

3D virtualizációs és vizualizációs technológiák az eredmények archiválásában

Az elmúlt évtizedek technológiai fejlődése az élet minden területén forradalmi változásokat okozott, köszönhetően többek között az informatikai alapú, illetve mobilkommunikációs megoldások széles körű elterjedésének. A félvezetőgyártás területén végbemenő folyamatok hatékonyan támogatták a miniatürizációs törekvéseket, aminek eredményeként egyre kisebb méretű és komplexebb integrált áramköröket lehetett előállítani, aminek köszönhetően különböző funkciókra optimalizált, egyre növekvő teljesítményű mikroprocesszorokkal lehetett az informatikai alapú eszközök fejlesztését támogatni. A számítási kapacitások gyors növekedése, valamint az új termékek árának csökkenése a korábban kizárólag professzionális ipari felhasználók számára elérhető eszközöket és megoldásokat hozzáférhetővé tette a felhasználók legszélesebb rétegei számára. Ezzel megszűnt a multinacionális vállalatok informatikai alapú innováció területén fennálló monopóliuma, és az úgynevezett startup vállalkozási forma¹ terjedésével új lendületet vettek a fejlesztések hardveres és szoftveres területen egyaránt. Ennek köszönhetjük többek között a háromdimenziós (3D) technológiák önálló piaci tényezővé válását, a 3D modellezés, szkennelés és nyomtatás dinamikus fejlődését és gyors terjedését. A különböző 3D képalkotási eljárásokat ma már az élet számos területén alkalmazzák (orvostudomány, térképészet, építészet, mérnöki tudományok, oktatás, közigazgatás stb.), és mára bekerült a modern régészet és hadszíntérkutatás eszköztárába is, ahol hatékonyan egészítik ki a bolygatásmentes vizsgálati eljárásokat és a hagyományos kutatási módszereket egyaránt.

Térlátás és térélmény

A térbeli érzékelés, az emberi térlátás fiziológiájának és tulajdonságainak mélyreható elemzését mellőzve annyit célszerű megjegyezni, hogy természetes térlátásnak nevezzük azt a képességet, hogy a megfigyelt objektumok térbeli alakját, méretét, illetve egymáshoz képesti térbeli helyzetét két képből meg tudjuk állapítani. Ezt nevezzük sztereoszkópikus látásnak, amelyhez szükséges két képet – az elektromágneses spektrum optikai tartományából (700–400 nm) beérkező sugárzás érzékelésével – jobb és bal szemünk képezi. Az ember a külvilágból származó összes információ megközelítőleg 80%-át köszönheti látásának.

¹ „Általában start-upról akkor beszélünk, amikor egy induló vállalkozás nagy növekedési potenciállal rendelkezik, és valamilyen innováció jellemzi a termékét, és a működését.” Márkus 2016. https://uni-bge.hu/GKZ/Kutatas-Projekt-Mobilitas/LIM-Folyoirat/2016/Cikkek/Ck_Markus.pdf (A letöltés dátuma: 2018. 10. 02.)

A közeli térérzékelés a binokuláris látás, azaz a két szem közötti konvergenciaszögek és a szemlencsék akkomodációs fokának mérésén alapszik, míg a távolban a perspektíva, fény-árnyék hatások, kitakarások és mozgások elemzésével tapasztalati úton történik.² Azaz távolabbi megfigyelés esetén optikai tartományban a térérzékelés prognosztikus, valószínűsítő jellegű, amiből következik szemünk „becsaphatósága”, az optikai csalódás jelensége, amelyet ki lehet használni például sík felületen (2D) történő térábrázolások (3D) esetén térhatás keltésére. Ugyanakkor, ha technikailag meg tudjuk oldani, hogy a két szem ugyanazt az objektumot vagy jelenetet különböző szög alatt lássa, az agy képes rekonstruálni egyfajta térélményt, amely a megfigyelő akaratától függetlenül jön létre. Ezt nevezhetjük mesterséges térlátásnak is, amit kiválthatunk különböző aktív és passzív sztereoszkópiás megoldásokkal (például sztereó diánéző, polárszűrős vagy anaglif szemüveg,³ VR-szemüveg⁴), illetve holográfiával.

Ugyanakkor a valósághű térhatású élmény fokozása érdekében tett erőfeszítések az elmúlt évtizedekben teljesen új alapokra helyezték a 3D vizualizációs technikákat. Az objektumok (tárgyak, élőlények, természetes képződmények, formák, jelenségek) látszólagos térbeli ábrázolásával szemben ma már azok 3D modelljének informatikai alapú megalkotása (leképezése, felépítése) képviseli a fő irányvonalat, amelyet ezt követően tetszőlegesen lehet manipulálni, vagy animálni akár egy valóságos háttér előtt, akár egy hasonlóképpen modellezett környezetben. Ez a megoldás azonban már messze túlmutat a vizualizáció keretein, hiszen lehetőséget teremt elképzelt, a valóságtól akár teljesen független terek, helyszínek, objektumok és jelenetek létrehozására, azaz alkalmazásával átlépünk a *virtualizáció* világába. Ezek a technológiák kezdetben az ipari tervezés, a videójáték-fejlesztés és a hollywoodi stúdiók világában fejlődtek, ezért változásait többnyire csak monitoron vagy a filmvásznon követhettük nyomon passzív szemlélőként, mára azonban már szinte bárki számára elérhetővé váltak. Az új technológia által biztosított különböző technikai megoldások lehetőséget teremtenek többek között arra, hogy a földből előkerülő, különböző történelmi korokból származó sérült vagy töredék tárgyi leletek 3D szkennelését követően előállítsuk azok pontos térbeli modelljét, majd a rendelkezésre álló egyéb források (történeti leírások, grafikák stb.) vagy információk alapján digitálisan kiegészítsük, és megfelelő utómunkálatokat, textúrázást, fény-árnyék hatások beállítását követően megjelenítsük azokat eredeti állapotukban. Az elkészült modellek később további projektekhez szabadon felhasználhatók önállóan, illetve építőelemként, szükség esetén manipulálhatók, animálhatók, vagy akár különböző alapanyagokból, valamilyen 3D nyomtatási megoldással tetszőleges számban reprodukálhatók látható, tapintható, forgatható, akár eredeti funkciójában felhasználható formában.

Különböző 3D szoftverek segítségével, a megalkotott modellek felhasználásával készíthetjük el egy több száz vagy akár ezer évvel korábban állott erődítmény, vár, palota, illetve bármilyen épület, helyszín legapróbb részletekig realiztikus, térben bejárható virtuális mását, de lehetőségünk van komplett csatajelenetek megelevenítésére is, közel mozifilmminőségben. A 3D technológiák tudományos alapossággal és történeti hűséggel történő alkalmazása tehát teljesen új távlatokat nyit meg a történelmi tárgyú kutatások területén.

² Engler: A térlátás; Katona 2012.

³ Olyan szemüveg, amely a térhatás elérését a jobb és bal szemnek szánt képi információk a fény polarizációja alapján vagy színszűrő segítségével történő szétválasztásával biztosítja.

⁴ Virtual Reality.

Segítségével olyan formában (digitálisan) archiválhatjuk, illetve jeleníthetjük meg történeti és kulturális örökségünket, amely akár évszázadokon keresztül biztosítja majd a felnövekvő generációk számára múltunk élményalapú megismerésének feltételeit. Ezzel a megoldással ugyanakkor elkerülhető az egyes leletanyagok szándékos⁵ vagy nem szándékos⁶ módosítása, rongálása vagy teljes pusztulása is. A tanulmány Zrínyi-Újvár példáján keresztül mutatja be a fentiekben említett technológiákat, valamint a kapcsolódó technikai megoldásokat és módszereket.

3D szkennelés

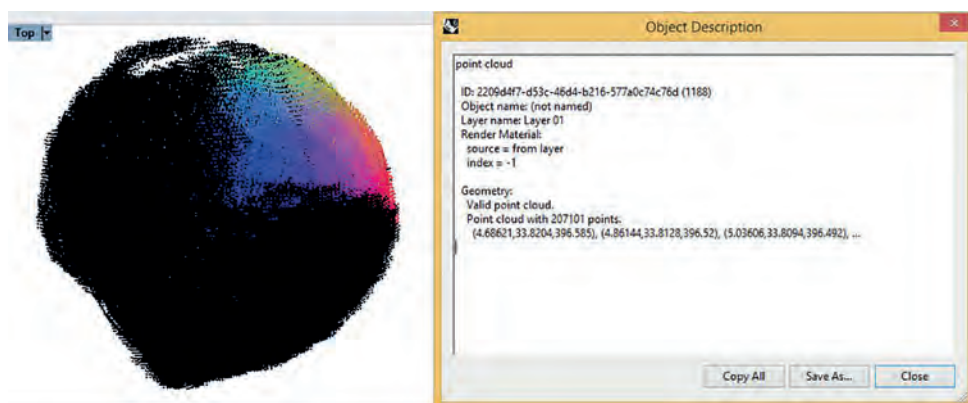
A 3D képkalkotásnak ma már számos eljárása ismert akár az orvostudomány, térképészet, építészet, régészet vagy anyagtudományok területén, amelyek különböző fizikai alaptörvényszerűségeket használnak fel működésük során. A 3D szkennelés tulajdonképpen egy valós objektum vagy környezet vizsgálatának speciális módszere, amelynek során adatokat gyűjtünk annak térbeli kiterjedésével, alakjával és megjelenésének további jellemzőivel (szín, textúra) kapcsolatban. Alkalmazásának elsődleges célja általában, hogy előállítsuk a szkennelt objektum digitális 3D modelljét. Az ennek első lépéseként keletkező információtömeg általában nem más, mint egy olyan térbeli pontfelhő, amelynek elemei a vizsgált felületen helyezkednek el.⁷ A pontokhoz illeszkedve valamilyen geometriai módszerrel felületet illesztve kialakul a megfigyelt objektum digitális térbeli formája. Ha a pontfelhőhöz az adatrögzítés során színinformációt is rendelünk, akkor az eredeti objektum textúráját, mintázatát is megőrizhetjük, illetve megjeleníthetjük.

Bár az adatfelvétel fizikailag sokféleképpen történhet – ideértve a hagyományos mértékvételi eljárásokat is –, a korszerű eszközök ma már többnyire fotóelektromos hatáson alapuló (lézer- vagy strukturált fény) olyan kamerák, amelyek segítségével különböző irányokból (szögek alatt) készítünk meghatározott felbontású digitális felvételeket a vizsgált objektumról. A szkennerek működési elvükből adódóan számos hasonló tulajdonsággal rendelkeznek, mint a digitális fényképezőgépek, így többnyire kúpszerű látótérrel rendelkeznek, és csak a kitakarás nélküli felületekről képesek adatokat gyűjteni. Ugyanakkor fő funkciójuk, hogy a vizsgált tárgy felületének pontjairól távolságinformációkat szerezzenek, amelynek segítségével képesek meghatározni azok térbeli helyzetét saját viszonyítási rendszerükben. A felület textúrája, színe a 3D modellalkotás szempontjából csak másodlagos információt jelent. A szkennelés eredményeként elkészült képek az összehangolt regisztrációs folyamat eredményeként egy közös térbeli referenciarendszerbe kerülve egyfajta térképet alkotnak, és a többszörös átfedések miatt rengeteg redundáns információt tartalmaznak. Az egyes képeken tárolt információk alapján egy szoftvermodul hozza létre a térbeli pontfelhőt (*1. kép*), majd ebből interpolációval rekonstruálja a 3D modellt (*2. kép*).

⁵ Például szélsőségesek által megrongált vagy teljesen elpusztított történelmi helyszínek. Lásd: <https://news.nationalgeographic.com/2015/09/150901-isis-destruction-looting-ancient-sites-iraq-syria-archaeology/> (A leltetés dátuma: 2018. 10. 02.)

⁶ Például a lelet eredeti lelőhelyéről (tőzegmocsár, agyagos talaj, sós vagy édesvíz stb.) való eltávolítását követően annak konzerváló hatása megszűnik, így a természetes bomlási folyamatok beindulnak, felgyorsulnak.

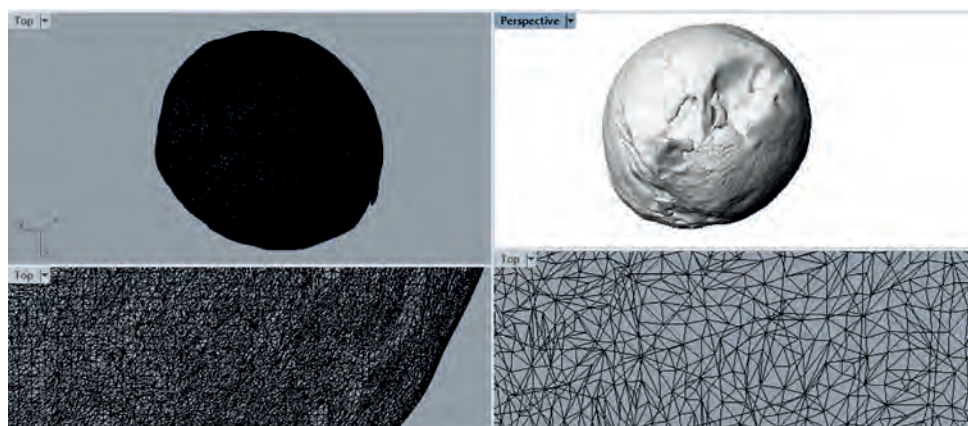
⁷ Bernardini–Rushmeier 2002.



1. kép

Muskétagyó 3D szkennelt modellje (nyers pontfelhő 207 101 db ponttal)

Forrás: a szerzők saját szerkesztése



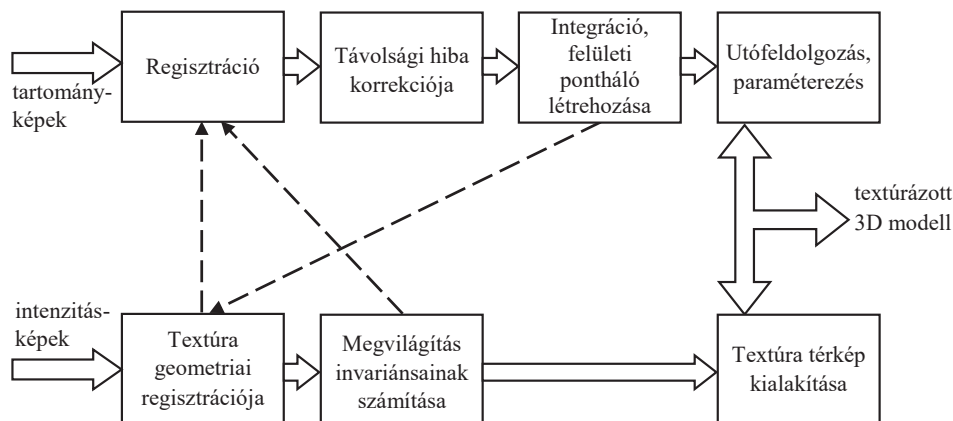
2. kép

Muskétagyó 3D szkennelt modellje (poligon felületi háló)

Forrás: a szerzők saját szerkesztése

A folyamat során alkalmazott matematikai algoritmusok tulajdonságai nagyban befolyásolják a végeredmény minőségét. A rekonstrukcióhoz szükséges lépéseket a 3. kép foglalja össze olyan szkennerek esetére, amelyek a felületi pontok távolsági adatait és a textúrára vonatkozó információkat külön dolgozzák fel, és csak a modellalkotás legvégén egyesítik. A két folyamat lépesei között ugyanakkor feldolgozás közben is megvalósul(hat) információcsere a pontosság fokozása érdekében (szaggatott vonalak). Bár sokféle technikai megoldás létezik a pontfelhő előállítására, a legelterjedtebben használt aktív szkennerek a háromszögelés elvét alkalmazzák a távolság meghatározására. Ennek lényege, hogy valamilyen forrással megvilágítjuk a vizsgált objektum felületét, és az arról visszaverődő fényt egy optikai rendszeren keresztül egy fotóelektromos érzékelő felületére vetítjük. A fényforrás

és az érzékelő(k) egymáshoz képesti helyzete ismert (rögzített), és egy referenciasíkhöz történő kalibrálást követően a rendszer érzékelni tudja egy vizsgált pont annak felületéhez képesti mélységét (kiemelkedését vagy süllyedését) azáltal, hogy a visszaverődés után az érzékelő felületén megjelenő fénypont helyzete (D_z) a távolság függvényében (DZ), azzal arányosan fog megváltozni (4. kép). A szoftver a kapott mélységértékeket a fényforrás és az érzékelő kalibrált pozíciójának, illetve orientációjának ismeretében át tudja konvertálni a szkennerek 3D koordináta-rendszerében egy ponttá.⁸



3. kép

A szkennelésből származó modell rekonstrukciójához szükséges lépések

Forrás: Bernardini–Rushmeier 2002. 150. alapján a szerzők szerkesztése

A gyakorlatban ez lézerszkennerek esetén úgy történik, hogy a fényforrás egy keskeny csíkot vetít a tárgy felületére és a CCD-érzékelő⁹ minden szkennelési vonalon érzékeli a visszaverődő lézerefény csúcspontját, amiből az egyes pontok 3D pozícióját úgy számítják ki, hogy a szkennelési vonalat metszik a lézerefény ismert síkjával (5. kép).¹⁰

A strukturált fényforrást alkalmazó szkennerek működése némileg eltér, hiszen az ilyen eszközök valamilyen mintázatot (célszerűen vonalas) vetítenek a vizsgált felületre, és a felszerelt kamerákkal a bekövetkező torzulás nagyságát mérik. Egyetlen csík elmozdulása akár közvetlenül 3D koordinátákká transzformálható, ugyanakkor léteznek már olyan módszerek is, amelyek váltakozó sávmintákat vetítenek a felületre, aminek eredményeként bináris Gray-kód szekvencia jön létre, és amelynek a feldolgozásával meghatározhatók a felület elemeinek eltérései. Egy csík szélességének megváltozása az adott felületen például arányos lesz a vizsgált felületrészt meredekségével, azaz a mélység paraméter első deriváltjának függvénye. A csíkos szekvenciával végzett frekvencia- és fázismérések eredményei Fourier-transzformációval elemezhetők.¹¹ A különböző módszereket kombinálva olyan eszközt kaphatunk, amely alkalmas a vizsgált tárgy nagy pontosságú

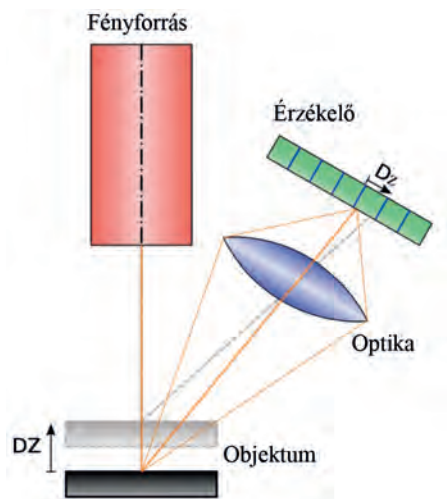
⁸ Bernardini–Rushmeier 2002.

