



**Siim Grundsten**

# **3D SKANNERI JUURUTAMISE VÕIMALUSED TALLINNA TEHNIKA KÕRGKOO MÕÕTETEHNIKA LABORIS**

**LÕPUTÖÖ**

Mehaanikateaduskond  
Tehnomaterjalid ja turundus eriala

Tallinn 2015

Mina, Siim Grundsten, tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teoste on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Lõputöö autor

Siim Grundsten.....

Nimi, allkiri ja allkirjastamise kuupäev

Üliõpilase kood 100820294

Õpperühm TI-81

Lõputöö vastab sellele püstitatud kehtivatele nõuetele ja tingimustele.

Juhendaja

Vello Vainola.....

Nimi, allkiri ja allkirjastamise kuupäev

.....

Konsultandid

.....

Nimi, allkiri ja allkirjastamise kuupäev

.....

Kaitsmisele lubatud „.....“.....20....a.

Mehaanikateaduskonna dekaan Vello Vainola.....

Nimi ja allkiri

# SISUKORD

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| SISSEJUHATUS.....                                                | 5  |
| 1. 3D SKANNERI TEHNOLOOGILISED VÕIMALUSED .....                  | 7  |
| 1.1. 3D skanner.....                                             | 7  |
| 1.2. 3D skanneri parameetrid.....                                | 9  |
| 1.3. 3D skaneerimise tehnoloogiad.....                           | 11 |
| 1.3.1. Aktiivsed skannerid.....                                  | 12 |
| 1.3.2. Triangulatsioon.....                                      | 13 |
| 1.3.3. Passiivsed skannerid.....                                 | 16 |
| 1.4. Kasutusala.....                                             | 16 |
| 2. 3D SKANNERI TURUNDUS EESTIS .....                             | 21 |
| 2.1. Ettevõtted.....                                             | 21 |
| 2.1.1. Shaperize .....                                           | 21 |
| 2.1.2. Amper Engineering .....                                   | 22 |
| 2.1.3. Wolfprint .....                                           | 23 |
| 3. 3D SKANNERI TEENUSED EESTIS .....                             | 24 |
| 4. 3D SKANNERI JUURUTAMISE VÕIMALUSED MÕÕTETEHNIKA LABORIS ..... | 26 |
| 4.1. Skannerid kooli laborites .....                             | 31 |
| 4.2. Kasutatavad programmid.....                                 | 32 |
| 4.3. 3D skanneri eesmärk laboris.....                            | 34 |
| 5. ANALÜÜS JA SOOVITUSED TALLINNA TEHNIKAKÕRGKOOILE .....        | 36 |
| 5.1. Soovitused 3D skanneri soetamiseks.....                     | 36 |
| 5.2. Fuel3D Scanify .....                                        | 37 |
| 5.3. EScan 3D scanner .....                                      | 38 |
| 5.4. Cubik CADScan .....                                         | 39 |
| 5.5. NextEngine .....                                            | 40 |
| 5.6. Nikon ModelMaker MMDx .....                                 | 42 |
| 5.7. Steinbichler Comet L3D 5MP .....                            | 43 |
| 5.8. Creaform HandySCAN 700.....                                 | 44 |

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 5.9. Võrdlus .....                  | 45 |
| 5.10. Hinna ja kvaliteedi suhe..... | 46 |
| KOKKUVÕTE.....                      | 48 |
| SUMMARY .....                       | 50 |
| VIIDATUD ALLIKAD.....               | 52 |

## SISSEJUHATUS

Tänapäeva arenevas ühiskonnas muutub kõik väga kiiresti: see, mis on täna uus, võib homseks olla juba vananenud. Arengud tehnoloogias ei toimu enam aastatega vaid lausa päevade-tundidega. Seepärast tasub ajaga kaasas käia ning olla kursis, milliseid uusi tehnoloogilisi lahendusi pakutakse. Teisisõnu: võimalusel tuleb kasutada parimaid töövahendeid, et elu muutuks lihtsamaks ning õppimine kergemini arusaadavaks ja põnevaks.

Käesoleva lõputöö eesmärk on uurida Eesti turul olevaid erinevaid 3D skaneerimise seadmete mudelid ja selle uuringu baasil teha soovitus Tallinna Tehnikakõrgkoolile sobiva aparadi soetamiseks. 3D skaneerimise seadme abil saab rikastada õppetööd, tagada paremaid teadmisi 3D mudelite kohta ja seade annab tudengitele palju erinevaid võimalusi enda täiendamiseks. Inimesel peab olema väga hea kujutlusvõime, et kolmemõõtmelist maailma ette kujutada. 3D skannerit kasutades saab aga kõigile pakkuda võimalust asjadest ühte moodi aru saada, selgitada keerulisi tööprotsesse või visuaalselt näidata, kuidas üks või teine asi reaalselt välja näeb. Skanneri abil saab lahti seletada keeruliste ülekannete tööpõhimõtteid või mõõta konstruktsiooni gabariite ja erinevaid avasid, seejuures täiendades teadmisi kolmemõõtmeliste mudelite tegemise, parendamise ja koostajooniste valmistamise osas. Seega, 3D skanner annab palju võimalusi kolmemõõtmelise maailmaga tutvumiseks arvuti ja selle uue seadme abil ning paberil detailse joonise koostamiseks.

Käesoleva uurimistöö esimeses osas käsitletakse 3D skanneerimise seadme olemust: kirjutatakse lahti ja seletatakse erinevaid skannerite omadusi:

- olulisemad parameetrid – võimaldavad skannereid võrrelda ja eristada;
- gabariidid - kas seade on nii väike, et seda saab käes hoida, või nii suur, et võtab poole labori põrandapindalast;
- kasutusvõimalused - kas leidub laual, põrandal või käest kasutatavaid variante, mis otstarbeks 3D skannereid kasutatakse ja kes on nende kasutajad; milliseid materjale on võimalik skaneerida või saab kõiki materjale digitaliseerida;
- tööpõhimõtted.

Teises osas kirjutatakse Eestis tegutsevatest firmadest, kes pakuvad 3D skaneerimise teenust või on seadmete edasimüüjad. Peatükis tuuakse ka välja, milliste mudelitega need firmad töötavad, milline on 3D skannerite töö kvaliteet ja mis skaneerimise tulemustega edasi teha saab. Lisaks uuritakse, kas tegu on ainult Eestis tegutsevate ettevõtetega või ollakse tuntud ka välismaal. Seega annab see osa lõputööst ülevaate, mis on firmade poolt pakutavad tooted või teenused ning mille poolest on nad erilised või nõutud. Seejärel uuritakse, milliseid seadmeid tarvitatakse Eesti turul ning mis otstarbeks neid kasutatakse.

Viimane osa sisaldab seadmete analüüsi: tuuakse välja mõned 3D skannerid ja kirjeldatakse nende konkreetsete aparaatide eeliseid ja puudusi. Koondtabel annab kiire ja hea ülevaate valikuvõimalustest – seal näeb kõikide seadmete hindu, gabariite ja mõõtmistäpsust. Need väljavalitud skannerid peaksid mehaanikateaduskonna huve arvestades olema täiesti sobilikud õppetöö eesmärgiks, heade töötulemustega ja väga täpsed.

# 1. 3D SKANNERI TEHNOLOOGILISED VÕIMALUSED

## 1.1. 3D skanner

3D skanner on viimasel ajal aina rohkem ja rohkem uudishimu tekitav seade. "Tegu on optilise sisendseadmega, mis teisendab kujutise elektronkujule" [1]. Teisisõnu on tegu seadmega, mis digitaalselt salvestab tegelikkuses oleva keha kujutise, kasutades selleks laserkiiri. Need laserkiired moodustavad objekti pinnast nn "punkt pilve". Ehk 3D skanner salvestab tegelikkuses oleva keha täpse suuruse ja kuju digitaalselt arvutisse kolmemõõtmelisena. Tänu vastavale tarkvarale on võimalik neid digitaalseid andmeid näha ning vajadusel hiljem töödelda. See kas kujutatud pilt on värviline, sõltub palju iga punkti ja värvi kohta on kogutud informatsiooni. Sellest moodustub mudeli kujutis, kas see tuleb värviline või mustvalge. [2], [3], [4, pp. 109-183]

Esimene 3D skanner leiutati 1960. aastal. Seade kasutas töötamiseks valgust, kaameraid ja projekteid. Praeguseks hetkeks pole tööpõhimõte muutunud. Fotoaparaadid töötavad samal põhimõttel nagu skannerid. Mõlemil on koonusekujuline vaateväli ning nad koguvad teavet objekti pinna kohta. Kaamera salvestab ainult värve, skanner lisab värvidele ka XYZ-koordinaadistiku. Tavaliselt tervikliku mudeli saamiseks ei piisa ühest skaneerimisest. Vaja läheb erinevaid vaatenurki salvestamiseks kõiki pinna reljeefe, et saada vajalik informatsioon nende asukoha kohta. Iga skaneering annab esemest ühe punkt pilve, millest hiljem tehakse üks punkt pilve kogumik. See tähendab, et kõik eelnevalt skaneeritud punkt pilved joondatakse omavahel ja saadakse üks terviklik punktidest moodustunud kujutis. Punkt pilve on seejärel võimalik 3D mudeliks muuta ehk luua mõõdistatavast objektist digitaalsel kujul koopia. [3], [5], [6]

Leidub erinevaid 3D skannereid nn laua- (Ingl k. *desktop*) ja kaasaskantavaid (Ingl k. *portative*) versioone. Esimest varianti on lihtsam kasutada, sest seade ise uurib skaneeritavat objekti iga võimaliku külje pealt. Kõigepealt asetatakse skaneeritav ese alusele, mis keerleb. Seejärel aparaat keerutab uuritavat katseaset ja analüüsib detaili kaugust kiirtega, tekitades palju erinevaid punkte ruumis ja salvestades need ühte faili, mida saab arvutis kasutada.

Tavaliselt on skaneeritavate detailide suurused piiratud. Enamasti suurim laius on 180 mm ja kõrgus 250 mm. Selliste gabariitidega skaneeriv seade on näha joonisel (Joonis 1). [7]



Joonis 1. 3D skaneerimine [7]

Kaasaskantava skanneri puhul ei ole gabariidid enam nii piiravad. Pole alust, mille peal objekt peaks ringi keerlema. Selleks aluseks on inimene ise, kes käib ringi. Tema käes on seade ja skaneerib seda, mida vaja. Näide on (Joonis 2). [8]



Joonis 2. Sense skanner [8]

3D skanneri töö tulemust saab hõlpsasti kasutada 3D printimise näol. Kogu info, mis on kogutud esemest ja talletatud elektrooniliselt faili kujul on võimalik välja printida, kui ta on õigesse mõõtu viidud. See võimaldab teha kiiresti vajaminevaid koopiaid või realiseerida ideid esemetest mida pole ja selleks kulutada vähem rahalist ressursi. Tänu nendele võimalustele kasutatakse väga palju 3D printimist, mis võimaldab välja printida tahke ning ruumilise eseme, kasutades selleks kindlat liiva või plasti (polüamiid) ja liimi. Esimene teadaolev patenteerimise avaldusega seade leiutati 1980. aastal, Jaapanis, kuid avaldust ei antud sisse aasta jooksul ja seepärast sai patendi 1986. aastal Charles C. Hull. [9], [10]

## 1.2. 3D skanneri parameetrid

Tänapäeva info- ja tarbimisühiskonnas on erinevate toodete valik lai. Leidub suuremaid ja väiksemaid, kallimaid ning odavamaid tooteid. Nähtusi iseloomustavad suurused ongi need parameetrid, mis teevad esemetest pisut erinevad seadmed või tõstavad ühte rohkem esile teiste

seast. Ideaalis peaks leidma iga inimene endale sobivate parameetritega toote. On selleks siis igapäevaseks kasutamiseks mõeldud seade või tööstuses rakendamist vajav 3D skanner. [11]

Leidub väga palju erinevaid 3D skannereid, näiteks kontaktipõhiselt töötavaid ja laseriga töötavaid seadmeid. Skanner võib olla 2 m kõrge inimese skaneerimiseks, kui ka 20 cm kõrge, mis sobib töölauale või seljakotti, et jäädvustada väiksemate mõõtmetega objekte. 3D skannerite mass võib varieeruda 0,5 kg-st kuni 30 kg-ni. [11]

Objekti pinna uurimiseks võib skanner kasutada nii laser- kui ka valguskiirgust. Valguse kasutamine 3D skannerites on inimese silmale parem, sest laser võib silma kahjustada, kuigi see sõltub laseri võimsusest. Tänu laserile või valgusele on võimalik objekti pinda digitaalselt registreerida. Iga punkti tuvastamine ruumis sõltub sellest, kui täpne on seade. Loodava kujutise identsus olemasoleva objektiga sõltub resolutsioonist ja punkti mõõtmistäpsusest. Resolutsioon on kauguse vähim muutus mida sensor on võimeline registreerima. Näiteks kui resolutsioon on 0,5 mm, siis pinnal olev kumerus või nõgusus, mis on 0,4 mm jääb skanneri silmale tuvastamata ja digitaalselt kuvatakse tasane ala. Punktide mõõtmistäpsus on aga registreeritud punkti eksimusampluaa. Ehk kui mõõtmistäpsus on 0,2 mm siis punkti asukoht võib olla 0,2 mm õigest kohast ees- või tagapool. See annab skaneeritud pinnale eksimusliku lainetuse, millega peab arvestama. Juhul kui skaneeritava objekti pealispind on matt või tuhm, siis on resolutsioon ja mõõtmistäpsus väga sarnased asjad. Üldjuhul ei suuda laserkiir mati pinna pealt piisavalt peegelduda ning seda pinda ei suudeta kuvada. Selle vältimiseks kasutatakse spetsiaalset pulbrit või pihustit, mis lisavad küll väga õhukese kihi detailile juurde, kuid seeläbi on võimalik digitaalselt registreerida pinda. Teine halb pind mida skanneriga skaneerida on läikivad pinnad või klaas. Selliste juhtudel tuleb tegutseda samamoodi nagu mati pinna puhul. Vastasel korral tekib liiga palju „müra“ andmete registreerimisel. Teisisõnu tekib lisapunkte enne reaalsel pealispinda ja selle taha. Seda kõike saab hiljem arvutis eemaldada erinevate programmidega, aga see on aeganõudev töö. [11]

3D skannerite olulisemaid näitajaid on ka mõõtmiskaugus, mis näitab kui kaugel saab või peab olema skaneeritav objekt skannerist. Palju punkte on võimeline salvestama ühe skaneerimise korral ja kui suurt ruumilist objekti on võimeline skaneerima ning kas hiljem on võimalik erinevaid ülesvõtteid omavahel kokku sobitada. [11]

### 1.3. 3D skaneerimise tehnoloogiad

3D skaneerimise tehnoloogiad jagatakse kahte rühma - kontaktipõhine ja mittekontaktipõhine. Mittekontaktipõhised jagatakse veel omakorda aktiiv- ja passiivskanneriteks.

