

Templomi falképek restaurálásának támogatása digitális térmodellezési technológiákkal

Supporting the restoration of church fresco paintings with our digital spatial modeling technology

DR. ERDÉLYI Marcell¹, DR. FERENCZ József²

¹Debreceni Egyetem, 4028 Debrecen, Ótemető utca 2-4,
Tel: 0040-774-437618, Email: climen84@gmail.com

²Master Cad Kft., Nagyvárad, Mioriței utca 3,
Tel/fax:0040-259-478092, Email: mastercadmi@gmail.com

Abstract

In our presentation, we will present the process and results of our work during the restoration of the frescos of two historic churches. The state of the identified wall paintings of the listed churches must be depicted realistically, in a way that can be properly interpreted and used purposefully, before and after the restoration. The representation that is necessary and satisfies the expressed needs is best served by the digital high-precision photo-realistic spatial model of the walls containing the frescos, edited in accordance with the technological standards, and the orthophotos that can be edited from it. In the case of both listed churches, we used our digital, high-precision photo-realistic spatial modeling technology, so the work phases are described only once, and our results are described in tables containing appropriate data for the two listed churches, before and after restoration.

Kivonat

Előadásunkban két műemlék templom falképeinek restaurálása során végzett munkáink folyamatát és eredményeit mutatjuk be. A műemlék templomok azonosított falképeinek állapotát, valóságghűen, megfelelő módon értelmezhető és célirányosan felhasználható módon, a restaurálás előtt és után ábrázolni kell. A szükséges és a megfogalmazott igényeket kielégítő ábrázolást a korunk műszaki technológiai színvonalának megfelelően szerkesztett, a falképeket tartalmazó falak, digitális nagy pontosságú fotó-realisztikus térmodellje és az abból szerkeszthető ortofotók szolgálják legjobban. Mindkét műemlék templom esetében a digitális, nagy pontosságú fotó-realisztikus térmodellezési technológiánkat alkalmaztuk, ezért a munkafázisokat csak egyszer, az elért eredményeinket pedig két műemlék templomra vonatkozó, restaurálás előtti és utáni, megfelelő adatokat tartalmazó táblázatokban ismertetjük.

Kulcsszavak: Műemlék templom, falkép, digitális, nagy pontosságú fotó-realisztikus térmodell, ortofotó.

1. BEVEZETÉS

A műemlék templomok azonosított falképeinek állapotát (formák, alakzatok és azok kölcsönös helyzetei, méretek, színezet), valóságghűen, megfelelő módon értelmezhető és célirányosan felhasználható módon, a restaurálás előtt és után ábrázolni kell. A szükséges és a megfogalmazott igényeket kielégítő ábrázolást a korunk műszaki technológiai színvonalának megfelelően szerkesztett, a falképeket tartalmazó falak, digitális nagy pontosságú fotó-realisztikus térmodellje és az abból szerkeszthető ortofotók (ortogonális vetítésű képek) szolgálják legjobban. Vállalkozásunkban már hosszabb ideje sikeresen alkalmazott digitális, nagy pontosságú fotó-realisztikus térmodellezési technológiánk alkalmazásával szerkesztett digitális térmodellek és ortofotók tökéletesen megfelelnek az említett célnek. Technológiánkban, a valós világ választott összetevőitől, ez esetben a belső falaktól, falképektől a digitális térmodellig és az ortofotóig három munkafázis, adatgyűjtés, adatfeldolgozás és termék előállítás konkrét feladatainak sikeres elvégzését kell megoldanunk.

Előadásunkban a Bihar Megye műemlék nyilvántartásában szereplő **magyarremetei református templom** (1. templom) és a **siteri református templom** (2. templom) falképeinek restaurálás előtti (2020) és utáni (2022) állapotainak ábrázolását biztosító digitális, nagy pontosságú fotó-realisztikus térmodellek és

ortofotók megvalósításának folyamatát mutatjuk be. Figyelembe véve, hogy a technológia munkafázisai a két esetben azonosak, azokat csak egyszer tárgyaljuk. Kiemeljük a templomok egyedi adottságai által generált különbségeket a három munkafázis során. Különös figyelmet fordítottunk a restaurálás előtti és utáni digitális, nagy pontosságú fotó-realistikus térmodellek és ortofotók azonos vonatkoztatási rendszereink biztosítására, ami egy különleges feladat. Műemlék épületekről lévén szó, a választott vonatkoztatási rendszerben a szükséges felmérési hálózati és illesztő pontok állandósítása tilos.

A restaurálás előtt és után az említett három munkafázisunkat és az elért eredményeket előadásunk következő pontjaiban mutatjuk be.

