

TARTU ÜLIKOOL
Arvutiteaduse instituut
Informaatika õppekava

Oliver Jõgar
Fotorealistliku Kuu pinnase materjali
protseduuriline genereerimine
Bakalaureusetöö (9 EAP)

Juhendaja(d):
Mathias Plans, MSc
Hans Teras, MSc

Tartu 2025

Fotorealistliku Kuu pinnase materjali protseduuriline genereerimine

Lühikokkuvõte:

Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli luua protseduuriliselt genereeritud virtuaalne Kuu arvutigraafika materjal mängumootoris Unreal Engine 5, mis annaks võimalikult fotorealistliku tulemi. Lõputöö käigus tutvustati seostuvat ULYSSES projekti, uuriti Kuu pinnase omadusi ning räägiti materjali olemusest ja meetodikast. Tulemuseks saadi Unreal Engine 5 kaudu loodud protseduuriline Kuu materjal, mis täitis ettenähtud nõuded ning mida võrreldi tegeliku Kuuga.

Võtmesõnad: Protseduuriline genereerimine, Kuu, fotorealism, Unreal Engine, simulatsioon, arvutigraafika, varjutaja

CERCS: P170 Arvutiteadus, arvutusmeetodid, süsteemid, juhtimine;

Procedural Generation of Photorealistic Moon Surface Material

Abstract:

The goal of this thesis was to create a procedurally generated computer graphics material of the Moon in the Unreal Engine 5 game engine, which would give the most photorealistic result possible. This thesis introduces the ULYSSES project, examines the properties of the Moon surface and explains the basics of computer graphics materials. The result was a procedural material made in Unreal Engine 5 that met the established requirements and which was compared against the real Moon.

Keywords: Procedural generation, Moon, photorealism, Unreal Engine, simulation, computer graphics, shader

CERCS: P170 Computer science, numerical analysis, systems, control;

Sisukord

1. Sissejuhatus.....	4
2. ULYSSES.....	5
2.1 Nõuded ja suunised.....	6
3. Kuu omadused.....	7
3.1 Kraatrid.....	8
3.2 Regoliit.....	8
3.3 Mered ja mandrid.....	9
3.4 Varjud.....	9
4. Metoodika.....	11
4.1 Materjal.....	11
4.2 Füüsikal baseeruv renderdamine.....	12
4.2.1 Normaalvektorid.....	12
4.2.2 BRDF.....	13
4.3 Protseduuriline genereerimine.....	15
5. Materjali loomine.....	18
5.1 Kraatrid.....	19
5.2 Regoliit.....	21
5.3 Albeedo kaart ja mered.....	21
5.4 Varjud.....	22
6. Tulemus.....	23
6.1 Kraatrid.....	23
6.2 Regoliit.....	24
6.3 Mered ja mandrid.....	25
6.4 Varjud.....	25
6.5 Edasiarendused.....	26
7. Kokkuvõte.....	27
Viited.....	28
Lisa 1. Terminid.....	29
Lisa 2. Oren-Nayar BRDF mudeli HLSL kood.....	30
Litsents.....	31

1. Sissejuhatus

Kuukulgurite, satelliitide ning muu kosmosetehnika üks peamisi etappe arendamisel on sisuka testimise läbimine. Nende instrumentide kõrgete materjali- ja ajakulude tõttu ei ole rikked missiooni jooksul aktsepteeritavad. Selleks, et seadet saaks efektiivselt katsetada, on vaja luua katsetuskeskkond. Ideaalis luuakse neid vähemalt kaks; füüsiline analoog ning simulaator. Koostöös seadme füüsilise prototüübi ning digitaalse kaksikuga toetab ja kiirendab katsetuskeskkond aparatuuri arendust ning tõstab töökindluse taset. Kuna füüsilist keskkonda ei ole alati lihtne ega soodne otstarbekalt jäljendada (näiteks mikrogravitatsiooni olek), siis simulaator aitab nende puuduste täitmisega.

Tartu observatooriumis on arendusel kuukulgur nimega KuupKulgur ning sellega paralleelselt seotud simulaatori projekt ULYSSES. Simulaatori eesmärk on pakkuda arendusplatvormi nii KuupKulguri kui ka teiste seadmete katsetusteks virtuaalses keskkonnas. Selles projektis varasemalt kasutusel olnud Kuu tekstuurid ja graafika materjalid on olnud oodatust kehvema kvaliteediga. Fotorealistlikuma tulemi jaoks peab looma uue materjali. Materjal tähendab arvutigraafikas reeglistiku, mis määrab renderdatud objekti pinnase optilised omadused.

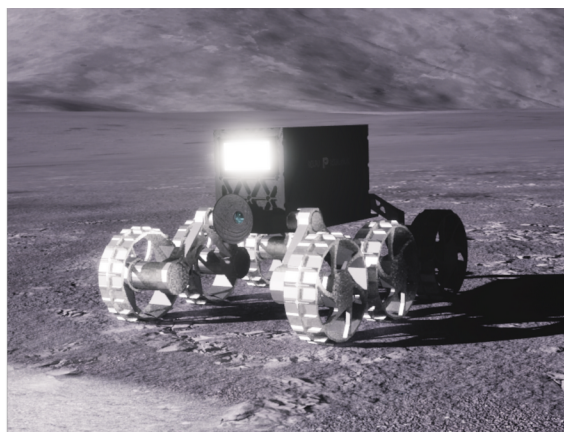
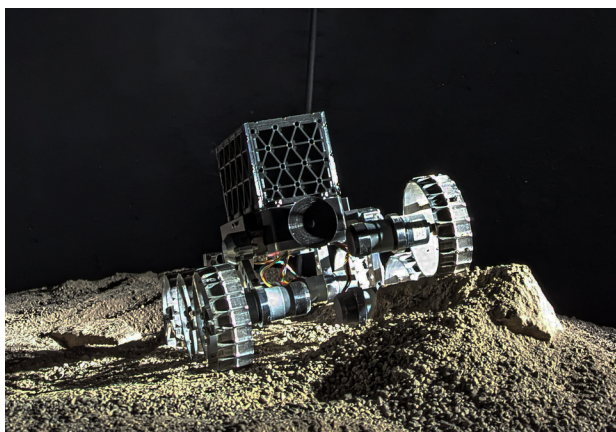
Töö eesmärk on luua fotorealistlik Kuu materjal läbi protseduurilise genereerimise. Materjal tuleb luua Unreal Engine 5 mängumootoris, et seda oleks võimalik hiljem täiendada ning implementeerida ULYSSES projekti.

Teine peatükk kirjeldab ULYSSES projekti detailsemalt ning millised suunised on antud tulemusele. Töö kolmas peatükk selgitab Kuu erinevaid omadusi, mida materjal peab võimalikult hästi imiteerima. Neljas peatükk selgitab töö metoodikat, nimelt selgitatakse materjali, füüsikal baseeruvat renderdamist ning protseduurilist genereerimist. Viies peatükk kirjeldab töö käiku ning kuidas eelnevalt kirjeldatud võtteid rakendati materjali loomisel. Kuues peatükk võrdleb tulemust päris Kuuga ning millised edasiarendused on võimalikud tulevikus.

Töö toimub koostöös Tartu Ülikooli Observatooriumi kosmose ja kulgurite simulatsiooni projektiga ULYSSES. Eduka lõpptulemuse puhul võidakse töö käigus loodud materjali edasi arendada ning kasutada Kuu simulatsiooni otstarbeks.

2. ULYSSES

UniversaL phYsics-based planetary SurfaceS Exploration Simulator ehk ULYSSES on Tartu observatooriumi poolt algatatud taevakehade simulatsiooni keskkond. See on nii nimetatud liivakast robotite, kuukulgurite ja satelliitide arenduseks ning nende funktsionaalsuse valideerimiseks eri keskkondades ja maastikel [1]. Projekti aluseks on Unreal Engine 5 mängumootor. Simulaatorit kasutatakse KuupKulgur (pilt joonisel 1) projekti katsetamiseks¹, mis on Eesti esimene kuukulguri projekt.



Joonis 1. KuupKulguri prototüüp Tartu observatooriumi kosmosemissioonide simuleerimise keskuses (vasak) ning KuupKulguri digitaalne kaksik ULYSSES simulaatoris (parem).

Algselt kasutati simulaatoris Unreal Marketplace'ist pärit Kuu regoliidi ja isegi mustvalge sambla tekstuuri. Need ei sobinud antud põhjustel:

- algsed materjalid olid loodud “maastiku” (ingl *landscape*) materjalidena, kuid projekti üleminek 3D-mudelitel põhinevale pinnasele nõudis “staatilise võrgustiku” (ingl *static mesh*) materjali loomist (erinevus materjalide tüüpide vahel selgitatakse täpsemalt neljandas peatükis);
- olemasolevad materjalid olid loodud lokaalselt joondatult, ehk materjal ei arvestanud tükeldatud maapinna osade üleminekutega, mis lõi ebasujuva tulemuse (täpsem kirjeldus neljandas peatükis);
- kasutatud tekstuurid nägid ainult head välja lähedalt, kuid mitte kaugelt.

Simulatsioon on olemuselt reaalmaailma jäljendamine katsetuste läbiviimiseks. Simuleeritud süsteemi vastavus tegelikkusele on tähtis omadus võimalikult kasuliku simulatsiooni loomisel. Kuna projektis kasutuses olev Kuu materjal ei ole piisav kvaliteetse tulemuse saavutamiseks,

¹<https://tospegroup.space/projects/kuupkulgur/>

siis on tarvis leida materjali jaoks uus lahendus. Uuele materjalile määrati teatud sihtmärgid, mida täpsustab järgnev peatükk.

2.1 Nõuded ja suunised

Materjal loodi eesmärgiga tõestada protseduurilise genereerimise sobilikust ULYSSES projektis kasutuseks. Tulevikus on planeeritud integreerida see Kuu digitaalse kõrgusmodeliga (ingl *digital elevation model* ehk DEM). Kõrgusmodel pakub sellisel juhul üldise maastiku ning suuremate kraatrite kuju, mida täiendatakse protseduuriliselt genereeritud tehnilike detailidega. Töö tulemusele on paika pandud järgnevad nõuded ja suunised ULYSSES meeskonna poolt:

- peab olema loodud Unreal Engine 5 mängumootori materjalina;
- peab kasutama normaalvektorite kaarti ilma geomeetriat muutmata.
- võiks imiteerida võimalikult palju Kuul esinevaid nähtusi;
- võiks olla fotorealistlik vaadates orbiidilt, kus üks piksel võrdub ~20 cm;

Virtuaalset Kuu pinda taheti implementeerida materjalina, kuna see pakub paremat võimekust võrreldes teiste lahendusega.

3. Kuu omadused

Kuu graafika materjali loomiseks on esmalt vaja aru saada nähtustest, mis kõige rohkem iseloomustavad Kuu välimust. Selle peatüki eesmärk on kirjeldada neid nähtusi ning selgitada nende printsiipe.

Kuu on Maa ainus looduslik kaaslane ning lähim taevakeha. Tema mediaan raadius on 1737.103 ± 0.015 km [2, lk 1601]. Võrreldes Maaga, mille mediaan raadius on keskmiselt 6371 km [3, lk 131], on Kuu umbes 2% Maa ruumalast. Välimuselt on ta kera kujuga, põhiliselt halli värvi ning kaetud tumedamate ning heledamate aladega, näidatud joonisel 2². Kuu on pidevalt suunatud Maa poole ühe küljega, mille tõttu eristatakse Kuu esi- ning tagakülge.



