aim of this work was to create a digital counterpart of the roundabout so it could be integrated into Gazebo simulator for the development of autonomous vehicles. Estonia's Land Board airborne laser scanning data was used to achieve the most accurate representation of the roundabout. The work resulted in a functional digital twin of the Narva road roundabout, that could be implemented with Gazebo.

CERCS: T120 Systems Engineering, T120 Robotics

Keywords: Digital twin, Gazebo, robotics, environment model, Blender

Sisukord

Resümee	2
Abstract	2
Sisukord	3
Sissejuhatus	4
1. Kirjanduse ülevaade	5
1.1. Digikaksik	5
1.2. Olemasolevad digikaksiku lahendused	5
1.3. 3D-modelleerimine	8
1.4. Blender	11
1.5. Gazebo simulaator	11
2. Töö eesmärk ja nõuded	13
2.1. Eesmärk	13
2.2. Funktsionaalsed nõuded	13
2.3. Mittefunktsionaalsed nõuded	13
3. Digikaksiku loomise protsess	14
3.1. Punkt pilv	14
3.2. Punkt pilve töötlus	15
3.3. Võrgustiku eraldamine objektideks	16
3.4. Hoonete mudelite lisamine	17
3.5. Objektidele tekstuuri lisamine	18
3.6. Teemärgiste ja liiklusmärkide lisamine	19
3.7. Puude ja bussipeatuste mudelite lisamine	20
3.8. Kataloogistruktuur Ubuntu	21
3.9. Faili parameetrid	21
4. Digikaksiku esitus Gazebo	24
5. Arutelu	26
6. Kokkuvõte	27
Kasutatud kirjandus	28
Lisad	31
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	32

Sissejuhatus

Täpsete mudelite loomine ja nende käitumise põhimõtete simuleerimine on tänapäevase teaduse jaoks üldlevinud ja oluline meetod [1]. Olemasolevast keskkonnast digikaksiku loomine võimaldab teha digitaalseid katseid, mille tulemused oleksid võrdsed reaalmaailma katsete tulemustega. Isejuhtivate sõidukite arendamisega kaasneb palju katse-eksituse meetodit [2]. Digikaksik keskkonnast võimaldab efektiivsemalt ja kiiremalt arendada algoritme isejuhtivatele sõidukitele, luua erinevaid olukordi liikluses või muuta ilmastiku olusid vastavalt katse vajadusele [2].

Digikaksikuid keskkondadest luuakse ka muudel põhjustel kui isejuhtivate sõidukite arenduseks. Digikaksik linnast, mis saab pidevalt andmeid sensoritelt, kaameratelt ja avatud informatsiooni, nagu ilmastikuolud ja ühistranspordi liikumised, loob terviku linnast. Selle põhjal on võimalik efektiivsemalt korraldada liiklusvoogu, tänavavalgustust, talvel lumekoristust, jälgida sildade ja tänavate korrasolu. [3]

Hetkel puudub digikaksik Eesti keskkondadest, mida oleks võimalik kasutada isejuhtivate sõidukite arendamiseks, mistõttu on digikaksikute loomine ja arendamine vajalik. Digikaksik võimaldab säästa raha ja efektiivsemalt korraldada keskkondade või seadmete arendust ja kontrolli.

Bakalaureusetöö eesmärgiks on arendada digikaksik Tartu linna Narva maantee ringristmikust ja selle ümbrusest, et luua keskkond isejuhtivate sõidukite arendamiseks. Ringristmik on Tartu üks suurimaid ja keerukamaid, seega sobiv ka keerukamate olukordade testimiseks. Töös antakse ülevaade olemasolevatest keskkonna ja seadmete digikaksikutest ja meetodist kuidas luua keskkonna digikaksik.

1. Kirjanduse ülevaade

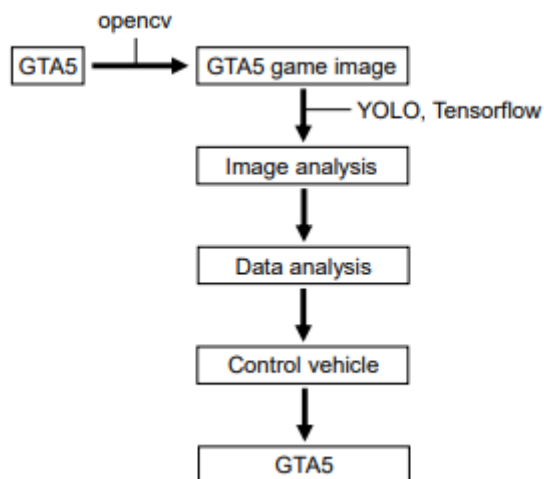
Kirjanduse ülevaade käsitleb teemasid, mis on digikaksik ja 3D-modelleerimine, ehk moodus, kuidas saab digikaksikut esitada. Tuuakse välja olemasolevaid lahendusi seadmetest ja keskkondadest, kuidas need aitavad raha säästa ja efektiivsemalt seadmeid arendada.

1.1. Digikaksik

Digikaksik on tarkvaraline väljendus füüsilisest objektist, keskkonnast või seadmest [4]. Digikaksik jäljendab objekti sisemisi protsesse, tehnilisi omadusi ja objekti käitumist vastavas keskkonnas ning võimaldab analüüsida ja testida objekti käitumist erinevates oludes [5]. Füüsilise seadme anduritelt saadud teavet võrreldakse digikaksiku tulemustega, et kontrollida seadme tööd [5]. Digikaksik võimaldab optimeerida ja arendada seadmeid digitaalselt, enne kui seda tehakse füüsilisel seadmel [4]. Digikaksikud keskkondadest, nagu ringrada, maantee või kesklinn, võimaldavad teha katseid isejuhtivate sõidukitega, mille tulemused korreleeruvad reaalmaailma tulemustega [6].

1.2. Olemasolevad digikaksiku lahendused

Algoritmide arendamine, kasutades tehisintellekti, on vajalik autonoomsete sõidukite arenguks [2]. Katse-eksituse meetodid on vastavate algoritmide loomiseks vajalikud, et testida algoritmi töökindlust, efektiivsust ja ohutust. Katse-eksitus meetodi testimiseks on tarvis realsusele vastavat simulatsiooni keskkonda, kuid selle arendus on aga aeganõudev ja kulukas protsess. Seetõttu on välja pakutud meetod kasutada simulatsiooni keskkonnaks videomängu GTA 5 [2]. Realistlik keskkond, jalakäijad ja autoliiklus linnas kui ka linnavälistel aladel, on juba mängus implementeeritud. Videomängu pilti salvestatakse jooksvalt maatriksitena ja kasutades TensorFlow ja YOLO teeki analüüsitakse pidevalt saadud andmeid. Andmetele põhinedes edastatakse suunis kuidas mängutegelane peab edasi käituma. Algoritm on välja toodud joonisel 1. [2]



Joonis 1. Üldistav algoritm autonoomse sõiduki simulatsioonile GTA 5-s [2].

Turul on olemas simulatsioonikeskkondi pakkuvaid firmasi. Näiteks UK ettevõtte rFpro pakub motosporti ja autotööstusele keskkonda, kus on võimalik arendada isejuhtivaid sõidukeid ja võimalusi erinevaid andureid arendada [6]. Firma pakub digikaksikuid Hiina, USA, Euroopa ja Kanada teedest ning samuti on koostatud keskkondi ka F1 ja NASCAR ralliradadest. Kõik digikaksikud on koostatud kasutades LiDAR-i poolt kogutud andmepilvi. Joonisel 2 on firma rFpro digikaksik Saksamaa kiirteest. [7]



Joonis 2. Firma rFpro digitaalne teisik Saksamaa kiirteest. [7]

Ameerika suuretevõtte General Electrics on koostanud 1,2 miljonit digikaksikut tuulefarmidest, reaktiivmootoritest, naftaplatvormidest ja paljudest elektritootmise seadmetest [8]. Hinnanguliselt on tehisintellekti ja digikaksikute abil probleeme ennetades säästetud klientidele 1,5 miljardit dollarit [9].