Kontaktipõhised 3D skannerid (Joonis 3) uurivad objekte kompimise teel, kus detail on asetatud kindlale lamedale alusele. Juhul kui skaneeritaval objektil pole lamedamat külge või ei püsi alusel paigal, siis see kinnitatakse fiksaatoriga. Skanneri küljes on väiksegabariidiline robotkäsi, mis on võimeline igas suunas ennast liigutama. Robotkäsi kombib eset ja loob objektist katsumise teel mudeli. See on väga aeganõudev protsess, võrreldes teiste skaneerimisvõimalustega. Peale selle tuleks sellise meetodi puhul skaneerida ümaramaid esemeid, sest mõõtmistulemused ei ole väga täpsed ja kuna robotkäsi on suur, siis ei pruugi kõik objekti pinna omapärad välja joonistuda. Suurimaks probleemiks on see, et skaneerimise käigus võib skaneeritav objekt viga saada. Seetõttu võiks vältida kontaktipõhiste skannerite kasutamist väärtuslike ja ajalooliste esemete skaneerimise puhul. [3], [12]



Joonis 3. 3D mõõtesead [13]

Kontaktipõhisel skaneerimisel võib olla kolm meetodit:

Veosüsteem, kus kõik teljed on omavahel risti ja igal teljel on oma statsionaarne kontaktkäsi. Iga käsi liigub enda telje suunal. Selline süsteem töötab paremini lamedate pindadega kujundite või lihtsate ümarate pindade skaneerimisel. [12]

Liigendkäsi jäikade ühendustega ja ülitäpsete nurgasensoritega. Käe otsas on väga täpse mõõtmistäpsusega sensor. See on ideaalne uurimaks suuri ja lamedamaid detaile, kus tuleb mõõta ka sügavaid avasid. [12]

Mõlema meetodi kombinatsiooni võib kasutada, näiteks liigendkäsi, mis on riputatud kalgule. Kaardistamiseks suurte avadega või kattuvate pindadega objekte. [12]

### 1.3.1. Aktiivsed skannerid

Aktiivsed skannerid saadavad välja teatud elektromagnetlaineid või valgust ja registreerivad nende peegeldused esemetelt. Võimalikud lahendused taolisteks protseduurideks on kasutada valgust, ultraheli või röntgenkiirgust. [12]

Laserimpulss (Ingl k. *time-of-flight*) 3D skanner on aktiivskanner, mis kasutab esemete uurimiseks laserit. See saadab välja silmale nähtamatu laserkiire ning tuvastab, kui kiiresti jõudis objekti pinnalt peegeldunud kiir tagasi. Kogu töö registreerib sensor, mis teeb kindlaks pinna kauguse ja kiire edasi-tagasi liikumiseks kulunud aja. Kuna valguse liikumise kiirus ning kiire levimiskiirus edasi-tagasi on teada, saab välja arvutada vaadeldava punkti kauguse valemiga (1) [12, p. 3]

$$c \times \frac{t}{2}, \quad (1)$$

kus  $c$  -valguskiirus m/s;

$t$  -aeg s.

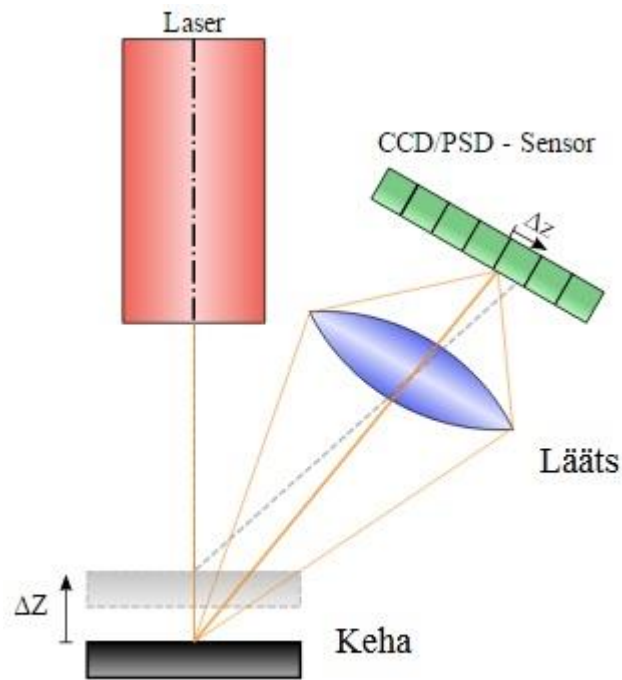
Skaneeritava mudeli detailsus sõltub sellest, kui täpselt suudab skanner mõõta laserkiire peegeldumist. Ühe millimeetri läbimiseks kulub laserkiirel ligikaudu 3,3 pikosekundit ( $10^{-12}$ ). Tavaline laserimpulss 3D skanner suudab ühes sekundis mõõta 10 000–100 000 punkti kaugused. Laserimpulss 3D skanneri eeliseks on nende võimekus töötada väga suurte kaugustega. Seega on

need head suurte struktuuride ning maastiku skaneerimiseks. Puuduseks on jällegi täpsus. Kuna valguskiirus on väga suur, tuleks peegeldumist mõõta väga täpselt, mis on kujunenud suureks probleemiks. Samuti tekitab raskusi, kui laserkiir tabab objekti äärt ning seetõttu peegeldub kiir tagasi kahest eri kohast. [12]

Selle skanneri teine omapära on see, et sensor registreerib ainult ühest punktist saadud andmeid. Kuigi ainult ühest punktist, aga selle eest väga suure vaatlusalala peale. Saamaks paremat 3D mudelit tuleb laserimpulss skanneri pead liigutada ringiratast või kasutada liigutatavaid peegleid. Peeglite kasutamine on rohkem kasutusel, sest nad on kergemad ja seeläbi saab neid kiiremini liigutada ning mõõtmistulemused on täpsemad. [12]

### **1.3.2. Triangulatsioon**

Triangulatsioonil põhinev 3D skanner (Joonis 4) on samuti aktiivskanner, mis kasutab laserkiiri, et uurida keskkonda. Laserkiir lastakse objektile ja kaamera otsib laserpunkti ülesse. Laser, laserkiir ning kaamera moodustavad omavahel kolmnurga, seepärast sellise süsteemiga skaneerimist nimetataksegi triangulatsiooniks, sest punkt arvutatakse välja trigonomeetrias kasutatavate valemitega. Laseri ning kaamera asukoht ja laserkiire nurk on teada. Samuti on teada kolmnurga ühe külje pikkus. Nende teadmiste ja mõõtmistulemuste põhjal saab punkti paiknemise ruumis välja arvutada. Triangulatsiooni skanner ei suuda suurtel kaugustel töötada ning on seetõttu palju täpsem kui laserimpulss skanner. Esimene taoline skanner töötati välja 1978. aastal. [12], [14, pp. 59-103]



Joonis 4. Triangulatsioon [15]

Mõlemal, laserimpulss ja triangulatsiooni skanneritel, on omad plussid ja miinused. Üks on sobilikum skaneerima suuremaid objekte, teine aga lähemalt ja täpsemalt. Laserimpulss skanner võib lausa kilomeetrite kauguselt skaneerida. Seepärast ongi see sobilikum ehitiste ja looduse skaneerimiseks, aga ainuke ebasoosiv asjaolu on täpsus. Valguse liikumise kiirus on see, mis teeb selle masina ebatäpseks. Laseri kiire edasi-tagasi liikumise mõõtmise aeg peab olema väga õigeaegne, sest väiksema eksimuse muudab saadava punkti asukohta ruumis. Juhul kui mõõtmistulemus jääb liiga hiljaks on punkt sensorist kaugemal. Sellisel juhul ei tasuks teha mõõtmisi, mis peavad olema millimeetrise täpsusega. [12]

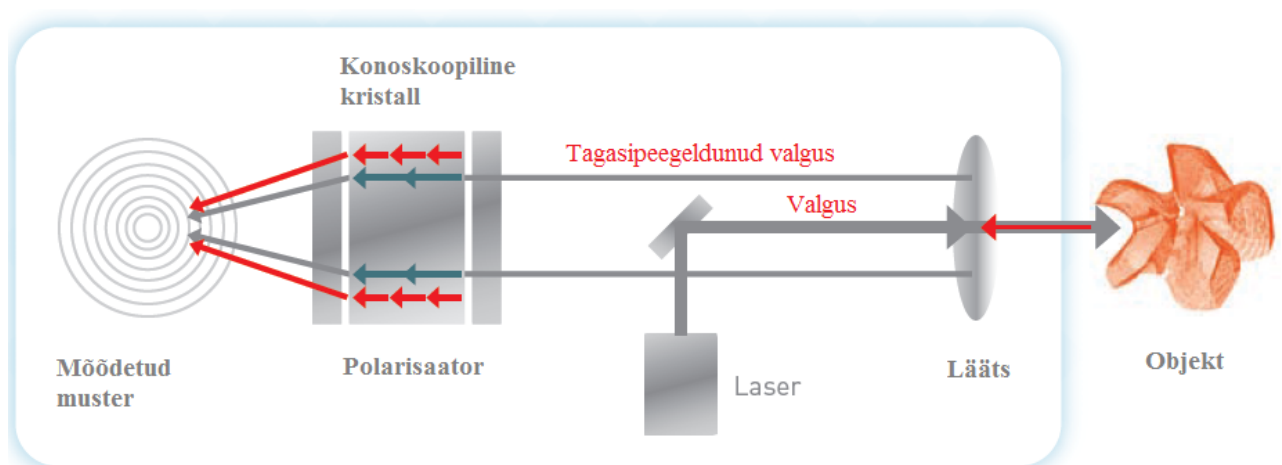
Teine asjaolu, mis laserimpulss skannerite täpsust pärsib on see, kui laserkiir mis saadetakse skaneeritava objekti poole läheb vastu objekti nurka. See on halb sellepärast, et informatsioon mis tagasi peegeldub tuleb kahest eri asukohast. Loob uue punkti objektile, mida pole olemaski. Seepärast kui kasutatakse kõrgema resolutsiooniga skaneerimist, siis on suurem tõenäosus, et laserkiired põrkavad vastu nurki ja loovad uusi punkte nurkade taha. Skannerid väiksema laserikiire laiusega vähendavad selliste olukordade teket, kuid siis on jällegi mõõtekaugus piiratud, sest laserikiire laius suureneb vahemaa kasvades. Skannerites kasutatav tarkvara üldjuhul tuvastab esimese laseri tabamuse detailile ja seeläbi tühistab põrkega tagasitulnud informatsiooni. [12]

Väikese detailsusega skaneerimised, ligikaudu 10 000 punkti sekundis, võivad võtta vähem aega kui ühe sekundi. See-eest suure täpsusega mõõtmised, mis vajavad miljoneid punkte võivad võtta aega mõne minuti. Sellist ajavahet põhjustab liikumine. Kuna igat punkti uuritakse erineval ajahetkel, siis igasugune kõikumine ja vibratsioon segab õigete andmete kogumist. Seepärast on väga oluline skannerit ja skaneeritavat objekti hoida stabiilselt ning seeläbi vähendada erinevaid liikumist põhjustavaid tegureid. [12]

Temperatuuri muutus võib olla üks faktor, mis segab skaneerimist. Näiteks, kui skanner on pandud kolmjala peale ja väljas paistab päike skanneri ühele küljele, siis see pool mida päike kõige enam soojendab hakkab soojuspaisumise pärast liikuma. Informatsioon hakkab tasapisi muutuma sellises olukorras. Osadel skanneritel on sisse ehitatud kompensaatorid, mis sellises olukorras takistavad liikumist skaneerimise ajal. [12]

Triangulatsiooni skanner töötab aga vastupidiselt laserimpulss skannerile. Objekti mõõtmine peab toimuma lähedalt ja täpsus loodaval kujutisel on väga punktuaalne. Seepärast sellel põhimõttel töötavate skannerite täpsust mõõdetakse kümnetes mikromeetrites. [12]

Konoskoopiline skanner saadab kiire esemele ning püüab sama tagasipeegeldunud kiire läbi konoskoopilise kristalli ja projekteerib CCD (Ingl k. *Charge Coupled Device*) peale (Joonis 5). Saadakse difraktsiooni muster ja saab määrata punkti kauguse. Selle süsteemi plussiks on punkti kauguse kindlaks määramine ainult ühe kiirega. [12], [16], [17]



Joonis 5. Konoskoopiline kristall [18]

CCD-sensor ehk laengsidestusseadis on optoelektroniline kiirgusvastuvõtja optilise kujutise teisendamiseks elektrisignaaliks. Põhilist rakendust on see seade leidnud foto- ja videokaamerates, skannerites, teleskoopides. [12], [16], [17]

Esimene seade tööstuslikuks otstarbeks, mis leiutati konoskoopilisel põhimõttel oli ConoProbe ning see toodi turule 1999. aastal. ConoProbe on kõrge täpsusega punktide tuvastaja ja töötab mitte-kontaktipõhisel süsteemil. Tööstuses leiab ta rakendust mehaanika valdkonnas kvaliteedi kontrolliks nagu näiteks turbiini labade, erinevate ülekannete, masinate osade, vormide ja pehmete materjalide uurimiseks. Samuti materjali paksuse, toote kuju ja nurga mõõtmiseks. [19]

### **1.3.3. Passiivsed skannerid**

Aktiivsed skannerid saadavad välja elektromagnetlaineid, et siis peegeldumisel registreerida peegeldumispunktide asukohta. Passiivsed skannerid aga ei saada ise mingeid kiiri ega laineid, vaid otsivad esemelt peegeldunud valgust. Enamasti nähtavat valgust või infrapunakiirt. Taoliseks näiteks on tavaline digitaalne kaamera. [12]

Stereoskoopiline - Töötab põhimõttel nagu inimese nägemine. Silmade asemel kasutatakse kahte eraldi paiknevat kaamerat, mis on samasse punkti fikseeritud ja mõlema pildi erinevustest saab tarkvaraga välja arvutada punktide kaugused. [12]

Fotomeetriline - Kasutatakse ühte kaamerat, kuid erinevaid valgustingimusi. Objekti pildistamisel ei kasutata välku, sest see rikuks skaneeritava eseme varjud ja kontrastsuse. Jäädakse looduslike valgusallikate juurde. [12]

Siluett - Pildistatava objekti tagataust on hästi kontrastne ja see toob välja eseme piirjooned ehk kontuuri. Tagataustaks võib olla valge paber, kust on hästi näha järjestikuste piltide puhul pildistatava detaili piirjooni. Silueti tulemus on hea, kuid erinevad reljeefid pinnal jäävad siiski jäädvustamata. [12]

## **1.4. Kasutusala**

Järgnevalt kirjeldatakse 3D skanneri kasutusalasid:

- tööstus;
- meelelahutus;
- rõivatööstus;

- arheoloogia;
- õnnetuste fikseerimine;
- meditsiin;
- haridus.