Joonis 2. Kuu eeskülje (vasak) ning tagakülje (parem) vaade.

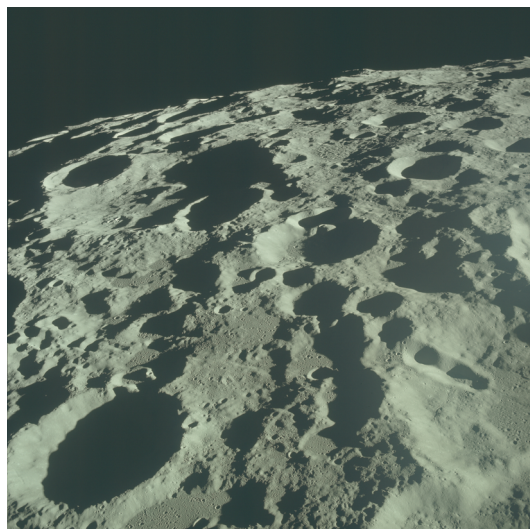
Kuul on praktiliselt olematu atmosfäär (umbes 14 korda hõredam võrreldes Maaga) [4, lk 40], ning sellega seotud optilised ning meteoroloogilised nähtused, nagu näiteks valguse hajumine ja neeldumine, ilm, tuul, pilved jt, puuduvad³. Seetõttu on tal ka puudulik kaitse väikekehade ja kosmosetolmu vastu. Selle tagajärjel on nende ja Kuu pinnase vahel tihedad kokkupõrked. Need on loonud talle omased kraatrid ning on lisaks tekitanud aluspõhja peale olemuselt puudrise kivimite kihi, mida nimetatakse regoliidiks. Mõlemad katavad valdava enamuse Kuu pinnasest [4, lk 285]. Ilmanähtuste ja geoloogilise aktiivsuse puuduse tagajärjel on Kuu pinnas hästi säilinud, mille tõttu leidub kraatreid üle 2 miljardi aasta vanad.

²Autor: NASA LRO / Jatan Mehta

³https://et.wikipedia.org/wiki/Atmosf%C3%A4%C3%A4r#Optilised_omadused

3.1 Kraatrid

Kraater on meteoriidi või muu sarnase taevakeha kokkupõrke tagajärjel tekkinud lehtrikujuline süvend pinnases. Kokku on suudetud loendada üle 1,3 miljoni kraatri diameetriga ≥ 1 km ning 6 972 kraatrit ≥ 20 km [5]. Kraatrid on olenevalt maandunud taevakehast varieeruva suuruse ja kujuga, nagu on näha joonisel 3⁴. Kraatri tulemusel jäävad vahepeal alles radiaalselt heledamad välja paiskunud materjali kiired. Üldjuhul on kraatri ääred ja väljapaiskekiht heledam kui ümbritsev maastik, kuna päikesekiirgus on vähem aega seda mõjutanud. Samuti on mõnedel kraatritel leida keskmine tipp, mis tekib pritsmeefekti ja materjali sulamise kombinatsioonina⁵. Kokkupõrge samuti tekitab kõrvaltoote, nimelt regoliidi.



Joonis 3. Pilt kraatritest Apollo 11 missioonilt. On näha väga suurt variatsiooni kraatrite suurustes.

3.2 Regoliit

Regoliiti nimetatakse lahtiseks heterogeenseks materjali kihiks, mis katab aluspõhja⁶. Seda leidub Kuul, Maal, Marsil ja mitmel teisel taevakehal. Kuu puhul on ta värvi poolest erineva heledustega hall, tulenevalt aluspõhja koostisest. Vesi, hapnik ning tuul, mis üldjuhul mõjutavad Maa pealse regoliidi tekkimist, puuduvad Kuu peal. Tulemusena on võrdlemisi kohev ja puudrine tekstuur, mida näitab joonis 4⁷. Peamiselt tekib regoliit Kuu peal teiste taevakehadega kokkupõrkel lisaks kraatritele. Regoliidi juurde tekkimine oleneb olemasoleva



Joonis 4. Pilt Apollo 11 missioonilt, mis illustreerib Kuu regoliidi peenet ja puudrist tekstuuri.

⁴Autor: NASA, AS11-44-6610

⁵https://et.wikipedia.org/wiki/Kuu_kraatrid#Iseloomustus

⁶<https://et.wikipedia.org/wiki/Regoliit>

⁷Autor: NASA, AS11-40-5877

regoliidi kihi paksusest. Mida suurem kiht, seda suuremaid kokkupõrkeid on vaja et jõuda aluspõhjani ning materjali lahti paisata [4, lk 285]. Regoliidi kihi paksus, värvus ja kompositsioon on piirkonniti erinevad, kõige märgatavalt erinedes meredes ja mandrites.

3.3 Mered ja mandrid

Kuu tumedaid laike nimetatakse meredeks. Need on tekkinud basaltsete laava basseinide jahtumise käigus [4, lk 184]. Nad on üle ujutanud ja sulatanud oma asukohas eelnevad mandri alad, seal hulgas ka kraatrid. Selle tõttu on nendes alades ühtlasem pinnas ning vähem kraatreid, nagu on näha joonisel 5⁸. Mandrid on kõik ülejäänud heledamad alad. Need on vanemad kui mered ja seega sisaldavad rohkem kraatreid. Kompositsiooni poolest on mandrid anortosiidsed⁹ ehk koosnevad suurel hulgal naatrium-kaltsiumpäevakivi ning lisanduvate mineraalide segust¹⁰.



Joonis 5. Pilt Apollo 17 missioonilt. Kuu tume meri pildi ülemises osas on palju lamedam kui kraatritega täidetud hele mander.

3.4 Varjud

Kuigi Kuu on Maalt vaadatuna heleduse poolest Päikese järel teine taevakeha, on tema albeedo ehk peegeldumistegur võrreldes teiste Päikesesüsteemi taevakehadega suhteliselt madal [6, lk 6], keskmiselt $0,1362 \pm 2-3\%$ [7, lk 4992]. Kuna iga peegeldusega tuleb tagasi vaid 14% algsest valgusest, siis kahekordsel peegeldusel, ehk valgustatud pinnaselt varjuni ning varjust vaatajani, jõuab tagasi vaid 1,8% valgusest. Lisaks ei ole peale Päikese teisi tugevaid valgusallikaid, mis Kuud valgustaks. Atmosfääri hõreduse tõttu puudub ka taevas, mis peegeldaks valgust tagasi. Koostöös madala albeedoga on nendel põhjustel Maa pealt palja silmaga vaadatuna Kuu valgustamata ala peaaegu võimatu eristada tumedast taevast.

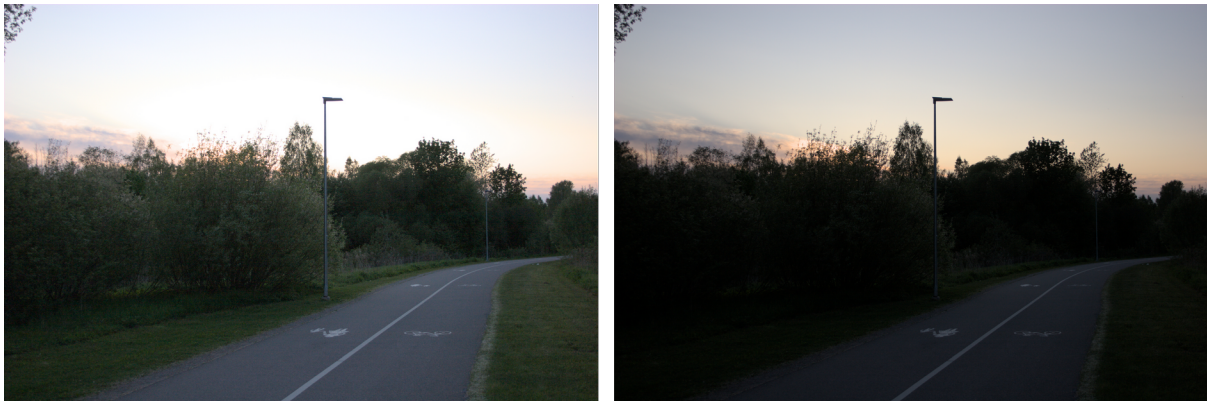
Sarnane lugu on kaamerateaga. Kuu varjude detailne jäädvustamine nii Maa kui ka Kuu pinnaselt tavapärase kaameraga on raskendatud. Seda põhjustab kaamera madal dünaamikavahemik ehk suurima ja väikseima ereduse suhe. Kaamera ja isegi inimese silm ei

⁸Autor: NASA, AS17-149-22793

⁹<https://et.wikipedia.org/wiki/Kuu>

¹⁰<https://et.wikipedia.org/wiki/Anortosiit>

suuda korraga jäädvustada pilti, kus on korraga hästi heledad ja tumedad alad. Inimsilma dünaamiline ulatus on 24 stoppi ehk heledusastet, kuid olenevalt kaamerast on see umbes poole väiksem, 10-14 stoppi¹¹. Sel juhul tekib kas üle- või alasäritus, ehk kaamera sensor jäädvustas liiga palju või liiga vähe valgust. Seda nähtust illustreerib joonis 6. Vasakul fotol jäädvustatud taevas on sobiv, kuid nii jääb pildi alumine osa alasäritatud. Paremalt pildil on vastupidine probleem, puud on kenasti valgustatud, kuid nüüd on taevas ülesäritatud.



Joonis 6. Ülesäritatud (vasak) ning alasäritatud (parem) fotod.

Kaasaegsetel kaameratel on olemas kõrge dünaamikavahemusega ehk HDR režiim, mis võtab mitu eri säritusega kaadrit ja kombineerib need, säilitades niimoodi varjude kui ka eredalt valgustatud alade detailsuse. HDR ei osutunud materjali loomisel prioriteediks, seega ei kata käesolev töö selle implementeerimist. Saame selle tõttu eeldada, et meie simulaatori virtuaalne kaamera ei ole HDR võimekusega ning varjud on praktiliselt valgustamata.

Olles tutvunud Kuu eripärasustega, on võimalik need aluseks võtta materjali loomisel. Selleks tutvume esmalt materjali põhimõtetega neljandas peatükis.

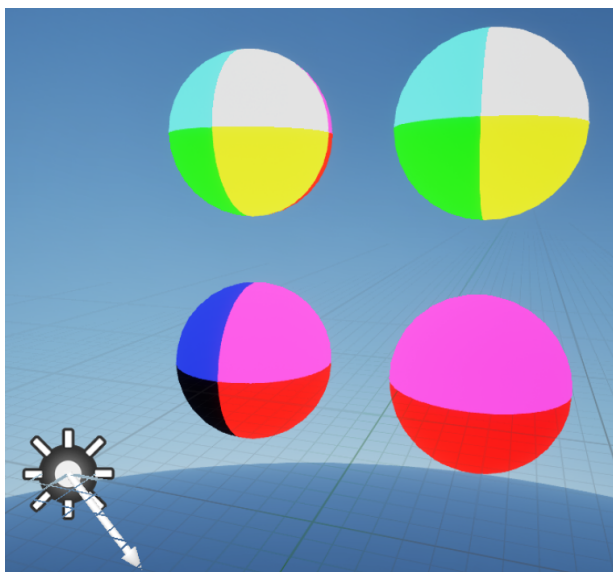
¹¹<https://www.fotokursus.ee/miks-taevas-fotol-sinine-ei-jaa-dunaamiline-ulatus/>

4. Metoodika

Eelnevalt välja toodud Kuu omadused on vaja tõlkida arvutile arusaadavaks reeglistikuks, millest kujuneb välja meie soovitud materjal. Peatükk kirjeldab materjali loomise põhimõtteid, seal hulgas füüsikal baseeruv renderdamine ning protseduuriline genereerimine.