⁹ Charge-coupled Device – töltéscsatolt eszköz (fotóelektromos érzékelő lapka).

¹⁰ Bernardini–Rushmeier 2002.

¹¹ Peng–Gupta 2007.

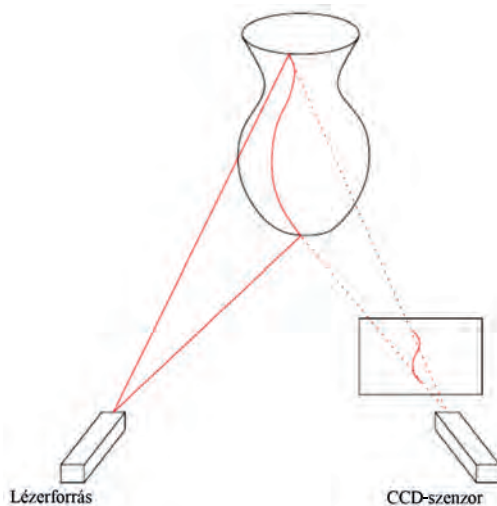
3D digitális rekonstrukciójára. A 6. képen egy kétkamerás rendszer elvi felépítése látható, amelynek célja, hogy a felületi egyenetlenségek által okozott kitakarásokból eredő hibát csökkentse a mérések során.



4. kép

Háromszögelés módszere a mélységmérésben

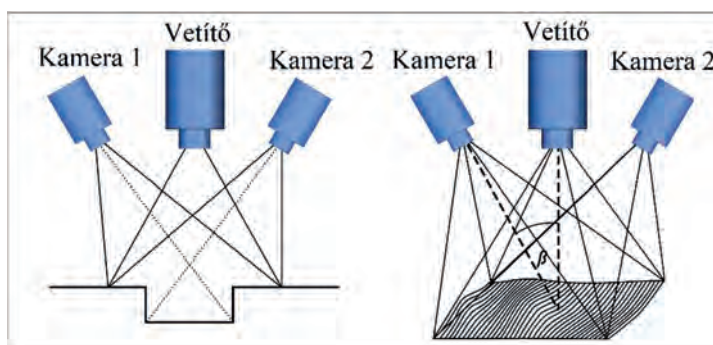
Forrás: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/24/Laserprofilometer_EN.svg/360px-Laserprofilometer_EN.svg.png (A letöltés dátuma: 2018. 10. 21.)



5. kép

A lézerszkennelés elve

Forrás: Bernardini–Rushmeier 2002. 151.



6. kép

Szkennelés strukturált fénnel

Forrás: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/aa/3-proj2cam.svg> (A letöltés dátuma: 2018. 10. 21.)

Ennek a megoldásnak az egyik legnagyobb előnye a gyorsaság, hiszen nem pontonként végzi a felület letapogatását, hanem adott esetben akár teljes látómezőt vizsgál. Mivel egy ilyen látómező-szkennelési fázis akár a másodperc törtresze alatt is megtörténhet, megfelelő számú és érzékenységu szenzor, valamint nagy számítási kapacitású feldolgozóegység alkalmazása esetén akár mozgó objektumokat is tudunk valós időben szkennelni.

Mind a lézer-, mind pedig a strukturált fényt alkalmazó eszközök esetén azok fő paramétereit és működési tulajdonságait az alkalmazás körülményein kívül számos tényező befolyásolja. Hardveroldról a beépített fényforrás, az érzékelők, és az optika minőségi paramétereit vannak a legnagyobb hatással az eszköz által előállított pontfelhő felbontására és a torzítások mértékére, míg a vezérlő és adatfeldolgozást támogató áramkörök – természetesen az alkalmazott módszerek függvényében – határozzák meg elsődlegesen a működési sebességet. Az előállított 3D modell minőségét a feldolgozó szoftver által felhasznált matematikai algoritmusok működési elve és járulékos szolgáltatásai, hibakorrekciós képessége határozza meg.

Az eszközök az egyes mérési irányokból különböző formátumú fájlokat generálhatnak. Jellemzően vagy egy olyan ponthalmaz fájlt (x, y, z koordinátákból álló szöveges állományokat¹²), amelyet más szoftverek is képesek megnyitni (7. kép), vagy egy gyártóspecifikus formátumú fájlt.¹³ Ha textúrával együtt történik a szkennelés, akkor egy bitkép is készül (lásd 9. kép).

¹² Jellemzően .asc, .csv, .txt, .pnt, .xyz vagy .cgo .asci/cgo .ascii kiterjesztések formájában.

¹³ Például: .RGE (Shining3D), .3DD, .RXP, .RSP (Reigl), .3PI (ShapeGrabber), .AC (Steinbichler), .BIN, .SWL (Perceptron), .BRE, .CTR (Breuckmann), .PTS, .PTX, .PTG (Leica), .CDK, .CDM, .RGV, .RVM, .VVD (Konica Minolta)

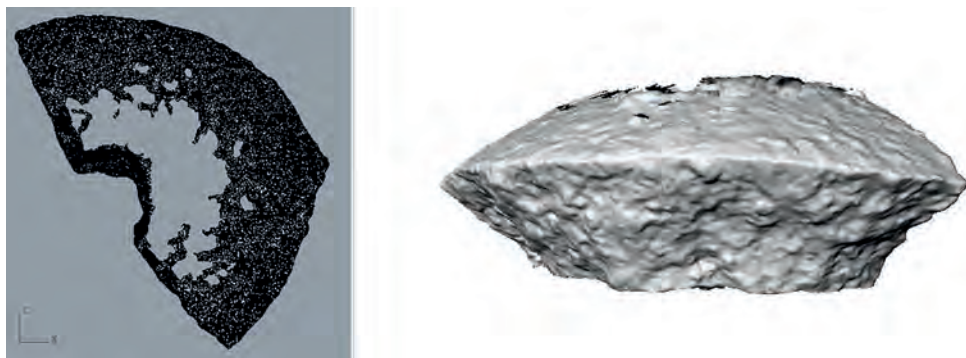
x			y			z		
-6.31379	45.8204	396.585	-0.1865	-0.800412	-0.5697			
-6.13856	45.8128	396.52	-0.125182	-0.821903	-0.555702			
-5.96394	45.8094	396.492	-0.0709069	-0.842256	-0.534394			
-5.78967	45.8093	396.491	0.121942	-0.866708	-0.48368			
-5.6156	45.8094	396.493	0.191978	-0.89736	-0.397355			
-5.4424	45.8175	396.564	0.076628	-0.935337	-0.345358			
-5.26865	45.8174	396.564	-0.0376931	-0.955213	-0.293508			
-6.30979	45.9663	396.333	-0.224425	-0.782316	-0.581047			
-6.13572	45.9657	396.328	-0.165521	-0.826118	-0.538638			
-5.96028	45.9558	396.244	-0.155495	-0.847306	-0.507833			

7. kép

Egy .asc kiterjesztésű file felépítése (az egyes sorok a felületi pontok x, y és z koordinátáit szóközzel elválasztva tartalmazzák)

Forrás: a szerzők saját szerkesztése

A különböző irányszögekből készített ponthalmazok egy egybefüggő fájlba olvashatók, illetve az utófeldolgozás során (amennyiben szükséges), a mérési hibák miatt a 3D modellen kialakult rések kitölthetők annak érdekében, hogy összefüggő felületet vagy például nyomtatható szilárdtest-alakzatokat kapjunk, illetve a felesleges/hibás mérési eredmények kivághatók. Kisebb méretű tárgyak szkenneléséhez kiegészítőként lehet tárgyforgató automatikát (tárgyforgató számoly) használni, míg nagyobb tárgyak, járművek, élőlények vagy akár épületek esetében különböző kézi eszközök állnak rendelkezésre. A tárgyforgató automatikák használatakor a számoly fizikai mérete és teherbírása korlátokat¹⁴ jelenthet. Mindemellett kisméretű tárgyakról a teljes modell készítése is kihívást jelent, mivel a céltárgy talapzata (tálcára felfekvő felület), illetve konkáv alakzatok esetén a további kitakart részek nem jelennek meg a modellen (8. kép). Ez a probléma eltérő céltárgy-orientációkkal végzett szkenneléssel, illetve szoftveres utómunkálatokkal orvosolható.



8. kép

Zrínyi-Újvár ostromának helyszínéről származó bombarepsz 3D modellje (bal oldal: a poligonháló felülnézete, jobb oldal: a 3D szkennelőkamerájának síkjából készített pillanatkép)

Forrás: a szerzők saját fotói

¹⁴ A tárgyasztalok jellemzően néhány cm-es, maximum 0,5 m-es és néhány kg-os tárgyak mozgatására alkalmasak.

A sötét,¹⁵ a fényes, csillogó,¹⁶ az áttetsző,¹⁷ illetve a világos és sötét részleteket is tartalmazó tárgyak szkennelés szempontjából kritikusak lehetnek, ezért az optimális eredmény elérése érdekében ezeket célszerű „mattítani” (például repedésvizsgáló aeroszollal) a folyamat megkezdése előtt. A strukturált fényt alkalmazó eljárásoknál a természetes/mesterséges fényforrások erőssége és iránya is befolyásolhatja a pontosságot, illetve a szkennelés eredményét. Törekedni kell arra, hogy a teljes folyamat ideje alatt egyenletes szórt fény érje a tárgyat, amit laboratóriumi körülmények között viszonylag egyszerű biztosítani, ugyanakkor egy régészeti feltárás helyszínén a szabad térben már lényegesen komolyabb előkészületeket igényelhet. Ilyen körülmények között, kisebb méretű tárgyak esetén célszerű lehet egy szórt fényű megvilágítással rendelkező, fényképezésnél is használatos „fénysátrat” használni annak érdekében, hogy hibamentes modellek készüljenek. Arra is érdemes ügyelni a tárgyak elhelyezésekor, hogy a zsámoly forgatása során el ne mozduljanak, mert az mérési hibát eredményezhet. A tárgy geometriája és anyagi tulajdonságai határozzák meg az alkalmazható rögzítési módszereket, amely legegyszerűbb esetben lehet kétoldalú ragasztó vagy gyurma, illetve ha a lelet állapota ezt nem engedi meg, valamilyen átlátszó alátét vagy támaszték használata javasolt.

A szkennelések eredményeként kapott 3D modellek¹⁸ általában még utómunkára szorulnak,¹⁹ amelyeket különböző 3D tervező/modellező szoftverekkel tudunk elvégezni. Az ilyen programok lehetőséget biztosítanak arra is, hogy a kapott végeredményt utólag tetszőlegesen manipulálni tudjuk.

Az általunk alkalmazott, kisméretű tárgyak beltéri szkennelésére használható EinScan-SE készülék 1.3 Mpixels kamerával, 290–480 mm fókusz távolsággal, fix és automata mérési opciókkal rendelkezik. A leletanyagok szkennelése során fontos tapasztalatokat szereztünk az eszköz működéséről, tulajdonságairól. Az EinScan-SE forgózsámolya segítségével képes 8–180 irányból automatikusan léptetett felvételeket készíteni, azonban mérés előtt érdemes tanulmányozni a tárgy felületi minőségét és geometriai jellemzőit, illetve a műszer mérési pontosságát²⁰ is figyelembe véve átgondolni, hogy az adott tárgyról milyen felbontású modellre van szükségünk. A fenti példánál maradva, a túlmintavételezett modell pontfelhőjében lesznek „fals” mérések, amelyek kiszűrését nem könnyíti meg a minták magas száma, és a feldolgozást is nehezíti, jelentősen lassítja a sokszorosára növekedett fájl méret.²¹

A konkáv tárgyak többféle orientációval is körbefényképezhetők annak érdekében, hogy minimalizáljuk az árnyékos területek arányát, majd ezt követően az így keletkezett különálló modellek a szoftver segítségével egyesíthetők. Gyakorlati tapasztalatok alapján kijelenthető, hogy a több tárgyorientációval végzett mérés és a modellek összeillesztése egyaránt időigényes folyamat, és meglehetősen nehézkes művelet. Ezért fontos, hogy előre meghatározzuk az adott feladat elvégzéséhez feltétlenül szükséges orientációkat, ezáltal minimalizálva a szkennelések

¹⁵ Abszorbeálja a fényt.

¹⁶ Szórja vagy egyenetlenül veri vissza a fényt.

¹⁷ Átereszti a fényt.

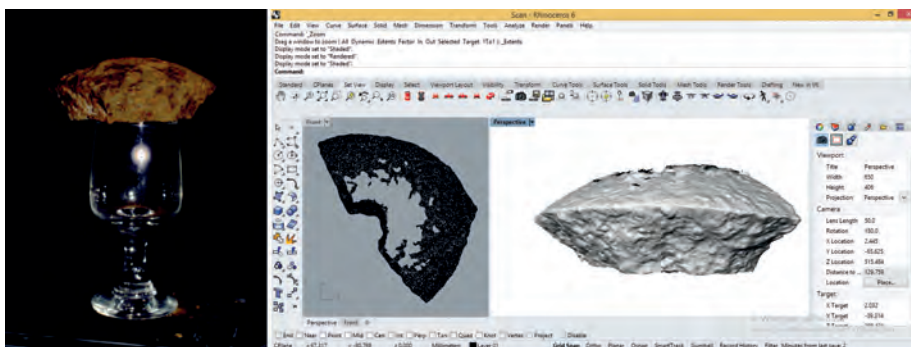
¹⁸ A térbeli pontfelhőket vagy azokból generált poligonhálót tartalmazó fájlok.

¹⁹ Például „fals” mérési eredmények (pontok vagy pontthalmazok) szűrése, pontthalmazból felületi hálós (poligonos) vagy „nurb” felületek generálása, a felületi háló poligonszámának csökkentése, fájl típus-konverzió (a további feldolgozás érdekében használt szoftver által kezelt formátumra való alakítás).

²⁰ Eszközünk 0,1 mm-nél kisebb hibával méri a vizsgált tárgy felületi pontjainak távolságát.

²¹ A fájl méretet ugyan sok tényező befolyásolja, de gyakorlati tapasztalataink szerint a készített felvételek számával arányosan növekszik, azaz az ugyanarról a tárgyról készült 16 és 32 irány szögéből készült modell által elfoglalt lemezterület is duplájára nő.

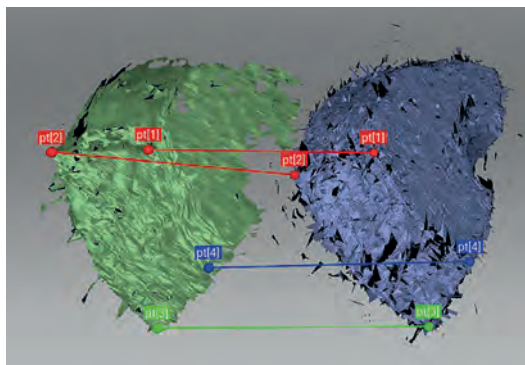
számát, amivel jelentős időt, energiát és tárhelyet tudunk megtakarítani. Például ha áttetsző anyagból készült támasztékot, illetve tartószerkezetet alkalmazunk, a céltárgy az optimális síkba emelhető/dönthető (9. kép). Az áttetsző támasztékok jellemzően nem lesznek láthatók a modellben, vagy csak kisszámú hibás mérési pontot eredményeznek, amelyek lényegesen kevesebb utómunkával távolíthatók el. Kézi eszközök használata esetén célszerű úgy elhelyezni a tárgyat, hogy az a lehető legtöbb irányból, a szkennelési folyamat megszakítása nélkül (akadálytalanul) az optimális távolságból körbejárható legyen, hiszen a szükséges mérések számával arányosan nő az utómunkák időigénye és a lefoglalt tárhely mérete. A szkennelést követő utómunkákat megkönnyíti, ha kiválasztunk a tárgyon referenciapontokat (10. kép), amelyek lehetnek markáns élek, textúrák, de a céltárgyat nem kitakaró, azzal nem összeolvadó mintázatokat, markereket is alkalmazunk a háttérben, esetleg a céltárgy talapzatánál. Nagy méretű, esetleg homogén felszínű tárgyak esetén az egyes mérések összeillesztését szintén a céltárgyon elhelyezett jelölésekkel (matricázott markerek) egyszerűsítjük le.



9. kép

Egy üveg pohárral megemelt céltárgy (balra: a kép a szkennertől készített nyers pillanatkép, jobbra: pontfelhő és az arra illesztett zárt felület)

Forrás: a szerzők saját fotói



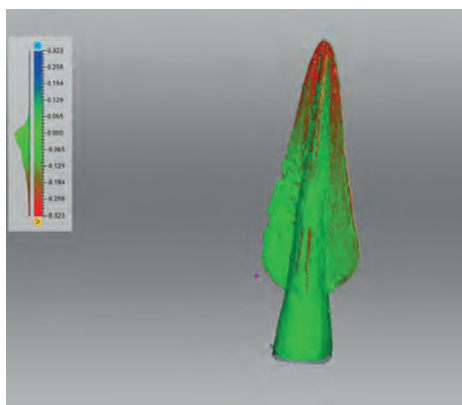
10. kép

Két különböző irányszögből szkennelt modell illesztése referenciapontok segítségével

Forrás: a szerzők saját fotója

Akárcsak a fizikai objektumoknak, azok digitális reprezentációjának, a 3D modelleknek is rögzíteni kell a készítés körülményeit, illetve a fizikai tárgyakkal való relációjukat. Ezt a 3D szkenneléssel foglalkozó szakemberek gyakran csak a modell fájlnevében teszik meg, amelyet a mentés során adnak. Ez egyrészt korlátozza a feltüntethető információ mennyiségét, másrészt az eseti megoldások (megadott paraméterek eltérő típusa, formátuma, elhelyezkedése) a későbbi feldolgozások során növelik a hibavalószínűséget. A mérési körülményeket a fájlok nem rögzítik, illetve digitálisan sokszor a 3D szkennelő szoftvere sem generálja. Ezért régészeti alkalmazásnál fontos lehet egyfajta metainformáció²² utólagos rögzítése a fájlok leírásaiban.