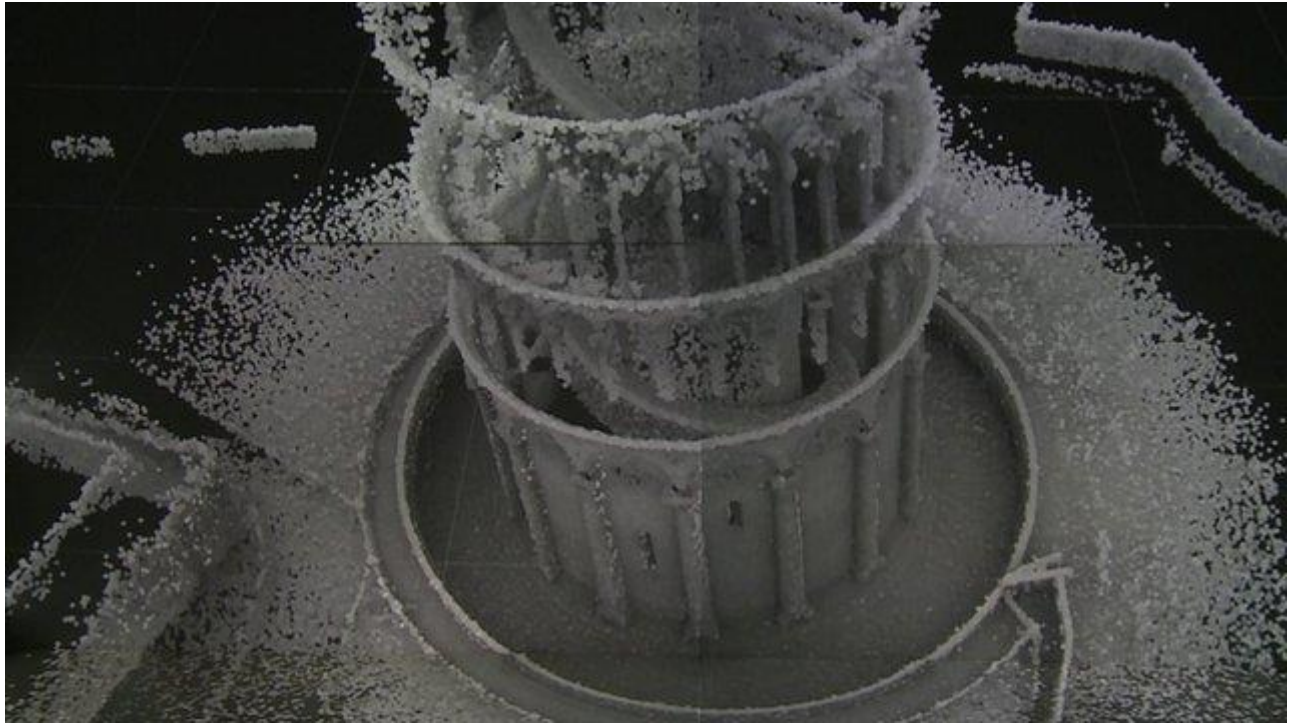
3D skannereid kasutatakse laialdaselt tööstuses. Nende abil tehakse kvaliteedi kontrolli, luuakse teostusjooniseid, näiteks monumentidest ja sildadest. Samuti kasutatakse robotikas robotsilmana, mille abil seade saab kogu informatsiooni ümbritsevast keskkonnast. Peale selle kasutatakse 3D skannereid modelleerimises, mille puhul 3D mudeli loomine on lihtsam ja aega säästvam kui selle tegemine arvuti teel. See välistab selle, et kui soovitakse olemasolevast objektist saada mudeli kujutist arvutisse, ei pea käsitsi mõõtma igat pikkust ja laiust ning seejärel selle arvutisse kandma, vaid lihtsa skaneerimisega luuakse kujutis elektroonselt. Peale selle on võimalik vastava skanneriga kontrollida keevituse kvaliteeti ja lasta võrrelda keevist tolerantsi piirmääradega. Niiviisi saab kiiresti teada kas keevis on hea või mitte. [3], [20], [21], [22]

Meelelahutusäris luuakse filmitööstuse jaoks erinevaid mudeleid. Vajadusel kahandatud kujul ja niimoodi saab luua erinevaid efekte. Hävitades väikeste kulutustega terve linnaosa. Samuti ka videomängude jaoks. 3D objekti loomine on palju kiirem olemasolevat skaneerides, kui seda uuesti modelleerimistarkvaraga teha. [3]

Samuti kasutatakse rõivatööstuses skannereid. Näiteks, saab luua inimesest 3D kujutise ja seeläbi talle ideaalselt sobivaid riideid disainida ilma, et peaks ise riideid eelnevalt proovima. Selleks luuakse mannekeen ühe inimese kehakuju ja mõõtude järgi. Eelnevalt skaneeritakse inimest. Sellele järgneb robotika ja arvutikontrolli koostöö ning konkreetse inimese koopia ongi valmis. [3]

Viimasel ajal on väga menukaks saanud kultuuripärandi säilitamine (Joonis 6). Luuakse igavesed koopiad arvutisse, et neid vajadusel kasutada taastamiseks. Esimesel võimalusel talletatakse selliseid ajaloolisi objekte mis on suuremas ohus. Ilm lõhub palju looduslikke vaatamisväärsusi ning tihtipeale tuleb ajalugu ka vandaalide käest päästa. 3D skaneerimine on ohutu ja laserkiir liiga nõrk, et tungida skaneeritavasse materjali. Nii ei tehta kultuuriväärtustele uusi kahjustusi skaneerimise käigus. Dr Franco Tecchia, tahab luua virtuaalset muuseumi ajaloolistest paikadest ja esemetest, et neid sisuliselt kodust lahkumata oleks võimalik näha. Selleks, et näha kõiki maailma vaatamisväärsusi ei pea igale poole reisima, vaid võib külastada mõnda muuseumi, kus selline võimalus oleks olemas. Tema esimeseks projektiks oli Pisa torni jäädvustamine. Ta tahtis oma meeskonnaga selle ülesande teha kiiresti teostatavaks ja lihtsaks. Selleks tegid nad uuel põhimõttel

töötava skanneri. Skanner, mis on vedru peal ja mõõdistab keskkonda samal ajal kui jalutad. Selleks, et skaneerida peab olema teada skanneri asukoht ruumis ja vedru peal muudkui kõikudes on seda raske saavutada, kuid meeskond kasutab oma seadmes odavat inertsiandurit, mis seirab skanneri asukoha. Nii võetigi ülesse Pisa torn vähem kui 20 minutiga. [3], [23], [24]



Joonis 6. Pisa torni punktipilv [25]

CyArk on mittetulundusorganisatsioon, mis tegeleb maailma kultuuripärandi talletamisega. Luuakse identsed kolmemõõtmelised koopiad ajaloolistest objektidest. Hiljem on võimalik rekonstrueerida ehitisi või selle kaunistusi. Nad teevad koostööd Google Earthiga, et muuta maailmapärandi esitlemine veelgi põnevamaks ja kõigile kättesaadavamaks. Neil on plaan teha ka Titanicu vrakist korralik 3D mudel. [24], [26]

Firma eesmärk on viie aasta jooksul skaneerida 500 säilitamisväärtset kohta. Esmalt tegeletakse UNESCO poolt välja kuulutatud säilitamist vajavate objektidega. Kuid CyArk ei tegele selle projektiga üksi ja oma abikäe eesmärgi täitmiseks annavad kohalikud ettevõtted, kellel on vastav varustus olemas, et skaneerida kultuuripärandit. Nii ettevõtted, kui ülikoolid teevad CyArkiga koostööd, et saaksid kõigivõimalikud ajaloolised kohad digitaalselt salvestatud. Hea näide selle tegevuse vajalikkusest on Uganda. Seal skaneeriti ühte hoonet (Joonis 7), mis oli nelja kuninga hauaks. Kõigest aasta peale tegevust põles hoone maha. Nüüd on kolmemõõtmelised joonised hauamälestisest väga vajalikud, kui hakatakse seda kohta uuesti ehitama. [24]



Joonis 7. Uganda hauakamber [27]

Arheoloogide jaoks on töö muutunud palju lihtsamaks. Varemalt võis võtta neil mõne hauakambri visandamine nädalaid aega. Selleks, et mõõta mõõdulindiga kitsaid käike või muid raskesti läbitavaid kohti, kulus neil palju aega. Tihtipeale ei olnud tulemused ka täpsed ja seepärast taastasmistööde käigus selgus, et mõõtmistulemused on olnud valed ning restaureerimine ei ole teostatav nii nagu algselt oli plaanitud. Tänu 3D skaneerimisele saab tehtud identne koopia samadest kohtadest vaid mõne tunniga või paari päevaga. Sellele järgneb mõnetunnine järeltöötlus arvutis programidega, kus antakse punktipilvedele tahked pinnad. See teeb töö tegemise palju kiiremaks ja tulemused on täpsemad, kui nad olid varemalt. [24]

Õnnetuspaikade ülesvõtmiseks kasutab ka politsei 3D skanneri võimalusi. Dokumenteeritakse olukord, salvestatakse digitaalselt ja hiljem saab õnnetuse paika korduvalt üle vaadata ja uurida sündmuspaika erinevatest vaatenurkadest efektiivsemalt kui seda on tehtud varem. Selline võimalus annab seadusesilmale ümberlükkamatud asitõendid, kui peaks kohtus minema vaidluseks või väidete ümberlükkamiseks. Samuti võimaldab 3D skanner hoida aega kokku ja teha sama töö mitu korda kiiremini ära. Näiteks maastikult rehvi mustri jäljendi tegemine. See on väga aega nõudev töö, kuid tänud skaneerimisele saab väga hõlpsasti mustrit digitaliseerida ja võrrelda erinevate rehvidega. [24], [28]

Meditšiini valdkonnas kasutatakse 3D skannerit erinevatel otstarvetel. Näiteks ortoosikeskuses tehakse jalatallast ülesvõtte, et uurida inimese jalalaba. Seda sellepärast, et tihtipeale inimestel hakkavad jalad ja alaselg valutama pärast pikka tööpäeva ning otsitakse oma murele lahendust. Peale seda uurib spetsialist eriliste arvutiprogrammidega tulemusi ja saab teha järeldusi, milliseid

probleeme need jalad patsiendile tekitavad. Tänu sellele saab leevendada jalgadel seismise valusi, kui skaneeritud info abil lasta teha endale sobivad jalatsi tallad. Lisaks, FSS-skanneriga tehtav digitaaluuring annab ruutsentimeetrise täpsusega keharaskuse jalalabadele ja näeb ära koormuse jaotuse ja jalalaba mõõdud. [29]

Teine meditsiiniline valdkond kus 3D skannerit kasutatakse on erinevate proteeside tegemiseks. Väga suurt kasutusala on leidnud see seade suusisese skannimise näol, mille abil luuakse täpseid hambaproteese inimestele. Aeganõudva hammastest jäljendi tegemine spetsiaalse silikooni või alginaadiga on asendunud digitaalse jäljendiga. Pärast jäljendi võtmist on võimalik luua väga täpselt sobivad proteesid või hambumust korrigeerida. Ortodont saab tänu jäljendile lasta laboris teha sobivaid breketeid, mis saab juba teisel visiidil hammaste külge panna. Proteesiarst saab, aga skaneerimise tulemustega lasta valmis teha proteesid, mis tehakse CNC freesimise, laserpaagutamise või 3D printimise abil. [30]

Open Bionics on esimene ettevõtte, kes on teinud 3D skaneerimise inimese käe osast, kellel polnud sündides kätt ja seejärel 3D printeri abil printisid puuduva käe osa ja robootilise käelaba, mis töötab mehaaniliselt. Ka varem on tehtud 3D prinditud proteese, kuid mitte ühtegi mehaanilise lahendusega. Printimiseks kulus 40 tundi ja käe omanik oli tööga väga rahul, sest tavaliselt võetakse esmalt jäljend käest. Seejärel kulub paar nädalat, et sellest vormist tehtaks korralik protees. Patsiendile tundus, et saavutatud tulemus 3D skanneri ja printeri abiga olid palju paremad kui eelnevalt tehtud proteeside tegemine. [31]

Lisaks eelnevale leiab 3D skanneri kasutusala ka kõige lihtsamate asjade näol. Hingamismaskide loomiseks näo kuju järgi, sest iga inimese nägu on omamoodi ja standardne näomask ei pruugi sobida kõigile. See võib olla valulikult ebamugav või ei täida oma funktsiooni ehk meditsiiniline hapnik ei jõua patsiendini vaid pääseb maski ja näo vahelt välja. [28]

Hariduses õppetöö eesmärgiks ja õpilaste meelitamiseks kooli tegi TTÜ Virumaa Kolledž uudistajatele demonstratsiooni, kuidas 3D skanneriga võetakse ülesse põlevkivist tükk ja seejärel eraldi väljatöötatud programmiga arvutatakse välja elektri täpne asukoht. Kui nüüd puuriga sinna auk puuritakse ja pirn auku pannakse, hakkab pirn põlema. [32]

## **2. 3D SKANNERI TURUNDUS EESTIS**

### **2.1. Ettevõtted**

Eesti interneti lehekülje järgi (baltinfo.ee) pakuvad 3D skanneerimise teenust ainult kolm firmat. Amper Engineering OÜ, 3D Trükikoda ja Makerpood 3D print. Viimane neist firmadest on oma tegevuse lõpetanud. Koduleht ei ole saadaval ja internetist ei ole võimalik neilt teenuseid hankida. Lisaks inforegistris olevale e-mailile kirja saates, sealt vastust ei saa. 3D Trükikoda muudab firma nime, sest firma muutub rahvusvaheliseks. Selleks, et pakkuda teenust rohkematele klientidele. Amper Engineering on tegutsev firma, kes pakub igapäevaselt 3D skanneerimise teenust. Tuvastamaks erinevaid tekkinud defekte detailidel ja seeläbi saab leida lahenduse seadme detailide eluea pikendamiseks. Teisalt kulunud või vigastada saanud objekti skanneerimist ja seejärel uue sobiva CAD-mudeli (ingl k. *Computer Aided Design*) loomist. Nende moto on teha vanast esest uus. [33]

#### **2.1.1. Shaperize**

Firma muutis hiljuti nime. Varemalt oli ta tuntud kui 3D Trükikoda. Selleks, et välisturgudel läbi lüüa loodi uus ühisfirma koos Mainor AS-ga. Põhiliselt tegeleb ettevõtte 3D printimisega ning sinna juurde käib 3D skaneerimine ja 3D modelleerimine, ühesõnaga kõik mis on seotud kolmemõõtmelise maailmaga. [34]

Skaneerimise teenust pakuvad nad lauaversioonina kasutatavat Matter and Form skannerit. Suurim võimalik detaili kõrgus on 25 cm ja laius 18 cm. Saadava skaneeringu täpsus on +/- 0,25 mm. Nagu nad ise on maininud, siis see seade on rohkem tavakasutajatele, sest täppistööd sellega teha ei saa. Näiteks skaneerides malendi nuppe on tulemuseks vesised ja äravoolanud nägudega kujundid. [34]

3D modelleerimise teenust pakub firma Solid Edge või Solidworks keskkonnas. Seda läheb vaja kliendi poolt saadetud faili muutmiseks juhul kui toote gabariidid on liiga suured, siis tuleb see teha digitaalselt erinevateks juppideks ja hiljem osadena välja printida. Samuti täiesti uue toote tegemise korral. [34]

Peamiselt pakub firma 3D printimise teenust. Prototüüpide mõõtmed võivad olla kuni 250x160x150 mm. Mudeleid, mida saab värviliselt printida ja lisaks on firma kodulehel otsevideo 3D printerist, mis näitab kuidas hetkel printeris toode valmib. [34]

### **2.1.2. Amper Engineering**

Firma tutvustab ennast oma kodulehel kui kliendi ideele õige vormi andjana. Pöörab tähelepanu inimestele, kes on puutunud kokku mootorite või masinatega, sest tihtipeale kui miskit läheb katki, siis asendust on väga raske leida. Küll on valed mõõtmed ja hind liiga kallis. Selliseid probleeme aitab lahendada Amper Engineering, kes kasutab kaasaegsemat tehnoloogiat ja loob vajadusel sama detaili uuesti või isegi täiustatuma versiooni. [35]

Oma tööks kasutavad nad Creaformi skannerit Metrascan 3D. Tarkvarade lahendustest aga Rapidform XOR ja Catia, mis annab lisaks skaneerimisele võimaluse neid jooniseid muuta ning modelleerida vastavalt vajadusele. [35]

Ettevõtte pakub pöördprojektsiooni ja kvaliteedi kontrolli teenust. Kvaliteeti kontrollitakse tootmises kasutatud CAD-mudeli võrdlemisega skaneeritud andmetest. Sellest analüüsist selguvad originaalmudeli ja kontrollimist vajava detaili erinevused. Piisava täpsuse selliseks võrdluseks annab MetraScan 210 3D skanner, mille täpsus on 85 mikronit e. 0,085 mm. Suurema täpsuse saamiseks kasutatakse sondi, mis tagab 25 mikroni e. 0,025 mm suurima või vähima mõõtmistulemuste erinevuse loodavast kujutisest. [35]

