



ROKASGRĀMATA
3D UN MŪSDIENU
TEHNOLOĢIJAS KULTŪRAS
MANTOJUMA SAGLABĀŠANĀ
UN PĀRVALDĪBĀ

ROKASGRĀMATA

3D UN MŪSDIENU
TEHNOLOĢIJAS KULTŪRAS
MANTOJUMA SAGLABĀŠANĀ
UN PĀRVALDĪBĀ



2025

Redaktors: Jānis Heinsbergs

Projekta vadītāji: Baiba Brice, *Vegard Berggård* (Vegards Berggords)

Māksliniece: Līga Lastovska

Korektūra: SIA "Idea Media"

Tulkojums: SIA "Skrivanek Baltic"

Tekstu autori: *Hanna Geiran* (Hanna Geirana), Juris Dambis, *Kristian Løseth* (Kristians Lesets), Simona Čevere, Jānis Heinsbergs, Māris Kaļinka, Artjoms Zelenkevičs, Kaspars Markus Molls, Jānis Meinerts, Artūrs Lapiņš, *Lene Buskoven* (Lēne Buskoven), *Øyvind Ødegård* (Eivins Ēdegors), *Eleni Diamanti* (Eleni Diamanti), *Unn Eide* (Unna Eide), *Stig Storheil* (Stīgs Stūrheils), *Åsne Dolve Meyer* (Osne Dolve Meijere), *Dag Endre Opedal* (Dāgs Endre Opedals), *Markus Sebastian Bakken Storeide* (Markuss Sebastians Bakens Stūreide), *Jon Yngve Hardeberg* (Juns Ingve Hardebergs)

Vāka foto no Adobe stock



© Nacionālā kultūras mantojuma pārvalde, 2025

© Tekstu autori

Iespiests: SIA "JELGAVAS TIPOGRĀFIJA"

SATURS

7	Priekšvārds
8	Rokasgrāmatas mērķis un uzdevumi
9	Atskats kultūrvēsturiskā mantojuma uzmērīšanā
13	Līdzšinējā 3D jaunāko tehnoloģiju izmantošanas pieredze kultūras mantojuma pārvaldībā un izpētē Norvēģijā un Latvijā
24	Kultūrvēsturiskā mantojuma veidi un uzmērīšanas iespēju klasifikācija
37	Modernās uzmērīšanas metodes un tehnoloģijas
79	Droša datu uzglabāšana ilgtermiņā
82	NORVĒĢIJAS UN LATVIJAS SPECIFISKĀ PIEREDZE MODERNO TEHNOLOĢIJU PIELIETOŠANĀ
82	LIDAR dati arheoloģiskā mantojuma pārvaldībā un izpētē
87	3D skenēšana industriālā mantojuma pārvaldībā un izpētē
93	3D dati arhitektūras objektu un to elementu izpētē un pārvaldībā
96	Kuģa vraka 3D fotogrammetriskā dokumentācija Arktikā
101	Precīza mākslas priekšmetu dokumentēšana laboratorijā un uz vietas
105	Pēcvārds
106	Datu aplūkošanas programmatūra
108	Terminu saraksts

Hanna Geiran, Norvēģijas kultūras mantojuma pārvaldes vadītāja

Dokumentācija ir kultūras mantojuma pārvaldības un izpētes stūrakmens, un jaunās tehnoloģijas piedāvā arvien efektīvākus un sarežģītākus veidus, kā dokumentēt un iepazīt kultūras mantojumu. Šāda attīstība paver fantastiskas iespējas, taču vienlaikus rada arī vairākus izaicinājumus. Izvēlēties pareizo tehnoloģiju noteiktam uzdevumam var būt sarežģīti, un ir jāapzinās datu vākšanas mērķis.

Dokumentācija ir priekšnoteikums kultūras mantojuma pārvaldībai un saglabāšanai. Objektus, ēkas un vietas var apdraudēt, piemēram, klimata pārmaiņas, nekontrolēta urbanizācija, bruņoti konflikti un vispārējs nolietojums laika gaitā. Dokumentācija kalpo kā drošības līdzeklis, nodrošinot, ka zināšanas par kultūras mantojumu ir pieejamas arī nākotnes zinātniekiem un kopienām. Digitālie ieraksti un fotoarhīvi ir ļoti svarīgi un ļauj izveidot visaptverošu kultūras mantojuma krātuvi. Papildus tam, ka šāda krātuve ir pamats akadēmiskiem pētījumiem, tā var atvieglot kultūras mantojuma uzraudzību, palīdzēt vadīt uzturēšanas un restaurācijas darbus un pat kalpot par palīgmateriālu rekonstrukcijas projektiem.

Labā dokumentēšanas prakse ir ne tikai informācijas apkopošana, bet arī pareizā informācijas apjoma noteikšana, lai atrisinātu konkrēto problēmu. Izmantojot jaunās dokumentēšanas tehnoloģijas, varam ģenerēt detalizētus objektu un vietu modeļus ar lielisku precizitāti un izšķirtspēju. Tomēr detalizētai dokumentācijai ir nepieciešams liels datu apjoms saistībā ar drošības apsvērumiem. Datu uzglabāšana var būt sarežģīts un dārgs priekšs, un datu īpašniekiem var būt apgrūtināta piekļuve datiem un to izmantošana.

Ir pieejami ļoti dažādi rīki, kuros izmanto dažādu sarežģītības līmeņu tehnoloģijas un kuru izmantošanai bieži vien ir nepieciešamas specializētas prasmes. Kultūras mantojuma īpašniekiem un apsaimniekotājiem var būt sarežģīti orientēties nemitīgi mainīgajā jauno dokumentācijas tehnoloģiju vidē. Šī rokasgrāmata ir palīgmateriāls, kurā strukturēti un saskaņoti ir aprakstīta attiecīgā dokumentēšanas prakse. Tā iepazīstina ar dažādiem mums pieejamiem rīkiem, to darbību tehnikā līmenī un situācijām, kurās tie būtu jāizmanto. Mūsu mērķis ir, lai šī rokasgrāmata palīdzētu kultūras mantojuma jomas dalībniekiem pieņemt labākus lēmumus saistībā ar dokumentācijas tehnoloģiju izvēli un uzlabotu kultūras mantojuma saglabāšanu nākamajām paaudzēm.

2 | ROKASGRĀMATAS MĒRĶIS UN UZDEVUMI

Cik vien tālā vēsturē spējam atskatīties, cilvēce vienmēr ir centusies saglabāt savas vēsturiskās vērtības un liecības, kas ir identitātes pamats nākamajām paaudzēm.

Laika gaitā formas un līdzekļi, ar kuriem iespējams dokumentēt kultūrvēsturisko mantojumu, ir mainījušās. No akmens plāksnēm un sienu gleznojumiem alās līdz digitāliem datiem mūsdienās.

Šobrīd vērojama ļoti strauja tehnoloģiju attīstība, kas padara kultūrvēsturiskā mantojuma dokumentēšanu un uzmērīšanu pieejamāku un daudzpusīgāku. Objektu uzmērīšanai tiek izmantotas dažādas tehnoloģiskās iekārtas un uzmērīšanas metodes, nodrošinot precīzus un daudzveidīgus rezultātus.

Rokasgrāmatas mērķauditorija ir lasītāji, kuru ikdiena nav cieši saistīta ar objektu digitalizāciju un uzmērīšanu un kuriem plašais tehnoloģisko iespēju klāsts var radīt zināmu apjukumu brīžos, kad jāpieņem lēmums par kultūrvēsturiska priekšmeta vai objekta uzmērīšanu.

Šīs rokasgrāmatas mērķis ir iepazīstināt lasītājus ar kultūrvēsturiskā mantojuma veidiem un metodēm, kādas var tikt izmantotas objektu uzmērīšanai, izvēloties katram konkrētajam gadījumam vispiemērotākās metodes un tehnoloģijas.

UZDEVUMI:

- veidot lasītājos izpratni par objektu dažādību un atbilstošām uzmērīšanas metodēm;
- izglītēt lasītājus par mūsdienu uzmērīšanas metodēm;
- radīt izpratni par dažādu metožu izmantojumu un ar to saistītajiem kvalitātes riskiem;
- sniegt skaidras vadlīnijas, kvalitātes un nodevumu prasībām, kā arī metožu izvēlē;
- skaidrot drošas datu uzglabāšanas principus ilgtermiņā;
- iepazīstināt ar aktuālo kultūrvēsturisko objektu uzmērīšanas pieredzi Latvijā un Norvēģijā.

ATSKATS KULTURVĒSTURISKĀ MANTOJUMA UZMĒRĪŠANĀ

Dr. Arch. Juris Dambis

Kopš kultūras mantojuma saglabāšanas pirmajiem centieniem pasaulē ir attīstījusies arī kultūras vērtību dokumentēšana, sākotnēji uzkrājot pavisam nelielu informāciju, kad precizitātei netika pievērsta uzmanība, līdz mūsdienās, ar ļoti plašu, apjomīgu informāciju un pat vēl neaptveramām precizitātes iespējām. Kaut arī pašos senākajos kultūras vērtību aprakstošos un attēlojošos materiālos



Rīgas panorāma 1650.g. J.K. Broce

informācijas apjoms ir neliels, tomēr tiem ir ļoti liela nozīme vērtību izzināšanā un atjaunošanā.

Mūsdienās profesionāls materiālā kultūras mantojuma aizsardzības darbs nav iedomājams bez vērtību vispusīgas apzināšanas un precīzas fiksācijas. Kultūras mantojuma dokumentēšana ir kļuvusi par nepārtrauktu procesu, kas, radot atbilstošu un savlaicīgu informāciju, nodrošina vērtību uzraudzību, uzturēšanu un veicina to izpratni. Dokumentēšana ir gan produkts – iegūtu materiālu kopums, gan arī darbība, kuras rezultātā tiek iegūta mantojuma uzraudzībai un atjaunošanai nepieciešamā informācija. Kultūras mantojuma dokumentēšana rada pieejamus materiālus un nemateriālus resursus, kas izpaužas kultūr-

vēsturiskas vērtības un tās saglabātības stāvokļa fiksējošā, mērošā, stāstošā un tematiski aprakstošā informācijā.

Materiālā kultūras mantojuma aizsardzības nozare ir raksturīga ar tradicionālu materiālu, tehnoloģiju, metožu, paņēmieni, seno instrumentu un amatniecības prasmju lietojumu. Mūsdienās vērtību izzināšanā nepietiek tikai ar interesi par kultūras mantojuma objekta vēsturi, tā ārējo veidolu, konstruktīvo uzbūvi, plānojumu, bet arvien nozīmīgāka kļūst katra detaļa, virsmas faktūra, amatnieka darbarīku lietojuma pēdas, deformācijas, nodilums, bojājumu apjoms un raksturs.

Lai labāk izprastu un veiksmīgāk lietotu mūsdienu modernās tehnoloģijas materiālā kultūras mantojuma dokumentēšanā, vispirms jāatceras 20.gadsimtā lietotās tradicionālās metodes. Būvētā mantojuma dokumentēšanas veids, apjoms un precizitāte ir bijusi atkarīga no dokumentēšanas mērķa. Visbiežāk mērķi ir bijuši šādi:

1. Vispārīga kultūrvēsturisko vērtību apzināšana. Parasti objekti tikuši kartēti, aprakstīti, skicēti to ārējais veidols, dažkārt plānos norādītas arī vērtīgākās detaļas, 20.gadsimta otrajā pusē skices visbiežāk aizstāja foto fiksācija.

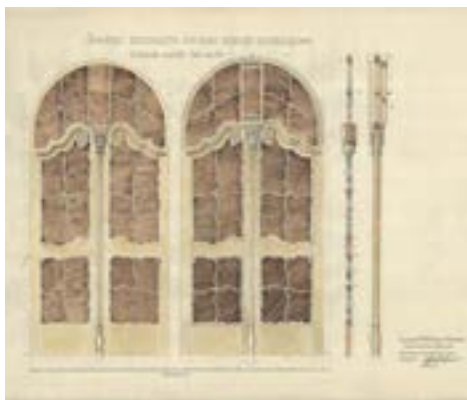
2. Kultūrvēsturiska objekta apzināšana un dokumentēšana, lai to iekļautu aizsargājamā kultūras pieminekļu sarakstā. Dokumentēšanas apjomu un veidu izvēlējās attiecīgās kultūras mantojuma institūcijas speciālisti, vēlāk to noteica normatīvais regulējums. Kultūras pieminekļu uzskaites dokumentāciju parasti veidoja noteiktā formā sagatavota pamatinformācija par objekta atrašanās vietu, izcelsmi, datējumu, kultūrvēsturisko nozīmi, saglabātības stāvokli, ietverot arī pēc iespējas precīzu objekta substances raksturojošu grafisko un foto informāciju.

3. Kultūrvēsturiska objekta saglabātības stāvokļa dokumentēšana veicot uzraudzību (monitoringu). Dokumentēšanas veids, apjoms un precizitāte izrietēja no iespējamā objekta apdraudējuma, notikušiem pārveidojumiem, vai bojājumiem. Dokumentēšana parasti veikta detalizēta apraksta veidā, kuru papildina raksturojošas skices, uzņēmējumi, foto attēli. Mēdz būt arī tādi monitoringa pasākumi, kuri ir saistīti ar konstrukciju deformāciju, to ļoti precīziem mērījumiem.

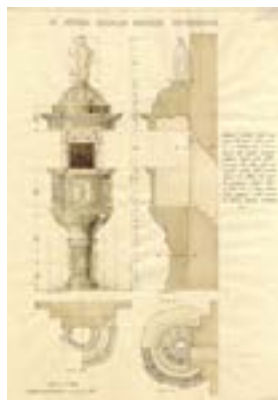
4. Kultūrvēsturiska objekta dokumentēšana un fiksēšana, lai to atjaunotu (restaurētu) vai kontrolēti pārveidotu. Tā vienmēr ir bijusi visatbildīgākā kultūrvēsturisko objektu dokumentēšana, tiecoties

uz iespējami pilnvērtīgāku informāciju un augstāku precizitāti. Informācija nepieciešama vērtību padziļinātai izzināšanai, paredzamo darbu dokumentācijas izstrādei, darbu norisei un to izpildes kvalitātes kontrolei.

Latvijā aktīva informācijas vākšana par kultūras mantojuma objektiem sākās ar Pieminēkļu valdes izveidošanu 1923.gadā, bet intensīva to uzmērīšana, vēl saglabājot Latvijas pirmās brīvvalsts laika skolu, pagājušā gadsimta otrajā pusē. Plaši veiktie arhitektūras mantojuma uzmērījumi izceļas ar tajos attēloto informācijas apjomu, kvalitāti un augsto profesionalitāti, mūsdienu vērtējumā tiem piemīt no vērtību attēlojuma starojoša noskaņa un mākslinieciska vērtība. Šie profesionālie zīmējumi parāda ar kādu aizrautību un mīlestību vērtību fiksētāji pirms vairākām desmitgadēm ir attiekušies pret Latvijas muižām, pilīm, baznīcām, uzmanību pievēršot pat vissīkākām detaļām. Lai precīzu uzmērījumu iegūtu tika veikta rūpīga objekta uzmērīšana dabā, izmantojot samērā vienkāršas metodes un instrumentus. Topogrāfiskiem uzmērījumiem plaši tika lietoti ģeodēziskie instrumenti, ēku uzmērījumiem galvenokārt mērlente, metramērs, svērtenis un līmeņrādis, vēlāk arī foto tehnika. Pēc mērījumu iegūšanas, no pierakstiem un skicēm tika izveidota uzmērījuma dokumentācija – objekta novietnes plāns, samērā precīzi ēkas stāvu plāni, griezumumi, fasādes un detaļu zīmējumi. Arhitektūras objekta uzmērīšana bija darbietilpīgs process, bieži vietas, kur dabā nevarēja piekļūt, tika uzzīmētas ievērojot būves un detaļu savstarpējās proporcijas. Pateicoties vēsturiskajiem doku-



Iekšējo stikloto divviru durvju uzmērījums, M.Smilšu iela 8, 1948.g. NKMP krājums



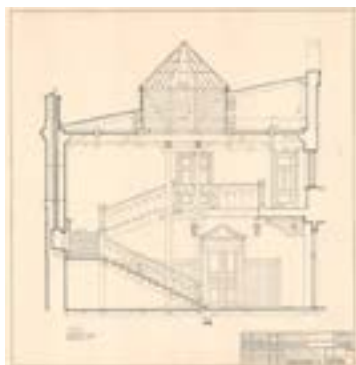
Sv. Pētera baznīcas kanceles uzmērījums. NKMP krājums



Priedes kroga dienviņu fasādes uzmērījums, Brīvdabas muzejs. NKMP krājums



Stāmerienas pils fasādes uzmērījums,
1985.g. NKMP krājums



Stāmerienas pils uzmērījums, griezum
1985.gads. NKMP krājums

mentēšanas materiāliem, mēs šodien daudz kvalitatīvāk varam veikt arhitektūras pieminekļu atjaunošanu.

Būvētā mantojuma atjaunošana mūsdienās nav iedomājama bez paša objekta rūpīgas izpētes, uzmērīšanas, novietnes situācijas plāna, fasāžu, griezumu, konstrukciju un katras detaļas fiksācijas, iegūstot arvien precīzākus datus par objekta substanci, apjomu, formu, krāsu un materialitāti.

Mūsdienu tehnoloģiju laikmetā paveras arvien jaunas iespējas, pat nepieskaroties kultūrvēsturiskam objektam, iegūt precīzu informāciju par tā formu, krāsu, virsmu faktūru, novietni, uzbūvi, struktūru, vissīkākām deformācijām un zudumiem. Šāda informācija dod jaunas iespējas kvalitatīvākai kultūrvēsturisko vērtību apzināšanai, izpratnei, atjaunošanai un uzraudzībai.

LĪDZŠINĒJĀ 3D JAUNĀKO TEHNOLOĢIJU IZMANTOŠANAS PIEREDZE KULTŪRAS MANTOJUMA PĀRVALDĪBĀ UN IZPĒTĒ NORVĒĢIJĀ UN LATVIJĀ

JAUNĀKO 3D TEHNOLOĢIJU IZMANTOŠANAS PIEREDZE KULTŪRAS MANTOJUMA PĀRVALDĪBĀ UN IZPĒTĒ NORVĒĢIJĀ

Kristian Løseth

Kad pirms 20–25 gadiem studēju arheoloģiju, apguvām dokumentēšanu, izmantojot mērlenti, zīmuli un papīru. Tie bija pēdējie analogā fotoattēla mirkli. Izrakumos un lauka apsekojumos tik tikko sāka izmantot tahimetrus un GPS. Daži agrīnie lietotāji dokumentēja arheoloģisko vietu mikrotopogrāfiju, rūpīgi izmērot ar tahimetru katru 10 cm lielu apgabalu un izmantojot šos punktus 3D modeļa konstruēšanai. Mana pirmā pieredze ar attālo izpēti bija vēsturiski sausajā vasarā Norvēģijas centrālajā daļā. Iznomājām helikopteru un fotografējām seno konstrukciju pēdas, noliecoties pa sānu durvīm.



Aerofoto ar redzamām seno konstrukciju pēdu vietām pļavā, *Trøndelag*.
Foto: *Lars Forseth*

Tagad, kad analogās fotokameras palika pagātnē, arheoloģiskajos lauka darbos plaši tiek izmantotas digitālās metodes, un ir iespēja iegādāties bezpilota lidaparātu, kas izmaksās mazāk nekā viena stunda gaisā ar helikopteru. Ar fotogrammetrijas palīdzību var viegli un ātri izveidot arheoloģiskās vietas 3D modeli. Arī zemes radiolokācijas radars ir ievērojami ietekmējis Norvēģijas arheoloģijas attīstību.

Kultūras mantojuma izpētes un pārvaldības joma pēc būtības ir starpdisciplināra. Jau izsenis tika izmantotas citu disciplīnu metodes. Norvēģijā kultūras mantojuma nozare diezgan labprāt izmanto jaunas dokumentēšanas metodes. Arheoloģiskajos lauka darbos 3D modeļus regulāri izmanto gan izrakumu procesa atbalstam, gan dokumentēšanai, gan arī, lai izveidotu modeļus, ar kuriem var iepazīstināt sabiedrību. Kultūrvēstures muzejs ir izveidojis savu 3D datu portālu vietnē <https://3d.unimus.no/>. Šeit varam izpētīt 3D modeļus no arheoloģiskajām vietām, kā arī atrastos artefaktus. Ievērojams 3D skenēšanas lietojums Norvēģijas arheoloģijā ir redzams projektā “Ūsebergas (*Oseberg*) [kuģa] glābšana”, kura mērķis ir dokumentēt dažus no svarīgākajiem Norvēģijas vikingu laikmeta atradumiem, kas novecojušu saglabāšanas metožu dēļ šobrīd atrodas sliktā stāvoklī.



Kuģa vraka 3D modelis,
Norvēģijas Jūras muzeja krājums

Norvēģijas Jūras muzejam ir lieliski projekti, kas parāda, kā 3D dokumentāciju var izmantot, lai paplašinātu arheoloģiskajos izrakumos iegūtās zināšanas. Pilsētvides attīstības Oslo krastmalā rezultātā tika atrasti daudzi kuģi un laivas no vecās ostas. Šie atradumi tiek dokumentēti 3D formātā ne tikai tāpēc, lai saglabātu datus par atradumiem, bet arī lai digitāli rekonstruētu laivas un iegūtu vairāk zināšanu par to funkcijām un iespējām. Divi no atradumiem ir arī rekonstruēti pilnā mērogā, sniedzot gan pētniekiem, gan sabiedrībai iespēju pavisināties ar 16. gadsimta laivām Oslo fjordā.

3D dokumentācija ir pavērusi jaunas un aizraujošas iespējas attiecībā uz ēkām un drupām Norvēģijā. Riksanitkvarēnā 2006. gadā tika uzsākts projekts par mūsu viduslaiku drupu saglabāšanu. Digitālā dokumentācija ir bijusi galvenā šī projekta daļa jau kopš paša sākuma, un tai ir vairākas funkcijas. Tā kalpo par pamatu konservatoriem, mūrniekiem un amatniekiem, kuri strādā pie drupu saglabāšanas. Turklāt to izmanto arī sabiedrības informēšanai un lai parādītu saglabāšanas rezultātus. Tomēr ar datiem saistītās problēmas vēl nav atrisinātas, jo īpaši saistībā ar datu pārvaldību. Diskusijās par 3D datiem Norvēģijas kultūras mantojuma iestādēs šī tēma tiek nemitīgi apspriesta, un, iespējams, tā būs aktuāla arī turpmākajos gados.

Norvēģijas zemūdens arheoloģijai ir sena novatorisku tehnoloģiju izmantošanas vēsture. Tam ir vairāki iemesli. Viens no tiem ir tas, ka mūsu zemūdens topogrāfija ir tikpat iespaidīga kā tā, kas ir redzama virs ūdens. Tas nozīmē, ka daudzas mūsu zemūdens arheoloģiskās vietas atrodas pārāk dziļi, lai varētu ienirt un izpētīt. Turklāt nirēju pakalpojumi izmaksā ļoti dārgi, un laiks, ko viņi pavada zem ūdens, ir ierobežots. Norvēģija ir valsts ar plašu piekrastes rūpniecību, tāpēc zemūdens tehnoloģijas jūras arheoloģijā tika izmantotas jau sen. Mūsdienās dažas modernas iekārtas kļūst arvien pieejamākas iestādēm, kas ir atbildīgas par zemūdens kultūras mantojuma saglabāšanu. Gan sānu skenēšanas sonāri, gan attālināti vadāmi transportlīdzekļi (ROV) ir ikdienas jūras arheologu darba rīki. Papildus tam Norvēģijas Zinātnes un tehnoloģiju universitātes (NTNU) Lietišķās zemūdens robotikas laboratorijā tiek veikti pētījumi par zemūdens iekārtu izmantošanu zinātnes jomā. Šeit viņi veido arheoloģisko zemūdens tehnoloģiju lietojumu nākotni.

Izmantojot šo jauno tehnoloģiju sniegtās priekšrocības, rodas vairāki izaicinājumi. Lielākā daļa šo dokumentēšanas metožu ļauj iegūt lielu datu apjomu. Dati ir pieejami dažādos formātos, un to atvēršanai, rediģēšanai un analīzei bieži vien ir nepieciešama specializēta pro-

grammatūra. Gan uzglabāšanas jauda, gan patentēta programmatūra parasti izmaksā dārgi. Lietojamība un atkalizmantojamība ir ļoti ierobežota, ja dati netiek pareizi pārvaldīti. FAIR principi datu pārvaldībā kļūst arvien populārāki kultūras mantojuma nozarē. Datu padarīšana par atrodamiem, pieejamiem, sadarbībspējīgiem un atkārtoti izmantojamiem ir labs un nākotnē drošs veids, kā pārvaldīt ievāktos datus, bet tas prasa lielus resursus. Norvēģijā ir valsts sistēmas, kas ir paredzētas dažādu veidu datiem, piemēram, informācijai par kultūras mantojuma objektiem (*Askeladden*) un universitātes muzeju artefaktiem (*Unimus*). Taču dati, kas ir iegūti no 3D skenēšanas/fotogrammetrijas, zemes radiolokācijas radara, sonāra un cita veida dokumentācijas, atkarībā no pieejamajiem resursiem tiek apstrādāti ļoti dažādi. Pašlaik tā ir viena no galvenajām diskusijām Norvēģijā: kā uzglabāt datus un padarīt tos pieejamus saprātīgā veidā reālistiska budžeta ietvaros?

Vēl viena diskusija ir par to, ko nesīs nākotne. Visas šajā rokasgrāmatā aplūkotās tehnoloģijas strauji attīstās, un, laikam ejot, rodas jaunas tehnoloģijas. Raksta tapšanas laikā mākslīgais intelekts ir viena no aktuālākajām tēmām sabiedrībā. Mašīnmācīšanās metodes arheoloģisko vietu noteikšanai ar dažādiem panākumiem ir izmēģinātas Norvēģijā un citās valstīs. Ir arī projekti, kuros artefaktu analīzei un rekonstrukcijai izmanto mākslīgo intelektu. Jēvikas (*Gjøvik*) NTNU Kultūrvēstures muzeja un *Colourlab* projekta *TexRec* mērķis ir rekonstruēt un interpretēt ļoti trauslos gobelēnus no Ūsebergas atradumiem. Šie ir piemēri pētījumiem, kurus var atbalstīt ar digitālo dokumentāciju un mākslīgo intelektu. Tagad apzināties, ka mākslīgais intelekts ir noderīgs un ļauj atrisināt reālas pasaules problēmas. Turpmākie gadi kultūras mantojuma nozarē būs aizraujoši.

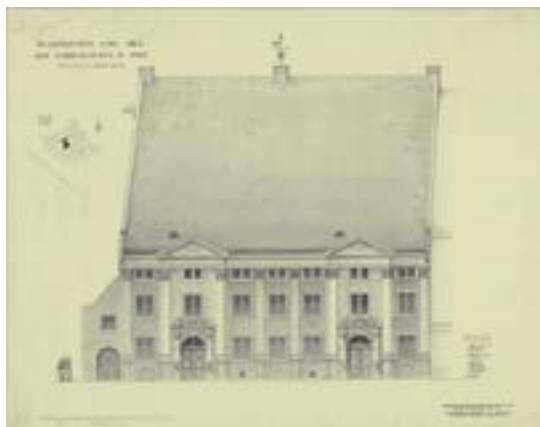
Nobeigumā var secināt, ka jaunās tehnoloģijas mums ir devušas daudz jaunu iespēju kultūras mantojuma dokumentēšanā, pārvaldībā, saglabāšanā, izpētē un sabiedrības informēšanā. Tiek veikti aizraujoši pētniecības projekti, lai pielāgotu jaunas metodes, un citās nozarēs ir pieejamas tehnoloģijas, ko var izmantot kultūras mantojuma dokumentēšanai. Turklāt dažas tehnoloģijas kļūst lētākas un pieejamākas arī tiem, kuri nav speciālisti. Arvien labāk sākam izprast, kāpēc mums ir jāizmanto progresīvas dokumentēšanas metodes. Nav jāvāc milzīgi datu apjomi, ja tiem nav praktiska lietojuma. Turpmākajos gados ir nepieciešama stingrāka pieeja datu pārvaldībai. Esmu pārliecināts, ka šī rokasgrāmata būs lielisks resurss ikvienam, kurš meklē informāciju par jauniem kultūras mantojuma dokumentēšanas veidiem, kā arī tiem, kuri meklē norādījumus par iegūto datu pārvaldību.

3D JAUNĀKO TEHNOLOĢIJU IZMANTOŠANA KULTŪRAS MANTOJUMA PĀRVALDĪBĀ UN IZPĒTĒ LATVIJĀ – NACIONĀLĀS KULTŪRAS MANTOJUMA PĀRVALDES PIEREDZE

Simona Čevere

Kultūras mantojuma aizsardzība nevar pastāvēt bez vērtību, objektu, vietu un notikumu dokumentēšanas. Latvijā kultūras mantojuma apzināšanas pirmsākumi datējami jau ar 1818. gadu, kad Kurzemes Literatūras un mākslas biedrība nodibināja Kurzemes provinces muzeju. Senatnes pieminekļu apzināšanas un saglabāšanas aktivitātes lielā mērā veica Baltijā dzīvojošā vācbaltiešu inteliģence. Sabiedrībā pieauga interese par kultūrvēsturisku ainavu attēlošanu, ko uzskatāmi apliecina Johana Kristofa Broces (*Johann Christoph Brotze*) nenovērtējamais ieguldījums kultūras mantojuma dokumentēšanā. Viņa radītie kultūrvēsturiski nozīmīgu objektu un vietu zīmējumi un apraksti vēl joprojām ir nozīmīgs avots arī mūsdienu pētniekiem.

2023. gads bija Latvijas kultūras mantojuma aizsardzības sistēmas simtgades gads – 1923. gadā tika pieņemts Likums par pieminekļu aizsardzību un nodibināta Pieminekļu valde. Tajā laikā tika sākta aktīva informācijas vākšana par potenciāliem kultūras pieminekļiem, tos fiksējot fotoattēlos, uzmērījumos, zīmējumos un pierakstos. Kultūras pieminekļu dokumentēšana tika turpināta arī padomju okupācijas laikā. Nacionālās kultūras mantojuma pārvaldes (NKMP) arhīvā ir lieliska kolekcija ar apmēram 16 000 uzmērījumu vienībām. Tie atbilstoši sava laika iespējām un tehnoloģijām ir ar zīmuli vai tušu rasēti, dažkārt arī kolorēti kultūras pieminekļu, to fragmentu, detaļu un



Dannenšterna nama
galvenās fasādes
uzmērījums, 1945. gads,
NKMP krājums

atsevišķu priekšmetu detalizēti rasējumi, daļai no tiem ir arī visai augsta mākslinieciskā vērtība. Līdz pat mūsdienām šie rasējumi tiek praktiski izmantoti kultūras pieminekļu atjaunošanā un pētniecībā.

Arī pēc valsts neatkarības atgūšanas kultūras mantojuma aizsardzības institūcija Valsts kultūras pieminekļu aizsardzības inspekcija (kopš 2018. gada – Nacionālā kultūras mantojuma pārvalde) turpināja kultūras mantojuma apzināšanas un dokumentēšanas darbu.

Likumsakarīgi, ka dokumentēšana attīstās līdzī laikam: ir mainījušies paņēmieni un tehnoloģijas, bet saglabājies pamatmērķis – fiksēt kultūras vērtības.

Apzinoties kultūras mantojuma dokumentēšanas nozīmi, NKMP 2014. gadā uzsāka plānveidīgu kultūras pieminekļu uzmērīšanu, izmantojot modernas tehnoloģijas un izvirzot noteiktus mērķus:

- iegūt precīzus kultūras pieminekļu dokumentēšanas materiālus: datus par kultūras pieminekļa substanci, apjomu, formu, materialitāti, kurus ir iespējams izmantot kultūras pieminekļa saglabāšanā un arī atjaunošanā – kā izejmateriālu atjaunošanai analogās detaļās vai kā pamatu būvprojektēšanā;
- precīzi dokumentēt kultūras pieminekļa saglabātības, defektu, nodiluma un deformācijas stāvokli turpmākam monitoringam;
- iegūt maksimāli precīzu informāciju par kultūras pieminekli ar nedestruktīvām metodēm;
- sniegt valsts atbalstu un piemēru kultūras pieminekļu īpašniekiem, nodrošinot, ka īpašniekiem dokumentēšanas dati ir brīvi pieejami bez maksas;
- atspoguļot jauno tehnoloģiju iespējas kultūras pieminekļu aizsardzībā un popularizēt Latvijas kultūras mantojumu sabiedrībā.

Kopš 2015. gada atbilstoši pieejamajam finansējumam katru gadu tiek veikta apdraudēto un nozīmīgāko kultūras pieminekļu uzmērīšana, vidēji uzmērot 12–15 objektus gadā. Līdz šim ar 3D metodēm kopā ir uzmērīti 198 kultūras pieminekļi.

Nemot vērā to, ka NKMP nav nedz nepieciešamo tehnisko resursu (iekārtu), nedz arī speciālistu ar atbilstošu kvalifikāciju, uzmērīšanas dati tiek iegūti tikai ārpakalpojumā, izsludinot publisko iepirkumu.

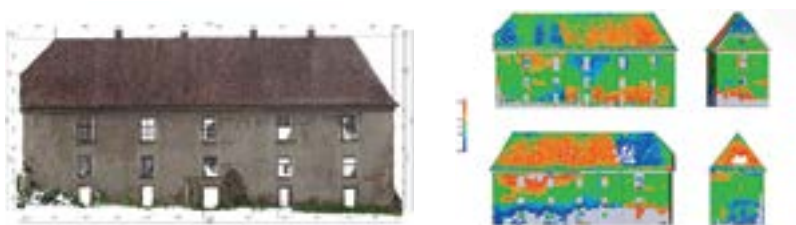
Uzsākot uzmērīšanas pakalpojuma iepirkšanu, NKMP nebija pietiekamas pieredzes un zināšanu uzmērīšanas iepirkuma prasību definēšanā un tehnisko specifikāciju sagatavošanā, tādēļ pirmā iepirkuma rezultāti nebija tik detalizēti, kā bija cerēts.

Taču jāatzīst, ka šī sākotnējā pieredze bija vērtīga, jo ļāva būtiski pilnveidot kvalitātes prasības, analizējot pieļautās kļūdas un neprecizitātes.

Ņemot vērā, ka 60 % no nekustamajiem kultūras pieminekļiem Latvijā ir būvētais mantojums, ir svarīgi izvēlēties uzmērīšanas tehnoloģijas, kas vislabāk atbilst šāda mantojuma veida fiksēšanas vajadzībām. Apzinot starptautiski izmantotās aktuālās un tradicionālās uzmērīšanas metodes, NKMP kā pamatmetodi būvētā mantojuma dokumentēšanai ir izvēlējusies trīsdimensionālo lāzerskenēšanu ar stacionāro 3D skeneri, jo tā dod iespēju saglabāt visprecīzāko informāciju par kultūras pieminekli. Lai iegūtu iespējami pilnīgus datus par objektu, metodes tiek kombinētas, piemēram, izmantojot fotogrammetrijas metodi objektu jumta daļu, torņu, tuvākās apkārtnes fiksēšanai ar droņu vai ēku detaļu fiksēšanai ar rokas skeneri.

Kā būtiska izvēle tālākajā darbībā tika pieņemts stratēģisks lēmums ikgadējo ne visai lielo finansējumu maksimāli izmantot tieši uzmērīšanas darbiem, tādējādi uzkrājot datus par iespējami lielāku skaitu kultūras pieminekļu, un neveidot 3D modeļus, jo to sagatavošana ir visai dārga un modelim nav tik izšķirīga loma praktiskajā kultūras pieminekļa atjaunošanas procesā.

Ēku vai būvju uzmērīšanai katram objektam tehniskajā specifikācijā tiek noteikts uzmērīšanas apjoms (piemēram, ēkas ārējais apjoms, atsevišķas iekšējās telpas, konkrētas interjera detaļas) un precizitātes prasības (piemēram, ēkas ārējā apjoma uzmērījuma punktu mākoņa blīvumam jābūt vismaz 10 punkti uz cm^2 , uzmērījuma punkta 3D precizitātei – vismaz 2 mm/10 m, jumta plakņu uzmērījuma absolūtajai precizitātei jābūt līdz 50 mm, interjera detaļām, kur svarīga precīza forma un apdares tehnika, uzmērījuma precizitātei jābūt 0,1 mm). Papildus parasti tiek prasīti arī no uzmērīšanas datiem iegūti fasāžu un jumta plakņu attēlojumi, būvju plānu attēlojumi, interjera sienu notinumi, arhitektonisko detaļu griezumī noteiktā mērogā, norādot arī galvenos gabarītu izmērus. Sliktā tehniskā stāvoklī esošiem kultūras pieminekļiem bieži vien, izmantojot uzmērīšanas datus, tiek analizētas deformācijas nobīdes un sasvērumi attiecībā pret sākotnējo būvju daļu un konstrukciju



Neretas muižas kungu mājas uzmērījums, 2018. gads

vertikalitāti un horizontalitāti. Praksē ir pierādījies, ka ar zināmu laika distanci veikta atkārtota lāzerskenēšana un iegūto datu savietošana ļauj veiksmīgi diagnosticēt deformāciju progresu un analizēt iemeslus. Dažkārt ir situācijas, ka objekts ilgstoši bijis bez saimnieka, ir sliktā tehniskā stāvoklī un tā uzmērīšana ir bijusi kā ielēkšana vilciena pēdējā vagonā – ar sajūtu, ka, iespējams, pēc laika šie uzmērījuma dati būs liecība par jau zudušu kultūras pieminekli. Tāpēc jo lielāks gandarījums ir brīžos, kad šie NKMP pasūtītie uzmērījumi kļūst par pamatu objekta atdzimšanai, jo jaunie kultūras pieminekļa īpašnieki tos veiksmīgi izmanto objekta zudušo daļu atjaunošanā un restaurācijas un rekonstrukcijas darbu projektēšanā.