Ezek szükségességét egy gyakorlati példán keresztül is szemléltetjük. A 11. képen két különböző eszköz (Artec Space Spider kézi és EinScan-SE forgózsámolyos szkennelő) által készített 3D modellt hasonlítottunk össze. A modellek közti eltérések nagyságát színkódolással jelzi a szoftver, amelyben a pirossal megfestett részek jelzik a legnagyobb differenciát. Első ránézésre is szembevető a dárdahegy csúcsán megjelenő, közel párhuzamos elrendezésű vonalas alakzat, ami valószínűsíthetően a forgózsámolyos szkennelő mérési hibájára vezethető vissza, amit a mérés során a céltárgyra eső erős oldalfény okozhatott, miközben a tárgyat hosszirányú tengelye körül forgattuk. A mérési körülmények, illetve a mérésben felhasznált eszközök konfigurációja a 3D modellfájlok alapján utólag nem lennének megállapíthatók.



11. kép

Két különböző szkennelővel végzett mérések eredményeinek összehasonlítása

Forrás: a szerzők saját fotója

Megkülönböztethetjük egymástól a 3D szkennelés körülményeire, illetve az utómunkálatok során alkalmazott technikák dokumentálására vonatkozó metainformációkat, illetve magára a tárgyra (leletre) vonatkozó információkat. Előbbi esetén a modellalkotásra használt hardverek és szoftverek adatait, azok beállításait, a mérési elrendezést, valamint az utómunkálatok során végzett módosításokat célszerű dokumentálni. Utóbbi esetben a fizikai

²² Hasonlóan a digitális fényképezőgépek által generált „exif” információkhoz (lásd részletesebben: <http://owl.phy.queensu.ca/~phil/exiftool/TagNames/EXIF.html> [A letöltés dátuma: 2018. 11. 02.]).

paraméterek (méretek, tömeg, összetétel) mellett a leletfeltárás körülményei (helyszín koordinátája, lokális referenciapontok stb.) lehetnek lényegesek. Sokszor az elkészült modelleket valamilyen tematika szerinti virtuális tárlat, videóprezentáció, animáció, szimuláció keretében használják fel, így célszerű címkézni (akár az NTFS²³ vagy egyéb fájlrendszerek saját címkerendszerével) azokat, illetve hasznos róluk kisméretű előnézeti fájlt generálni (a keresés és rendezés egyszerűsítése érdekében²⁴).

3D megjelenítés és virtualizáció

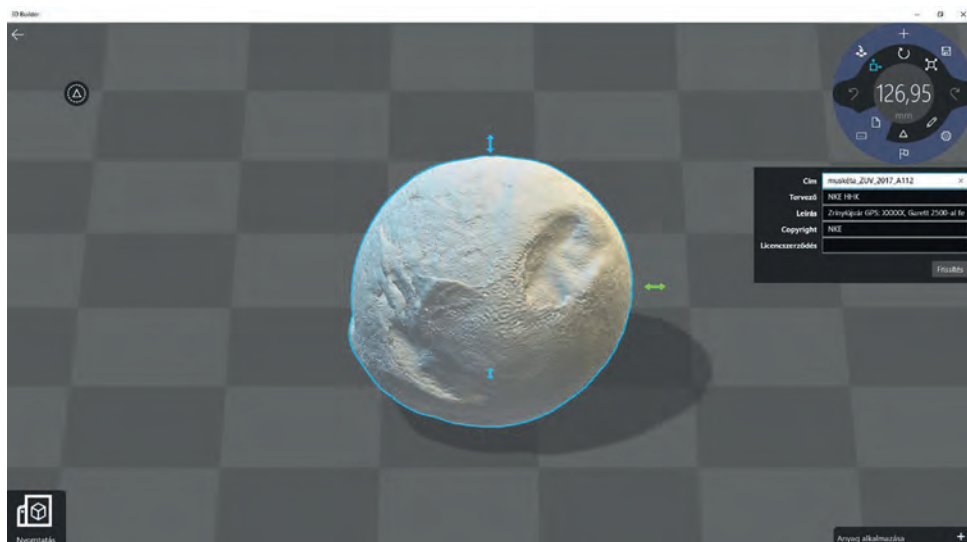
Számos lehetőség áll ma már rendelkezésünkre az elkészült modellek megjelenítésére, utólagos manipulációjára és komplex környezetben való felhasználására. A különböző célszoftverek mellett ugyanakkor érdemes kiemelni azt a megoldást, ami a legelterjedtebben használt operációs rendszer részeként bárki számára biztosítja 3D objektumok egyszerű kezelését. A Windows 10 szoftvercsomagba mára olyan fejlett 3D megjelenítő/szerkesztő megoldásokat integráltak, amelyek képesek a szerkesztés mellett előnézeti képet adni az egyes támogatott 3D modellformátumokról,²⁵ illetve saját alapértelmezett formátumáról (.3mf²⁶), valamint azokat képes metainformációkkal is kiegészíteni (*12. kép*). Ezek a mezőnevek ugyanakkor a jelenlegi verzióban sajnos még előre definiáltak és a felhasználó által nem módosíthatók, továbbá kiolvasásuk is az operációs rendszer saját szoftvereivel oldható csak meg. Azonban az a tény, hogy az operációs rendszerek beépített alkalmazásai is képesek már 3D modellek megjelenítésére, szerkesztésére, abba az irányba mutat, hogy a jelenleg még alapvetően csak szakemberek által alkalmazott 3D technológia hamarosan a legszélesebb felhasználói rétegnek mindennapi életébe, munkájába is beépül majd, a szöveg-, kép- vagy videószerkesztéshez hasonlóan.

²³ New Technology File System (új technológián alapuló fájlrendszer). A Microsoft Windows NT operációs rendszernek és újabb változatainak szabványosított fájlrendszere. A korábbi fájlrendszerekhez képest rendelkezik többek között hozzáférés-védelemmel, naplózás funkcióval és a fájlokhoz tartozó metaadatok támogatásával.

²⁴ A tárgyak szkennelése során keletkező fájlok mérete több száz MB-tól több GB-ig terjedhet, amelyek betöltése hosszabb időn keresztül leköti a számítógép erőforrásait.

²⁵ 3D modellformátumok: .fbx, .3mf, .stl és .obj.

²⁶ <https://3mf.io/specification/> (A letöltés dátuma: 2018. 11. 15.)



12. kép

A Windows 10 3D modellformátumának metaadatmezői

Forrás: a szerzők saját fotója

A tárgyak digitalizálása során lehetnek olyan esetek, amikor a tárgy mérete, tömege, elhelyezkedése²⁷ nem teszi lehetővé a korábban bemutatott mérési eljárások alkalmazását, vagy a felhasználás nem követeli meg a lézeres vagy strukturált fény technológia által kívánt pontosságot, esetleg azoknál gyorsabb eljárásra van szükség. Ilyenkor a fotogrammetria elvén működő 3D modellalkotás módszere nyújthat segítséget a felhasználók számára, amelynek régészeti alkalmazására az alábbi esettanulmány szolgálhat példaként.

Az interaktív történelemoktatás hasznos eszközei lehetnek a virtuális/kiterjesztett valóság (VR/AR²⁸) alapú megoldások. A Zrínyi-Újvár virtuális látképének fejlesztése során prototípus jelleggel kialakított verzióban magát Zrínyi Miklóst alakítva járhatjuk be a korabeli tájat és az egykoron állott védőműveket. Az oktatás játékosítása, gamifikációja²⁹ vonzóvá teheti a történelemtanulást, segítheti a különböző történelmi események elképzelését, lehetővé teszi a már elveszett, távoli vagy nehezen megközelíthető helyszínek bejárását a fiatalok számára. A bejárható terepmodellen elhelyezhetők információs pontok, amelyeket „meglátogatva” a középkori ember mindennapjait, a végvári élet különböző mozzanatait, a használati tárgyakat, fegyvereket ismerhetik meg a tanulók (élményalapú oktatás). Ezek az információs pontok tartalmazhatják a leletekről eredeti állapotukban készült felvételeket, azok rekonstrukciójának eredményeit, 3D modelljét, írásos (történeti források, publikációk), képi (metszetek, grafikák, fényképek, térképszelvények) és videóanyagokat, animációkat. A játékosság fokozása érdekében rejtvények, feladványok is hozzárendelhetők egy-egy helyszínhez vagy eseményhez, amelyeket a tanulóknak teljesíteniük kell a bejárás során.

²⁷ Például víz alatt, barlangban stb.

²⁸ Virtual Reality/Augmented Reality

²⁹ Damsa 2016.

A klasszikus oktatási módszereket természetesen nem tudják teljes mértékben kiváltani a VR/AR-alapú megoldások, azonban azok vonzóbbá, közérthetőbbé tehetők általuk, a tanulási folyamat pedig gyorsítható. A kiterjesztettvalóság-alapú megoldásoknál ezek a játékok különböző helyszínek valós meglátogatását,³⁰ azokról információk begyűjtését is jelenthetik, így kiegészítve például a tanulmányi kirándulásokat.

A fenti „játék” karakterének megteremtésekor a hagyományos modellezési eljárások felhasználása helyett a 3D modell létrehozása során Zrínyi Miklós arca fotogrammetriai eljárás segítségével lett leképezve egy olyan mellszoborról, amely a Nemzeti Közszerológati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Karának is helyt adó Zrínyi Miklós Laktanya és Egyetemi Campus főépületének alulájában volt kiállítva.



13. kép
Zrínyi-Újvár makettje

Forrás: a szerzők saját fotója

A fotogrammetriai eljáráshoz egy okostelefonos applikációt használtunk fel, az Autodesk cég ingyenes 123D alkalmazását. A szoftver jelenleg már nincs forgalomban, helyét a ReCap Pro³¹ elnevezésű program vette át. A modell elkészítéséhez összesen 64 fotóra volt szükség, amelyek az okostelefon beépített kamerájával készültek két magassági szögéből, merőlegesen a szobor függőleges tengelyére, illetve azzal 30°-os szöget bezárva úgy, hogy a fejtető is jól látszódjon. A kétszer 32 képből álló fotósorozattal a Zrínyi-szobor teljes felszínét meg-

³⁰ A játékoság érdekében a népszerű geocaching elveit is integrálhatjuk. Lásd: www.humankinetics.com/excerpts/excerpts/learn-about-the-benefits-of-geocaching (A letöltés dátuma: 2018. 11. 19.)

³¹ www.autodesk.com/products/recap/overview (A letöltés dátuma: 2018. 11. 20.)

örökítettük. A fotókat feltöltve az applikációba, az megkezdte a feldolgozást, és rövid időn belül egy magas részletgazdagságú, élethű 3D modell jelent meg a kijelzőn. A nyers modellt beillesztve az Autodesk Mudbox szoftverébe, először csökkenteni kellett annak poligon-számát, majd ráhelyezni a textúrát (14. kép).



14. kép

Zrínyi Miklós 3D modellje

Forrás: a szerzők saját fotója

A fej 3D modelljét ezt követően ráillesztettük egy az internetről letöltött korhű testpáncélra, így létrehozva Zrínyi Miklós egész alakos karakterét, amelyet a felhasználás előtt még egy úgynevezett rigging eljárás³² alá kellett vetni. Ennek során egy csontvázra feszítettük modellünket annak érdekében, hogy az animálás során a poligonok a csontokkal együtt a valósághoz hasonló hatást keltve mozogjanak.

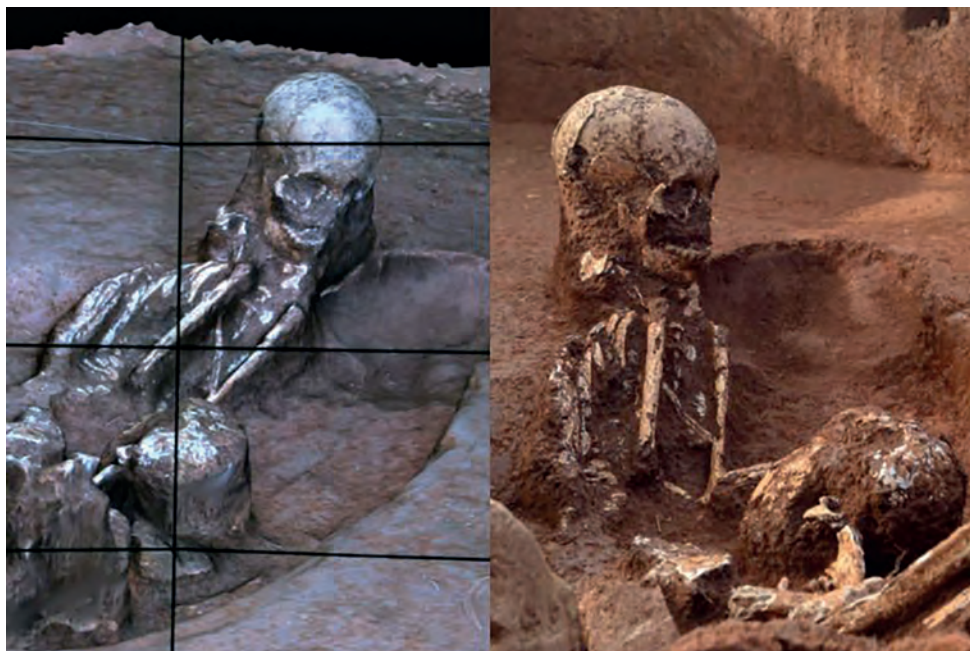
A virtuális és a kiterjesztett valóság szerepe a régészeti munkában

Először célszerű tisztázni ezen fogalmak jelentését, hiszen a virtuális valóság kifejezés önmagában is kétértelmű, mivel a virtuális szó a (fizikai) valósággal ellentétes értelemben is használatos. Ugyanakkor a virtuális valóság (VR) és a kiterjesztett valóság (AR) kifejezéseket sokan egymás szinonimájaként használják, holott jelentéstartalmuk eltérő. A VR az érzékelt, érzékelhető világ teljes mértékű szimulálását, különböző érzékszerveink³³ által keltett érzet leképezését vagy mesterséges előállítását jelenti, míg az AR használata során rendszerünk a valóságról érzékelt képet egészíti ki többletinformációval, tartalommal, így

³² A rigging során a 3D modell testét, végtagjait referáljuk a 3D térben való „élethű” mozgás, mozgatózás érdekében.

³³ Jellemzően a látás és hallás, de vannak kísérletek már többek között a tapintás és egyensúlyérzet szimulálására is.

a valós és virtuális tér egyszerre jelenik meg. Ezt egyfajta második, a fizikai valóságban nem létező információs réteggént lehet a legegyszerűbben elképzelni.



15. kép

A VR-kép és a valóság összehasonlítása

Forrás: www.abc.net.au/news/2016-10-18/vr-and-drones-could-unlock-secrets-about-the-plain-of-jars-laos/7938520 (A letöltés dátuma: 2018. 11. 29.)

A 3D térérzet mesterséges előállítására számtalan technikai megoldás létezik, de leggyakrabban a fejre szerelhető kijelzők/szemüvegek, illetve a látóteret részlegesen vagy teljesen kitöltő projekciók³⁴ használatosak.

A felhasználási területek esetén a megjelenítési módok mellett a vezérlésre (térbeli navigáció, interakció a virtuális környezettel) használt megoldások is fontos választási szempontok lehetnek. A környezetben való hely- vagy nézetváltoztatást kontrollerekkel, gesztusokkal, kézmozdulatokkal tudjuk elérni, de fejlesztenek hanggal való vezérlési módokat is. A valós térbeli akadályok (falak, tárgyak stb.) a VR-megoldások esetén korlátozó tényezőt jelenthetnek, hacsak azokat le nem képezik a virtuális térben is (például a teremben egy falra a virtuális térben látható textúrákat, modelleket illesztünk).

A régészeti felhasználás sokrétű lehet, például a roncsolásmentes elemzések lehetősége mellett a távoli, nehezen vagy csak időszakosan megközelíthető feltárási helyszínek bármikor megjeleníthetők, így azok akár „napi szinten” bejárhatóvá válnak a feltárást részt vevő szakemberek számára. Az oktatásban és felkészítésben is hasznosíthatók lehetnek ezek

³⁴ Ebbe a kategóriába a CAVE (Computer Assisted Virtual Environment) és a dóm elvű megoldások tartoznak.

a modellek, hiszen a kevésbé szakszerű megoldások alkalmazása során a leletek esetlegesen bekövetkező rongálódása megelőzhetővé válik, ha a tényleges feltárás előtt a munkafolyamatokat egy virtuális környezetben gyakorolják be. Sokszor a valós környezetet, fizikai adottságokat (méret, távolságok stb.) egy fénykép vagy videófelvétel nem képes arányosan visszaadni, míg egy virtuális térben a szemlélő átélheti a valósághoz leginkább hasonlatos környezetben való tevékenységek élményét. A kiterjesztett valóság oktatásban való alkalmazása is előnyös lehet, hiszen egy feltárás munkafolyamatait egy képzett régész rögzítheti egy valós helyszínen, majd azt a tanulók átélhetik tantermi vagy otthoni környezetben is, akár interaktívan beavatkozva annak lefolyásába (16. kép).



16. kép

Egy VR-dómban a délkelet-ázsiai Plain of Jars lelőhelyen (Phonsavan, Laosz)

Forrás: www.youtube.com/watch?v=y9ZHw8T7ECU (A letöltés dátuma: 2018. 12. 04.)

A 3D technológia alkalmazása a régészeti munkafolyamatokban

A régészeti feltárások, kutatások során készített 3D modellek több célra használhatók. Az egyik leggyakoribb a távoli lelőhelyeken folytatott expedíciós mérések költségeinek csökkentése,³⁵ illetve a nehezen elérhető, veszélyes helyszíneken végzett vizsgálatok eredményeinek utólagos feldolgozása.³⁶ A leletrekonstrukció, illetve „konzerválás” egy másik lehetséges felhasználási mód. A sérült leletek korhű, az írásos és egyéb források alapján

³⁵ Metcalfe 2017.

³⁶ Nyugodt körülmények között a régészeti munkára és nem a körülményekre kell koncentrálniuk a szakembereknek (például a bűvárfelszerelés és műszerek figyelemmel kísérése).

történő rekonstrukciója digitális modellek segítségével a leginkább költséghatékony megoldás. A hosszú távú megőrzést, illetve a bemutatást is elősegítheti a 3D technológia, hiszen korhű, a lelethez tökéletesen illeszkedő támasztékok, tartószerkezetek hozhatók létre, akár 3D nyomtatással is. Egy másik felhasználása lehet az egyes tárgyak előállításához, alkalmazásához kapcsolódó elméletek vizsgálata, összehasonlítása. Például Négyesi Lajos³⁷ kutatása során empirikus úton előállított sajtolt, „hengeres testű, gömbfejű lövedék” digitális modell formájában egyszerűbben és gyorsabban előállítható lett volna. Bereczki Zoltán³⁸ kutatási eredményei alapján különböző középkori épületek digitalizált modelljét alkotja meg, a korabeli építési módszerek korlátainak és lehetőségeinek figyelembevételével (17. kép).