4.1 Materjal

Materjal on arvutigraafika termin reeglistikule, mis määrab renderdatud objekti pinnase optilised omadused. Materjali saab luua kas maastiku või staatilise võrgustiku jaoks, mille puhul erinevad nende kasutatud sõlmede valik ning materjalile ettenähtud objekti tüüp. Maastikud on eraldi objekti tüüp Unreal Engineis, millega saab luua maapinda, kuid see ei osutunud ULYSSES projekti otstarbeks sobivaks süsteemiks. Antud töö keskendub staatilise võrgustiku materjalidele, mille saab rakendada 3D mudelitele. Materjali renderdamiseks ekraanile kompileeritakse see esmalt varjutajaks. Varjutaja (ingl *shader*) on arvutiprogramm, mis määrab ära objektide kolmemõõtmeliste pinnaomaduste kujutamiseviisi ning mis üldjuhul jookseb graafikaprotsessoril¹².



Joonis 7. Võrdlus lokaalselt ja globaalselt joondatud materjalidel. Ülemised kerad on lokaalselt joondatud ning alumised globaalselt.

Samuti saab materjal kasutada lokaalset või globaalset joondamist. Joonis 7 kujutab neli kera ning all vasakul nurgas on valgusallika tähis, mis asub maailma nullpunktis. Ülemised kerad kasutavad lokaalselt ja alumised globaalselt joondatud materjali, ülejäänud materjali parameetrid on samad. On näha, et lokaalselt joondatud materjali puhul ei olene materjali välimus objekti positsioonist stseenis ning kerad on ühtemoodi värvitud. Vastupidine kehtib globaalselt joondatud materjali puhul. Need kerad on erinevalt värvitud, kuna

värv tuleneb maailma positsiooni väärtusest. Esimese puhul liigub materjal objektiga kaasas, teise puhul püsib materjal maailmaruumiga kooskõlas ning ei liigu kaasa.

¹²<http://vallaste.ee/>

4.2 Füüsikal baseeruv renderdamine

Füüsikal baseeruv renderdamine (ingl *physically-based rendering*), lühendatult PBR, on arvutigraafika tehnika, mille eesmärk on renderdada stseeni ning selle objekte nii, et tema valgus ja pinnased oleksid modelleeritud füüsikal põhinevatel reeglitel¹³. See on fotorealistliku materjali loomiseks kõige mõistlikum lahendus, kuna imiteerides füüsikalisi nähtusi on lihtsam saavutada tõsielule sarnase tulemuse. PBR on nüüdseks muutunud vaikimisi valikuks materjalide loomisel pea kõigis 3D tarkvarades, kaasa arvatud Unreal Engine 5¹⁴.

Kolmemõõtmelise stseeni renderdamine kahemõõtmeliseks rasterpildiks ehk pikslitest koosnevaks pildiks kujutab endast kaamera piksli väärtuste arvutamist, mille jaoks kasutatakse renderdamise võrrandit. Ümberkirjutatuna Kajiya originaalvalemist [8] on antud võrrandis 1¹⁵.

$$L_{\text{out}}(x, v) = L_{\text{emit}}(x, v) + \int_{\Omega} f_{\text{brdf}}(x, v, \omega_{\text{in}}) \cdot L_{\text{in}}(x, \omega_{\text{in}}) \cdot (\omega_{\text{in}} \cdot n) d\omega_{\text{in}} \quad (1)$$

Võrrand leiab 3D stseeni punktist x kiiratud valguse suunas v . Iga kaamera piksli x ja v väärtused on eelnevalt välja arvatud läbi protsessi nimega rasteriseerimine. Võrrandi parem pool koosneb kahe komponendi summast, punkti **emiteeritud** ning **peegeldatud** valgus. **Emiteeritud valgust** võib siin kontekstis ignoreerida, kuna Kuu ainult peegeldab päikesevalgust. Vaatame peegeldatud valguse komponenti eraldi võrrandis 2.

$$\int_{\Omega} f_{\text{brdf}}(x, v, \omega_{\text{in}}) \cdot L_{\text{in}}(x, \omega_{\text{in}}) \cdot (\omega_{\text{in}} \cdot n) d\omega_{\text{in}} \quad (2)$$

Peegeldatud valgus oleneb kogu punktile sissetulevast valgusest. Selle arvutamiseks integreeritakse üle ühikpoolsfääri kõikvõimalikud valguse suunad punktis x , kasutades kolme tegurit: **kuidas valgus peegeldub suunast ω_{in} suunda v (BRDF)**, **kui tugev on sissetulev valgus suunast ω_{in}** ning **kuidas sissetuleva valguse nurk mõjutab peegeldust**.

4.2.1 Normaalvektorid

Normaalvektor on 3D-mudeli pinnaga risti olev vektor, mida kasutatakse valguse suuna ja intensiivsuse määramiseks¹⁶. Peegeldatud valguse komponenti viimane tegur nõuab normaalvektorit n , mida saab määrata läbi normaalvektorite kaardi. Sellega on võimalik võltsida muhke ja mõlke materjalis ilma 3D geomeetriat kasutamata, mis säästab arvuti

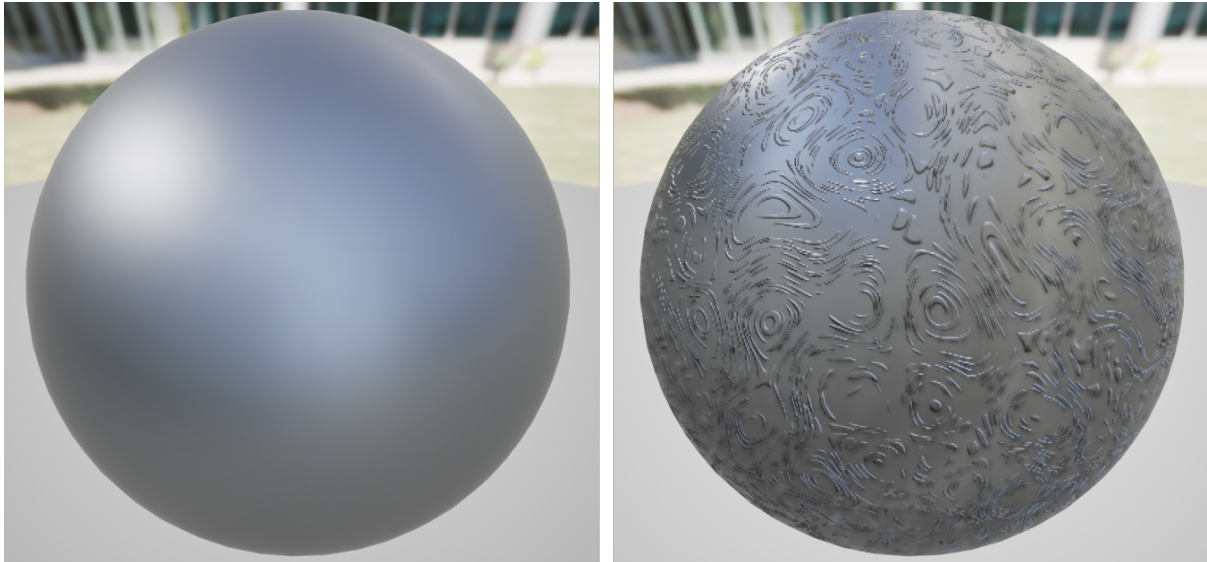
¹³https://en.wikipedia.org/wiki/Physically_based_rendering

¹⁴<https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/physically-based-materials-in-unreal-engine>

¹⁵<https://cglearn.eu/pub/advanced-computer-graphics/physically-based-shading>

¹⁶<https://sonaveeb.ee/ds/MOD>

ressursse. Geomeetriat moondavat alternatiivi kutsutakse *displacement map*-iks ehk nihke kaardiks. See töö arvutab genereeritud kõrgusandmete järgi normaalvektorite kaardi, mis panustab realistliku tulemuse saavutamisse märkimisväärselt, nagu demonstreerib joonis 8.



Joonis 8. Võrdlus materjalist ilma normaalvektori kaardita (vasak) ning normaalvektori kaardiga (parem).

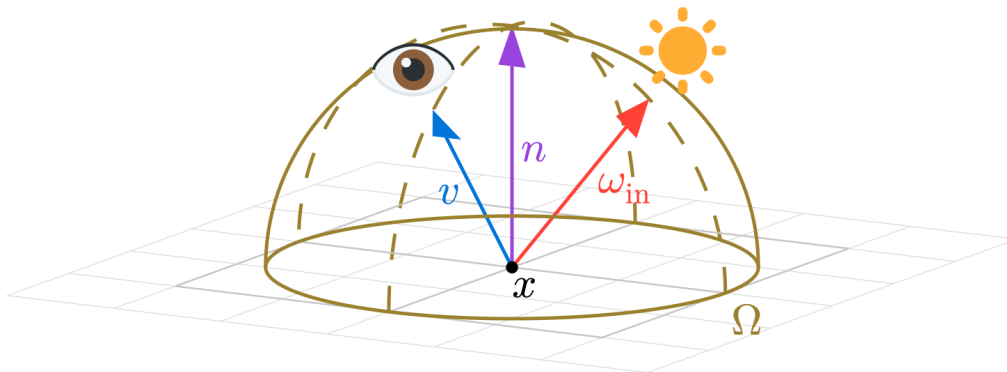
Teine tähtis tegur renderdamise võrrandi peegeldatud valguse komponendist on nimelt BRDF.

4.2.2 BRDF

Kahesuunaline peegelduse jaotuse funktsioon (ingl *bidirectional reflectance distribution function*), lühendatult BRDF, on funktsioon, mis kirjeldab pinnase peegelduvaid omadusi. See arvutab suunast ω_{in} sisse tuleva ning suunda v peegelduva valguse punktis x . Õigesti valitud BRDF aitab kaasa fotorealismi saavutamisele. Joonis 9 kujutab renderdamise võrrandi peegeldatud valguse komponendi parameetreid.