Ar būvēto mantojumu saistīto mākslas pieminekļu uzmērīšana bieži vien ir arī visai izaicinoša. Tā kā interjera dekoratīvā apdare parasti ir jāuzmēra baznīcās, darbu procesu un rezultātus var ietekmēt atsevišķu interjera elementu sasniedzamība (piemēram, liela izmēra altāris, augstu izvietotas ērģeļu luktas), kā arī uzmērāmā priekšmeta materiāls. Šajā gadījumā galvassāpes sagādā baznīcās bieži vien esošie zeltītie un citi elementi ar atstarojošu pārklājumu.

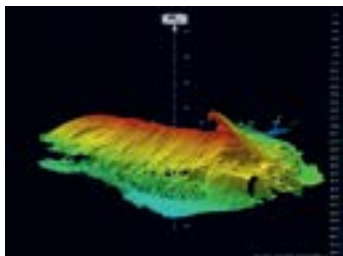
Bez būvētā mantojuma otra visai nozīmīga un sarežģīta kultūras pieminekļu grupa ir arheoloģiskais mantojums, kura apzināšanai NKMP izmanto netiešas nedestruktīvas un neinvazīvas metodes – reljefa analīzi un ģeofizikālās metodes. Kā galveno ģeofizikālo metodi lieto radiolokācijas metodi ar ģeoradaru. Ģeofizikālās izpētes mērķis ir noteikt pazemē esošo seno konstrukciju, apbedījumu vai to palieku atrašanās vietas teritorijās, kurās vairs nav saglabājušās virszemē redzamas liecības, kā arī citus raksturlielumus (būvju atliekas, tukšumus), kurus ir iespējams interpretēt, izmantojot ar ģeoradaru iegūtus datus (objektu ģeometriskās sakarības, dziļums, izmēri u. c.), lai prognozētu nepieciešamās darbības objektu saglabāšanai, aizsardzībai un izmantošanai nākotnē.

Tomēr šīs izpētes metodes gadījumā bieži vien nākas saskarties ar problēmām. Viena no tām ir sarežģītie zemes virsmas apstākļi virs arheoloģiskā pieminekļa. Piemēram, gara zāle, krituši koki, krūmi, akmeņi būtiski ierobežo iespēju veikt kvalitatīvu izpēti visā pieminekļa platībā. Otra problēma ir datu interpretācija un nepieciešamība jau izpētes laikā analizēt rezultātus un pieņemt lēmumus, kas balstīti uz veikto analīzi, par, piemēram, izpētes laukuma koriģēšanu. Šo iemeslu dēļ, veicot ģeofizikālo izpēti arheoloģiskajā pieminekļī, NKMP kā nosacījumu izvirza arheologa piesaisti darbu veikšanā.

Līdz šim visveiksmīgākie ģeofizikālās izpētes rezultāti iegūti, pētot apbedījumu vai to palieku esamību. Savukārt pilsdrupās izpētes re-

zultātus stipri ietekmē būvju palieku, būvgružu esamība gruntī, kas apgrūtina seno konstrukciju identificēšanu.

Ņemot vērā, ka kultūras pieminekļi ir visai dažādi, arī to dokumentēšanas veidi var būt visai atšķirīgi. 2021. gadā pirmo reizi izpētes procesā tika izmantota batimetrijas metode – ar tās palīdzību tika veikta Kokneses pils zemūdens daļas apsekošana 10 m joslā no virszemes mūra daļas. Izpētes rezultātā tika atklātas piekrastes korozijas vietas, kā arī grunts iegrimšana un izskalojumi pieminekļa tiešā tuvumā. Šis ir lielisks piemērs, kā mūsdienu tehnoloģiju iespējas ļauj noteikt pilsdrupu tehnisko stāvokli un saglabāšanu ietekmējošos apstākļus, kurus kultūras pieminekļu uzraudzības speciālisti parasta objekta apsekojuma laikā nemaz nevarētu ieraudzīt.



Kokneses pils, batimetrijas dati, 2021. gads

Nākotnē NKMP plāno ar batimetrijas palīdzību apzināt un izpētīt zemūdens arheoloģisko mantojumu, tostarp jūrā nogrimušu kuģu vrakus un ezeros esošās ezermitnes.

Meklējot jaunus virzienus, kā izmantot tehnoloģiju sniegtās iespējas, NKMP 2021. gadā veiksmīgi realizēja vienu virtuālas rekonstrukcijas projektu. Līdz Otrajam pasaules karam Rīgā, Lielajā Monētu ielā 11, atradās nams ar brīnišķīgu manierisma stila portālu, par kuru liecina tikai viens attēls. Kara laikā ēka gāja bojā, bet no portāla saglabājušies vien daži fragmenti. Apzinot dažādās vietās glabātos fragmentus un tos precīzi uzmērot, radās iespēja atjaunot portālu digitāli – speciālisti izveidoja tā 3D modeli, rekonstruējot portāla vēsturisko izskatu.

Negaidīti šim stāstam bija arī turpinājums, jo 2024. gada vasarā tika atrasti vēl vairāki portāla fragmenti. NKMP tos gada nogalē uzmērīja, un plānots, ka ar tiem varētu papildināt iepriekš izveidoto modeli.

Ambiciozākais nākotnes plāns paredz, ka, balstoties uz šo virtuālās rekonstrukcijas modeli, vienkopus savāktos fragmentus varētu rekonstruēt arī fiziski un izvietot apskatei vidē.



Portāla saglabājušies fragmenti to oriģinālajās atrašanās vietās. Portāla 3D modelis

Izvērtējot šajos desmit gados uzkrāto pieredzi, var secināt – lai valsts pārvaldes institūcija iegūtu veiksmīgu rezultātu, pasūtot kultūras pieminekļu uzmērīšanas pakalpojumu, ir nepieciešams vesels pasākumu komplekss un atbilstoša darbinieku kompetence. Būtiskākie atzīmējamie aspekti ir šādi:

- skaidri apzināti mērķi, kādēļ konkrētajam objektam nepieciešama augstas precizitātes uzmērīšana;
- pārdomāta uzmērīšanas darbu apjoma noteikšana un precizitātes parametru definēšana, lai iegūtu kvalitatīvu rezultātu;
- rūpīga darbu plānošana, jo uzmērīšanu ietekmē laikapstākļi, apgaismojums, koku lapotnes, sniegs u. c.;
- sadarbība ar objekta īpašnieku, lai pēc iespējas nodrošinātu objekta sagatavošanu (gara zāle, koku zari, telpu atbrīvošana no uzmērīšanu traucējošām mēbelēm utt.) un pieejamību uzmērīšanas laikā;
- kompetentu iepirkumu speciālistu un juristu atbalsts pakalpojumu iepirkumu procesā – NKMP ir diezgan daudz saskārusies ar tirgus dalībnieku mēģinājumiem piespiest pazemināt kvalitātes kritērijus, tikušas apstrīdētas tehniskās specifikācijas un iepirkuma nolikuma prasības, uzskatot, ka tās ir pārāk augstas. Šajos gadījumos būtiska ir iestādes spēja argumentēti pamatot un juridiski precīzi formulēt prasības;
- kvalitatīva datu pārbaude – tas nozīmē, ka NKMP rīcībā būtu jābūt kompetentam speciālistam, kas var tos izvērtēt;
- pastāvīga zināšanu pilnveidošana un sadarbība ar jomas praktiķiem;

- datu ilgtermiņa glabāšanas nodrošināšana;
- ērts datu izmantošanas, apskates un izplatīšanas risinājums;
- 3D datu integrācijas iespējas citos risinājumos (piemēram, ĢIS produktos);
- uzkrāto datu plašākas izmantošanas veicināšana NKMP ikdienas darbā (nepieciešamas darbinieku apmācības, programmatūra);
- iespēja vienotā resursā (ne tikai NKMP ietvaros) iegūt informāciju par to, kuriem objektiem ir veikta 3D uzmērīšana, kādā apjomā, ar kādu precizitāti, kādi ir izmantošanas nosacījumi.

NKMP līdzšinējā pieredze 3D tehnoloģiju izmantošanā kultūras mantojuma pārvaldībā un izpētē ir apliecinājusi savu nozīmīgumu un potenciālu. Ir veiksmīgi īstenoti vairāki projekti, kas ļāvuši ne tikai dokumentēt un saglabāt kultūras vērtības digitālā formātā, bet arī uzlabot to pieejamību un pētniecības iespējas. 3D skenēšana un modelēšana ir sekmīgi izmantota arhitektūras, mākslas un arheoloģisko pieminekļu digitalizācijā, tādējādi sniedzot plašākas iespējas kultūras mantojuma saglabāšanai ilgtermiņā, kā arī veicinot izglītības un tūrisma attīstību. Tomēr, lai pilnībā izmantotu 3D tehnoloģiju potenciālu, nepieciešams turpināt attīstību vairākos virzienos. Viens no būtiskākajiem aspektiem ir finansējuma un cilvēkresursu kapacitātes palielināšana, nodrošinot speciālistu apmācību un tehnoloģiju pieejamību valsts un pašvaldību institūcijām. Turklāt svarīgi ir veicināt sadarbību starp dažādām institūcijām un zinātniskajiem centriem, lai nodrošinātu vienotu datu standartu un ilgtermiņa uzglabāšanas stratēģiju.

Nākotnē 3D tehnoloģijas var būt ne tikai dokumentēšanas rīks, bet arī pamats interaktīvām digitālām platformām un virtuālās realitātes risinājumiem, kas ļautu plašākai sabiedrībai piekļūt kultūras mantojumam inovatīvā un iesaistošā veidā. Jāstrādā arī pie mākslīgā intelekta un automatizētu analīzes rīku integrācijas, kas varētu efektīvizēt lielapjoma datu apstrādi un objektu klasifikāciju.

Noslēgumā jāuzsver, ka 3D tehnoloģiju izmantošana kultūras mantojuma jomā Latvijā ir nozīmīgs solis uz priekšu, taču tālākai attīstībai nepieciešama ilgtermiņa stratēģija, valsts atbalsts un starptautiska sadarbība, lai nodrošinātu ilgtspējīgu un inovatīvu pieeju mūsu kultūras vērtību saglabāšanā nākamajām paaudzēm.

KULTŪRVĒSTURISKĀ MANTOJUMA VEIDI UN UZMĒRĪŠANAS IESPĒJU KLASIFIKĀCIJA

Plānojot uzmērīšanas darbus, ir būtiski noteikt mērķi, kādēļ uzmērījums ir nepieciešams, un paredzēt, kādas būs turpmākās darbības ar uzmērījuma datiem. Precīza mērķa noteikšana ļauj izvēlēties atbilstošāko un efektīvāko uzmērīšanas metodi tā sasniegšanai.

Iespējamās darbības ar kultūrvēsturisko mantojumu, kuru veikšanai nepieciešams uzmērījums:

- dokumentēšana, faktiskā stāvokļa fiksēšana;
- zinātniskā izpēte, virsmu un griezumu analīze;
- restaurācija, vēsturiskā stāvokļa atjaunošana;
- rekonstrukcija, pārbūve;
- saglabātības stāvokļa monitorings;
- digitalizācija eksponēšanai interneta vidē;
- mēroga kopijas izgatavošana, 3D izdrukas.

Objektu tipi un uzmērīšanas mērķi var būt atšķirīgi, tādēļ kultūras mantojuma (kultūras pieminekļu) uzmērīšanas precizitātes prasības izriet no kultūras mantojuma specifikas un moderno tehnoloģiju izmantošanas īpatnībām.

UZMĒRĪJUMU PRECIZITĀTES LĪMEŅI – KLASES

A Īpaši augsta precizitāte īpaši precīzai uzmērīšanai, kad nepietiek tikai ar precīzu objekta vai tā daļas formu, bet nepieciešamas vissīkākās detaļas, gravējumi, materiāla faktūra, arī krāsa, parasti nelieliem priekšmetiem (0,01–0,1 mm).

B Ļoti augsta precizitāte precīzai uzmērīšanai ar augstu formas un detalizācijas pakāpi, arī krāsu fiksācija, dokumentējot dekoratīvus izstrādājumus, izceļot sīkus bojājumus, nodilumu, deformācijas (0,1–1,0 mm).

C Augsta precizitāte precīzai uzmērīšanai ar augstu formas precizitāti būvēm, bieži arī ar krāsu fiksāciju (2–5 mm).

D Vidēja precizitāte uzmērīšanai ar samērā augstu formas precizitāti, dažkārt fiksējot arī krāsu (5–10 mm).

E Neliela precizitāte uzmērīšanai ar samērā augstu formas precizitāti (10–20 mm).

F Zema precizitāte uzmērīšanai ar pietiekamu formas precizitāti lielākām plaknēm (20–50 mm).

G **Ļoti zema** precizitāte vispārējas ģeometrijas vai apvidus uzmērīšanai (50–100 mm).

R Struktūras izpēte un dokumentēšana ar ģeoradaru.

S Zemūdens izpēte (batimetrija).

Piedāvātajam tipoloģiskajam sadalījumam pievienoti biežāk lietotie uzmērījumu precizitātes līmeņi. Tie ir norādīti aptuveni, un praksē vienmēr jāpārliciecinās un jāizvēlas piemērotākais atbilstoši uzmērījuma mērķim un paredzētajam iegūto datu lietojumam.

5.1 ARHITEKTŪRAS MANTOJUMS (BŪVĒTAIS MANTOJUMS)



Nidaros katedrāles rietumu fasāde.
Foto: Anders Amlø, Riksantikvaren



Rundāles pils ieejas vārti, NKMP krājums

5.1.1. Ēkas, būves:

5.1.1. ārējais veidols **D**;

5.1.2. fasāžu detaļas **C D**;

5.1.3. plānojums **D**;

5.1.4. interjeru apdare **C D**;

5.1.5. interjera detaļas **B C**;

5.1.6. jumta konstrukcijas **C D**;

5.1.7. pazemes konstrukcijas, mūri **R**;

5.1.8. inženierkomunikācijas un iekārtas **D R**.

Vēsturisku ēku un būvju uzmērīšanā aizvien aktīvāk tiek izmantotas modernās 3D uzmērīšanas tehnoloģijas, jo tās sniedz daudz precīzākus un daudzpusīgākus uzmērījumu datus un precīzi fiksē ēkas, detaļu stāvokli un deformācijas. Ēkas uzmērīšanas darbi var būt visaptveroši, uzmērot visas telpas un fasādes (t. sk. jumtus), vai arī

koncentrēti uz atsevišķām detaļām. Uzmērot visu ēkas apjomu, var tikt kombinētas lāzerskenēšanas un fotogrammetrijas uzmērīšanas metodes, būtiskākais, lai nodevumā uzmērījuma dati ir savietoti vienā punktu mākonī vai novietoti vienā koordinātu sistēmā. 3D punktu mākonis ir galvenā datu kopa, no kuras tālāk sagatavo atvasinātos nodevumus. Tālākās darbības ar ēkas punktu mākonī visbiežāk ir:

- 2D CAD rasējumu, plānu sagatavošana (fasādes, jumta un stāvu plāni, šķēsgriezumī un garengriezums, atsevišķi būves mezgli);
- 3D uzmērījuma modeļu (parametriski modeļi) sagatavošana. Uzmērījuma modeļos ēkas elementi (sienas, pārsegumi, sijas, citas konstrukcijas, kāpnes, logi, durvis, santehnika, inženiertīkli utt.) tiek modelēti kā individuāli elementi patiesajā ģeometrijā un novietojumā. Pirms modeļa izstrādes ir būtiski definēt modeļa detalizācijas līmeni (kuri elementi un cik detalizēti ir jāmodelē), kas tieši ietekmē darbu izmaksas un nepieciešamo laiku;
- 3D modeli iespējams sagatavot arī kā vienotu virsmu, kas sastāv no trīsstūra poligoniem (*mesh* modelis). Šādam modelim iespējams pievienot arī patieso tekstūru no fotoattēliem. Šos modeļus izmanto izgaismošanas projektēšanai un projekta vizualizācijām. Modeļa detalizāciju paaugstina, palielinot poligonu skaitu modelī;
- 2D sienu notinumi ar pievienotiem raksturīgajiem izmēriem;
- analīzes un izpētes atskaites par ēkas konstrukciju deformācijām un vertikālītāti.

Atsevišķos gadījumos, kad nepieciešams uzmērījums tikai ēkas fasādei (piemēram, atjaunošanas un apgaismošanas projektam), kā papildu uzmērījumu var izmantot fotogrammetriju un sagatavot augstas izšķirtspējas 2D ortofoto vai fasādes 3D virsmas (*mesh*) modeli. Projektos, kur augstākas precizitātes uzmērījums nepieciešams fasādes vai interjera detaļām, tās ieteicams uzmērīt atsevišķi, pielāgojot metodi un izšķirtspēju objekta specifikai.

5.1.2 Pilsētībūvniecības objekti, pilsētu vēsturiskie centri, apbūves kompleksi, ansambļi:

1.2.1. telpiskais plānojums (plānojuma struktūra, arhitektoniski telpiskā sistēma, iekārtojums) **G**;

1.2.2. apbūves ārējais veidols **F**;

1.2.3. vides iekārtojuma arhitektūras, dizaina un mākslas elementi **C D**;

1.2.4. apzaļumojuma sistēma **G**.



Rorosas raktuvju pilsēta,
Tronds Isaksens, *Riksan tikvaren*



Kuldīgas vecpilsēta,
Kuldīgas novada pašvaldība

Vēsturisku ēku grupas un apbūves kompleksu uzmērīšanai galvenokārt izmanto lāzerskenēšanas vai/un fotogrammetrijas metodi no gaisa (no drona vai helikoptera). Ja nepieciešami detalizētāki fasāžu uzmērījumi, tos var papildināt ar to pašu metožu uzmērījumiem no zemes. Svarīgi ir uzmērījumus no dažādām iekārtām savietot vienā koordinātu sistēmā, lai tie ir savietojami un izmantojami jau kā vienots datu kopums. Līdzīgi kā ēkām, arī lielākiem objektiem – apbūves teritorijām – primārais nodevums būtu 3D punktu mākonis un 2D ortofoto. Iespējamās tālākās darbības ar šiem uzmērījumu datiem:

- teritorijas 3D modelis ar reljefu un ēku būvapjomiem LOD1 vai LOD2 līmenī;
- apvidus 3D modelis ar reālajām ēku aprisēm un tekstūrām (*mesh* modelis);

Abi iepriekšminētie nodevumi ir izmantojami teritoriju telpiskajā analīzē, īpaši saistībā ar jauniem vai demontējamiem būvapjomiem, parādot, kā mainīsies pilsētas panorāma, radot jaunu būvapjomu vai, tieši otrādi, veicot demontāžu:

- 3D reljefa modelis (DTM) un virsmas modelis (DSM), ko bieži izmanto pilsētplānošanas vajadzībām, veicot plūdu un trokšņu analīzi;
- 2D ortofoto kartes un iegūtie 3D dati ir vērtīgs datu avots topogrāfisko karšu izveidei vai aktualizēšanai;
- regulāri veicot teritorijas uzmērīšanu no gaisa, iespējams efektīvi monitorēt ēku jumtu izmaiņas. Tas ir īpaši aktuāli vecpilsētās, kur no ielas līmeņa ir grūti pamanīt būvapjoma izmaiņas jumtu līmenī;
- koku un apstādījumu kartēšana. Ar mūsdienu programmatūru no punktu mākoņa iespējams identificēt koku novietojumu, stumbra diametru un vainaga izmērus.

5.1.3 Kultūrvēsturiskas ainavas:

1.3.1. ainaviski telpiskais izveidojums **G**;

1.3.2. apbūves vai apbūves elementu ārējais veidols **F**;

1.3.3. atsevišķi arhitektūras, dizaina vai mākslas elementi **C D**.

Kultūrvēsturiskās ainavas parasti ir plašas (vairāku kvadrātkilometru) teritorijas, un to uzmērīšanai jāizmanto iespējami efektīvākās metodes, piemēram, aero lāzerskenēšana un fotogrammetrija. Iegūtie uzmērījuma dati ir 3D punktu mākonis un 2D ortofoto karte. Plašām teritorijām ir būtiski veikt 3D punktu mākoņa klasifikāciju. Parasti klasifikācijā nodala zemes reljefa, būvju, ceļu un apauguma punktus, attēlojot tos dažādās krāsās. Lai uzmērīšanas rezultātā iegūtu pēc iespējas detālākus reljefa datus, ieteicamais laiks darbu veikšanai ir koku bezlapu periodā (agrs pavasaris vai vēls rudens). Vislabākais laiks lidojumu veikšanai ir pavasaris, kad ir ilgstoši laika periodi ar lidojumiem labvēlīgiem laikapstākļiem. Primārais nodevums būtu klasificēts 3D punktu mākonis un teritorijas ortofoto. Tālākās darbības ar šiem uzmērījumu datiem:

- teritorijas 2D karšu sagatavošana tūrisma un rekreācijas vajadzībām;
- apvidus 3D modelis ar reālajām aprisēm un tekstūrām (*mesh* modelis);
- reljefa izmaiņu monitorings apvidū, kur novērojama zemes virskārtas slīdēšana. Upju gultņu un krasta erozijas monitorings.

5.2. MĀKSLAS MANTOJUMS UN PRIEKŠMETI

2.1. Nekustamā māksla:

2.1.1. glezniecība, sienu gleznojumi **A B**;

2.1.2. interjeru dekoratīvā apdare, iekārtas **B C**;

2.1.3. tēlniecība, skulptūras, skulpturāli veidojumi **C**.

2.2. Kustamā māksla:

2.2.1. mākslas priekšmeti **A B**;

2.2.2. glezniecība un grafika **A B**;

2.2.3. iespaiddarbi, grāmatas **A B**;

2.2.4. mūzikas instrumenti **A B**;

2.2.5. tekstilijas **B**.

Mākslas darbi ir pieejami daudzveidīgās formās un izmēros, sākot no gleznām un beidzot ar skulptūrām un citām formām. Dokumentējot tos 3D formātā, ir jānodrošina estētiskās kvalitātes saglabāšana, kas ietver precīzu objekta formas un izskata atveidi. Tas rada izaicinājumus saistībā ar komplicētu un detalizētu ģeometriju, kā arī sarežģītām virsmas īpašībām. Materiāla pilnīgais vizuālais izskats veidojas no tā formas un virsmas īpašībām, piemēram, krāsām, spīduma, tekstūras un



Ornāts, Alsunga.
Foto: L. Skujāne, NKMP krājums

caurspīdīguma. Uzmērot mākslas objektu 3D formātā, vienlīdz svarīga ir gan tā forma, gan virsma. Nelielas, spīdīgas, krāsotas keramikas vāzes formas 3D skenēšana var radīt pavisam citus izaicinājumus nekā liela granīta statuja. Vāzes uzmērīšanu var apgrūtināt tās atstarojošā virsma, savukārt statujai var būt grūti piekļūt tās lielā izmēra dēļ. Lai iegūtu vislabāko iespējamo rezultātu, izšķirīga nozīme ir izvēlētajai uzmērīšanas metodei. Par labāko risinājumu ieteicams konsultēties ar speciālistiem vai jāizmēģina dažādas pieejamās metodes. Galvenie uzmērīšanas rezultāti būtu objekta virsmas (*solid, mesh*) modelis ar patieso tekstūru, kā arī 3D punktu mākonis. Sagatavotos modeļus tālāk var izmantot, lai:

- arhivētu objekta esošo stāvokli uzmērīšanas brīdī;
- modeļus varētu integrēt interneta vietnēs un demonstrēt plašākai auditorijai ar 3D skatīkļu palīdzību;
- izgatavotu 3D izdrukas vai kopijas citos veidos;
- digitāli restaurētu, piemēram, modelējot, trūkstošās vai bojātās detaļas.

5.3. ARHEOLOĢIJAS MANTOJUMS:

- 3.1. arheoloģiskās senvietas **FGR**;
- 3.2. arheoloģiskās senvietas ar būvēm **DER**;
- 3.3. arheoloģiskie priekšmeti **AB**.



Vikingu ķivere no Gjermundbu
Foto: Ellen C. Holte, KHM

MODERNO TEHNOLOĢIJU UN METOŽU IZMANTOJUMS SAUSZEMES ARHEOLOĢIJĀ

Mūsdienu arheoloģijā pazemes objektu izpētei arvien vairāk izmanto dažādu tehnoloģiju integrāciju. Tas būtiski palielina kultūras mantojuma izpētes precizitāti. Viens no pamatinstrumentiem, ko aktīvi izmanto šajā jomā, ir ģeoradars. Tomēr, lai sasniegtu vislabākos rezultātus, ģeoradara datus bieži vien kombinē ar citām ģeofizikālām un digitālām metodēm, piemēram, lāzerskenēšanas (LIDAR), fotogrammetrijas un magnetometrijas rezultātiem.

Ar ģeoradaru pazemes struktūras var noteikt ar augstu precizitāti, taču tā iespējas var būtiski uzlabot, ja to izmanto kombinācijā ar citām metodēm. Piemēram, LIDAR izmanto, lai izveidotu īpaši precīzu virsmas reljefa modeli, kas palīdz vizualizēt ainavas izmaiņas, bieži vien norādot uz pazemē esošiem arheoloģiskiem objektiem, piemēram, ēku pamatiem vai apbedījumu pilskalniem. Pēc tam izmanto ģeoradaru, lai detalizētāk izpētītu ar LIDAR identificētos objektus. Šāda pieeja ļauj pētniekiem ne tikai redzēt objekta aprises virszemē, bet arī iegūt informāciju par tā pazemes apjomu. Fotogrammetrija palīdz papildināt ģeoradara datus ar vizuālu informāciju, izveidojot precīzus objektu 3D modeļus. Tas ir īpaši noderīgi, pētot lielus arheoloģiskos objektus vai teritorijas ar plašiem būvju fragmentiem pazemē. Fotogrammetriju var izmantot arī regulārai izrakumu dokumentēšanai, palīdzot fiksēt izmaiņas, kas rodas izpētes gaitā.

Vēl viena svarīga ģeofizikālā metode, ko bieži kombinē ar ģeoradaru, ir magnetometrija. Ar šo metodi var noteikt anomālijas zemes magnētiskajā laukā, ko var izraisīt dzelzs objekti vai objektu ar atšķirīgu magnētisko caurlaidību klātbūtne. Piemēram, gadījumos, kad pazemē atrodas lieli dzelzs artefakti vai seno struktūru metāla elementi, magnetometrija palīdz tos lokalizēt, bet ģeoradars precīzē to dziļumu un formu. Eiropā daudzi atradumi no Otrā pasaules kara laikiem veikti ar magnetometriju. Dažādu metožu datu integrācija paver jaunas iespējas arheoloģiskajiem pētījumiem. Apvienojot ģeoradara, LIDAR un fotogrammetrijas datus vienotā koordinātu sistēmā, ir iespējams izveidot visaptverošu teritorijas karti, kurā var redzēt gan virszemes, gan pazemes objektu precīzu atrašanās vietu. Šādas kartes var izmantot, lai plānotu izrakumus, samazinot kultūras mantojuma objektu bojājumu risku līdz minimumam.

Turklāt ģeoradara datus bieži izmanto, lai analizētu dziļākos augšnes slāņus un identificētu objektus, kas var atrasties citai metodei nepieejamā dziļumā. Piemēram, integrējot ar citām tehnoloģijām, arheologi var rekonstruēt pilnīgu senās apmetnes ainu, atklājot gan virszemes struktūras, gan pazemes tuneļus vai apbedījumus.

MODERNO TEHNOLOĢIJU UN METOŽU IZMANTOJUMS ZEMŪDENS ARHEOLOĢIJĀ

Zemūdens kultūras mantojuma objektu kategorija var ietvert gan kultūrvēsturiskas vietas, kas raksturīgas sauszemei un ir nonākušas zemūdens vidē (senkapi, apmetnes, ēkas u. c.), gan objektus, kas specifiski radīti saistībā ar ūdens infrastruktūru (ostas vietas, tiltu pamati, doki u. c.), kā arī objektus, kas saistīti ar aizsardzību pie ūdenstilpēm (ezermītnes, aizsardzības sistēmas pie pilīm u. c.), un nogrimušu transportlīdzekļu vrakus un to kravas (kuģi, laivas, lidmašīnas u. c.). Šīs vietas ir īpaši vērtīgas ar to, ka, atšķirībā no arheoloģiskā materiāla sauszemē, zemūdens mitrā un bezskābekļa vide nodrošina labu organisko materiālu saglabāšanos ilgā laika periodā, tāpēc darbībām, kas saistītas ar zemūdens kultūras mantojuma vietu izpēti, ir jābūt sevišķi rūpīgām.

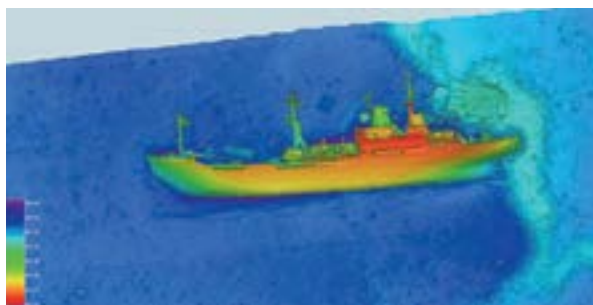
Organizējot zemūdens objektu uzmērīšanu, ir svarīgi izvērtēt atšķirīgās pieejas, kas atkarīgas no dažādiem izpētes mērķiem. Uzmērīšanā ir svarīgi paredzēt tādu digitālo tehnoloģiju izmantošanu, kas var veikt uzmērīšanu ar atbilstošu precizitāti, lai kāds objekts vai detaļa darba procesā netiktu palaista garām. Zemūdens darbos tiek izdalīti trīs veidu izpētes mērķi:

- nezināmu objektu meklēšana konkrētā teritorijā;
- zināmu objektu detalizēta uzmērīšana un dokumentācija;
- kultūras mantojuma objektu monitorings.

Ja mērķis ir apzināt jaunas zemūdens kultūrvēsturiskās vērtības vai meklēt vēsturiskus objektus (piemēram, zudušu kuģu vrakus) pēc arhīvu ziņām, tad visbiežāk nepieciešams uzmērīt samērā lielas ūdens platības, ko veic ar ierīcēm, kuras tver pēc iespējas plašāku laukumu. Tādā gadījumā mērījumos redzami objekti var būt uzmērīti ar salīdzinoši zemu izšķirtspēju, kā rezultātā ir apgrūtināta objekta identificēšana. Attiecīgajā situācijā jāreķinās ar to, ka mērījumi, iespējams, būs jāveic atkārtoti, lai iegūtu precīzākus datus. Plašu teritoriju apzināšanā būtiskākie ir dati par kopējiem objekta izmēriem un aprisēm, kas ir pietiekami precīzi, lai būtu iespējama objekta identificēšana. Nezināmu objektu meklēšanas mērķi pārsvarā ir pakārtoti projektiem, kas saistīti ar jūras teritoriju saimniecisku ekspluatāciju, piemēram, izbūvējot vēja parkus jūrā, ir nepieciešams apzināt visu to izbūves teritoriju, lai darbu laikā netiktu iznīcināti nozīmīgi kultūrvēsturiski objekti.

Veicot zināmu objektu detalizētu uzmērīšanu, pārsvarā mērķis ir iegūt pēc iespējas detalizētākus datus par visiem pētāmā objekta aspektiem. Tādā gadījumā tiek fiksēti konstruktīvie risinājumi, krāsa, tek-

stūra, materiāli, detaļu izmēri, novietojums konkrētās pozīcijās u. tml. Būtisks mērījuma kvalitātes rādītājs ir vienas sistēmas ievērošana un darba procesa aprakstīšana – tas atvieglo kļūdu konstatēšanu un vēlāku labošanu pēc izpētes. Detalizētu dokumentēšanu pētnieku grupas pārsvarā veic zinātniskos nolūkos, lai iegūtu jaunu informāciju par objektiem, to izveidošanos un saglabātības stāvokli. Citos gadījumos pētnieki to dara, lai dokumentētu informāciju par objektiem, kas dabas ietekmē vai saimnieciskās darbības rezultātā tiks iznīcināti vai pārvietoti.



“MV Sevan” vraka
uzmērījums ar
daudzstaru sonāru
(autors: Latvijas
Hidroekoloģijas
institūts)

Jūras vai iekšzemes ūdeņu vides mainīgie apstākļi ietekmē zemūdens objektus, ko kultūras mantojuma pārvaldības nozarē apzīmē kā vietas veidošanās procesu (angļu: *site formation process*). Tā izsekošanai svarīgs ir kultūras mantojuma objekta regulārs monitorings, kas palīdz izprast gan to, kāpēc objekts ir konkrētajā stāvoklī un saglabātības pakāpē, gan to, kāds tas varētu izskatīties nākotnē. Monitoringa veikšanas gadījumā visbiežāk izmantojama kāda no batimetrijas metodēm, jo tās var sniegt visplašāko informāciju par vides izmaiņām. Bieži vien šīs metodes mēdz kombinēt ar citām, tā iegūstot vairāk datu, piemēram, reizi gadā kāds vraks tiek uzņemts ar sānskata sonāru un vizuāli apsekots ar zemūdens dronu. Monitoringā būtiski ir konstatēt apkārtējās vides izmaiņas un to ietekmi uz objektu, tāpēc svarīgi ir izvēlēties metodi, kas dod salīdzināmus datus, piemēram, fotogrāfijas vai dziļummērījumus. Monitoringu parasti veic kultūras mantojuma pārvaldības iestādes un kultūras pieminekļu īpašnieki, tādā veidā reģistrējot izmaiņas un izstrādājot plānus, kā labāk objektu saglabāt ilgtermiņā. Šo izpētes veidu mēdz izmantot arī dabas pētnieki, īpaši jūras biologi, kuru interese pārsvarā ir saistīta ar zemūdens mantojuma objektos esošajām dzīvotnēm. Tas visbiežāk notiek gadījumos, kad objekts ir videi bīstams, piemēram, kāda karakuģa vraks ar

sprāgstvielām izdala ūdenī kaitīgas ķīmiskās vielas, tāpēc ir svarīgi veikt monitoringu, lai konstatētu, kādu ietekmi tas atstāj uz zivīm un citiem zemūdens floras un faunas iemītniekiem.

Izvēloties zemūdens mantojuma objektu uzmērīšanas metodes un tehnoloģijas, būtiska loma ir vides apstākļiem un dziļumam, kādā atrodas pētāmais objekts. Ja objekts ir vairāk nekā 40 m dziļumā, cilvēkam nav iespējams veikt manuāli detalizētu vraka uzmērīšanu zemūdens spiediena dēļ, taču šādos apstākļos piemērota metode ir objekta apsekošana ar zemūdens dronu (šo metodi var izmantot arī seklos ūdeņos). Seklās vietās izpētei zem ūdens nereti var pielāgot sauszemes kultūras mantojuma uzmērīšanā lietotās metodes un tehnoloģijas, piemēram:

- konstrukciju vai vraku fotogrammetriskā uzmērīšana un 3D modeļa izveide ar zemūdens kamerām;
- objekta uzmērīšana ar dažādām GPS mērierīcēm (seklos ūdeņos), piemēram, tahimetru;
- skenēšana ar ģeoradaru (GPR), ierīci ievietojot laivā vai uz cita ūdens transportlīdzekļa;
- metāla detaļu lokalizēšana ar zemūdens metāla detektoru.

Līdzās tam pastāv arī tehnoloģijas, kas radītas specifiski zemūdens izpētei. Tās ir batimetriskās mērīšanas tehnoloģijas (sonāri) un zemūdens drons ar aprīkotu kameru. Metožu izvēli samērā reti nosaka finansiālais izdevīgums, drīzāk vides apstākļi un uzmērīšanā iesaistīto cilvēku kvalifikācija. Izmantotās tehnoloģijas un metodes vienmēr būs pakārtotas sasniedzamajiem mērķiem, taču, jo vairāk dažādu veidu tehnoloģiju pieejams izpētē, jo plašāks ir iegūto datu spektrs, ko iespējams izmantot turpmākajos pētījumos.