17. kép

Középkori épületek építésének lépcsőfokai 3D technológia segítségével

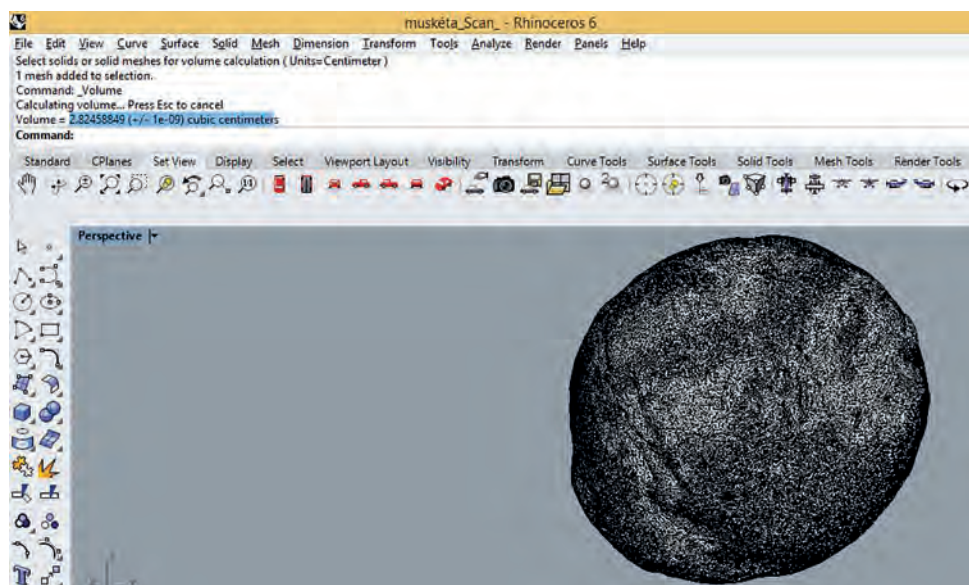
Forrás: http://bebop.hu/booklet/arnyekolt_egyben_lo.jpg (A letöltés dátuma: 2018. 12. 12.)

Az iparban használt minőség-ellenőrzési megoldásokhoz hasonlóan az előállított digitális modellt roncsolásmentes vizsgálatokra, illetve más vizsgálati módok ellenőrző méréseire is fel lehet használni időbeni és helyszínbéli korlátozás nélkül, a tárgy fizikai érintése vagy akár jelenléte nélkül. Megfelelő felbontás esetén a modellbe történő belenagyítással, akár a textúra eltávolításával láthatóvá tehetők a szabad szemmel nem érzékelhető részletek, felszíni sérülések, bevésések, alakzatok, feliratok. Egy ilyen vizsgálatra lehet jó példa egy szabálytalan vagy becsapódás következtében deformálódott muskétagyolyó térfogatának pontos meghatározása, amely segítséget nyújthat az eredeti (gyártáskori) kaliber, a járulékos információk alapján pedig a kor és a fegyver típusának behatárolásában. A 18. képen egy olyan térfogatszámítást végeztünk el egy muskétagyolyó szkennelt és tisztított modelljén,

³⁷ Négyesi 2013. és Hausner–Négyesi–Padányi 2012. 189–218.

³⁸ Bereczki 2018.; Bereczki 2017.

amely hagyományos mérési eljárásokkal és számításokkal hosszadalmas munkafolyamat eredményeként lett volna csak elvégezhető. Az alkalmazott 3D modellező programba történő importálással és egy egyszerű parancssor lefuttatásával $2,825 \text{ cm}^3$ térfogatot kaptunk, amely 10^{-9} pontosságú meghatározást jelent a 3D modell tényleges geometriájához képest.



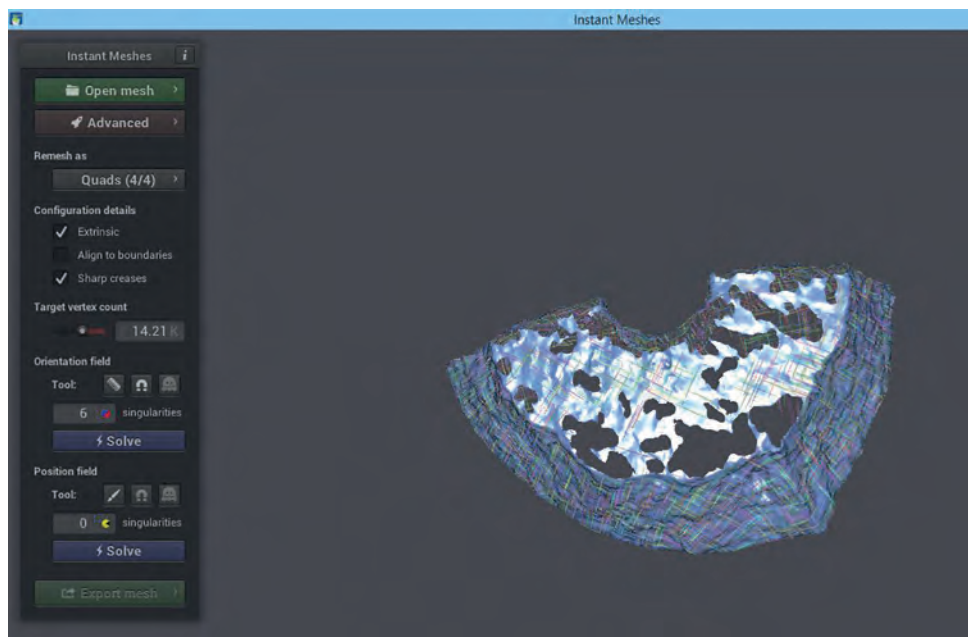
18. kép

Egy muskétagyolyó modelljén végzett térfogatszámítás

Forrás: a szerzők saját szerkesztése

A régészeti feltárások során számtalan lelet kerülhet felszínre, amelyek 3D-ben történő digitalizálásához és megőrzéséhez komoly méretű tárhelyre van szükség, illetve a feltétlenül szükségesnél nagyobb részletgazdagságban, felbontásban történő rögzítés eredményeként kialakuló fájl méret a későbbi felhasználás során is nehézséget jelenthet. Ezért érdemes a szkennelést követően optimalizálni, azaz szükséges mértékűre egyszerűsíteni a modell pontfelhőjét vagy a poligonok számát. Ez utóbbira például a nyílt forráskódú, ingyenesen felhasználható Instant Meshes alkalmazása³⁹ hatékony megoldást jelenthet (19. kép).

³⁹ <https://github.com/wjakob/instant-meshes> (A letöltés dátuma: 2019. 01. 03.)



19. kép

Az Instant Meshes kezelőfelülete és az egyszerűsített modell gyorsnézete

Forrás: a szerzők saját szerkesztése

3D nyomtatás

A szkennelt tárgyakról, eszközökről készült vagy valamilyen 3D tervező szoftverrel tervezett digitális modellek ma már nemcsak a monitorok kijelzőin jeleníthetők meg, de lehetőség van azok kézzel fogható formában, különböző alapanyagokból történő előállítására is 3D nyomtatók segítségével. A 3D nyomtatás az additív gyártástechnológiai eljárások csoportjába tartozik, hiszen a kívánt formákat vékony rétegek egymásra történő építésével alakítják ki, és nem pedig előgyártmányok megmunkálásával.⁴⁰

Az eljárás alapját minden esetben egy digitális háromdimenziós modell jelenti, amelyet valamilyen szelvényelőzővel segítségével vékony, vízszintes rétegekre bontunk, majd legeneráljuk a nyomtató által olvasható és feldolgozható (végrehajtható) vezérlőfájlt, amely lépésenként tartalmazza az eszköz működtetéséhez szükséges paramétereket, mint a koordináták, sebességek, időzítések. A fájlt feltöltve, majd futtatva a nyomtató elkezd végrehajtani az abban kódolt utasításokat, és a választott alapanyagból elkezd rétegről rétegre felépíteni a gyártmányt, amíg az el nem nyeri végleges formáját. Bár ez első olvasatra nem tűnik bonyolult folyamatnak, annak gyakorlati kivitelezésére ma már számos eljárás létezik.

⁴⁰ Husi–Szemes 2015. <https://docplayer.hu/18168546-Rapid-prototyping-technologiak-additiv-technikak-dr-habil-husi-geza-dr-szemes-peter-tamas.html> (A letöltés dátuma: 2019. 01. 03.)

Ezek segítségével a hobbicélú felhasználástól a professzionális mérnöki gyártmányokig szinte bármilyen prototípus, alacsony vagy nagy példányszámú alkatrész, eszköz, tárgy készíthető szinte bármilyen alapanyagból, széles méret- és formaválasztékban. Ilyen megoldásokkal olyan komplex struktúrák is előállíthatók, amelyeket semmilyen más eljárással nem lehet fizikailag kivitelezni.⁴¹

A 3D nyomtatási eljárások közül a műanyag szálolvasztásos (FDM⁴²) technika a legelterjedtebb, és napjainkban még a legolcsóbb megoldás. Az ilyen elven működő gépek közös tulajdonsága, hogy az alapanyag (valamilyen hőre olvadó műanyag, termoplasztik) milliméteres átmérőjű szál formájában, feltekercselve áll rendelkezésre. Ezt egy léptető motor húzza be a felmelegített nyomtatófejbe, ahol megtörténik annak megolvasztása, majd az így keletkezett olvadékot kipréseli a néhány tized milliméter átmérőjű fűvókán keresztül, majd az előző réteghez tapadást követően lehűlve megszilárdul.⁴³ Egy tipikus FDM-rendszerben az extrudáló fej horizontálisan és vertikálisan mozog, párhuzamosan a tőle rétegenként függőlegesen lefelé távolodó munkaasztallal.

A sztereolitográfia (SLA⁴⁴) során a rendszer egy olyan folyékony halmazállapotú műanyag alapanyaggal dolgozik, amely bizonyos hullámhosszúságú fény hatására szilárdul meg (fotopolimer). A folyamat során a gyártmány egy olyan munkaasztalon jön létre, amelyet egy rétegnivel a fotopolimerrel töltött kád felszíne alá pozicionálnak. Egy fókuszált UV-fénynyaláb a modell kétdimenziós szeletei geometriájának megfelelően addig pásztázza a folyadék felszínét, amíg a polimer el nem éri szilárd halmazállapotát. Ezt követően a platform egy rétegvastagsággal mélyebbre merül, és a már megszilárdult réteg fölé ismét folyékony fotopolimer kerül. Ez a metódus addig ismétlődik, amíg a munkadarab el nem éri végleges formáját. A modell geometriájától függően mechanikai alátámasztások alkalmazására is szükség lehet, amelyek a gyártás után eltávolíthatók. Az elkészült gyártmányokat gyakran még UV-fény segítségével utólag le kell világítani, hogy végleges szilárdságukat elérjék.⁴⁵ Ezzel az eljárással lényegesen nagyobb pontosságú prototípusok készíthetők, ugyanakkor sokkal lassabban, mint szálolvasztással.

A fotopolimerizáció elvén működő másik gyártástechnológia során a folyadék felszínét projektorral világítják meg (DLP⁴⁶). Ezekkel a nyomtatókkal nagyobb nyomtatási sebesség érhető el, mivel ilyenkor az egész réteget egyszerre világítjuk le, ugyanakkor az elérhető maximális felbontást a projektor felbontására korlátozza.⁴⁷

A szelektív lézeres szinterezés (SLS⁴⁸) finom por állagú alapanyaggal dolgozik. Működésének lényege, hogy a munkafelületen a berendezés a kívánt rétegvastagságban eltéríti a port, majd a lézer egy tükörrendszer segítségével mozgatótt nyalábbal végigpásztázza azt a modell adott szeletének megfelelően. A levilágított por szintereződik, a szomszédos

⁴¹ Gál-Németh 2019. http://hadmernok.hu/191_19_gal.pdf (A letöltés dátuma: 2019. 03. 20.)

⁴² Fused Deposition Modelling.

⁴³ 3D nyomtatás különböző technológiákkal I. – az FDM-eljárás. <https://3dnyomtato.wordpress.com/2013/07/12/3d-nyomtatas-kulonbozo-technologiakkal-i-az-fdm-eljaras/> (A letöltés dátuma: 2019. 01. 07.)

⁴⁴ Stereolithography Apparatus.

⁴⁵ Additív technológiák körkép. www.cnc.hu/2012/12/additiv-technologiak-korkep/ (A letöltés dátuma: 2019. 01. 07.)

⁴⁶ Digital Light Processing.

⁴⁷ 3D printing Technology Comparision: SLA vs DLP. <https://formlabs.com/blog/3d-printing-technology-comparision-sla-dlp/> (A letöltés dátuma: 2019. 01. 08.)

⁴⁸ Selective Laser Sintering.

részecskékkel összekapcsolódva megszilárdul, aminek következtében kialakul a kívánt forma. A platform ezek után tovább ereszkedik, és újabb porréteget terít le.⁴⁹ Az eljárás legnagyobb előnye a korábbiakhoz képest, hogy már fémtárgyak nyomtatására is alkalmas. Hasonló eljárás még a szelektív lézeres megolvasztás (SLM⁵⁰) és az elektronsugaras megolvasztás (EBM⁵¹), amelyek között a különbség, hogy míg az előbbi nagy energiájú lézersugarat, addig az utóbbi nagy energiájú elektronsugarat használ fel a fémpor megolvasztásához.⁵²

Külön érdemes megemlíteni a „jettingelős” módszert alkalmazó 3D nyomtatási eljárásokat. Fotopolimer jetting (PJ⁵³) technológia – más néven PolyJet – esetében a munkasztalra folyékony fotopolimert csepegtetünk, amelyet UV-fény segítségével, közvetlenül a munkasztalra kerülést követően szilárdítunk meg. A binder jetting (BJ) technológia ugyanakkor egy speciális – nyomtatófejen keresztül kiperéselt – kötőanyagot használ a por állagú alapanyag összetapasztásához.⁵⁴ Mind a fotopolimer, mind a kötőanyag jetting eljárások igen pontos additív gyártást tesznek lehetővé, és sima felületet, jó kidolgozottságot, kellően hosszú élettartamot biztosítanak.

Laminált tárgy készítése (LOM⁵⁵) során egy léptetőszerkezet (görgő) végzi az alapanyagként használt lap-, illetve lemezanyagok továbbítását a munkafelületre. Ezt követően lézérfény segítségével történik meg a tárgy adott metszete külső és belső kontúrjának vágása, majd egy felmelegített henger segítségével az összeragasztási folyamat. A platform ezután mélyebbre merül, majd a léptetőszerkezet felviszi a következő réteget.⁵⁶

Tekintettel arra, hogy kutatócsoportunk számára – a Zrínyi-Újvár ostromának kutatása során előkerült, illetve az alkalmazhatóságvizsgálatokhoz felhasznált más forrásokból származó leletek reprodukciójához – egy FDM szálolvasztásos technikát alkalmazó eszközt szereztünk be, a kísérletek megkezdése előtt szükség volt a nyomtatási folyamat és az alapanyagok tulajdonságainak előzetes vizsgálatára. Az FDM működési elvét a 20. kép szemlélteti.

Az ábrából kiderül, hogy meghatározott geometriák esetén szükség lehet támaszték alkalmazására a torzulások elkerülése érdekében. A támaszték készülhet a nyomtatott tárgy alapanyagából, amelyet a folyamat végén el kell távolítani, majd az alátámasztási pontoknál ezáltal keletkezett felületi hibákat eldolgozni (csiszolás). Ez esetben elegendő egyetlen nyomtatófej alkalmazása, ugyanakkor a manuális utómunkálatok hosszabb ideig is eltarthatnak. A másik megoldás, ha két nyomtatófejes vagy dupla extrúderes fejjel rendelkező eszközt használunk, hogy az egyik fűvóka a modellt építi, míg a másik vele szinkronban kialakítja a támasztékot egy vízben (vagy más folyadékban) oldódó anyagból.

⁴⁹ 3D nyomtatás különböző technológiákkal II. – Az SLS-eljárás. <https://3dnyomtato.wordpress.com/2013/08/14/3d-nyomtat-as-kulonbozo-technologiakkal-ii-az-sls-eljaras/> (A letöltés dátuma: 2019. 01. 08.)

⁵⁰ Selective Laser Melting.

⁵¹ Electron Beam Melting.

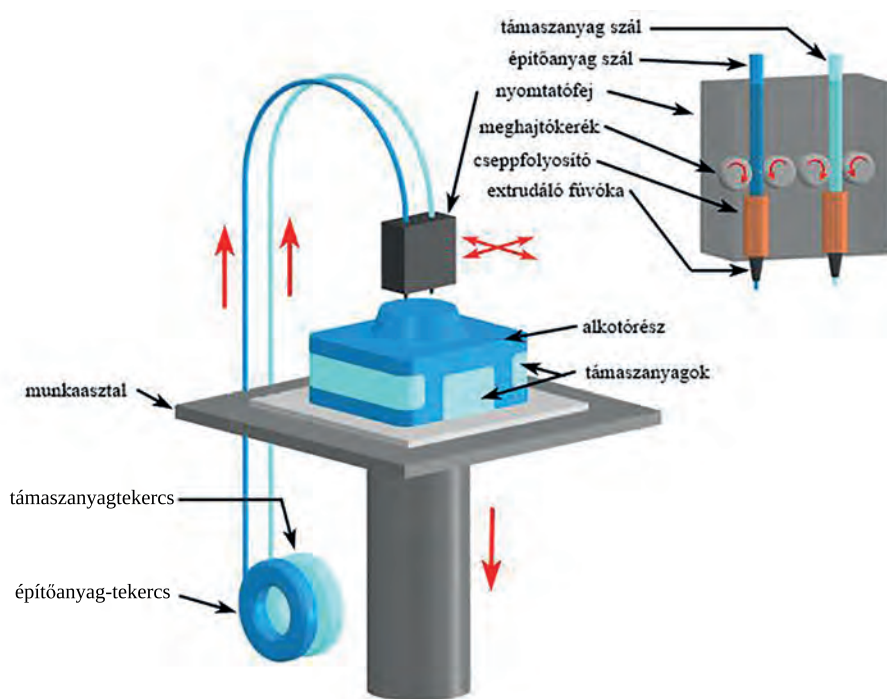
⁵² Palermo 2013b. www.livescience.com/40310-laminated-object-manufacturing.html (A letöltés dátuma: 2019. 01. 08.)