General Electrics on koostanud ülevaate ennetatud probleemidest ja nende süvenemisel arvatav kahju väärtus [10]. Näiteks 2018. aasta augustis avastati hälve elektriijaama gaasiturbiini töös. Tarkvara tuvastas, et gaasiturbiini aurujahutuse möödavoolumklapp oli vaid 48% avatud, kuigi simulatsiooni kohaselt pidi vastav väärtus olema 68%. See erinevus viitas probleemile aurujahutamistorudega ning arvutuste kohaselt oleks 30 tunni möödumisel turbiini komponendid sulama hakanud. Probleemid likvideeriti õigeaegselt ning hinnanguliselt hoiti ära varaline ja tootmismahu langusest tekkiv kahju kogumahu 9 miljonit dollarit. [11]

General Electrics loob digitaalse teisiku kõigist ehitatud reaktiivmootorist, et nende tööd oleks võimalik ka lennuki lennu ajal jälgida [12]. Mootori ehituse ajal koguvad insenerid tuhandeid andmepunkte iga individuaalse detaili kohta, mis mootorisse käib ja selle abil on võimalik koostada võimalikult täpne digitaalne teisik. See võimaldab jälgida mis temperatuurid, rõhud ja kiirused on normaali piires iga mootori kohta eraldi. Digitaalsele reaktiivmootorile simuleeritakse võrdseid töötingimusi mida kogeb reaalne reaktiivmootor lennul, ehk ilm, kiirused ja detailide tavapärase kulumine. Reaalse ja digitaalse mootori andmeid võrreldes on näha kas mootor toimib normi piires või vajab hooldust. Reisijate arv, linnad, kus õhus on palju liiva ja piloodi eripärad on ühed paljudest tähtsatest teguritest, mida digitaalne teisik suudab jälgida ja arvesse võtta. Kõik see võimaldab arendada efektiivsemaid reaktiivmootoreid tulevikuks. [12]

Elektriautode tootja Tesla loob digitaalse teisiku igast oma müüdüd autost [13]. Autode andurid edastavad pidevalt informatsiooni mida seejärel tehisintellekt töötleb ja vastavalt analüüsib, kas auto töötab korrektselt või on vaja autol hooldust. Selline lähenemine võimaldab pakkuda paremat teenust ja tõstab auto töökindlust. [13]

Eesti riigi Maa-amet on koostanud kuni 2024. aastaks strateegia kolmemõõtmeliste ruumiandmete hõive, kaardistamise, modelleerimise, andmete jagamise ja visualiseerimise vallas [14]. Strateegia eesmärkide alla kuulub 3D kaarditeenuste platvormi väljaarendamine, mis aitaks teha avaliku sektori ruumiandmed kättesaadavaks ühest kohast ja kõigile. Märtsi lõpus avalikustati prototüüp prakendus, mis muudab ruumiandmed kättesaadavaks ühest kohast ja ajakohasena [14], [15]. Rakendus kasutab 3D mudeliteks ja visualisatsiooniks aerolaserskaneerimise kõrguspunkte, kõrgusmudeleid ja Eesti topograafia andmekogu [14]. Joonisel 3 on kujutatud Delta keskust ja Narva maantee ringristmikku Maa-ameti 3D kaardil.



Joonis 3. Delta keskus Maa-ameti 3D kaardil. [16]

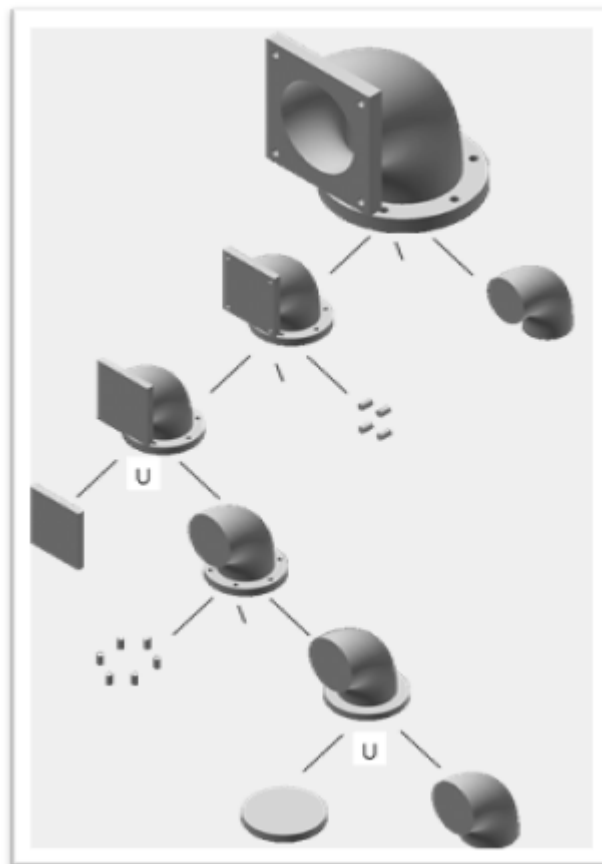
1.3. 3D-modelleerimine

3D-modelleerimine on objekti simuleerimine kolmemõõtmeliselt digitaalsel kujul. See võimaldab objektide käitumist simuleerida ja uurida erinevates keskkondades [1]. Enamik arvutipõhist 3D-geomeetrilist modelleerimist tehakse põhiprimitiividega nagu jooned, tasapinnad, kastid. Paljusid siledaid ja deformeeruvaid objekte on selliste ehitusplokkide abil raske või ebaefektiivne kuvada. [17]

Objekti viimisel kolmemõõtmelisele digitaalsele kujule on vaja teada keha mõõtmeid. Mõõtmisi on võimalik teha kasutades erinevaid meetodeid ja seadmeid [1]. Mõõtmisüsteeme on üldistades kaks – kontaktne ja mittekontaktne [18]. Kontaktmeetodid varieeruvad lihtsast mõõdulindiga mõõtmisest kuni keeruka koordinaatide mõõtmise masinani, mida kasutatakse tavaliselt masinaehituses. [18]. Kontaktivaba mõõtmise alla kuuluvad optilise ja akustiliste seadmetega mõõtmine, näiteks laserskanneerimissüsteem [18].

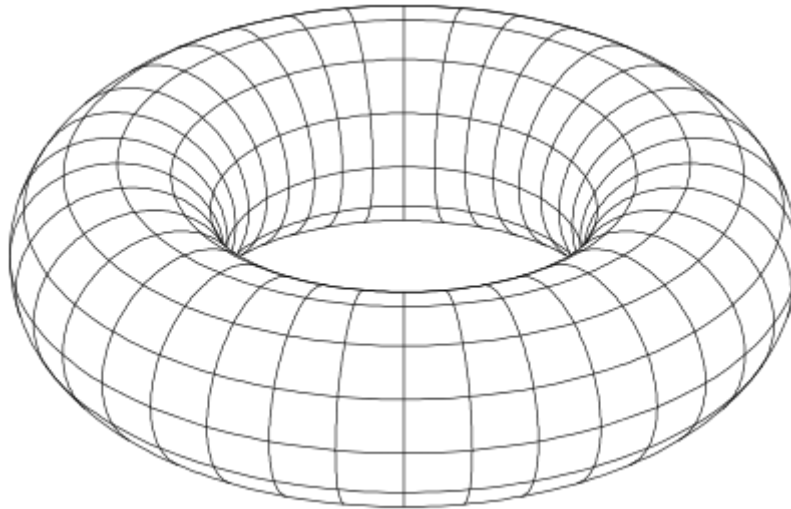
Modelleerimistehnikateks on konstruktiivne mahtgeomeetria, implitsiitne pind ja alajaotus pinnad [19].

Konstruktiivne mahtgeomeetria (ingl *constructive solid geometry*) on meetod, kus Boole'i loogikaoperaatoreid kasutades kombineeritakse lihtsamaid geomeetrilisi kujundeid (nt ring, ruut) saades seeläbi soovitud objekt. Valminud objekt on salvestatud andmepuuna, kus operaatorid on puuharud ja geomeetrilised kujundid on lehttipud. Mõnesid sõlmesid kasutatakse Boole'i loogikaoperaatoritena (näiteks liitmine ja lahutamine, korrutamine ja jagamine) ja teisi sõlmesid kasutatakse objekti keeramiseks ja pööramiseks (joonis 4) [4].



Joonis 4. Konstruktiivne mahtgeomeetria andmepuu. [20].

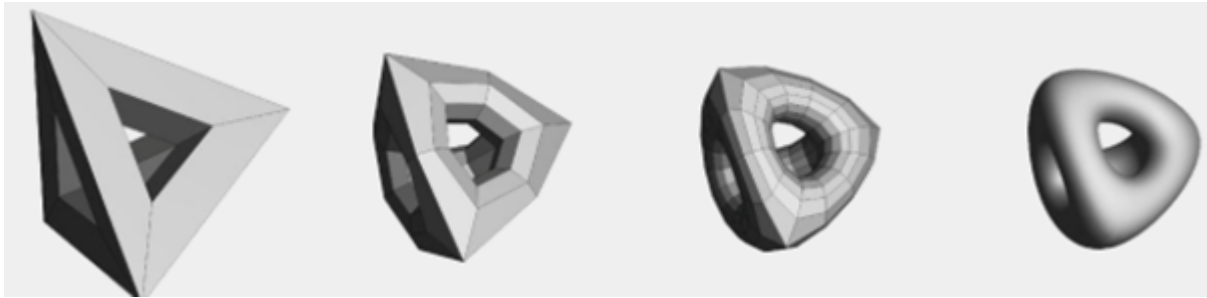
Implitsiitne pind (ingl *implicit surfaces*) tähendab, et pinnad on kontuuritud 3D-s mõne skalaarvälja kaudu. Tavaliselt kasutatakse seal kolme tehnikat, mida igaüks eristab väljafunktsioonide järgi. Väljafunktsioon määrab väärtuse igas ruumipunktis tänu mõnele aluseks olevale primitiivsele geomeetrilisele objektile, tavaliselt punktidele, joone segmentidele ja hulknurkselt piiratud tasapindadele (joonis 5) [17].