Veicot jebkādus zemūdens darbus, primāri ir jānodrošina cilvēku veselība un drošība. Tieši drošības pasākumi veido lielu daļu sadārdzinājuma. Tiesa, zemūdens objektu uzmērīšanas procesā ne vienmēr



Kuģa vraka fotofiksācija ar zemūdens kameru (autors: Zemūdens kultūrvēsturiskā mantojuma asociācija)

cilvēkam ir nepieciešams atrasties zem ūdens – lielu daļu metožu var izmantot no laivas vai kuģa, kas samazina drošības riskus iesaistītajiem cilvēkiem. Taču šādā gadījumā iegūto datu kvalitāte ne vienmēr būs atbilstoša izvirzītajiem mērķiem. Katra metode ir atkarīga no dažādiem vides apstākļiem, kas jāņem vērā. Piemēram, kuģa vraka dokumentēšana straumes apstākļos, iespējams, būs precīzāka, ja to veiks nirējs ar zemūdens kameru, uzmanīgāk manevrējot un uztverot apkārtējo vidi ar dabīgajām maņām, nekā zemūdens drons, kam ne vienmēr ir pietiekami labs motors, lai noturētos straumē un, labākajā gadījumā, ir tikai viena mehāniskā roka (manipulators), ko var izmantot darbā. Toties situācijā, kad objekts atrodas cilvēkam grūti sasniedzamā vai nesasniedzamā dziļumā, ar dronu informāciju iespējams ievākt krietni īsākā laikā un ar daudz mazākiem resursiem. Dronu izmantošana pēdējos gados kļūst arvien izplatītāka, jo tehnoloģiju attīstība ļauj lietot arvien vairāk dažādu metožu – ne tikai vizuālo apsekošanu, bet arī automātisko fotogrammetriju, paraugu ņemšanu, batimetriskos mērījumus u. c. Ir divu veidu zemūdens droni – attālināti vadāmie (*remotely operated vehicle*, ROV) un automātiskie droni (*automatic underwater vehicle*, AUV). Vietu apsekošanai visbiežāk izmanto ROV, jo tie ir ērti vadāmi no attāluma un spēj nokļūt lielos dziļumos. Savukārt plašu teritoriju kartēšanai vai fotogrammetrijai biežāk izmanto AUV, kuram tiek manuāli ievadīts uzmērāmais maršruts un veicamais uzdevums, ko tas veic bez attālinātas vadības. Dronu izstrādes industrija ir diezgan attīstīta, tāpēc tehnisko parametru un lietošanas iespēju ziņā ir liela izvēle. Starp zināmākajiem ražotājiem ir uzņēmumi *Deep Trekker*, *Fugro NV*, *Chasing* u. c. Latvijā zemūdens dronus ražo *Submerge Baltic* un *Eprons ROV*.



Vraka apsekošana un
fotofiksācija ar zemūdens
dronu (autors: K. M. Molls)

Veicot batimetrijas mērījumus, gandrīz visos gadījumos ir vajadzīgi labi laikapstākļi un mazs vēja ātrums. Turklāt vislabākos rezultātus iespējams iegūt, ja vējš pūš no krasta. Veicot zemūdens fotogrammetriju, vajadzīga laba redzamība zem ūdens, ko ietekmē gan laikapstākļi,

gan zemūdens fauna. Vislabākie apstākļi šiem darbiem ir pavasarī, kad ūdens augi vēl nav sazaļojuši. Šo faktoru dēļ iegūto fotogrāfiju kvalitāte var būt nederīga izvirzītajam uzmērīšanas mērķim.

Zemūdens kultūras mantojuma objektu dokumentēšana no finansiālā aspekta ir izdevīgāka par objekta izcelšanu no ūdens, jo objektu, kas pavadījis vairākus gadu desmitus vai simtus zem ūdens, izceļot no ūdens, ir nepieciešams konservēt un pēc tam arī ilgtermiņā uzglabāt. No ūdens izcelts kuģa vraks pat pēc konservācijas turpinās degradēties, kas ir liels resursu un finanšu izaicinājums. Tehnoloģiju izmantošana šo objektu dokumentēšanai zem ūdens var būt krietni lētāks pasākums un prasīt mazāk resursu.

Uzmērīšanas metožu izvēle dažreiz var būt pakārtota valstī noteiktajiem tiesiskajiem regulējumiem, piemēram, vairākās Eiropas valstīs un arī citur pasaulē ir aizliegts nirt un veikt fizisku izpēti karakuģu vrakos, kas atzīti par karavīru mirstīgo atlieku atdusas vietām. Šajā gadījumā vienīgais veids, kā var veikt objekta izpēti, ir izmantot no attāluma lietojamas tehnoloģijas, kas neiejaucas objekta struktūrās. Tomēr tās ne vienmēr dod visefektīvākos rezultātus, piemēram, izmantojot batimetriskās uzmērīšanas metodes, netiek iegūta informācija par objekta krāsām un tekstūru.

Atkarībā no uzmērīšanas metodes pirmdatus nepieciešams apstrādāt pirms to publicēšanas vai publiskas izmantošanas. Ja darbs tiek veikts ar batimetriskajām mērīšanas ierīcēm, ir jāapgūst atbilstošu programmu lietošana datu apstrādei, citādi pieejami būs tikai punktu mākoņi. Ņemot vērā, ka ir dažādas batimetriskās uzmērīšanas ierīces un atbilstošās programmas, detalizētāk par to var skatīt 6. nodaļas sadaļā par batimetrisko mērīšanu.

Zemūdens darbos iegūtie attēli parasti ir jāuzlabo ar kādu attēlu apstrādes programmu (piemēram, *Adobe Photoshop*, *Corel Photo-Paint* u. c.), jo pat labos zemūdens redzamības apstākļos objektu tekstūras izskats un krāsas ir mainījušās ūdens ietekmē. Pēdējā laikā ir izstrādātas vairākas ar mākslīgo intelektu darbinātas zemūdens attēlu uzlabošanas programmas un modeļi, kas automatizē šo procesu (*NVIDIA Jetson AGX Orin, Underwater Image Enhancement Benchmark Dataset and Beyond* u. c.).

Iegūtos attēlus var izmantot gan dažādām publikācijām, gan arī fotogrammetrisko 3D modeļu veidošanā. Ņemot vērā, ka 3D modelim nepieciešams liels daudzums fotogrāfiju, to apstrādē visērtāk ir rast iespēju izmantot automatizētu attēlu uzlabošanas programmu. Fotogrammetriskā modeļa izveidošanas principi zemūdens objektam ir tādi paši kā sauszemes objektiem (skatīt 6. nodaļu).



Pludmalē izskalota kuģa vraka
3D modelis
(autors: M. Kalniņš)

legūtos datus galvenokārt var izmantot pētniecībā vai zemūdens pasaules eksponēšanā sabiedrībai. Ņemot vērā, ka datu par zemūdens kultūras mantojumu ir ļoti maz, labā prakse ir visu pēc iespējas publicēt, lai to varētu izmantot gan pētnieki visā pasaulē, gan sabiedrība, lai uzzinātu vairāk par pārsvarā nepieejamām kultūras vērtībām. Viens no vēlamajiem risinājumiem ir iesniegt datus NKMP un Latvijas Nacionālajam vēstures muzejam, tādējādi nodrošinot pētniekiem tiešu piekļuvi šiem datiem. Datus ir iespējams arī publicēt kādā no tiešsaistes brīvpieejas vietnēm, piemēram, *Sketchfab* (3D modeļiem), *Academia.eu* vai *ResearchGate* (zinātniskām publikācijām), *Latvijas pilskalni un servietas* (datiem par aizvēstures un viduslaiku vietām entuziastiem) u. c.

5.4. INDUSTRIĀLAIS MANTOJUMS



Hakavik (NOR) hidroelektrostacija
(autors: Riksanikvaren)



Drabešu vējdzirnavas.
Foto: E.Šulcs, NKMP krājums

5.4.1. Kustami objekti B C.

5.4.2. Nekustami objekti.

Nekustami objekti ir iekļauti būvētā mantojuma sastāvā.

Industriālā mantojuma objektu klāsts ir ļoti plašs. Daļa no objektiem ir speciālas nozīmes ēkas ar atbilstošu aprīkojumu un mehānismiem, piemēram, hidroelektrostacijas un vējdzirnavas. Otrā daļā ir dažāda veida priekšmeti, agregāti un pat transportlīdzekļi.

Plašāk par industriālā mantojuma uzmērīšanas praksi var izlasīt 9. nodaļā.

MODERNĀS UZMĒRĪŠANAS METODES UN TEHNOLOĢIJAS

Šajā nodaļā sniegts pārskats par pašlaik izmantotajām uzmērīšanas tehnoloģijām, to darbības pamatprincipiem, iespējām un priekšrocībām. Lai precīzi izvēlētos savām vajadzībām piemērotāko uzmērīšanas veidu, ir būtiski izprast pieejamo tehnoloģiju klāstu un to specifiskās īpašības. Objektu tipi un iespējamās uzmērīšanas vajadzības aplūkotas iepriekšējā nodaļā.

6.1 ROKAS UN STACIONĀRIE BEZKONTAKTA GAISMAS ATSTAROŠANAS TIPA SKENERI

Darbības princips

Šo skeneru darbības pamatprincips balstās uz gaismas izstarošanu pret objektu un mērījumu veikšanu, analizējot atstarotās gaismas ātrumu. Skenera sensors fiksē laiku, kādā gaisma atstarojas no virsmas, tādējādi nosakot katra uzmērījuma punkta attālumu no skenera līdz virsmai XYZ koordinātu sistēmā.



Rokas 3D lāzerskenera darbības princips
(autors: J. Heinsbergs)

Šādi skeneri vidēji vienā sekundē iegūst mērījumus par diviem miljoniem punktu.

Skeneri var atšķirties atkarībā no izmantotā gaismas spektra, kas tieši ietekmē uzmērījuma precizitātes rādītājus. Arī šo skeneru grupā pastāv dažādas precizitātes klases, sākot no 0,01 mm līdz 1 mm precizitātei. Būtisks skenera darbības rādītājs ir arī uzmērījumu izšķirtspēja, kas ir attālums starp uzmērījuma punktiem uz objekta virsmas. Ir svarīgi, lai pasūtītājs skenēšanas darba uzdevumā norādītu, kuras ir objekta sīkākās detaļas, kam jābūt uzmērītām (redzamām). Atkarībā no precizitātes un izšķirtspējas prasībām uzmērīšanas speciālistam jālieto atbilstošs instruments un uzmērīšanas tehnika.



Zemas un augstas izšķirtspējas 3D
uzmērījumi
(autors: Riksanikvaren)

Lielākā daļa skeneru uzmērījumu rezultātā iegūst modeli, kas attēlo tikai objekta virsmu bez patiesajām krāsām. Tehnoloģijām un tirgum attīstoties, vairums ražotāju cenšas savā skeneru piedāvājumā iekļaut arī tādas ierīces, kas spēj noskenēt gan objekta virsmu, gan tā tekstūru. Pagaidām krāsu skeneri tiek piedāvāti kategorijā ar precizitāti līdz 0,1 mm.

Skeneru ražotājiem un pakalpojumu sniedzējiem parasti ir pieejami dažādi skeneru modeļi, kas piemēroti atšķirīga izmēra objektiem. Piemēram, skeneris, ar kuru mēra vēsturisku durvju atslēgu, nebūs piemērots divu metru augstas skulptūras skenēšanai.

Uzmērīšanas process

Uzmērīšanu parasti veic viens skenēšanas operators, ar skeneri virzoties ap objektu vai priekšmetu. Ja priekšmets ir maza izmēra, to var novietot uz rotējošas platformas. Skenēšanas laikā operators seko līdzi uzmērītās virsmas apjomam datora vai ierīces kontroles monitorā. Operatoram ir būtiski redzēt uzmērīto platību reālajā laikā, lai pamanītu neuzmērītās vietas. Objekta uzmērīšanas laiku tieši ietekmē objekta veids un piekļuves sarežģītība. Tomēr arī sarežģītu objektu skenēšanai ar rokas skeneri vajadzīgs ne vairāk kā dažas stundas.

Grūti pieejamās vietās operatoram nepieciešams palīgs. Uzmērīšanas brīdī skenerim ir svarīgi atrasties tiešā objekta virsmas tuvumā, lai iegūtu datus atbilstošā kvalitātē.

Atkarībā no objekta un skenera tipa operators var izmantot papildu marķējumu. Marķējums šajā gadījumā ir uz virsmas neregulāri izvietotas apaļas melnbaltas uzlīmes. Marķējumu izvieta uz objekta vai uz speciāli sagatavotas uzmērīšanas virsmas, ja objektu ir iespējams uz tās novietot. Vēsturisku priekšmetu un objektu virsma visbiežāk ir nelīdzena vai ar izteiktu faktūru, tādēļ papildu marķējumu uz paša objekta parasti nelieto. Lai iegūtu 3D uzmērījuma datus par visām objekta virsmām, uzmērīšanas laikā tiek sagatavoti vairāki atsevišķi uzmērījuma fragmenti, kurus savienojot tiek iegūts pilnīgs objekta virsmas uzmērījums. Svarīgi ir ievērot uzmērījumu fragmentu malu pārkļāšanos, lai būtu iespējama precīza savietošana.



Uzmērīšanas process, izmantojot 3D rokas skeneri (autors: A. Ābele)

Prasības objektam un nelabvēlīgi apstākļi

Lai veiktu 3D uzmērīšanu, objektam jābūt attīrītam no netīrumiem, kuri var izmainīt virsmas reljefu un tieši ietekmēt uzmērījumu atbilstību patiesajām objekta formām. Īpaša uzmanība jāpievērš, uzmērot spīdīgus priekšmetus, jo to virsma atstaro uzmērījuma starus neprecīzi. Spīdīgās virsmas pirms uzmērīšanas tiek matētas ar speciāla matējoša aerosola palīdzību.

Uzmērījumu rezultāts.

Uzmērījumu rezultātā tiek sagatavots objekta 3D *solid* virsmas modelis patiesajā mērogā. Atkarībā no skenera tipa objekta virsma ir bezkrāsaina vai ar patieso tekstūru (krāsām).

Solid uzmērījuma modeļa faila formāts ir *.stp*. *Solid* failu izmēri ir atkarīgi no objekta lieluma un modeļa izšķirtspējas un parasti nepārsniedz 100 MB. Objektu publicēšanai interneta vidē visbiežāk izmanto *mesh* modeļus *.obj* formātā. **Skat. nodaļu "Droša datu glabāšana ilgtermiņā".** Bez maksas aplūkošanas programmās ir iespējams atvērt 3D modeli, to rotēt un pietuvināt.



Objekta 3D modelis no dažādiem skata punktiem (autors: A. Ābele)

Lai veiktu tālāku modeļa apstrādi drukai, mēroga maiņai vai modifi-
cēšanai, ir nepieciešama specializēta programmatūra un speciālista
konsultācija.

Uzmērījuma prasību definēšana.
Nepieciešamā informācija uzmērīšanas darbu veicējam.

Objekta informācija pakalpojuma sniedzējam piedāvājuma sagatavošanai
Objekta attēls, izmēri
Uzmērījuma mērķa apraksts (<i>būtisks, jo tas palīdz konsultantam precīzāk izprast va- jadzību un izvēlēties piemērotāko uzmērīšanas tehnoloģiju un nodevuma sastāvu, ņemot vērā labās prakses principus</i>)
Norādīt sīkākās detaļas, kuras ir būtiski saskatīt uzmērījumā
Pārvietojamība (ja objektu nevar pārvietot pie pakalpojuma sniedzēja, ir jānorāda tā atrašanās vieta)
Novietojums (telpās vai ārpusē, vēlams fotoattēls)

Uzmērīšanas prasības	Izvēles
Precizitātes minimums	0,02–0,1 mm
Krāsainība	Krāsains/melnbalts
Primārie nodevuma formāti	
3D solid modelis	.stp
3D mesh modelis	.obj, .stl, .fbx
3D punktu mākonis	.e57, .xyz

6.2 SKENĒŠANA AR FOTOKAMERU

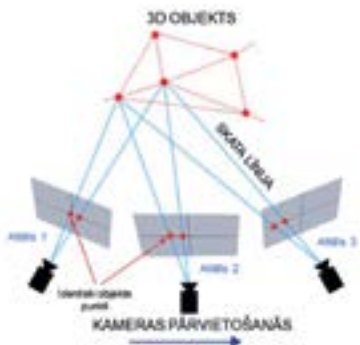
6.2.1 Fotogrammetrijas metode

Darbības princips

Šī uzmērīšanas metode, saukta arī par fotogrammetriju, balstīta uz
augstas izšķirtspējas fotogrāfijām, kurās objekts uzņemts no dažā-
diem leņķiem. Priekšnoteikums 3D formas uzmērīšanai ir fotogrā-
fiju pārklāšanās par vismaz 60 % tādā veidā, lai konkrēti objekta
punkti būtu redzami vismaz trijās fotogrāfijās. Ar modernu dator-
programmu algoritmu palīdzību no fotogrāfijām tiek iegūti dati par
objekta 3D formu. Fotogrāfiju krāsas ir lielisks informācijas avots,
lai 3D uzmērītajiem objektiem piešķirtu foto reālistiskas krāsas –
tekstūru.

Precizitāte un izšķirtspēja

Fotogrammetrijā ar fotokameru ierastais uzmērījumu izšķirtspējas
diapazons ir no 1 līdz 10 mm. Iespējama arī augstāka izšķirtspēja ar
specializētu fototehniku. Uzmērījuma precizitāti un izšķirtspēju ietek-
mē vairāki faktori. Aplūkosim būtiskākos no tiem.



Kameras pārvietošana ap objektu, saglabājot vienmērīgu attēlu pārkļājumu (autors: M. Kaļinka)



Fasādes elementa fotogrāfija ar augstu un zemu izšķirtspēju (autors: J. Heinsbergs)

Foto izšķirtspēja. Pikseļu skaits attēlā. Jo augstāka ir attēlu izšķirtspēja, jo lielāka iespēja sasniegt augstu precizitāti. Fotogrammetrijas darbos parasti izmanto kameras ar sensora izmēru virs 8 MP.

Apgaismojums. Objektam ir jābūt vienmērīgi labi izgaismotam, lai fotografēšanas laikā varētu maksimāli izmantot fotokameru sniegtās ekspozīcijas laika un attēlu dziļuma regulēšanas iespējas.

Kameras kalibrēšana. Kalibrēšana ir process, kurā tiek noteikts kameras fokusa attālums, formāta izmērs, galvenais punkts un objektīva izkropļojumi. Ar to ir saistīti divi apakšfaktori: a) dažas kameras nekalibrēšanas pietiekami precīzi (ļoti plata leņķa vai *fisheye* objektīvi) un b) dažas kameras ir nestabilas (kalibrēšanas izmaiņas). Abos gadījumos precizitāte būs zemāka. Savukārt augstas kvalitātes objektīvs un stabila kamera nodrošinās labākus rezultātus.

Kameras pozīciju izkliešana. Punktiem un objektiem, kas parādās tikai fotogrāfijās ar ļoti zemu leņķi (piemēram, punkts parādās tikai divās fotogrāfijās, kuras uzņemtas ļoti tuvu viena otrai), ir daudz zemāka precizitāte nekā punktiem fotogrāfijās, kas atrodas tuvāk 90 grādiem. Nodrošinot, ka kameras pozīcijām ir labs izkliešanās, tiks panākti labāki rezultāti.



Fotogrāfiju izvietojums ap objektu
3D uzmērījuma iegūšanai
(autors: M. Kaļinka)

Foto pārklājums. Punkta vai objekta pozīcija tiek aprēķināta precīzāk, ja tā parādās vairākās fotogrāfijās. Ieteicamais pārklājums ir vismaz 60 %, kas nozīmē, ka objekta elements ir redzams ne mazāk kā trīs fotogrāfijās no dažādiem leņķiem ar labu izsklaidi.

Mēroga marķieri. 3D punkta precizitāte ir saistīta ar tā atrašanās vietas precizitāti attēlos. Šo attēlu pozicionēšanu var uzlabot, izmantojot marķierus. Fotogrammetrijas apstrādes programmas izmanto attēlu datus, lai pikseļu daļas līmenī atzīmētu punktu, kas palielina tā izvietojuma precizitāti un visa uzmērītā objekta relatīvo precizitāti. Marķieri tiek izmantoti arī tādēļ, lai palielinātu uzmērījuma absolūto precizitāti – atbilstību faktiskajiem priekšmeta izmēriem dabā.

Foto tehnikas un programmatūras pieejamības dēļ fotogrammetrija ir izplatīta metode dažādu vēsturisku priekšmetu, ēku fasāžu un interjera detaļu uzmērīšanā.

Fotogrāfiju skaits vienam fotogrammetrijas objektam atkarībā no tā izmēra var būt no 50 līdz pat vairākiem tūkstošiem. Jāņem vērā, ka fotogrāfiju pēcapstrāde fotogrammetrijas programmās aizņem būtisku datora operatīvās atmiņas daļu un videokartes resursus. Šī iemesla dēļ plaši izplatīti ir fotogrammetrijas programmu mākoņpakalpojumi, kas ļauj lietotājam izmantot neierobežotus datu pēcapstrādes resursus. Skat. nodaļu “Datu apstrādes programmatūra”.

Uzņemtos digitālos attēlus var saglabāt dažādos formātos: JPEG, TIFF, PNG, RAW. Visbiežāk lietotais formāts ir JPEG. Jāņem vērā, ka JPEG ietver datu saspiešanu ar kvalitātes zudumiem, lai samazinātu failu lielumu. Ir iespēja lietot failu formātus bez kvalitātes zudumiem (*lossless*), piemēram, RAW un TIFF, bet tas nozīmē lielus datu apjomus. Praktiskā pieredze liecina, ka arī JPEG dod pietiekami labu rezultātu.

Uzmērīšanas process

Objekta fotografēšanu parasti veic viens operators, virzoties ap objektu vai rotējot objektu fiksētas kameras priekšā. Katra nākamā

kadra pozīcija ir 10–20 grādi pret iepriekšējo. Svarīgi, lai uzmērāmais objekts vienmēr atrastos kadra centrā. Kameras attālumu līdz objekta virsmai nosaka objekta izmērs. Jo lielāks ir objekts, jo lielāks būs arī fotografēšanas attālums, lai saglabātu labu objekta kadrējumu. Augstāku detalizāciju lielākiem objektiem var panākt, izmantojot augstākas izšķirtspējas fotokameru.



Sienas dekora fotografēšana un uzmērījuma rezultāts (autors: *Riksantikvaren*)

Fotografēšanas procesā būtiska nozīme ir viendabīgai, izkliedētai gaismai, kas nerada izteiktas ēnas. Ja fotografēšana nenotiek brīvā dabā, foto operatoram rūpīgi jāseko līdzi kadra ekspozīcijas laikam, lai fotogrāfijas nebūtu pārāk tumšas vai, tieši pretēji, pārgaismotas.

Fotogrāfiju pēcapstrāde, no 2D fotoattēliem izveidojot 3D objektu, ir gandrīz pilnībā automātiska, un to veic ar modernu fotogrammetrijas programmatūru. Skat. nodaļu “Datu apstrādes programmatūra”.

Prasības objektam un nelabvēlīgi apstākļi

Lai veiktu 3D uzmērīšanu ar fotogrammetrijas metodi, objektam jābūt attīrītam no netīrumiem, kuri izmaina virsmas reljefu un var tieši ietekmēt uzmērījumu atbilstību patiesajām objekta formām. Īpaša uzmanība jāpievērš objekta izgaismošanai. Objektus, kuri atrodas brīvā dabā, labāk uzmērīt mākoņainā dienā vai jālieto saulesargi, kas izkliedē saules gaismu un nerada ēnas.

Uzmērījuma rezultāts

Fotoattēlu pēcapstrādes rezultātā iegūstam 3D uzmērījumu krāsaina punktu mākoņa un *mesh* modeļa formā. Failu izmērs ir tieši atkarīgs no punktu mākoņa blīvuma un objekta izmēriem. Failu lielums var būt daži desmiti MB līdz pat vairākiem GB. Turklāt jāņem vērā, ka faili, kas satur tekstūras informāciju, var būt vairāki un vienmēr jālieto kopīgā arhīvā.

Uzmērījuma prasību definēšana.

Nepieciešamā informācija uzmērīšanas darbu veicējam.

Objekta informācija pakalpojuma sniedzējam piedāvājuma sagatavošanai
Objekta attēls, izmēri
Uzmērījuma mērķa apraksts (<i>būtisks, jo tas palīdz konsultantam precīzāk izprast vajadzību un izvēlēties piemērotāko uzmērīšanas tehnoloģiju un nodevuma sastāvu, ņemot vērā labās prakses principus</i>)
Norādīt sīkākās detaļas, kuras ir būtiski saskatīt uzmērījumā
Pārvietojamība (ja objektu nevar pārvietot pie pakalpojuma sniedzēja, jānorāda tā atrašanās vieta)
Novietojums (telpās vai ārpusē, vēlams fotoattēls)

Uzmērīšanas prasības	Izvēles
Precizitātes minimums	1–10 mm
Krāsainība	Patiesā tekstūra
Primārie nodevuma formāti	
3D mesh modelis	.obj, .dxf (pēc vajadzības)
3D punktu mākonis	.e57, .las
Fotogrāfijas	.jpeg vai .tiff, .png, .raw (pēc nepieciešamības)

6.2.2 RTI metode

Darbības princips

RTI (*Reflectance Transformation Imaging*) ir salīdzinoši jauna metode, kuru izmanto priekšmetu virsmu kartēšanai un mikroreljefa pētījumiem. Metodes pamatā ir vairāku augstas izšķirtspējas fotogrāfiju uzņemšana, mainot apgaismojuma leņķi, bet saglabājot fotokameras pozīciju fiksētu. Fotogrāfijas tiek apstrādātas datorprogrammā, un rezultātā tiek iegūta 2D fotogrāfija, kurā var dinamiski mainīt apgaismojumu un saskatīt virsmas reljefa nianšes. Metode tiek veiksmīgi izmantota arheoloģijā, mākslas zinātnē un paleontoloģijā (Jager et al., 2018; Hammer et al., 2002).

Atkarībā no objekta izmēra un novietojuma RTI uzmērīšanu veic dažādos apstākļos un veidos. Maziem priekšmetiem augstvērtīgus rezultātus var iegūt, izmantojot īpašu gaismas kupolu ar iebūvētu vietu fotokameras un LED gaismekļiem.

RTI metode veiksmīgi izmantojama arī objektu uzmērīšanai bez gaismas kupola, ievērojot RTI fotografēšanas principus. Fotogrāfiju izšķirtspēju RTI vajadzībām ietekmē objekta izmērs un kameras sensora izmērs. Visbiežāk RTI projektiem izmantotā izšķirtspēja ir 4000 x 3000 pikseli, kas nodrošina pietiekamu objekta detalizāciju un optimālu faila izmēru.



Sienas gleznojuma fotogrāfēšana ar RTI metodi.

Foto: Gunnar Almevik

Uzmērīšanas process

RTI uzmērīšanā tiek izmantotas augstas izšķirtspējas digitālās fotokameras. Fotografēšanas laikā fotokameras pozīcija tiek fiksēta. Pirms fotografēšanas jāpārliedzina, ka objekts ir stabils un nekustīgs. RTI izmanto gan mazu atsevišķu priekšmetu, gan sienas fragmentu uzmērīšanā. Fotografēšanas laikā tiek uzņemtas vairākas fotogrāfijas, mainot gaismas avota leņķi uz katru attēlu. Parasti tie ir 40–60 objekta fotoattēli ar dažādiem apgaismojuma leņķiem.

Attēlu pēcāpstrādē programmatūras algoritmiem ir svarīgi identificēt precīzu gaismas avota leņķi pret objektu, tādēļ tiek izmantoti speciāli lodveida marķieri (*Reference ball*). Marķierus novieto tiešā objekta tuvumā. Iegūto fotoattēlu pēcāpstrādē tiek veikta speciālās datorprogrammās (piemēram, *RTIBuilder* un *RTIViewer*), kuras analizē, kā objekts atstaro gaismu katrā no fotogrāfijām, un galarezultātā izveido 2D interaktīvu failu, kurā iekļautas visas uzņemtās fotogrāfijas.

Prasības objektam un nelabvēlīgi apstākļi

Ja objekts nav pārvietojams uz speciāli aprīkotu telpu RTI uzmērījumu veikšanai, ir būtiski nodrošināt brīvu piekļuvi objekta virsmai, lai tur uz statīva var novietot fotokameru un operatoram ir iespēja brīvi pārvietoties gar objekta virsmu.

Uzmērījuma rezultāts

Pēcāpstrādes rezultātā programmas ģenerē interaktīvu 2D failu, kurā iespējams apskatīt objektu, virtuāli mainot gaismas leņķi ap to. RTI metodes nodevuma failu biežākie formāti ir:

- PTM (*Polynomial Texture Maps*) paplašinājums *.ptm*. Fails satur informāciju par gaismas atstarošanās koeficientiem no objekta virsmas;
- HSH (*Hemispherical Harmonics*) paplašinājums *.hsh*. Šis formāts nodrošina detalizētāku un precīzāku virsmas apgaismojuma attēlojumu.

Abu formātu nodevumi aplūkojami bezmaksas programmā *RTIViewer*.

Uzmērīšanas prasības	Izvēles
<i>Izšķirtspēja</i>	<i>Standarts 4000 x 3000 pix</i>
<i>Krāsainība</i>	<i>Patiesā tekstūra</i>
<i>Primārie nodevuma formāti</i>	
<i>RTI interaktīvs fails</i>	<i>.ptm, .hsh (pēc vajadzības)</i>
<i>Fotogrāfijas</i>	<i>.jpeg vai .tiff, .png, .raw (pēc nepieciešamības)</i>

6.3 FOTOSKENĒŠANA AR MULTIROTORU BEZPILOTA LIDAPARĀTU

Darbības princips

Multirotoru bezpilota lidaparāts (*unmanned aerial vehicle*, UAV) ir piemērots vēsturisku objektu fotoskenēšanai, jo ir viegli manevrējams no pozīcijas uz pozīciju. Turklāt tam piemīt svarīga īpašība – spēja gaisā ieņemt statisku pozīciju.



Bezpilota lidaparāts ar fotokameru (Adobe stock)

UAV ar aprīkots ar augstas izšķirtspējas fotokameru, un objekta fotoskenēšanas princips ir tāds pats kā rokas kameru. Fotoattēliem jābūt augstai izšķirtspējai un jāpārklājas vismaz par 60 %. UAV tiek izmantots, lai iegūtu fotogrāfijas no augstākiem skata punktiem tādiem objektiem kā ēku fasādes, jumti, pieminekļi u. c., kur piekļūt ar rokas fotokameru nav iespējams. Veicot ēkas uzmērīšanu ar UAV, pilots lidaparātu vada manuāli un cenšas ievērot vienādu distanci pret objektu, cik to atļauj apkārtējais apaugums vai apbūve. UAV lietošana nav piemērota izteikti šaurās un tumšās zonās.

Ar šo metodi nav iespējams uzmērīt izteikti tumšas zonas (izteiktas ēnas, dobumi, stūri), jo šajās zonās iegūtie dati nav izmantojami tālākām darbībām.



Fotogrāfiju novietojums
ap objektu 3D uzmērījuma
veidošanai
(autors: M. Kaļinka)

Lielāku objektu uzmērīšanā fotogrammetrijas pēcapstrādes programmas ļauj vienā projektā apvienot fotogrāfijas, kas uzņemtas gan ar rokas fotokameru, gan ar UAV.

Tāpat kā mazāku priekšmetu fotogrammetrijā, arī lielāku objektu uzmērīšanā izmanto marķierus gan uz zemes, gan fasādes. Objektam, kas ir uzskatāms par nekustamu mantu vai īpašumu, būtiska ir piesaiste koordinātu sistēmai. Ja marķieri ir ģeodēziski uzmērīti un to centriem ir zināmas koordinātas un absolūtā augstuma vērtība (virs jūras līmeņa), tad objektam būs zināma atrašanās vieta.



Uzmērīšanas marķieri
ēku uzmērīšanas procesā
(autors: M. Kaļinka)

TERITORIJU UZMĒRĪŠANA

UAV fotoskenēšanu plaši izmanto arī plašāku teritoriju uzmērīšanā, veicot maršruta veida lidojumu virs uzmērāmās platības. No uzņemtajām fotogrāfijām iespējams sagatavot teritorijas 3D uzmērījumu, kā arī augstas izšķirtspējas 2D ortofoto attēlu. Lidojuma uztādījumi var nedaudz atšķirties atkarībā no prioritārā lidojuma mērķa. Lidojuma augstumu nosaka UAV pilots, primāri novērtējot apstākļus droša lidojuma veikšanai.



Fotogrāfiju novietojums virs objekta apvidus modeļa izgatavošanai (autors: M. Kaļinka)

Lidojumi teritorijas uzmērīšanai no gaisa parasti tiek veikti autonomā režīmā pēc iepriekš izstrādāta lidojuma plāna. Lidojuma plānus var sagatavot dažādās tiešsaistes datorprogrammās, un to izveide bieži vien ir bez maksas. Lidojuma laikā lidojuma plānam jābūt atvērtam konkrētajā datorprogrammā. Tādēļ ir svarīgi, lai izvēlēta programmatūra ir saderīga ar konkrēto UAV modeli. Autonomais lidojums tiek kontrolēts un aktivizēts no UAV kontroles pults, kurā atvērts lidojuma plāns.

Lidojuma plāna svarīgākie uzstādījumi:

- lidojuma augstums, kas tieši ietekmē fotoattēlu izšķirtspēju dabā un lidojuma ilgumu;
- lidojuma ātrums: 2–3 m/s. To samazina, ja lidojums jāveic apstākļos ar vāju apgaismojumu. Jaunākie UAV modeļi ļauj fotografēt jau ar lidojuma ātrumu 5 m/s, ko nodrošina uzlabotais fotosensors;
- kameras leņķis: 3D uzmērījumiem parasti izmanto 60–65° leņķi. Ortofoto izgatavošanai piemērotāks ir 90° kameras leņķis (*Nadir*);
- attēlu pārklājums 75 % (*Front overlap*) un sānu pārklājums 80 % (*Side overlap*). Tieši ietekmē lidojuma ilgumu, un parasti ar šiem uzstādījumiem necenšas eksperimentēt;
- lidojuma līniju virziens. Viens lidojuma virziens ir pietiekams ortofoto izgatavošanai. 3D uzmērījumam ir ieteicami divi lidojuma virzieni, kas veido viendabīgu lidojuma līniju režģi virs objekta.

Lai nonāktu līdz precīzam teritorijas 3D uzmērījumam vai 2D ortofoto, ir svarīgi fotogrāfiju pēcapstrādes posmā izmantot zemes marķierus (*ground control points*, GCP). Lai šī metode nodrošinātu 2–3 cm precizitāti, marķieriem ir jāatbilst šādām pamatprasībām:

- vienmērīgs izvietojums ap objektu un tā centrā;
- atklāts novietojums vietās, kurus nesedz koku lapotnes un ēkas. Ja iespējams, vēlams marķieri novietot dažādos augstuma līmeņos gan uz zemes, gan jumta;



Lidojuma plāna shēma pilsētas kvartāla fotografēšanai ar UAV (autors: J. Heinsbergs)



Marķieri pie objekta uzmērījumu veikšanai ar UAV (autors: J. Heinsbergs)

- atbilstošs izmērs un noformējums. Pārāk mazam vai neatbilstošā krāsā izgatavotam marķierim ir grūti identificēt centru un precīzi piešķirt koordinātas;
- uzmērīts centrs. Šajā gadījumā visiem marķieriem jābūt obligāti uzmērītiem, izmantojot elektronisko tahimetru vai GNSS ierīci.

Uzmērīšanas process

Atkarībā no objekta izmēra un atrašanās vietas uzmērīšanas process var ilgt no dažām stundām līdz vairākām dienām. Pirms ierašanās objektā pilots veic sagatavošanās darbus, kas saistīti ar lidojuma atļauju saņemšanu (ja nepieciešams), zemes marķieru novietojuma un lidojuma plānu sagatavošanu. Sākot uzmērīšanas darbus, teritorijā tiek izvietoti un uzmērīti zemes marķieri (GCP) un precizēts lidojuma plāns atbilstoši faktiskajiem apstākļiem.

Kad sagatavošanās darbi pabeigti, pilots veic kontrolētus uzmērīšanas lidojumus virs objekta, vadot UAV manuāli vai sekojot lidojuma plānam autonomi. Lai pilots spētu reaģēt bīstamās situācijās un varētu pārņemt pilnu UAV vadību, viņam ir jā saglabā nepārtraukts vizuāls kontakts ar UAV. Objektos, kur tas nav iespējams, tiek piesaistīts pilota palīgs – novērotājs, kurš atrodas citā punktā un var pārņemt UAV vizuālo uzraudzību. Svarīgi, lai lidojuma laikā novērotājam ir pieejama nepārtraukta balss saziņas iespēja ar pilotu operatīvo komandu nodošanai.

Labākie laika apstākļi fotoattēlu uzņemšanai ir viegli apmākusies diena bez nokrišņiem, kad fotogrāfijas ir pilnībā bez ēnām. Uzņemot blīvi apaugušu teritoriju (muižu parki, kapsētas), jāņem vērā, ka uzmērījuma dati zem koku lapotnēm netiks iegūti. Šādu teritoriju uzmērīšana ar UAV fotogrammetrijas palīdzību jāveic bezlapu periodā, kad zemi nesedz sniegs un nav citu apstākļu, kas ietekmē drošu lidojumu.