⁵³ Photopolymer Jetting.

⁵⁴ What is 3D Printing? The definitive guide to additive manufacturing. www.3dhubs.com/what-is-3d-printing#-technologies (A letöltés dátuma: 2019. 01. 09.)

⁵⁵ Laminated Object Manufacturing.

⁵⁶ Palermo 2013b.



20. kép

Az FDM-nyomtatók működési elve

Forrás: www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling (A letöltés dátuma: 2019. 01. 10.)

Az FDM-nyomtató által használt hosszú, folytonos szálakat „filamentnek” nevezik (mint a textiliparban), és ma már számos alapanyagból készítik azokat különböző kiegészítésekben. Tulajdonságaik széles palettán mozognak az alkomponenshez kevert adalékanyagok egyre növekvő számának köszönhetően. Gyakorlatilag minden olyan műanyag felhasználható alapanyag céljára, ami hőre megolvad és formázható (termoplasztik). Leggyakrabban ak-rinitril-butadién-sztirol (ABS) és politejsav (PLA) szálát alkalmaznak. Lényegi különbség a két anyag között, hogy amíg az ABS kőolajszármazék, a PLA egy biológiai úton lebomló anyag, amelyet növényekből állítanak elő, tehát komposztálható. ABS-szel történő 3D nyomtatás esetén a nyomtató munkalapját célszerű 110 Celsius-fok körüli hőmérsékletre fűteni, ez az anyag ugyanis nagyon érzékeny a hőváltozásra, amelynek következtében hideg felületre nyomtatva már az első réteg is deformálódhat,⁵⁷ ami lehetetlenné teszi a gyártmány kivitelezését. A hőérzékenységi miatt a nyomtatóteret is érdemes a környezeti levegőtől elszigetelni annak érdekében, hogy a nyomtatás teljes folyamata során minimalizáljuk a légmozgások által okozott hőingadozás mértékét. A PLA ugyanakkor egy sokkal rugalmasabban kezelhető, kevésbé érzékeny anyag, ahol a munkaasztal nem igényel felmelegített környezetet. ABS-t elsősorban olyan tárgyak előállításához használják, amelyeket

⁵⁷ 3D nyomtatás különböző technológiákkal I. – az FDM-eljárás.

mindennapos használatra terveznek, mint például gépjárművek egyes alkatrészei vagy műanyag játékok (például legó). Az autóiparban olyan nagy cégek alkalmazzák már a műanyag szálolvasztásos eljárást, mint a BMW, Hyundai vagy a Lamborghini, de más profilú nagyvállalatok is (például Nestlé) előszeretettel alkalmazzák termékeik tervezése során, vagy közvetlenül a gyártásban.⁵⁸ A PLA ezzel szemben kisebb igénybevételű eszközök, prototípusok gyártására alkalmas.

Az FDM-technológia előnyei között célszerű kiemelni a sebességet, hiszen alapanyagtól, mérettől és a kitöltés geometriájától függően a modell viszonylag gyorsan, néhány óra vagy néhány tíz óra alatt elkészíthető, míg bonyolultabb technikák alkalmazása során, azonos méretek esetén a teljes munkafolyamat napokat is igénybe vehet. Másik kedvező tulajdonság a nagyobb tárgyak elkészítésének lehetősége, hiszen a nem ipari méretű eszközök esetében akár 50–60 cm oldalhosszúságú gyártmányok is készíthetők, míg a szinterezés vagy jettingalapú eljárásoknál ugyanez a mérettartomány jellemzően 10–20 cm-re korlátozódik. A FDM-eljárást alkalmazó nyomtatók ára és üzemeltetési költsége, valamint a felhasznált alapanyagok fajlagos bekerülési költsége is lényegesen alacsonyabb a többi eszközhöz képest, ugyanakkor a felhasználható anyagok tekintetében lényegesen korlátozottabbak a lehetőségeink.⁵⁹ Ennek ellenére a korábban említetteken felül ma már elérhetők műanyagalapú, 1,75 és 2,85–3 mm-es átmérőjű olyan nyomtatószálak, amelyek régészeti felhasználása is célszerű lehet.

A széles színválasztékban elérhető filamentek mellett mára már akár fa-, fém-, sőt kőhatású anyagokkal is dolgozhatunk, miközben a 3D nyomtatott tárgyak utókezelése további lehetőségeket rejt magában (például forgácsolás, polírozás, esztergálás, marás, fúrás, dörzsárazás, fűrészelés,⁶⁰ bevonatolás, festés, hőkezelés, áztatás, csiszolás, vegyszeres kezelés⁶¹).

A műszaki filamentek típusába olyan speciális tulajdonságú keverékek tartoznak, amelyek a többek között a PLA- és ABS-anyagok jellemző alaptulajdonságai közül egyet vagy akár többet is megváltoztatnak, javítanak. Ilyenek lehetnek például a hőálló, ütésálló, rugalmas, csiszolható vagy a vezető/árnyékoló⁶² tulajdonságú nyomtatószálak.

A HIPS⁶³ keménysége és hőállósága miatt széles körben alkalmazott polimer. Ezek mellett a kedvező tulajdonságok mellett ABS-filamentek támaszanyagaként is fel lehet használni, mivel a HIPS a limonén nevű szerves vegyületben oldódik.

A gipsztartalmú filament terepasztalok, illetve agyagtartalmú tárgyak, kerámiák reprodukálására használható. Megmunkálásuk a gipszhez hasonlóan könnyű, így a végtermék csiszolható, formálható, és az elkészült modell akár vízfestékkel színezhető.

A hőálló anyagok a PLA-nál magasabb olvadásponttal rendelkeznek, így akár közvetlen hőhatásnak kitett tárgyakat is lehet a felhasználásukkal készíteni. Jellemzően ezeknek magasabb az ütés- és törésállósága is, így a komolyabb igénybevételnek kitett tárgyakat, eszközöket, bemutatódarabokat is célszerű ilyen anyagból készíteni.

⁵⁸ Palermo 2013a. www.livescience.com/39810-fused-deposition-modeling.html (A letöltés dátuma: 2019. 01. 12.)

⁵⁹ www.cs.cmu.edu/~rapidproto/students.98/susans/project2/pros.html (A letöltés dátuma: 2019. 01. 12.)

⁶⁰ Ezek alkalmazhatósága nagyban függ az anyagtípustól, valamint a nyomtatás kitöltési geometriájától, hiszen ezek függvényében deformálódhat a gyártmány például a befogás vagy más erőkifejtés hatására.

⁶¹ Például az acetongőzben való pihentetés ABS esetén egyenletesen sima és fényes felületet eredményez.

⁶² A jellemzően antistatikus vagy árnyékoló hatású anyagok elektronikai áramkörök burkolására, elválasztására használhatók.

⁶³ High Impact Polystyrene.

A rugalmas filamentből például régészeti leletekhez illeszkedő támasztékok, fedő- vagy tartószerkezetek alakíthatók ki. Az antisztatikus, vezető tulajdonságú anyagok a régészeti munka során használt műszerek (például fémkeresők) vagy azokkal közvetlenül érintkező eszközök burkolatának kialakítására használhatók. A kevlár- és üvegszál erősítésű anyagok előnye a magas hő-, illetve kopásállóság, míg az olaj- és vegyszerálló anyagok a régészeti leletek tárolására használt szerkezetek, edények, illetve azokba elhelyezett támasztékok nyomtatására használhatók.

Szállúzásos technika esetén, alapanyagtól függően, de jellemzően a 45 fokos dőlés-szögnél nagyobb áthidalásoknál vagy alátámasztással nem rendelkező („levegőben lógó”) tárgyrészeknél szükséges lehet úgynevezett „support”-ot (támasztékot) építeni. Ezek a támaszok utólag eltávolíthatók (törés, vágás) a modelltől, azonban ezzel a vékony, néhány szálnyi vastag falazatokat és a részletgazdag tárgyakat deformálhatjuk, azokban kárt tehetünk, ha az ugyanolyan szilárdságú támasztornyokat megpróbáljuk letörni róluk. Ezeket a roncsolódásokat a vízben oldódó filamentből készült támasztékok alkalmazásával tudjuk elkerülni. Speciális összetételű szálak használata esetén a nyomtatás előkészítése, illetve a nyomtató beállítása is eltérhet a hagyományos PLA/ABS nyomtatáshoz képest. Helyesen kell beállítani az extrúder hőfokát,⁶⁴ a nyomtatás optimális sebességét, a visszahúzás mértékét,⁶⁵ a rugalmas és a magas kopás-/ütésállóságú anyagok esetében a filament továbbítására használt mechanikus elemek (görgők) konfigurációját⁶⁶ (anyagelakadás elkerülése érdekében), valamint figyelemmel kell lenni a hőtágulás hatásának kezelésére. A nagyobb keménységű keverékek (például fémpor, kevlár, üvegszál) használat közben önmagukban is, de a megolvasztásukhoz szükséges magasabb hőmérséklet miatt is az extrúder korai elkopásához vezetnek.

Kutatóműhelyünk részére a két független fejjel rendelkező, magyar fejlesztésű Craftbot3 3D nyomtatót⁶⁷ szereztük be, amely 50–300 mikron/réteg felbontásával a részletgazdag régészeti leletek reprodukálására, illetve sérült leletek kiegészítésére is felhasználható. A nyomtató fűtött tálcával rendelkezik, így a hőmérséklet-változásra érzékenyebb anyagok esetén az alsó rétegek felhajlásának és hibás gyártmány előállításának valószínűsége csökken. A két fej tetszőlegesen felhasználható két tárgy egyidejű nyomtatására, szinkronban vagy tükrözéssel, illetve támasztékok oldható filamenttel történő egyidejű nyomtatására vagy két különböző színű és/vagy alapanyagú szál egy tárgyon belüli használatára, így nagyobb szabadságot adva a felhasználók kezébe.

⁶⁴ 3D Printing Filament Comparison. <https://static1.squarespace.com/static/57bafefc15d5dbf599092bd6/t/58a5f3e03e00be425d9b11df/1487270891027/ThreeDotZero+Filament+Comparison.pdf> (A letöltés dátuma: 2019. 01. 13.)

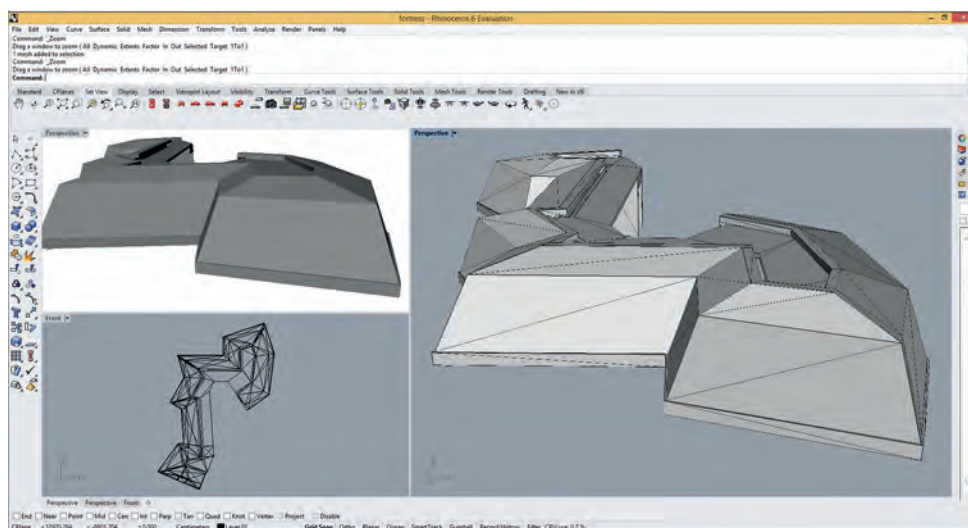
⁶⁵ Ha a munkaasztalon egyszerre több helyen nyomtatunk össze nem függő struktúrákat, a fej munkaterület-váltásai közben szükség lehet a szál kismértékű visszahúzására a megfolyás elkerülése érdekében.

⁶⁶ Például a rugalmas filamentek kicsúszva a behúzó görgők közül feltekeredhetnek azok tengelyére, ezáltal megakasztva a szerkezetet, és/vagy hibás nyomtatáshoz vezethetnek, illetve extrém esetben akár a nyomtatóban is kárt tehetnek.

⁶⁷ <https://craftbot.com/category/craftbot-3-3d-printer> (A letöltés dátuma: 2019. 01. 13.)

3D modellek készítése, szerkesztése

A 3D modelleken végzett módosítások és kiegészítések kivitelezésére több alternatív szoftveres megoldás is létezik. Ezek alaptulajdonságaik, illetve fő funkcióik tekintetében általában megegyeznek, és a fejlesztők bizonyos domináns felhasználási területre fókuszálva ezekhez további képességeket is társítanak (például számítógépes animációk készítése, mérnöki munkák elvégzésének lehetősége, autógyártás, orvosi felhasználás). A gyakorlatban különböző szakemberek elsősorban szakmai tudásuk, előzetes tapasztalataik alapján – és nem a szoftverek valós képessége, potenciálja – szerint választanak eszközt egy adott feladathoz.



21. kép

Zrínyi-Újvár modelljének különböző nézetek a Rhino-szoftverben

Forrás: a szerzők saját szerkesztése

A különböző modellező, CAD-⁶⁸ és animációs szoftverek eltérő kezelőfelülettel és funkciókkal rendelkezhetnek, így a programok közötti váltás esetenként nehezítheti, de egyszerűsítheti is a felhasználó munkáját előzetes ismeretei, illetve gyakorlata függvényében. Kutatócsoportunk munkájának támogatása céljából a Rhino(ceros)⁶⁹ professzionális 3D tervezőszoftvert választotta, tekintettel arra, hogy a régészeti modellezési, leltrekonstrukciós feladatok hatékony elvégzését egyaránt nagyban segíti szabadformás tervezési szemléletével és megoldásaival, miközben a parametrikus tervezéshez és műszaki modellezéshez szükséges eszközrendszer számos elemét is integráltan tartalmazza, illetve alkalmas komplex látványtervek kialakítására is. A szoftver többek között képes megnyitni, illetve szerkeszteni a 3D modellezés, illetve szkennelés területén használatos főbb fájl típusokat, miközben különböző nézetek és számítások segítik a modellek elemzését és feldolgozását.

⁶⁸ Computer-aided Design.

⁶⁹ www.rhino3d.com (A letöltés dátuma: 2019. 01. 16.)

Képes a nagyszámú elemet tartalmazó pontfelhők, 3D szkennelési eredmények, LIDAR-adatok beolvasására, szerkesztésére és utólagos feldolgozására egyaránt. A 3D modellek alapján *reverse engineering*⁷⁰ eszköztára segítségével lehetőséget biztosít optimalizált, szerkeszthető, illetve különböző technológiákkal legyártható modellek előállítására is. A 21. képen Zrínyi-Újvár később ismertetett módszerrel létrehozott modelljét láthatjuk a Rhino-programba történő beolvasást és megjelenítést követően a szoftver felhasználói környezetében.

Zrínyi-Újvár 3D modelljének grafikai tervezése és kivitelezése

A számítógép segítségével három dimenzióban létrehozott vizuális környezet kialakítása az úgynevezett CGI-grafika⁷¹ alkalmazásán alapszik, amivel korábban csak filmvászonon, majd reklámfilmekben, televíziós műsorokban találkozhattunk, a terület húzóágazata ugyanakkor mégis a videójátékok fejlesztése lett. A századfordulót követően azonban olyan mértékben növekedett a személyi számítógépek számítási teljesítménye (Intel Pentium III,⁷² AMD Athlon⁷³ és Athlon 64⁷⁴), hogy az azok segítségével létrehozott kezdetleges 3D grafikai elemek megjelenítése már időben és árban is elérhetővé vált. Később a videokártya- és operációs rendszereket gyártó multinacionális vállalatok összefogásának köszönhetően már sokkal komplexebb ábrázolások részletgazdag vizuális megjelenítésére (pixel shader,⁷⁵ vertex shader,⁷⁶ DirectX⁷⁷) is alkalmassá vált egy-egy egyszerűbb, otthoni használatra vásárolt számítógép.

A hardvergyártóknak és a rendszertervezőknek köszönhetően a 3D grafika felhasználása gyorsan terjedt, ezért önálló fejlesztőplatformokat hoztak létre grafikai szoftverek fejlesztése céljából. A videójáték-fejlesztők is ebbe az irányba mozdultak el, aminek köszönhetően számos, különböző funkcióval rendelkező, úgynevezett szoftveres 3D motort⁷⁸ alakítottak ki. Ma már tervezők, grafikusok, sőt régészek és hadszíntérkutatók is használják azokat munkájuk során alkotásaik létrehozására vagy leleteik vizualizálására.

A 3D grafika területén ma már széles körben hozzáférhető vívmányokat felhasználva kutatócsoportunk arra vállalkozott, hogy megtervezi és létrehozza – elmúlt évtizedes kutatómunkánk eredményeként rendelkezésre álló információk alapján – Zrínyi-Újvár lehető legpontosabb 3D modelljét és közvetlen környezetének látványtervét, amely interaktív módon akár be is járható. A fő cél, hogy élményszerű platformot biztosítson eddigi és jövő-

⁷⁰ Vizsszamodellezés.

⁷¹ Computer-generated Imagery – számítógépen létrehozott kép.

⁷² Az Intel cég 32 bites, x86-os mikroarchitektúrára épülő 6. generációs processzora (1999).

⁷³ Az AMD cég 32 bites, x86-os mikroarchitektúrára épülő 7. generációs processzora (1999).

⁷⁴ Az AMD cég 64 bites, AMD64 mikroarchitektúrára épülő 8. generációs processzora (2003).

⁷⁵ 2D technológia, az egyes pixelek utólagos feldolgozását teszi lehetővé.

⁷⁶ 3D technológia, a kirajzolt vásznon megjelenő egyes szögpontok utólagos feldolgozását teszi lehetővé.

⁷⁷ A Microsoft cég egyik csomagja a Windows operációs rendszerhez, multimédiás alkalmazások gyorsabb kirajzolását teszi lehetővé.