Joonis 5. Skalaarvälja kaudu kontuuritud kujund (ingl *k torus*) [21].

Alajaotuspinnad (ingl *subdivision surfaces*) on tavaline modelleerimise meetod, mis on viimaste aastakümnete jooksul populaarsust kogunud animatsioonis ja visuaalefektides. Täpsemalt koosnevad alajaotuspinnad väiksematest parameetristest pindadest/tükikestest mis on defineeritud üle selle objekti enda võrgustiku (ingl *mesh*) [7].

Alamjaotus on toiming, mida saab rakendada hulknurkse võrgustiku jaoks ja ka matemaatiline tööriist, mis fikseerib aluseks oleva sileda pinna, kuhu võrgu korduv alajaotus koondub (joonis 6). Selget alajaotust on siledama võrgustiku saamiseks lihtne rakendada mitu korda. Kontrastiks kuju määrava sileda pinna – „piiripinna” (ingl *limit surface*) – tuletamine on oluliselt keerukam, kuid tagab suurema täpsuse ja paindlikkuse [22].



Joonis 6. Objekti muutmine sujuvaks kasutades eri arv alajaotuspindu. [22].

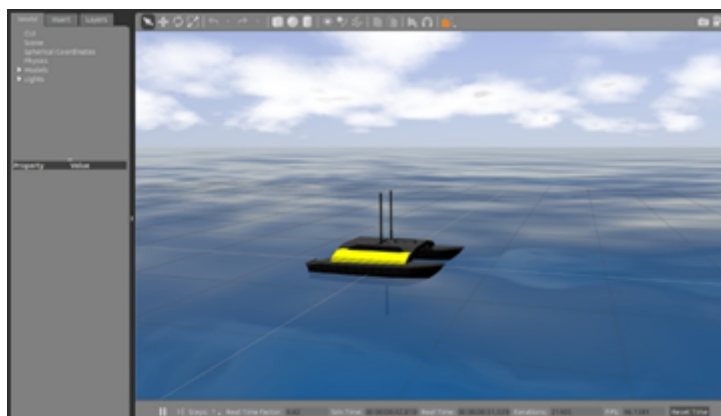
1.4. Blender

Blender on avatud lähtekoodiga 3D arvutigraafika tarkvara rakendus modelleerimise, visuaalefektide ja füüsika simulatsioonide arendamiseks [23].

NASA kasutas Blenderit, et kinnitada esimeste Maa suuruste planeetide olemasolu Päikesesüsteemist väljaspool. Astronoomid kasutasid simulatsiooniks Blenderit, et aidata valideerida, et Kepler-20e ja Kepler-20f on planeedid, mitte muud astrofüüsilised nähtused. [24] NASA-l on loetelu 3D mudelitest - asteroidid, satelliidid, maavälised maastikud, planeedikulgid, kosmoselaevad, skafandrid ja teisi kosmosetehnoloogiaga seonduvaid esemeid, millest paljud on loodud kasutades Blenderit [25].

1.5. Gazebo simulaator

Gazebo on robotite ja erinevate sensorite disaini, arenduse ja töökindluse katsetamiseks loodud simulatsioonikeskkond [26]. Gazebo abil on võimalik katsetada robotite ja sensorite tööd erinevates keskkondades nagu õhus, vees, maapinnal ja maa all [26]. Joonisel 7 on Heron mehitamata veesõiduk Gaebo simulaatoris.



Joonis 7. *Heron mehitamata veesõiduk Gazebo simulaatoris.* [27]

Gazebot on kasutanud DARPA (Ameerika Ühendriikide Kaitseministeeriumi alluvuses olev agentuur) ja NASA (Ameerika Ühendriikide kosmoseagentuur) oma robotite simulatsiooniks [28], [29]. DARPA on korraldanud võistlusi Gazebo simulaatoril poolautonoomsete robotite arendamiseks, mis suudavad täita ülesandeid raskesti ligipääsetavas ja ohtlikes keskkondades [28]. Kogemuste ja oskuste omandamiseks arendas NASA oma planeedikulguri jaoks kuumaastiku sarnase digitaalkeskkonna. Keskkond loodi Gazebos kasutamiseks, kus teadlased said testida kulguri sõitmist ja süsteemide ning instrumentide tööd. [29]

2. Töö eesmärk ja nõuded

2.1. Eesmärk

Bakalaureusetöö eesmärk on luua Tartu linna Narva maantee ringristmikust digikaksik, mida saaks kasutada isejuhtivate sõidukite arenduseks.

2.2. Funktsionaalsed nõuded

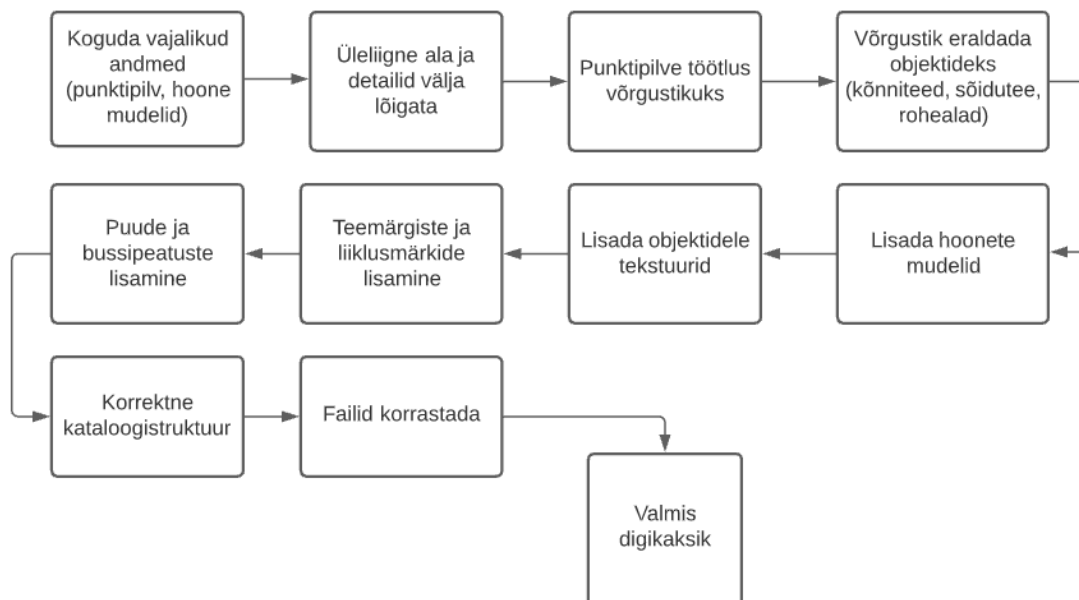
- Digikaksik imiteerib nii füüsiliselt kui ka visuaalselt Tartu linna Narva mnt ringristmikku.
- Digikaksik on integreeritud Gazebo simulatsiooni keskkonnaga, et võimaldada ROSi toega robotite kasutamist.

2.3. Mittefunktsionaalsed nõuded

- Lahendus toimib Gazebo v9 simulaatoril.
- Kogu lahendus on dokumenteeritud ja eksisteerib kasutusjuhend.
- Lahendus on vabalt allalaetav GitHubist, ut-ims-robotics organisatsiooni lehelt.