Teine teenus mida firma osutab on olemasolevast esemest, CAD mudeli loomine. Keskmiselt võib kuluda ühe CAD mudeli loomiseks 12h, kuid kasutades 3D skannerit ja vastavat tarkvara, võib piirduda 3h tööga. Esmalt on vaja skaneerida, saades vajaminevast objektist täpne 3D punktipilv, mida saab arvutis edasi töödelda. Sellest punktipilvest saab võtta mõõte, uurida tekkinud vigu ja alustada CAD mudeli loomist. Selleks, et saaks luua CAD mudelit on vaja punktipilve analüüsida ja töödelda. Punktid tuleb omavahel ühendada ja luua neist pind. Selle jaoks kasutatakse programmi GeoMagic Design X, mis tänu pinna moodustamisele võimaldab CAD mudelit luua. Selles etapis saab eemaldada objektilt mittevajalikud ebatäpsused. [35]

Viimases tööetapis luuaksegi CAD mudel, mida on samuti võimalik muuta vastavalt kliendi soovidele. Pinnamudel luuakse .stl faililaiendina, mida kasutavad enamus CAD programmid. Seejärel tehakse sellest .step või .iges failiformaat ehk CAD mudeli formaat. Selliselt on võimalik seda faili kasutada ka CNC pingis. [35]

### 2.1.3. Wolfprint

Maailma esimesi firmasid, mis teeb elusuuruses skaneeringuid inimestest fotogramm-meetrial. 3D kujutise loomiseks kasutatakse 50 Canon'i peegelkaamerat, mis teevad 2D pilte. Ei ole teist sellist skaneerimise viisi, kus tulemuseks oleks nii reaalse väljanägemisega fotodest tehtud 3D mudel. Sellist skaneerimise teenust saab kasutada videomängude montaažiks. Vahetada mängutegelase nägu enda näoga ja palju muid loovaid võimalusi, mis nõuavad väga head pildi kvaliteeti. [36]

Ettevõtte pakub peale siseruumis skannimise ka maastikul skannimist. 3D skaneeritud mudelid talletavad palju huvitavaid värve, kui looduslik valgus langeb nende pinnale. Lisaks ei esine sellistel mudelitel tehast valgust ehk lambivalgust. 3D kunstnikul võib kuluda nädalaid tabamaks looduse tegelikku ilu ning seda jäljendada, kuid fotoskaneerimine annab täpse tulemuse loodusvärvide ilmingust. [36]

Skaneerides kogutakse infot objekti värvidest ja varjudest fotole. Seejärel tarkvaraga luuakse punktipilv, millest omakorda luuakse 3D mudel. Tulemuseks on fotorealistlik, väga täpne ja kõrge resolutsiooniga mudel. Resolutsioon näitab punktide asetust uuritava detaili pinna võrgustikus. Mida kõrgem on resolutsioon seda rohkem informatsiooni kogutakse objekti kohta. Seevastu, mida väiksem on resolutsioon, seda lamedam ja tasapinnalisem tuleb skaneeritud pind. [36]

Lisaks skaneerimisele pakub firma taolise skanneri ehitamise teenust. Nad on juba mitu fotogramm-meetrial skannerit ehitanud, mis võimaldab isegi inimest skaneerida.

Wolfprint on ainuke firma maailmas kes pakub ka sündimata lapse skaneerimise ja seejärel 3D printeriga lapse kuju tegemise teenust. Lapsest luuakse vahetu ja täpne koopia, just selline nagu parasjagu loode ema kõhus on. Niiviisi saavad vanemad oma võsukest näha varem kui muidu. Seda kõike saab teha tänu ultraheli pildile, mis ei ole ainult tasapinnaline vaid loob lootest tervikliku 3D kujundi. Loomulikult peab kliinikul olema selleks 3D ultraheli seade, mis võimaldab ülesvõtte lootest hiljem salvestada sobiva faili näol. [36]

### **3. 3D SKANNERI TEENUSED EESTIS**

Geodeesia firmades on 3D skaneerimine laialdaselt levinud. Kõige enam kasutatakse 3D skannerit olemasolevate hoonete mõõdistamiseks. Tihtipeale läheb seda vaja kui soovitakse maja rekonstrueerida. Asendada vana viimistlus uuega või siis tehakse hoopis juurdeehitusi. [37]

Tänu maja punktipilvele on võimalik seda modelleerida ning saadakse hoonest 3D mudel arvutisse. See, aga on ideaalne algmaterjal arhitektidele, kes saavad tööd jätkata, projekteerida vastavalt vajadustele. 3D mudel annab täpsed mõõdud hoonest ja pildi kõikvõimalikest defektidest, mis võivad hoonetel esineda. Ajapikku ära vajunud seinad või puuduliku krohvi kohad seintel, mis on ära kukkunud. Need on ainult paar näidet sellest, mis võib olla, kuid olukordi on palju ja erinevaid. [37]

Tihti pakutakse ka järelvalve näol teenust ehitusjärgus olevatele hoonetele, mis lõppkokkuvõttes annab parema ülevaate ehitusfirmadele, ehitise omanikele, järelvalvele ja kinnisvarahaldajatele ehituses olevast hoonest. 3D skanner sellises olukorras annab täpse ülevaate erinevate kasutatavate materjalide mahtudest. Saab ära mõõdistada kaevetööd, välja arvutada palju kulub betooni vastava konstruktsiooni tegemiseks. Lisaks on võimalik tuvastada pinnaerinevusi ning seeläbi arvutada vajalikud mahud suurte pindade asfalteerimiseks või betoneerimiseks. Peale selle saab lasta kontrollida siimaani tehtud töö kvaliteeti. Kuidas projekt ja tegelikkuses valmiv hoone on kooskõlas. Juhul kui peaks esinema puudusi või muid asjaolusi, mille pärast on objekti mõõtmed erinevad projektil olevatest mõõtmetest, siis 3D skaneerimine aitabki selliseid olukordi varakult avastada ja likvideerida puudused väiksemate kulutustega. [37]

Viimasel ajal ka Eestis väga tuntust kogunud ettevõtmine on ajaloolise taustaga objektide või vaatamisväärsuste jäädvustamine. Vanadel hoonetel või mõisadel puuduvad joonised ja 3D skanneriga on vajaminevaid jooniseid kerge teha. Kvaliteetse skanneriga jäädvustatakse ka pisemad nikerdused hoonete fassadil, mida on võimalik salvestada arvutisse ja niiviisi saab igal ajal hoone 3D mudelile ligi ning vajadusel teha neist vajaminevad joonised või rekonstrueerimiseks ette valmistada. Hiljem saab kulunud või ajajooksul ära lagunenenud illustratiivseid nikerdusi arvutis visualiseerida ja uuesti luua. [37], [38]

Geodeesia24 pakub avariide analüüsimise teenust, kus õnnetuse korral oleks vaja tänav kiiresti avariilisest olukorrast likvideerida. Selle jaoks on võimalik kokkupõrge skaneerida ja seda hiljem kontoris uurida ja nii ehk isegi avastada asju mida kohapeal kiirustades ei olekski leidnud. See annab parema liikluskorralduse võimaluse ja õnnetusjuhtumite korduva kontrollile. [37]

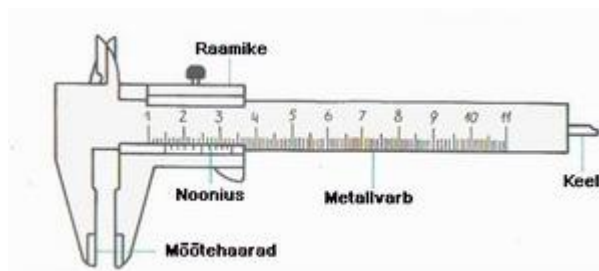
## **4. 3D SKANNERI JUURUTAMISE VÕIMALUSED MÕÕTETEHNIKA LABORIS**

Mõõtetehnika laboris uuritakse ja õpitakse tundma masinaehituses kasutatavaid mõõteseadmeid või tehnikat. Nende kasutusalasid ning seadmete mõõtmisvõtteid ja kuidas mõõteseadmeid hooldada. Laboratoorse praktika läbimisel annab seadmete kasutamine õppijale aimu toodete valmistamisel kui oluline on kvaliteet ja milliste piirmääradega on võimalik seda tagada.

Järgnevalt kirjeldatakse lühidalt mõõtelaboris kasutatavaid mõõteseadmeid:

- nihik;
- kruvik;
- sisekruvik;
- siseindikaator;
- sügavuskruvik;
- nooniusnurgamõõdik;
- radiaalviskumise mõõdik;
- keermekruvik;
- harkkaliiber.

Detailide täpseks mõõtmiseks kasutatakse nihikut (Joonis 8). Nihik koosneb kahest põhidetailist – liikumatust ja liikuvast haarast. Liikumatul haaral on põhiskaala, mis on millimeeterjaotusega. Mõõtejoonlaud on samasugune. Liikuvale haarale on aga noonius. Nooniusel nullkriips ühtib põhiskaala nullkriipsuga siis kui haarad on üksteise vastu surutud. [39]



Joonis 8. Nihik [39]

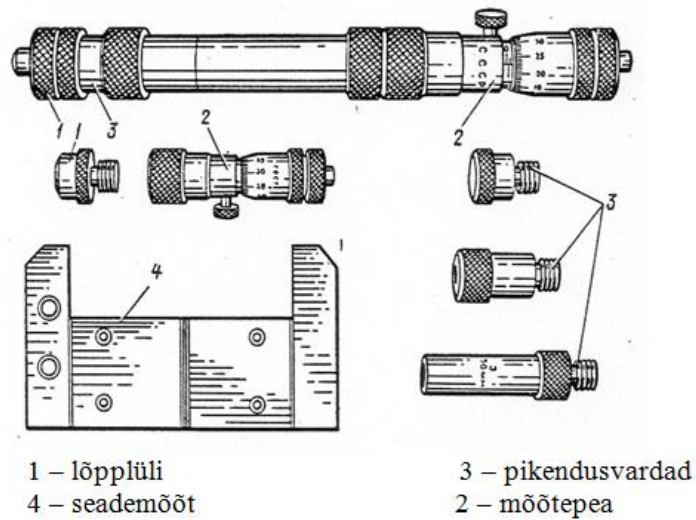
Nihik on tavaliselt 1/10 ehk 0,1 mm täpsusega. Sellise mõõtetäpsusega nihiku nooniusse pikkuseks on 19 mm ja see on jagatud kümneks võrdseks osaks. Kuid noonius, mis on jagatud 20 võrdseks osaks ja on 39 mm pikk on 0,05 mm mõõtetäpsusega. Nihikuga saab süviste sügavusi mõõta, detailide pikkusi ja sisemisi läbimõõte. [39]

Kruviku (Joonis 9) mõõtmistäpsus on suurem kui nihikul ning seda kasutatakse laiuste ja pikkuste mõõtmiseks. Kujult meenutab ta metallklambrit, millele on kinnitatud liikumatu mõõtepind ehk kand ja liikuv mõõtepind ehk mikromeetrilise kruvi otspind. Kruvi on ühendatud trumliga, mille serv näitab mõõtepindade vahelist kaugust ja kruviku samm on 1 või 0,5 mm. Kruviku kasutamisel on kõigil mõõtmistel tarvis rakendada ühesugust survet. Selle tagamiseks on kruviku liikuv trummel varustatud friktsioonisiduriga. Mõõtmise käigus kui hakkab kruvik mõõdetavale detailile ligidale saama tuleb edasi keerata siduri abil seni, kuni käristi hakkab kärisema. Seejärel saab kätte mõõdu, mis loetakse täis- või poolmillimeeter varrel olevalt skaalalt ja sajandikud trumlilt. [40]



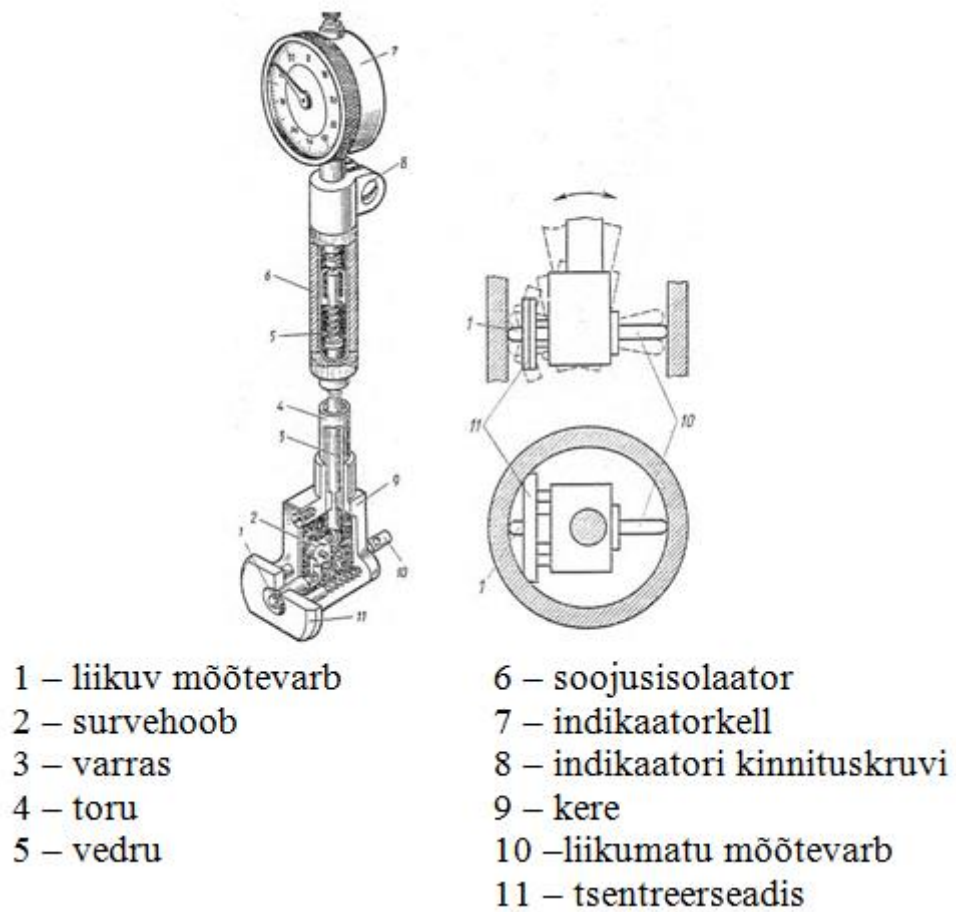
Joonis 9. Kruvik [40]

Sisekruvik (Joonis 10) töötab samal põhimõttel nagu kõik kruvikud, pikkuste mõõtmiseks. Sisekruvikuga saab mõõta aga esemete sisemusi ning õõnsusi. Nii nagu ka nimi seda juba kirjeldab. Mõõtmistäpsus on 0,01 mm. Tavaline mõõtepiirkond on 75...600 mm. Sisekruviku osadeks on mõõtepea, kuus pikendusvarrast ja otsak. Sisekruviku miinus võrreldes tavalise kruvikuga on see, et ta on ebatäpsem, sest varraste omavaheline kinnitus pole piisavalt jäik. Mõõtevahemikus 150...175 mm on mõõtemääramatus  $\pm 8 \mu\text{m}$ . [41]