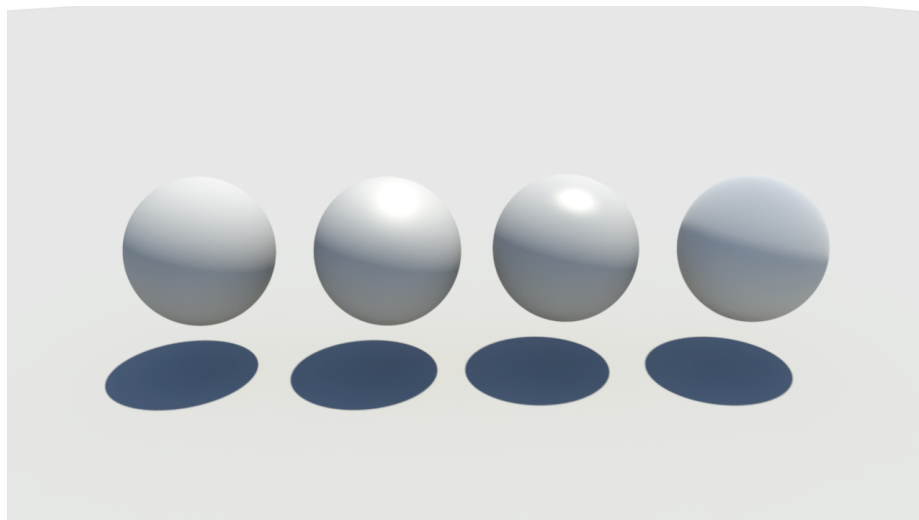
$$\int_{\Omega} f_{\text{brdf}}(x, v, \omega_{\text{in}}) \cdot L_{\text{in}}(x, \omega_{\text{in}}) \cdot (\omega_{\text{in}} \cdot n) d\omega_{\text{in}}$$

$$|v| = |\omega_{\text{in}}| = |n| = 1$$



Joonis 9. Visualiseering renderdamise võrrandi peegeldatud valguse komponentidest. Valemil ning joonisel on värvidega välja toodud vastavad parameetrid. Päike tähistab sissetuleva valguse vektorit ω_{in} ning silm peegeldatud valguse vektorit v .

Kuu materjali loomise puhul on kasulik võtta kasutusele otstarbeks mõeldud olemasolevaid BRDF funktsioone, nagu näiteks Minnaert, Hapke ning Oren-Nayar. Käesoleva töö jaoks otsustati kasutada Oren-Nayar mudelit. Mudel sai valitud, kuna see imiteerib karedate pinnaste välimust hästi, mis sobib Kuu regoliidi valgustamiseks. Joonisel 10¹⁷ on näha erinevusi mõne populaarseima BRDF mudeli vahel.



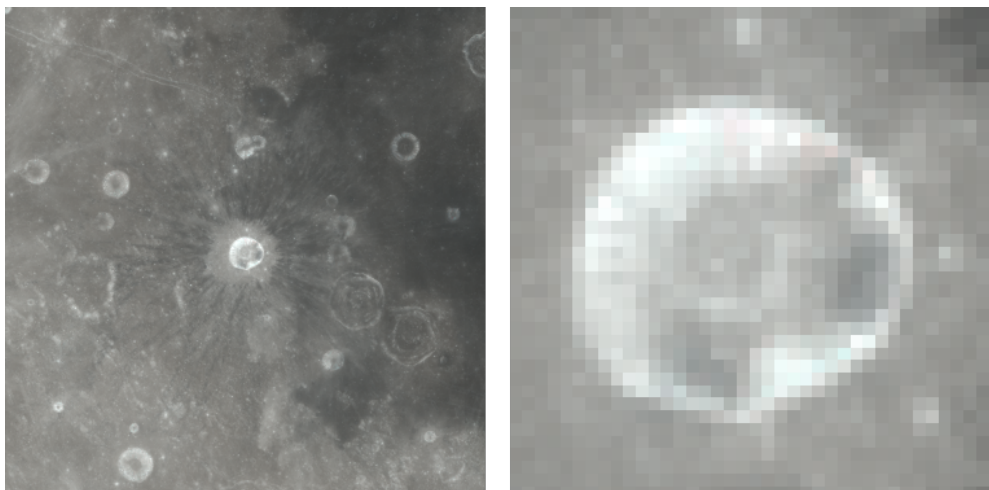
Joonis 10. Neli erinevat BRDF mudelit kõrvuti. Vasakult paremale: Lambert, Blinn, Phong ja Oren-Nayar, igal ühel kõrge kareduse väärtus.

¹⁷Autor: Frederic Cervini, <https://www.thebelgianvfxguy.com/2012/03/vfx-back-to-basics-series-5-what-is.html>

4.3 Protseduuriline genereerimine

Protseduuriline genereerimine on andmetötluse meetod, millega luuakse andmeid algoritmiliselt¹⁸. Graafika materjali puhul mõeldakse protseduurilise genereerimise all materjali osa või kogu omaduste, näiteks värvi või kareduse, määramist kasutades teatud algoritme. Selle meetodi peamised eelised on madal failisuurus, lõpmatu detailsus ning kergendatud tekstuuri kaardistamine.

Arvutigraafika valdkonnas on tavapärane kasutada tekstuuridel ehk piltidel põhinevaid graafika materjale. See on tihti mõistlik lähenemine objektide välimuse määramiseks. Kahjuks piirab pildi eraldusvõime üksiku tekstuuri kasutamist suurematel pindadel ja maastikel. Liiga suure eraldusvõimega tekstuuri on arvutil kulukas renderdada. Samuti kaotab liiga suureks skaleeritud tekstuur lähedalt vaadates detailsust, nagu näiteks joonisel 11¹⁹.

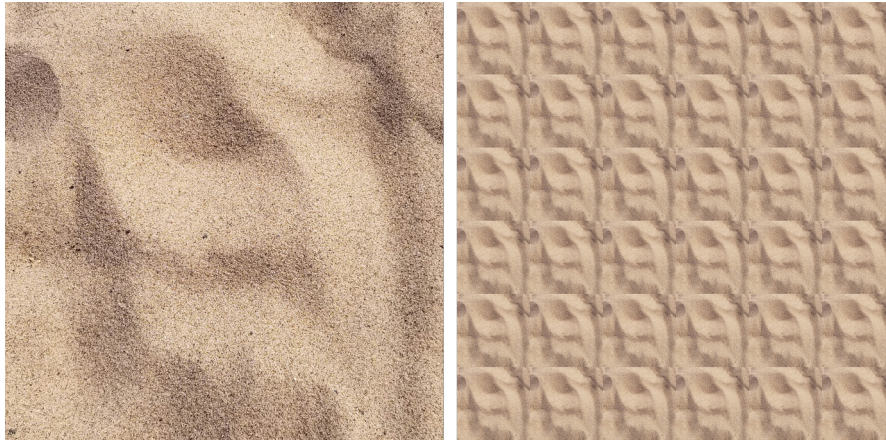


Joonis 11. 16K eraldusvõimega tekstuur (vasakul) muutub skaleerimise käigus piksli haaval eristatavaks (paremal).

Kvaliteedi säilitamiseks on võimalik sama tekstuuri korduvalt kasutada pinnase katmiseks, kuid siis tekivad palja silmaga nähtavad ning ebanaturaalsed korduvad mustrid. See üldjuhul häirib vaataja silmi, mis on demonstreeritud joonisel 12. Protseduuriline genereerimine lahendab mõlemad probleemid, kuid nõuab materjali loojalt rohkem teadmisi, nimelt kuidas matemaatilistest avaldisest soovitud lõpptulemust efektiivselt kätte saada.

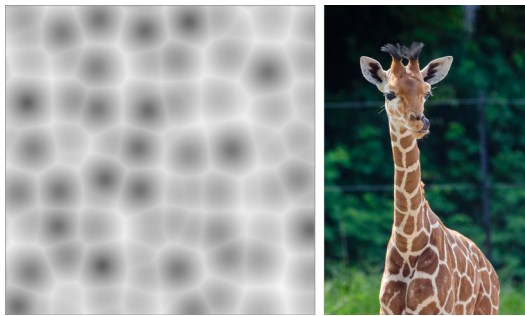
¹⁸https://et.wikipedia.org/wiki/Protseduuriline_genereerimine

¹⁹Autor: NASA Scientific Visualization Studio



Joonis 12. Tekstuur (vasak) kasutatakse korduvalt (parem).

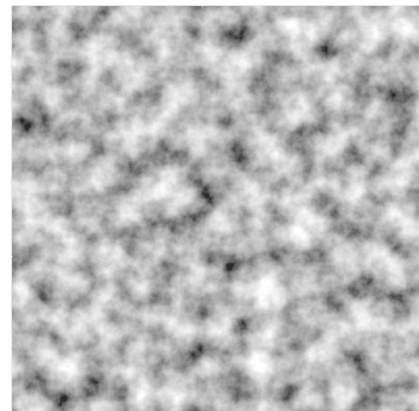
Kõige kasulikumad algoritmid protseduurilises genereerimises on mürad. Protseduuriline müra (ingl *procedural noise*) on algoritmiliselt loodud struktureerimata muster²⁰. Erinevat viisi mürasid kombineerides on võimalik luua näilikut ebahühtlane materjal deterministlikust algoritmist [9]. Näited üldlevinud müradest on Worley müra ja Perlini müra.



Joonis 13. Worley müra (vasak) meenutab kaelkirjaku laiike (parem).

Worley müra, tuntud ka Voronoi müra nime all, on Voronoi diagrammil põhinev müra funktsioon²¹. Üks selle peamisi otstarbeid on orgaaniliste kujutiste jäljendamine, nagu näiteks kaelkirjaku laiigud, nagu näidatud joonisel 13. See müra on sisse ehitatud Unreal Engine 5 mängumootoris, mille tõttu oli mugav seda kasutada käesolevas töös loodud Kuu materjalis.

Perlini müra on gradient müra, mida kasutatakse protseduuriliselt genereeritud maastike loomiseks, variatsioonide tekitamiseks ning tekstuuride loomise abistamiseks²². Näide Perlini mürast on toodud joonisel 14. See on samuti sisse ehitatud Unreal Engine'i funktsioon ning kasutatud loodud materjalis korduvalt. Perlini müra tihti kombineeritakse iseenda skaleeritud versioonidega, et luua kihiline ning kõrgema sagedusega müra. Neid kihte kutsutakse oktaviteks ning tulenevat müra võib nimetada ka fraktaalseks müraks.



Joonis 14. Kuue oktaviga Perlini müra.