3. Digikaksiku loomise protsess

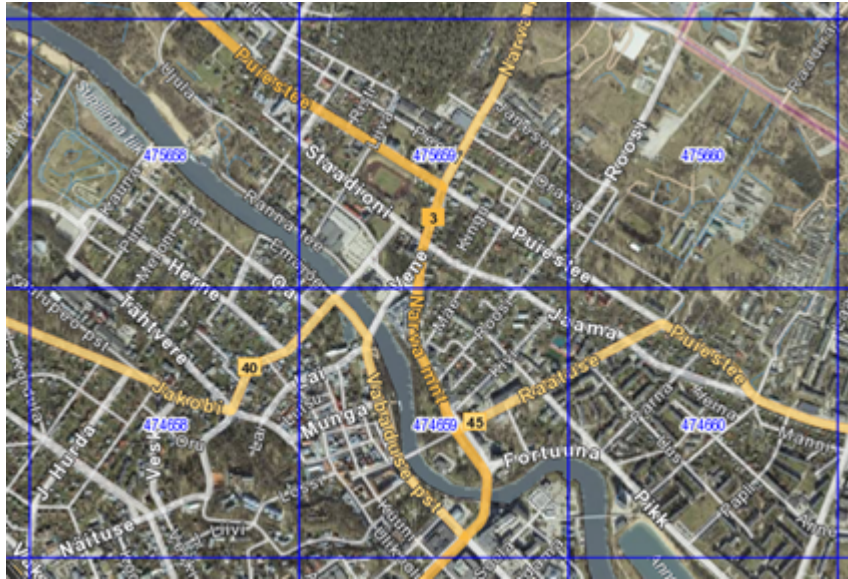
Digikaksik loodi kasutades andmeid Eesti Maa-ameti aerolaserskaneerimise punktipilve [30] ja Ehitisregistri hoone mudelid [31]. Punktipilve töödeldi kasutades CloudCompare'i [32] ja muudeti võrgustikuks mida saab Blenderis edasi töödelda. Blenderis eraldatakse teed, kõnniteed ja muud alad, et müra eemaldamine ja tekstuuri peale kandmine oleks lihtsam. Lisatakse hooned, teemärgistused, liiklusmärgid, puud ja bussipeatused. Lõpuks demonstreeritakse korrektset kataloogistruktuuri ja failide korrastamist. Kogu digikaksiku valmimise protsess on välja toodud joonisel 8.



Joonis 8. *Protsessi selgitav järjestus.*

3.1. Punktipilv

Võimalikult täpse digikaksiku loomiseks on töö raames kasutatud Maa-ameti 2020. aasta aerolaserskaneerimise kõrguspunkte. Punktipilved on laaditud alla Maa-ameti kodulehelt [33]. Vastav asukoht jääb 1:2000 (1 km x 1 km) kaardi mõõtkavas numbritele 474659 ja 475659 (joonis 9).

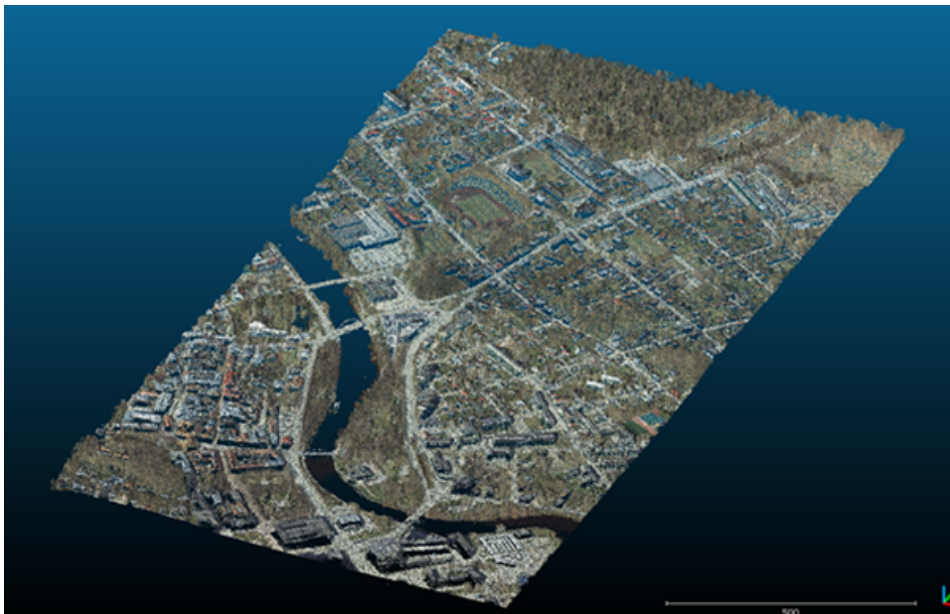


Joonis 9. Kaardilehe ruudustik Maa-ameti kaardirakendusel. [34]

3.2. Punktipilve töötlus

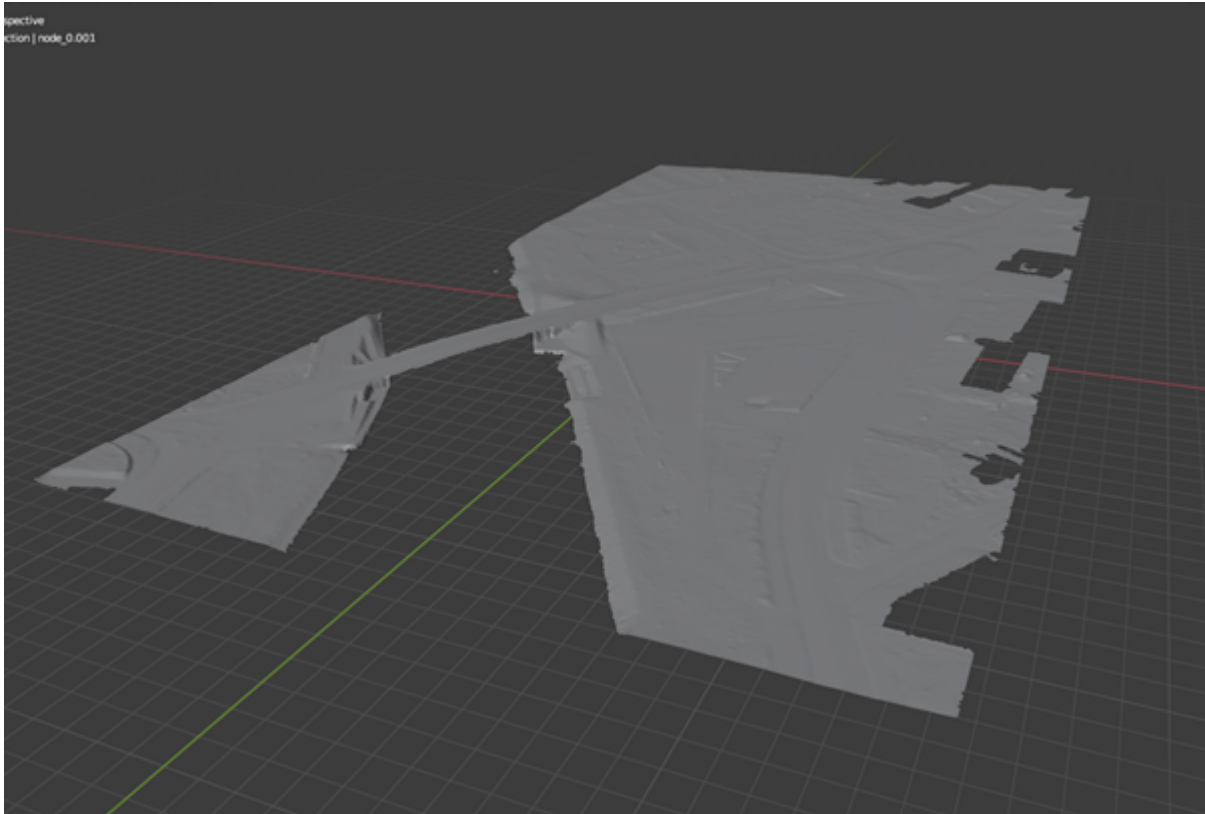
Punktipilved on seejärel vaja töödelda vastava punktipilve töötlemiseks mõeldud tarkvaraga, mis selles töös on CloudCompare (joonis 10) [32]. CloudCompare on 3D punktipilve töötlemiseks loodud avatud lähtekoodiga tarkvara.

Kasutatud punktipilved katavad pindala 2x1 km.



Joonis 10. Allalaetud punktipilved CloudCompare-is.

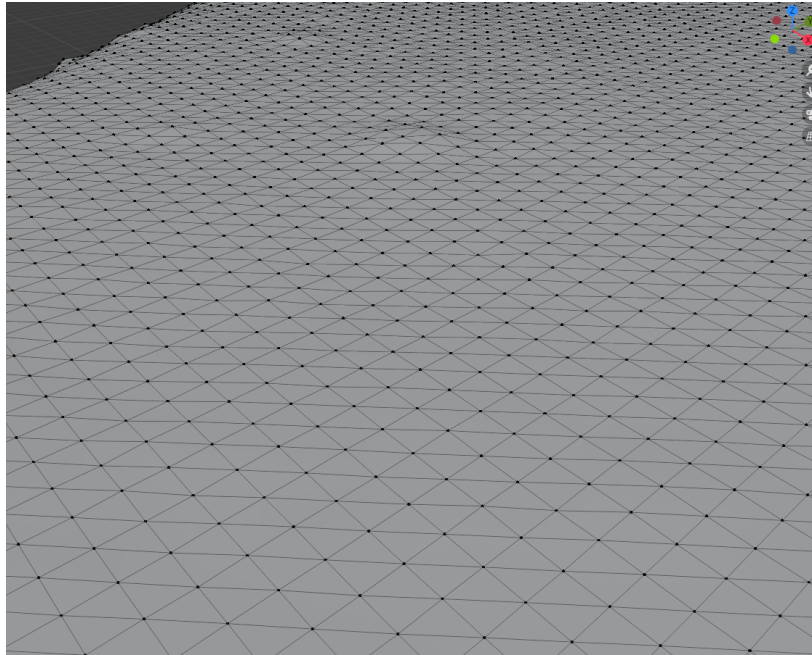
Töö hõlmab vaid ringristmiku ümbritsevat ala, seega suure osa punktipilvest saab eemaldada. Alles jääb vaid ringristmiku ümbrus ja sellest saab genereerida võrgustiku (ingl k *mesh*), millest eemaldab veel hooned ja puud (joonis 11). Hooned ja puud eemaldame, sest võrgustiku genereerimisel muutuvad need deformeerunuks. Vastava võrgustiku saab eksportida .obj failitüübiks, mida saame kasutada Blenderis.