Lidojumu drošība

Bezpilota lidaparātu izmantošanas gadījumos ir obligāti jāapzinās ar šo uzmērīšanas veidu saistītie riski cilvēku veselībai un trešo personu īpašumam. Galvenie faktori, kas ietekmē lidojuma drošību, ir:

- apstākļiem neatbilstoši izvēlēts lidojuma augstums un ātrums;
- neatbilstoši laikapstākļi, piemēram, vējš un nokrišņi;
- lidojums ārpus pilota vai viņa palīga redzamības zonas;
- pilota iemaņu trūkums;
- pilota traucēšana lidojuma laikā.

Pieaugot lidaparātu lietošanas intensitātei un to izmantošanai komerciāliem un nekomerciāliem mērķiem, valstis ir ieviesušas stingru regulējumu un normatīvo aktu bāzi, kas definē lidaparātu lietošanas noteikumus. Atbilstošie likumi un normatīvie akti Latvijā un Eiropas Savienības valstīs: <https://droni.caa.gov.lv/normativais-regulejums/> Dronu lietošanas noteikumi Norvēģijā: <https://luftfartstilsynet.no/droner/veiledning/fly-drone-trygt/>

Prasības objektam un nelabvēlīgi apstākļi

Ja tiek uzmērīts atsevišķs objekts (ēka, pieminekļi), tam iespēju robežās jābūt atbrīvotam no apauguma, kas tieši piekļaujas objekta virsmai vai bloķē skatu uz to tiešā tuvumā.

Teritorijas uzmērīšanai nav īpašu sagatavošanas prasību. Uzmērīšanas darbu veikšana ar UAV ir tieši atkarīga no laikapstākļiem.

Lidojumus neveic nokrišņu un stipra vēja gadījumā. Lai sasniegtu labākos fotogrammetrijas rezultātus, iegūstot labas kvalitātes fotoattēlus, lidojuma laiku ieteicams plānot dienas vidū, kad saule ir visaugstāk un objektiem ir mazākas ēnas. Atkarībā no gadalaika piemērotākais laika posms ir no plkst. 11.00 līdz 15.00. Ja diena ir apmākusies, šis laika periods var būt ilgāks.

Uzmērījuma prasību definēšana.

Nepieciešamā informācija uzmērīšanas darbu veicējam.

Objekta informācija pakalpojuma sniedzējam piedāvājuma sagatavošanai
Objekta attēls, adrese
<i>Uzmērījuma mērķa apraksts (būtisks, jo tas palīdz konsultantam precīzāk izprast vajadzību un izvēlēties piemērotāko uzmērīšanas tehnoloģiju un nodevuma sastāvu, ņemot vērā labās prakses principus)</i>

Uzmērīšanas prasības	Izvēles
<i>Precizitātes minimums</i>	30–50 mm
<i>Krāsainība</i>	Patiesās krāsas
<i>Primārie nodevuma formāti</i>	

2D ortofoto	.jpeg, .tiff
3D mesh modelis	.obj, .dxf (pēc vajadzības)
3D punktu mākonis	.e57, .las
Fotogrāfijas	.jpeg vai .tiff, .png, .raw (pēc nepieciešamības)

6.4 LĀZERSKENĒŠANA NO FIKSĒTAS POZĪCIJAS

Darbības princips

Šajā nodaļā aprakstīta lāzerskenēšana ar stacionāro 3D skeneri, kas tiek plaši izmantots vēsturisku objektu uzmērīšanā, jo šāda veida uzmērījumus iespējams veikt arī sarežģītos objekta apstākļos, saglabājot augstu precizitāti. Lāzerskenēšana ir attāluma mērīšana līdz virsmai, izmantojot redzamu vai neredzamu lāzerstaru. Lāzerskenēšana ir uzmērīšanas tehnoloģija, kas ļauj īsā laikā iegūt augstas precizitātes trīsdimensiju datus par objekta ģeometriju un apkārtējo vidi. Uzmērīšanas rezultātā tiek iegūts trīsdimensionāls punktu mākonis, kurš sastāv no vairākiem miljoniem punktu un kurā katram punktam ir savas X, Y, Z koordinātas. Uzmērīšanas laikā skeneris fiksē arī lāzera stara atstarošanās intensitāti, kas atšķiras atkarībā no objekta virsmas materiāla.

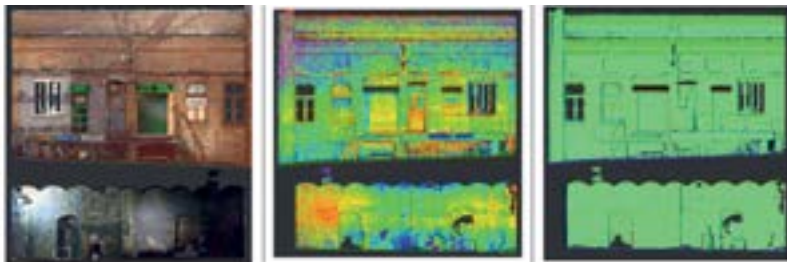
Skenēšanas laikā 3D skeneris tiek novietots stabilā, stacionārā pozīcijā un veic pilnu 360 grādu rotāciju ap savu asi, izpildot līdz diviem miljoniem mērījumu sekundē.



Fiksētās pozīcijas lāzerskenera rotācijas ap savu asi uzmērīšanas laikā (Adobe stock)

Lāzerskenēšanas priekšrocība, salīdzinot ar fotogrammetrijas metodi, ir tā, ka precīzu mērījumu iegūšanai nav nepieciešama gaismas. Jāņem vērā, ka lāzerskenēšanas process bez krāsām var būt divas vai pat trīs reizes ātrāks (atkarīgi no skenera modeļa) par skenēšanu ar krāsām.

Ja punktu mākonim nepieciešams piešķirt patiesās krāsas, skeneris izpilda vēl vienu pilnu rotāciju, veicot 360 grādu fotografēšanu. Pēc apstrādes gaitā no iegūtajām fotogrāfijām uzmērījumu punktiem tiek piešķirta krāsa, kas atbilst fotogrāfijai. Apgaismojums ir svarīgs tikai tad, ja punktu mākonim ir jābūt ar patiesajām krāsām. Piemērā apskatāmi punktu mākoņa fragmenti fasādei un pagrabam dažādās krāsu skalās. RGB/Intensitāte/Neitrāls

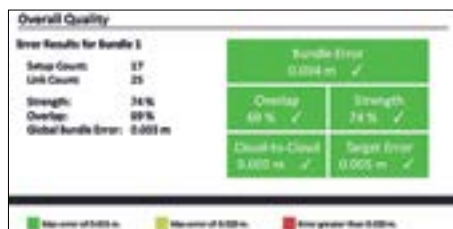


Lāzerskenēšanas punktu mākoņa iespējamās krāsas. Krāsains, intensīvs un neitrāls (autors: J. Heinsbergs)

Precizitāte un punktu blīvums

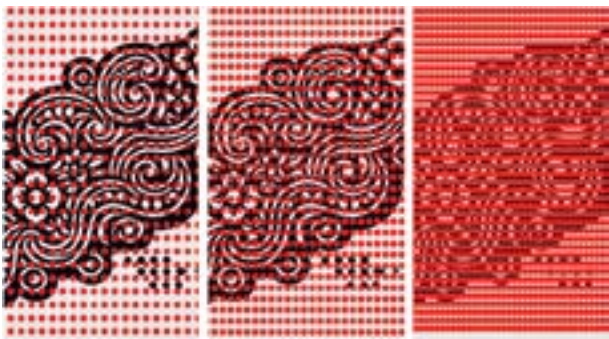
Biežāk lietoto stacionāro 3D skeneru uzmērījumu precizitāte ir 2–3 mm/10 m. Attiecīgi, attālinoties no objekta virsmas, precizitāte samazinās. Tomēr būtiskākais faktors, veicot uzmērīšanu ar 3D stacionāro skeneri, ir pareizs skenēšanas punktu – staciju – novietojums, kas nodrošina pietiekamu uzmērījumu punktu mākoņu pārklāšanos. Lai nodrošinātu augstu gala uzmērījuma precizitāti, ieteicamais pārklājums starp punktu mākoņiem ir 30–50 %.

Kopējais objekta 3D uzmērījuma punktu mākonis veidojas, savietojot punktu mākoņus no visām projektā izmantotajām uzmērījumu stacijām. Savietotā punktu mākoņa (*cloud to cloud*) precizitāte parasti tiek noteikta ne mazāka par 15 mm, kas tiek uzrādīta nodevuma dokumentācijā – savietošanas atskaitē.



Punktu mākoņa savietošanas atskaites apkopojuma tabulas ilustratīvs piemērs (autors: J. Heinsbergs)

Otrs būtiskākais faktors lāzerskenēšanā ir uzmērījumu punktu blīvums – attālums starp uzmērījumu punktiem uz objekta virsmām. Ja punktu blīvums ir nepietiekams, punktu mākonī ir grūti identificējam objekta sīkāko detaļu ģeometrijas. Savukārt, ja punktu blīvums visam uzmērījuma punktu mākonim ir pārsātināts, punktu mākoņa faila izmērs ir pārāk liels ērtai lietošanai tālākajos projekta posmos. Praksē optimāls punktu blīvums ēku uzmērīšanā ir 5–10 mm. Telpām, kurās ir izteiktas sienu vai griestu detaļas, punktu mākoņa blīvumu var palielināt un veikt atsevišķu pēcapstrādes ciklu, saglabājot lielāku punktu mākoņa blīvumu.



Dažāda blīvuma punktu mākoņa ilustrācija (autors: J.Heinsbergs)

Punktu blīvums	Raksturojums	Pielietojums
2 mm	Ļoti blīvs	Atsevišķas telpas vai sienas ar daudz detaļām
5 mm	Blīvs	Interjeri ar detaļām
10 mm	Optimāls	Standarta interjers, fasādes
20 mm	Rets	Jumta un fasādes plaknes ar detaļām virs 20 cm

Lāzerskenēšanas marķieri

Lāzerskenēšanas rezultātā iegūtie punktu mākoņi atspoguļo objektu tā patiesajos izmēros, tādēļ standarta marķieru lietošana ne vienmēr ir obligāta.

Marķierus lāzerskenēšanā lieto, lai veiktu savietotā punktu mākoņa precizitātes kontroli un novietotu uzmērījumu patiesajās koordinātās un augstumā virs jūras līmeņa. Marķierus izvieto gan telpās, gan uz fasādes, kur tos uzmēra ģeodēzists ar elektronisko tahimetru (precizitāte līdz 1 mm).



Marķieru izvietošana
objektā
lāzerskenēšanas
vajadzībām
(autors: J. Heinsbergs)

Marķieru nepieciešamību izvērtē skenēšanas operators, ņemot vērā projekta apjomu, objekta ģeometriju un ar to saistītos riskus precīzu un ticamu uzmērījumu iegūšanai.

Uzmērīšanas process

Objekta lāzerskenēšanas darbus parasti izpilda viens skenēšanas operators. Ja objekts ir apjomīgs un tiek izmantoti marķieri, var tikt iesaistīts arī ģeodēzists un palīgs. Lai skenēšanas darbi noritētu raiti, ir svarīgi, lai uzmērāmās telpas ir brīvi pieejamas un atvērtas vienlaidus. Skenēšanas operators parasti veic telpu secīgu uzmērīšanu viena stāva ietvaros ar vienu vai vairākām lāzerskenēšanas iekārtām. Vienas skenēšanas stacijas pilns uzmērīšanas cikls var ilgt no 30 sekundēm līdz vairākām minūtēm atkarībā no skenera tipa un skenēšanas uzstādījumiem (krāsainība, punktu blīvums). Tādējādi skenēšanas operators var vienlaikus strādāt ar vairākiem skeneriem. Operatora palīga galvenie uzdevumi procesā ir sagatavot telpas kvalitatīvai uzmērīšanai, komunicēt ar ēkas īpašnieku par telpu pieejamību un sakārtot telpas pēc uzmērīšanas.

Prasības objektam un nelabvēlīgi apstākļi

Pirms telpas uzmērīšanas ir jāpārliciecinās, vai ir redzami un uzmērāmi būtiskākie elementi:

- sienu plaknes (var būt daļēji aizsegta ar mēbelēm, svarīgi, lai nav pilnībā aizsegta ar aizkariem vai drapējīgām);
- logu ailes, pārsedes (jāatver aizkari vai jāpacelžalūzijas);
- palodzes (svarīgi, lai nav pilnībā piekrāmētas ar priekšmetiem);
- patiesais pārsegums (ja telpā izvietoti iekārtie griesti, jāatver vismaz viena plāksne);
- pirms fasādes skenēšanas tā jāatbrīvo no celtniecības aizsargiem, baneriem vai aizklātiem būvžogiem, kuri tieši piekļaujas fasādei. Ja fasādi aizsedz būvniecības sastatnes, ir iespējams uzmērīt tikai fasādes galvenās formas, bet ne detaļas, kuras aizsedz sastatņu konstrukcijas vai laipas ēkas augstākajos stāvos.

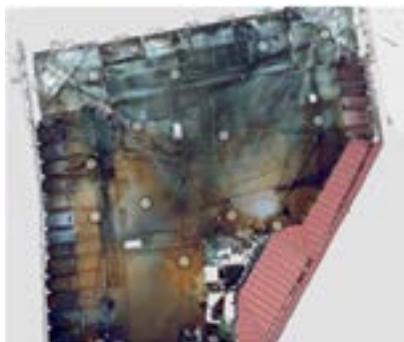
Uzmērot telpu, operators nosaka nepieciešamo staciju skaitu telpā, lai uzmērījumā nebūtu nozīmīgu “aklo zonu”. Piemēram, ja telpā ir vairāk nekā viens logs, ir jāizvieto vairākas stacijas, lai uzmērītu visas logu ailas. Lai nodrošinātu punktu mākoņu savietošanu starp telpām, skenēšanas staciju parasti novieto atvērtās durvīs.

Lāzerskenēšana ārpus telpām nav iespējama stipra lietūs un snigšanas apstākļos. Ziemas periodā sniega sega ir traucējošs elements, tādēļ objekts pirms uzmērīšanas jānotīra.

Uzmērījuma rezultāts

Uzmērīšanas pirm dati ir uzmērījumu failu kopums no katras uzmērīšanas stacijas. Pirm datu pēc apstrādi veic programmatūrā, kuru nodrošina skenēšanas iekārtas ražotājs, un datu savietošanas procesu sauc par reģistrāciju. Reģistrācijas rezultātā no pēc apstrādes programmatūras ir iespējams eksportēt savietotos datus dažādos punktu mākoņa formātos, piemēram, *.e57* un *.las*. Eksportējot datus, operatoram ir iespēja vēlreiz noteikt punktu mākoņa blīvumu galaproduktam. Visbiežāk to izmanto, lai samazinātu nodevuma failu lielumu. Ja punktu blīvumu nav atļauts samazināt, nodevuma faila izmērs var sasniegt pat 100 GB. Tādēļ, lai neapgrūtinātu tālāko darbu ar failiem, ieteicams tos sadalīt pa daļām (piemēram, pa ēkas stāviem). Ieteicamais maksimums vienam nodevuma failam ir līdz 20 GB.

Vēl viena būtiska nodevuma sastāvdaļa ir 360 grādu attēli, kuri punktu mākonī attēlojas kā lodveida objekti skenēšanas staciju patiesajās pozīcijās. Šie attēli pieejami gan bezkrāsu skenēšanas datiem, gan krāsainajiem punktu mākoņiem. Bezkrāsu skenēšanas datiem 360 grādu attēli ir melnbalti, un krāsu skala tajos veidojas nevis no fotoattēla, bet atstarošanās intensitātes datiem. Šie attēli var būt ļoti noderīgi tālākajās darbībās ar punktu mākonī (3D modelēšanā vai ra-



360 grādu attēlu izvietoējums plānā un skats no konkrētas pozīcijas (autors: J. Heinsbergs)



sējumu sagatavošanā), lai labāk izprastu sarežģītas vietas uzmērījuma datus un precīzāk identificētu nepieciešamos priekšmetus vai objekta detaļas. 360 grādu fotoattēli parasti aplūkojami programmatūrā, kas ir unikāla katram skeneru ražotājam, bet pieejama bez maksas.

Uzmērījuma prasību definēšana.

Nepieciešamā informācija uzmērīšanas darbu veicējam.

Objekta informācija pakalpojuma sniedzējam piedāvājuma sagatavošanai
Objekta adrese, ēkām – telpu plāni, aktuālās fotogrāfijas no ārpusē un telpām (vēlams)
Uzmērījuma mērķa apraksts (<i>būtisks, jo tas palīdz konsultantam precīzāk izprast vajadzību un izvēlēties piemērotāko uzmērīšanas tehnoloģiju un nodevuma sastāvu, ņemot vērā labās prakses principus</i>)
Uzmērījuma datu primārie lietotāji un to darba uzdevums, piemēram, veikt izpēti, projektēšanu vai plānošanu

Uzmērīšanas prasības	Izvēles
Skenera precizitātes prasības	2–3 mm uz 10 m
Savietotā punktu mākoņa precizitāte	Ne vairāk kā 15 mm
Krāsainība	RGB vai melnbalts
Punktu mākoņa blīvums	Izvēles no 2 līdz 20 mm
360 grādu fotoattēli	Jā (iespēja nodalīt)/Nē
Primārie nodevuma formāti	
3D punktu mākonis	.e57, .las
360 grādu attēli	Formāts atkarībā no skenera ražotāja

6.5 ROKAS UN PĀRNĒSĀJAMĀS MOBILĀS LĀZERSKENĒŠANAS IEKĀRTAS

Darbības princips

Rokas mobilo lāzerskenēšanas iekārtu darbība ir balstīta uz SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) algoritmu, kas ļauj skenerim nepārtraukti sekot savam novietojumam telpā, izmantojot lāzerskenera attāluma mērījumus līdz iekārtas lāzersensoram. Veicot uzmērīšanu, SLAM algoritms nepārtraukti veic apkārtējo ģeometriju aprēķinus un fiksēšanu, izmantojot lāzerskenera atstarojuma datus no apkārtējām virsmām. Tādējādi jau uzmērīšanas laikā iekārta precīzi fiksē apkārtējās vides objektu novietojumu, kartējot apvidu reālajā laikā.

Šo iekārtu priekšrocība, ņemot vērā iespēju veikt uzmērīšanu kustībā, ir uzmērīšanas ātrums, turklāt ar skeneri iespējams uzmērīt grūti



Ilustratīvi mobilo
skenēšanas iekārtu
veidi (autori: A. Ābele,
E. Dzenis)

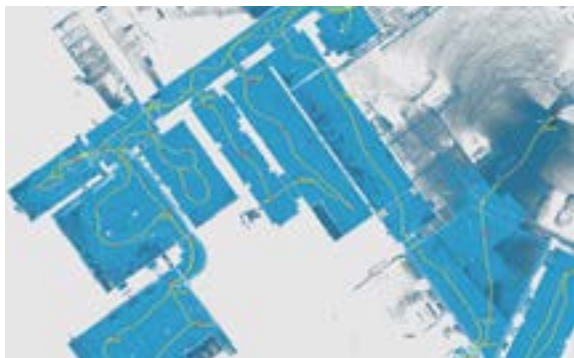
pieejamas vietas objektā, kur stacionārās skenēšanas iekārtas nav iespējams novietot (piemēram, dažādas šahtas, telpas virs piekaramiem griestiem un citus atvērumus).

Mūsdienās šādu iekārtu uzmērījumu precizitāte sākas no 6 mm, kas, šķiet, ir ļoti augsta, ņemot vērā uzmērīšanas ātrumu un citas priekšrocības. Tomēr, lai sasniegtu augstu absolūto precizitāti kopējam 3D punktu mākonim, ir vairāki būtiski nosacījumi:

- skenēšanas laikā jāpārvietojas vienmērīgi un lēnā ritmā, bez straujām rotācijām, jo tas ļauj SLAM algoritmam precīzāk sekot līdz skenera novietojumam telpā un piešķirt uzmērījumiem precīzākas koordinātas;
- skenēšanas maršrutiem ieteicams pārklāties, lai SLAM algoritms spētu identificēt vietu telpā, kura jau ir uzmērīta, un salāgot datus, ja iepriekšējā maršrutā veidojušās novirzes;
- vienmērīgi jāizvieto kontroles punkti (*Control points*), kuri ir ģeodēziski piemēri ar konkrētām koordinātām.

Ievērojot iepriekšminētos nosacījumus, ir iespēja panākt augstu (līdz 20 mm) punktu mākoņa absolūto precizitāti. Iekārtu efektīvais darbības rādiuss parasti ir līdz 50 metriem. Attālākie uzmērījumu punkti tiek dzēsti pēcapstrādes laikā.

Kontroles punkti nav obligāti mazākiem objektiem, kad visu objektu var uzmērīt viena gājiena ietvaros (līdz 20–30 min.) un punktu mākonim nav plānots savietot ar citiem uzmērījumu datiem. Tomēr gadījumos, kad kontroles punkti nav izmantoti, pirms tālākām darbībām ar punktu mākonim ir būtiski pārliedzināties par uzmērījumu rezultāta absolūto precizitāti, salīdzinot kontrolmērījumus objektā ar izmēriem punktu mākonī.



Mobilās
lāzerskenēšanas
iekārtas gājiena
maršruts un
kontroles punkti
ēkā (autors:
J. Heinsbergs)

Mobilajiem skeneriem, atšķirībā no fiksētās pozīcijas lāzerskeneriem, punktu blīvumu precizē tikai pēcāpstrādes procesā. Atkarībā no iekārtas ražotāja un pēcāpstrādes programmas punktu mākoņa blīvumam pēcāpstrādē tiek piedāvāti iepriekš definēti punktu blīvumi, sākot no 5 mm un retāki.

Datu pēcāpstrādes (*postprocessing*) programmatūra mobilajām skenēšanas iekārtām parasti ir unikāla, un to nodrošina iekārtas ražotājs kopā ar instrumentu vienotā darba plūsmā.

Vairums pārnēsājamo mobilo lāzerskenēšanas iekārtu ir aprīkotas ar foto vai video kamerām, kas tiek izmantotas, lai punktu mākonim piešķirtu RGB krāsas. Daži skeneru modeļi ir aprīkoti ar vismaz četrām kamerām, kas vienlaikus ar uzmērīšanu veic arī 360 grādu fotofiksāciju.

Uzmērīšanas process

Visbiežāk uzmērījumus var veikt viens iekārtas operators. Atsevišķos gadījumos tiek piesaistīts palīgs, ja iekārtas un operatora drošam darbam ir nepieciešama palīdzība sarežģītākos apvidos. Lielāku objektu uzmērīšana parasti tiek sadalīta uzmērīšanas gājienos. Tie parasti ir 20–30 minūšu ilgi uzmērīšanas periodi, kuru laikā tiek veikti vienlaikus uzmērījumi konkrētai objekta daļai (stāvs, korpuss, fasādes, jumts vai tamlīdzīgi). Tā kā skenēšana tiek veikta nepārtrauktā kustībā, tad pirms uzmērīšanas operators pārliecinās, vai visa gājiena maršrutā nav šķēršļu, kas kavētu brīvu pārvietošanos, un sagatavo telpas uzmērīšanai (atsedz logu ailes un griestu paneļus). Pirms uzmērījumu veikšanas objektā tiek izvietoti kontroles punkti.

Uzmērīšanas laikā operators pārvietojas pa iepriekš sagatavoto maršrutu, kontrolējot iekārtas darbību ekrānā, un veic kontroles punktu fiksāciju. Piesaiste kontroles punktiem uzmērīšanas laikā notiek, fiziski novietojot skeneri uz kontroles punkta.

Tāpat kā citi lāzerskeneri, arī mobilās iekārtas veic mērījumus telpās bez gaismas. Vienīgi tad jābrīnās, ka tumšās telpās punktu mākoņa krāsa būs melna, savukārt izgaismotās telpās – RGB. Protams, punktu mākonis aplūkojams, arī izmantojot atstarošanās intensitātes krāsu paleti. Lai izgaismotu tumšas telpas, skenēšanas operators var aprīkot iekārtu ar papildu gaismekļiem, tādējādi iegūstot krāsainu punktu mākonī.



Darbs ar mobilo lāzerskenēšanas iekārtu tumšākās telpās (autors: J. Heinsbergs)

Ilustratīvs piemērs – mobilā lāzerskenera punktu mākoņa piesaistes precizitāte kontroles punktiem (autors: J. Heinsbergs)

Control Point	Delta X [mm]	Delta Y [mm]	Delta Z [mm]
02	0.02	-0.74	0.65
02	-0.25	0.34	-0.43
01	-1.60	1.26	-0.31
01	-0.96	1.46	0.35
01	-1.71	0.96	-0.89

Control point used:
Green > +5mm
Green < -5mm
Green > +10mm
Green < -10mm
Yellow > +5mm
Yellow < -5mm
Red > +10mm
Red < -10mm

Datu pēcapstrādes laikā speciāla programmatūra veic skenēšanas maršruta un uzmērījuma datu pārrēķinu, izdarot korekcijas vietās, kur iekārtas SLAM procesors ir zaudējis precizitāti. 3D uzmērījumu dati tiek novietoti koordinātās atbilstoši uzmērītajiem kontroles punktiem. Pēcapstrādes procesa kvalitātes kontroli apstiprina ar atskaiti, kas var būt daļa no nodevuma.

Prasības objektam un nelabvēlīgi apstākļi

Uzmērīšanas darbus nav ieteicams veikt stipru nokrišņu laikā, kas var ietekmēt iekārtas elektronikas darbību ilgtermiņā. Pirms uzmērīšanas darbiem objekta telpām ir jābūt atvērtām un atbrīvotām no šķēršļiem ejās, kas var traucēt pārvietošanos ar skeneri. Šāda tipa skeneriem ir būtiski saglabāt SLAM algoritma spēju precīzi

sevi pozicionēt uzmērīšanas laikā. Galvenie faktori vai apstākļi, kuri apgrūtina vai pilnībā dezorientē iekārtas darbību:

- daudz kustīgu objektu ierobežotā telpā (piemēram, sabiedriskā ēka ar daudz kustīgiem cilvēkiem skenera tuvumā);
- apvidus ar ierobežotu plakņu daudzumu (piemēram, plakans ēkas jumts bez piegulošām ēkām vai jumtiem);
- telpas ar daudzām izteikti atstarojošām virsmām (piemēram, daudziem spoguļiem);
- dažāda tipa aizkari, ja tie atrodas tieši skenēšanas maršrutā un cieši piekļaujas iekārtai skenēšanas laikā;
- ārtelpa bez izteiktām apbūves virsmām un augstiem krūmājiem (piemēram, parku vai kapu teritorijas).

Uzmērījuma rezultāts

Uzmērīšanas pirmdati ir strukturēts failu kopums par katru uzmērīšanas gājieni un ir atverami tikai pēc apstrādes programmatūrā.

Datu pēc apstrādes rezultātā tiek iegūts savietots un attīrīts punktu mākonis .e57, .las vai citos punktu mākoņa formātos. Punktu mākoņa krāsainība atkarīga no skenēšanas iekārtas iespējām un uzstādījumiem. Veicot eksportēšanu, operatoram ir iespēja vēlreiz noteikt punktu mākoņa blīvumu galaproduktam. Visbiežāk to izmanto, lai samazinātu nodevuma failu izmēru.

Uzmērījuma prasību definēšana.

Nepieciešamā informācija uzmērīšanas darbu veicējam.

Objekta informācija pakalpojuma sniedzējam piedāvājuma sagatavošanai
Objekta adrese, ēkām – telpu plāni, aktuālās fotogrāfijas no ārpuses un telpām (vēlams)
Uzmērījuma mērķa apraksts (<i>būtisks, jo tas palīdz konsultantam precīzāk izprast vajadzību un izvēlēties piemērotāko uzmērīšanas tehnoloģiju un nodevuma sastāvu, ņemot vērā labās prakses principus</i>)
Uzmērījuma datu primārie lietotāji un to darba uzdevums, piemēram, veikt izpēti, projektēšanu vai plānošanu

Uzmērīšanas prasības	Izvēles
Skenera precizitātes prasības	6 mm
Punktu mākoņa absolūtā precizitāte	Ne vairāk kā 20 mm
Krāsainība	RGB vai melnbalts
Punktu mākoņa blīvums	Izvēles no 5 līdz 20 mm
360 grādu fotoattēli	Nav pieejams visiem SLAM skeneriem
Primārie nodevuma formāti	
3D punktu mākonis	.e57, .las
360 grādu attēli	Nav pieejams visiem SLAM skeneriem

6.6 MOBILĀS LĀZERSKENĒŠANAS IEKĀRTAS (AUTOMAŠĪNA, DRONS VAI HELIKOPTERS)

Šajā sadaļā aplūkotas divas radniecīgas mobilās lāzerskenēšanas tehnoloģijas, jo to darbības princips ir ļoti līdzīgs, atšķiras tikai LiDAR sensora(-ru) pārvietošanās metode. Iekārtu iespējams novietot uz automašīnas vai piestiprināt lidaparātam.

Katram šim veidam ir sava procesa specifika, tādēļ tie tiks apskatīti atsevišķi.

6.6.1 Mobilā lāzerskenēšana, iekārta uzmontēta uz automašīnas Darbības princips

Mobilā lāzerskenēšana (MLS) ir moderna metode, kas izmanto lāzertehnoloģiju, lai iegūtu brauktuvi, būvju un virsmu 3D uzmērījumus. Uz transportlīdzekļa uzstādīts lāzerskeneris raida lāzerstarus, kas atstarojas no virsmām. Laiks, kāds nepieciešams lāzera atstarojumam uz iekārtu, tiek izmantots, lai noteiktu attālumu, kas ļauj izveidot detalizētu 3D punktu mākonī.

Izmantojot GNSS uztvērēja datus un iekšējo IMU (*Inertial Measurement Unit*) sensoru, iekārta precīzi nosaka savu atrašanās vietu, maršrutu, kustības ātrumu, augstuma izmaiņas, pārvietojoties vidē. IMU dati ir būtiskākā informācija, lai precīzi piešķirtu koordinātas uzmērītajiem lāzerskenēšanas punktiem. Kā papildu datu avotu automašīnas riteņiem piestiprina arī distances mērītāju.

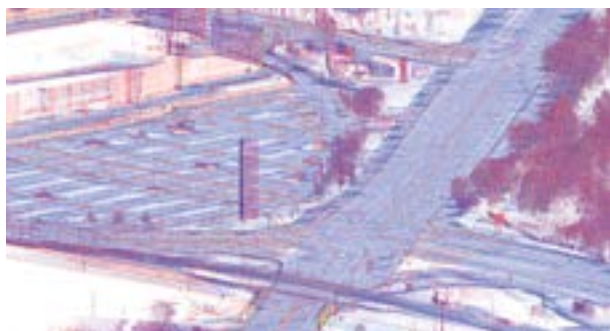
Parasti iekārtas komplektācijā ietilpst arī divas vai vairākas fotokameras, kuras galvenokārt izmanto, lai iegūtu krāsas punktu mākoņa vajadzībām. Atkarībā no iekārtas komplektācijas un modeļa pieejami arī 360 grādu fotoattēli.

Mērījumu relatīvā (konkrētā apvidus mērījumi) precizitāte mūsdienu MLS iekārtām ir no 1 līdz 3 cm robežās. Absolūtā precizitāte (piesaiste nacionālajai koordinātu sistēmai) parasti ir robežās no 2 līdz 5 cm. Uzmērījumu precizitāti ietekmē vairāki faktori:

- GNSS (GPS) signāla kvalitāte. Apdzīvotās un apmežotās vietās GNSS signāls ir vājāks;
- IMU sensora darbības kvalitāte un precizitāte maršruta posmos, kur GNSS signāls ir vājš;
- automašīnas braukšanas ātrums. Veicot skenēšanu lielākā ātrumā, samazinās punktu mākoņa blīvums un samazinās punktu mākoņa detalizācija;
- apvidus un laikapstākļi.

Lai uzlabotu GNSS signāla pārklājumu uzmērījuma teritorijā, skenēšanas maršruta tuvumā tiek novietota papildu bāzes stacija raidīšanas režīmā.

MLS uzmērīšanas vajadzībām apvidū netiek izvietoti īpaši marķieri. Tomēr, lai veiktu papildu kontroli punktu mākoņa precizitātei, dabā tiek uzmērīti raksturīgi elementi, kuri ir skaidri identificējami punktu mākonī. Bieži vien tie ir ceļa horizontālo apzīmējumu raksturīgie stūri. Iekārtu uzmērījumu attālums ir līdz 150 metriem, tomēr par efektīvu uzmērījumu distanci var uzskatīt attālumu no 60 līdz 80 metriem. Tālāki mērījumi pēcapstrādes procesā tiek dzēsti vai netiek ņemti vērā. Punktu blīvumu regulē ar braukšanas ātrumu. Sasniedzamais punktu blīvums, braucot ar ātrumu 50 km/h, uz apkārtējām virsmām būs vidēji 5 mm. Tie ir deviņi punkti uz 1 cm². Iekārtām tehnoloģiski attīstoties, LiDAR sensoru veikspēja arvien palielinās.



MLS punktu mākoņa vizualizācija (autors: M. Kakko)

Uzmērīšanas process

Uzmērīšanas darbus parasti veic viena automašīna ar divu cilvēku apkalpi, iekārtas vadītājs/operators un tehniķis/mērnīeks. Vadītājs seko plānotajam maršrutam, kontrolē uzmērīšanas ātrumu un uzrauga arī MLS sistēmas darbības stabilitāti. Tehniķis atbild par iekārtas uzstādīšanu, iestatīšanu un kalibrāciju pirms darbu veikšanas. Tehniķis skenēšanas laikā seko arī uzmērījumu datu kvalitātes rādītājiem.



MLS iekārtas aprīkojums uz auto (autors: M. Kakko)

3D uzmērīšanu apdzīvotās vietās parasti var veikt robežās līdz 50 km/h. Ārpus apdzīvotām vietām uzmērīšanas ātrums parasti nepārsniedz 80 km/h. Uzmērīšanas darbus var veikt arī naktī, vienīgi tad jārēķinās, ka 3D punktu mākonim nebūs pieejama RGB krāsainība. Salīdzinot ar citām metodēm, MLS ļauj īsā laikā uzmērīt lielas un sarežģītas platības. Tomēr vēsturisku teritoriju uzmērīšanā rūpīgi jāizvērtē iekārtas efektivitāte un iespējas kombinēt 3D datus ar citām metodēm, lai iegūtu pilnīgu konkrētās teritorijas 3D uzmērījumu.

Prasības objektam un nelabvēlīgi apstākļi

Uzmērāmajiem objektiem vai teritorijām nav jāveic īpaši sagatavošanās darbi. Jāpārliciecinās, lai plānotais maršruts ir izbraucams un būtiskus objektus neaizsedz nekādi vizuāli šķēršļi. Ja objekta teritorijā ir gājēju ielas, jāveic attiecīgi plānošanas darbi, lai skenēšanas process būtu drošs iedzīvotājiem.

Nelabvēlīgi apstākļi, kas tieši ietekmē uzmērījumu kvalitāti un precizitāti, ir:

- apvidus vai maršruta posmi, kur GNSS uztveramība ir pasliktināta (posmi zem lieliem kokiem, tuneļi vai šauras ielas). Šīs zonas pirms uzmērīšanas apzina un izvērtē speciālisti, mainot uzmērīšanas procedūru un veicot papildu kontroles uzmērījumus);
- izteikti nelīdzeni ceļu posmi, kas nav piemēroti MLS uzmērīšanai braukšanas laikā. Vecpilsētās, kur bieži sastopams bruģēts ceļu segums, tiek izmantota STOP & GO uzmērīšanas metode. Uzmērīšanas brīdī automašīna tiek apstādināta, un, noslēdzoties skenēšanas ciklam, tā tiek pārbraukta uz nākamo skenēšanas pozīciju. Attālums starp pozīcijām, atkarībā no apvidus, var būt 10–20 m. Izmantojot STOP & GO metodi, jāievēro tie paši noteikumi, kā veicot uzmērīšanu ar stacionāro lāzerskeneri (skat. 6.4 nodaļu);
- stiprs lietus vai putenis, kura laikā nav iespējama uzmērīšana;
- kvalitatīvu datu iegūvi apgrūtina arī pārāk slapjš vai, tieši pretēji, pārāk sauss ceļa segums. Abos gadījumos aiz automašīnas veidojas rasas vai putekļu mākonis, kas aizsedz LiDAR sensoru redzamību uz brauktuves.

Uzmērījuma rezultāts

Datu pēcāpstrādes rezultātā tiek iegūts 3D punktu mākonis visā uzmērītajā maršrutā. Pirms nodošanas punktu mākonim ir jāveic apjomīgs attīrīšanas darbs no liekajiem punktiem (piemēram, atstarojumi logos, garāmbraucoši auto un ejoši cilvēki u. c. kustīgi objekti skenēšanas maršrutā). Punktu mākoņa krāsainība un punktu blīvums jāprecizē darba uzdevumā atbilstoši turpmākajām izmantošanas vajadzībām.