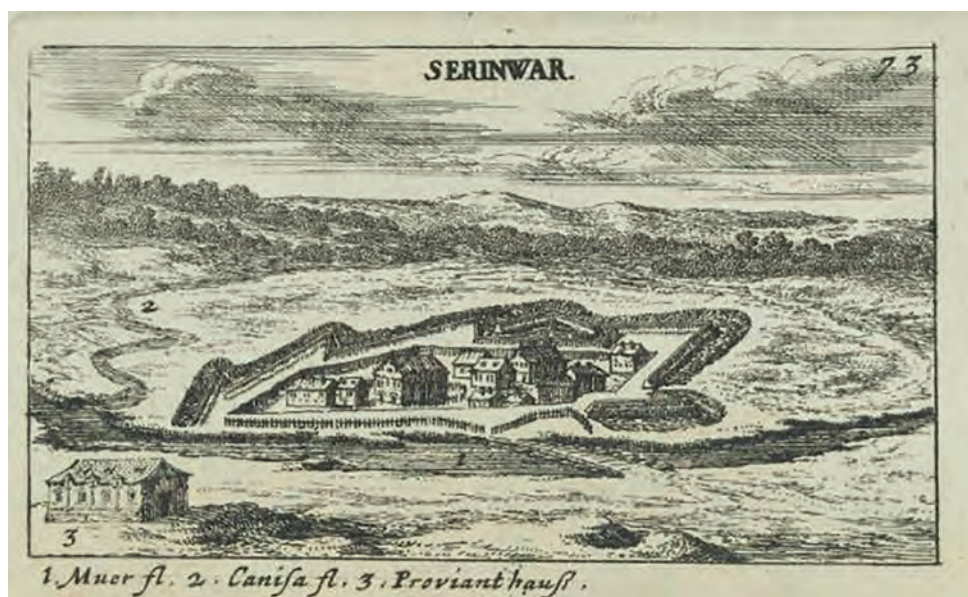
⁷⁸ 3D motor vagy angolul "3D engine" egy integrált szoftverfejlesztő környezet, amelyet grafikus alkalmazások fejlesztésére hoztak létre. Minden 3D motor rendelkezik a 2D/3D elemek kirajzolásának, objektumok ütközésetekeltálásának, a fizikai tér szimulálásának és a modellek animálásának képességével.

beni kutatási eredményeink megjelenítésére, hiszen a modell a később felbukkanó, tudományosan igazolható adatok és információk alapján bármikor tetszőlegesen módosítható.

Egy 3D grafikai alapokon nyugvó hiteles történelmi látkép komplett vizuális megvalósításához számos bemeneti paraméter és minél több, akár redundáns információ, történelmi jegyzet, paraméter, leírás és mérési eredmény szükséges, ami kutatóink korábbi munkájának eredményeként szerencsére rendelkezésre is állt már a projekt megkezdésének pillanatában.

Zrínyi-Újvár a Mura folyó mentén, a mai Somogy megyei Örtilos külterületén állott erődítmény volt, melyet Zrínyi Miklós⁷⁹ hadvezér építtetett németalföldi hadmérnökökkel azzal a céllal, hogy a környezeti és terepviszonyokat hatékonyan kihasználva megerősítse a Muraköz, illetve birtokai védelmét. Az így létrejött hídfőállás szolgálhatott volna Kanizsa várának és a törökök által megszállt területek visszafoglalásának kiindulópontjaként.

Pierre Surirey de Saint-Remy, francia tábornok, *Mémoires d'artillerie* (1697) című művében írja le, hogyan is néztek ki akkoriban a mozsárütegek és az ágyúállások, de ezek alaprajzai is megtalálhatók az említett írásban.⁸⁰ A mű vázlataiban távlatból ugyan, de megjelenik Zrínyi-Újvár ábrázolása (22. kép) is, amely ebben a formában, ha nem is jelent konkrét információt, de segítséget nyújt a látkép kialakítása folyamatának megkezdéséhez.



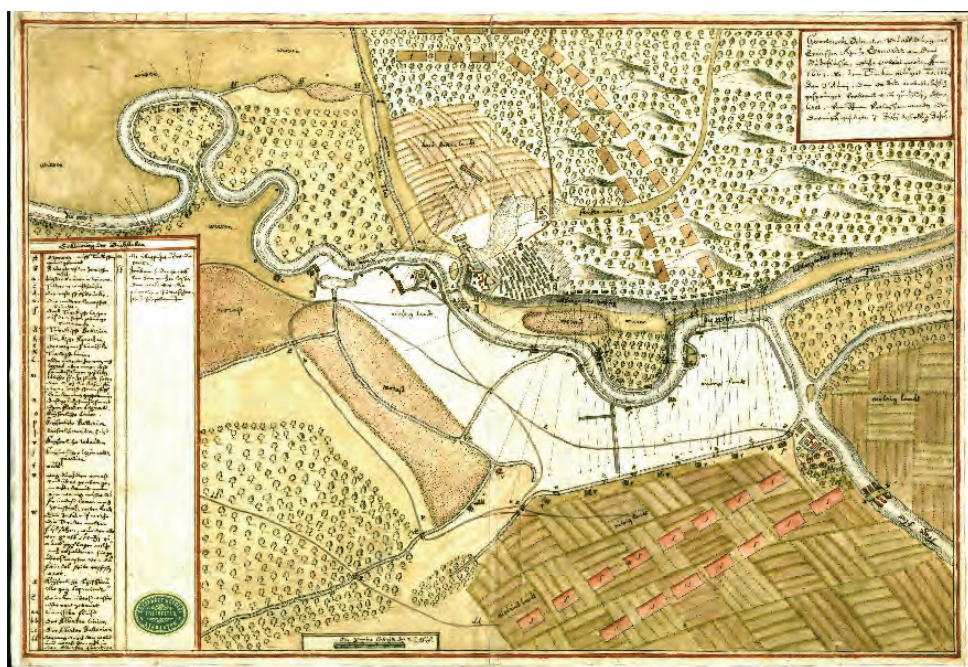
22. kép

Panorámakép Zrínyi-Újvárról

Forrás: Birken 1684.

⁷⁹ Zrínyi Miklós (horvátul: Nikola Zrinski) a XVII. században élő költő, hadtudós, hadvezér és politikus. Horvát bán, Zala és Somogy vármegyék örökös főispánja, nagybirtokos főnemes.

⁸⁰ *Saint-Remy* 1697.



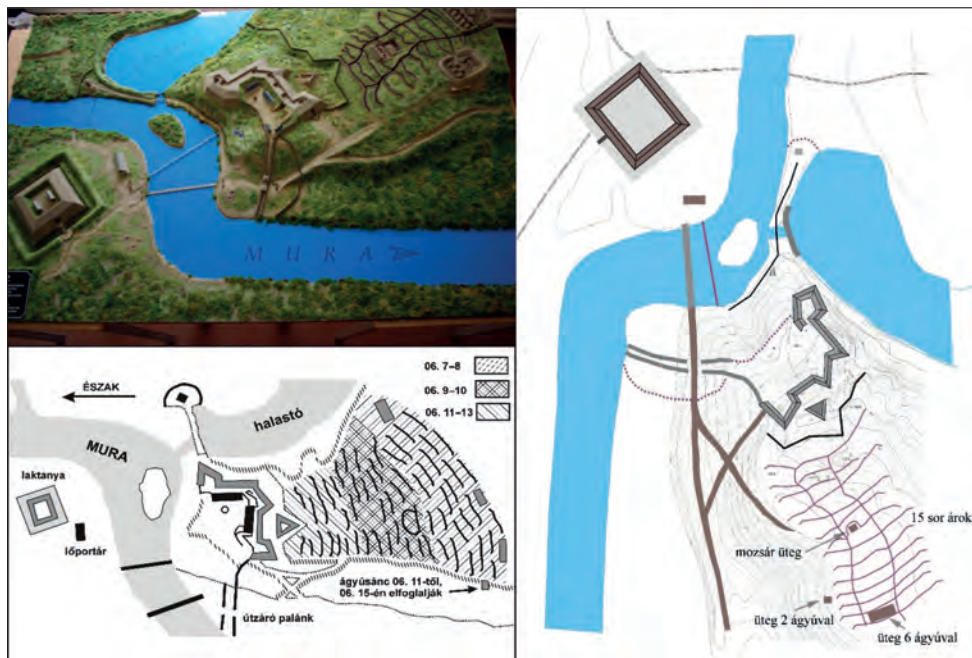
23. kép

Az Esterházy Pál-féle térkép 1664-ből

Forrás: MNL OL T. 2. XXXII. téka, 1064

Habár a történelmi jegyzetek és leírások sok hasznos információval szolgálnak, a pontos térbeli pozicionáláshoz térkép használata is szükséges. A tájolás megtervezése során előzetesen a 23. képen látható korabeli térképet használtuk, amelyen jól látszik a vár és környezetének helyzete és a közeli tó, valamint a Mura folyó partja is jól körülhatárolható. Kivehető a folyón átívelő hidak helyzete, az épületek pozíciója, illetve – habár elnagyolva, de – a török ostromárok viszonylagos helyzete is leolvasható.

A tervezés során talán a legnagyobb segítséget Zrínyi-Újvárnak és környékének 1664. június 14-i helyzetét bemutató, 2010-ben elkészített makettje nyújtotta, amely rögzíti az addig végzett kutatások eredményei alapján feltételezhető állapotokat, így kiindulási alapnak választása jó megoldásnak bizonyult. Ennek egy részlete (balra fent), grafikai terve (jobbra), valamint az ezek alapjául szolgáló Jacob von Holst korabeli térképe alapján készült vázlat (balra lent) a 24. képen látható.



24. kép

*Zrínyi-Újvár makettje, grafikai terve és Holst térképe alapján készült vázlata*⁸¹

Forrás: a szerzők saját szerkesztése

A 3D látványkép kialakításához felhasznált szoftverek kiválasztása a területen korábban szerzett szakmai tapasztalat és jártasság, valamint a felhasználási lehetőségek és korlátozások figyelembevételével történt. A Blender Foundation 3D grafikai modellező platformja egy nyílt forráskódú (GNU GPL v3⁸²) program, ezért széles körben használják 2D-3D grafikusok, modellezők és mérnökök egyaránt. A modellek elkészítésén túl lehetőséget biztosít animálási és szimulációs műveletek végzésére, illetve renderelésre.⁸³ Zrínyi-Újvár egyes 3D elemeinek modellezése során elsősorban a Blender 2.76-os verzióját használtuk fel, amelynek legfőbb előnye, hogy számos 3D motorral, köztük az általunk használt Unity 3D-vel is kompatibilis, és az elkészített modellt változatos formátumokba képes exportálni. Egyszerű modellezési folyamatot biztosít, amelynek leírásához a szoftver honlapján külön

⁸¹ A várrekonstrukciót a korabeli vázlatok és a helyszíni kutatások eredményei alapján a ZMNE Bolyai Makett Klub tagjai, Hajba László, Kovács Imre, May Károly, Nagy Ádám, Péntes Tamás, Réti József, Somogyi Balázs, Szabó Zoltán, Varjasi András készítették. A szükséges kutatásokat a ZMNE és a HM HIM közös munkacsoportja, Bartha Tibor, Hausner Gábor, Kállai Attila, Négyesi Lajos, Németh András, Németh József, Padányi József, Papp Ferenc az egyetem hallgatóinak segítségével végezték, Belezna és Örtöls községek támogatásával. Méretarány: 1/400. A makett átadásának időpontja: 2010. április 23.

⁸² GNU General Public License Version 3. <https://download.blender.org/release/GPL3-license.txt> (A letöltés dátuma: 2018. 10. 13.)

⁸³ Számítógépes grafikai szakkifejezés, amely az elkészült 3D modellek képernyőre történő kirajzolását jelenti.

útmutató is található számos hasznos oktatóanyaggal⁸⁴ együtt. A textúrázáshoz nagy segítséget jelentett a Krita⁸⁵ elnevezésű rajzprogram. Megjelenésében és funkcionalitásában egyaránt nagyon hasonlít az Adobe Photoshop professzionális programhoz, ugyanakkor ez is nyílt forráskódú, és minden korlátozás nélkül bárki számára felhasználható. A különböző textúratípusok generálásához a Materialize⁸⁶ elnevezésű szoftvert használtuk, amelynek segítségével komplex és precízen számított bittérképeket lehet létrehozni. A projekt technikai megvalósításának legfontosabb eleme a Unity 3D⁸⁷ grafikus motor volt, amely a piacon elérhető 2D/3D grafikus motorok között vezető szoftvernek számít az amatőr jellegű felhasználások területén, ugyanakkor megfelelő szakértelem birtokában a zrínyi-újvárihoz hasonló projektek kivitelezése során is hasznos lehet. A Microsoft cég szoftverfejlesztő környezete, a Visual Studio⁸⁸ számtalan programozási nyelvet támogat, értelmez és fordít gépi kódra. A Unity 3D-ben az egyes kódbetétek írásakor a Visual Studio Community 2015-ös verzióját használtuk fel.

A tervezés információszerzési szakaszának lezárása után a következő lépés a földfelszín pontos megtervezése és létrehozása volt. Ennek folyamata igen összetett és bonyolult, az eljárás többszörös leképezéseken alapul. Zrínyi-Újvár környezetében a földfelszín alapját egy, a közelmúltban készült LIDAR-felvétel⁸⁹ adta. A lézeres felvételtől generált 3D objektumok azonban első próbálkozásra nem bizonyultak felhasználhatónak látványterv készítésére. A levegőből végzett szkennelések eredményeiből generált felszín 12 részletben állt rendelkezésre OBJ-formátumban,⁹⁰ amelyeket először egyesíteni kellett a Blenderben (25. kép). Ehhez elegendő volt létrehozni egy üres jelenetet, amelybe egyesével importálva a szeleteket, azok automatikusan egymás mellé kerültek, mivel az egyes darabok szögpontjainak koordinátái már eleve jól voltak pozicionálva az origóhoz képest. Ahhoz, hogy a részek egységes felszín alkossanak, utólagos logikai egyesítést kellett végezni.

A heightmap⁹¹ generálása már nem bizonyult ilyen egyszerű feladatnak, mivel az egyesítést követően kiderült, hogy a modell 453 960 szögpontot tartalmaz, amelyek többsége egymást metsző síkokat alkot, ezért ezt a számítógép képtelen jól megjeleníteni. A legfőbb problémát a jelenlegi videokártyák kapacitásának szűk keresztmetszete jelenti, mivel még a legerősebb „high-end” videokártyák is egy jelenetben egyszerre legfeljebb 1 millió szögpontot tudnak kirajzolni. Az így keletkezett akadály leküzdése érdekében szükségszerűvé vált az egyesített felszín optimalizálása.

⁸⁴ www.blender.org/support/tutorials/ (A letöltés dátuma: 2018. 10. 13.)

⁸⁵ <https://krita.org/en/> (A letöltés dátuma: 2018. 10. 13.)

⁸⁶ <http://boundingboxsoftware.com/materialize/index.php> (A letöltés dátuma: 2018. 10. 13.)

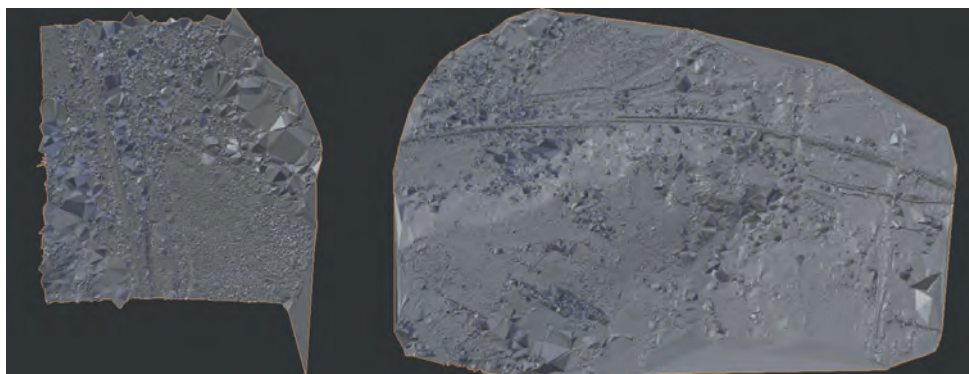
⁸⁷ <https://unity3d.com/> (A letöltés dátuma: 2018. 10. 13.)

⁸⁸ <https://visualstudio.microsoft.com/> (A letöltés dátuma: 2018. 10. 13.)

⁸⁹ Light Detection and Ranging – lézeralapú távérzékelés.

⁹⁰ Wavefront Object (egyszerű és széles körben elterjedt 3D modellformátum, az egyes szögpontok koordinátapontjait és azok kapcsolatát tartalmazza szövegesen).

⁹¹ Egy raszterkép, amelynek minden egyes képpontja magassági adatnak felel meg. A fehér pontok magas értékeknek, a fekete pontok alacsony értékeknek felelnek meg.



25. kép

LIDAR-felvétel egy darabja és a teljes felszín modellje egyesítés után

Forrás: a szerzők saját szerkesztése

Az optimalizáláshoz az egyes szögpontoknak a vertikális alapsíkkal párhuzamos magasságértékét kellett alapul venni és azt leképezni egy 2D-s mátrixra, amely esetünkben egy tradicionális képfájl volt. Ezt az tette lehetővé, hogy egy színes képpont megjelenítéséhez általánosan 3+1 csatornára van szükség (RGB-⁹² és alfa⁹³ csatornák), amelyeket felhasználva 32 bites színmélységnél 256,⁴ vagyis 4 294 967 296 különböző lehetséges magasságértéket kapunk. Az ezzel az eljárással készített magasságtérkép a 26. képen látható.



26. kép

Az elkészült 2D magasságtérkép

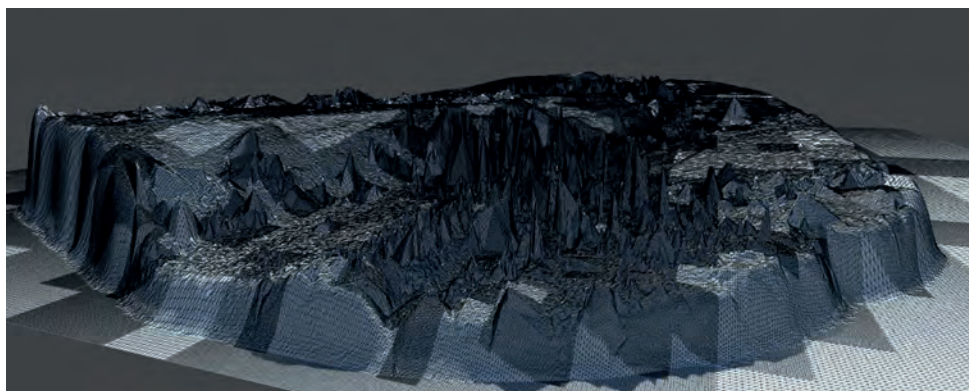
Forrás: a szerzők saját fotója

⁹² RGB – Red Green Blue, ezekből keveri ki a számítógép a megjelenített színeket. Minden egyes színt 8 biten ábrázol, vagyis [0–255] közötti értéket vesz fel. Ezt nevezzük 24 bites színmélységnek.