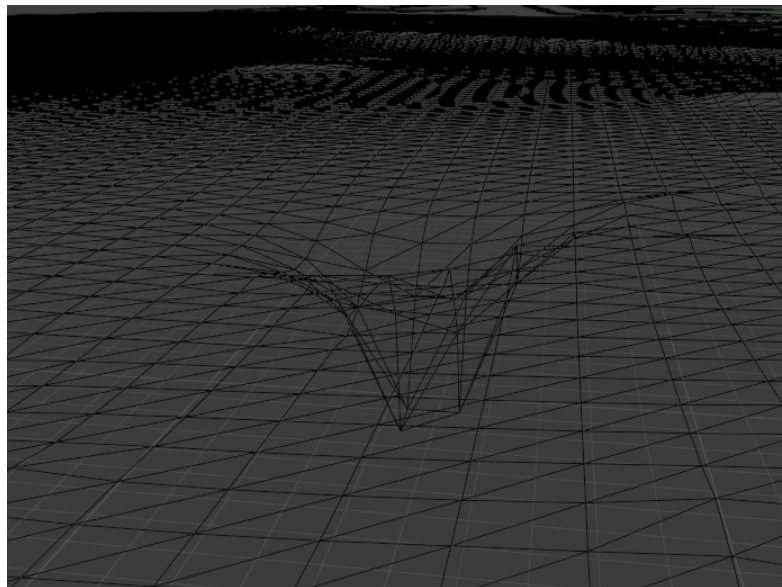
Joonis 11. Punktipilvest loodud võrgustik Blenderis.

3.3. Võrgustiku eraldamine objektideks

Loodud võrgustik koosneb kolmnurkadest (joonis 12), mis tuleb eraldada erinevateks objektideks nagu kõnnitee ja sõidutee, et sellele oleks võimalik kanda tekstuuri ja kohad, kus vaja müra eemaldada (joonis 13). Muudetakse vaid objekti, mitte kogu võrgustikku. Võrgustikul võib esineda väiksemat müra, mida punktipilve töötluses algoritmid ei tuvastatud. Müra saab eemaldada: ala keskmistades, müra välja lõigates ja lasta Blenderil automaatselt auk täita või käsitsi parandada.



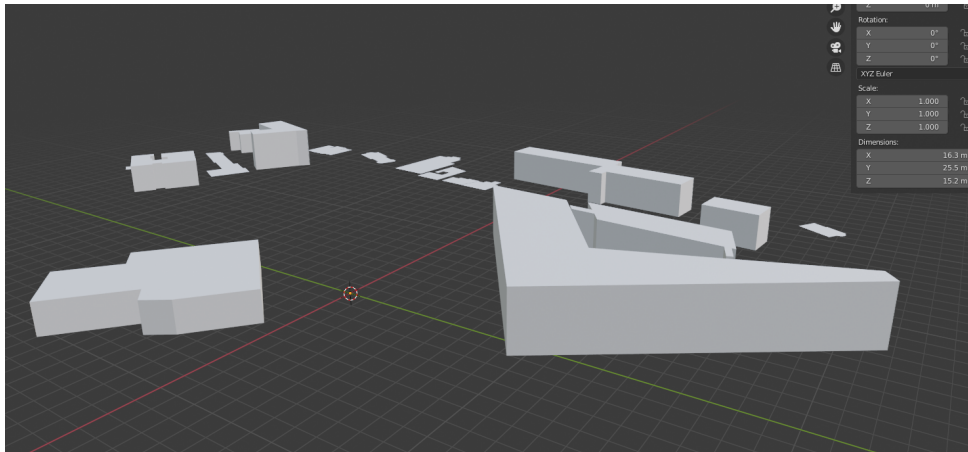
Joonis 12. *Loodud võrgustik, mis koosneb kolmnurkadest.*



Joonis 13. *Näide mürast, kus võrgustik on deformeerunud.*

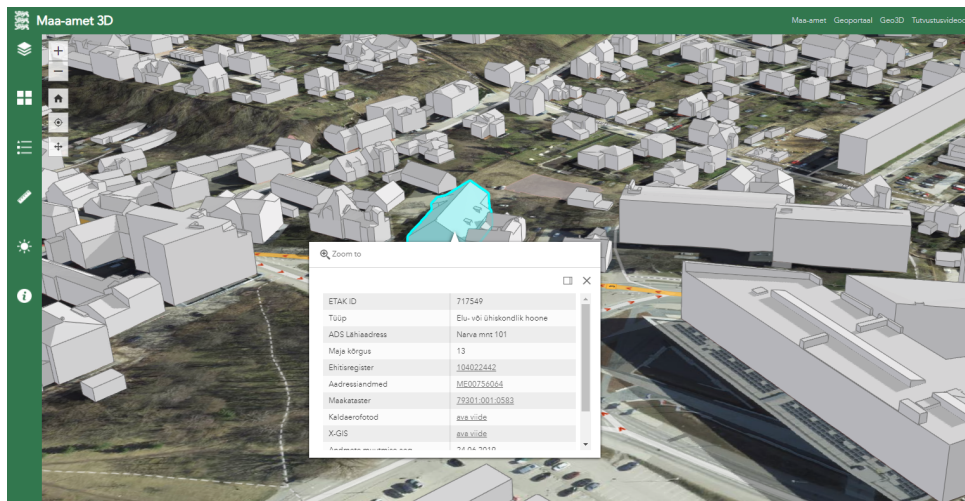
3.4. Hoonete mudelite lisamine

Digikaksikule on vaja lisada ümbruses olevad hooned. Hoonete mudelid on võetud Ehitisregistrist [31].



Joonis 14. Ringristmiku ümbruses olevad hooned.

Mõned hooned on tulnud lamedad (joonis 14), Ehisregistri rakenduses on mainitud, et võib esineda tehnilisi tõrkeid [31]. Probleemi lahendamiseks kasutame Maa-ameti 3D kaardirakendust, kust saame uurida iga hoone kõrgust (joonis 15) [16].

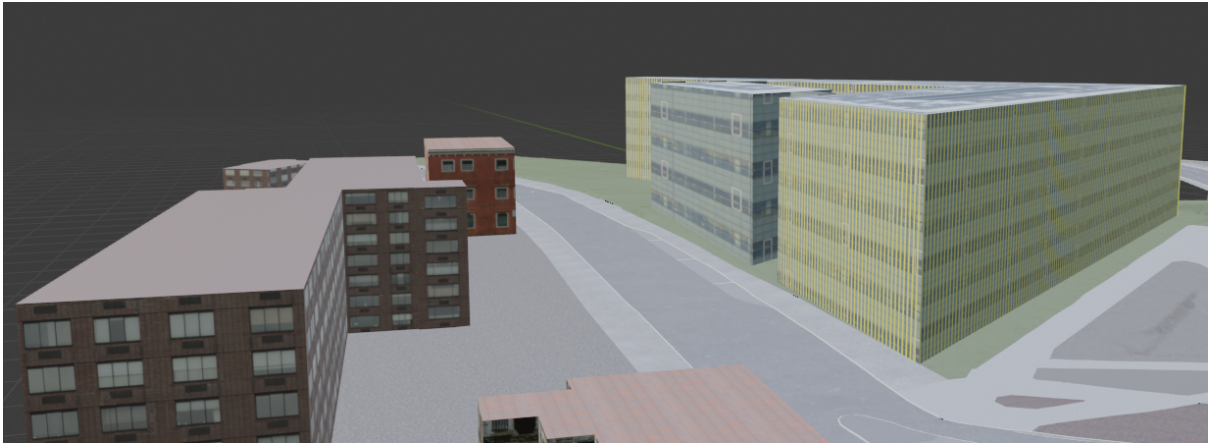


Joonis 15. Maa-ameti 3D rakenduses hoone info kuvamine [16].

Maa-ameti andmete põhjal parandame hoonete mudelite kõrgused [16].