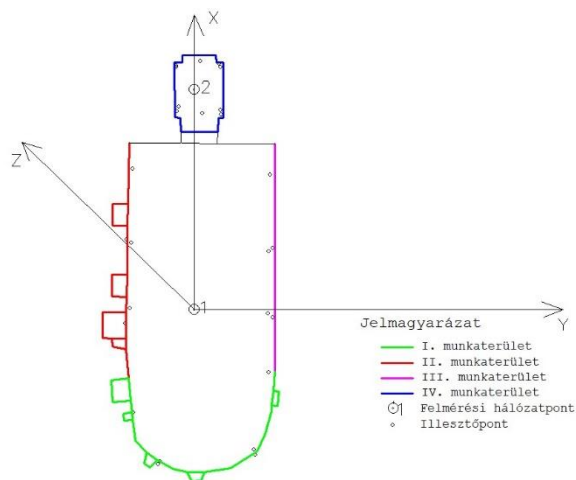
Következtetésekkel zárjuk előadásunkat.

2. ADATGYŰJTÉS

A megfogalmazott célt szolgáló termékek előállítása kellő minőségű és mennyiségű, a két templom célterületének munkázónairól, megfelelő eszközökkel és módszerekkel gyűjtött adatokat igényel. Ennek az igénynek a kielégítése a templomok belső területein, több fázisban végzett terepi munka során a nagy pontosságú digitális térmodellezéshez szükséges adatok gyűjtésével valósult meg. Az adatgyűjtés összetett folyamatának lépéseit a következőkben mutatjuk be röviden.

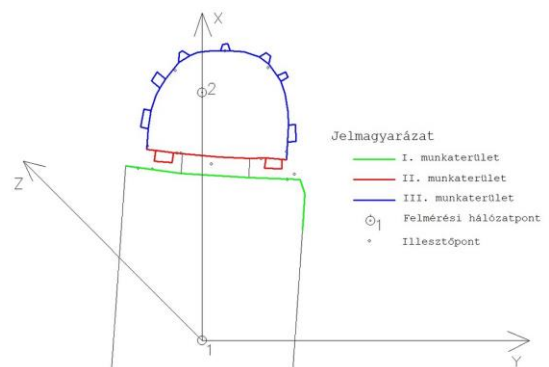
A **munkaterületek (MT) megismerése** során azonosítottuk a templomok belső terei és falképeket tartalmazó falai által meghatározott, modellezendő részeket. A munkaterületek számát és nagyságát a falak alakja (sík, ívelt, tagolt), a falképek nagysága és kiterjedése alapján különböztetjük egymástól. Helyi vonatkoztatási rendszerként a munkázóna konkrét feltételeinek figyelembevételével a munkázóna 3D-s terében Descartes-féle ortogonális, bal sodrású koordináta-rendszereket határoztuk meg (1. ábra, 2. ábra).

A **felmérési hálózat pontjainak, valamint az illesztőpontok helyeinek és számainak meghatározását** a munkaterületek sajátosságai és a nagy pontosságú térmodellezési technológiát alkalmazó modellezéshez szükséges pontok elméleti számának és helyének figyelembevételével határoztuk meg a konkrét pontszámokat és ponthelyeket, a restaurálás előtti és utáni lehetőségek figyelembevételével. A két templom esetében a restaurálás előtti és utáni térmodellezési munkáinkhoz szükséges pontok számát és munkaterületi elosztásait az 1. táblázat tartalmazza.



1. ábra

A magyarrémetei templom munkaterületei



2. ábra

A siteri templom munkaterületei

1. táblázat

Templom	Munkavégzés ideje	Pontok típusa	Pontok helye				Összesen	
			Padló	M T I	M T II	M T III		M T IV
1	Restaurálás előtt 2020	Felmérési hálózati	2	0	0	0	0	2
		Fotogrammetriai illesztő	0	6	5	5	10	26
		Összesen	2	6	5	5	10	28
	Restaurálás után 2022	Fotogrammetriai illesztő	0	6	6	5	5	22
2	Restaurálás előtt 2020	Felmérési hálózati	2	0	0	0	-	2
		Fotogrammetriai illesztő	0	5	5	5	-	15
		Összesen	2	5	5	5	-	17
	Restaurálás után 2022	Fotogrammetriai illesztő	0	6	7	-	-	13

A **fotogrammetriai illesztőpontok előre jelölését** a restaurálás előtti raszteres adatgyűjtés (digitális fényképezés) előtt, a fotogrammetriai illesztőpontok megfelelően választott elhelyezkedése függvényében, a falképeket tartalmazó falakra vetített lézersugárral oldottuk meg. Így a falképek fizikai állapotát nem károsítottuk. A restaurálás utáni raszteres adatgyűjtés elvégzése után a fotogrammetriai illesztőpontokat a készített digitális fényképeken és restaurálás előtti digitális, nagy pontosságú fotó-realisztikus térmodelleken, a szükséges feltételeket betartva választott közös pontok alkotják, amelyeket a digitális fényképeken megfelelően jelöltünk.