²⁰https://et.wikipedia.org/wiki/Protseduuriline_m%C3%BCra

²¹https://en.wikipedia.org/wiki/Worley_noise

²²https://en.wikipedia.org/wiki/Perlin_noise

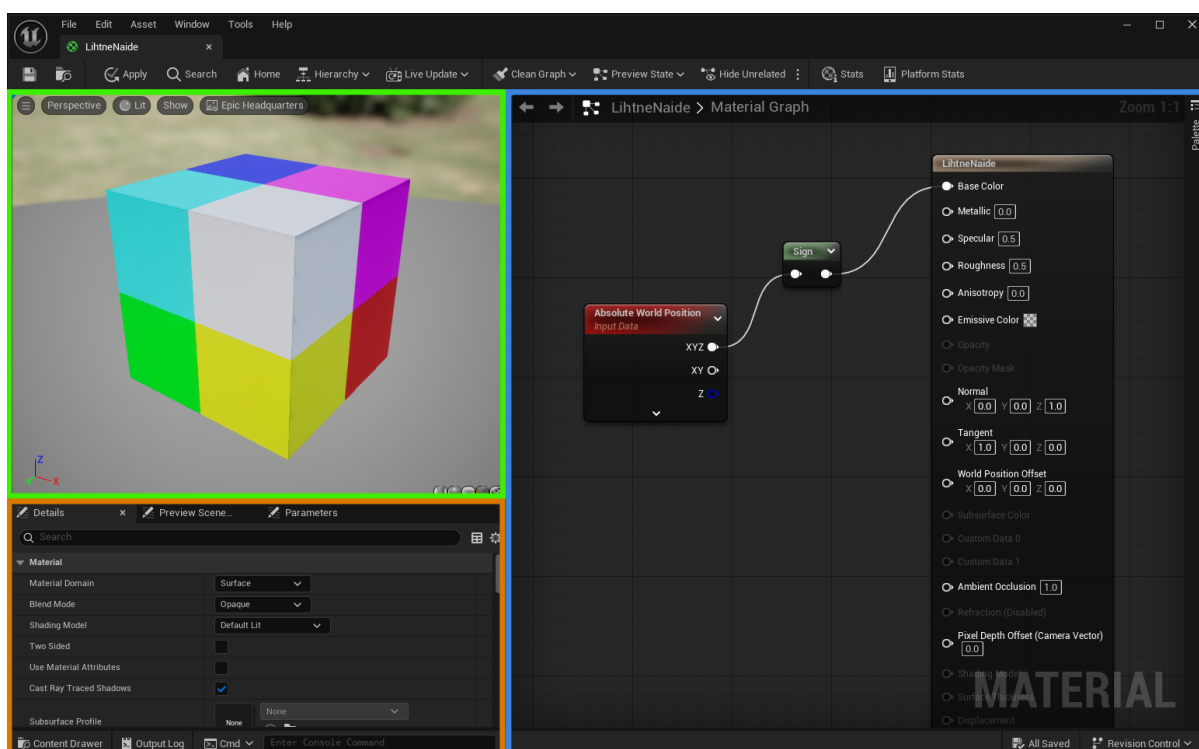
Kuu puhul on DEM-kõrgusmudel tekstuuri kujul, ainult et värviandmete talletamise asemel talletab pildifail kõrgusandmeid. Parim ilma töötluseta Kuu kõrgusmudeli eraldusvõime on suurusjärgus 5 meetrit piksli kohta [10, lk 4], mis ei ole sobilik lähedalt realistliku kuukulguri vaatepildi loomiseks. Crues jt kasutasid erinevaid järeltöötlus protsesse, mille kaudu saavutati üks meeter piksli kohta kõrgusandmestiku. Nende võtetega eraldusvõime paranes, kuid oli kõrgekvaliteetse simulatsiooni jaoks siiski ebaadekvaatne ning nõudis tehislake kivide ja kraatrite lisamist [10, lk 4–5]. Bingham jt suutsid vähendada korduva tekstuuri probleeme interpoleerides lineaarselt erinevate suurustega tekstuuride vahel [11, lk 8], mis on samuti sobiv lahendus Kuu materjali jaoks. Käesolev töö seda meetodit edasi ei uurinud, kuna oli eelaimus, et protseduuriline genereerimine on protsessorile vähem kulukas ning kasutab vähem kettaruumi.

Tekstuuripõhisele materjalile on ka võimalik lisada tehislake nüanssi juurde protseduuriliselt. Sellised hübriidmaterjalid kombineerivad mõlema meetodi eelised. Kang jt suutsid selle meetodiga saavutada praktiliselt eristamatu detailsusega materjali, mis jookseb graafikakaardil reaajas [12]. Käesolev töö on ettekääne selle meetodi rakendamiseks, nimelt tehislake detaili loomine läbi protseduurilise genereerimise. Töö käigus loodi prototüüp materjal, kasutades ainult protseduurilist genereerimist. Kombineerides selle DEM-kõrgusmudeliga looks hübriid materjali, kus kõrgusmudel määrab pinnase üldise kuju ning detaili lisatakse protseduuriliselt. See on võimalik edasiarendus, mida ULYSSES projekt saaks kasutada.

5. Materjali loomine

See peatükk kirjeldab Kuu materjali loomise põhilisi etappe Unreal Engine 5 mängumootoris.

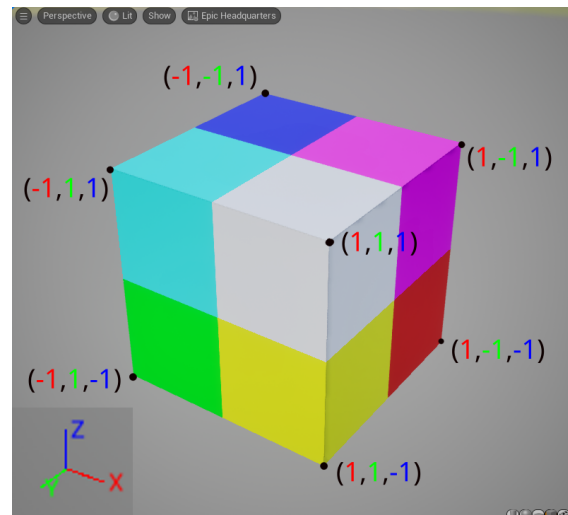
Unreal Engine 5 pakub materjalide loomiseks sõlmepõhist kasutajaliidest, mida nimetatakse materjali redaktoriks. Seal on võimalik luua sõlmed, teise nimetusega materjali avaldised, mis käituvad sarnaselt matemaatilistele avaldistele. Sõlmedel võivad olla nii sisendid kui ka väljundid, kuid neist kahest peab olema alati vähemalt üks. Igal materjalil on tulemuse sõlm, mille kaudu luuakse täpsustatud avaldiste süsteemist materjal.



Joonis 15. Ekraanivaade Unreal Engine 5 materjali redaktorist.

Joonisel 15 on näha ekraanivaadet Unreal Engine 5 materjali redaktorist. Vasakul rohelise kasti sees on materjali 3D eelvaade, kus on näha värvilist kuubikut. See näitab materjali loomise ajal tulemust. Eelvaate all oranžis kastis on omaduste paneel, mille kaudu muudetakse hetkel valitud sõlme sätteid. Paremal sinises kastis on sõlmede graaf, milles toimub enamus materjali loomise tööst. Süsteem sarnaneb Blender tarkvara varjutaja redaktoriga, millega on autoril olnud varajasemat kogemust.

Joonisel 16 on sõlmede graafis näha lihtsat süsteemi, mis koosneb kolmest sõlmest. Punase päisega maailma positsiooni sõlm väljastab X , Y ja Z koordinaatide väärtused Float3 tüüpi andmestikuna. Selle sõlme abiga saab luua globaalselt joondatud materjale, nagu selgitati peatükis 4.1. Selle sõlme väljund läbib signumfunktsiooni, mis tagastab 1 kui sisend on positiivne, -1 kui on negatiivne ning 0 kui on null. See omakorda ühendatakse materjali tulemuse sõlme baasvärvi sisendisse, mis lõpuks kajastatakse eelvaate aknas.

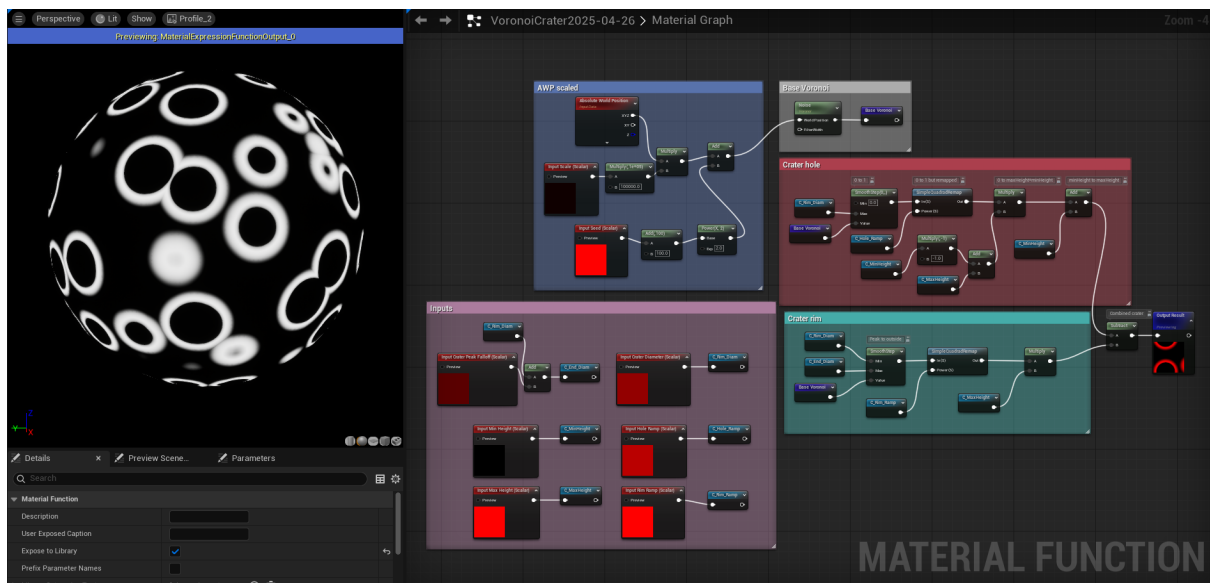


Joonis 16. Kuup, mis kasutab globaalselt joondatud materjali.

Tulemuseks on materjal, mis jagab maailmaruumi kaheksaks värvi. Joonisel 16 on välja toodud kuubi tippude koordinaadid, mille väärtused tulenevad signumfunktsioonist. Neid väärtusi interpreteeritakse RGB värvidena ning kuvatakse kuubi pinnasel. Tähelepanu võiks juhtida ka joonise all vasakul nurgas olevale teljestiku märgile, mis näitab telje vastavaid värve.

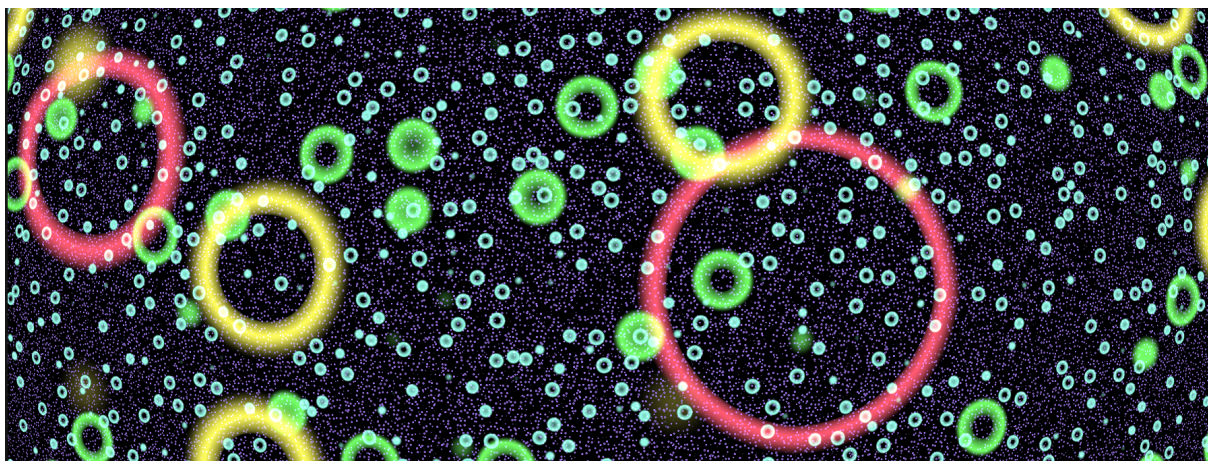
5.1 Kraatrid

Kraatrite loomiseks kasutati aluseks Worley müra. See sai valitud, kuna sellest on lihtne tekitada korduvaid kuid pseudosuvalise positsiooniga ringikujulisi tekstuure. Esmalt skaleeritakse ning nihutatakse Worley müra vastavalt kasutaja poolt antud parameetritele. Loomise käigus on kraater jagatud kaheks osaks, auk ning äär. Mõlemas kasutatakse *SmoothStep* sõlme nende kahe osa eraldamiseks. Eelnevalt määratud parameetrid, näiteks kraatri osade kokkupuute punkt ning miinimum ja maksimum kõrgused, rakendatakse samuti mürale. Lõpuks liidetakse osad kokku ning tulemuseks on kraatrite kõrguskaardistik. Seda kõrgusandmestiku kasutatakse lõpliku normaalide arvutamiseks. Eri suurustes kraatrite loomise lihtsustamiseks eraldati vastutavate sõlmede grupp taaskasutatavaks materjali funktsiooniks, mis koondab seesolevad avaldised üksikuks sõlmeks. Joonis 17 näitab kraatrite genereerimiseks loodud materjali funktsiooni.