3.5. Objektidele tekstuuri lisamine

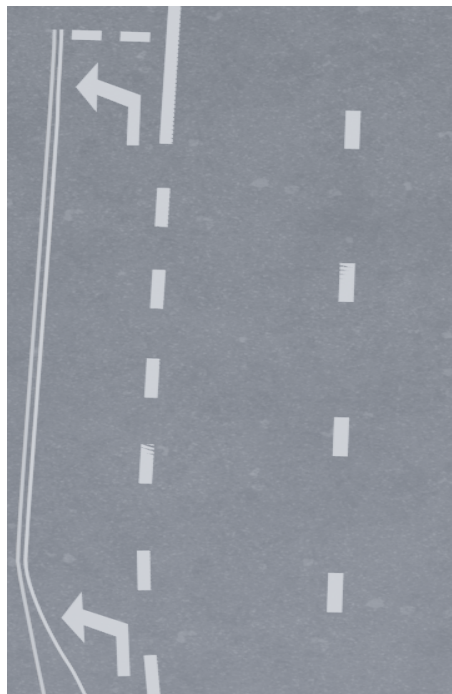
Visuaalse sarnasuse saavutamiseks peab objektidele peale kandma tekstuuri. Blender pakub võimalust objektile peale kanda ühevärvilist või keerukamat mustrit. Töös kasutatud tekstuurid on saadud lehekülgedelt, mis pakuvad tasuta kasutajate poolt loodud tekstuure (joonis 16) [35], [36].



Joonis 16. *Objektid, kuhu on kantud tekstuurid.*

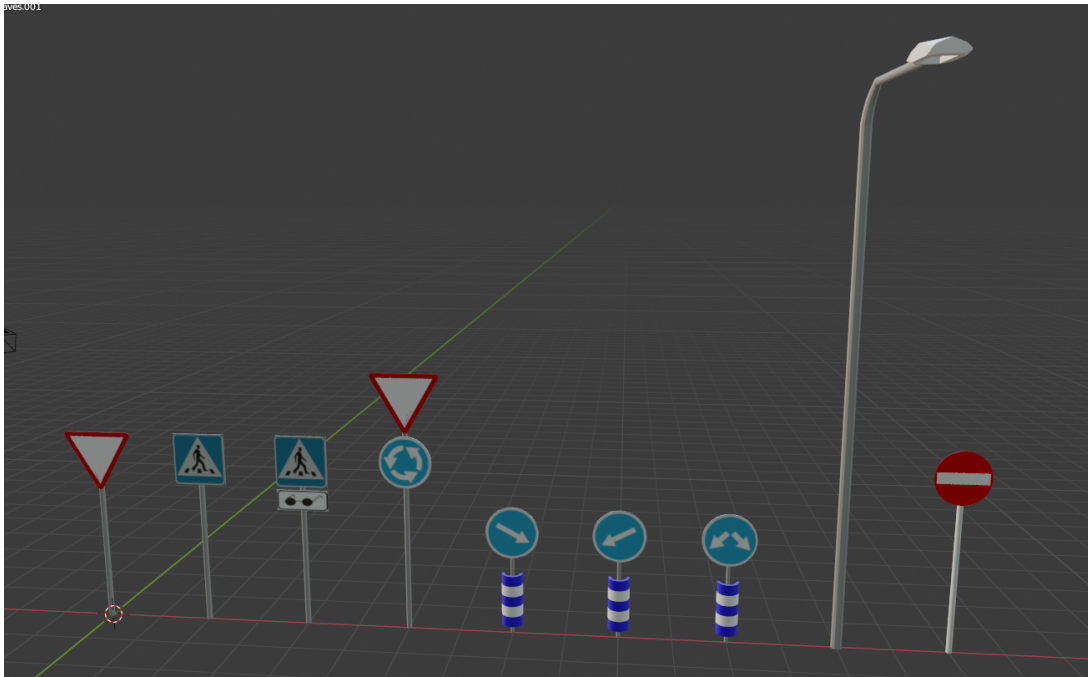
3.6. Teemärgiste ja liiklusmärkide lisamine

Järgnevalt on vaja sõiduteele lisada teemärgistused, mis vastaksid reaalsusele (joonis 17). Tee märgistamiseks luuakse uus objekt mis kantakse sõidutee peale. Märgistuste täpsuseks on võetud taustaks Maa-ameti ortofotod [37]. Lisaks on jälgitud seaduses sätestatud liiklusmärkide, teemärgiste vastavaid pikkuseid ja laiuseid [38].



Joonis 17. *Teemärgistused sõiduteel.*

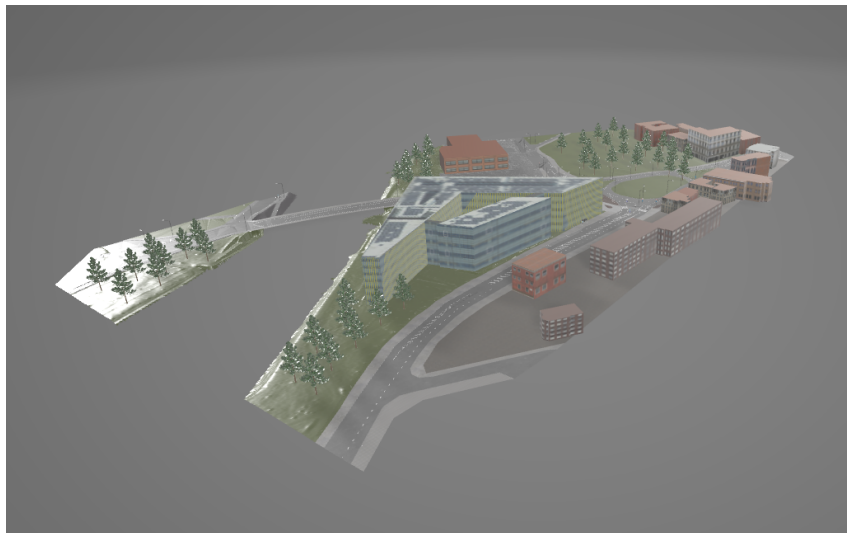
Töö raames loodi liiklusmärgid, mis esinevad ringristmiku ümbruses. Liiklusmärgid loodi kasutades Blenderi (joonis 18).



Joonis 18. Digikaksiku jaoks loodud liiklusmärgid ja tänavalatern.

3.7. Puude ja bussipeatuste mudelite lisamine

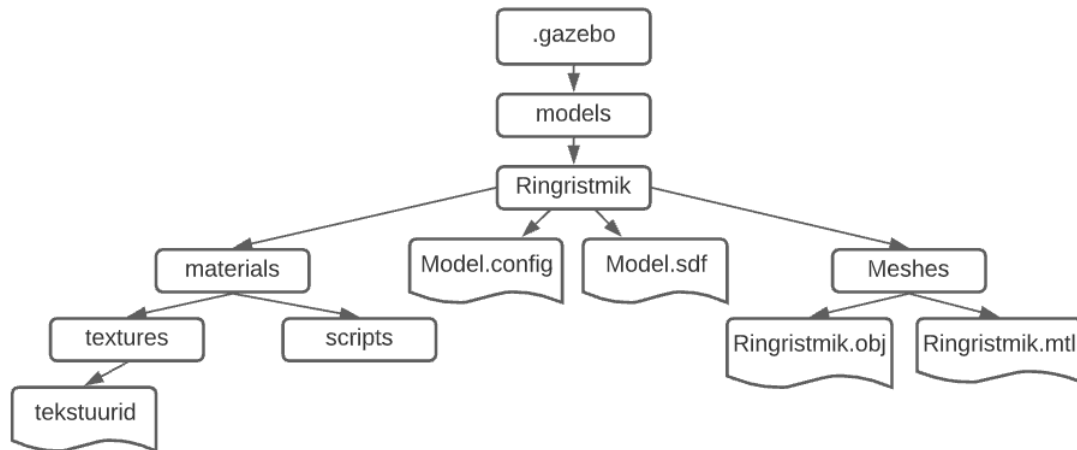
Keskkonnale lisame viimaseks puid ja bussipeatusi. Mudeliteks kasutame tasuta kasutamiseks loodud mudeleid [39], [40]. Kui mudelid on lisatud, saame genereerida .obj faili, mida saab vaadata Windows 3D vaaturiga (joonis 19) [41].



Joonis 19. Loodud digikaksik Windows 3D vaaturis.

3.8. Kataloogstruktuur Ubuntu

3D mudeli implementeerimisel Gazeboga on tarvis mudeli failid tõsta Gazebo mudelite kataloogi või lisada Gazebo keskkonnamuutujate hulka kataloog, kus mudeli failid asuvad. Näitena kasutame meetodit, kus lisame failid Gazebo mudelite kataloogi. Kataloogstruktuur peab olema järgnev (joonis 20).



Joonis 20. Vajalik kataloogstruktuur mudeli jaoks.

3.9. Faili parameetrid

3D mudeli esituseks Gazebos on vaja lisada kaks faili, `model.sdf` ja `model.config`.