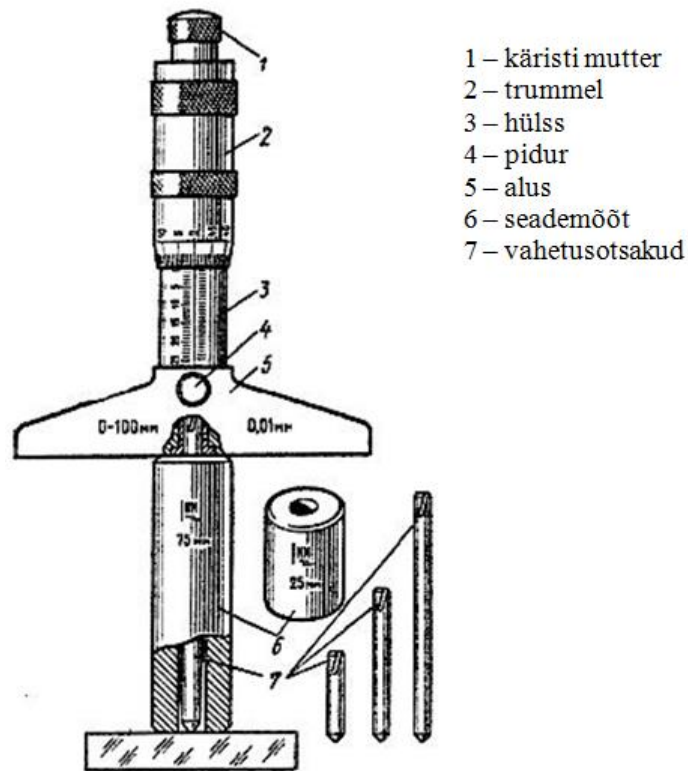
Joonis 10. Sisekrüvik [41]

Siseindikaatorit (Joonis 11) kasutatakse silindrite siseläbimõõdu mõõtmiseks. Skaalajaotise väärtus võib olla 0,01; 0,002 või 0,001 mm. [42]



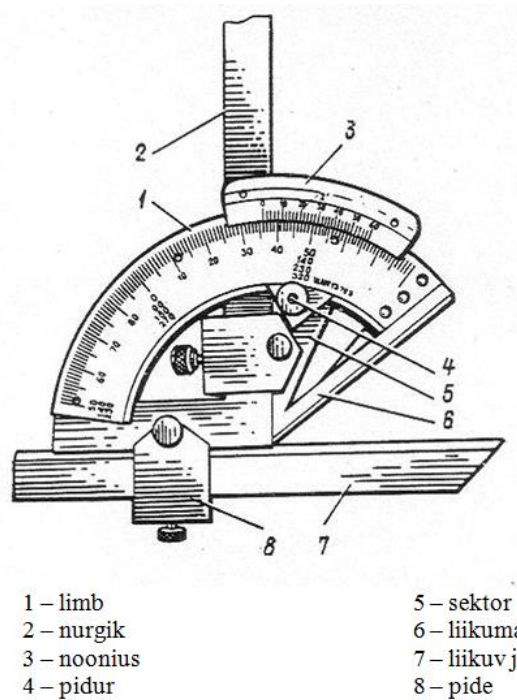
Joonis 11. Siseindikaator [41]

Sügavuskruvikuga (Joonis 12) saab mõõta kitsaid sooni ja väikse läbimõõduga auke mõõtmistäpsusega 0,01 mm. Erinevalt tavalisest kruvikust sügavuskruviku mõõtekruvi sissekeeramisel näit suureneb. Seepärast numbrid suurenevad pikiskaalal paremalt vasakule ja ringskaalal päripäeva. [41]



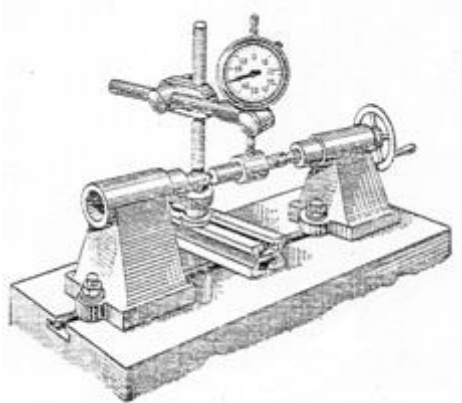
Joonis 12. Sügavuskruvik [41]

Nooniusnurgamõõdikut (Joonis 13) kasutatakse erinevate esemete nurkade mõõtmiseks, kuni  $320^\circ$ . Välisnurki piirides  $0^\circ$ – $180^\circ$  ja sisenurki  $40^\circ$ – $180^\circ$ . Nooniust saab liigutada mööda limbi kaart hammasülekanedega. Mõõtmisel tuleb hoida mõõdikut koos detailiga vastu valgust ja jälgida, et näha millal mõõtepindade ja nurgamõõdiku vahelt valgus läbi ei paista. Seejärel nurgamõõdiku mõõteasend fikseeritakse piduriga. Näidu lugemisel leitakse täiskraadid limbi skaalalt nooniusse nullkriipsu kohalt ja minutid nooniusskaalalt. Nooniusskaala kriipsude vahekaugusele vastab  $2'$ . [41]



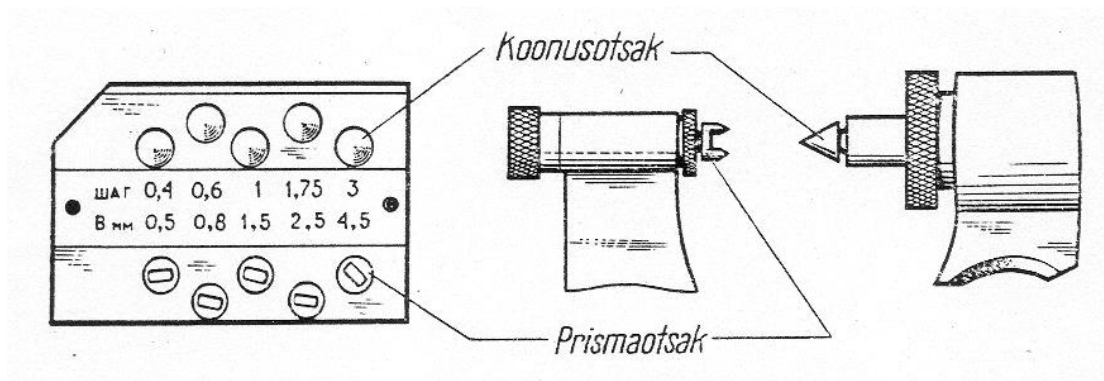
Joonis 13. Noonjusunurgamõõdik [41]

Radiaalviskumise (Joonis 14) mõõdikuga saab mõõta võlli radiaalviskumist. Mõõtevarb peab olema asetatud risti, siis tuleb võlli keerata ühe täisringi võrra ja indikaatorilt ülesse kirjutada suurim ja väiksem näit. Seejärel saab vaadata, kas see näit on väiksem lubatust ja määrata tolerants. [41]



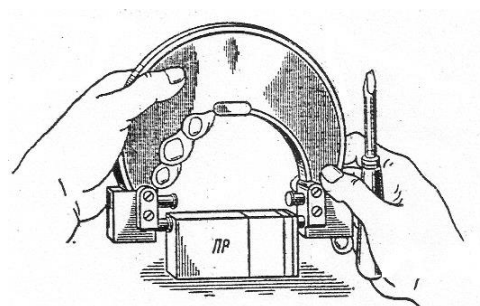
Joonis 14. Radiaalviskumise mõõdik [41]

Keermekruvikuga (Joonis 15) mõõdetakse detailile lõigatud keermete keskläbimõõtu. Varrastesse on puuritud avad, kuhu asetatakse vastavalt keerme sammule mõõteotsak. Kruviku kanda pantakse prismaotsak ja koonusots pannakse kruviku liikuvasse vardasse. Karbi pessa on kirjutatud iga otsaku keermesammud. [41]



Joonis 15. Keermekruvik [41]

Harkkaliibritega (Joonis 16) mõõdetakse võlle. Enne mõõtma asumist tuleb harkkaliiber mõõteplaatidega kalibreerida. [41]



Joonis 16. Harkkaliiber [41]

#### 4.1. Skannerid kooli laborites

Tallinna Tehnikaülikoolis kasutatav Atos II 400 on valgusega töötav skanner, mis on toote koordinaatide mõõtmiseks. Selle aparaadi eeliseks on kõrge täpsus ja lihtne teisaldamise võimalus, kuid miinuseks on tundlikkus läikivate pindade vastu. Saamaks siiski infot läikivate pindade kohta, tuleb need katta  $\text{TiO}_2$  pulbriga, mis loob valge mati värvuse kihi ja seda on võimalik siis skaneerida. [43]

Skannerit Atos II 400 kasutatakse kvaliteedi kontrollimiseks, prototüüpide skaneerimiseks ja digitaliseerimiseks. Mõõtmiskiirus on 1,4 miljonit pinnapunkti sekundis. Suurim ja väikseim mõõtmisviga mis võib esineda on 0,015 mm. Mõõtmismahu piirangut ei ole, kuid ühe pildi mõõtmaht on kuni 360x280x280 mm. Failiformaatide laienditeks on stl, iges, pol, ascii, ply, vda/pset. [21], [43]

Lisaks kasutab Tallinna Tehnikaülikool Aramis 2M skannerit, millega uuritakse materjalide deformatsioone. Seade jälgib stereokaamerate abil pinnale tekkivaid deformatsioone ja saab mõõta 3D koordinaate, kiirusi ja kiirendusi. Seejärel nende andmetega saab avastada defekte ning tekkinud pingeid ja teha kindlaks materjali omadused. Mõõtemaht jääb 1 mm<sup>3</sup> kuni 100x75x55 mm. Mõõtevahemikuks on 0,05-100% ja deformatsiooni mõõteviga on 0,01%. [43]

Tartu ülikooli haridustehnoloogia keskus kasutab kasutajasõbralikku Cubify Sense 3D skannerit. Skanner töötab kiiresti ja on väga lihtne käsitleda. Sisuliselt võib saada kolmemõõtmelise digitaliseeritud versiooni esemest kuskil kolme minutiga. See hõlmab kogu informatsiooni eseme kuju ja värvide kohta. Skanner on võimeline ülesse võtma nii raamatu suurusi objekte kui ka luua inimesest virtuaalset koopiat. [44]

Tallinna Tehnikakõrgkooli rõiva- ja tekstiiliteaduskond kasutab 3D Human Solution Anthroscanni, mis on mõeldud inimesest 3D mudeli tegemiseks. Seejärel saab võttad täpsed mõõdud ja kujundada sobivad riided. Seda skannerit peetakse maailma üheks parimaks, mis on mõeldud rõivatööstusele ja ülikoolidesse õppimise eesmärgiks. Seade on optiline ja töötab triangulatsiooni põhimõttel ning tänu sellele on inimese silmale ohutu. Tegemaks täpset tööd on seadmel kaks lasersensorit, mis registreerivad kogu info. Pärast skannimist saab kogu info talletada sobivatesse failiformaatidesse, mida loevad enamused modelleerimistarkvarasi, näiteks obj ja stl. [45], [46]

## **4.2. Kasutatavad programmid**

Kogu info, mis saadakse laserskaneerimise käigus moodustab kujutisest punktipilve. See punktipilv on digitaalne ja kuvab pinna reljeefi ruumis. Visuaalselt näeb kujutist arvuti ekraanil, aga selle informatsiooniga pole midagi peale hakata. Punktidel ei ole mingeid tahke ja neil ei ole mingeid mõõte. Selleks, et seda kogutud infot paremini saaks kasutada, on vaja seda digitaalselt muuta. Vastavate programmidega saab anda igale punktile oma värvi ja luua punktide võrgustike vahele tahud ehk antakse punktipilvele kolmemõõtmeline mudeli kuju. Seejärel on võimalik CAD programmidega edasi töödelda antud informatsiooni, justkui oleks skaneeritud objekt 3D modelleeritud. [47]

Järgnevalt tuuakse tabelis (Tabel 1) välja mõned praegusel ajal turul kasutatavatest programmidest, millega saab punktipilvest teha sobiv CAD fail, et sellega edasi töötada.

Tabel 1

## Punktipilve programmid [48], [49]

| <b>Programmi nimi</b>         | <b>Hind,<br/>€</b> | <b>Lisateave</b>                                                                          |
|-------------------------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Blender                       | Tasuta             | Uuendatakse pidevalt, mitmetele operatsioonisüsteemidele                                  |
| MeshLab                       | Tasuta             | Odav lahendus punktipilve ja mudeli töötlemiseks                                          |
| Meshmixer                     | Tasuta             | Lihtne ja mugav programm 3D mudeli töötlemiseks                                           |
| Geomagic                      | 7 300-27 500       | Automaatselt loob kujutise, sobilik kõige nõudlikemale pöördprojekteerimisel              |
| InnovMetric PolyWorks         | 9 200-27 500       | Suurte andmemahutude, kuni 100 miljoni punkti, töötlemiseks                               |
| Rapidform                     | 9 200-27 500       | CAD modelleerimiseks                                                                      |
| Pointools Plug-in for AutoCAD | 1 240              | Väga suurte punktipilvedega töötlemiseks                                                  |
| VirtualGrid VRMesh            | 639                | Lihtne kasutada, mudelit saab töödelda                                                    |
| Rhinoceros                    | Kuni 1000          | Õppeasutustele kuni 90% allahindlust, on Eestis edasimüüja<br>Lisaprogramm Grasshopper 3D |

Blenderi kasutamiseks minimaalsed nõuded arvutile [49]:

- 32-bit kahetuumaline 2Ghz protsessor;
- 2 GB RAM'i;
- 24 bit värve, 1280x768 monitor;
- OpenGL'i toetav graafikakaart, 256MB RAM'i.

Soovituslikud nõuded [49]:

- 64-bit neljatuumaline protsessor
- 8 GB RAM'i
- 24 bit värve, full HD monitor (1920x1080)
- OpenGL'i toetav graafikakaart, 1GB RAM'i.

3D tarkvaraprogrammid, nagu näiteks Blender, võimaldab luua kolmemõõtmelise animatsiooni. See võimaldab õppida mingi süsteemi ruumilist struktuuri ja selgitada dünaamilisi protsesse. Kuu faaside illustreerimist ja päikesevalguse liikumist Maa-kuu süsteemis. Digitaalse tehnoloogia abil saaks iga õpilane seda personaalselt uurida, sest füüsilisi makette või 3D mudeleid võib koolides paraku puudu jääda. [44]

### **4.3. 3D skanneri eesmärk laboris**

3D skannerit saab kasutada väga paljudes erinevates valdkondades. Rakendamisvõimalusi on palju ja kõige arendavam õppimise vorm on ikkagi katseeksitusmeetodi abil. Parima väljundi leidmiseks peabki proovima skanneri erinevaid võimalusi ja välja selgitama seadme võimalikud funktsioonid. Kasutades 3D skannerit ja uurides objekti saab esmalt infot gabariitide kohta. Seepeale on võimalik anda koordinaadipunktile tahke vorm, millest moodustub 3D mudel virtuaalses keskkonnas. Pärast seda on võimalik sellest mudelist teha ükskõik mida. Seda paremaks muuta, eemaldades defekte või luua täiesti uus toode või meene ning siis 3D printeri abil virtuaalsest andmekogust teha füüsiline detail.

Mehaanika valdkonnas kasutatakse skannerit üldjuhul kvaliteedi kontrolliks ja pöördprojekteerimiseks. Kvaliteedi kontrollis mõõdetakse detaili tolerantsi piirmäära, kas antud objekt on mingile täpsusklassile sobiv või mitte. Samuti defekti tuvastamiseks kontrollitakse detaili mõõte ja pinnavorme prototüübiga. Niiviisi saab kindlaks teha kas ja kui palju on erinevaid kahjustusi tekkinud seadmele. Kui leitakse mingi viga või anomaalia objektil, siis saab uurima hakata mis seda põhjustas ning seejärel likvideerida probleemi allika.