Joonis 17. Kraatrite kuju genereeriv sõlmede süsteem.

Kraatrite materjali funktsiooni kasutatakse viie kihi loomiseks, kus igal kihil on eri suurustega kraatrid, nagu on näha joonisel 18. Igal kihil on oma parameetrid, mida kasutaja saab muuta ka lõplikust materjalist ilma redaktorit kasutamata. Need kihid summeeritakse kokku ning tulemus jõuab ümbersuunamissõlme. Seda sõlme kasutatakse väljundite ümbersuunamiseks nimepidi, ehk sama nimega ümbersuunamissõlmed samas graafis jagavad üksteisega sama sisendit. See lihtsustab sisendi taaskasutamist graafi teistes osades, vähendades sõlmede vaheliste ühenduste visuaalset segadust.



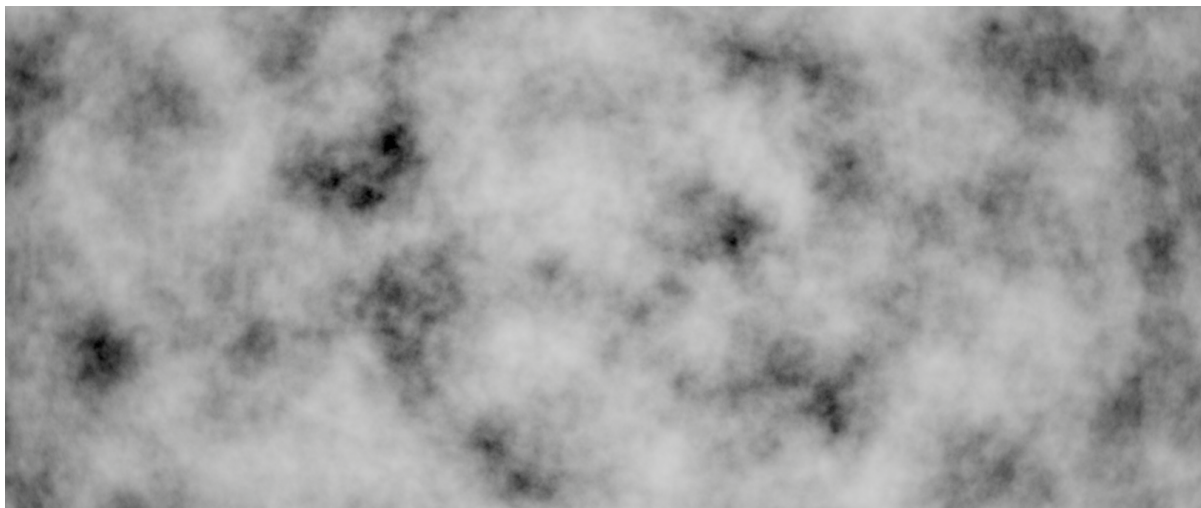
Joonis 18. Erinevate suurustega kraatrite kihid, kus iga kiht on välja toodud erineva värviga.

Suuruse järjekorras kahanevalt: punane, kollane, roheline, helesinine, lilla.

Pärast kihtide loomist lisatakse kraatrite äärtele varieeruvust kasutades Perlini müra. See omakorda kombineeritakse regoliidiga normaalvektorite kaardistikuks, millest räägitakse täpsemalt järgmises peatükis.

5.2 Regoliit

Regoliidi tekstuur kasutab kolme eri suurusega Perlini müra, et luua peene ja kivise välimusega kiht üle terve Kuu pinnase. Mürad on omakorda mitme oktaviga, et luua kõrgema sagedusega müra. Joonis 19 näitab loodud kõrguskaardistikku. Regoliit ja kraatrid liidetakse üksteisega kokku ning nende summast arvutatakse pinnase normaalvektorite kaart. See kaart aitab luua kõrgendike ja süvendite illusiooni seal, kus geomeetria seda ei tee.



Joonis 19. Emuleeritud regoliidi kõrguskaardistik kasutades Perlini müra.

5.3 Albeedo kaart ja mered

Kuu koosneb mitmest eri tooni hallidest. Mandrid on üldjuhul heledamad kui mered. Kraatrite ääred on samuti heledamad kui ülejäänud kraater. Materjalis on tarvis värvida maastik eri toonidega, tehes seda näilikult suvaliste variatsioonidega.

Optikas ja arvutigraafikas on terminil albeedo kaks eri tähendust. Peatükis 3 mainiti, et albeedo on peegeldustegur, ehk kui kvantitatiivselt suur osa valgusest peegeldub pinnaselt tagasi. Arvutigraafikas aga tähendab albeedo objekti valgustamata värvianimeid. Albeedo kaart on tekstuur, mis sisaldab objekti albeedo. Loodud Kuu materjali albeedo kaart kasutab põhiliselt halle toone, mis kombineeritakse lineaarse interpolatsiooni ehk *lerp*iga.

Lerp on arvutigraafikas levinud funktsioon, mis interpoleerib kahe väärtuse vahel parameetri t järgi, kus $t \in [0,1]$. Materjalis kasutatakse t sisendiks Perlini müra, mille kaudu värvitakse müra mustad alad ühte ja valged alad teist värvi.

Mered on samuti loodud Perlini müraga. Seekord kasutatakse *SmoothStep* sõlme mere laikude kuju määramiseks, mille järgi saab *lerp*ida tumedama ja heledama halli värvi vahel.

5.4 Varjud

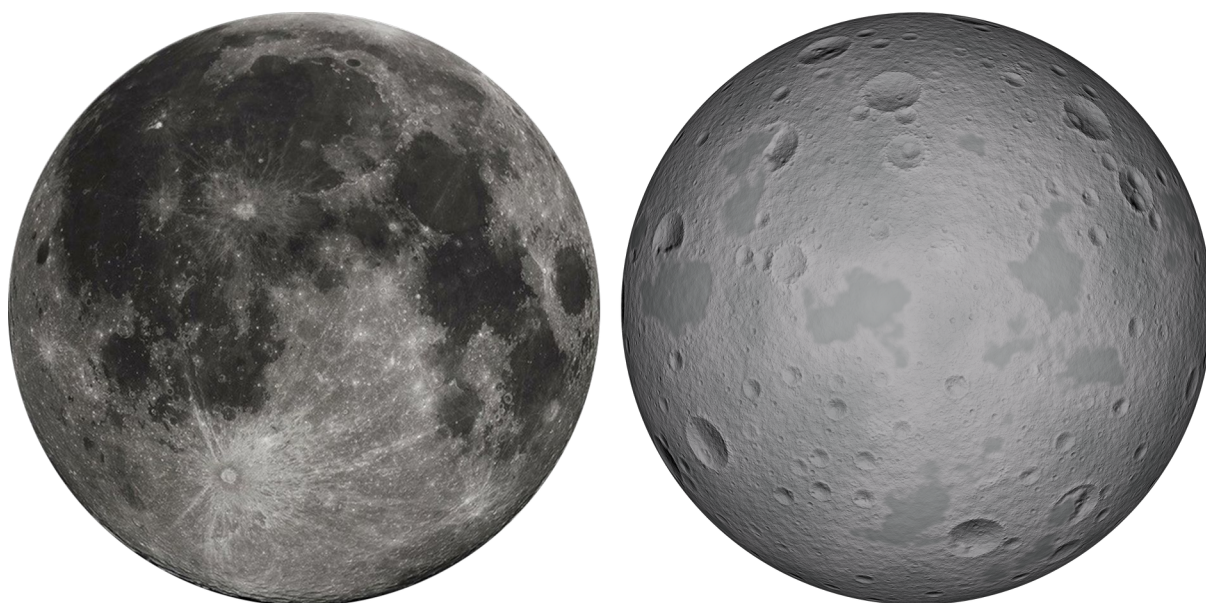
Materjalile sai viimasena lisatud BRDF mudel, sel juhul Oren-Nayar, et tulemust realistlikumaks teha. Konkreetne mudel sai valitud, kuna see kujutab kareid objekte nagu Kuu paremini kui üldlevinud Lamberti mudel.

Tulemuse loomisel tuli takistuseks Unreal mängumootori ülesehitus. Programmil ei ole sisse ehitatud Oren-Nayar BRDF, ning selle implementeerimine tavaliselt nõuab mängumootori lähtekoodi muutmist ning kompileerimist, mis on kulukas ja ebapraktiline lahendus. Selle asemel otsustati lisada mudel läbi Unreali *Custom* sõlme, mis võimaldab kirjutada HLSL varjutaja koodi. See on teatud olukordades lihtsam ja arusaadavam kui sõlmede kogumi loomine. Lisa 2 sisaldab materjalis kasutatud HLSL koodi. Kood põhineb täiustatud Oren-Nayar mudeli valemil²³.

²³<https://mimosa-pudica.net/improved-oren-nayar.html>

6. Tulemus

Tulemuseks saadi Kuu pinnasele sarnase materjali, mis jäljendab tegelikku Kuud mitmes aspektis ning näitas protseduurilise genereerimise edukust Kuu materjali loomisel. Materjal sai loodud ainult kasutades protseduurilist genereerimist. Ettenähtud tulemuse nõuetest ja suunistest said täidetud materjali loomine Unreal Engine 5 mängumootoris, mitme Kuu nähtuse imiteerimine ning normaalide kasutamine. Soovitud kvaliteet kaugusel 20 cm piksli kohta ei saavutatud, adekvaatsed tulemused piirduvad umbes 3 kuni 5 meetrit piksli kohta. Kuud ning loodud materjali näitab kõrvuti joonis 20²⁴. Lisaks on töö kaasatud failides kõrge kvaliteediga video ja pildi renderid loodud materjalist kaustas „Materjali renderid“.