⁹³ Az alfa csatorna paraméterei az RGB-csatornákéval megegyezők, azaz szintén 8 bites ábrázolást alkalmaz. Ez egy olyan kiegészítő bájttal, amely egy RGB-szín áttetszőségét határozza meg, és ezzel együtt már RGBA-színről beszélünk, ami 32 bites színmélységnek felel meg.

Mivel azonban a lézeres távérzékelés során gyűjtött adathalmazban a tényleges földfelszín mellett minden mesterséges és természetes terepelem is megjelenik, azok a magasságtérképen is megjelentek. Ahhoz, hogy ezek hatását kiküszöböljük, a térképen megjelenő diszkrét „felhőket” újraleképezés előtt meg kellett szüntetni, aminek legegyszerűbb megoldásaként a grafikus szerkesztést választottuk. A Krita szoftverben az egyes különálló felhőket kijelölve újraépítettük azok színét a közvetlen közelben lévő képpontok színének megfelelő értékeket felhasználva. A szoftver ezt automatikusan képes volt elvégezni, csak arra kellett nagyobb figyelmet fordítani, hogy valóban csak olyan fehér területeket jelöljünk ki, amelyek nem részei a földfelszínnek.

A magasságtérkép kijavítását követően a felszín legenerálását kellett elvégezni az „engine”-ben, majd végrehajtani annak kalibrációját, simítását és az egyes domborulatok szintezését, illetve a folyómeder mélyítését. Mivel a Unity 3D motor képes magasságtérképből domborzati felszínt készíteni, elegendő volt annak képességeire hagyatkoznunk. A magasságtérképet RAW⁹⁴ formátumban kiexportálva, majd azt a Unity 3D-be beimportálva létre is jött a felszín domborzata (27. kép).



27. kép

A felszín domborzati viszonyai a generálást követően

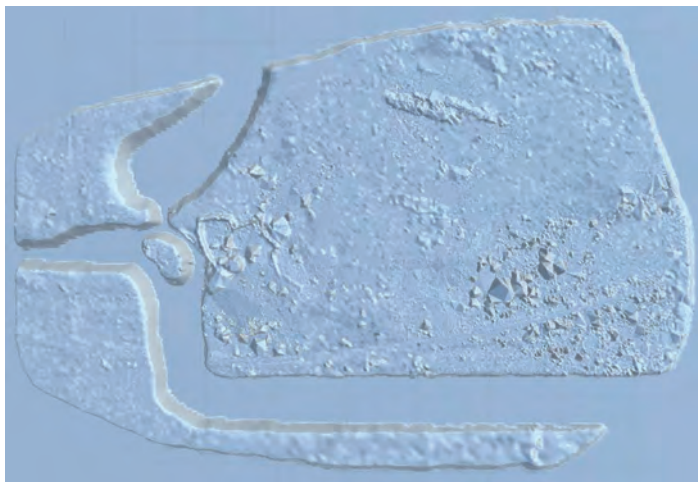
Forrás: a szerzők saját fotója

A Unity 3D a domborzati felületeket speciálisan kezeli, azok technikai vizualizálását optimalizálva hajtja végre. A megjelenítendő szögpontokat és az azokból létrejövő síkokat kiegyensúlyozva állítja be, tehát csak annyi szögpontot hoz létre, amennyi a domborulat bonyolultságának kirajzolásához feltétlenül szükséges, azaz bonyolultabb geometriáknál sűrűbb a rács, az egyszerűeknél ritkább.

A Mura folyó medre az eltelt évszázadok során jelentősen megváltoztatta helyét. Ahhoz, hogy ezt korrigálni lehessen, a 24. képen látható makett grafikáját raszterként ráhelyeztük a kapott felszínre, majd addig végeztünk különböző transzformációkat, amíg közel tökéletes illeszkedést nem találtunk. Ezzel nemcsak a folyó, de a vár mellett lévő tó is az eredetileg feltételezett helyére került. Ezt követően a Unity 3D domborzatmélyítő eszközével a raszter mentén „kiástuk” a medret, azaz az érintett szögpontok vertikális síkkal

⁹⁴ Nyers, kizárólag bitértékeket tartalmazó fájlformátum.

párhuzamos koordinátáit kinulláztuk, aminek köszönhetően azok a horizontális alapsíkra kerültek. Habár a raszter nem minden elemében illeszkedett pontosan a felszínre, a LIDAR-felvételen a hajdani meder felfedezhető nyomait felhasználva kialakítható volt a meder vonalvezetése (28. kép).

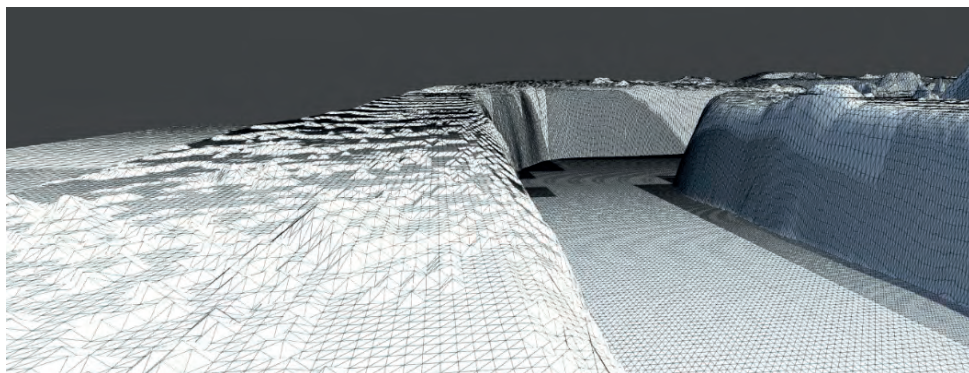


28. kép

Domborzat a kimélyített folyómederrel

Forrás: a szerzők saját fotója

Mivel a generálást követően létrejött felület még mindig tartalmaz olyan nemkívánatos elemeket, amelyeket a LIDAR-felvétel készítésekor a fák és egyéb objektumok okoztak, és a fenti ábrán tüskék formájában jelennek meg, szükségessé vált a modell tisztítása. Ezt a felszín simításával lehet elérni, amihez a Unity 3D direkt erre a célra kialakított domborzsímitó eszközét használtuk. A végeredmény a 29. képen látható.



29. kép

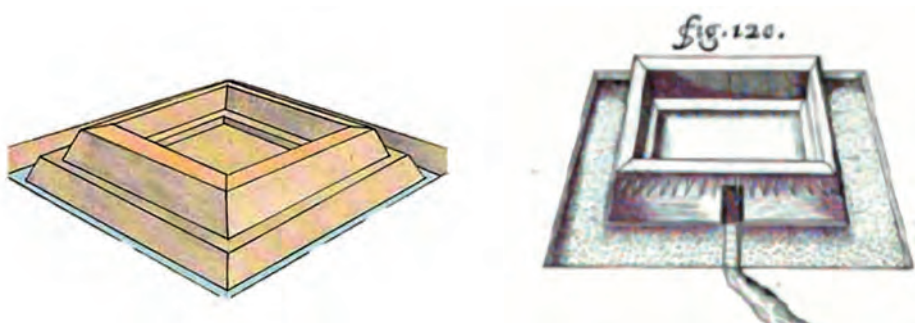
A domborzat a simítást követően

Forrás: a szerzők saját fotója

Objektumok létrehozása

Az optimális felszín kialakítása már lehetőséget teremt a korabeli objektumok, műszaki létesítmények elhelyezésére, ezért a következő lépcsőben a várak, az utak, az ostromárkok és a tüzelőállások létrehozására került sor. Ehhez referenciaként a folyó- és tómeder kialakítása során alkalmazott rasztert használtuk.

A laktanya körüli árok kialakítása során a korábban ismertetett módszert alkalmaztuk. Mivel árokmélységről egyéb információ, hiteles mérési eredmény nem állt rendelkezésre, a 30. képen látható vázlatok arányosságait vettük figyelembe. Az ábrából jól kivehető, hogy akkor járunk el helyesen, ha az árok fenekét a kaszárnya körüli fal magasságával megegyező mélységben alakítjuk ki.

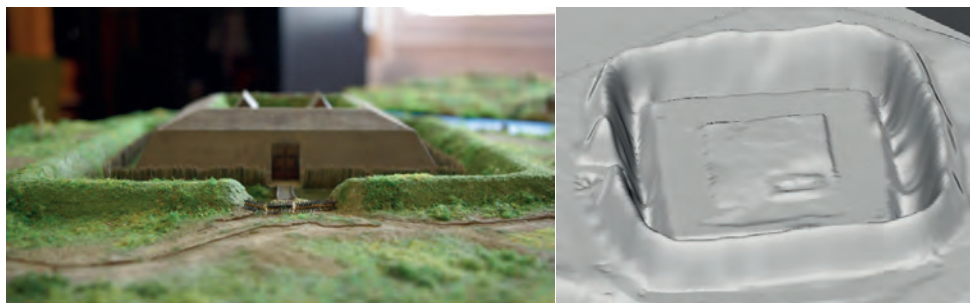


30. kép

A laktanya lehetséges változatai

Forrás: a szerzők saját szerkesztése

Habár a vázlaton nem szerepel, az eredeti objektumot feltételezhetően a valóságban sánc is védhette, ezért az árok köré töltést emeltünk, aminek kialakításakor a maketten látható arányokra hagyatkoztunk. A vázlatokon és a maketten is szerepel egy híd is, amely a laktanya kapujához vezet. A töltés kialakításakor ezt is figyelembe kellett venni, azaz annak helyét szabadon kellett hagyni. A makettet és a kapott végeredményt a modellen a 31. kép szemlélteti.



31. kép

Laktanya épülete a maketten (balra), valamint helye és védelmi rendszere a modellen (jobbra)

Forrás: a szerzők saját fotói

Az utak és a török ostromárok kialakításához szintén a makett szolgált kiindulópontként, amely alapján készült 32. képen megfigyelhető azok elhelyezkedése és orientációja. Ahhoz, hogy ezeket a szabálytalan geometriákat a domborzati modellen is ki lehessen alakítani, az említett képből sablont kellett készíteni és ráhelyezni azt a felszínre. Az utak nyomvonalát nem mélyítettük ki, csak azok felszínét simítottuk ki annak érdekében, hogy az út modellje megfelelően illeszkedjen a felszínre, és ne legyenek a modellen átnyúló domborzati kitüremkedések, buckák.

Az ostromárok kialakítása során azok mélységét egy átlagember magasságához⁹⁵ viszonyítva állapítottuk meg, míg szélességnek egy ember átlagos vállszélességénél⁹⁶ nagyobb értéket használtunk beállításként a domborzatmélyítő eszközön. Ezt követően hajtottuk végre a szükséges mélyítési és simítási műveleteket.



32. kép

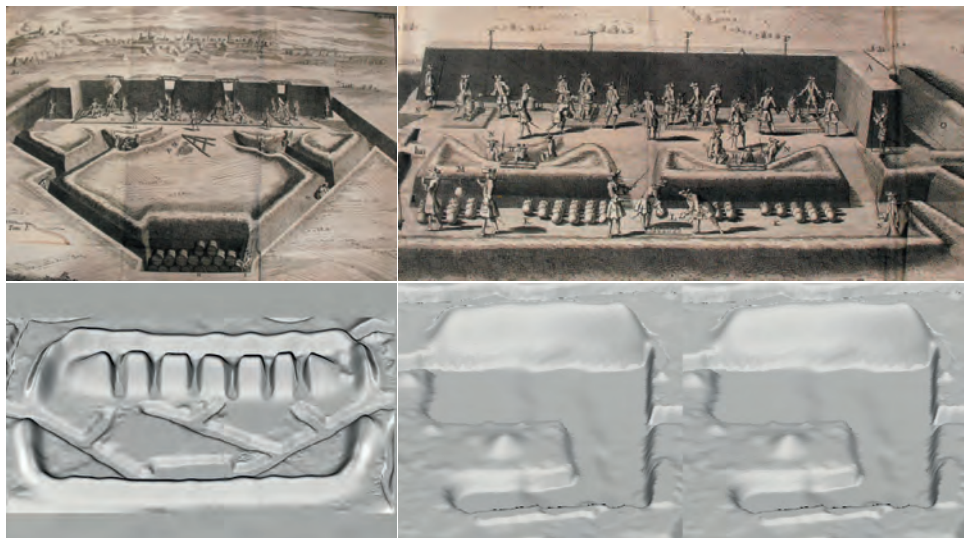
A sablonként használt kép egy szelete

Forrás: a szerzők saját fotója

⁹⁵ www.averageheight.co/average-male-height-by-country (A letöltés dátuma: 2018. 11. 12.)

⁹⁶ http://antropologia.elte.hu/_vllszlessgl.html (A letöltés dátuma: 2018. 11. 12.)

A korábbi sablont használtuk fel a három tüzelőállás helyének meghatározása során is, majd a mélyítési fázist követően, a mozsárüteg kivételével töltést is emeltünk köréjük. Az egyes állások berendezését a makett mellett további vázlatok is segítették, amelyek a 33. képen láthatók modelljeikkel együtt.



33. kép

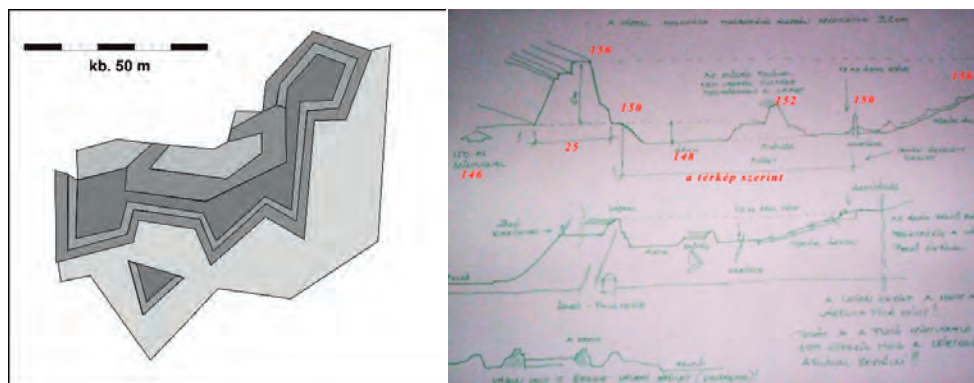
Ágyú- (balra) és mozsárüteg (jobbra) állások és modelljeik

Forrás: Saint-Remy 1697. és a szerzők saját szerkesztése

A felszín kialakítása a fenti objektumok létrehozásával lezárult, így következő lépésként átérhettünk a különböző terepelemek modellezésére, mint maga a vár, a kaszárnya, az ágyúk, az út, a kerítés, az útzáró palánk, az őrtornyok, a hidak és az épületek.

A laktanya modellezésének a 30. kép alapján láttunk hozzá, annak méretét úgy alakítottuk, hogy illeszkedjen az előzetesen létrehozott árokkal határolt területre. A textúrázáshoz sár-föld mintázatot használtunk, azt helyeztük rá a felületre, majd az illesztésénél keletkező réseket utólagos finomításokkal számoltuk fel.

A vár alaprajzának kialakításához, valamint a 2D síkból történő kiemeléshez a 34. képen látható felülnézeti és keresztmetszeti vázlatokat használtuk fel, az elővédet pedig különálló modellként hoztuk létre. Az elővéd kezdetben a vár felőli oldalról nyitott volt, majd az új kutatási eredmények megismerését követően onnan is lezártuk.

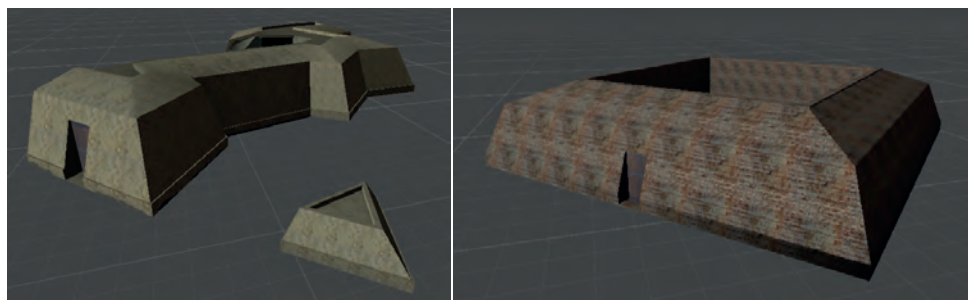


34. kép

A vár alaprajzának és függőleges metszetének vázlata

Forrás: a szerzők saját szerkesztése

A várra és az elővédre helyezett textúra megegyezik a laktanyánál is használttal. Az erődtítmény felszínre történő illesztésekor, a laktanya felhelyezésénél is jelentkező problémák mellett kiderült az is, hogy a domborzat túlságosan lejt a folyó irányába, ezért a vár alapzata és a felszín között keletkezett, a magasságkülönbség miatt kialakuló rést feltöltéssel kellett utólagosan orvosolni. Az elkészült modellek a 35. képen láthatók.



35. kép

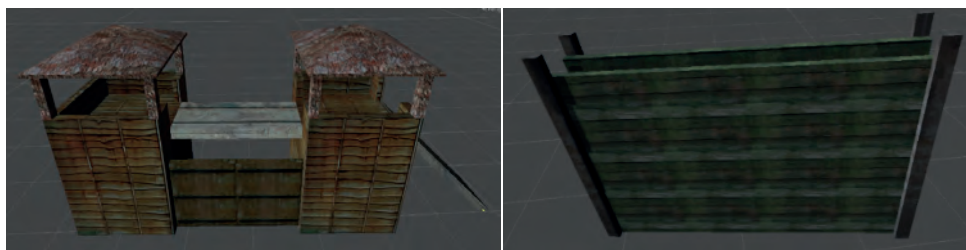
Az erődtítmény (balra) és a laktanya (jobbra) modellje

Forrás: a szerzők saját fotója

A Unity 3D-nek megvan az a képessége, hogy egy vonal mentén utat generáljon. Mivel az utak nyomvonalát előzetesen már elkészítettük a felszínen, azok megrajzolása nem igényelt hosszabb időráfordítást. A szoftver létrehozta ugyan az egyes utakat, viszont azok összeillesztése már körülményesebb munka volt. Azon utak esetében, amelyek metszik egymást, annak érdekében, hogy a későbbiekben szépen kirajzolhatók legyenek, az egyiket szemmel nem látható módon, de magasabbra kellett pozicionálni a másiknál, mintha az egyik út fedné a másikat. Erre azért volt szükség, hogy elkerüljük azt a 3D modellezési hibát, ami a LIDAR-felvételek esetén is problémát okozott, miszerint a videokártyák képtelenek helyesen megjeleníteni azonos helyen és helyzetben lévő síkokat. Meg lehetett volna

oldani a problémát precízebben is, ugyanakkor ehhez újabb szögpontokat kellett volna létrehozni a modellen a metszés vonalában, majd a szögpontok mentén logikai vágást kellett volna alkalmazni. Ez körülményes lett volna, legfőképpen azért, mert a használt 3D motor nem támogatja az ilyen műveleteket, ezért az út modelljét ki kellett volna exportálni, majd módosítani Blenderben, végül visszaimportálni. Ennek a megoldásnak a másik hátránya lenne, hogy a későbbiekben nehezen tudnánk szükség esetén módosítani.