Jāņem vērā, ka punktu mākoņi ar augstu punktu blīvumu lielām teritorijām ir vairākus desmitus un pat simtus GB lieli. Tādēļ ieteicams tos nodevumā sadalīt pa posmiem vai teritorijām.

Uzmērījuma prasību definēšana.

Nepieciešamā informācija uzmērīšanas darbu veicējam.

Objekta informācija pakalpojuma sniedzējam piedāvājuma sagatavošanai
Nepieciešamais ceļa posms vai teritorijas karte
Uzmērījuma mērķa apraksts (<i>būtisks, jo tas palīdz konsultantam precīzāk izprast vajadzību un izvēlēties piemērotāko uzmērīšanas tehnoloģiju un nodevuma sastāvu, ņemot vērā labās prakses principus</i>)
Uzmērījuma datu primārie lietotāji un to darba uzdevums, piemēram, veikt izpēti, projektēšanu vai plānošanu

Uzmērīšanas prasības	Izvēles
Skenera precizitātes prasības	10–30 mm
Punktu mākoņa absolūtā precizitāte	Ne vairāk kā 50 mm
Krāsainība	RGB vai melnbalts
Punktu mākoņa blīvums	Izvēles no 5 līdz 20 mm
360 grādu fotoattēli	Nav pieejams visiem MLS skeneriem
Primārie nodevuma formāti	
3D punktu mākonis	.e57, .las
360 grādu attēli	Nav pieejams visiem MLS skeneriem

6.6.2 Mobilā lāzerskenēšana, iekārta uzmontēta uz lidaparāta

Izšķir divu veidu lidaparātus – pilotējamus un bezpilota. Pilotējamie lidaparāti – vieglās klases lidmašīnas un helikopteri – 3D uzmērīšanas darbos tiek izmantoti jau vairākus gadu desmitus. Attīstoties tehnoloģijām, skeneru veikspēja arvien palielinās, un parasti pilotējamās lidaparātus izmanto lielu teritoriju (vairāki simti un tūkstoši kvadrātkilometru) uzmērīšanai. Iegūtos 3D datus pamatā izmanto pilsētu, reģionu un valstu kartēšanas vajadzībām.

Šajā nodaļā sīkāk aplūkosim 3D uzmērīšanu ar LiDAR sensoru, kurš uzstādīts uz UAV bezpilota lidaparāta, kam ir savas priekšrocības un arī atšķirības uzmērīšanas procesā, salīdzinot ar UAV ar fotokameras sensoru (6.3 nodaļa).

Darbības pamatprincips

Arī 3D lāzerskenēšana ar bezpilota lidaparātu UAV tiek klasificēta kā mobilā lāzerskenēšanas sistēma (MLS) un darbojas pēc tā paša principa. Lāzersensors raida lāzerstarus un uzver atpakaļ to atstarojumus.



Bezpilota lidaparāts, aprīkots ar LiDAR sensoru (autors: M. Rutkovskis)



LiDAR lāzerskenēšanas shematiskais attēlojums (autors: J. Heinsbergs)

Pēc atstarojuma laika tiek aprēķināta punkta distance no sensora līdz objektam.

Šī tipa skeneriem, atšķirībā no citiem LiDAR sensoriem, ir rūpnieciski iestatīts redzes leņķis, kas vērsts uz leju, un tam ir noteikts lāzerstaru skaits. Līdz ar to uzmērījumu blīvumu šīm iekārtām regulē, mainot lidojuma augstumu.

Attīstoties LiDAR tehnoloģijām, jaunākie lāzerskenēšanas modeļi ir aprīkoti ar “Multi-pulse” tehnoloģiju, kas ļauj skenerim izsūtīt vairākus impulsus pēc kārtas vēl pirms atstarojuma saņemšanas atpakaļ. Šī tehnoloģija nodrošina vairāk atstarojumu un blīvāku punktu mākonī, kas ir būtiski, veicot skenēšanu blīvi apaugušā vai kalnainā apvidū. Šī metode un “Multi-pulse” funkcija ir ļoti noderīga, ja LiDAR dati tiek izmantoti, lai plašos apvidos meklētu reljefa īpatnības, kas var liecināt par neatklātu servietu esamību. Metodes galvenā priekšrocība ir spēja veikt precīzus zemes virsmas mērījumus plašās teritorijās, ko nodrošina lāzerstaru blīvums, un iespēja atklāt patieso reljefu arī zem vidēji blīva apauguma. Tāpat kā citām MLS sistēmām, arī UAV savu pozīciju apvidū nosaka, izmantojot GNSS un IMU (*Inertial Measurement Unit*) sensora datus. Apvidos, kur satelītu signāla pārklājums ir vājš, bieži vien tiek izmantots uz zemes novietots GNSS raidītājs, kas darbojas kā bāzes stacija papildu datu precizitātei.

Mērījumu relatīvā (konkrētā apvidus mērījumi) precizitāte šīm MLS iekārtām ir no 1 līdz 3 cm robežās. Absolūtā precizitāte (piesaiste nacionālajai koordinātu sistēmai) ir robežās no 2 līdz 5 cm.

Uzmērījumu precizitāti ietekmē vairāki faktori:

- GNSS (GPS) signāla kvalitāte. Apdzīvotās un apmežotās vietās GNSS signāls ir vājāks;
- IMU sensora darbības kvalitāte un precizitāte maršruta posmos, kur GNSS signāls ir vājš;

- lidojuma augstums un ātrums, kas tieši ietekmē punktu mākoņa izšķirtspēju. Vēsturiskām teritorijām ieteicams zemāks lidojuma augstums (20–50 metri) un ātrums (1–3 m/s), lai iegūtu augstas izšķirtspējas 3D punktu mākonī;
- lāzerskenera kvalitāte, ko pamatā nosaka divi rādītāji:
 - lāzerstara impulsa frekvence, diapazons no 100 līdz 500 kHz (cik uzmērījumus var veikt vienā sekundē. Jo augstāka frekvence, jo lielāka veiktspēja),
 - lāzerstara novirze, diapazons 0,3–1,5 mrad (distances kļūda);
- laikapstākļi, kam ir būtiska nozīme šīs metodes izmantošanā. Datu kvalitāti ietekmē lietus, migla un arī spoža saule. Tādēļ piemērotākais laiks ir bez nokrišņiem un stipra vēja;
- kontroles punkti (*Ground Control points*, GCP). Tie ir uz zemes izvietotas atbilstoša izmēra markas ar uzmērītām koordinātām. Šo punktu izmantošanai ir būtiska nozīme tieši absolūtās precizitātes kontrolei un uzlabošanai.

3D uzmērījumu punktu mākonī iespējams sagatavot ar patiesajām krāsām (RGB), ja papildus lāzerskenēšanai veikta arī objekta aerofotografēšana.

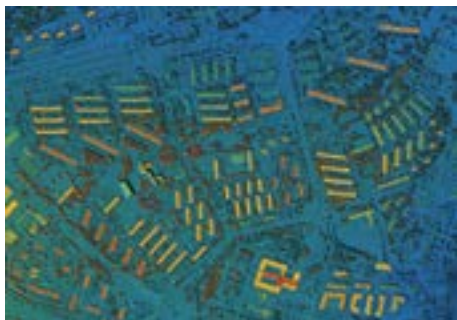
Uzmērīšanas process

Pirms uzmērīšanas objektā tiek veikti vairāki sagatavošanās darbi:

- lidojuma plāna sagatavošana specializētā programmā. Lidojuma laikā UAV seko iepriekš izstrādātam lidojuma plānam, kurā ir noteikts lidojuma maršruts, augstums un ātrums, kas nodrošina nepieciešamo datu pārklāšanos un vienmērīgi aptver visu objekta teritoriju;
- primāro bāzes staciju un kontroles punktu vietu noteikšana, kuru piemērotība pēc tam tiek pārbaudīta apvidū.

Uzmērīšanas darbus parasti veic UAV pilots viens pats vai lielākos objektos ar ierobežotu redzamību kopā ar pieaicinātu palīgu – novērotāju, kurš var uzraudzīt UAV darbību vietās, kur pilotam nav vizuāla kontakta ar lidaparātu. UAV, kas aprīkoti ar lāzersensora iekārtu, parasti ir krietni lielāki un smagāki (līdz pat 25 kg), tādēļ šie uzmērīšanas darbi jāveic, stingri ievērojot visus drošības noteikumus un vietējos likumus un normatīvos aktus. Datu pēcapstrāde ir svarīgs posms, kurā ar uzmērījuma pirmdatiem tiek veiktas vairākas būtiskas darbības:

- lieko punktu ("trokšņa") atfiltrēšana. Tie ir nevērtīgie punkti, kas veidojušies no kustīgu objektu atstarojumiem (kustīga veģetācija, transportlīdzekļi, putni, cilvēki);
- vairāku datu kopu savietošana no atsevišķiem lidojumiem;
- punktu klasifikācija (zeme, ēkas, veģetācija);
- punktu mākoņa savietošana ar koordinātu un augstuma sistēmām.



Klasificēts LiDAR punktu mākonis
(Adobe stock)

Lidojumu drošība

Bezpilota lidaparātu izmantošanas gadījumos ir obligāti jāapzinās ar šo uzmērīšanas veidu saistītie riski cilvēku veselībai un trešo personu īpašumam. Galvenie faktori, kas ietekmē lidojuma drošību, ir:

- apstākļiem neatbilstoši izvēlēts lidojuma augstums un ātrums;
- neatbilstoši laikapstākļi, piemēram, vējš un nokrišņi;
- lidojums ārpus pilota vai viņa palīga redzamības zonas;
- pilota iemaņu trūkums;
- pilota traucēšana lidojuma laikā.

Pieaugot lidaparātu lietošanas intensitātei un to izmantošanai komerciāliem un nekomerciāliem mērķiem, valstis ir ieviesušas stingru regulējumu un normatīvo aktu bāzi, kas definē lidaparātu lietošanas noteikumus. Atbilstošie likumi un normatīvie akti Latvijā un Eiropas Savienības valstīs: <https://droni.caa.gov.lv/normativais-regulejums/>
Dronu lietošanas noteikumi Norvēģijā: <https://luftfartstilsynet.no/droner/veiledning/fly-drone-trygt/>

Uzmērījuma rezultāts

Datu pēcapstrādes rezultātā iegūst klasificētu 3D punktu mākonī objekta teritorijai. Gadījumos, kad objekts ir vairākus kvadrātkilometrus liels un punktu mākonim ir augsts blīvums un liels izmērs, ieteicams to sadalīt atsevišķos kvadrātos. Datu dalīšanas gadījumā jāpievērš uzmanība dalījuma nomenklatūrai un skaidrai failu numerācijai.

Uzmērījuma prasību definēšana.

Nepieciešamā informācija uzmērīšanas darbu veicējam.

<i>Objekta informācija pakalpojuma sniedzējam piedāvājuma sagatavošanai</i>
Nepieciešamais ceļa posms vai teritorijas karte
Uzmērījuma mērķa apraksts (<i>būtisks, jo tas palīdz konsultantam precīzāk izprast vajadzību un izvēlēties piemērotāko uzmērīšanas režīmu</i>)
Uzmērījuma datu primārie lietotāji un to darba uzdevums

Uzmērīšanas prasības	Izvēles
Klasifikācijas prasības	Zeme, apaugums, ēkas, ceļi u. tml.
Punktu mākoņa absolūtā precizitāte	Ne vairāk kā 50 mm
Krāsainība	Ne visiem iespējams
Primārie nodevuma formāti	
3D punktu mākonis	.las/.laz, .e57

6.7 ĢEOLOKĀCIJA AR ĢEORADARIEM

Darbības pamatprincips, darbības apraksts

Ģeoradari ir ierīces, kas izmanto elektromagnētiskos viļņus, lai izpētītu zemes virsējos slāņus un pazemē esošus objektus. To darbības pamatprincips ir augstas frekvences radioviļņu raidīšana zemē un atstaroto signālu reģistrēšana no dažādiem objektiem vai zemes slāņiem. Ģeoradars sastāv no divām galvenajām daļām: vadības bloka un antenas. Lai panāktu lielāku precizitāti, radara sistēmu var papildināt ar GPS ierīci, kas fiksē radara maršrutu globālajā vai vietējās koordinātās. Vadības blokā tiek konfigurēti pamata iestatījumi un apsekošanas dati, bet pārējo fizisko darbu veic antena. Ģeoradara antena vairākus simtus reižu sekundē raida zemē noteikta garuma radioviļņus. Kad radioviļņi saskaras ar objektu, kura dielektriskās īpašības atšķiras no apkārtējās vides īpašībām (piemēram, ar keramiku, metālu vai pat dažāda blīvuma augsni), daļa viļņu tiek atstarota atpakaļ un uztverta tajā pašā ģeoradara antenas uztvērējposmā. Savukārt neatstarotā viļņa daļa turpina ceļu dziļāk zemē, radot arvien vairāk un vairāk atstarojumu, līdz tas izzūd. Ģeoradara radioviļņu fizikālās īpašības zemē līdzinās gaismas optikai un refrakcijai.



Ģeoradara darbības principa attēlojums
(autors: Adobe)

Pēc atstarotā signāla atgriešanās laika ilguma var spriest par objekta dziļumu, bet pēc atstarojuma īpašībām – par objekta īpašībām. Visbiežāk par galveno raksturlielumu uzskata objekta radītās anomālijas formu. Neliels iegarens objekts tiek attēlots kā parabola, savukārt slāņu maiņa tiks attēlota ar taisnākām līnijām. Ģeoradariem ir augsta izšķirtspēja, un ar tiem var atklāt gan lielus, gan mazus pazemes ob-

jektus. Pieredze liecina, ka mazākais objekta izmērs, ko var noteikt ar ģeoradaru, ir atsevišķs ķieģelis.

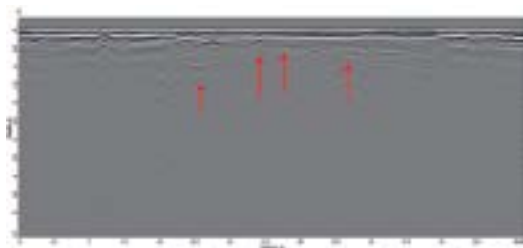
Šo tehnoloģiju plaši izmanto dažādās jomās, sākot ar ģeoloģiju un būvniecību un beidzot ar kriminālistiku un, protams, arheoloģiju. Kultūrvēstures pētnieki ar radara palīdzību meklē senu ēku drupas un pamatus visā pasaulē: gan tuksnešos, gan džungļos, gan arī mūžīga sasaluma reģionos. Pētnieku pieredze rāda, ka ar radaru ir iespējams meklēt arī cilvēku paliekas un citus objektus no dažādiem laikiem. Nav būtiski, vai objekts ir atradies zemē 10 dienas vai 10 tūkstošus gadu, galvenais, lai tas ir atšķirīgs no apkārtējās zemes slāņiem.

Iekārtas

Modernajiem ģeoradariem ir plašas izmantošanas iespējas un augsts procesa automatizācijas līmenis, kas padara tos par neaizstājamu instrumentu arheoloģiskajos pētījumos. Mūsdienās aktīvi attīstās dronu tehnoloģija, kas ļoti labi strādā kombinācijā ar radariem. Izmantojot dronus kā antenas nesējus, pētniekiem vairs nav jāiet vairāki kilometri purvos, ledājos un citos sarežģītos apstākļos, lai iegūtu datus.

Atsevišķu ģeoradaru darbības apraksts.

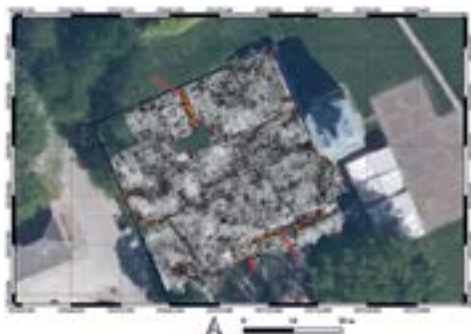
RadSys Zond piedāvā virkni ģeoradaru, piemēram, *Zond 12e* un *Zond 16e*, kas ir viegli lietojami un kam ir īpaši augsta jutība pret objektiem gruntī. Uzņēmums ražo ierīces ar dažādu frekvenču antenām, kas ļauj izpētīt gan virszemi, gan dziļāk esošus objektus. *Zond* ģeoradari var darboties arī sarežģītā vidē, tostarp grūti pieejamās vai stipri piesārņotās vietās. Tie ir pierādījuši savu uzticamību arī daudzās ekspedīcijās Grenlandes un Svalbāras ledājos. Uzņēmums attīsta arī dronu tehnoloģiju, ražojot radarus, kurus var izmantot kombinācijā ar dronu. Galarezultāts, ko var iegūt ar *RadSys* ģeoradariem, visbiežāk ir 2D profili vai griezumumi (2. attēls). Atsevišķie objekti datus ir attēloti ar parabolām.



Ar *RadSys Zond 12e* iegūtais ģeoradarēšanas profila piemērs ar iezīmētām parabolām, kas, visticamāk, norāda uz pazemes komunikācijām (autors: A. Zelenkevičs)

IDS GeoRadar piedāvā RIS MF Hi-Mod tipa sistēmas, ko izmanto arī arheoloģiskajos pētījumos. Šīm ģeoradara sistēmām ir daudzfrekvenču antenas, un tās spēj vienlaikus darboties vairākās frekvenču joslās. Tas ļauj

izpētīt dažādus zemes slāņus un iegūt pilnīgāku informāciju par zemes dziļu struktūru. Lielais skenēšanas ātrums un spēja integrēt sistēmā arī GPS padara IDS radarus par pieprasītākajiem instrumentiem tirgū. Bieži vien šāda radara kopējā komplektācijā var redzēt nevis vienu antenu, bet pat divas vai četras uzreiz. Uzņēmums piedāvā arī radarus piekabēm, kas ļauj ar lielu precizitāti un ātrumu izpētīt ceļus, nebloķējot satiksmi. Tās ir diezgan sarežģītas tehnoloģijas, kas palīdz izvairīties no automašīnas, būves un citu virszemes objektu radītajiem trokšņiem. No IDS ģeoradariem var iegūt pat 3D pazemes situācijas attēlojumu, veidojot no tā dažādus griezumus un dziļuma kartes (3. attēls). Dziļuma kartes palīdz izprast situāciju no citas perspektīvas, kas paaugstina rezultāta interpretāciju.



Attēls. Ar IDS GeoRadar RIS MF Hi-Mod iekārtu iegūta dziļumu karte ar iezīmētām senām konstrukcijām vai pamatu fragmentiem
(autors: A. Zelenkevičs)

Metodes priekšrocības

Ģeoradara izmantošana arheoloģijā ir pavērusi jaunus apvārsņus pētniecībai bez izrakumu veikšanas. Tas ļauj zinātniekiem pētīt senās struktūras un artefaktus, tos neaizskarot un neatsedzot. Šai metodei ir vairākas būtiskas priekšrocības salīdzinājumā ar tradicionālajām arheoloģisko izrakumu un kultūras pieminekļu izpētes metodēm.

Pirmkārt, ģeoradara pētījumi ir neinvazīvi, tas nozīmē, ka metode neparedz objektu atsegšanu. Tas ir īpaši svarīgi, strādājot ar kultūras mantojuma objektiem, kad fiziska iejaukšanās var sabojāt vērtīgus vēsturiskus artefaktus. Ar ģeoradaru īsā laikā var apsekot lielas platības, izveidojot trīsdimensiju kartes ar pazemes objektiem. Abi šie faktori ļauj saglabāt ainavu vai zemes virsmu un būtiski samazina rakšanas izmaksas neperspektīvās vietās.

Otrkārt, ar šo tehnoloģiju var atklāt objektus, kurus nevar saskatīt ar citām metodēm. Piemēram, ar ģeoradaru var atklāt pazemes kapenes, seno ēku paliekas, sienas, ceļus un zudušo civilizāciju atstātos artefaktus (ja tie ir pietiekami lieli). Līdzīgus rezultātus var mēģināt iegūt

arī ar citām ģeofizikālajām metodēm, piemēram, ar elektrisko izpēti vai magnetometriju. Tomēr ģeoradars joprojām ir ātrākais, ērtākais un vieglāk izmantojamais informācijas iegūšanas instruments. Tas palīdz arheologiem plānot izrakumus ar augstu precizitāti, koncentrējoties uz vērtīgākajām vietām.

Trešā priekšrocība ir iespēja izmantot ģeoradaru atkārtoti vienā un tajā pašā teritorijā dažādos apstākļos. Piemēram, ja kāda iemesla dēļ ir nepieciešams pārtraukt izrakumus, ar ģeoradaru iegūtos datus var izmantot vēlāk, nezaudējot to nozīmi. Turklāt ģeoradaru praktiski neietekmē ārējie faktori, piemēram, lietuss vai magnētiskās vētras. Tas ļauj gan nepārtraukt darbu sniega vai lietuss laikā, gan strādāt gandrīz jebkuros temperatūras apstākļos.

Prasības objektam un uzmērīšanai nepieciešamais laiks

Ģeoradara darbību netieši ietekmē daudzi ar teritorijas īpatnībām saistīti faktori. Pirmkārt, virsmas stāvoklis. Ideāli, ja apsekotā teritorija ir līdzena vai attīrīta vismaz no lieliem akmeņiem, veģetācijas un citiem virsmas objektiem, kas var traucēt radioviļņiem vai kavēt speciālistu darbu. Nelīdzens reljefs, nogāzes vai ūdens klātbūtne var apgrūtināt radioviļņu caurlaidību un sarežģīt datu interpretāciju, tomēr darbs nelīdzenā reljefā ir iespējams, un tam ir vairāki veiksmīgi piemēri.

Atkarībā no apsekojamās teritorijas platības un tās sarežģītības ģeoradara lauka darbi var ilgt no pusstundas līdz vairākām dienām. Piemēram, 1–2 hektāru lielas teritorijas izpētei ar sagatavotu virsmu un minimāliem traucējumiem var būt vajadzīga viena līdz trīs dienas. Tajā pašā laikā sarežģītiem objektiem, piemēram, pilsētu teritorijām ar daudzām pazemes komunikācijām, var būt nepieciešams daudz vairāk laika. Vienkāršos gadījumos pietiek ar vienu uzmērījumu profilu, lai paveiktu darbu. Tādējādi lauka darbs var aizņemt tikai vienu stundu. Svarīgs aspekts ir arī ģeoradara operatora pieredze. Pieredzējis speciālists spēj ne tikai kvalitatīvi veikt izpēti, bet arī operatīvi identificēt iespējamās anomālijas un pielāgot iekārtas darbību, lai iegūtu visprecīzākos rezultātus. Eksperts ģeofiziķis jau izpētes laikā var mēģināt noteikt dažādas anomālijas augsnē un veikt papildu pārbaudes vietās ar vairākām anomālijām.

Iegūtie dati un uzmērījuma rezultāts

Ar ģeoradaru iegūtie dati ir atstaroto signālu kopums, un to analīze balstās uz datu interpretāciju. Katrs signāls atspoguļo viļņa ātrumu, kas pārvietojas telpā. Apvienojot simtiem šādu signālu, veidojas radaru profili, kam tiek veikta pēcapstrāde, lai izdalītu un vizualizētu pazemes objektus. Pēcapstrādes process ietver trokšņu filtrāciju, datu izlī-

dzināšanu, ģeometrijas korekciju un citas signālu apstrādes metodes. Svarīgi ir izprast teritorijas reljefu un pareizi pielāgot tam datus. Mūsdienu programmatūra ļauj automatizēt vairākus pēcapstrādes posmus, taču galvenā loma lēmumu pieņemšanā joprojām paliek cilvēkam, jo eksperts nolasa vizuālo informāciju. Pašlaik mākslīgais intelekts jau ir pietuvojies ģeoradara zinātniskajai sfērai, bet tas vēl nav kļuvis par reāli izmantojamu funkcionalitāti. Mūsdienu ģeofiziķim vai apmācītam arheologam pašam ir pareizi jāinterpretē dati, lai atšķirtu reālus objektus no trokšņiem, ko rada, piemēram, zemes struktūras izmaiņas. Tas ir ļoti svarīgs aspekts, ja runa ir par salīdzinoši svaigiem apbedījumiem vai citām vietām ar pārraktu grunti. Šādā vidē zemes struktūras traucējumu dēļ atspulgi ir izkropļoti.

Primārie nodevuma formāti, failu izmēri un izmēru ietekmējušie faktori

Ģeoradaru izpētē izmantotie datu formāti ir atkarīgi no konkrētās aparātūras un programmatūras, bet visbiežāk tiek iegūti dati ar paplašinājumiem GPR, DZT un SEG-Y. Šie formāti ļauj saglabāt gan neapstrādātus, gan apstrādātus datus ar iespēju tos vēlāk analizēt un vizualizēt. Nozarē sastopams liels datu formātu daudzums, jo katrs iekārtu ražotājs izdod datus unikālā formātā, un arī datu pēcapstrāde ir iespējama tikai tā paša ražotāja programmatūrā. Tādēļ bieži rodas situācija, ka jēldatiem no viena ražotāja ģeoradara nevar veikt pēcapstrādi cita ražotāja programmatūrā failu nesaderības dēļ. Atsevišķiem jēldatu formātiem var veikt pēcapstrādi *Python* programmēšanas valodas atvērtā koda programmās, bet tā vairāk uzskatāma par eksperimentālu datu pēcapstrādi. Jēldatu pēcapstrādei visdrošāk izmantot ģeoradaru ražotāju rekomendēto datu apstrādes plūsmu. Ģeoradara izpētē iegūto failu apjoms var atšķirties atkarībā no vairākiem faktoriem: antenas frekvences, skenēšanas blīvuma, izpētes apgabala lieluma un izpētes ilguma. Piemēram, ar augstfrekvences antenu pat nelielā viena hektāra platībā var iegūt datus vairāku GB apjomā. Ir jāņem vērā, ka jēldatu pēcapstrādei un uzglabāšanai ir nepieciešama palielināta datora procesora jauda un datu glabāšanas vieta. Parasti ražotāji izdod un atbalsta savas lietojumprogrammas *Windows* operētājsistēmā, dažkārt arī *Linux*.

Nodevuma sastāvs un kvalitātes pārbaude

Ģeoradara rezultāti arheoloģijā sniedz unikālu iespēju ielūkoties pagātnē, neiejaucoties kultūras slāņu kopumā. Tomēr, lai pārliecinātos par iegūto datu ticamību, ir jāizdara rūpīga kvalitātes pārbaude. To parasti veic tas pats ģeofiziķis, kurš apstrādā datus.

Pirmkārt, jāņem vērā izpētes apstākļi: laikapstākļi, virsmas apstākļi, iespējamie trokšņi un citi faktori, kas varēja ietekmēt rezultātus. Ģeoradara operatoram vienmēr jāinformē datu analītiķis par situāciju ob-

jektā. Datu analītiķim jāzina, vai objektā ir bedres, konstrukcijas ar dziļiem pamatiem un citas sīkas detaļas.

Otrkārt, dažos gadījumos var būt svarīgi atkārtot izpēti tajā pašā teritorijā, lai apstiprinātu konstatētās anomālijas. Var precīzāk noteikt objekta laukumu vai arī paplašināt izpētes teritoriju, lai lokalizētu lielus objektus zem zemes virsmas. Arī tādā situācijā, kad lauka darbos ir iesaistīts profesionāls operators, viņš var paveikt šo uzdevumu vienas ekspedīcijas laikā, ja raksturīgās anomālijas tiek pamanītas laikus.

Turklāt ģeoradara izpētes rezultātus bieži vien salīdzina ar citu metožu rezultātiem, piemēram, magnetometriju vai elektroizpēti, lai palielinātu iegūtās informācijas ticamību. Ir svarīgi atzīmēt, ka datu interpretācijas kvalitāte lielā mērā ir atkarīga no eksperta pieredzes un kvalifikācijas. Pat izmantojot vismodernākās iekārtas, ir nepieciešama rūpīga analīze, lai izdarītu gala secinājumus par identificētajiem objektiem.

Uzmērījuma prasību definēšana.

Nepieciešamā informācija uzmērīšanas darbu veicējam.

<i>Objekta informācija pakalpojuma sniedzējam piedāvājuma sagatavošanai</i>
Objekta atrašanās vieta. Objekta izmēri un laukums, kurā ir nepieciešams veikt izpēti
Pazemes inženierkomunikāciju un kanalizācijas plāni (ja tādi ir)
Uzmērījuma mērķa apraksts un sagaidāmais rezultāts (piemēram, vai tiek meklētas senas konstrukcijas vai apbedījuma vietas)
Iepriekšējās izpētes rezultāti (ja tādi ir bijuši)
Teritorijas kultūrvēsturiskais konteksts (ēku materiāli, apbedījuma tradīcijas utt., ja tas ir zināms)

<i>Uzmērīšanas prasības</i>	<i>Izvēles</i>
<i>Horizontālās precizitātes minimums</i>	0,10–0,50 m
<i>Vertikālās precizitātes minimums</i>	0,05–0,20 m
<i>Pazemes objektu izmēru identificēšana</i>	0,20–0,5 m
<i>Primārie nodevumi 3D izpētei</i>	
<i>Dziļuma kartes</i>	.pdf, .jpg
<i>Radarēšanas dati</i>	Ģeoradara ražotāja izveidotais formāts (.sgy / .dt / .rd3 / .dzt / ...)
<i>Atskaite par paveiktiem darbiem</i>	.pdf, .docx
<i>Primārie nodevumi 2D izpētei</i>	
<i>Radarēšanas profili</i>	.pdf, .jpg
<i>Radarēšanas dati</i>	Ģeoradara ražotāja izveidotais formāts (.sgy / .dt / .rd3 / .dzt / ...)
<i>Atskaite par paveiktiem darbiem</i>	.pdf, .docx

6.8 BATIMETRISKĀ MĒRĪŠANA AR SĀNSKATA SONĀRU

Darbības princips

Batimetriskā jeb akustiskā tālīzpētes mērīšana ir nedestruktīva metode zemūdens kultūrvēsturiskā mantojuma dokumentēšanai. Tā sākotnēji tika radīta un izmantota kuģniecības nozarē, lai kartētu ūdensceļus un identificētu potenciālos zemūdens šķēršļus. Tomēr tās darbības principi ir ērti pielāgojami arī zemūdens kultūras mantojuma apzināšanai un izpētei.

Batimetriskie mērījumi tiek veikti, izmantojot eholoti jeb sonāru, kas izdala skaņas viļņus ūdenstilpes gultnes virzienā. Attālums no sonāra līdz ūdenstilpes gultnei vai tajā esošam objektam tiek aprēķināts, balstoties uz viļņa ceļošanas laiku līdz virsmai un atpakaļ uz ierīci. Skaņas viļņi atduras pret visām virsmām un šķēršļiem, rezultātā iegūstot datus par gultnes dziļumu un objektiem, kas tur atrodas. Batimetriskie mērījumi uztver ne tikai gultnē esošus objektus, bet arī ūdenī peldošus, piemēram, zivis, kas ir vērā ņemams kļūdas faktors.



Skenēšanas process Āraišu ezerā no motorlaivas (autors: J. Meinerts)

Iekārtu spektrs, īss apraksts par aktuālākajām iekārtām

Iekārtas, kas izmanto akustiskās tālīzpētes metodes, tiek lietotas gan civilajā, gan militārajā jomā, tādēļ tām var būt dažādas tehniskās specifikācijas. Visvienkāršākās ierīces darbojas ar viena viļņa (*single-beam sonar*) jeb stara principu – tiek palaists tikai viens stars, rezultātā iegūstot konkrēta punkta dziļummērījumu, kas der tikai ūdenstilpes dziļuma noteikšanai.

Objektu lokalizēšanai zem ūdens ar kuģi vai ROV ir piemērots attēlveidošanas sonārs (*imaging sonar*). Tas izdala signālus sev apkārt, veidojot reāllaika attēlu ierīcei piesaistītā ekrānā. Tas var noderēt orientācijas noteikšanai zem ūdens. Taču tas drīzāk ir uzskatāms par atbalsta ierīci zemūdens droniem un transportlīdzekļiem, nevis par pētniecības tehnoloģiju.

Zemūdens mantojuma apzināšanā viena no efektīvākajām iekārtām ir sānskata sonārs (*side-scan sonar*). Ierīce izdala slīpus akustiskos signālus gultnes virzienā, un, signālam saskaroties ar kādu objektu, veidojas ēnas, kas palīdz noteikt uzmērītā objekta veidu. Datus var izmantot dziļumkaršu un atklāto objektu vizualizāciju izveidei.

Viena no komplicētākajām ierīcēm ir daudzstaru sonārs (*multi-beam sonar*). Tas izstaro daudzus akustiskos signālus vienlaikus, un rezultātā tiek iegūts punktu mākonis ar dziļuma reljefa informāciju (tāpat kā LiDAR dati sauszemē). Datus var apstrādāt un no tiem veidot virsmas 3D modeļus. Šo metodi plaši izmanto jūras ģeoloģijā un bioloģijā, bet tā ir būtiska arī zemūdens arheoloģisko objektu uzmērīšanā.

Lai konstatētu objektus, kas ieskaloti vai aprakti ūdenstilpes gruntī, var izmantot zemgultnes profilētāju (*sub-bottom profiler*). Tā raidītie signāli caurdur gultnes virsmu, un dati tiek uzrādīti profila šķērsgrīzumā (līdzīgi kā ģeoradara darbība sauszemē). Tā lietošanā gan ir vairāki ierobežojumi, piemēram, to var lietot samērā seklos ūdeņos un tas mēdz neuztvert koka konstrukcijas.

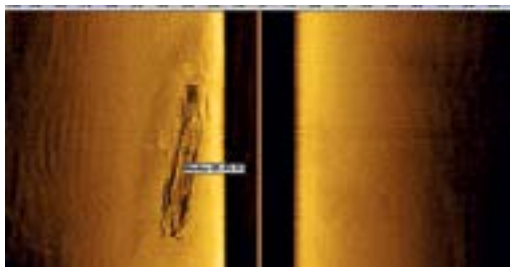
Uzmērīšanas process

Zemūdens kultūras mantojuma objektu uzmērīšana visbiežāk tiek veikta ar sānskata sonāru. Pētnieki to izmanto gan jaunu objektu meklēšanā, gan dažādos monitoringa procesos jūrās un arī iekšzemes ūdeņos. Arī cenas ziņā tā ir viena no lētākajām un mobilākajām tehnoloģijām. Atkarībā no pētāmās ūdenstilpes dziļuma sānskata sonāra ierīci var uzstādīt divos veidos – līdz 10/20 m dziļās vietās sonārs ir piestiprināms pie ūdens transportlīdzekļa borta un, ja nepieciešams, ar rokturi nolaižams ūdenī un paceļams ārā. Savukārt, ja dziļums ir lielāks par 20 m, ierīces signāla izdevēju piestiprina pie torpēdas veida sistēmas, ko, iesienot auklā, ielaiž ūdenī un velk aiz kuģa – veidojas tā sauktā velkamā zivs (*tow fish*).



Sānskata sonāra uzmērīšanas princips
(Adobe stock)

Veicot mērījumu, sonāra ierīce izstaro divus sfēriskus signālus gultnes virzienā. Mērījuma aptvertās teritorijas apjoms ir pielāgojams sonāra ierīcei piesaistītajā ekrānā. Iegūtie dati uzrādās ekrānā kā divas paralēlas vizualizācijas kolonnas, starp kurām iekrāsojas melns nodalījums, kas ir sonāram tiešā apakšā esošā gultnes daļa, kuru signāli mērījumos neuztver. Iegūtajā attēlā redzama gultne plaknē. Raidot skaņas viļņus pa kādu objektu un tam sasniedzot objekta virsmu, daļa no signāla izklīst. Skeneris aprēķina izklīduma leņķi un veido objekta aprises. Savukārt signāla raidīšanas virzienam pretējā pusē aiz objekta vizualizācijā tiekiesta ēna, kas rada trīsdimensionāla attēla iespaidu. Sānskata sonāra mērījumi nesniedz informāciju par materiāliem un objektu tekstūru, taču metāla, akmens un koka objekti labāk atstaro signālus, tāpēc tie skenējumā tiek iekrāsoti tumšākā tonī nekā smiltis vai citi gultnes materiāli. Mērīšanas procesā vienlaikus tiek iegūti arī dziļuma, ūdens temperatūras u. c. dati.