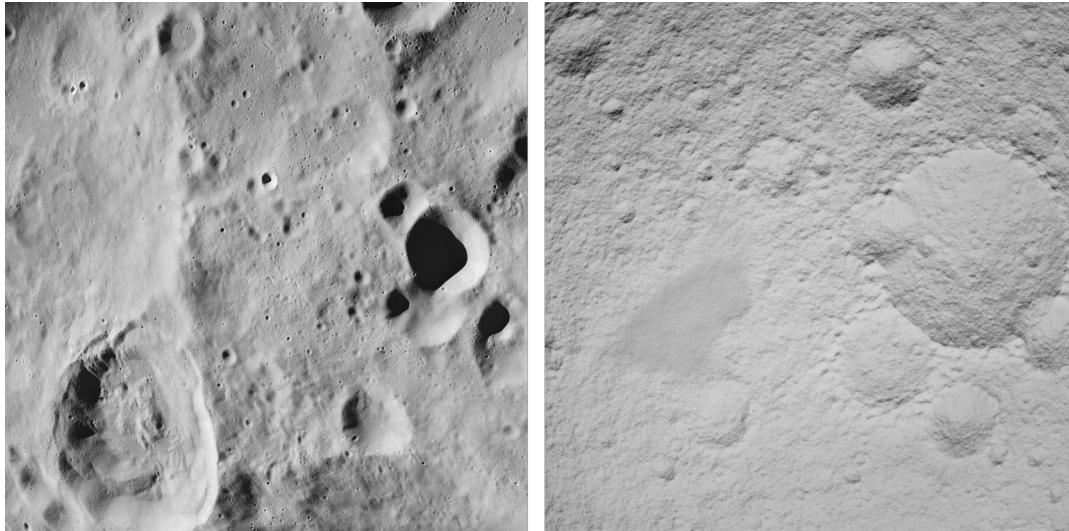
Joonis 20. Võrdlus Kuu eeskülje (vasak) ja loodud materjaliga (parem).

6.1 Kraatrid

Materjal suutis edukalt luua kraatrid protseduuriliselt, seal hulgas luua neid eri suuruse, kõrguse, sügavuse ja kaldega. Kraatrite omadusi on võimalik muuta kasutaja poolt vastavalt vajadusele. Nende loomiseks kasutati aluseks Worley müra. Perlini müraga lisati veel rohkem variatsiooni kraatri äärtele. Kraatrite ääred on ka heledamaks värvitud sama kõrgusandmestiku põhjal. Võrreldes joonisel 21²⁵ päris Kuu kraatreid materjali kraatritega saaksid sünteesitud kraatrid olla kuju poolest ebaühtlasemad. Lisaks ei esine meredes ühtegi kraatrit, kuna genereerimise käigus lisatakse kraatreid ainult mandri aladele.

²⁴Vasaku pildi autor: NASA LRO / Jatan Mehta

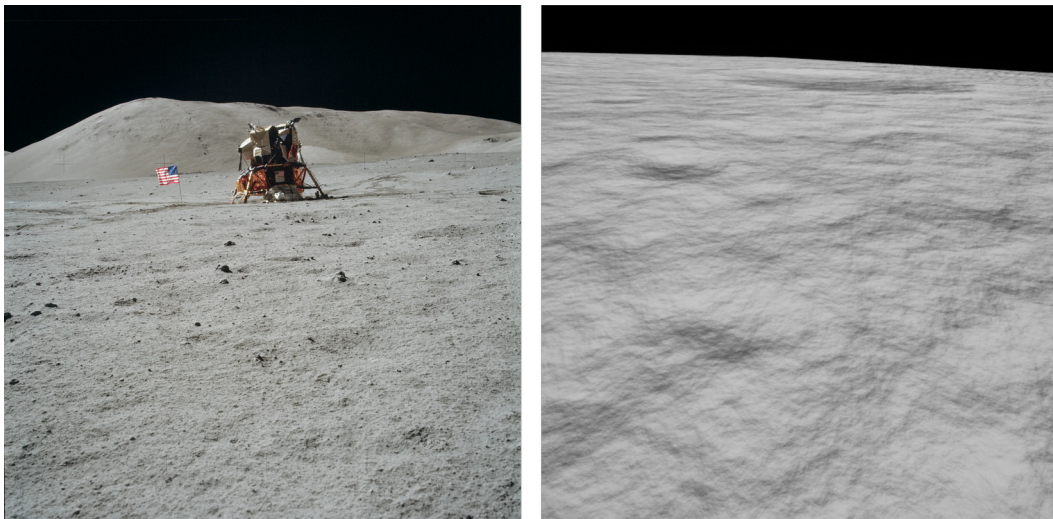
²⁵Vasaku pildi autor: NASA, AS08-17-2680



Joonis 21. Võrdlus Kuu kraatrite (vasakul) ja materjali kraatritega (paremal).

6.2 Regoliit

Regoliit põhineb kolmel Perlini müra kihil, kus igal kihil on oma oktavid. Regoliit tuuakse sammuti materjalis esile normaalide kaudu. Värvid on genereeritud Perlini müra väärtusi interpoleerides kasutades *lerp* funktsiooni. Loodud regoliit jätab pinnasele kõva ja kivise mulje, mis kohati erineb Kuul oleva regoliidi puudrises tekstuuriga (vaata joonis 22²⁶). Vasakul Apollo pildil on ka näha eraldi väikseid kive, mida materjalis ei ole esil. Selliste väikeste kivide implementeerimine materjali sisse ei oleks aga praktiline. Üldjuhul kasutatakse selleks hoopis Unreal Engine'i *Procedural Foliage* tööriista, millega saab näiteks luua puude 3D-mudelitest terve metsa või puistada eraldi loodud kivide mudeleid üle taevakeha pinnase²⁷.



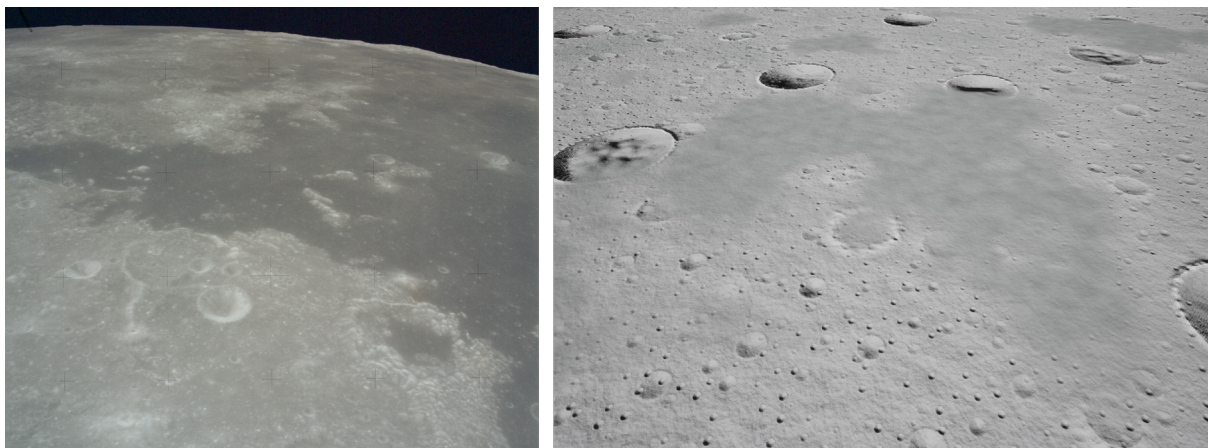
Joonis 22. Apollo 17 missioonilt võetud pilt Kuu pinnasest (vasakul) ja loodud materjali pilt pinnasest (paremal).

²⁶Vasaku pildi autor: NASA, AS17-134-20508

²⁷<https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/procedural-foliage-tool-in-unreal-engine>

6.3 Mered ja mandrid

Perlini müraga loodud materjali mered meenutavad Kuu merede laigulisust. Materjali mered on võrreldes Kuu omadega heledamad. Samuti on materjali meredes puudu kraatrid. Joonise 23²⁸ vasakul pildil on näha mere sees ka mägesid, mis võivad olla osad eelnevate kraatrite alles jäänud ääred. Mõni merele lähedane kuid mitte sees olev kraater võib materjalis olla lamedam, mis tuleneb merede lisamisel hajutatud piirkonnast. Hajutus sai lisatud, kuna see tekitab väga järsud üleminekud merede ja kraatrite vahel.



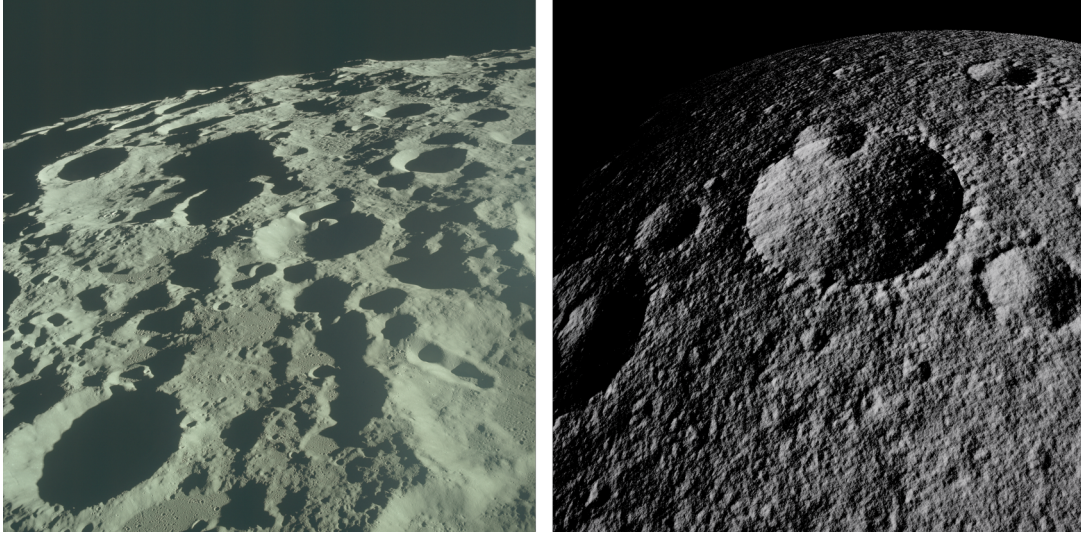
Joonis 23. Apollo 17 missiooni pilt merest (vasak) ning materjali genereeritud meri (parem).

6.4 Varjud

Varjude välimust kujundas kõige rohkem Oren-Nayar BRDF funktsiooni kasutamine. See kujutab Kuu karedat pinda hästi. Siiski on selles aspektis veel edenemisruumi. Vaadates joonist 24²⁹, on näha paremal materjali pildi keskel kraatris varju sees rohkem valgust kui seda on vasakul Apollo missiooni pildilt. Selle probleemi juurpõhjust ei suudetud kindlusega tuvastada, kuid kahtlustatakse müra sõltuvust madala täpsusega maailma positsiooni sõlmest. Sarnane probleem esines ka Kuu materjali pimedal küljel. Osaliseks lahenduseks vähendati pimedade poole normaalide mõju valgusele, mille kaudu probleem leevenes, kuid mitte täielikult.

²⁸Vasaku pildi autor: NASA, AS17-145-22263

²⁹Vasaku pildi autor: NASA, AS11-44-6610



Joonis 24. Kuu kraatrite varjud (vasak) ja loodud materjali varjude (parem) võrdlus.

6.5 Edasiarendused

Võrreldes päris Kuuga on materjalil mitmed puudused. Neid võib jagada kaheks, lihtsamad ning raskemad parandused. Lihtsamate paranduste hulka kuulub:

1. mõned kraatrid on liiga suured, kuid seda saab muuta materjali parameetrites;
2. merede ja mandrite värvitoonid ei ühti võrdluspiltidega, mis nõuab värvide paremat valikut materjali sees.