Pöördprojekteerimist kutsutakse teisisõnu ka pöördmodelleerimiseks. Seda sellepärast, et kui soovitakse saada 3D mudel olemasolevast detailist, siis lihtsaim ja kiireim viis selleks on skaneerimine. Alternatiiv on mõõta joonlaua või muu mõõteriistaga kõik vajaminevad mõõdud ja peale seda CAD programmiga modelleerima asuda. 3D skanner säästab sellest protsessist. Peale

detaili ülesse võtmist saab objekti lihtsalt ja kiirelt arvutisse sobivasse CAD faili teha ning vajaminev mudel ongi valmis. Seejärel saab seda vastavalt vajadustele täiustada. [50]

Alternatiivina eelpool mainitud võimalustest saab 3D skannerit ja arvutit kasutada, et luua 2D koostejooniseid objektist. Uurida erinevaid materjale millest on toode tehtud või mis materjaliga võiks toote asendada või milliseid pinnakatteid võib lisada ning kuidas gabariidid muutuvad. Leida kõige ergonoomilisemad lahendused toote kasutamiseks ja tegemiseks. Kujundada skeeme, kuidas ehitada pneumo- ja hüdroseadmete süsteeme või täiendada olemasolevaid. Skaneerides ülesse olemasolev lahendus, siis saab digitaalselt sobitada õige pikkuse ja õigete läbimõõtudega seadmeid. Sellega vähendab eksimuse võimalust, kus võib jääda mingi asi kahe silma vahele. Samamoodi saab talitada elektriseadmete paigaldamisel. [51]

## **5. ANALÜÜS JA SOOVITUSED TALLINNA TEHNIKAKÕRGKOOLOILE**

### **5.1. Soovitused 3D skanneri soetamiseks**

Enne kui läheb konkreetse 3D skanneri soetamiseks, oleks tarvis selgeks teha, millist eesmärki hakkab see seade täitma. Mida üritatakse saavutada, milliseid tulemusi oodatakse ja milliseks kujuneb toote väärtus. Kuna seade leiab rakendust laboris, siis oleks hea, kui skanner on piisavalt lihtsa tööpõhimõttega, et selle õppimisega saaks kõik hakkama ning ei peaks kulutama selleks mitu nädalat. Seade võiks mõõtmistelt olla väiksemapoolsem ja kaasaskantav, siis leiaks sellele rohkem rakendust. Lisaks saab kasutada ka väljaspool laborit ja aitaks teha uurimustöid või lõputöid. Seadme kasutamine ilmestaks töö sisu, samas annab praktilisi oskusi ja faktilisi teadmisi. [52]

Kindlasti esimese asjana peabki mõtlema sellest, et kas otsustada laua- või kaasaskantava versiooni kasuks. Kohati on lauaversioon väiksema mõõtmiseksimusega, kuid mõõdistatava detaili gabariidid hakkavad rolli mängima, sest 250x200 mm pole just palju võimalusi pakkuv lahendus. Pealekauba peab ese alusel paigal olema, sest liikuvaid objekte ei suuda sellised versioonid salvestada. Kaasaskantav versioon see-eest on mitmekesisem. Mõõtmistulemused jäävad neil 0,5 mm-st kuni 0,05 mm-ni ja nende seadmetega on võimalik ka elusaid olendeid skaneerida erinevalt lauaversioonidest ehk liikumine ei sega informatsiooni kogumist. Loomulikult saab kaasaskantava versiooniga kergemini ühest laborist teise minna ja rikastada nii erinevate õppetundide omandamist.

Mõõtmistulemuste täpsus on parameeter, mis otseselt mõjutab seadme hinda. Mida täpsem seade, seda kõrgem ka müügihind. Nii on alati olnud, et kes tahab parimat tulemust, peab ka vastavalt maksma. Rolli mängib jällegi seadme otstarve, kõik oleneb sellest kui suurt täpsust vaja on ning mida üritatakse saavutada. Kõrgkooli vaatepunktist, kui hakatakse katsetama ja õppima ning proovitakse leida uusi väljundeid seadmele, siis ei pea olema täpsus väga suur. Kuid mehaanikateaduskonna puhul kui hakatakse tegelema kvaliteedikontrolli ja pöördprojekteerimisega, on siiski mõõtmistulemuste täpsus üks olulisemaid näitajaid.

Mõõtmistulemuse täpsust sõltub kahest olulisest näitajast. Resolutsioonist ja punktide mõõtmistäpsusest. Resolutsioon näitab kui väikest detaili suudab skanner lugeda. Näiteks kui resolutsioon on 0,5 mm, siis see tähendab, et kui detail on väiksem kui 0,5 mm siis seda ei suudeta tuvastada ehk jääb registreerimata. Punktide mõõtmistäpsus näitab kui täpselt punktid asetsevad skaneeritud pinnal ehk 0,1 mm mõõtmistäpsuse puhul võib kogu ülesse võetud info erineda 0,1 mm võrra. See tähendab seda, et skaneeritud objekti pind võib olla 0,1 mm kõrgemal tegelikkusest või 0,1 mm madalamal. Sellega määratakse detaili lainelisus tegelikust pinnast. Reljeefi asemel võib tekkida palju lamedam või ümaram väliskuju.

## 5.2. Fuel3D Scanify

Scanify (Joonis 17) on hetkel üks parimaid lahendusi, mis turul saada on. Töö kvaliteet on hea ja hind võrreldes tulemustega on madal. Sellises hinnaklassis ei ole teist nii hea resolutsiooniga 3D skannerit. Peale selle on tegu väga kiire skanneriga. Aparaat töötab fotogramm-meetria süsteemil ja loob pildi vähem kui sekundiga, 0,1s jooksul. See annab võimaluse pildistada ka liikuvaid objekte, kui selleks vajadus on. [53]

Seadmega on võimalik skaneerida objekte ja seejärel vastavalt vajadusele mudelit kujundada, pärast järgneb 3D printimine. Samuti animatsioonide tegemiseks ja peale seda kuvamaks ekraanil. Scanify on suuteline väga hästi jäädvustama inimese nägu, tekstiili, taimi, kivehitisi, telliseid, saviskulptuure, puunikerdusi, ausambaid ja muid kõrgkvaliteediga pindasid. Toote täpsema kirjelduse leiab tabelist (Tabel 2). [53]



Joonis 17. Scanify [54]

Tabel 2

## Scanify tootekirjeldus [53]

| Tootekirjeldus                            |                                                                 |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Skaneerimise maht                         | 210x300 mm, 400 mm diagonaal, ühe mõõtmisega                    |
| Skaneerimise tehnoloogia                  | Fotogramm-meetria                                               |
| Töötamiskaugus                            | 350-450 mm                                                      |
| Skanneri mass                             | 0,51 kg                                                         |
| Skanneri mõõtmed                          | 255x245x35 mm                                                   |
| Valgusallikas                             | Xenon LED                                                       |
| Välgu laadimise aeg peale pilti           | 30 s                                                            |
| Ühest skaneerimisest saadud failide mahud | Stl: 32mb<br>Ply: 17mb<br>Obj: 72mb                             |
| Min. arvuti nõuded                        | 2 GB rammi, 1 GB kõvakettal vaba ruumi,<br>Dual-core protsessor |

### 5.3. EScan 3D scanner

EScan (Joonis 18) skaneerib kiiresti ja võimaldab mõistliku summa eest teha kvaliteetset pöördprojekteerimist. Tegu on täpse ning väga mobiilse seadmega, mis kaalub 2,4 kg. Täpsuse saavutamiseks kasutab eScan triangulatsiooni põhimõtet, kus kogu info läheb läbi laengsideustuseadise. Nii on teada iga punkti täpne asukoht ruumis. Punktipilve tegemisel ei ole positsioon oluline. EScaniga saab skaneerida horisontaalselt, kui ka vertikaalselt ja erineva nurga all skaneerimine ei sea takistusi skannerile. Tuleb kindlalt fikseerida või sobivasse rakisesse kinnitada. Lihtsaim, mugavaim ja kiireim oleks kasutada kolmjalg. Skanner, oma väga suure täpsusega, on mõeldud pöördprojekteerimiseks, animatsioonide tegemiseks, inspeksiooniks, disainimiseks, tööstuses kasutamiseks ja paljudesse teistesse valdkondadesse, kus mängib rolli mobiilsus ning resolutsioon. Lisaks on seadme kasutamine tehtud lihtsaks ja mugavaks. Punktipilve töötlemine ja CAD failiks tegemine käib mõne klõpsu vajutusega seadmega kaasa antavas programmis. Tavalisemad faililaiendid, mida teha saab on obj, stl, iges ja palju muud. Parim täpsus mis selle seadmega on võimalik lisavarustusega saada on 0,03 mm. Tavalise ehk standard versiooni täpsus on

0,05 mm ning optimaalne kaugus mõõdetavast objektist peab olema 170 mm. Mida kaugemale jääb objekt, seda ebatäpsemaks võib mõõtmine jääda. Näiteks 450 mm kaugusele jääva detaili mõõtmistäpsus võib langeda 0,12 mm-ni. Kuid see ei tähenda seda, et saab ainult väiksemaid detaile skaneerida. Tehes mitu erinevat skaneerimist ühest suuremast objektist, on võimalik need skannid omavahel ühildada ja luua lõpuks üks suur terviklik pilt. Tuleb meeles pidada, et skaneerides uut kohta objektile tuleb skaneerida ka vana osa, sest siis suudab programm sobitada kattuvad osad kokku ja tulemuseks saab justkui ühekordselt skaneeritud detaili. [55]

Toote ostmisel saab kaasa kõik vajaliku, mida läheb tarvis pöördprojekteerimiseks. Seadme, sellega kaasa tulevad tarkvarad, millega saab punktipilvi omavahel ühendada, töödelda ja sobivasse failiformaati luua. Vajadusel eelnevalt ka töödelda, et oleks 3D mudelina lihtsam edasi töötada. Loomulikult ka USB kaabli, mille saab arvutisse ühendada ja toiteseadme. Lisaks ühe aastane garantii. [55]



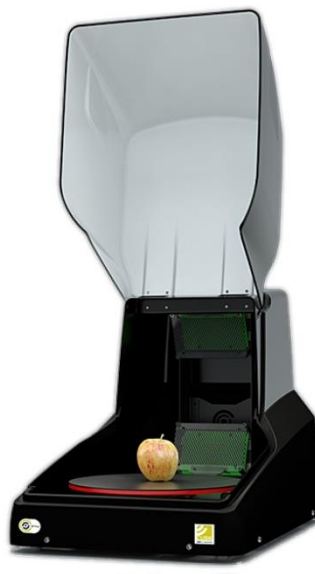
Joonis 18. eScan 3D [56]

#### 5.4. Cubik CADScan

Cubik (Joonis 19) on lihtne ning samas väga mugav skaneerimaks väikseid objekte. Skanneril on pöörlev alus ja detailist saab hõlpsasti 360 kraadise mudeli. Tuleb lihtsalt detail asetada alusele ja arvutist programm tööle panna ning minutitega on punktipilv olemas. Peale seda on võimalik saadud infot koheselt kasutada CNC pingis, 3D printeris või CAD programmis edasi töötlemiseks. [57]

Suurim objekt mida Cubik skanneriga skaneerida saab on 200 mm kõrge ja diagonaal on 220 mm. Suurim lubatud kaal alusel on 4 kg. Valgusallikana kasutab LED'e, mis on silmale ohutud. Resolutsioon ja mõõtetäpsus jäävad 0,05-0,15 mm vahele. Sõltub, kui suure täpsusega skaneerima pannakse. See omakorda mõjutab skaneerimisele kuluvat aega ja lõpuks faili suurust. Seadet saab ühildada kõigi operatsioonisüsteemidega. Enimkasutatavad faililaiendid CAD programmideks, mida Cubik teeb on stl, obj, ply. Nagu ikka, saab skannerit arvutiga ühendada USB'ga. [57]

Seadme miinuseks on see, et ta ei ole väga mitmekülgne. Tänu oma pöörlevale alusele ja macrovõttele on skaneerimise tulemus hea. Kuid saab ainult väiksemaid asju skaneerida näiteks mudelautost kuni jalgpalli suuruste detailideni. Arvestades aga seadme hinda ja töö tulemust, siis on saavutused märkimisväärsed. Samasuguse mõõtmistäpsusega skannerid on mitu korda kallimad kui Cubik. Peale selle on tegu väga lihtsasti kasutatava seadmega, mis teeb automaatselt ise enamuse tööst ära ja inimesel jääb üle vaid kontrollida ning vajadusel pisut parandada tulemust. [57]



Joonis 19. Cubik [58]

## 5.5. NextEngine

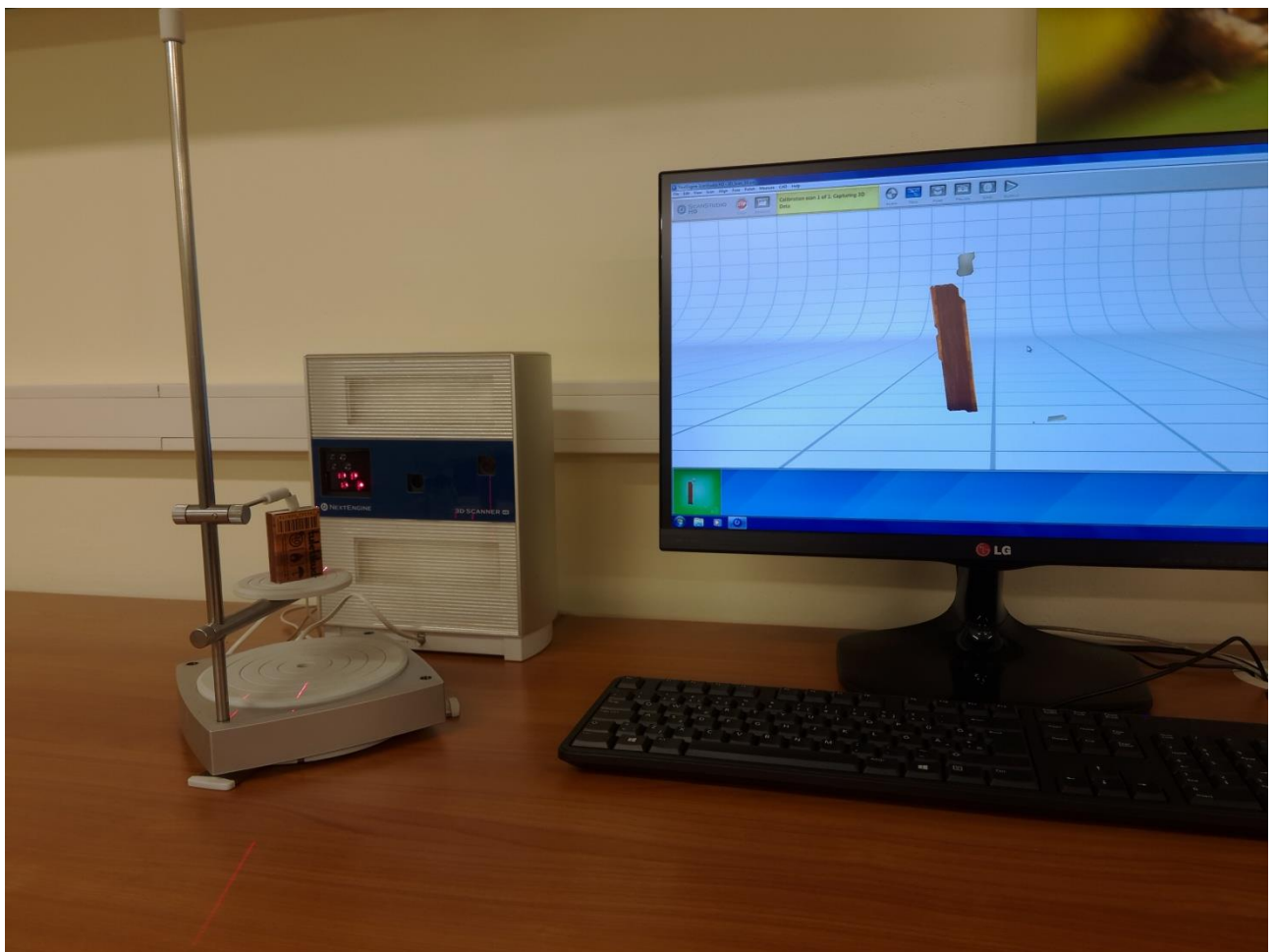
NextEngine (Joonis 20) skaneerib detaile mitme laseri abil, kuskil 50 000 punkti sekundis. Tulemused on kiired ja digitaalselt saadakse värviline detail. Seade võimaldab teha pöördprojekteerimist, kasutada disainimise otstarbeks, luua animatsioone. Peale skaneerimist saadakse värviline geomeetiline kujund, mis on väga täpne algsele objektile. Seejärel tuleb eemaldada üleliigne sodi, täita augud, kui on, ning seejärel saab salvestada faili sobivasse formaati ja alustada modelleerimisega. Programmis nimega Rapidworks, saab faili edasi töödelda. Paari klõpsuga tuvastab programm kõikvõimalikud geomeetrilised kujundid punkt pilvest, mis teeb kogu töö lihtsamaks. Kujunditele tuleb anda tahke vorm ja ongi 3D mudel valmis. [59]

NextEngine suudab jäädvustada, mida paljud tippklassi skannerid ei suuda. Rikkaliku ja täpse värvisalvestuse iga pealispinna punktist. Tänu sellele, et seade on optiliselt sünkroonis, ei esine moonutusi värvide ja geomeetria vahel. Igal NextEngine skanneril on sisse ehitatud ruumiliselt

mitmekülgne ning hajuva valgustusega valgus, mis saavutab varjudevaba pildi. Need valgustused on niimoodi seadistatud, et tagada lai värvide spekter suurepärase värvide jäädvustamiseks.