Uzmērījuma vizualizācija
(autors: A. Vilks)

Mērījumus visbiežāk veic no laivas vai neliela kuģa, lai varētu efektīvi izdarīt vajadzīgos manevrus. Datu ievākšanai optimālais transportlīdzekļa ātrums ir 3–4 mezgli, bet, ja ūdenstilpes dziļums pārsniedz 40 m, ātrumam nevajadzētu būt lielākam par 2 mezgliem. Skenēšanas maršrutu nepieciešams izplānot pirms mērījumu veikšanas. Atkarībā no ierīces iestatījumiem viduslīnija zem sonāra, kur dati netiek ievākti, parasti ir 10–15 m plata katrā pusē, tāpēc veidojas datu zaudējums 30 m platā joslā. Lai kompensētu šo iztrūkumu un iegūtu pēc iespējas pilnīgākus datus, maršrutā ir jāparedz savstarpēji joslu pārklājumi, pretējā gadījumā pastāv risks pazaudēt būtisku informāciju par pētāmo teritoriju. Maršrutu visērtāk ir plānot kā paralēlas līnijas, to galos apgriežot transportlīdzekļi, veidojot U burta formas apgriešanās vietas. Izstrādāto maršrutu var sagatavot iepriekš un ievadīt transportlīdzekļa navigācijas sistēmā, kur tai ērtāk izsekot. Maršruta izsekošanai der arī rokas navigācijas ierīces.

Prasības objektam, lai veiktu uzmērīšanu, un paredzamais laiks faktiskajam darbam

Uzmērīšanas darbiem svarīgi ir laikapstākļi, jo tie var ietekmēt datu ievākšanas kvalitāti. Veicot skenēšanu ar sānskata sonāru jūrā, maksimālais pieļaujamais vēja ātrums sekmīgai un kvalitatīvai datu ievākšanai ir 6 m/s, turklāt visoptimālākie apstākļi ir tad, ja vēja kustība veidojas no piekrastes jūras virzienā, jo tādējādi viļņi būs mazāk traucējoši. Lekšzemes ūdeņos vēja ātrums lielākoties uzmērīšanas darbu neietekmē. Arī nokrišņi skenēšanas datu kvalitāti pārsvarā neietekmē, taču tas ir būtisks faktors, kas samazina darbinieku komfortu darba procesā.

Zemūdens straumes un citas dabiskas parādības var ietekmēt datu precizitāti, piemēram, skaņas viļņu izplatība saldūdenī notiek ātrāk nekā blīvākajā sālsūdenī, taču saldūdeņos bieži sastopams daudz vairāk organisko mikrodaļiņu, kas savukārt var pasliktināt datu kvalitāti. Ja ūdenī ir liels mikrodaļiņu daudzums, ieteicams skenēšanu veikt ar zemāku signāla frekvenci, kas būtu apmēram 400 kHz. Ūdenstilpēs, kur organiskās vielas skenēšanas darbiem netraucē, uzmērīšanu iespējams veikt ar 900 kHz frekvenci, kas nodrošina lielāku datu izšķirtspēju. Ja ūdenī ar augstu mikrodaļiņu koncentrāciju skenēšana tiek veikta ar lielu frekvenci, pastāv risks, ka mērījumā tiks uztvertas šīs daļiņas, kas būtiski pasliktinās mērīšanas rezultātus. Vislabāk skenēšanas darbus ir veikt vēlā pavasarī vai vasaras sākumā, pirms ir savairojušās organiskās mikrodaļiņas. No darbības vietas aspekta skenēšanu ar sānskata sonāru parasti iespējams veikt ūdenstilpēs ar dziļumu līdz 70 m. Seklākais dziļums, kurā ar sānskata sonāru var veikt mērījumus, ir aptuveni 2 m. Darba procesa ilgumu precīzi prognozēt ir samērā sarežģīti, jo tas ir atkarīgs no laikapstākļiem (vēja ātruma u. tml.), teritorijas attāluma no laivas piestātnes vietas, pētāmās teritorijas lieluma un citiem faktoriem. Dažreiz noteiktās vietās ir nepieciešams mērījumus atkārtot, lai iegūtu precīzākus datus par kādu skenējumā uztvertu objektu. 1 km² lielas teritorijas uzmērīšana vidēji aizņem aptuveni 8–9 stundas. Vislielāko laika patēriņu parasti veido nokļūšana uz skenēšanas teritoriju. Darbus ieteicams organizēt maiņās, ideālā gadījumā – ar vairākiem transportlīdzekļa vadītājiem.

legūtīe uzmērījuma pirmdati un nepieciešamā pēcapstrāde

Ar sānskata sonāru veikto mērījumu dati ir sākotnēji redzami ierīcei pievienotajā ekrānā, kur tos iespējams reāllaikā apskatīt gan virsskatā, gan profila griezumā. Redzamā informācija ir pietiekami uzticams iegūto datu atspoguļojums, kas ļauj pieņemt lēmumu par tūlītēju korekciju izdarīšanu, proti, veikt atkārtotu skenēšanu nekvalitatīvu mērījumu gadījumā.

Pēc skenēšanas datus iespējams apskatīt un apstrādāt atbilstošās da-

torprogrammās. Jēldati uz datora nav apskatāmi bez apstrādes. Importējot tos programmās, var veidot dziļumkartes, kā arī iegūt skenēto objektu vizualizācijas, kas izmantojamas pētniecībā vai vienkāršai apskatei. Ar datu apstrādes procesu pārsvarā iespējams iepazīties dažādās brīvpieejas pamācībās internetā. Biežāk izmantotās programmas ir *SonarWiz (Chesapeake Technology)*, *HIPS and SIPS (CARIS)* u. c., no kurām daļa ir pieejamas bez maksas. Pēc pirmapstrādes datus iespējams saglabāt arī citos formātos, piemēram, kā attēlus vai ģeotelpiskos datus, un integrēt ģeogrāfiskajās informācijas sistēmās.

Piesaiste koordinātu un augstuma sistēmai (pēc nepieciešamības)

Ierīce, kas uztver skenera datus, ir piesaistīta navigācijas sistēmai un automātiski reģistrē precīzu skenera atrašanās vietu, taču ir svarīgi, lai navigācijai būtu uzstādīta universāli lietojama koordinātu sistēma, visbiežāk tā ir WGS84. Tādā veidā datus pēc apstrādes procesā ir ērtāk konvertēt darbam ar nepieciešamajām ģeogrāfiskajām informācijas sistēmām. Vēlāk importējot datus datorprogrammā, ir jānorāda atbilstošā koordinātu sistēma.

Primārie nodevuma formāti, failu izmēri un izmēru ietekmējošie faktori

Skenēšanas procesā tiek iegūti dati dažādos failu formātos, kas parasti atšķiras atkarībā no ražotāja, taču visbiežāk tas ir XFT, kas ir viens no hidrogrāfisko datu standartformātiem industrijā, līdz ar to ir arī viegli konvertējams. Šo formātu visērtāk uzglabāt un vēlāk izmantot dažādās datorprogrammās, tostarp ar laika nobīdi.

Uzmērījuma prasību definēšana.

Nepieciešamā informācija uzmērīšanas darbu veicējam

Objekta informācija pakalpojuma sniedzējam piedāvājuma sagatavošanai	
Uzmērāmās teritorijas koordinātas, kartogrāfiskais materiāls	
Uzmērījuma mērķa apraksts	
Norādīta frekvence, kādā vēlams veikt mērījumu	
Koordinātu sistēma, kādā veikt mērījumu	
Failu formāts, ko vēlams saņemt	

Uzmērīšanas prasības	Izvēles
Precizitātes minimums	400 kHz / 900 kHz
Krāsainība	krāsains (pārsvarā dzeltenī-melni) / melnbalts
Primārie nodevuma formāti	
Kartogrāfiskais materiāls	.pdf, .xml (pēc nepieciešamības)
Batimetriskie jēldati	.xft
Fotogrāfijas	.jpeg vai .tiff, .png, .raw (pēc nepieciešamības)

DROŠA DATU GLABĀŠANA ILGTERMIŅĀ

Liela apjoma 3D uzmērījumu datu droša ilgtermiņa glabāšana prasa ievērot vairākus labās prakses principus, lai nodrošinātu datu integritāti, pieejamību un aizsardzību pret aparatūras kļūmēm vai novecošanos. Šeit aprakstīti galvenie pamatprincipi un ieteikumi 3D datu ilgtermiņa glabāšanai.

7.1 DATU IZVIETOŠANAS DAŽĀDĪBA UN REZERVES KOPIJAS

Vienmēr ir ieteicams uzturēt vairākas dublējumkopijas un glabāt datus vismaz trīs dažādās vietās:

- primārā glabāšana (kur dati tiek izmantoti ikdienā),
- lokālā rezerves kopija (piemēram, ārējie cietie diski vai tīklam pieslēgts serveris),
- ārējā/globālā rezerves kopija (mākoņglabāšana ārkārtas gadījumiem).

“3–2–1” rezerves kopēšanas likums: saglabājiet 3 datu kopijas, glabājiet tās uz 2 dažādiem datu nesēju veidiem un turiet 1 kopiju ārpus vietējās sistēmas. Šāds princips garantē piekļuvi datiem arī tad, ja viena sistēma nav pieejama.

7.2 MĀKOŅGLABĀŠANA ILGTERMIŅĀ GLABĀŠANAI

Mākoņpakalpojumi nodrošina mērogojamus, drošus un rentablus risinājumus lielu datu apjomu glabāšanai. Izvēlieties pakalpojumu sniedzējus, kuri piedāvā:

- automātiskas rezerves kopijas un kopēšanu vairākās ģeogrāfiskajās zonās;
- datu integritātes pārbaudes, lai novērstu datu bojājumus;
- aukstās glabāšanas risinājumus arhīva datiem, kuriem nav nepieciešams bieži piekļūt, bet kuri ir jāglabā drošībā.

7.3 FAILU FORMĀTU IZVĒLE UN DATU SASPIEŠANA

Izmantojiet atvērtus un labi atbalstītus formātus. Ilgtermiņa glabāšanai izvēlieties failu formātus, kuriem ir lielāka atbalsta iespēja nākotnē. Biežāk lietotie 3D datu formāti ir:

- .PLY (poligonu faila formāts),
- .OBJ (objektu fails),
- .LAS/.LAZ (LIDAR dati) punktu mākoņiem,
- .E57 (atvērts formāts 3D punktu mākoņu datiem).

Bezzudumu arhivēšana. Arhivējiet savus 3D datus, izmantojot formātus. LAZ (arhivēts LAS) vai ZIP, lai samazinātu faila izmēru, bet nezaudētu informāciju.

7.4 METADATI UN DOKUMENTĀCIJA

Uzglabājot metadatus, pārliecinieties, ka tie satur visus datus un pavadošos failus, kas dokumentē avotu, izmantoto aprīkojumu, iestatījumus, koordinātas un jebkuru citu apstrādes informāciju. Metadatu struktūrai jāpaliek nemainīgai – tieši tādai pašai, kāda tā ir uzreiz pēc uzmērīšanas un eksportēšanas no uzmērīšanas iekārtas. Tas nodrošinās datu izmantojamību arī nākotnē.

Saglabājiet skaidru datu mapju struktūru un konsekventus failu nosaukumus, lai datus būtu viegli pārvaldīt un atrast.

7.5 ILGTERMIŅA ARHIVĒŠANAS GLABĀŠANAS DATU NESĒJI

Magnētiskā lente. LTO (*Linear Tape-Open*) magnētiskā lente ir uzticams un rentabls risinājums ilgtermiņa arhivēšanai. Tai ir liela kapacitāte, un, ja to pareizi uzglabā kontrolētā vidē, tā kalpo vairāk nekā 30 gadus.

Optiskā glabāšana (*Blu-ray*). Arhīva klases *Blu-ray* diski (piemēram, M-DISC) piedāvā ilgstošu izturību (līdz 1000 gadiem), taču tie var nebūt piemēroti ļoti lieliem datu apjomiem zemākas ietilpības dēļ.

SSD un HDD. Regulāri atjauniniet tos ar jaunākiem diskkiem ik pēc 5–10 gadiem, jo to ilgmūžība un uzticamība laika gaitā samazinās.

7.6 DATU ATGŪŠANAS PLĀNS

Izstrādājiet “Datu atgūšanas plānu pēc katastrofām” saviem 3D datiem, kurā ietilpst:

- datu atjaunošanas procedūras no rezerves kopijām;
- plāns datu migrēšanai uz jaunākiem formātiem vai sistēmām, attīstoties tehnoloģijām;
- regulāra rezerves kopiju pārbaude, lai pārliecinātos, ka tās ir funkcionālas.

7.7 DATU DROŠĪBA

Šifrējiet sensitīvus datus pirms to glabāšanas, īpaši mākoņpakalpojumos, lai aizsargātu pret nesankcionētu piekļuvi.

Izmantojiet ar paroli aizsargātus arhivētus datus, pārsūtot tos starp dažādām glabāšanas sistēmām.

7.8 DATU PĀRVIETOŠANA UN TO IZMANTOJAMĪBA NĀKOTNĒ

Regulāri atjauniniet glabāšanas datu nesējus un programmatūru, lai izvairītos no novecošanās. Cietajiem diskkiem un citiem datu nesējiem ir ierobežots darbmūžs, tādēļ periodiski migrējiet datus uz jauniem datu nesējiem.

Ir būtiski sekot līdzi jaunākajām datu glabāšanas tehnoloģijām, kas var piedāvāt labāku veiktspēju, uzticamību vai izmaksu efektivitāti. Lai nodrošinātu uzkrāto 3D datu glabāšanu, pārvaldību, prezentēšanu un izplatīšanu, 2025. gadā ir plānots papildināt NKMP pārziņā esošo Kultūras mantojuma pārvaldības informācijas sistēmu “Mantojums” (<https://mantojums.lv/>) ar 3D datu pārvaldības un vizuālā atbalsta moduli. Šis modulis nodrošinās vairākas būtiskas funkcionalitātes.

- Kultūras pieminekļu 3D vizuālie dati tiks uzglabāti vienotā failu glabātavā datu centrā *Swift (Open Stack Object Store)*.
- Sistēma atbilstoši biznesa lietotāju vajadzībām nodrošinās autorizētiem sistēmas lietotājiem (kultūras pieminekļa īpašniekiem vai NKMP darbiniekiem) mehānismu 3D datu augšupielādei caur sistēmas lietotāja saskarni, kā arī iespēju sagatavot metadatus. Autorizētie lietotāji varēs augšupielādēt gan pilna formāta 3D datņu komplektus, gan samazināta formāta datnes, kas tiks izmantotas sistēmas vizualizācijas modeļa priekšskatījumam. Papildus tiks nodrošināta datu pārbaude un papildināšana.
- Samazinātā 3D formāta datnes tiks piesaistītas attiecīgajam kultūras piemineklim, nodrošinot sistēmas lietotājiem (gan autorizētiem lietotājiem, gan publiskās daļas lietotājiem) iespēju veikt datu priekšskatījumu un pēc pieprasījuma aplūkot vizualizētos datus, izmantojot iebūvētu 3D modeļa/punktu mākoņa pārlūku (*viewer*).

Viens no NKMP mērķiem ir vienotā resursā uzkrāt un droši saglabāt gan iestādes pasūtītos kultūras pieminekļu 3D datus, gan dot iespēju kultūras pieminekļu īpašniekiem uzglabāt šos apjomīgos datus drošā vidē un ērti tiem piekļūt nepieciešamības gadījumā. Ja sabiedrībā būs interese par šādu pakalpojumu, nākotnē sistēmā varētu piedāvāt iespēju glabāt 3D datus arī par citiem kultūrvēsturiski nozīmīgiem objektiem, kuriem nav valsts aizsargājama kultūras pieminekļa statusa.

Savukārt otrs mērķis – dot iespēju sabiedrībai bez īpašu palīglicenzekļu (speciālas programmatūras) lietošanas apskatīt 3D datus par Latvijas kultūras mantojumu – iespējams, ar laiku tos integrējot arī ģeotelpisko datu risinājumos. Tas būtu nozīmīgs ieguldījums kultūras mantojuma popularizēšanā, izglītības procesos un tūrisma attīstībā, kā arī varētu veicināt jaunu pakalpojumu veidošanos privātajā sektorā.

NORVĒGIJAS UN LATVIJAS SPECIFISKĀ PIEREDZE MODERNO TEHNOLOĢIJU PIELIETOŠANĀ

8

LIDAR DATI ARHEOLOĢISKĀ MANTOJUMA PĀRVALDĪBĀ UN IZPĒTĒ

Jānis Meinerts

ATSĻĒGAS VĀRDI: *LIDAR ARHEOLOĢIJĀ, ĢIS ARHEOLOĢIJĀ, ARHEOLOĢISKĀ
APZINĀŠANA, PILSKALNI*

Teritoriju tālīzpētei ir svarīga loma mūsdienu arheoloģijā, jo tā ļauj attālināti izpētīt plašas teritorijas un organizēt mērķtiecīgas ekspedīcijas uz vietām, kur identificētais objekts atbilst noteiktām pazīmēm. No lidaparātiem veiktā lāzerskenēšana un iegūtie 3D dati (LIDAR) ir vērtīgs informācijas avots speciālistiem, jo precīzi un detalizēti ataino zemes reljefu – virsmu ar augstu precizitāti un punktu blīvumu. Šajā nodaļā aplūkoti divi piemēri, kā LIDAR dati ir izmantoti praksē, atklājot 77 jaunus pilskalnus Latvijas teritorijā un 12 akmens laikmeta senvietas Burtnieku ezera apkārtnē.

PILSKALNU JAUNATKLĀJUMI LATVIJĀ 2018.–2021. GADĀ, IZMANTOJOT LIDAR DATUS

Objekta vēsture. Sistemātiska pilskalnu apzināšana Latvijas teritorijā aizsākās jau 19. gadsimta otrajā pusē, bet īpašu pacēlumu tā piedzīvoja 20. gadsimta 20. gados. Lielākā daļa zināmo pilskalnu tika uzskaitīta laikā līdz Otrajam pasaules karam, galvenokārt balstoties uz folkloras avotiem un vietējo iedzīvotāju sniegto informāciju. Paralēli pilskalnu apzināšanai notika arī to aktīva arheoloģiskā izpēte. Kā vizuāli atpazīstami un ar folkloru saistīti arheoloģiskā mantojuma objekti tie ir kļuvuši par nacionāli nozīmīgiem simboliem literatūrā un mākslā. Līdz 2018. gadam Latvijā bija zināmi aptuveni 480 pilskalni, lai gan ne visi no tiem atbilst pilskalnu formālajām pazīmēm. Jaunu pilskalnu atklāšana pēdējās desmitgadēs bijusi reta parādība.

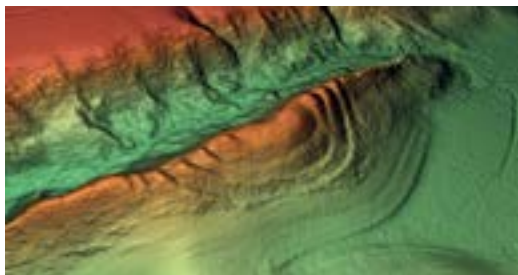
Izmantotā metode. Pilskalnu apzināšanai izmantoti brīvpiekļuvē pieejamie Latvijas teritorijas vienlaidus LIDAR skenēšanas dati, kas pēc Latvijas Ģeotelpiskās informācijas aģentūras (LĢIA) pasūtījuma konkursa kārtībā veikti laika posmā no 2013. līdz 2019. gadam. Skenēšana primāri notikusi, lai atvieglotu topogrāfisko un tematisko karšu

sastādīšanu un iegūtu aizsardzības sektoram nozīmīgu informāciju. Skenēšanas precizitāte, ņemot vērā skenējamās teritorijas platību un primāros mērķus, uzskatāma par ļoti labu: vismaz 1,5 punkti uz 1 m², vertikālā precizitāte vismaz 12 cm, horizontālā precizitāte vismaz 36 cm. Visbiežāk iegūtais datu pārklājums ir krietni kvalitatīvāks nekā skenējumam izvirzītās minimālās prasības, tomēr iegūto datu blīvums dažādos reģionos un lokālās teritorijās atšķiras. Šī ir primārā un gandrīz vienīgā LIDAR skenējumu datu kopa, kas izmantota arheoloģiskā mantojuma apzināšanas, pētniecības un aizsardzības darbā Latvijā. Papildus LIDAR karšu vizuālai pārbaudei pilskalnu jaunatklāšanas procesā plaši izmantota reljefa 3D vizualizāciju veidošana no LAS failu punktu mākoņiem. Pilskalnu reljefa formas mērītas digitālajā vidē, jo LIDAR datu pieejamība ļāva atteikties no nepieciešamības veikt pilskalnu reljefa uzmērīšanu ar laikietilpīgajām un ne vienmēr līdz galam precīzajām tradicionālajām metodēm.

Ātrai punktu mākoņu skatīšanai trīsdimensionālā vidē un dažādu mērījumu veikšanai tika izmantota datorprogramma *FugroViewer*, ar kuru bez iepriekšējas datu konvertēšanas citos formātos iespējams atvērt brīvi lejuplādējamus LAS failus. Šī ir bezmaksas programmatūra, kas ir vienkārši apgūstama un spēj teicami veikt visas nepieciešamās darbības: pieslēgt un atslēgt dažādus punktu slāņus (ēkas, reljefs, augstā un zemā veģetācija utt.), ģenerēt divdimensionālu virsmas vai trīsdimensionālu reljefa modeli dažādās krāsu gammās, kā arī izdarīt mērījumus vertikālajā plaknē un veidot pilskalnu profilus.

Diemžēl no programmas *FugroViewer* nav iespējams eksportēt attēlus un citus failu formātus pietiekami augstā kvalitātē, lai tos izmantotu publikācijās un kā ilustrācijas komunikācijā ar sabiedrību. Tāpēc šim nolūkam tika izmantota datorprogramma *planlauf/TERRAIN*, kas pieejama, iegādājoties licenci. Šī programma ļauj strādāt ar ļoti lielu teritoriju un datu apjomu un ir lieliski piemērota pilskalnu trīsdimensionālām vizualizācijām. Ar šo programmu iespējams veikt arī ļoti plaša spektra darbības, modificējot un rediģējot punktu mākonī. Tā piedāvā vairākus veidus, kā vizualizēt reljefu, un plašas iespējas eksportēt vizuālos materiālus dažādu formātu un kvalitātes failos – kā attēlus, video, grozāmus trīsdimensionālus modeļus.

Lielākā daļa no punktu mākoņu apstrādes programmām ļauj izmantot katram punktam definēto augstuma vērtību, lai automātiski ģenerētu augstumlīknes, līdzīgas tām, ko ierasts redzēt topogrāfiskajās kartēs un klasiskos pilskalnu vai citu arheoloģisku senvietu uzmērījumos. Šāda reljefa modeļa ar augstumlīknēm izveide no LAS failiem aizņem vien



2018. gadā jaunatklātā Daudziņu pilskalna reljefa 3D modelis, sagatavots no LĢIA LIDAR skenēšanas datiem, izmantojot datorprogrammu planlauf/TERRAIN
(autors: Jānis Meinerts)

pāris desmit minūšu, salīdzinot ar uzmērīšanu dabā un tai sekojošu uzmērījuma sagatavošanu, kas kopā var aizņemt pat vairākas dienas.

legūtais rezultāts. Jauno pilskalnu meklēšanu LIDAR kartēs bez īpaša pamudinājuma vai institucionāla ietvara veica vairāki desmiti Latvijas senākās vēstures entuziastu, šajā procesā pēc savas iniciatīvas iesaistījās arī vairāki jomas profesionāļi. Interesenti pētīja LIDAR kartes un uzrādīja profesionāliem arheologiem vietas ar pilskalniem raksturīgiem reljefa pārveidojumiem. Šī informācija tika nodota Latvijas Kultūras akadēmijas profesoram, arheologam Jurim Urtānam, kurš koordinēja un veica tālākos jaunatklāto pilskalnu apzināšanas darbus. Laika posmā no 2018. līdz 2021. gadam Latvijas teritorijā tika pamanīti, dabā apsekoti un kā īstas arheoloģiskas senvietas atpazīti 77 jauni pilskalni. Šis darbs, kas lielā mērā balstīts sabiedriskās jeb “pilsoņu zinātnes” iniciatīvās, ir būtiski papildinājis Latvijas pilskalnu karti, īpaši Latgales reģionā, kur zināmo pilskalnu skaits ir pieaudzis par vairāk nekā ceturto daļu. Tāpat kā citos līdzīgos LIDAR datu izmantošanas gadījumos, arī pilskalnu izpētē pierādījies, ka tikai jomas eksperti, pārbaudot un novērtējot objektu dabā, var droši spriest par tā arheoloģisko nozīmi. Pilskalnu apzināšanas rezultātā tapušajā jaunatklāto pilskalnu katalogā kā ilustratīvais materiāls primāri izmantoti no LAS failiem sagatavotie pilskalnu trīsdimensionālie modeļi, kas aizstājuši tradicionālos uzmērījumus.

AKMENS LAIKMETA SENVIETU ARHEOLOĢISKĀS APZINĀŠANAS BURTNIKA EZERA APKĀRTNĒ

Objekta vēsture. Pirmās liecības par Burtnieka ezera apkārtnes apdzīvotību akmens laikmetā iegūtas jau 19. gadsimtā, kad arī noritēja pirmie arheoloģiskās izpētes darbi Riņņukalna apmetnē. Pētījumi turpinājās arī 20. gadsimta 60. un 70. gados, kad plaši izrakumi notika Zvejnieku apmetnes un kapulauka kompleksā. Šo akmens laikmeta senvietu izcilā zinātniskā nozīmība visas Ziemeļeiropas kontekstā, kā arī unikālie saglabātības apstākļi Zvejnieku kapulaukā ir veicinā-

juši noturīgu pētnieku interesi par šiem objektiem arī 21. gadsimtā, kad veikti aizvien jauni pētījumi, izmantojot inovatīvas izrakumu un fiksācijas metodes. Paralēli arheoloģiskajai pētniecībai 21. gadsimta pirmajā desmitgadē veikti arī pirmie ģeoloģiskie pētījumi Gunta Eberharda vadībā ar mērķi rekonstruēt senā Burtnieka paleoezera krasta līniju, kas iezīmēja jaunas iespējas akmens laikmeta senvietu identifi- cēšanai un vajadzību pēc plašākiem apzināšanas darbiem paleoezera seno krastu zonās.

Izmantotā metode

Burtnieka paleoezera krasta līniju modelēšanai izmantoti brīvpiekļuvē pieejamie Latvijas teritorijas vienlaidus LIDAR skenēšanas dati. 2020. un 2022. gadā paleoezera krasta līnijas tika modelētas uz LIDAR DEM modeļa bāzes (apzināšanas darbu vadītāji – arheologi Mārcis Kalniņš un Aija Macāne), kur datorprogrammā QGIS ezera līmenis tika pacelts līdz G. Eberharda pētījumos konstatētajām augstuma atzīmēm, kas dažādos akmens laikmeta periodos variē no 42 līdz 47 m v. j. l. (Latvijas normālajā augstumu sistēmā LAS 2000,5). Pēc tam dabā tika apsekotas zonas, kur zemes virskārtu nesedza apaugums, kā arī veikta zondēšana un pārbaudes izrakumi jaunatklātajās potenciālo apmetņu vietās.



2023. gadā izstrādātais un precizētais Burtnieka paleoezera krasta līniju modelis (ezera maksimālais līmenis pie 50 m v. j. l.) un ezera krastos apzinātās senvietas (autori: Edijs Breijers un Mārcis Kalniņš)

Darbu gaitā atklājās nepieciešamība uzlabot izpētes metodiku, tāpēc 2023. gadā projektam tika piesaistīts ģeogrāfs un ĢIS speciālists Edijs Breijers, kurš izstrādāja jaunus Burtnieka ezera krasta līniju modeļus, kuros ņemta vērā reģionam raksturīgā glacioizostāze – zemes garozas nevienmērīga pacelšanās laikā pēc ledus vairoga atkāpšanās (līdz šim tika uzskatīts, ka šis process Burtnieka apkārtni nav ietekmējis). E. Breijers Burtnieka paleoezera krastu modelēšanai izmantojis metodoloģiju, ko izstrādājis, pētot senās Ventspils lagūnas krasta līnijas Baltijas jūras piekrastē. Metodes būtība ir veikt atkārtotu LIDAR LAS

failu punktu mākoņu automatizētu apstrādi, kuras rezultātā iegūtie dati apstrādāti, izmantojot dažādas QGIS programmatūras un citu modelēšanas rīku sniegtās iespējas, lai procesa galarezultātā radītu jaunu, īpaši lokālajiem apstākļiem pielāgotu krasta līniju modeli, kas cita starpā ņem vērā arī glaciozostatiskos procesus.

legūtais rezultāts

Veicot arheoloģisko apzināšanu, balstoties uz paleoezera krasta līniju modeļiem, kopumā atklātas 12 akmens laikmeta atradumu koncentrācijas vietas, no kurām 4–5 uzskatāmas par akmens laikmeta apmetnēm. Vairākās no jaunatklātajām arheoloģiskajām senvietām veikti pārbaudes izrakumi, kas ļāvuši ne tikai papildināt mūsu izpratni par Burtnieka ezera apkārtnes apdzīvotības struktūru akmens laikmetā, bet arī apstiprināt lietotās metodes pareizību. Izmantojot precizēto un E. Breijera izstrādāto krastu modeli, 2023. gadā apzināšanas laikā ezera ziemeļu galā tika apsekotas arī paleoezera krasta līnijas pie mūsdienu absolūtās augstuma atzīmes 50 m v. j. l., kur izdevās fiksēt jaunas akmens laikmeta senvietas. Šīs vietas netika pārbaudītas iepriekšējās apzināšanas ekspedīcijās, jo neiekļāvās ezera maksimālā ūdens līmeņa pie 47 m v. j. l. krastu zonā. Seno krasta līniju precīza modelēšana, kas ir metodoloģiski un tehnoloģiski sarežģīts process, aktualizējusi sadarbības nepieciešamību starp dažādu jomu pētniekiem. Lai gan labi rezultāti tika sasniegti arī ar vienkāršākām metodēm (ezera ūdens līmeņa paaugstināšana, izmantojot nerediģētu DEM modeli), ko spēja paveikt paši arheologi, īpaši izstrādāta un augsti detalizēta krasta līniju modeļa izmantošana uzrādīja neapstrīdamas priekšrocības.

DATU PĀRVALDĪBA, TURPMĀKĀ IZMANTOŠANA

Izmantotos LIDAR skenēšanas pamatdatus glabā LĢIA, tie ir brīvpieejā pieejami lejupielādei jebkuram interesentam LAS failu formātā LĢIA tīmekļa vietnē [1]. LIDAR kartes pieejamas kā karšu slāņi LĢIA [2] un LVM GEO [3] karšu pārlūkos, atvasinātās un pārpublicētās formās vairākos citos publiskos karšu pārlūkos.

Pilskalnu jaunatklājumi 2018.–2021. gadā

Apzināto objektu apraksti, kartes un fotofiksācijas materiāli glabājas NKMP Kultūras mantojuma informācijas centra (KMIC) arhīvā; fiksēto objektu vietas kartētas NKMP ģeogrāfiskās informācijas sistēmas (ĢIS) datubāzē. Informācija par apzinātajiem pilskalniem publicēta nozares zinātniskajā literatūrā. Vairākos no jaunatklātajiem pilskalniem jau notikuši arheoloģiskās izpētes darbi. Kultūras mantojuma aizsardzības aspektā 2022. gadā Latvijas Kultūras akadēmija rosinājusi iekļaut jaunatklātos

pilskalnus valsts aizsargājamo kultūras pieminekļu sarakstā. LIDAR dati jaunatklāto pilskalnu kontekstā ir būtiski atvieglojuši iespējas ne tikai precīzi kartēt tos ĢIS datubāzē, bet arī sagatavot nepieciešamo dokumentāciju to iekļaušanai kultūras pieminekļu sarakstā, tostarp noteikt tiem individuālās aizsardzības zonas. Ikdienas arheoloģiskā mantojuma aizsardzības darbā LIDAR kartes ļauj arī daudz vieglāk izvērtēt dažādu ar būvniecību saistītu darbu ietekmi uz arheoloģisko mantojumu.

AKMENS LAIKMETA SENVIETAS BURTNIEKA EZERA APKAIMĒ

Arheoloģiskās apzināšanas un izpētes darbu pārskati glabājas NKMP KMIC arhīvā. Izpētes darbu rezultāti publicēti zinātniskajā literatūrā.

[1] https://www.lgia.gov.lv/lv/Digit%C4%81lais%20virsmas%20modelis?fbclid=IwAR1PlaFfaN-dRuu9J4Nng_8nwOoxPRFKEOZAmHfk2-rZw73o5AFv5FQrrlQ

[2] <https://kartes.lgia.gov.lv/karte>

[3] <https://www.lvmgeo.lv/kartes>

9

3D SKENĒŠANA INDUSTRIĀLĀ MANTOJUMA PĀRVALDĪBĀ UN IZPĒTĒ

Norvēģijas ūdens resursu un enerģētikas direktorāts:

Unn Eide un Stig Storheil

Norvēģijas hidroenerģijas un rūpniecības muzejs:

Åsne Dolve Meyer un Dag Endre Opedal

Norvēģijas Ūdens resursu un enerģētikas direktorāta (NVE) pienākums ir palīdzēt saglabāt valsts nozīmes kultūras mantojumu šajā nozarē. Sadarbībā ar Kultūras mantojuma direktorātu NVE ir uzskaitījuši aptuveni 230 ar ūdenstecēm un enerģētiku saistītus objektus, kurus uzraugām mūsu lietu pārvaldības sistēmā.

NVE Muzeju iniciatīva tika uzsākta 2003. gadā sadarbībā ar Norvēģijas Meža muzeju un Norvēģijas Hidroenerģijas un rūpniecības muzeju. Mūsu mērķis ir saglabāt Norvēģijas ūdens resursu kultūras vēsturi, dokumentējot un izplatot informāciju.

Visi NVE uzskaitītie objekti ir tehniskais un rūpnieciskais kultūras mantojums, kas rada noteiktas problēmas saistībā ar saglabāšanu. Hidroelektroenerģijas shēmas un enerģijas pārvades sistēmas nepārraukti attīstās, to apjoms ir liels, un to uzturēšana pēc ražošanas pārtraukšanas izmaksā ļoti dārgi. Tāpēc dokumentācija ir svarīgs veids, kā saglabāt zināšanas par objektiem un tajos veikto izmaiņu vēsturi. Daļa

Norvēģijas Hidroenerģijas un rūpniecības muzeja darba ir ēku/iekārtu dokumentēšana kā turpinājums uzskaitītajiem objektiem, par kuriem atbild Norvēģijas Ūdens resursu un enerģētikas direktorāts (NVE).

DOKUMENTĀCIJAS STANDARTI UN REĢISTRĀCIJAS VEIDLAPA

Vairumā gadījumu par objektu izmaiņu dokumentēšanu ir atbildīgi to īpašnieki. Lai nodrošinātu noteiktu vienprātību un kvalitātes līmeni, NVE ir izstrādājusi mūsu nozares objektu dokumentācijas standartu (Jilmaza (*Yilmaz*) un Snekenēsa (*Snekenes*), 2019). Standarts galvenokārt balstās uz vadlīnijām, kas ir izstrādātas, pamatojoties uz Anglijas un Amerikas vēsturisko ēku apsekojuma/Amerikas vēsturisko inženiertehnisko pētījumu un Kultūras mantojuma direktorāta vadlīnijām. Standartizācija padara dokumentācijas procesu paredzamāku un efektīvāku gan objektu īpašniekiem, gan NVE lietu pārvaldībai.

Standarts ir iekļauts digitālajā reģistrācijas veidlapā ar saitēm uz piemēriem, un tas ir integrēts arī mūsu mediju bāzē un arhīva sistēmā. Tas nodrošina atbilstošu datu glabāšanu un pieejamību, kā arī atvieglolo dokumentācijas izmantošanu gan tagadnē, gan nākotnē.

METODES

Pirms projekta uzsākšanas un dokumentācijas metodes izvēles ir svarīgi skaidri saprast, kāpēc dokumentācija ir nepieciešama, kam tā ir paredzēta, kādiem mērķiem tā tiks izmantota un cik detalizēti tā ir nepieciešama.

Bezpilota lidaparāts

No bezpilota lidaparātiem uzņemtie fotoattēli ir noderīgi, lai dokumentētu lielus objektus un sniegtu pārskatu no gaisa. Bezpilota lidaparātus var izmantot gan ārpus telpām, gan iekštelpās, piemēram, elektrostacijās un lielās rūpnieciskās ēkās. Salīdzinot ar helikopteru izmantošanu, bezpilota lidaparāti ir lētāki un videi draudzīgāki, lai gan to lidojuma diapazons un attēla kvalitāte ir zemāka. Tomēr fotografēšanai ar bezpilota lidaparātu ir nepieciešams dārgs aprīkojums, un tā izmantošana ir vairāk atkarīga no laikapstākļiem. Pēdējos gados Norvēģijā ir ieviesti stingrāki noteikumi attiecībā uz bezpilota lidaparātu izmantošanu, un ir svarīgi, lai pirms tam tiktu saņemti visi sertifikāti un atļaujas. Tādai iestādei kā, piemēram, muzejam vai objekta īpašniekam ar ierobežotiem resursiem un darbiniekiem, šādu sertifikātu uzturēšana var būt sarežģīts uzdevums.