- `Model.config` on fail, mis ütleb Gazebole, millist `model.sdf` faili peab avama ja infot mudeli kohta, mis mudel see on, kes on looja ja vajadusel kellega kontakteeruda.
- `Model.sdf` on fail, mis sisaldab kõiki mudeliga seotud parameetreid: visuaal, kokkupõrke, inertsus, sensor ja valgus.

`Model.config` faili lisatakse info mudeli enda ja looja kohta (joonis 21).

```
<?xml version="1.0"?>

<model>
  <name>Tartu Narva maantee Ringristmik</name>
  <version>1.0</version>
  <sdf version="1.6">model.sdf</sdf>

  <author>
    <name>Rudolf Poldma</name>
    <email>rudolfpoldma9@gmail.com</email>
  </author>

  <description>
    EST:
    Digikaksik Tartu Narva ringristmikust
    ENG:
    Digital twin of Tartu Narva road roundabout
  </description>
</model>
```

Joonis 21. *Model.config* sisu.

Model.sdf faili on vaja lisada visuaalse ja kokkupõrke parameetrid ja tekstuuride ja koodide asukoht (joonis 22). Mõlema parameetri puhul lisada 3D mudeli asukoht.

```

<?xml version="1.0" ?>
<sdf version="1.6">
  <model name="TNM_Ringristmik">
    <static>true</static>
    <link name="link">
      <pose>0 0 -5 1.55 0 0</pose>
      <collision name="collision">
        <geometry>
          <mesh>
            <uri>model://TNM_Ringristmik/meshes/TNM_Ringristmik.obj</uri>
          </mesh>
        </geometry>
      </collision>
      <visual name="visual">
        <geometry>
          <mesh>
            <uri>model://TNM_Ringristmik/meshes/TNM_Ringristmik.obj</uri>
          </mesh>
        </geometry>
        <material>
          <script>
            <uri>model://TNM_Ringristmik/materials/scripts</uri>
            <uri>model://TNM_Ringristmik/materials/textures</uri>
            <name>TNM_Ringristmik</name>
          </script>
        </material>
      </visual>
    </link>
  </model>
</sdf>

```

Joonis 22. Faili *model.sdf* parameetrid.

Blenderis .obj failitüübi genereerimisel, luuakse ka fail *Mudel.mtl*, mis sisaldab infot tekstuuride ja materjalide kohta (joonis 23). Selle faili sisu tuleb muuta nii, et kõik tekstuuride asukohad oleks suunatud loodud tekstuuride kataloogi.

```

newmtl Material.007
Ns 225.000000
Ka 1.000000 1.000000 1.000000
Kd 0.800000 0.800000 0.800000
Ks 0.500000 0.500000 0.500000
Ke 0.000000 0.000000 0.000000
Ni 1.450000
d 1.000000
illum 2
map_Kd ../materials/textures/graybrick.jpg

```

Joonis 23. Fail *.mtl* lõik õige tekstuuri asukohaga.

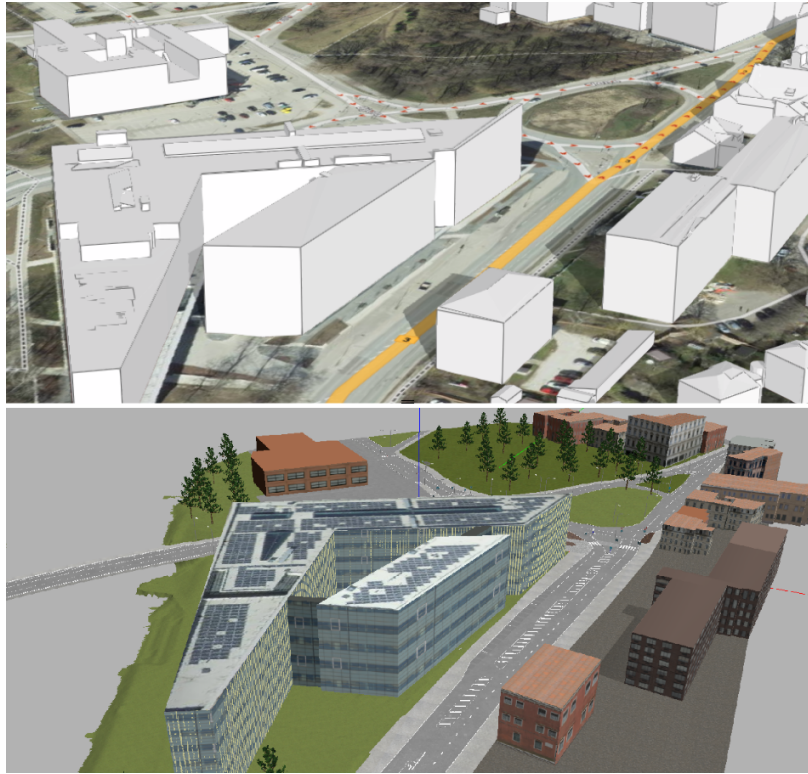
4. Digikaksiku esitus Gazebos

Digikaksiku demonstreerimiseks Gazebos on eeltöö eelmises peatükis tehtud. Joonisel 24 tuuakse näitena Gazebo 9 simulaatoriga kaasatulev maasturi mudel [42] loodud Narva mnt digikaksiku keskkonnas, mida võrreldakse Google Maps [43] vaatega.

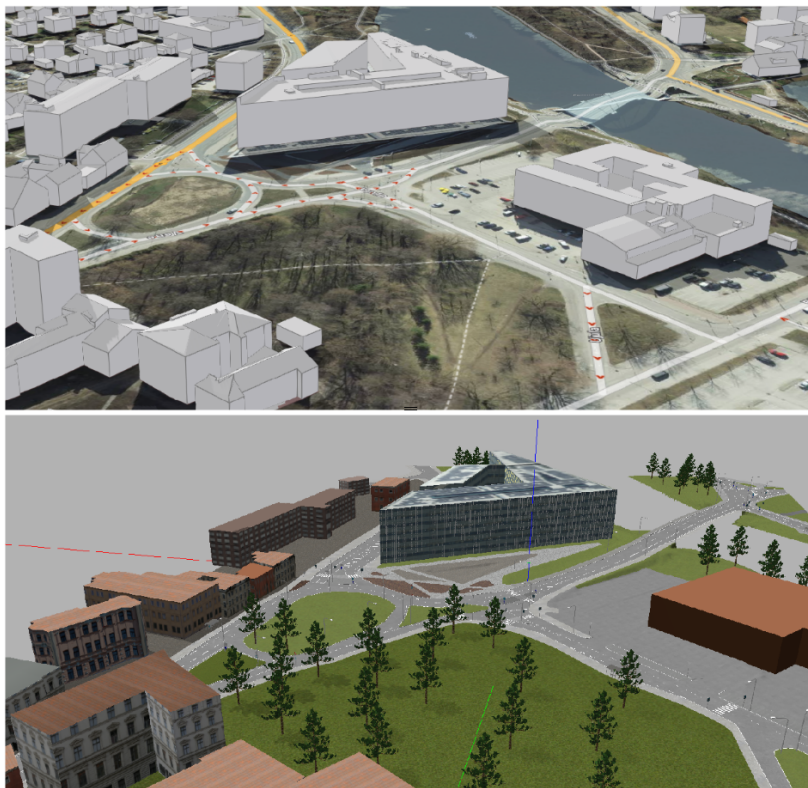


Joonis 24. Digikaksiku võrdlus Google Maps vaatega.

Joonisel 25 ja 26 on toodud võrdluseks vaated ringristmikust Maa-ameti kaardirakendusest [16] ja loodud digikaksikust.



Joonis 25. Vaate võrdlus ringristmikust põhja suunas.



Joonis 26. Vaate võrdlus ringristmikust lõuna suunas.

5. Arutelu

Töö tulemusena valmis digikaksik Tartu Narva maantee ringristmikust, mida on võimalik kasutada Gzebos isejuhtivate sõidukite arenduseks. Digikaksiku koostamiseks kasutati Eesti Maa-Ameti aerolaserskaneerimise punktipilve ja Ehitisregistri hoone mudeleid [30], [31]. Gzebos implementeeriti digikaksik teiste vabalt kättesaadavate mudelitega, et kontrollida töökorda. Bakalaureusetöö tugevuseks on digikaksiku mudeli vaba kättesaadavus ja kasutades modelleerimistarkvara, on võimalik sealt eemaldada ja lisada mudeleid ja objekte vastavalt vajadusele. Töös on kasutatud ajakohaseid andmeid.

Bakalaureusetöö raames valminud digikaksik ei ole üks-ühele täpne ega detailne. Töös kasutatud meetodite puhul oli kitsaskohaks objektide eraldamine, mis oli aeganõudev ja manuaalne tegevus. Objektide efektiivsemaks eraldamiseks oleks mõistlik punktipilvest genereerida värvidega võrgustik, kust oleks võimalik eraldada objekte kasutades värvide väärtusi.