Raskemad parandused, mis nõuavad põhjalikumat materjali avaldiste täiendamist või ümberehitamist on:

1. meredel ja mandritel on vähe värvi variatsiooni, näiteks joonise x päris Kuul on näha meredes sinakaid ja oranžikaid toone;
2. meredes puuduvad kraatrid;
3. mered ei täida kattuvaid kraatreid ning üleminekud on seetõttu kehvad;
4. kraatritel puuduvad väljaheite kiired;
5. kraatritel puuduvad keskmised tipud;
6. uuemad kraatrid ei kata vanu kraatreid realistlikult;
7. pinnasel puuduvad eraldi seisvad kivid.

Materjalil on lisaks eeltoodud puudustele teisi võimalikke täiendusi, näiteks geomeetria nihke kasutamine normaalvektorite kaardi asemel.

7. Kokkuvõte

Tartu observatooriumil oli tarvis luua uus arvutigraafika materjal simulaatori projekti ULYSSES jaoks, mis jäljendaks Kuu pinnast võimalikult fotorealistlikult. Varasemad tekstuuripõhised lahendused ei pakkunud sobivat kvaliteeti, mille tõttu uuriti protseduurilise genereerimise kasutamist materjali loomiseks. Materjalile määrati nõuded ja suunised, millest lähtuti tulemuse loomisel. Peamine nõue oli materjali loomine Unreal Engine 5 mängumootoris. Nõuete täitmiseks uuriti Kuu erinevaid pinnase omadusi, mida materjal saaks jäljendada. Peamisteks omadusteks osutusid kraatrid, regoliit, mered, mandrid ning varjud.

Nende omaduste implementeerimiseks materjaliks oli esmalt vaja tutvuda materjalide, füüsikal baseeruva renderdamise ning protseduurilise genereerimise metoodikast. Renderdamise võrrand toob välja, mis komponendid loovad 3D stseeni objektidest tuletatud andmetest rasterpildi ning mis nende mõju tulemusele on.

Materjal loodi Unreal Engine 5-e materjali redaktoriga, mis pakub sõlmepõhist süsteemi materjalide loomiseks. Materjali aluseks võeti erinevad mürad, nimelt Worley ja Perlini müra. Moonutades neid mürasid läbi matemaatiliste avaldiste oli võimalik luua materjal, mis ei kasuta ühtegi pildifaili tulemuse loomiseks. Worley müra kasutati peamiselt kraatrite järgi tegemisel ning Perlini müra regoliidi, merede, mandrite, erinevate variatsioonide ja põhivärvi jaoks. Materjali välimuse täiustamiseks lisati Oren-Nayari BRDF funktsioon, mis tõi materjali peegeldavad omadused lähemale päris Kuu omadega.

Tulemuseks saadi materjal, mis täitis peamised ettemääratud nõuded ning mis jäljendab mitu Kuu pinnase omadust. Kraatrid on eri suurustes ning nende parameetreid, nagu näiteks ääre kallak või kraatri sügavus, saab kihi haaval muuta materjali vaates hõlpsasti. Pinnas emuleerib regoliiti hästi kaugemalt vaadates. Mered toovad tulemuse veel sammu võrra lähemale realismile. Oren-Nayari BRDF funktsioon sobis antud olukorras hästi Kuu kareda pinnase peegelduvuse imiteerimiseks ning varjude määramiseks.

Materjalil on mitu edasiarenduse ala. Peamine oleks generatiivse süsteemi kombineerimine DEM-kõrgusmudeliga, mille kaudu saavutaks tulenev materjal suurema vastavuse päris Kuu välimusega. Lisanduvate Kuu nähtuste implementeerimine ning kraatrite ja merede üleminekute täiendamine on samuti võimalikud täiendused.

Viited

- [1] H. Teras, Q. S. Islam, K. Kruuse, ja D. M. Pajusalu, „ULYSSES - A State of the Art Sandbox Simulator for Planetary Surfaces“, 2022, [Online]. Available at: <https://iafastro.directory/iac/paper/id/71167/summary/>
- [2] D. E. Smith, M. T. Zuber, G. A. Neumann, ja F. G. Lemoine, „Topography of the Moon from the Clementine lidar“, *J. Geophys. Res. Planets*, kd 102, nr E1, lk 1591–1611, jaan 1997, doi: 10.1029/96JE02940.
- [3] H. Moritz, „Geodetic Reference System 1980“, *J. Geod.*, kd 74, nr 1, lk 128–133, märts 2000, doi: 10.1007/s001900050278.
- [4] G. Heiken, D. Vaniman, ja B. M. French, *Lunar sourcebook: a user's guide to the moon*. Cambridge [GB] New York Port Chester [etc.]: Cambridge university press, 1991.
- [5] S. J. Robbins, „A New Global Database of Lunar Impact Craters >1–2 km: 1. Crater Locations and Sizes, Comparisons With Published Databases, and Global Analysis“, *J. Geophys. Res. Planets*, kd 124, nr 4, lk 871–892, apr 2019, doi: 10.1029/2018JE005592.
- [6] J. H. Madden ja L. Kaltenegger, „A Catalog of Spectra, Albedos, and Colors of Solar System Bodies for Exoplanet Comparison“, *Astrobiology*, kd 18, nr 12, lk 1559–1573, dets 2018, doi: 10.1089/ast.2017.1763.
- [7] G. Matthews, „Celestial body irradiance determination from an underfilled satellite radiometer: application to albedo and thermal emission measurements of the Moon using CERES“, *Appl. Opt.*, kd 47, nr 27, lk 4981, sept 2008, doi: 10.1364/AO.47.004981.
- [8] J. T. Kajiya, „The rendering equation“, *ACM SIGGRAPH Comput. Graph.*, kd 20, nr 4, lk 143–150, aug 1986, doi: 10.1145/15886.15902.
- [9] J. Dong *et al.*, „Survey of Procedural Methods for Two-Dimensional Texture Generation“, *Sensors*, kd 20, nr 4, lk 1135, veebr 2020, doi: 10.3390/s20041135.
- [10] E. Z. Crues *et al.*, „Digital Lunar Exploration Sites (DLES)“, *2022 IEEE Aerospace Conference (AERO)*, Big Sky, MT, USA: IEEE, märts 2022, lk 1–13. doi: 10.1109/AERO53065.2022.9843359.
- [11] L. Bingham, J. Kincaid, B. Weno, N. Davis, E. Paddock, ja C. Foreman, „Digital Lunar Exploration Sites Unreal Simulation Tool (DUST)“, *2023 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, USA: IEEE, märts 2023, lk 1–12. doi: 10.1109/AERO55745.2023.10115607.
- [12] H. Kang, Y. Sim, ja J. Han, „Terrain rendering with unlimited detail and resolution“, *Graph. Models*, kd 97, lk 64–79, mai 2018, doi: 10.1016/j.gmod.2018.04.001.

Lisa 1. Terminid

Materjal - arvutigraafikas reeglistik, mis määrab pinna optilised omadused³⁰

Liivakast - arvutisüsteemide testimiskeskond, milles saab turvaliselt katsetada, programmi, rakenduse vms tööd³¹

Renderdamine - ruumilise stseeni esitamine kahemõõtmelise pildina³¹

Regoliit - pude kivimiline materjal (nt murenenud aluspõhja kivimid, setted, muld), mida lisaks Maale leidub ka Kuul jt taevakehadel³¹

Varjutaja (*shader*) - arvutiprogramm, mis määrab ära objektide kolmemõõtmeliste pinnaomaduste kujutamiseviisi sõltuvalt valgusallikast, selle kaugusest ja valguse langemisnurgast³¹

BRDF (*bidirectional reflectance distribution function*) - funktsioon, mis kirjeldab pinnase valguse peegelduvaid ja neelduvaid omadusi³⁰

Füüsikal baseeruv renderdamine (*physically based rendering*, PBR) - arvutigraafika tehnika, mille eesmärk on renderdada stseeni ning selle objekte nii, et tema valgus ja pinnased oleksid modelleeritud füüsikal põhinevatel reeglitel³²

Protseduuriline genereerimine - andmetöötluse meetod, millega luuakse andmeid algoritmiliselt³³

Säritus (*exposure*) - fotoaparaadi sensori või filmi mõjutamine objektiivi läbiva valgusega³¹

Alasäritus (*underexposure*) - fotomaterjali vähene, mitteküllaldane säritus (veana)³¹

Ülesäritus (*overexposure*) - fotomaterjali liialdane, üleküllaldane säritus (veana)³¹

Võrgustik (*mesh*) - tahkude kogumik, mis kirjeldab objekti³⁴

Albedo (optika) - peegeldustegur, pinnalt peegelduva ja pinnale langeva kiirgusenergia suhe³¹

Albedo (arvutigraafika) - 3D stseeni objekti valgustamata värviandmed³⁵

³⁰<https://cgvr.cs.ut.ee/arvutigraafika-terminid/>

³¹<https://sonaveeb.ee>

³²https://en.wikipedia.org/wiki/Physically_based_rendering

³³https://et.wikipedia.org/wiki/Protseduuriline_genereerimine

³⁴https://www.cs.tlu.ee/~rinde/mm_materjal/pdf/mm_3D.pdf

³⁵<https://www.cgdirector.com/albedo-map/>

Normaalvektor - 3D-mudeli pinnaga risti olev vektor, mida kasutatakse valguse suuna ja intensiivsuse määramiseks³¹

Skaleerima - skaalat muutma või skaalale paigutama, mõõtkava järgi ümber arvutama, vähendama või suurendama³¹

Lisa 2. Oren-Nayar BRDF mudeli HLSL kood

```
static const float PI = 3.14159265f;
float NL = dot(N, L);
float NV = dot(N, V);
float LV = dot(L, V);
float s = LV - NL * NV;
float t;
if (s ≤ 0.0) {
    t = 1;
} else {
    t = max(NL, NV);
}
float A = 1.0 / PI * (1.0 - 0.5 * (roughness * roughness / (roughness *
roughness + 0.33)) + 0.17 * roughness * roughness / (roughness *
roughness + 0.13));
float B = 1.0 / PI * (0.45 * (roughness * roughness / (roughness *
roughness + 0.09)));
float orenNayar = NL * (A + B * s / t);
return orenNayar;
```

Lisa 3. Kaasapandud failid

Kaasapandud failide hulgas on materjali Unreal Engine 5 projekt ning pildi ja video kujul renderid. Piltide jaoks on neli kausta, „Kuu orbiit 1”, „Kuu orbiit 2”, „Kuu staatiline 1” ja „Kuu staatiline 2”. Need kujutavad kas orbiidist või staatilisest positsioonist võetud kaadreid Kuu materjalist. Kõrgeima kvaliteediga neist on „Kuu staatiline 1” kaadrid, mille eraldusvõime on 8000x8000 pikslit. „Videod” kaustas leidub kaks videot, üks orbiidist ning teine staatilisest vaatepunktist. Orbiidi video on 4K ning staatilise vaate video ruuduformaadis 3840x3840 eraldusvõimega. „KuuMaterjalProjekt” sisaldab Unreal Engine 5 projektifaile, seal hulgas lõplikku ning vahepealseid materjali iteratsioone ning ka renderite jaoks kasutatud sekventse.

Litsents

Mina, Oliver Jõgar,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Fotorealistliku Kuu pinnase materjali protseduuriline genereerimine”, mille juhendaja(d) on Mathias Plans ja Hans Teras, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada Tartu Ülikooli digitaalarhiivi kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni;
2. annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi kaudu Creative Commonsi litsentsiga CC BY NC ND 4.0, 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.

Oliver Jõgar

15.05.2025