Fotogrammetrija

Fotogrammetrija ir vairāku fotoattēlu izmantošana, pārklājot tos, lai vizualizētu objektu trīsdimensiju formā. Šī metode ir piemērota ērti izmantojamu modeļu izveidei, taču tai ir nepieciešams liels daudzums

fotoattēlu datņu, kas prasa ievērojamu krātuves vietu. Tāpēc ir svarīgi rūpīgi plānot un apzināti izvērtēt, kas ir jādokumentē. Ideālā gadījumā, fotografējot apgaismojuma apstākļiem ir jābūt neitrāliem. Praktiskai īstenošanai uz vietas ir nepieciešama rūpīga plānošana un mērķa apzināšanās. Ar fotogrammetriju izveidotos modeļus var ģeoreģistrēt. Lai veiktu fotogrammetriju, ir nepieciešamas noteiktas mācības, un visbiežāk izmantoto programmatūru lietošana var būt sarežģīta un dārga. Fotoattēli būs ļoti detalizēti. Tomēr, lai iegūtu detalizētus modeļus ar labu tekstūru, fotogrammetriju varētu apvienot ar lāzerskenēšanu. Tā, protams, ir plaša un dārgāka metode. Dažos projektos šāda veida detalizācija var būt nepieciešama, bet citos – ne. Piemērs: Longeraka (*Longerak*), kas tiek veidota no bezpilota lidaparā-



Hokavīkas spēkstacija
(autors: Stig Storheil /NVE)



Longerakas spēkstacija
(autors: Stig Storheil /NVE)

ta un dslr fotoattēliem, un Hokavīka (*Håkavik*), kas ir veidota tikai no bezpilota lidaparāta iegūtajiem fotoattēliem.

360 grādu fotoattēls un 3D modeļi

360 grādu fotoattēls ir labi piemērots iekštelpu dokumentēšanai un attēlošanai. To var apvienot ar VR aprīkojumu, padarot to piemērotu prezentācijai sabiedrībai. 360 grādu fotoattēls būtībā ir divdimensiju attēls, kuru veido vairāki fotoattēli, kuri pārklājas, lai lietotāji varētu panoramēt attēlu uz sāniem, uz augšu vai uz leju. 360 grādu fotoattēlus var kombinēt ar bezpilota lidaparāta fotoattēliem, lai visaptveroši dokumentētu un parādītu objektu no ārpusē un iekšpusē.

Lai attēlā iekļautu visaptverošus datus, jāizmanto 3D kamera. 3D kameras ir dārgas, un bieži vien modeļi ir jāglabā trešo pušu vietnēs. Norvēģijas Hidroenerģijas un rūpniecības muzejs (*Kraftmuseet*) izmanto *Matterport* 3D kameru gan dokumentācijai, gan modeļu veidošanai, kuri tiks demonstrēti sabiedrībai.

Piemērs: Folgefongnata, Odda (*Oda*) <https://kraftmuseet.no/arbeidarboligane>



Folgefonngata 11, strādnieku mājokļa modelis ar informāciju par izglītības programmām

3D DATŅU GLABĀŠANAS NIANSES

Attiecībā uz atsevišķu datņu, datņu kopu un pabeigtu modeļu glabāšanu nav vienkāršu un acīmredzamu paraugprakses nostādņu. 3D datnēm, tāpat kā visu veidu multivides datņu aizsardzībai, tiek piemēroti labi digitālo līdzekļu pārvaldības principi – kvalitatīvi metadati, atbilstošas uzglabāšanas un aizsardzības sistēmas un konsekventa glabāšanas politika.

Visiem uzņēmumiem, kuriem ir jāpārvalda 3D datnes, ir jāpieņem vairāki svarīgi lēmumi.

Galvenais lēmums būs saistībā ar to, vai pabeigtos 3D modeļus glabāt kā galvenās datnes savā sistēmā, vai arī uzticēt to glabāšanu ārējām tīmekļa platformām, piemēram, *Sketchfab*.

Vēl viens lēmums, kas ir jāapsver, ir modeļu bāzes datņu saglabāšana, kas bieži ir dažādu veidu fotoattēlu datnes, piemēram, JPEG, TIFF vai RAW datnes. Jums būs jāapsver, kādas ir iespējas apkopot atsevišķas datnes, kas veidos pamatu 3D modeļiem. Šīs datnes var saglabāt kā atsevišķas datnes ar kopīgiem metadatiem, lai tos varētu viegli apkopot. Ir alternatīvas kompilēšanas metodes, piemēram, virtuālo mapju izmantošana.

Ja pabeigtie 3D modeļi ir jāsaglabā sistēmā, pastāv vairāki atbilstoši formāti, piemēram, OBJ, PLY, STL, glTF/GLB. Daudzi no tiem ir tā sauktie neitrālie atvērtā pirmkoda formāti. Tomēr tie bieži vien ir patentēti, un galvenā problēma ir tā, ka tie ir mazāk izplatīti dažādās sistēmās. Tas attiecas arī uz RAW fotoattēlu datnēm, izņemot *Adobe DNG* formātu, – vienīgo *de facto* standartu. Citi formāti ir patentēti – tie pieder tādiem ražotājiem kā *Canon*, *Nikon* un *Sony*.

Dažādu veidu 3D programmatūras arī veido savas projektu datnes, piemēram, Pix4D .p4d datnes. Piemēram, *OPF* ir atvērts un brīvi pieejams fotogrammetrijas datņu standarts.

Kopumā 3D datnes formāta izvēle būs atkarīga no vairākiem faktoriem, piemēram, no tā, kādu programmatūru izmantosiet gan jūs, gan

jūsu kolēģi. Tāpat jums ir jādomā par modeļu galīgo lietojumu, piemēram, 3D tīmeklī vai VR/AR.

Publiskajiem uzņēmumiem ir jāievēro arī prasības par dokumentu nodošanu arhīvu iestādēm dokumentu ilgtermiņa glabāšanai. Tās, protams, atšķiras atkarībā no valstu tiesību aktiem. Piemēram, Norvēģijā nav apstiprinātu datņu formātu, lai iesniegtu 3D datnes kā fotogrammetriskos modeļus. Norvēģijas iestādes arī laikus uzdod jautājumu, vai vispār ir iespējams noteikt piemērotus datņu formātus, nezaudējot informāciju.

IZPLATĪŠANA/3D MODEĻI UN KARTES

Viens no veidiem, kā izmantot dokumentāciju, ir uzskaitīto kultūras mantojuma objektu prezentācija NVE tīmekļvietnē. Papildus objektu vēstures un attīstības aprakstiem, fotoattēliem, filmām un zīmējumiem tiek izmantotas arī kartes un animācijas.

3D modeļu un karšu kombinācija ir īpaši noderīga, lai vizualizētu dažādus shēmu elementus, kā arī to mērogu un kontekstu hidroenerģijas ainavā. Izmantojam ĢIS un kartēšanas rīkus, piemēram, *ArcGIS Pro* un *ArcGIS Online*, lai izvietotu 3D modeļus ainās jeb 3D kartēs.

Izmantojot *ArcGIS Pro*, var augšupielādēt vienu vai vairākus 3D modeļus un ievietot tos ainā. Esam izmēģinājuši dažādu hidroenerģijas shēmas elementu modeļu augšupielādi un animāciju veidošanu, kas izseko ūdens kustībai no ūdenskrātuves līdz elektrostacijai. Animācijas var eksportēt dažādos filmu formātos un, piemēram, ievietot tīmekļvietnēs. Piemēram, Hokavīkas spēkstacija ir uzcelta 1922. gadā, un tā tika nodota ekspluatācijā, lai ražotu elektroenerģiju dzelzceļa vajadzībām. Tā ir viena no vecākajām *Statkraft* ražotnēm un ir aizsargājams objekts (Hokavīkas hidroenerģijas shēmas 3D animācija).

Ir iespējams arī eksportēt 3D modeļus un ainas uz *ArcGIS Online* vai augšupielādēt savus 3D modeļus tiešsaistes ainā. *ArcGIS Online* priekšrocība ir tā, ka tā ir tīmekļvietne, un dinamiskās kartes un ainas var viegli kopīgot ar projekta partneriem vai sabiedrību.

3D MODEĻI KĀ MUZEJA DARBĪBAS DAĻA

Viens no veidiem, kā Norvēģijas Hidroenerģijas un rūpniecības muzejs izmanto 3D modeļus, ir nodrošināt digitālu piekļuvi ēkām un būvēm, kas parasti nav pieejamas sabiedrībai, bet kurām ir liela izglītojoša un vēsturiska vērtība. Tas varētu attiekties arī uz spēkstacijām vai rūpnīcu ēkām, kas joprojām tiek izmantotas vai ir slēgtas citu iemeslu dēļ. Tā var būt arī iespēja sniegt sabiedrībai priekšstatu par to, ko var redzēt

pieejamā muzeja ēkā, ļaujot iepazīties ar ekspozīciju pirms potenciālā apmeklējuma. Pandēmijas laikā muzeji visā pasaulē šādā veidā atvēra savas durvis sabiedrībai, kas tobrīd sēdēja mājās. Muzeja 3D attēlus var izmantot arī, lai gūtu ieskatu ēkās, kas parasti nav pieejamas apmeklētājiem, ļaujot sabiedrībai apskatīt ekspozīcijas visu diennakti.

360 grādu fotoattēlus un modeļus, kas ir izveidoti ar 3D kamerām, var izmantot arī personām ar kustību traucējumiem, nodrošinot piekļuvi ēku daļām, kurās citādi viņi nevarētu iekļūt. Modeļus var aplūkot atsevišķā izstādes ekrānā vai piekļūt tiem, izmantojot kvadrātkodu. Izvēle starp 360 grādu fotoattēlu un 3D fotoattēlu ir atkarīga no vairākiem faktoriem.

Sabiedrībai būs vieglāk uztvert 360 grādu fotoattēlu, un bieži vien ar to pietiek, lai attēlotu telpu vai nelielu izstādes vai ēkas daļu. Visai ēkai, kuru apmeklētāji ir aicināti apskatīt no sava datora vai tālruņa, ir piemērots 3D fotomodelis. Gan 3D modeļus, gan 360 grādu fotoattēlus var demonstrēt, arī izmantojot VR brilles, tādējādi nodrošinot vēl aizraujošāku pieredzi, nekā to var iegūt uz ekrāna.

Norvēģijas Hidroenerģijas un rūpniecības muzejs ir izmantojis 3D modeļus vairākās publiskās lietošanas jomās, sākot ar veselām ēkām un beidzot ar ēku daļām. Modeļi ir pieejami mūsu tīmekļvietnē un *Google Maps*, lai sasniegtu plašāku auditoriju. Pandēmijas laikā viens no šiem modeļiem tika pielāgots par pamatu izglītības programmai, kas bija paredzēta skolēniem, kuri sēdēja mājās. 3D modeļu priekšrocība ir iespēja iekļaut modelī informācijas punktus, tālākai izpētei izmantojot muzeja arhīvu un vizuālos materiālus.

Arī mums kā muzejam ir svarīgi dokumentēt savas izstādes. Dažos gadījumos (nelielām, vienkāršām izstādēm) var pietikt ar parastiem fotoattēliem, taču Norvēģijas Hidroenerģijas un rūpniecības muzejs šim nolūkam galvenokārt izmanto 360 grādu fotoattēlu. Šāda veida dokumentācija parasti nav paredzēta sabiedrībai, bet to var iesniegt partneriem un māksliniekiem, kuri ir snieguši materiālus izstādei.

ATSAUCES

U. Jilmaza (*Yilmaz, U.*) un K. Snekenēsa (*Snekenes, C.*) (2019). *DOKIVER – dokumentasjon av kulturminner i vassdrags- og energisektoren*. NVE ziņojums Nr. 42/2019. Oslo: NVE.

3D DATI ARHITEKTŪRAS OBJEKTU UN TO ELEMENTU IZPĒTĒ UN PĀRVALDĪBĀ

Artūrs Lapiņš

Būvētas kultūrvides objektu un vietu pārvaldības pamatu veido darbs ar esošām būvēm un struktūrām. Tāpēc iespējami precīza un vispusīga esošās situācijas dokumentēšana ir būtiska un neatņemama izpētes, saglabāšanas un atjaunošanas procesu sastāvdaļa. Dokumentēšanas uzdevums ir veikt visaptverošus objekta 3D uzmērījumus. Tādējādi tiek iegūts aktuāls 3D datu kopums, veidojot oriģinālā kultūras pieminekļa digitāli arhivējamu kopiju. Šāda dokumentācija būtiski paplašina kultūrvēsturiskā objekta informatīvo lauku. Savukārt arhitekta uzdevums ir piedāvāt risinājumu konkrētai problēmai, kas saistīta ar objekta saglabāšanu, turklāt to pasniegt pēc iespējas skaidrā un saprotamā veidā. Esošās vides uzmērīšana, izmantojot tradicionālās metodes, nenoliedzami ir laikietilpīga, tādēļ projektēšanas praksē būvju dokumentēšanai tiek izmantoti iespējami efektīvākie tehnoloģiskie risinājumi. Būvētas kultūrvides objektu dokumentēšanā un saglabāšanas projektēšanā izmanto gan tradicionālos plaknes, gan instrumentālos telpiskos uzmērījumus. Aprakstītie piemēri apliecina ģeomātikas un arhitektūras starpdisciplināras sadarbības iespējas.

KULDĪGAS PILS jeb Jēzuspils nojaukšana 19. gadsimta pirmajā ceturksnī iezīmēja vairāk nekā 600 gadu pastāvējuša nozīmīga viduslaiku objekta beigas. 13. gadsimtā aizsāktā Livonijas ordeņa komtura pils, kas 17. gadsimtā tika pārbūvēta Kurzemes hercoga vajadzībām, ilgu laiku bija novada saimnieciskais un administratīvais centrs. Livonijas–Prūsijas ceļa malā esošais komplekss pildīja arī reprezentācijas funkcijas. Par pili kā koncentriskas aizsardzības sistēmas centrālo elementu joprojām liecina Kuldīgas vēsturiskā centra plānojums, tādēļ iegūtie dati par zudušo nocietinājumu apjomu papildina pilsētas identitāti.

Analīzei primāri izmantots aerolāzerskenēšanas jeb gaisa LiDAR (angļu: *Airborne Light Detection and Ranging*) procesā iegūtais punktu mākonis. Šos telpiski ģeoreferencētos datus iespējams izmantot gan virsmas reljefa modelēšanai, gan telpiskai savietošanai. Vēsturisko vietu analīzei galvenokārt izmantojams zemes virsmas reljefa modelis (DTM). Virsmas modelī var ērti saskatīt reljefa īpatnības, kas ļauj pamanīt plaknes anomālijas – iedobes un izvirzījumus. Kuldīgā šāda

analīze uzrāda teritorijas nelīdzenumus, ļaujot atsevišķos gadījumos identificēt arī zem zemes saglabājušās konstrukcijas. Kuldīgas pilsvietas reljefa modelī izdalās gan virs zemes redzamais velvētās pagrabtelpas uzkalns, gan nocietinājumu valnis dienvidu un rietumu pusē. Reljefā iezīmējas arī dienvidrietumu bastions, pilsgrāvis, kā arī ziemeļu puses Zvaigžņu skansts. Tālākai analīzei izmantots reljefa ortoprojekcijas un specializēto izpētes atskaišu savietojums. Savietojot reljefu ar arheoloģiskās izpētes atskaiti, varētu būt nepieciešams precizēt pēdējā piedāvāto apkārtsienas trajektoriju. Tā, visticamāk, sekojusi vēl tagad redzamajam zemes reljefam, nevis to šķērsojusi ieslīpi, kā secināts pēc neliela pamatu atseguma ziemeļrietumu daļā. Reljefa savietojums ar ģeofizikālās izpētes datiem savukārt ļauj prognozēt turpmākās pilsvietas izpētes teritorijas. Reljefa datu papildinājums ar vēsturisko attēlu un analoģu studijās iegūtajām atziņām ļauj pamatot teorētisku zudušās pils rekonstrukciju.

Virsmas novirzes no plaknes ļauj vizualizēt arī vertikālu objektu, piemēram, sienu deformācijas. **RĪGAS DOMA** izbūve sākās 13. gadsimtā, savukārt 14. gadsimta beigās – 15. gadsimta pirmajā pusē tas, paaugstinot vidusjoma sienas, tika pārbūvēts par baziliku. Strādājot pie ēkas pamatu stiprināšanas, tika pamanītas sienu un griestu plakņu neregularitātes. No punktu mākoņa (inženieris Māris Kaļinka) iegūtie vidusjoma un sānjoma griezumi un šķēlumi uzskatāmi parāda vidusjoma ziemeļu sienas augšdaļas novirzi uz ziemeļiem jeb Doma laukuma virzienā, savukārt vidusjoma dienvidu siena saglabā savu vertikālītāti. Bazilikālās daļas ziemeļu sienas iekšplaknei sagatavota punktu kopa jeb notinums rietumu–austrumu virzienā. Vizualizējot tās ziemeļu–austrumu virziena koordinātas augstumu kartes formā, konstatēts, ka būtiskākās deformācijas ir travejām TR16 un TR15, turklāt travejai TR15 sasvērums veidojas pakāpeniski un augšdaļa aizvirzījies gandrīz par 40 cm no vertikāles.

Punktu mākoņa pārveidošana par virsmu (angļu: *mesh*) ļauj veikt platību aprēķinus, specificējot konservācijas darbus. **CĒSU PILS ZIEMEĻU TORŅA** cilindriskā forma ar daudzajiem bijušo ailu ievirzījumiem un neregulārām sānu plaknēm apgrūtina virsmas kartēšanu un līdz ar to arī faktisku konservējamo virsmu laukumu noteikšanu. Iegūtā punktu mākoņa (inženieris Māris Kaļinka) tālākai apstrādei izmantota programmatūra *CloudCompare*. Punktu mākonis segmentēts, samazinot iegūto punktu daudzumu datnē, līdz ar to samazinot arī datnes izmēru. Mākoņa daļu klasifikācija daļēji veikta, izmantojot automātisko horizontālo (grīdu) un vertikālo (sienu) plakņu noteikšanu. Tālāka klasifi-

kācija veikta manuāli, atbilstošās mākoņa projekcijās un šķēlumos izdalot fasādes plaknes, ailu dēļu vairogus, jumta pārsegumu u. tml. Izdzēsti nevajadzīgie iekštelpu elementi – koka pagaidu kāpnēs. Iegūtajam attīrītajam iekšsienu punktu mākonim turpināta klasifikācija, telpiski kartējot erodējušās un stiprināmās virsmas. Iegūtā datu kopa pārveidota par plakni tālākiem ģeometriskiem aprēķiniem.

Pēdējos gados līdz ar tehnoloģijas attīstību un pieejamību telpisko datu apstrāde, vizualizēšana un analīze ir kļuvusi par daļu no restaurācijas arhitekta ikdienas prakses. Tajā pašā laikā praktiskajā objektu saglabāšanas darbā datorprogrammas, kas tiek izmantotas instrumentālās uzmērīšanas telpisko datu apstrādei, ir tikai rīks, kas palīdz pētniekam vai projektētājam vizualizēt, analizēt un kvantificēt ar konkrēta objekta izpratni saistītos datus. Atšķirībā no ģeomātikas inženiera arhitekta darbs ir vērsts ne tik daudz uz precīzu esošās telpiskās situācijas fiksēšanu, cik uz radošu konkrētu uzdevumu risināšanu.

Veicot aktīvā kultūrvides aprītē neesošo Kuldīgas pils instrumentālo dokumentēšanu un arhitektonisko izpēti, iegūti jauni secinājumi par tās sākotnējo plānojumu, kā arī iezīmēti objekta iespējamās tālākās izpētes virzieni. Izmantojot tehnoloģiskās iespējas, arhitektoniskā izpēte kā starpdisciplināra izziņas metode nodrošina kompleksu pieeju kultūrvēsturiskā mantojuma dokumentēšanai, interpretācijai un prezentēšanai arī fragmentāri saglabātiem kultūrvēsturiskiem objektiem. Arhitektoniskajā izpētē instrumentālie uzmērījumi līdztekus izpētei objektā ļauj atkārtoti apsekot un analizēt gan atsevišķus objekta elementus, gan fiksēt to kopsakarības. Attīstoties instrumentālās fiksācijas metodēm, nākotnē izpēte arvien vairāk varētu attālināties no pašas vēsturiskās ēkas. Pilsdrupās šādi jau tiek pētītas citādi grūti apsekojamās un pat bīstamās daļas. Piemēram, Alūksnes pilsdrupu Dienvidu torņa instrumentālajā uzmērījumā iegūtā sienas augšdaļas silueta analīze ļāva noteikt zudušo augšstāva ailu vietas. Izveidojot detalizētu telpisko uzmērījumu kā vēsturiskā objekta virtuālu kopiju, izpēti var veikt, attālināti pieslēdzoties digitālās kopijas virtuālajai datubāzei. Apzinoties straujo datu iegūšanas, apstrādes un izplatības tehnoloģiju attīstību, nav izslēgts, ka tieši attālinātā datu analīze kļūs par arhitektoniskās izpētes un, iespējams, arī pasaules izziņas nākotni.

KUĢA VRAKA 3D FOTOGRAMMETRISKĀ DOKUMENTĀCIJA ARKTIKĀ

Øyvind Ødegård un Eleni Diamanti

Šajā rakstā ir sniegts ieskats robotizētām metodēm zemūdens kultūras mantojuma 3D dokumentēšanai. Raksta mērķauditorija ir arheologi un kultūras mantojuma apsaimniekotāji, kas nav eksperti un interesējas par jaunākajiem komerciāli pieejamajiem datu ieguves un apstrādes rīkiem.

FIGARO: PELDOŠĀ VAĻU MEDĪBU STACIJA

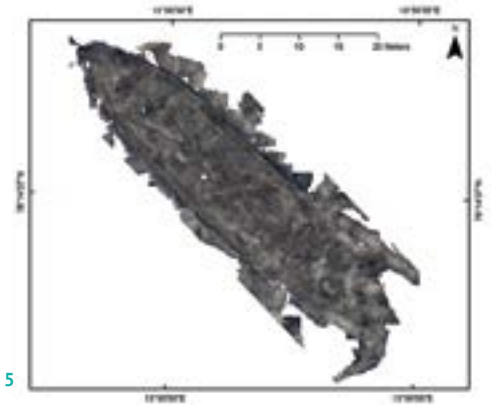
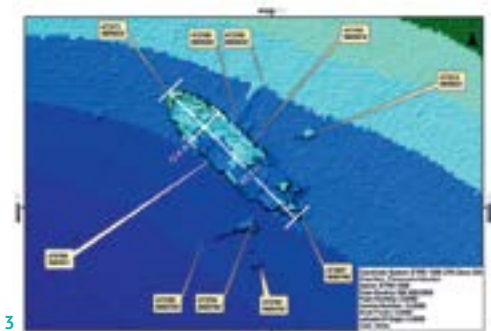
Drīz pēc tam, kad 1596. gadā Vilems Barencs (*Willem Barentsz*) atklāja Svalbāru (*Svalbard*), ūdeņi, kas ieskauj salas, kļuva par Eiropas vaļu medību vietu. Trīs gadsimtus šajos ūdeņos medīja tūkstošiem kuģu, līdz Grenlandes vaļu populācija bija gandrīz pilnībā izsīkusi. Ap 20. gadsimta sākumu šajā apgabalā uz īsu brīdi sākās mūsdienu Norvēģijas vaļu medības, bet kopš 1912. gada visa uzmanība tika pievērsta dienvidjūrām. Šajos gados tika izstrādātas jaunas tehnoloģijas, piemēram, sprāgstošas harpūnu granātas un mehanizēta apstrāde. *Figaro* bija pēdējā uzņēmuma *Joh. C. Tecklenborg* uzbūvētā koka barka Ģestemindē (*Geestemünde*), Vācijā, 1879. gadā. 1902. gadā to pārdeva Norvēģijas vaļu medību uzņēmumam un aprīkoja kā peldošo vaļu medību staciju, kas kļuva par Antarktīdā izmantoto zivju apstrādes kuģu prototipu. 1904. gadā kuģis tika nodots ekspluatācijā Svalbārā, bet 1908. gada augustā tas aizdegās un nogrima Trighamnā (*Trygghamna*) pie Īsfjorda (*Isfjorden*) ietekas Špicbergenas (*Spitsbergen*) rietumu piekrastē. 2007. gadā to atklāja Norvēģijas Hidrogrāfijas dienests jūras kartēšanas kampaņas laikā. Pašlaik tas ir pasaulē vistālāk uz ziemeļiem esošais vraks, ko ir apsekojuši arheologi.

FIGARO APSEKOŠANA

2015. gada septembrī UNIS un NTNU veica vraka apsekošanu, izmantojot *REMUS 100* autonomo zemūdens peldlīdzekli (*AUV*) ar sānu skenēšanas sonāru (*SSS*) akustiskai attēlveidošanai (1. attēls), un nelielu *Seabotix LBV 200* attālināti vadāmu transportlīdzekli (*ROV*) vizuālai izpētei. Redzamība nebija īpaši laba, taču vraku varēja droši identificēt kā *Figaro*, un šķita, ka tas ir salīdzinoši labi saglabājies. Kuģa vraks atrodas vertikāli uz ķīļa nelielā nogāzē 20x30 m dziļumā. Ledāju noteces suspendēto nogulumu dēļ redzamība Svalbāras fjordos vasaras siltajos mēnešos parasti ir ļoti slikta. Iespējams, apstākļi būs labāki aukstākā ziemas sezonā, kad ir mazāks noteces daudzums. 2016. gadā UiT-NTNU starpdisciplinārā

pētnieciskā kruīza “Polārā nakts” mērķis bija veikt *Figaro* izpēti no tuvas distances, tostarp veikt pilna pārklājuma fotodokumentāciju 3D rekonstrukcijai (Mogstad et.al., 2020). Šim nolūkam tika izmantots vidēja izmēra darba klases attālināti vadāms transportlīdzeklis (ROV) (*Sperre Subfighter 7500*) ar stereokameras sistēmu (2. attēls). Lai izveidotu ROV misijas plānu, tika izmantots aptuvenš batimetrisks modelis, kas pamatojas uz daudzstaru eholota (MBES) datiem, sānu skenēšanas sonāru (SSS) attēliem un video no iepriekšējiem pētījumiem (3. attēls).

ROV misija tika īstenota no pētniecības kuģa “Helmer Hanssen”. Kuģim “Helmer Hanssen” nav dinamiskās pozicionēšanas iespēju, līdz ar to misija bija jāplāno tā, lai noenkurotos pēc iespējas tuvāk vraka vietai, neradot risku, ka enkura ķēdes varētu traucēt vraka atrašanās vietu. Straumes pārvietoja kuģi, un ROV lielākoties atradās ārpus akustiskās pozicionēšanas sistēmas darbības diapazona. Tādējādi plānotos ROV izpētes maršrūtus nebija iespējams navigēt, izmantojot vadības sistēmas programmatūras uzlabotās funkcijas, bet tie bija jākontrolē manuāli, pamatojoties uz vizuālo situācijas apzināšanos un ceļa aprēķiniem. Pat ar iepriekšējam zināšanām par vraka atrašanās vietu un drukāto karti (3. attēls), kurā ir norādīti galvenie orientieri, pilotam un arheologam bieži vien bija grūti izsekot ROV pozīcijai attiecībā pret vraku. Ierobežotā



redzamība un vraka atrašanās vieta var radīt neskaidrības, līdz ar to vraka elementi varētu šķist vizuāli līdzīgi, tāpēc daļa vraka var tikt izpētīta vairāk, bet cita – mazāk. Papildus pārklājuma un datu kvalitātes nodrošināšanai pilotiem bija arī jāseko līdzī kabelim, kas savieno ROV, lai nodrošinātu, ka tas nekur neaizķeras. Vairākas stundas divu pilotu un viena otrā pilota – arheologa – kopējā kognitīvā slodze bija pārmērīga, līdz ar to laika gaitā darba efektivitāte mazinājās. Stereokameru sistēmu veidoja divas *Allied Vision GC1380* kameras, kas tika izvietotas 31,5 cm attālumā viena no otras 45 grādu leņķī *Minerva ROV* priekšpusē (4. attēls). Divas uz priekšu vērstas *HMI* lampas tika novietotas ROV rāmja augšpusē, lai nodrošinātu stereokameru un pilota kameras redzes lauka (*FOV*) apgaismojumu. Stereokameras tika sinhronizētas, lai uzņemtu attēlus ar ātrumu 0,5 kadri sekundē. Divu niršanu laikā – 12. janvārī 6.30 un 17. janvārī 4.00 – ar stereokameras sistēmu tika iegūti 33 228 attēli ar izšķirtspēju 1360 x 1024. Dators, kas bija paredzēts stereokameru attēlu uzņemšanai, tika novietots vadības telpā blakus pilota vadības stacijai. Otrais pilots – arheologs – varēja sekot līdzī attēlu kvalitātei reāllaikā un attiecīgi konsultēt pilotu.

Visi stereokameru attēli, *HD* video un navigācijas dati, kas tika iegūti no ROV, tika saglabāti īpašos datoros. Tūlīt pēc misijas beigām dati tika saglabāti arī rezerves diskos. Pētniecības kuģis visas misijas laikā atradās ārpus interneta darbības zonas, un mākoņpakalpojumi nebija pieejami. Attēlu kopu kopijas tika ievietotas darba mapēs apstrādei kampaņas laikā. Pēc atgriešanās Trondheimā (*Trondheim*) visi misijās iegūtie dati tika saglabāti *NTNU* serveros.

Attēlveidošana ar zemūdens kameru atšķiras no attēlveidošanas gaisā. Lai gan gaisā redzamība ir gandrīz neierobežota, zemūdens attēlveidošanas iespējas parasti ir ierobežotas līdz vairākiem desmitiem metru vai pat mazāk. Tas ir saistīts ar gaismas izkliedi un absorbciju, ko izraisa ūdens un tā sastāvdaļu (fitoplanktona, krāsainās izšķīdušās organiskās vielas un kopējās suspendētās vielas) raksturīgās optiskās īpašības. Gaismas izkliedēšana galvenokārt ietekmē attēlu asumu un kontrastu, savukārt absorbcija izraisa gaismas intensitātes vājināšanos dažādos diapazonos. Seklos ūdeņos apkārtējā gaisma (saule) var nodrošināt vienmērīgu ainas apgaismojumu, savukārt dziļākos ūdeņos vai naktī pareizas kameras lampas izvietojums ir ļoti svarīgs, lai kameras sistēma varētu labi iemūžināt zemūdens ainas. Lampām tuvu esošie objekti var “izdegt” pārāk liela spilgtuma dēļ, savukārt attālāki elementi tajā pašā attēlā var būt pārāk tumši. Izvēloties kameru sistēmas ar augstu dinamisko diapazonu un pielāgojot *ISO* (gaismas jutības) iestatījumus, šādas problēmas zināmā mērā var ma-

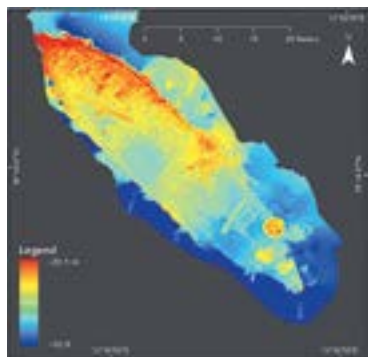
zināt. Pēcapstrādes procesā ir iespējams mazināt spilgtumu dažos apgabalos, vienlaikus uzlabojot redzamību tumšākos apgabalos, tādējādi uzlabojot attēla kvalitāti 3D rekonstrukcijas vajadzībām. Tomēr manuāli to veikt ir laikietilpīgs process, tāpēc sērijuveida korekcijām ir ieteicams izmantot algoritmus (Nornes, 2018). Attēlu kopām, kas tika iegūtas no *Figaro*, tika izmantots *CLAHSE* algoritms, lai uzlabotu redzamību un izlīdzinātu spilgtumu (5. attēls). Kameru sistēmu izvietošana zem ūdens rada arī refrakciju, kas var izraisīt ģeometriskas kļūdas 3D rekonstrukcijā. Papildus kameras sistēmas optikas ģeometriskajām īpašībām refrakcijas noteicošie faktori ir arī ūdens vides sāļums un temperatūra. Lai programmatūra varētu kompensēt refrakcijas kļūdas, pirms datu iegūšanas ir jāveic pareiza kameras sistēmas kalibrēšana (parasti izmantojot kalibrēšanas paneli). 3D rekonstrukcija tiek veikta līdzīgi kā sauszemes objektiem, izmantojot to pašu fotogrammetriskās apstrādes programmatūru (piemēram, *Agisoft Metashape*). Tomēr zemūdens ainu attēliem var būt tādas vides iezīmes, kuru 3D rekonstrukcijai ir nepieciešama papildu manuāla apstrāde. Kuģu vraki seklā ūdenī bieži ir klāti ar bioloģiskiem organismiem, piemēram, brūnalgēm un jūraszālēm. Tās mēdz kustēties līdz ar viļņiem un strauēm un var sarežģīt objektu saskaņošanu fotogrammetriskās apstrādes laikā. Bieži vien ir jāveic plašu attēlos redzamo pazīmju manuāla marķēšana, lai uzlabotu attēla precizitāti un konsekvenci. Arī vēžveidīgie, jūraszvaigznes u. c. pārvietojas pa jūras gultni, līdz ar to ir iespējamas kļūdas pat manuāli veiktajā pazīmju marķēšanā. Īpaši sarežģīti bija, cenšoties apvienot attēlu kopas, kas ir iegūtas ar piecu dienu intervālu. Pēc manuālas marķēšanas un attēlu atlases tika izveidoti vairāki modeļi, pakāpeniski izveidojot saskaņotāku vraka vietas 3D rekonstrukciju. Ģeoreģistrācija tika veikta, saskaņojot kuģa priekšgala un citas redzamās pazīmes attēlos un fotogrammetrijas modelī ar esošajiem *MBES* datiem.

REZULTĀTI

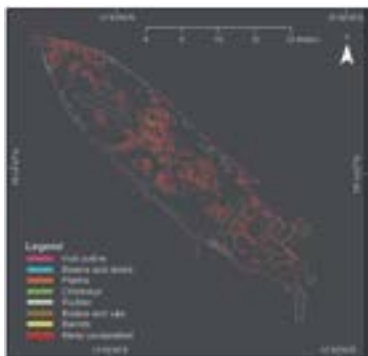
Tika veikta gandrīz pilnīga *Figaro* 3D rekonstrukcija, pamatojoties uz datiem, kas tika iegūti 2016. gada "Polārās nakts" izpētes kruīza laikā (6. attēls). Kuģa vraka garums ir 54 metri, platums – 11 metri, un to ieskauj gruveši un atdalījušās konstrukcijas. Pamatojoties uz 3D rekonstrukciju, bija iespējams sagatavot visaptverošu vraka vietas plānu un citas arheoloģiskajai interpretācijai paredzētas vizualizācijas (7.–9. att.).

SECINĀJUMI

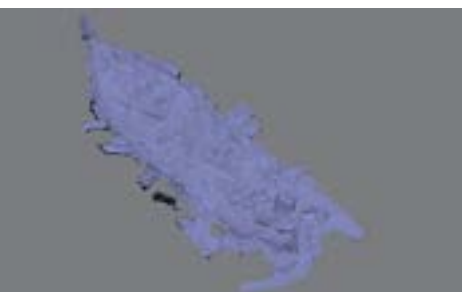
Plānošanai ir būtiska nozīme lielu platību un strukturāli sarežģītu vraku veiksmīgai 3D dokumentācijai. Tipiski *UCH* mērījumu un kartēšanas



6



7



8



9

mērķi ir nodrošināt pilnīgu datu pārklājumu un pietiekami augstu datu kvalitāti, lai tos varētu jēgpilni interpretēt. Strukturāli un telpiski sarežģītā zemūdens vidē ar dabas un kultūras iezīmēm ROV pilots var viegli dezorientēties un pazaudēt savu atrašanās vietu attiecībā pret interesējošo apgabalu un objektiem. Ļoti noderīga ir laba pozicionēšanas sistēma, kas ļauj sistemātiski izpētīt jūras gultni, izmantojot pārklājošos izpētes maršrutus. ROV pozīcijas un orientācijas attēlošana uz SSS vai MBES ģeoreģistrētiem attēliem vadības saskarnē var būt ļoti noderīga pilotam, kad viņš veic sarežģītu ainu izpēti. Slikta redzamība var negatīvi ietekmēt attēla kvalitāti, tādējādi pasliktinot iespēju veikt precīzu 3D rekonstrukciju un telpiskās apkopošanas procesu. Papildus rūpīgai gaismu un kameru konfigurācijai un iestatīšanai šo problēmu parasti var mazināt, pietuvinot kameru tuvāk interesējošajam objektam. Mazāks augstums nozīmē mazāku kameras skata lauku, kas prasa mazāku attālumu starp maršruta līnijām, un tas vēlreiz uzsver, ka ir nepieciešama laba pozicionēšana un plānošana.

ATSAUCES

Mogstad, A. A., Ødegård, Ø., Nornes, S. M., Ludvigsen, M., Johnsen, G., Sørensen, A. J., & Berge, J. (2020). Mapping the historical shipwreck figaro in the high arctic using underwater sensor-carrying robots. *Remote Sensing*, 12(6), 997.