6. Kokkuvõte

Füüsiliste objektide ja keskkondade simuleerimine võimaldab efektiivsemalt arendada ja optimeerida tehnikat või keskkonda vastavalt vajadusele. Töö eesmärgiks oli luua digikaksik Tartu Narva maantee ringristmikust, mida oleks võimalik implementeerida Gazebos. Töö tulemusena valmis digikaksik Tartu Narva maantee ringristmikust, mille abil on tulevikus võimalik arendada ja testida erinevaid isejuhtivaid sõidukeid. Loodud lahendus toimib Gazebos vastavalt nõuetele ja mida on võimalik muuta vastavalt vajadustele.

Kasutatud kirjandus

- [1] X. D. Luan, Y. X. Xie, L. Ying, ja L. D. Wu, „Research and Development of 3D Modeling“, *IJCSNS*, 8, 2008, 5.
- [2] H. Yun ja D. Park, „Simulation of Self-driving System by implementing Digital Twin with GTA5“, *2021 International Conference on Electronics, Information, and Communication*, 2021, 1–2, DOI: 10.1109/ICEIC51217.2021.9369807.
- [3] S. Ivanov, K. Nikolskaya, G. Radchenko, L. Sokolinsky ja M. Zymbler, „Digital Twin of City: Concept Overview“, *Global Smart Industry Conference (GloSIC)*, 2020, 178–186, DOI: 10.1109/GloSIC50886.2020.9267879.
- [4] A. F. Mendi, T. Erol, ja D. Dogan, „Digital Twin in the Military Field“, *IEEE Internet Computing*, 2021, 1–1, DOI: 10.1109/MIC.2021.3055153.
- [5] O. G. Brylina, N. N. Kuzmina, ja K. V. Osintsev, „Modeling as the Foundation of Digital Twins“, *2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC)*, 2020, 276–280, DOI: 10.1109/GloSIC50886.2020.9267812.
- [6] „RFpro launches digital twin of bespoke autonomous vehicle testing facility“, *rFpro*, 09, 2020.
<https://www.rfpro.com/rfpro-launches-digital-twin-of-bespoke-autonomous-vehicle-testing-facility/> (vaadatud mai 02, 2021).
- [7] „Digital Road Models“, *rFpro*. <https://www.rfpro.com/digital-road-models/> (vaadatud apr 15, 2021).
- [8] „Digital Twin | GE Digital“. <https://www.ge.com/digital/applications/digital-twin> (vaadatud mai 02, 2021).
- [9] „What is a Digital Twin? | GE Digital“. <https://www.ge.com/digital/blog/what-digital-twin> (vaadatud apr 15, 2021).
- [10] „GE Digital Twin Stories“. <https://www.ge.com/digital/industrial-managed-services-remote-monitoring-for-iiot/> (vaadatud mai 02, 2021).
- [11] „GE Digital Twin Stories - Early warning of steam cooling supply leak on a gas turbine“. <https://www.ge.com/digital/industrial-managed-services-remote-monitoring-for-iiot/article/96207-early-warning-of-steam-cooling-supply-leak-on-a-gas-turbine> (vaadatud apr 15, 2021).
- [12] BBC, Autos, “The jet engines with ‘digital twins’“. <http://www.bbc.com/autos/story/20170214-how-jet-engines-are-made> (vaadatud apr 15, 2021).
- [13] „Modern manufacturing’s triple play: Digital twins, analytics, IoT“. https://www.sas.com/en_us/insights/articles/big-data/modern-manufacturing-s-triple-play-digital-twins-analytics-iiot.html (vaadatud apr 15, 2021).
- [14] Maa-amet, „Geo3D strateegia“. index.php?lang_id=1&page_id=821 (vaadatud apr 15, 2021).
- [15] „Riik avalikustas kogu Eesti 3D kaardi“, *ERR*, 2021.
<https://www.err.ee/1608161203/riik-avalikustas-kogu-eesti-3d-kaardi> (vaadatud mai 02, 2021).
- [16] „Maa-amet 3D“. <https://3d.maaamet.ee/kaart/> (vaadatud apr 15, 2021).
- [17] „Implicit surfaces“. <http://paulbourke.net/geometry/impliciturf/> (vaadatud nov 02, 2020).
- [18] H. Setan, „Close range measurement and 3D modeling“. https://www.academia.edu/1408130/Close_range_measurement_and_3D_modeling (vaadatud: nov 02, 2020)

- [19] J. D. Foley *et al.*, *Computer Graphics: Principles and Practice*. Addison-Wesley, 1996.
<https://books.google.ee/books?id=-4ngT05gmAQC>
- [20] B. Wassermann, T. Bog, S. Kollmannsberger ja E. Rank, „A design-through-analysis approach using the Finite Cell Method. ECCOMAS Congress, 2016, DOI: 10.7712/100016.1984.8920.
- [21] Wikipedia, 2020. „Implicit surface“.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Implicit_surface&oldid=984961802 (vaadatus nov 02, 2020)
- [22] „Subdivision Surfaces“.
https://graphics.pixar.com/opensubdiv/docs/subdivision_surfaces.html (vaadatud nov 02, 2020).
- [23] B. Foundation, „About“, *blender.org*. <https://www.blender.org/about/> (vaadatud apr 06, 2021).
- [24] N. Administrator, „NASA Discovers First Earth-size Planets Beyond Our Solar System“, *NASA*, 2013. http://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/news/kepler-20-system.html (vaadatud apr 15, 2021).
- [25] „Models | 3D Resources“. <https://nasa3d.arc.nasa.gov/models> (vaadatud apr 15, 2021).
- [26] „Gazebo“. <http://gazebosim.org/> (vaadatud apr 15, 2021).
- [27] „Gazebo worlds - Unmanned Underwater Vehicle Simulator Documentation“.
https://uuvsimulator.github.io/packages/uuv_simulator/docs/features/gazebo_worlds/ (vaadatud apr 15, 2021).
- [28] C. E. Agüero *et al.*, „Inside the Virtual Robotics Challenge: Simulating Real-Time Robotic Disaster Response“, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2015, 12, 494–506, DOI: 10.1109/TASE.2014.2368997.
- [29] „NASA Technical Reports Server“, *NTRS*. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20190027571> (vaadatud apr 15, 2021).
- [30] Maa-amet, „Aerolaserskaneerimise kõrguspunktid“. index.php?lang_id=1&page_id=499 (vaadatud apr 15, 2021).
- [31] „Ehitisregister“. <https://livekluster.ehr.ee/ui/ehr/v1/3d> (vaadatud mai 03, 2021).
- [32] „Introduction“, *CloudCompareWiki*.
<http://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=Introduction> (vaadatud apr 15, 2021).
- [33] Maa-amet, „Laadi kõrgusandmed alla“. index.php?lang_id=1&page_id=614 (vaadatud apr 15, 2021).
- [34] „X-GIS 2.0 [Ue3b8OgN]“. <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/link/Ue3b8OgN> (vaadatud apr 15, 2021).
- [35] „Search Results on CC0 Textures“. <https://cc0textures.com/> (vaadatud mai 09, 2021).
- [36] „Building & Facade Texture: Background Images & Pictures“, *Textures*.
<https://www.textures.com/category/buildings/1926> (vaadatud mai 09, 2021).
- [37] Maa-amet, „Laadi ortofotod alla“. index.php?lang_id=1&page_id=610 (vaadatud mai 09, 2021).
- [38] „Liiklusmärkide ja teemärgiste tähendused ning nõuded fooridele, *Riigi Teataja*.
<https://www.riigiteataja.ee/akt/103032011006> (vaadatud mai 09, 2021).
- [39] „Trees realistic 3D - TurboSquid 1218366“, *TurboSquid*.
<https://www.turbosquid.com/3d-models/trees-realistic-3d-1218366> (vaadatud mai 09, 2021).
- [40] „Bus stop street max free“, *TurboSquid*.
<https://www.turbosquid.com/3d-models/bus-stop-street-max-free/676148> (vaadatud mai 09, 2021).
- [41] „Get 3D Viewer“, *Microsoft Store*.

- <https://www.microsoft.com/en-us/p/3d-viewer/9nblggh42ths> (vaadatud mai 09, 2021).
- [42] „Index of /suv“. <http://models.gazebosim.org/suv/> (vaadatud mai 09, 2021).
- [43] „Google Maps“, *Google Maps*. <https://www.google.ee/maps/> (vaadatud mai 20, 2021).

Lisad

Lisa 1.

Loodud digikaksiku repositooriumi asukoht.

https://github.com/ut-ims-robotics/tartu_delta_roundabout_digital_twin

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Rudolf Põldma

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose
 “Tartu linna Narva maantee ringristmiku digitaalse kaksiku loomine”
 mille juhendaja on Karl Kruusamäe
 reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Rudolf Põldma

20.05.2021