NextEngine skanner on piisavalt väike, et seda oma töölaua hoida. Seadet on võimalik kiiresti tööle panna ja skaneerima asuda. Parim koht skanneri hoidmiseks ongi enda lähedal, sest kes teab millal tuleb mingi hea mõtte pähe ja on vaja skaneerima asuda. NextEngine on mõeldud kasutamiseks tavalises ruumis, kus on kontorivalgus ja segavate objektidega taust. Skaneerimiseks ei pea olema pimiku võimalus ega kindlat tüüpi tagasein. Lisaks on skannerile antud hea väljanägemine. Välimist osa katab alumiiniumi sulam ja polükarbonaad.

Kasutamaks NextEngine skannerit ja programme peab arvutil olema vähemalt 2 Ghz dual-core protsessor, 3 GB RAM'i, 256 MB graafikakaart, mis toetab OpenGL(Ingl k. *Open Graphics Library*)'i ja operatsioonisüsteemiks Windows xp või uuem versioon. Soovituslikult võiks olla protsessoriks quad-core, 4 GB RAM'i või enam, 512 MB graafikakaart. Tavaliseks faili suuruseks peale skaneerimist on 20 MB, mida on vajadusel võimalik lihtsasti transportida.



Joonis 20. NextEngine

## 5.6. Nikon ModelMaker MMDx

Nikon 3D skanner (Joonis 21) on mõeldud mõõtmistulemuste kontrollimiseks ja pöördprojekteerimiseks. Seadme kaamera tehnoloogia on suur edasimineku skaneerimise osas. Kaadrisagedus on kõrge, kuni 150 Hz ja laserjoone laius kuni 200 mm. Tänu laiale skaneerimise ulatusele on võimalik korraga suuremat osa ja kiiremini objekte ülesse võtta. Nikoni mõõtetäpsus on parem kui 0,01 mm ja tänu heale resolutsioonile loob digitaalselt sarnase koopia. Kuna ModelMaker kasutab skaneerimiseks laserit, siis on ta suurepärane tööriist ülesse võtmaks pehmeid ja hapraid materjale. Puudub igasugune risk objekti pinda kahjustada või saada valesi mõõtmistulemusi. Kontaktipõhise skanneriga võib pehme materjali korral mõõtmisotsaku materjali sisse suruda ja nii on pind rikutud ja mõõtmistulemus vale. [60]

ModelMaker MMDx laserskannerit on võimalik kasutada liigendiga robotkäe küljes. Robotkäed on kontaktipõhise skaneerimise eesmärgiga. Üleüldiselt ühildub MMDx väga paljude erinevate robotseadeldistega. Lisaks stabiilsele liigendkäele võib Nikon skanneri ühendada ka otsejuhtmega arvutisse. Peale laialdasele kasutamisevõimalusele teiste seadmetega on skanneril kolmanda põlvkonna parema toimimise versioon, mis võimaldab skaneerida töötlemata lehtmetalli, kui ka lõpetatud toodet, millel on värv peal. Seda kõike ilma inimese abikäeta, pole vaja pealispinda kindla pihustusainega ega pulbriga katta. [60]

Seadme plussideks on tema kiirus, täpsus ja automaatne kasutamine ning võimalus näha kuvatud informatsiooni arvuti ekraanil. See annab võimaluse üle skaneerida neid kohti, mis jäid skaneerimata. Negatiivseks küljeks on kõrge hind ja parimate tulemuste saavutamiseks peab olema lisavarustus ehk robotkäsi. [60]



Joonis 21. ModelMaker [61]

### 5.7. Steinbichler Comet L3D 5MP

Comet L3D (Joonis 22) kasutab sinist LED valgust, mis võimaldab igas valgustingimuses skaneerida. LED'i eluiga on väga pikk ja valgustugevus suur. Tänu heale valgusele saab skaneerida ka pimedamates oludes ja mõõtmistäpsus jääb seejuures heaks. Ehk saab täpselt mõõta erinevaid nurgatagusi ja sügavamaid avasi. Sensor on 5 MP, mis tagab suurepärase resolutsiooni. Seepärast on tegu väga hea valikuga, kui soovitakse saada täpseid töötulemusi. Lähima mõõtmiskaugusega, 45 mm läätsega, saab skaneerida objekti mõõtmetega kuni 45x38x30 mm. Suuremate objektide skaneerimiseks peab olema suuremad läätsed, vastasel juhul saab ainult väiksemaid objekte skaneerida. [62]

Comet skanneri saab tööle minutitega. Seadet on mugav ja lihtne kasutada. Kuna skanner on kolmjala otsas, siis saab skaneerida ka kõige kitsamates ja ebamugavamates tingimustes. Seda ainult siis kui seadet on võimalik taolises olukorras püsti seada. Lisaks on võimalus skaneerida lähemaid ja kaugemaid objekte. Selleks on vaja vahetada läätsesi ning see on sama lihtne kui peegelkaameral. [62]

Seadme negatiivseks küljeks on see, et peab olema kolmjala või mõne teise fikseeritud seadme küljes. Positiivseks omaduseks on tema lihtne kasutatavus ja on kergesti õpitav. Läheb tööle väga kiiresti ja skaneerib täpselt ning väikseima ajakuluga. Kaasa saab spetsiaalse tarkvara, kus saab

lasta teha kõiki asju automaatselt või vajadusel manuaalselt. Määrata raskuskeset või luua sobiv formaat CAD programmi jaoks. [62]



Joonis 22. Comet L3D [63]

## 5.8. Creaform HandySCAN 700

CreaForm'i HandySCAN (Joonis 23) on väga mobiilne ja võrdlemisi hea mõõtmistäpsusega. Sobilik on ta ennekõike pöördprojekteerimiseks ja tootearenduseks professionaalsel tasemel. Skanneriga on võimalik ülesse võtta suuremaid ja väiksemaid objekte, kuid ei ole soovituslik mõõta alla 100 mm detaile. CreaForm'i toodete plussiks on see, et nad ei vaja kolmjalgu ega muid abivahendeid, mis fikseeriksid skanneri ja võimaldaks seeläbi paremaid mõõtmistulemusi. Tänu optilistele sensoritele, mis HandySCAN'l on, saab skaneerimise ajal skaneeritavat objekti liigutada ja see ei sega mõõtmistulemusi. Seade kasutab triangulatsiooni põhimõtet ning seeläbi on seade ise kõige keskmeks. Mistõttu objekti liigutamine ei muudagi skaneerimise kvaliteeti. [64]

Oma väikse massi ja gabariitidega on tegu väga mugavalt käsitletava seadmega. HandySCAN kaalub vähem kui 1 kg. Seega käsi ei väsi tööd tehes väga ruttu ära, sest kui tegu oleks raske skanneriga, siis ei jaksaks suuri objekte skaneerida. Seetõttu on lihtne töötada ka piiratud ligipääsuga kohtades, kus oleks vaja teha skaneerimist. Näiteks on hoonesse vaja uut gaasi-, vee- või ventilatsiooni toru, kuid ei tea mis läbimõõduga või kustkaudu oleks kõige otstarbekam seda

tuua, sest hoones on teisigi torusüsteeme. Peale mudeli loomist on võimalik arvutist välja uurida kustkaudu oleks kõige mõttekam torusi panna ning milliseid toruläbimõõte saab kasutada. [64]



Joonis 23. HandySCAN [65]

## 5.9. Võrdlus

Järgnevalt tuuakse välja tabel (Tabel 3), kus on välja toodud erinevad 3D skannerid ja nende põhiparameetrid. Resolutsioon, punktide mõõtmistäpsus, seadme gabariidid, mass ja kasutamisevõimalus.

Tabel 3

3D skannerid [66]

| Toode               | Resolutsioon,<br>mm | Mõõtmistäpsus,<br>mm | Kasutamisevõimalus | Mass,<br>kg | Hind,<br>€ | Mõõdud,<br>mm |
|---------------------|---------------------|----------------------|--------------------|-------------|------------|---------------|
| Fuel3D Scanify      | 0,35                | 0,3                  | Kaasaskantav       | 0,51        | 1 370      | 245x350x255   |
| eScan 3D<br>scanner | 0,05                | 0,06                 | Kaasaskantav       | 2,4         | 7 200      | 225x200x100   |
| NexEngine           | 0,2                 | 0,1                  | Lauaversioon       | 3,2         | 2 670      | 229x102x280   |
| Cubik 3D<br>scanner | 0,05                | 0,05                 | Lauaversioon       | -           | 1 350      | 510x340x335   |
| Nikon               | -                   | Kuni 0,007           | Kaasaskantav       | 0,4         | 38 840     | 180x75x138    |

| Toode                            | Resolutsioon,<br>mm | Mõõtmistäpsus,<br>mm | Kasutamisevõimalus | Mass,<br>kg | Hind,<br>€ | Mõõdud,<br>mm |
|----------------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|-------------|------------|---------------|
| ModelMaker<br>MMDx               |                     |                      |                    |             |            |               |
| Steinbichler<br>Comet L3D<br>5MP | 0,018               | -                    | Kaasaskantav       | 7           | 63 250     | -             |
| Creaform<br>HandySCAN<br>700     | 0,05                | 0,03                 | Kaasaskantav       | 0,85        | 50 760     | 122x77x294    |

## 5.10. Hinna ja kvaliteedi suhe

3D skannereid on palju ja väga erinevate parameetritega. Iga kasutaja peaks endale sobiva seadme leidma. Nii hinnaklassi, kui ka täpsuse osas. Esmane valik sõltubki väga palju just neist kahest näitajast. Kõigepealt on vaja endale selgeks teha mis on skanneri eesmärk, mida ja milleks sellega teha tahetakse. Seejärel hakkab suurt rolli mängima seadme hind.

Tallinna Tehnikakõrgkooli mehaanikateaduskonna tudengid tegelevad täppistööga. Valmistatud detailide mõõtmed peavad olema piirnormides ja mõõteseadmed piisavalt täpsed, et neid piirnorme mõõta. Ehituses on maksimaalne lubatud eksimus 1 mm, masinaehituses nii suur kõikumine ei ole lubatud. Seepärast tasuks 3D skanneri puhul vaadata suurema mõõtmistäpsusega seadmeid. Mida väiksem on eksimus, seda täpsemate gabariitide mõõtmega detaili saab digitaalselt. See annab võimaluse teha pöördprojekteerimist, prototüüpimist, parendamist ja erinevate pingekohtade leidmist palju täpsemalt.

Kolm viimast skannerit (Tabel 3) ModelMaker, Comet L3D ja HandySCAN on sobivad nii õppetööks kui ka professionaalseks kasutamiseks. Neid on lihtne tööle seada ja väga automaatsed. See tähendab seda, et seadmetega on väga lihtne ümber käia. Vajuta, skaneeri ja prindi välja skaneeritud detail. Seadmete kasutamine on tehtud nii lihtsaks kui vähegi võimalik, ent samas on jäetud võimalus kasutajal muuta ja seadistada kõike, kui selleks on vajadust ning piisavalt oskust. Lisaks tegu on kaasaskantavate skanneritega, mis teeb neist väga mobiilsed seadmed. Annab võimaluse neid kiiresti ja kergesti ühest kohast teise liigutada ning võimalikult väikese ajakuluga on võimalik skannereid tööle seada ja alustada skaneerimist.

Hind on neil kolmel seadmel päris kõrge, kuid ei tohi unustada, et selle raha eest saab korralikud kaasaskantavad skannerid. Kasutatavad programmid on lihtsad ning skaneerimine toimub kiiresti. Mõõtetäpsused on neil seadmetel väga head. Üldjuhul on lauaversioonid parima täpsusega, sest nad on fikseeritud ning kindlalt ühes kohas paigal. Kaasaskantavate skanneritega saab aga mugavalt ülesse võtta objekte ja neid liigutamata. Lisaks on nad väikeste mõõtmetega ning väga kerged, alla ühe kilogrammi.

Tallinna Tehnikakõrgkoolile oleks sobivaks kasutamiseks Nikon ModelMaker MDDx või Creaform HandySCAN 700. Nikon on poole kergem kui Creaformi mudel. Lisaks on mõõtmistäpsus märgatavamalt parem ning seadme enda mõõtmed on pisut väiksemad. Peale selle on ta ka hinna poolest soodsam. Creaformi kasuks räägib aga väga kiire skaneerimine. Objekti skaneerimine kuvatakse samaaegselt arvutis ja on võimalik kergesti märgata, mis koht jäi skaneerimata. Teiseks plussiks on võimalus ühekordse skaneerimisega ülesse võtta väga suuri esemeid, näiteks terve auto kere.

## KOKKUVÕTE

Lõputöö "3D skanneri juurutamise võimalused Tallinna Tehnikakõrgkooli mõõtetehnika laboris" eesmärk oli uurida 3D skannereid, anda informatsiooni nende võimalikest kasutusala-dest ja soovitada sobivat seadet Tallinna Tehnikakõrgkooli mõõtetehnika laborisse. Ülevaate saamiseks tuli välja tuua parameetrid, millega on võimalik skannereid omavahel võrrelda, ning uurida, milliseid tarkvarasid on tarvis 3D mudelite loomiseks.

Lõputöö esimene osa käsitleb mitmesuguseid 3D skannerite mudeleid. Lähemalt kirjeldatakse seadmete tööpõhimõtteid ja parameetreid; selgitatakse, mis vahe on aktiiv- ja passiivskanneritel ning millised näitajad mõjutavad seadmete töö kvaliteeti. Lisaks tuuakse välja skannerite kasutamisvaldkonnad. Näiteks meelelahutusäris annab 3D skanner võimaluse luua madalama eelarvega eriefekte, arheoloogias aga saab digitaalselt salvestada ajaloolisi esemeid ja talletada vajalikku informatsiooni mõne tuleviku restaureerimistöö tarbeks. Samuti leiab 3D skannerile laialdast kasutust tööstuses: kvaliteedi kontrolli puhul saab mõõta detailide gabariite ja välja selgitada deformatsiooni kohti; pöördprojekteerimise korral annab skaneering detaili täpsete mõõtmetega digitaalse koopia ja see võimaldab eset CAD programmi abil täiustada.