Nornes, S. M. (2018). *Guidance and control of marine robotics for ocean mapping and monitoring* (promocijas darbs). NTNU, Tronheima. (2018:202)

PRECĪZA MĀKSLAS PRIEKŠMETU DOKUMENTĒŠANA LABORATORIJĀ UN UZ VIETAS

Markus Sebastian Bakken Storeide un Jon Yngve Hardeberg

**ATSLĒGVĀRDI: #MANTOJUMS #MATERIĀLU ĪPAŠĪBAS #APGAISMOJUMS
#IZŠĶIRTSPĒJA #GAISMA**

Pasaulē pastāv visdažādāko formu un izmēru mākslas darbi, sākot no gleznām līdz skulptūrām u. c. To dokumentēšana 3D formātā iekļauj to estētisko īpašību, tostarp objekta formu un izskatu, saglabāšanu. Tas rada problēmas saistībā ar sarežģītu un sīku ģeometriju, kā arī sarežģītām virsmas īpašībām. Materiāla kopējo izskatu parasti iedala pēc formas un virsmas raksturlielumiem: krāsa, spīdums, tekstūra un caurspīdīgums. Situācijā, kad vēlamies dokumentēt mākslas objektu 3D formātā, vienlīdz svarīga ir gan forma, gan virsma. Mazas, glancētas, apgleznotas keramikas vāzes formas 3D skenēšana var radīt pavisam citus izaicinājumus nekā lielas granīta statujas 3D skenēšana. Vāzi varētu būt grūti iemūžināt tās atstarojošās virsmas dēļ, savukārt statuju – tās izmēra dēļ.

Pētījumos par gaismas mijiedarbību ar objektu un to, kā to izmanto 3D formas, virsmas raksturlielumu uztveršanai, tiek izmantots specializēts aprīkojums, kas var uztvert dažādas iezīmes atsevišķi un ar augstu precizitāti. Kontrolētā laboratorijas vidē varam pielāgot apgaismojuma apstākļus atbilstoši situācijai un datu iegūšanas sistēmai/metodei, taču, iegūstot datus uz vietas, apgaismojuma īpašības ir grūtāk kontrolēt. Šādās situācijās vispārīgāka pieeja arī var sniegt apmierinošus rezultātus, lai gan ar ierobežotu precizitāti. Šeit ir aprakstīti procesi, kurus izmantojām, lai analizētu divus ļoti atšķirīgus objektus, kas rada atšķirīgus izaicinājumus. Viens no tiem ir kristību trauks ar nelielām, lokālām virsmas detaļām un raupju virsmas materiālu, bet otrs ir krāsaina virsma ar 3D formas elementiem. Viens objekts tika pētīts uz vietas, bet otrs – laboratorijā.

Abos gadījumos tika izmantoti divi dažādi strukturētās gaismas skeeneri. *Artec Eva* 3D punktu precizitātes specifikācija ir 0,1 mm, izmantojot baltu apgaismojumu un iebūvētu krāsu sensoru. Krāsu iegūšanai tiek izmantots iekšējais *LED* masīvs, kuru veido 12 baltas diodes. Visi *Artec* dati tiek apstrādāti, izmantojot patentēto programmatūru *Artec Studio 15*.

Turpretī *Einscan Pro HD* 3D punktu precizitātes specifikācija ir 0,045 mm, izmantojot zilās gaismas apgaismojumu. Zilās gaismas apgaismojums ir mazāk pakļauts ģeometriskām kļūdām, ko izraisa virsmas krāsa un spīdums, jo projicētās gaismas joslas platums ir šaurāks. Krāsas tiek iegūtas, izmantojot *Color Pack* komplektu, kas ir savienots ar *USB 3.0* pieslēgvietu un novietots nelielā leņķī attiecībā pret 3D kamerām un projektoru. Tas nesniedz specifiskās attiecības uz apgaismojumu 2D attēlu uzņemšanas laikā, tāpēc tiek pieņemts, ka krāsu uztveršanai tiek izmantota apkārtējā gaisma. Visi *Einscan* dati tiek apstrādāti, izmantojot patentēto programmatūru *EXScan Pro*.

Eidskūgas (*Eidskog*) baznīca atrodas Matrandā (*Matrand*), Eidskūgas pašvaldībā. Baznīca ir celta 1665. gadā, taču ir pierādījumi, ka šajā vietā jau agrāk ir bijušas divas baznīcas, kas celtas 1200. gadu sākumā. Viens no objektiem, kas saglabājās līdz mūsdienām, ir ziepjakmens kristību trauks, kas, domājams, ir gandrīz 1000 gadu vecs. Tam ir dažādas gadu gaitā radušos bojājumu un remonta pazīmes, taču daudzi gravējumi joprojām ir redzami. Turklāt uz trauka virsmas ir iegriezumi, kas ir gandrīz neredzami ar neapbruņotu aci objekta raupjās virsmas tekstūras dēļ, bet kas kļūst skaidri redzami, aplūkojot objektu 3D bez krāsu informācijas. Trauka materiālam ir raupja tekstūra ar augstu atstarošanas spēju noteiktos leņķos, kas slēpj šīs smalkās detaļas krāsu un spīduma variācijās.

Abos gadījumos kristību trauks tika skenēts baznīcas iekštelpu dabiskajā apgaismojumā, kas galvenokārt nāca caur lieliem logiem sānu sienās. Trauka, kas atradās lielas telpas vidū, novietojuma dēļ, apgaismojums lielākoties bija vienmērīgs. Trauks tika vienmērīgi skenēts no visām pusēm, sadalot virsmu astoņos dažādos skenējumos ar aptuveni 40% pārklājumu. Pēc tam šie skenējumi tika apvienoti, lai izveidotu galīgo 3D modeli. Skenēšanas rezultāti blakus oriģinālajam objektam ir redzami 1. attēlā.

1



Reāls attēls



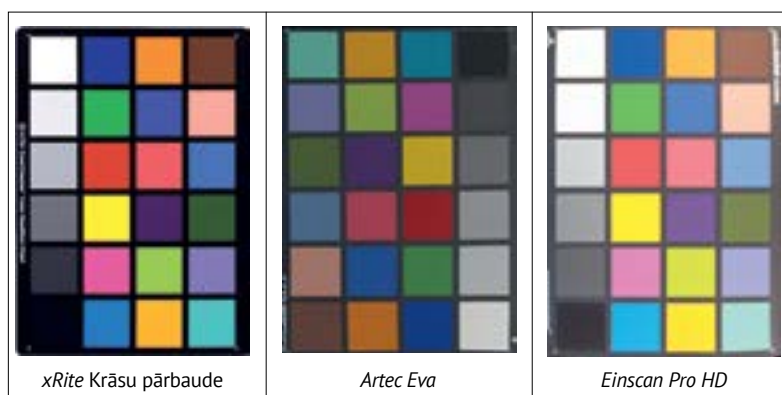
Artec Eva



Einscan Pro HD

Einscan Pro HD ģenerēja blīvāku 3D punktu mākonī salīdzinājumā ar *Artec Eva*, taču abi skeneri radīja apmierinošus rezultātus, ņemot vērā galīgo punktu mākoņu ģenerēšanai izmantoto skenējumu skaitu. Lai iegūtu informāciju par krāsām, abi strukturētās gaismas skeneri skenēšanas laikā nodrošināja vienlaicīgu krāsu iegūšanu. Galīgā krāsu tekstūra ir vairāku simtu objektu attēlu apvienojums no dažādiem leņķiem, kas tiek projicēti uz virsmas. Tomēr, ņemot vērā skeneru atšķirīgās specifikācijas, galīgās krāsu tekstūras rezultāti bija diezgan atšķirīgi. *Artec Eva* skenējuma krāsa šķiet labas uztveres līmenī, savukārt *Einscan Pro HD* tekstūrai ir izteikta zaļa nokrāsa. Mums radās aizdomas, ka tas ir saistīts ar nedokumentētajiem baznīcas apgaismojuma apstākļiem, tāpēc pārbaudījām abu skeneru krāsu izvadi kontrolētā vidē.

2



Šajā gadījumā divi standartizēti krāsu testa paraugi tiek skenēti kontrolētā apgaismojumā gaismas iekārtā, nodrošinot vienmērīgu telpisko un spektrālo gaismas sadalījumu pa virsmu. Var redzēt, ka, lai gan krāsu atšķirības starp abiem skeneriem ir mazinājušās, tās joprojām ir redzamas, jo atšķiras iegūšanas rīki. Šis piemērs parāda, ka dažas kameras ir jutīgākas pret apgaismojuma izmaiņām nekā citas, tādējādi ir iespējams iegūt ļoti atšķirīgus rezultātus. Katra skenera iekšējā krāsu apstrāde ir atšķirīga, bet diemžēl, tā kā lielākajā daļā 3D programmatūras krāsu apstrāde ir sekundāra funkcija, krāsu korekciju nebija iespējams veikt, neveicot vēl vienu manuālu darbību.

Otrs piemērs ir sena glezna, ko, iespējams, gleznojis spāņu baroka gleznotājs Husepe de Ribera (*Jusepe de Ribera*). Tā ir portreta glezna ar ļoti tumšiem pigmentiem, un uz tās virsmas ir vairākas plaisas un raksti, kas ir radušies nolietojuma dēļ. Lai gan pigmenti ir ļoti tumši, to

virsmas ir arī ļoti spīdīga, kas apgrūtina krāsas precīzu atveidi, izmantojot tiešās attēlveidošanas metodes. Skenēšana tika veikta laboratorijas apstākļos kontrolētā apgaismojumā gaismas iekārtā.



Attēlotā objekta ģeometrija ir daudz mazāka nekā kristību trauka ģeometrija un ir sadalīta mazākā apgabalā. Izmantojot abus skenerus, tika uzņemti trīs dažādi skenējumi ar 100% pārklājumu, lai nepieļautu iespējamās ģeometriskās kļūdas, ko rada spīdīgais materiāls no dažādiem leņķiem. Veicot skenējumus, glezna katru reizi tika pagriezta par 90 grādiem, lai iegūtu atšķirīgu attēla uzņemšanas virzienu. Šajā situācijā, izmantojot skeneri *Einscan Pro HD*, redzējām skaidru ģeometriskās precizitātes uzlabojumu, jo tas nodrošina lielāku 3D precizitāti un zilās gaismas projekciju. Tomēr skenera *Einscan Pro HD* krāsu attēlus spīdums ietekmē vairāk nekā citu skeneru, lai gan 3D ģeometrija tiek ietekmēta mazāk.

Šie pētījumi liecina, ka jebkuras 3D ieguves rezultāti ir ļoti atkarīgi no datu ieguves sistēmas, apgaismojuma apstākļiem un attiecīgā objekta izskata īpašībām. Izpratne par sarežģīto mijiedarbību starp objekta izskata īpašībām ļauj mums izvēlēties darbam piemērotāko rīku un radīt tādas apgaismojuma apstākļus, kas atbilst mūsu datu ieguves sistēmas priekšrocībām, vienlaikus ierobežojot trūkumus. Neviena sistēma nevar nodrošināt pilnīgu objekta dokumentāciju ar pareizu formu, krāsu un citām ārējām īpašībām. Tomēr, koncentrējoties uz konkrētām īpašībām un pēc tam izstrādājot datu ieguves procesu, var sasniegt ļoti labus rezultātus neatkarīgi no grūtībām.

Ja vēlaties iegūt visprecīzākos 3D datus, kā arī precīzus virsmas raksturlielumus, piemēram, krāsu un spīdumu, iesakām mēģināt ierobežot šo raksturlielumu savstarpējo mijiedarbību katra atsevišķa elementa segmentēšanas iegūšanas laikā. Izolēto datu turpmākai apvienošanai būtu jārada tīrāka un precīzāka objektu galīgā digitalizācija, salīdzinot ar pilnīgu vienreizēju datu iegūšanu.

13. PĒCVĀRDS

Kultūras mantojuma uzmērīšanas, dokumentēšanas un restaurācijas joma ir piedzīvojusi būtiskas pārmaiņas, pakāpeniski integrējot mūsdienu tehnoloģijas. Inovācijas, piemēram, 3D lāzerskenēšana, fotogrammetrija, atstarojošās transformācijas attēlveidošana (RTI) un uzlabotas digitālās modelēšanas metodes, ir būtiski uzlabojušas veidus, kā mēs uztveram, analizējam un saglabājam kultūras mantojumu. Šīs tehnoloģijas, metodes un iekārtas nodrošina jaunu precizitātes un pieejamības līmeni, ļaujot veikt precīzākus kultūrvēsturiskā mantojuma saglabāšanas projektus un veicinot plašāku sabiedrības iesaisti.

Šajā rokasgrāmatā aplūkotas dažādas mūsdienu tehnoloģijas un metodes, kas apvieno tradicionālās mantojuma saglabāšanas pieejas ar moderniem tehnoloģiskajiem risinājumiem. Izmantojot mūsdienu iespējas, mantojuma speciālisti un kultūrvēsturisko objektu īpašnieki var nodrošināt vēsturisko ēku, artefaktu un ainavu precīzu dokumentēšanu, kas savukārt veicina ilgtspējīgu restaurāciju un pārvaldību.

Lai gan tehnoloģijas sniedz milzīgas iespējas, tās prasa arī nepārtrauktu pielāgošanos un atbildīgu ieviešanu. Kultūras mantojuma saglabāšanas nozarei ir jābūt dinamiskai, līdzsvarojot inovācijas ar ētiskiem apsvērumiem un ilgtermiņa ilgtspējību. Attīstoties jauniem rīkiem un tehnoloģijām, ekspertiem, institūcijām un politikas veidotājiem ir būtiski sadarboties, lai efektīvi izmantotu šīs iespējas.

Ceram, ka šī rokasgrāmatā būs labs izzīņas avots kultūrvēsturiskās mantojuma izpētes speciālistiem, pārvaldītājiem un praktiķiem, kas vēlas integrēt modernās tehnoloģijas savā darbā. Pielāgojoties jaunākajām attīstības tendencēm, mēs stiprinām savas spējas aizsargāt un saglabāt kultūras mantojumu, nodrošinot tā ilgtspēju nākamajām paaudzēm.

Šī rokasgrāmatā tapusi sadarbībā starp *Riksantikvaren* (Norvēģija) un NKMP (Latvija) Eiropas Ekonomikas zonas finanšu instrumenta un Norvēģijas finanšu instrumenta 2014. - 2021. gada perioda Divpusējās sadarbības fonda stratēģiskās iniciatīvas “3D skenēšana un jaunās tehnoloģijas kultūras mantojuma pārvaldībā” ietvaros, apliecinot kopīgu apņemšanos saglabāt un aizsargāt mūsu kultūras mantojumu, izmantojot inovatīvas digitālās tehnoloģijas.

DATU APLŪKOŠANAS PROGRAMMATŪRA

Datu apstrādei tiek izmantotas dažādas specializētas programmas, kuru izvēle bieži vien ir atkarīga no izmantotās iekārtas un jēldatu formāta. Plašākais programmu piedāvājums ir pieejams tieši fotogrammetrijas datu – fotoattēlu – pēcapstrādē, kur no attēliem tiek sagatavoti punktu mākoņi, 3D modeļi vai ortofotogrāfijas. Savukārt ar citām tehnoloģijām iegūto jēldatu pēcapstrādi visbiežāk veic, izmantojot iekārtu ražotāju atbalstīto programmatūru.

Lai varētu novērtēt speciālistu veiktos darbus, 3D uzmērījumu galalietotājam ir svarīgi būt informētam par brīvpiekluves programmām, ar kuru palīdzību ir iespēja aplūkot dažāda veida 3D nodevumus. Šīs sadaļas turpinājumā sagatavots pārskats par biežāk izmantotajiem 3D datu nodevumu veidiem, to formātiem un atbilstošām aplūkošanas programmām (*viewer softwares*).

3D punktu mākoņu bezmaksas pārlūkprogrammu apskats

Pārlūkprogramma	Lietotāja iemaņas	Atbalstītie formāti	Vislabāk piemērots
CloudCompare	Vidējs+	.las, .laz, .e57 u.c.	Padziļinātai rediģēšanai un analīzei
Potree	Iesācējs	.las, .laz	Ātrai un vienkāršai skatīšanai
FME Data Inspector	Vidējs	.las, .e57 u.c.	Datu vizualizācijai veidojot darba plūsmas
LASzip un LASview	Iesācējs	.las, .laz	Vienkāršai LiDAR datu pārlūkošanai
Fugro Viewer	Iesācējs	.las, .laz	Vieglai un ātrai pārlūkošanai
Plas.io	Iesācējs	.las, .laz	Internetā lietojams apskates rīks
Point Cloud Viewer by Autodesk	Iesācējs+	.e57, .rcs, .rcp	Viegli lietojams .e57 un Autodesk failu skatītālis

3D Mesh un Solid modeļu bezmaksas pārlūkprogrammu apskats

Programmatūra	Lietotāja līmenis	Atbalstītie formāti	Vislabāk piemērots
Blender	Vidējs+	.obj, .stl, .ply, .fbx u.c.	Padziļinātai modelēšanai un renderēšanai
MeshLab	Vidējs	.obj, .stl, .ply u.c.	Modeļu tīrīšanai un apstrādei

Programmatūra	Lietotāja līmenis	Atbalstītie formāti	Vislabāk piemērots
View3D (Windows 3D Viewer)	Iesācējs	.obj, .stl, .gltf, .fbx u.c.	Vienkāršai apskatei Windows vidē
Open 3D Model Viewer	Iesācējs	.obj, .stl, .ply, .3ds u.c.	Viegļai un ātrai skatīšanai
GLC Player	Iesācējs	.obj, .stl, .ply, .3ds u.c.	Ātrai un vienkāršai modeļu pārbaudei
Autodesk Viewer	Iesācējs	.obj, .stl, .fbx, .gltf u.c.	Skatīšanai un sadarbībai interneta vidē
Wings 3D	Iesācējs+	.obj, .stl, .ply, .dae u.c.	Sākuma līmeņa modelēšanai un skatīšanai
Online 3D Viewer	Iesācējs	.obj, .stl, .ply, .gltf u.c.	Interneta vietnē balstīta modeļu pārbaude
Paraview	Vidējs+	.obj, .stl, .vtk u.c.	Datu vizualizācijai
FreeCAD	Vidējs	.obj, .stl, .step, .iges u.c.	CAD bāzētai 3D skatīšanai un rediģēšanai

3D parametrisko modeļu bezmaksas pārlūkprogrammu apskats

Programmatūra	Lietotāja līmenis	Atbalstītie formāti	Vislabāk piemērots
BIM Vision	Iesācējs-Vidējs	.ifc	BIM modeļu analīzei
Autodesk Viewer	Iesācējs	.rvt, .dwg, .ifc, .nwc u.c.	Sadarbībai tiešsaistē
Navisworks Freedom	Vidējs	.nwc, .nwd	Modeļu savietošanai un koordinēšanai
BIMcollab ZOOM	Iesācējs-Vidējs	.ifc	Aokūkošanai un kļūdu pārvaldībai
Tekla BIMsight	Vidējs	.ifc, .dwg	BIM sadarbībai, savietošanai
Solibri Anywhere	Iesācējs-Vidējs	.ifc	BIM modeļu pārbaudei, apjomu noteikšanai
Vectorworks Viewer	Iesācējs-Vidējs	.pln, .ifc, .dwg	Modeļu apskatei
FreeCAD	Vidējs	.step, .ifc, .dxf u.c.	Parametrisku CAD/BIM modeļu skatīšanai
DDS-CAD Viewer	Iesācējs	.ifc, .dwg	Arhitektūras modeļu skatīšanai

TERMINU SARAKSTS

Absolūtā precizitāte	Cik precīzi mērījums atbilst tā patiesajai vērtībai.
Aero lāzerskenēšana	Attālinātas izpētes metode, kurā no gaisa transportlīdzekļa tiek izmantoti lāzera stari, lai izveidotu detalizētas Zemes virsmas 3D kartes.
Autonoma zemūdens ierīce (AUV)	Autonoma zemūdens ierīce (angļu val. – <i>autonomous underwater vehicle</i>) ir zemūdens robots, kas darbojas pēc iepriekš izstrādāta darba plāna, proti, tas nav attālināti vadāms ar tālvadības konsoli, bet zemūdens darbus veic autonomi.
Batimetrija	Ūdens dziļuma mērīšana un ūdenstilpju kartēšana.
Datorizētā projektēšana	Datorizētā projektēšana (CAD) ir programmatūras izmantošana precīzu tehnisko rasējumu, modeļu un dizainu izveidei inženierijā, arhitektūrā un ražošanā.
Savietotā punktu mākoņa reģistrācija	3D skenēšanas process, kurā divi vai vairāki punktu mākoņi tiek izlīdzināti un apvienoti, balstoties uz to pārklājošajām īpašībām, lai izveidotu vienotu modeli.
Krāsa	Objekta izskats, kas rodas no tā, kā tas atstaro gaismu, bieži klasificēts pēc nokrāsas, piesātinājuma un gaismas intensitātes.
Digitālais virsmas modelis	Zemes virsmas 3D attēlojums, kas ietver visus dabiskos un cilvēka radītos objektus, piemēram, ēkas, kokus un reljefa īpašības.
Digitālais reljefa modelis	Zemes reljefa virsmas 3D attēlojums, kurā ir ņemti visi dabiskie un cilvēka radītie objekti, piemēram, koki un ēkas.
Dziļumu karte	Ūdens navigācijai domāta karte, kurā attēlotas ūdenstilpes vai ūdensteces dziļumu reljefa līnijas.
Elektromagnētiskie viļņi	Enerģijas viļņi, kas sastāv no elektriskajiem un magnētiskajiem laukiem, kuri svārstās perpendikulāri viens citam un spēj pārvietoties caur telpu un vielu. Piemēri ir radioviļņi, mikroviļņi un gaisma.
Fotogrammetrija	Tehnika, kas ļauj izveidot 3D modeļus un veikt mērījumus, uzņemot un apstrādājot savstarpēji pārklājošas fotogrāfijas ar objektu.
Gaismas atstarošanas skeneris	3D skenēšanas ierīce, kas izmanto atstaroto gaismu, piemēram, lāzerus vai strukturētu gaismu, lai iegūtu objekta formu un virsmas detaļas.
Kontroles punkts	Piesaistes punkts vai marķieris ar zināmu izmēru, ko izmanto 3D skenēšanā vai fotogrammetrijā, lai nodrošinātu precīzu datu mērogošanu un mērījumus.
Ģeogrāfiskās informācijas sistēma	Sistēma, kas paredzēta telpisko un ģeogrāfisko datu ievākšanai, glabāšanai, analīzei un attēlošanai, ļaujot vizualizēt attiecības, modeļus un tendences kartēs un pārskatos.
Spīdīga virsma	Spīdums vai mirdzums uz virsmas, kas raksturo virsmu, kura atstaro daudz gaismas dažos virzienos.
Globālā navigācijas satelītu sistēma	Satelītu sistēma, kas nodrošina pozicionēšanas, navigācijas un laika informāciju jebkurā vietā uz Zemes, ieskaitot tādas sistēmas kā GPS, GLONASS, <i>Galileo</i> un <i>BeiDou</i> .
Globālā pozicionēšanas sistēma	Satelītu navigācijas sistēma, kas nodrošina atrašanās vietas un laika informāciju jebkurā vietā uz Zemes, izmantojot signālus no satelītu tīkla.
Ģeoradars	Ģeofizikas instruments, kas izmanto radara impulsus, lai atklātu un kartētu pazemes objektus, struktūras un slāņus, mērot elektromagnētisko viļņu atstarojumus.
Inerciālā mērīšanas iekārta	Inerciālā mērīšanas iekārta (IMU) ir ierīce, kas mēra un ziņo par objekta specifisko spēku, leņķisko ātrumu un orientāciju, izmantojot akselerometrus, žiroskopus un dažkārt magnetometrus.

LKS-92	Latvijas koordinātu sistēma (LKS) ir nacionālā ģeodēziskā koordinātu sistēma, ko izmanto Latvijā kartēšanai un ģeotelpisko datu apstrādei. Tā balstās uz ETRS89 ģeodēziskās atsauces sistēmu.
LAS 2000,5	Latvijas augstumu sistēma (LAS) ir nacionālā vertikālā atsauces sistēma, ko izmanto Latvijā augstumu mērīšanai un noteikšanai virs jūras līmeņa, balstoties uz Baltijas augstumu sistēmu 1977 (BAS-77).
Lāzerskenēšanas markas	Speciāli markieri vai objekti, ko izmanto lāzerskenēšanā, lai palīdzētu savietot skenējumus, uzlabotu precizitāti un būtu atskaites punkti 3D datu apstrādes laikā.
Lāzerskenera attāluma precizitāte	Precizitātes pakāpe, ar kādu lāzerskeneris var izmērīt attālumu līdz virsmai vai objektam, parasti izteikta milimetros vai milimetru daļās.
Lāzerskenēšanas intensitāte	Lāzera signāla atstarošanas stiprums, ko uztver skeneris. Tas ir atkarīgs no virsmas materiāla, leņķa un attāluma. To izmanto virsmas īpašību analīzei vai skenējuma vizualizācijas uzlabošanai.
Lāzerskenera punkta precizitāte	3D koordinātu precizitāte katram punktam, ko uztver lāzerskeneris. To ietekmē tādi faktori kā skenera izšķirtspēja, attālums un apkārtējie apstākļi.
Lāzerskeneris	Ierīce, kas izmanto lāzera starus, lai precīzi izmērītu objektu, virsmu vai vidi 3D formātā, izstarojot lāzera impulsus un analizējot to atstarošanos.
Lāzerskenēšanas datu pēcapstrāde	Process, kurā tiek apstrādāti un pilnveidoti lāzerskenera savāktie sākotnējie dati, ietverot trokšņu samazināšanu, punktu mākoņu izlīdzināšanu, apvienošanu un datu pārveidošanu lietojamos 3D modeļos vai kartēs.
Lāzerskenēšanas trokšnis	Nevēlami vai kļūdaini punkti lāzerskenēšanas datos, kurus izraisa tādi faktori kā virsmas atstarošanas īpašības, apkārtējie apstākļi vai aparātūras ierobežojumi, kas var ietekmēt galīgā rezultāta precizitāti.
Lāzerskenēšanas punktu blīvums	Punktu skaits, ko lāzerskeneris uztver uz vienu laukuma vienību un kas nosaka skenētā 3D modeļa vai virsmas detalizācijas līmeni.
LIDAR	LIDAR ir attālinātās izpētes tehnoloģija, kas izmanto lāzera gaismu, lai mērītu attālumus un izveidotu detalizētas 3D kartes ar objektiem, virsmām vai vidēm.
LIDAR klasifikācija	LIDAR punktu mākoņu datu kategorizēšanas process dažādās klasēs vai slāņos, piemēram, zeme, veģetācija, ēkas un ūdens, lai labāk analizētu un izmantotu datus konkrētām vajadzībām.
Lidojuma plāns	Detalizēts plāns, kas nosaka maršrutu, augstumu, ātrumu un citus parametrus uzmērījumu no gaisa vai lidojuma misijas veikšanai, nodrošinot precīzu datu vākšanu un efektīvu izpildi.
Gaismas ģeometrija	Gaismas avotu telpisks izkārtojums un virziens attiecībā pret objektu vai virsmu.
LOD detalizācijas līmenis	Detalizācijas līmenis (LOD) attiecas uz dažādiem detalizācijas vai izšķirtspējas līmeņiem 3D modelī vai datu kopā, ko izmanto, lai optimizētu veiktspēju, vienlaikus saglabājot vizuālo kvalitāti atbilstoši skatītāja attālumam vai izmantojuma vajadzībām.
Magnetometrija	Magnētisko lauku mērīšana un analīze, lai noteiktu un kartētu Zemes magnētiskā lauka izmaiņas vai identificētu objektu magnētiskās īpašības. Tā bieži tiek izmantota ģeofizikā, arheoloģijā un vides pētījumos.
Tīklojums	3D modeļa struktūra, kura sastāv no savienotām virsotnēm, malām un plaknēm, ko parasti izmanto, lai attēlotu objekta formu un virsmu datorgrafikā un 3D modelēšanā.

Tīklojuma modelis	3D objekta attēlojums, kurš veidots, izmantojot tīklojuma struktūru, kas sastāv no virsotnēm, malām un plaknēm un kas nosaka objekta formu un virsmas ģeometriju.
Nadīra attēli	Nadīra attēli ir fotogrāfijas vai attēli, kuri uzņemti ar kameru vai sensoru, kas vērsti tieši uz leju, attēlojot Zemes virsmu no vertikālās perspektīvas, un kuri tiek plaši izmantoti kartēšanā un ģeogrāfiskās informācijas sistēmās (ĢIS).
Mēroga marķieri	Piesaistes objekti vai marķieri ar zināmām dimensijām, ko izmanto 3D skenēšanā vai fotogrammetrijā, lai nodrošinātu iegūto datu precīzu mērogošanu atbilstoši patiesajiem izmēriem.
Mobilā lāzerskenēšanas sistēma	Mobilā lāzerskenēšanas sistēma (MLS) ir 3D datu iegūšanas metode, kurā tiek izmantoti lāzerskeneri, kas uzstādīti braucošos transportlīdzekļos, piemēram, automašīnās vai laivās, lai ātri un efektīvi skenētu plašas teritorijas.
Mobilās skenēšanas kontroles punkti	Piesaistes punkti, kas tiek izmantoti mobilajā lāzerskenēšanā, lai nodrošinātu iegūto datu precizitāti un izlīdzināšanu ar patiesajām koordinātēm. Šie punkti parasti tiek marķēti uz zemes vai būvēm un kalpo datu korekcijai pēcapstrādes laikā.
Monitorings	Sistemātiska objekta analīze un pārraudzība, kas ietver tā regulāru apsekošanu un noteiktu novērojumu veikšanu.
Daudzpuslu	Tehnika, ko izmanto lāzerskenēšanā vai LIDAR sistēmās, kurā tiek raidīti vairāki lāzera impulsi ātri pēc kārtas, ļaujot iegūt blīvāku uzmērījumu kopu un mērīt objektus dažādos attālumos.
Oblique fotogrāfijas	Oblique attēli ir fotogrāfijas vai attēli, kuri uzņemti ar kameru vai sensoru, kas novietots slīpi, nevis tieši uz leju, ļaujot iegūt plašāku Zemes virsmas skatu, un kuri izmantojami objektu un īpašību attēlošanai no dažādām perspektīvām.
Ortofoto	Ortofoto ir ģeometriski korigēts foto attēls, kurā ir novērsti kameras lenķa un reljefa radītie kropļojumi, nodrošinot precīzu Zemes virsmas attēlojumu. To bieži izmanto kartēšanā un ĢIS lietojumos.
Pārklāšanās	Pārklāšanās attiecas uz to, cik lielā mērā divi vai vairāki attēli vai skenējumi pārklājas ar to pašu teritoriju. Gaisa fotogrāfijā vai LIDAR skenēšanā pārklāšanās nodrošina kopīgas iezīmes starp attēliem, kas palīdz izveidot precīzus 3D modeļus un kartes.
Parametriski modeļi	Parametriskie modeļi ir 3D modeļi, kas izveidoti, izmantojot parametrus vai mainīgos lielumus, kuri nosaka objekta ģeometriju un īpašības. Izmaiņas parametrus automātiski atjaunina modeli, ļaujot vieglāk veikt pielāgojumus un izmaiņas.
Punktu mākoņu reģistrācija	Punktu mākoņu reģistrācija ir process, kurā tiek izlīdzināti un apvienoti vairāki punktu mākoņi no dažādām skenēšanas sesijām vai perspektīvām vienotā 3D punktu mākonī, nodrošinot, ka visi punkti tiek precīzi novietoti attiecībā pret citiem.
Punktu mākonis	Punktu mākoņi ir datu punktu kolekcija 3D telpā, kas parasti tiek ģenerēta ar 3D skeneriem vai LIDAR sistēmām. Katrs punkts pārstāv konkrētu atrašanās vietu uz objekta vai vides virsmas, un kopā tie veido detalizētu 3D attēlojumu.
Sākotnējie dati	Sākotnējie dati ir neapstrādāti vai neinterpretēti dati, kas iegūti tieši no avota, piemēram, sensora, bez jebkādam korekcijām vai analīzes. Parasti tiem ir nepieciešama papildu apstrāde, lai iegūtu nozīmīgu informāciju.
RGB	RGB (sarkans, zaļš, zils) – galvenās krāsas, ko izmanto digitālajā attēlu veidošanā un displejos. Apvienojot šīs krāsas dažādās intensitātēs, iespējams iegūt plašu krāsu spektru.
ROV	Attālināti vadāms transportlīdzeklis (ROV) ir bezpilota attālināti vadāma ierīce, kas tiek izmantota zemūdens izpētei, pārbaudei un datu iegūšanai; bieži lietota okeanogrāfijā, inženierijā un arheoloģijā.

Sānskata sonārs	Batimetriskā dziļummērīšanas metode, kas tiek veikta ar ierīci, kura izdala akustiskos starus gultnes virzienā un iegūtos datus vizualizē ar akustiskajām ēnām.
Sensors	Sensors ir ierīce, kas nosaka un mēra fiziskās īpašības, piemēram, gaismu, temperatūru, spiedienu vai kustību, un pārveido šos mērījumus par elektriskiem signāliem apstrādei vai analīzei.
Sānu pārklāšanās	Sānu pārklāšanās attiecas uz pārklāšanos starp blakus esošajiem datu slāņiem vai pārejām, kas iegūtas gaisa izpētes vai lāzerskenēšanas laikā, nodrošinot nepārtrauktu teritorijas pārklājumu.
SLAM (vienlaicīga lokalizācija un kartēšana)	SLAM (vienlaicīga lokalizācija un kartēšana) ir process, ko izmanto robotikā un autonomajos transportlīdzekļos, kur sistēma vienlaikus veido apkārtējās vides karti un seko savai atrašanās vietai tajā. Tas ļauj tai orientēties un darboties nezināmās vidēs.
Solid modelis	<i>Solid</i> modelis ir 3D objekta attēlojums, kurā pilnībā ir noteikta objekta forma un robežas, nodrošinot pilnīgu un precīzu tā formas un struktūras attēlojumu.
STOP & GO skenēšana	STOP & GO skenēšana ir tehnika, ko izmanto mobilajā lāzerskenēšanā, kur skeneris iegūst datus, kamēr transports ir nekustīgs (STOP), un turpina skenēšanu transporta kustības laikā (GO), nodrošinot efektīvu plašu teritoriju pārklājumu.
Virsmas izskata raksturlielumi	Objekta virsmas vizuālās īpašības, kuras var uztvert ar redzi un tausti, tostarp krāsa, spīdums, tekstūra un caurspīdīgums.
Elektroniskais tahimētrs	Elektroniskais tahimētrs ir mērniecības ierīce, kas apvieno elektronisko teodolītu leņķu mērīšanai, elektronisko attāluma mērīšanas (EDM) ierīci attālumu mērīšanai un mikroprocesoru datu ierakstīšanai un apstrādei precīziem zemes mērījumiem un kartēšanai.
Tālizpēte	Tālizpēte ietver datu vākšanu no attāluma, parasti izmantojot satelītus, dronus vai citas gaisa sistēmas, lai mērītu un uzraudzītu Zemes virsmu vai objektus bez tiešas fiziskas saskares.
Telpiskā plānošana	Telpiskā plānošana ir process, kurā tiek organizēta un pārvaldīta zemes izmantošana un attīstība tā, lai optimizētu telpas, resursu un infrastruktūras izmantošanu, veidojot ilgtspējīgu un funkcionālu vidi.
Tekstūra	Tekstūra attiecas uz objekta virsmas īpašībām, piemēram, gludumu, raupjumu, rakstiem vai struktūru, ko var uztvert ar tausti vai redzi. 3D modelēšanā vai attēlošanā tekstūra pievieno vizuālas detaļas modeļa virsmai.
Caurspīdīgums	Materiāla īpašība, kas ļauj gaismai iziet cauri, neesot pilnībā caurspīdīgai.
UAV (bezpilota lidaparāts)	UAV (bezpilota lidaparāts) ir lidaparāts, kas darbojas bez pilota klātbūtnes un ko vada attālināti vai autonomi. To izmanto dažādiem mērķiem, piemēram, novērošanai, kartēšanai vai zinātniskajiem pētījumiem.
Vietas veidošanās process	Zemūdens procesu ietekmē radītās pārmaiņas kultūras mantojuma objektam, kas veido objekta biogrāfiju.
Kuģa vraks	Dažādu iemeslu dēļ zem ūdens nonācis transportlīdzeklis, kas vairs nav derīgs lietošanai un ir kļuvis par daļu no zemūdens vides.
xRite Colorchecker	Standartizēts krāsu kalibrēšanas marķieris, kas sastāv no 24 krāsotiem kvadrātiem un ko izmanto, lai pārbaudītu krāsu atveides precizitāti.
Zemūdens kultūras mantojums	Visas kultūras, vēsturiskās vai arheoloģiskās cilvēku eksistences liecības, kas daļēji vai pilnīgi, periodiski vai nepārtraukti vismaz 100 gadus atrodas zem ūdens (atbilstoši 2001. gada UNESCO Parīzes konvencijai "Par zemūdens kultūras mantojuma aizsardzību").