Az útzáró palánk és az őrtornyok tervezésekor a maketten látható objektumokat modelleztük le, mivel más információ nem állt rendelkezésünkre. A kivitelezés során elegendő volt egyetlen palánkszegmenst lemodellezni, majd a raszter mentén egymás mellé helyezni annyit, hogy azokból összefüggő műszaki zár keletkezzen. Az őrtorony geometriailag igen egyszerű, téglalap alapú hasáb struktúra, amelyen palló vezet fel az őrhelyre, és ami fölött négy oszlopon egy gúla alakú tető helyezkedik el. A tóhoz közelebbi őrtorony önálló létesítmény, míg az erősség melletti kicsit összetettebb, mivel áteresztőpontként is funkcionál. Ez két őrtoronyból áll, amelyeket egy híd köt össze, és ami alatt egy kapu helyezkedik el. Mindkettő egy-egy téglalapról létrehozható, majd feltextúrázva érik el végleges formájukat.



36. kép

Az áteresztőpont (balra) és egy palánkszegmens (jobbra) modellje

Forrás: a szerzők saját fotója

A maketten négy híd és egy gát is található. A hidakból kettő a Mura folyót, egy a gátat és szintén egy a laktanya körüli árkot íveli át. A Mura folyót átívelő hidakból egy stationer, stabil műszaki struktúra, azaz pilléreken nyugvó átkelőhely, egy pedig csónakok segítségével kialakított ideiglenes pontonhíd. Az állandó híd modellezése a gyakorlatban egy ismétlődő szegmens modellezését jelentette. A szegmens több tartópillérből áll, amelyeket keresztléccel kötöttünk össze. A keresztlécekre sínt fektettünk, amelyekre deszkát „erősítettünk”. A valóságban ez a folyamat különböző méretű téglalapok egymásra helyezését jelentette. A szegmenseket a raszter mentén, a Mura folyón keresztül egymás mellé helyeztük. A pontonhíd esetében a metodika ugyanez volt, a különbség csupán annyi, hogy a tartópilléreket csónakokkal helyettesítettük, amelyeket előre lemodelleztünk. A laktanyaárkot és a gátat átívelő hídnál az elsőnek létrehozott híd modelljének pillérjeit két darab U-profilra cseréltük. A gát esetében a farönkök imitálására hengertesteket használtuk, amelyekre fakéreg textúrát illesztettünk. A rönkökből készült gát és a híd modellje a 37. képen látható.



37. kép

A gát és a mellette lévő híd modellje

Forrás: a szerzők saját fotója

Az épületeket a maketten található objektumok alapján mintáztuk. A három nagyobb épület közül kettőt a várkertben, a lőportárként szolgáló harmadikat pedig a laktanyához közelebb, a Mura túlsópartjára, az út mentén helyeztünk el, míg a két kisebb, egyszintes épület a várból a folyópartra vezető palánsor „tölcsérébe” került. Mivel a maketten, a laktanya udvarán található épületek létezése a kutatások jelenlegi állása szerint nem igazolt, a 3D látképen nem is kaptak helyet. Az építőanyag tekintetében vályogházakról lehetett szó, így a modellekhez tartozó textúrát is ennek megfelelően választottuk ki. A méretezéshez a makett arányait vettük figyelembe.

Az ágyú és a mozsár modellezéséhez a 38. kép bal oldalán látható ábrázolást tekintettük kiindulási alapnak, és mivel pontos méretek nem álltak rendelkezésre, az illusztrációkat sablonként hasznosítottuk, amire a modellező szoftverben vonalasan felrajzoltuk az ágyúk egyes alkatrészeinek sziluettjét. Ezeket kiemeltük a síkból, és különböző szilárdtest-műveletekkel kialakítottuk azok végleges formáját, majd az elemeket összeillesztve megkaptuk a kész modelleket.



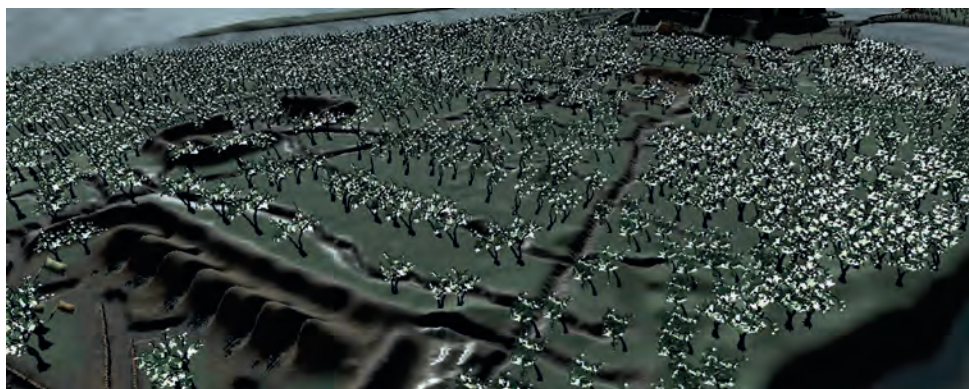
38. kép

Korabeli ágyú ábrázolása (balra), valamint az ágyú (középen) és a mozsár (jobbra) modellje

Forrás: Saint-Remy 1697. és a szerzők saját fotója

A modellek felhelyezését követően már csak a környezeti elemek, azaz a fák, az aljnövényzet, a tó és a folyó hiányoztak a látkép formai megjelenéséből (39. kép). A földfelszín növényzettel való betelepítésére a Unity 3D beépített, földfelszín-módosító funkciója használható. A motor tartalmaz előre létrehozott fatípusokat, amelyeket apróbb módosításokkal egyedire lehet alakítani. Ezek segítségével végül két fenyőfa- és öt lombhullató-módozatot állítottunk elő. A „füvesítés” szintén az előbb említett technikával történt egy átlagos fűmódozat és egy fűcsomótípus létrehozásával. A levélzetet egy ecset segítségével rajzoltuk a felszínre, így végeredményként a megadott helyeken az előre beállított határértékek között véletlen távolságokban fák és gyepek jelent meg. A vár körül vélhetően az erdő ki volt termelve, ezért oda egyedileg modellezett facsonkokat telepítettünk.

A vízfelületet a modellezés során egy egyszerű síkkal helyettesítettük, mivel a vízfelület ábrázolása – hullámzás, tükröződés, fényvisszaverődés – a nagy számítási kapacitásigény miatt jelentősen megterhelné a hardver erőforrásait. A síkot úgy méreteztük, hogy felszíne a meder teljes felületét lefedje, majd ezt követően a partvonal magasságához emeltük. A modellben látható vízeffektusokat a grafikus motorba épített shaderek⁹⁷ segítségével hoztuk létre.



39. kép

A komplett modell formai megjelenése egy perspektívából

Forrás: a szerzők saját fotója

A látvány megjelenítése érdekében fényforrás alkalmazására is szükség volt, mert anélkül csak egy sötét modellt kapnánk. A motor rendelkezik a globális fényforrás, azaz a Nap imitálásának képességével. Ehhez a szintéren úgynevezett irányított (directional) fényforrást helyeztünk el, amelyre a Unity 3D fejlesztői által készített Nap shadert applikáltuk rá. A fényforrás dőlésszöge határozza meg a napsütés erősségét. Jelenleg ez 30 fok, ami reggel 6 órának felel meg. Habár ez tetszőlegesen állítható, a napfelkelte és naplemente alacsony szög alatt beeső fénye emeli ki igazán a vár és az ostromépítmények vonalait.

⁹⁷ Egy 3D grafikai modell pontjait és/vagy textúráját, színét módosító alprogram (algoritmus), amely a kirajzolással egy időben vagy utólagosan módosítja annak kirajzolási mechanizmusát, ezzel befolyásolva a végeredmény megjelenését. Általában komplex hatások vizualizációjára alkalmazzák (víz, árnyék, nap, tűz, füst, köd stb.). Az alprogramot a gépi kódra történő fordítás után általában (nem törvényszerű) közvetlenül a videokártya processzora értelmezi és futtatja le.

Annak érdekében, hogy a kialakított modell, illetve helyszínek bejárhatók legyenek, ki kell alakítani egyfajta „játékmenetet”, amelybe beletartozik a kamera forgatásának képessége is, valamint a mozgás és a kamera terepelemekkel történő ütközésének lehetősége. A térben történő navigáció érdekében szükségünk van egy pontra, amelyet irányításkor mozgatunk. A pont tényleges pozíciója adja meg a kamera koordinátáit is, tehát a kamerát a mozgatott ponthoz kell rendelni. A Unity 3D segítségével beállítható továbbá a kamera fókusztávolsága, látószöge, sőt még a képminősége, valamint olyan utólagos effektek, mint az elmosódás, a makró és a HDR is. A kirajzolt képnek, pontosabban a kamera fókuszpontjának az egérmutató mozgásának megfelelő irányába kell mutatnia alapesetben. Mivel ilyen esetben a fókusztávolság adott, kizárólag a mozgatott pontból a kamera fókuszpontjába mutató vektort kell megállapítani, amely a kiindulási helyzetből és az egér mozgásából egyszerűen kiszámolható. Mivel szeretnénk elkerülni a globális koordináta-rendszerben való mozgást, mert azzal a kamera képe nem feltétlenül tükrözné a mozgás várható irányát, a pont mozgatását egy lokális koordináta-rendszerhez mérten kell kialakítani. Ez azt jelenti, hogy a mozgást nem az X, Y, Z tengelyek mentén vezetjük, hanem mindig a látott képhez képest egy leképezéssel. Azaz a cél, hogy a mozgás ne legyen abszolút, hanem a kamerán látott képhez képest mindig relatív. Ehhez az előbbi fókuszpontba mutató vektort kell használni, ez lesz a lokális X tengely, a rá merőleges normál vektor lesz az Y tengely és a kettő szorzata lesz a Z tengely, így már kiszámolható a mozgatott pontunk abszolút pozíciója is.

A térben minden modellünk csupán pontokkal határolt síkfelületek összessége. A síkokra különböző eljárásokkal – kifeszítéssel, letérképezéssel – textúrát lehet helyezni, amely megadja a modell színét. Ellenben semmi sem korlátozza azt, hogy ezeken a síkokon keresztül lehessen haladni. Annak érdekében, hogy a térben való közlekedés során egy adott modell határán a mozgás megtorpanjon, ütközőzónákat kell kialakítani a modell körül. Ez lehet maga a modell is, viszont a komplexitás megszüntetése érdekében érdemes egy bonyolult modellhez egy viszonylag egyszerű ütközőmodellt hozzárendelni. Mivel esetünkben a legtöbb modell alacsony poligonszámmal rendelkezik, a látképen szereplő modellek többsége egyben ütközőzóna is. Egyedül a látkép határaitra helyeztünk el erre a célra kialakított önálló síkokat, hogy a bejárható térnek korlátot szabjunk.

A többi szoftverhez hasonlóan a Unity 3D is rendelkezik egy beállítófelülettel, amelynek segítségével a játék grafikai komplexitásának, felbontásának, valamint billentyűkiosztásának beállítását lehet elvégezni a látkép indulása előtt.

Virtuálisan bejárható modellünkből számtalan processzorarchitektúrára, eszközre, platformra képesek vagyunk futtatható szoftvert készíteni. Ugyanakkor mivel a programkódot Intel architektúrájú processzorokra optimalizáltuk, a 3D látkép kizárólag ilyen erőforrást alkalmazó asztali számítógépeken, illetve laptopokon futtatható. Kisebb módosításokkal, grafikai kompromisszumok árán azonban lehetővé válik mobil operációs rendszereken, ARM-architektúrán futó verzió létrehozása is. Maga a modell, illetve Zrínyi-Újvár bejárható 3D látképe rugalmasan bővíthető, és részletgazdag élményt kínál a felhasználók számára. A folyamatban lévő régészeti és hadszíntérkutatások további eredményei bármikor integrálhatók, illetve a szoftver segítségével vizsgálhatók a különböző szcenáriók, a „mi lett volna, ha” és a „milyen lenne, ha” kérdések, ami jelentős támogatást nyújthat majd kutatócsoportunk további munkája során.

Összegzés

A régészeti kutatások eredményeit korábban elsősorban írott formában, illetve grafikus vázlatok segítségével rögzítették, amelynek gyakorlata máig él. Később ezek kiegészültek az analóg, celluloidfilm alapú fekete-fehér, majd a színes fotográfia és filmkészítés által kínált lehetőségekkel, amelyek jelentősen bővítették ugyan történeti emlékeink archiválásának eszköztárát, egyszerűsítették a terepi munkák dokumentációs feladatait, azonban eddig nem voltak képesek hitelesen, minden részletre kiterjedően visszaadni a feltárások során előkerülő leletek tulajdonságait. Környezetünkben, a fizikai térben előforduló tárgyak 3 dimenziós kiterjedéssel rendelkeznek, amelyet a 2 dimenziós fotográfia képtelen információvesztés nélkül visszaadni még digitális formában is. Annak érdekében, hogy a valós emberi érzékeléshez minél közelebb hozzuk digitális formában tárolt tárgyi emlékeinket, a vizualizáció során egyetlen térbeli objektumhoz kell rendelni azok minden tulajdonságát.

Ebben a fejezetben a 3D-s technológiai innovációk régészeti felhasználási lehetőségeit, a különböző munkafolyamatok során való alkalmazásának módszereit mutattuk be Zrínyi-Újvár példáján keresztül. Rendszereztuk a 3D modellek készítésének, feldolgozásának és felhasználásának lehetőségeit. Gyakorlati példákon keresztül mutattuk be, hogyan lehet a vizualizáció korszerű eszköztárát összekapcsolni a különböző régészeti és hadszíntérkutatási módszerekkel. Bár a régészeti feltárások térinformatikai (GIS) támogatására napjainkra már minden feltétel adott, azok integrációja csak korlátozottan vagy egyáltalán nem történt meg hazai viszonylatban. Az egyes régészeti leletek vizuális archiválása egészen az utóbbi évekig csak a róluk készült digitális fotók elkészítésére korlátozódott.

Kutatásaink során megvizsgáltuk egyrészt a leletrögzítés korszerű módszereit, valamint az eredmények minél látványosabb reprezentálásának lehetőségeként a virtuális valóság (VR), a kiterjesztett valóság (AR) és a kevert valóság (MR), valamint az additív gyártástechnológia eszközrendszerét. A régészeti feltárások során, hasonlóan egy-egy bűntény helyszínének igazságügyi szakértői nyomrögzítéséhez, teljeskörűen rögzíteni kell a leletek fizikai paramétereit, illetve előkerülésük körülményeit. Főleg azért fontos ez, mert a megváltozó környezeti viszonyok nagyban ronthatják az előkerülést követően a leletek állapotát. Az MR-technológiával ezek az információk a lehető legrövidebb időn belül rögzíthetők, és a későbbiekben bármikor, információvesztés nélkül felhasználhatók. 3D nyomtatás segítségével a hiányzó vagy sérült elemek, részletek reprodukciót követően a helyükre illeszthetők, ami szerepet játszhat például különböző feltételezések igazolásában is, de lehetőségünk van kézzelfogható vagy akár rendeltetésszerűen használható replikák készítésére is személtetési vagy oktatási céllal.

Érdemes kitérni a 3D nyomtatás látássérültek oktatásában, illetve múzeumpedagógiai foglalkozások során való felhasználhatóságára is, hiszen korlátozott látás vagy annak teljes hiánya esetén a hallás mellett a tapintással történő érzékelés válik az információk begyűjtésének egyik legfontosabb és leghatékonyabb eszközévé. A viszonylag gyorsan és költséghatékonyan előállítható terepasztaloknak és replikáknak köszönhetően számos olyan fontos információhoz juthatnak így hozzá akár közvetlen tapasztalás útján is az érintettek, amire korábban nem volt lehetőségük, hiszen a legtöbb esetben csak a fantáziájukra hagyatkozhattak egy-egy foglalkozás alkalmával.

Ugyanakkor általánosságban is elmondható, hogy a régészet, hadirégészet, valamint hadszíntérkutatás eredményeinek 3D vizualizációja nagyban segíti a megismerés, illetve

a megértés folyamatát, így nemcsak a szakmai közösség tudományos fejlődéséhez, hanem az érdeklődők tájékoztatásának minőségéhez is produktívan képes hozzájárulni. Az információs társadalom ma felnövekvő generációi számára az erre épülő megoldások, audiovizuális, illetve interaktív e-learning oktatási anyagok, a kiterjesztett vagy virtuális valóság technológiájára épülő disszemináció jelentős hozzáadott értéket képviselnek, és az élményalapú megismerésen keresztül hatékonyan segítik őket tanulmányaik és általános fejlődésük során.

Az általános történelemoktatás mellett a szakspecifikus képzés támogatásában is egyre növekvő szerepet játszhat ez a technológia. Különböző módszereivel, műszaki megoldásaival akár a régész-technikus vagy restaurátor-technikus képzések gyakorlati foglalkozásainak színvonala is jelentősen növelhető. Természetesen a terepi feltárások, vizsgálatok munkafolyamatainak elsajátítását, illetve elmélyítését csak azok tényleges végzése és folyamatos gyakorlása során lehet készségszinten elsajátítani, ugyanakkor azok előkészítése, illetve a szükséges elméleti ismeretanyag átadása, feldolgozása ilyen formában lényegesen hatékonyabb, idő-, energia- és akár költségtakarékosabb lehet, ezáltal növelve a tényleges kutatásokra fordítható erőforrások arányát.

A technológia napjaink fejlettségi szintjén elsősorban még csak műszaki szakemberek általi modellalkotást és használatot tesz lehetővé, ugyanakkor a folyamatos fejlődés hatására várhatóan egyre kifinomultabb megoldások, felhasználóbarát célalkalmazások jelenhetnek meg. Ezek segítségével az egyes technikák már mindenki számára elérhetővé és felhasználhatóvá válnak, így akár a hallgatók is képesek lesznek VR/AR-megoldásokkal jegyzetet, tanulási segédanyagokat készíteni, így a web 1.0 és 2.0 analógiája alapján a jelenlegi VR/AR-fogyasztókból később akár tartalom-előállító is válhat.