Teises osas antakse ülevaade 3D skaneerimise teenust pakkuvatest firmadest Eestis: iseloomustatakse firmat ja tuuakse välja ettevõtte peamised tegevusalad. Lisaks kirjeldatakse, millise tehnoloogiaga skannereid (enamasti aktiivskannereid) need firmad kasutavad ning millistele sihtrühmadele nende teenused on suunatud (peamiselt tööstusele ja avalikule sektorile). Peale selle loetletakse, milliseid 3D skaneerimise teenuseid Eestis üldse pakutakse, alustades hoonete mõõtmisest ja lõpetades hambaproteeside valmistamisega.

Viimases osas on vaatluse all mitu erinevat 3D skannerit. Peatükis kirjeldatakse nende skannerite häid ja halbu külgi, selgitatakse erinevaid parameetreid ning loetletakse skannerite kasutusvõimalusi. Teada saab ka seda, kas tegu on tavakasutajale või tööstusettevõttele sobiliku seadmega. Tabelis on märgitud skannerite resolutsioon, mõõtmistäpsus ja hind - see annab hea ülevaate töös käsitletud seadmetest. Lisaks on eraldi koondtabelis välja toodud üheksa erinevat tarkvaraprogrammi, millega saab punktipilvest teha sobiva faili ja CAD programmis edasi töötada.

Kuna Tallinna Tehnikakõrgkooli mõõtetehnika laborisse sobivale skannerile olid eelduseks võimalikult punktuaalne mõõtmistäpsus (umbkaudu 0,01 mm) ja portatiivsus, et seadet oleks võimalik kaasas kanda, siis lõpetuseks soovitataksegi laborisse kahte skannerit: Nikon ModelMaker MMDx ja Creaform HandySCAN 700. Mõlemad nimetatud seadmed peaks oma mõõtmiselt olema pigem väiksemad kui suuremad, kuid piisavad, et skanneriga oleks mugav ümber käia ja see oleks sobilik laboris kasutamiseks.

## SUMMARY

The goal of the current thesis „Possibilities of Introducing the 3D Scanner into the Measurement Technique Laboratory at TTK University of Applied Sciences“ was to investigate 3D scanners available in Estonia, give information on possible areas of their application and give a recommendation to the Measurement Technique Laboratory at TTK University of Applied Sciences on the scanner which could be suitable in the laboratory. For better overview comparative parameters of scanners and software for 3D model creation had to be explored.

The first part of the thesis handles the models of different 3D scanners. Working principles and parameters of the scanners were described in detail, the difference between active and passive scanners and which indicators influence the quality of the work of the scanner were explained. Additionally areas of application of the scanners were given: for example in the show business the 3D scanner gives the possibility for a lower budget to create special effects, in archaeology historical articles can be scanned digitally and information can be preserved for future restoration works. 3D scanners are also widely used in the industry: parameters of details can be measured for quality control and deformation spots can be found out; in case of the reverse engineering the scan gives the accurate digital copy of the detail with exact measurements and this enables to improve the detail by using the CAD programme.

In the second part of the thesis the overview of Estonian companies providing 3D scanning services was given: the characteristics and main fields of activities of those companies were brought out. Also the used technologies of the scanners (mainly active-scanners) and addressed target groups (primarily industry and public sector) were described. Besides, all 3D services provided in Estonia are listed in this chapter: starting with measuring buildings and coming down to creating dentures.

The last part of the thesis gives the results of the comparison of some 3D scanners: positive and negative sides of the scanners were described, different parameters were explained and areas of their application were listed. From this chapter one can also learn if the scanner is suitable for ordinary user or for an industrial enterprise. The table with resolutions, measuring accuracies and prices of the scanners gives the perfect overview of the appliances compared. Additionally the

separate consolidated table consists of nine different software programmes which enable to create a suitable file from the point cloud and process this further in the CAD programme.

As main expectations to the scanner suitable for the Measurement Technique Laboratory at TTK University of Applied Sciences were best possible accuracy (measuring accuracy approx. 0,01 mm) and portability – easy to take the scanner along, the two following scanners were recommended at the end: Nikon ModelMaker MMDx ja Creaform HandySCAN 700. Both appliances are rather smaller than bigger on the measurements but sufficient for comfortable handling and appropriate for using in the laboratory.

## VIIDATUD ALLIKAD

- [1] „eki,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.eki.ee/dict/qs/index.cgi?Q=scanner&F=M>. [Kasutatud 22. märts, 2015].
- [2] „laserdesign,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.laserdesign.com/what-is-3d-scanning>. [Kasutatud 22. märts, 2015].
- [3] „sokeeritud,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.sokeeritud.info/r/cmejnlyt610mof8w.html>. [Kasutatud 03. aprill, 2015].
- [4] G. Borenstein, Making Things See, Sebastopol: O'Reilly Media, 2012.
- [5] „artescan,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://artescan.net/blog/3-d-laser-scanner-history/>. [Kasutatud 22. märts, 2015].
- [6] „Geogrupp,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.geogrupp.ee/laserskaneerimine>. [Kasutatud 12. aprill, 2015].
- [7] „Shaperize,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://shaperize.com/teenus-3d-skanneerimine/>. [Kasutatud 24. märts, 2015].
- [8] „Adafruit,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://blog.adafruit.com/2014/04/10/handheld-3d-scanning-with-the-sense-comes-to-the-mac-3dthursday-3dprinting-3dscanning/>. [Kasutatud 24. märts, 2015].
- [9] „3dprintingindustry,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/history/>. [Kasutatud 22. märts, 2015].
- [10] A. AOTÄHT, „Kallis aparaat prindib kolmemõõtmeliselt,“ *Sakala*, kd. 11, p. 5, 2011.
- [11] „loreti,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.loreti.it/Download/PDF/Scanner/faq.pdf>. [Kasutatud 02. mai, 2015].
- [12] M. Koch, „googleBook,“ 2012. [Võrgumaterjal]. Available: <https://books.google.ee/books?id=uvgFBwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=et#v=onepage&q&f=false>. [Kasutatud 05. aprill, 2015].
- [13] „Kontakt,“ [Võrgumaterjal]. Available: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bf/9.12.17\\_Coordinate\\_measuring\\_machine.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bf/9.12.17_Coordinate_measuring_machine.png). [Kasutatud 05. aprill, 2015].
- [14] D. Cantor ja B. Jones, WebGL Beginner's Guide, Birmingham: Packt Publishing Ltd., 2012, pp. 59-103.
- [15] „Triangulatsioon,“ [Võrgumaterjal]. Available: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/24/Laserprofilometer\\_EN.svg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/24/Laserprofilometer_EN.svg). [Kasutatud 05. aprill, 2015].
- [16] „Vallaste,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.vallaste.ee/index.htm?Type=UserId&otsing=828>. [Kasutatud 08. aprill, 2015].
- [17] „Entsüklopeedia,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://entsyklopeedia.ee/artikkel/ccd-seade>. [Kasutatud 08. aprill, 2015].

- [18] „gppluslabs,“ [Võrgumaterjal]. Available: [http://qppluslabs.com/sites/default/files/CnPb\\_Bro.pdf](http://qppluslabs.com/sites/default/files/CnPb_Bro.pdf). [Kasutatud 21 aprill, 2015].
- [19] [Võrgumaterjal]. Available: [http://spie.org/samples/firstpage/psisdg/5972/597202\\_sample.pdf](http://spie.org/samples/firstpage/psisdg/5972/597202_sample.pdf). [Kasutatud 18. aprill, 2015].
- [20] E. Läkk, „Tootedisaineri töö peenmehaanika ja olemise jaatus,“ *Sirp*, kd. 4, p. 14, 2011.
- [21] V. Valk, „Sümbioos, sünergia, sünkroniseerimine:kohaneda ja omaks võtta,“ *Sirp*, kd. 11, pp. 22-23, 2012.
- [22] „Servorobot,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://servorobot.com/manufacturing-solutions/portable-inspection/>. [Kasutatud 25. aprill, 2015].
- [23] „Forte,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://forte.delfi.ee/news/teadus/vedrukaelne-3d-skanner-kaardistas-pisa-torni-20-minutiga?id=66782355>. [Kasutatud 03. aprill, 2015].
- [24] „Forte\_CyArk,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://forte.delfi.ee/news/digi/3d-skaneerimine-muudab-maailmaparandi-igaveseks?id=50546275>. [Kasutatud 12. aprill, 2015].
- [25] „Pisatorn,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://topnews.net.nz/data/3D-mapped-interior-Leaning-Tower-of-Pisa.jpg>. [Kasutatud 08. aprill, 2015].
- [26] „imelineteadus,“ [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.imelineteadus.ee/article/2011/7/27/3d\\_skaneerimine\\_muudab\\_maailmaparandi\\_iga\\_veseks](http://www.imelineteadus.ee/article/2011/7/27/3d_skaneerimine_muudab_maailmaparandi_iga_veseks). [Kasutatud 25. aprill, 2015].
- [27] „CyArk\_pic,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.cyark.org/projects/royal-tombs-at-kasubi/overview>. [Kasutatud 12 aprill, 2015].
- [28] F. R. O. Instituut, „Uus skanner salvestab kolmemõõtmeliselt,“ *Tarkade Klubi*, kd. 7, p. 74, 2008.
- [29] E. Rohtla, „Valu alaseljas saab alguse lääpa tallatud kingadest,“ *60+*, kd. 5, pp. 17-23, 2014.
- [30] „Kas tehnoloogia seljatab hambutuse?,“ *Hambaleht*, kd. 9, p. 2, 2014.
- [31] „OpenBionics,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.openbionics.com/world-first-for-3d-printing-and-bionics/>. [Kasutatud 23. aprill, 2015].
- [32] S. SOMMER-KALDA3, „Teadlaste öö muutub järjest populaarsemaks,“ *Põhjarannik*, kd. 10, p. 1, 2012.
- [33] „Amper-engineering,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://baltinfo.ee/koduleht/amper-engineering-ou-14523>. [Kasutatud 24. märts, 2015].
- [34] „shaperize,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://shaperize.com/>. [Kasutatud 28. märts, 2015].
- [35] „AmperEngineering,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.3dscan.ee/>. [Kasutatud 06 aprill, 2015].
- [36] „Wolfprint,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.wolfprint3d.ee/et/>. [Kasutatud 07. aprill, 2015].
- [37] „Geodeesia24,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://geodeesia24.ee/laserskaneerimine/>. [Kasutatud 12. aprill, 2015].
- [38] „Smcproject,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://smcproject.org.ee/documents/2012/11/3d-dokumenteering.pdf>. [Kasutatud 12 aprill, 2015].
- [39] „zone,“ [Võrgumaterjal]. Available: [http://web.zone.ee/metallityy/MARKIMINEMOOTMINE/markiminemootmine\\_2.html](http://web.zone.ee/metallityy/MARKIMINEMOOTMINE/markiminemootmine_2.html). [Kasutatud 21. aprill, 2015].
- [40] „HugePlanet,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://huge.planet.ee/ttu/materjalid/fyysika1/yldmootmised.htm>. [Kasutatud 21. aprill, 2015].
- [41] „Moodle,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://ekool.tktk.ee/course/view.php?id=88>. [Kasutatud

21. aprill, 2015].
- [42] „hariduskeskus,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.hariduskeskus.ee/opiobjektid/masinaelemendid/?download=Tolerantsid%20ja%20tehniline%20m%F5%F5tmine..pdf>. [Kasutatud 21. aprill, 2015].
  - [43] H. Herranen, „Detailid arvutisse skänneri abiga,“ *Inseneeria*, kd. 4, pp. 32-33, 2009.
  - [44] M. P. LEO SIIMAN, „3D-tehnoloogia abil haridusele uus nägu,“ *Sirp*, kd. 8, p. 33, 2014.
  - [45] „Human-Solution,“ [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.human-solutions.com/fashion/front\\_content.php?idcat=141&lang=7](http://www.human-solutions.com/fashion/front_content.php?idcat=141&lang=7). [Kasutatud 25. aprill, 2015].
  - [46] „Bromorom,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.brrom.ro/shop/bodyscanning/body-scanner/>. [Kasutatud 25. aprill, 2015].
  - [47] „Dirdim,“ [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.dirdim.com/lm\\_everything.htm](http://www.dirdim.com/lm_everything.htm). [Kasutatud 26. aprill, 2015].
  - [48] „Dirdim2,“ [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.dirdim.com/prod\\_software.htm](http://www.dirdim.com/prod_software.htm). [Kasutatud 26. aprill, 2015].
  - [49] „Blender,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.blender.org/download/requirements/>. [Kasutatud 26. aprill, 2015].
  - [50] „3dscanco,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.3dscanco.com/about/3d-scanning/glossary.cfm>. [Kasutatud 26. aprill, 2015].
  - [51] „digitalcorp,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.3ddigitalcorp.com/applications/manufacturing>. [Kasutatud 26. aprill, 2015].
  - [52] „lagoa,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://home.lagoa.com/2014/04/whats-the-right-3d-scanner-for-you/>. [Kasutatud 26. aprill, 2015].
  - [53] „Scanify,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.fuel-3d.com/product/>. [Kasutatud 26. aprill, 2015].
  - [54] „geeky\_scanify,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.geeky-gadgets.com/wp-content/uploads/2015/01/Fuel3D-3D-Scanner.jpg>. [Kasutatud 26. aprill, 2015].
  - [55] „eScan corp,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.b3-d.com/escan.html>. [Kasutatud 29. aprill, 2015].
  - [56] „eScan\_pic,“ [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.b3-d.com/image/84901619\\_scaled\\_256x124.jpg](http://www.b3-d.com/image/84901619_scaled_256x124.jpg). [Kasutatud 26. aprill, 2015].
  - [57] „Cubik,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://cad-scan.co.uk/product/cubik-desktop-3d-scanner/>. [Kasutatud 30. aprill, 2015].
  - [58] „Cubik\_pic,“ [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.3d-printerstore.ch/images/product\\_images/popup\\_images/123\\_0.jpg](http://www.3d-printerstore.ch/images/product_images/popup_images/123_0.jpg). [Kasutatud 30. aprill, 2015].
  - [59] „NextEngine,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.nextengine.com/>. [Kasutatud 30. aprill, 2015].
  - [60] „Nikon\_MMDx,“ [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.nikonmetrology.com/en\\_EU/Products/Laser-Scanning/Handheld-scanning/ModelMaker-MMDx](http://www.nikonmetrology.com/en_EU/Products/Laser-Scanning/Handheld-scanning/ModelMaker-MMDx). [Kasutatud 09. mai, 2015].
  - [61] „Nikon\_pic,“ [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.nikon.com/products/instruments/lineup/industrial/3d\\_metrology/portable\\_arms/mcax/img/pic\\_03.jpg](http://www.nikon.com/products/instruments/lineup/industrial/3d_metrology/portable_arms/mcax/img/pic_03.jpg). [Kasutatud 09. mai, 2015].
  - [62] „Comet L3D,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.steinbichler.com/products/3d-scanning/comet-l3d>. [Kasutatud 10. mai, 2015].
  - [63] „Comet\_pic,“ [Võrgumaterjal]. Available:

- <http://www.sableengineering.com/images/eng/scanner/comet.jpg>. [Kasutatud 10. mai, 2015].
- [64] „CreaForm\_Handyscan,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.creaform3d.com/en/metrology-solutions/portable-3d-scanner-handyscan-3d>. [Kasutatud 10. mai, 2015].
- [65] „CreaForm\_pic,“ [Võrgumaterjal]. Available: [http://ireviews.com/wp-content/uploads/2014/09/Creaform\\_HandySCAN\\_700.png](http://ireviews.com/wp-content/uploads/2014/09/Creaform_HandySCAN_700.png). [Kasutatud 10. mai, 2015].
- [66] „Aniwaa,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.aniwaa.com/3d-scanners/compare-3d-scanners/>. [Kasutatud 10. mai, 2015].
- [67] „3dmina,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.3dmina.com/>. [Kasutatud 12. aprill, 2015].