A **vektor alapú, hagyományos módszerrel végzett adatgyűjtést** csak a két templomban a restaurálás előtti munkálataink során alkalmaztuk. A felmérési hálózat pontjainak, valamint a fotogrammetriai illesztőpontoknak, a választott helyi vonatkoztatási rendszerben való pozicionálási adatait az ismert módon végeztük. A restaurálás előtt és után a pontok pozicionálását biztosító mérések és a gyűjtött adatok számát, a pontok típusa szerint csoportosítva a két templom esetében, a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat

Templom	Munkavégzés ideje	Pontok típusa	Gyűjtött adatok száma					Összesen
			M	S	H	V	XY Z	
1	Restaurálás előtt 2020	Felmérési hálózati	1	1	1	1	0	3
		Fotogrammetriai illesztő	26	26	26	26	0	78
		Összesen	27	27	27	27	0	81
	Restaurálás után 2022	Fotogrammetriai illesztő	0	0	0	0	22	22
2	Restaurálás előtt 2020	Felmérési hálózati	1	1	1	1	0	3
		Fotogrammetriai illesztő	15	15	15	15	0	45
		Összesen	16	16	16	16	0	48
	Restaurálás után 2022	Fotogrammetriai illesztő	0	0	0	0	13	13

Megjegyzés: M - mérés, S - távolság, H - vízszintes irány, V - függőleges irány, XYZ - 3D-s koordináták

A **raszter alapú, digitális fényképezési módszerrel végzett adatgyűjtést** mindkét templom esetében, restaurálás előtt és után az elvárt pontosság elérése érdekében megfelelően választott paraméterek beállításával, célirányosan végzett földi digitális fényképezéssel végeztük. A munka során a földi digitális fényképezés módszerét alkalmaztuk. A földi digitális fényképezést nagyjából vízszintes, különböző tájolású felvételezési irányokkal, a **Nikon D3200** digitális fényképezőgépekkel végeztük. A készített digitális fényképek, mint raszteres adathordozók, megfelelő módon lefedik a munkaterületeket. Az egyenként elnevezett digitális fényképeket a munkaterületekre osztva, megfelelő adattárakban a rögzítettük. A fényképek időrendi sorrendben, munkaterületekre osztott számát a 3. táblázat tartalmazza.

Templom	Munkavégzés ideje	Adathordozó	Gyűjtött adatok száma				Összesen
			MT I	MT II	MT III	MT IV	
1	Restaurálás előtt 2020	Digitális fénykép	246	317	334	247	1.144
	Restaurálás után 2022		375	280	283	228	1.166
2	Restaurálás előtt 2020		303	165	198	-	666
	Restaurálás után 2022		356	169	339	-	864

Az adatgyűjtés eredményei a vektor alapú adatok (mérések és koordináták) és a raszter alapú adathordozó (digitális fényképek), amelyek a szabatos adatfeldolgozás kiinduló adatai.

3. ADATFELDOLGOZÁS

Ebben a munkafázisban a két templom terepen gyűjtött vektor alapú adatait külön-külön az egész munkazónáira vonatkozóan egységesen, a raszter alapú adatok feldolgozását pedig a munkaterületekre vonatkozóan külön-külön, de azonos adatfeldolgozási lépésekkel, a rendelkezésünkre álló, szabatos adatfeldolgozást biztosító, professzionális programrendszerek célirányos felhasználásával a választott helyi vonatkoztatási rendszerekben végeztük.

A **vektor alapú, hagyományos módszerrel gyűjtött adatokat** a mért pontok típusának megfelelő módszerekkel, helyi vonatkoztatási rendszerekben a **Terramodel FDM** programrendszerrel, dolgoztuk fel. Eredményként a felmérési hálózat pontjainak és fotogrammetriai illesztőpontoknak a 3D-s koordinátáit kaptuk. A számított koordinátákkal pozícionált pontok pozícionálási pontosságát a kiegyenlítés során kapott standard hibák értékeivel jellemezhetjük:

Az 1. templom esetében:

$$\sigma_x^V = 0.007\text{m}, \sigma_y^V = 0.001\text{m}, \sigma_z^V = 0.001\text{m}, \sigma_{xy}^V = 0.00707\text{m}, \sigma_{xyz}^V = 0.00714\text{m}$$

A 2. templom esetében:

$$\sigma_x^V = 0.007\text{m}, \sigma_y^V = 0.001\text{m}, \sigma_z^V = 0.001\text{m}, \sigma_{xy}^V = 0.00707\text{m}, \sigma_{xyz}^V = 0.00714\text{m}$$

Ennek a munkafázisnak az eredményei a felmérési hálózat pontjainak és a fotogrammetriai illesztőpontok XYZ koordinátái a raszter alapú digitális fényképezési módszerrel gyűjtött adatok feldolgozása kiinduló adatainak egyik összetevője.

A **raszter alapú, digitális fényképezési módszerrel különböző időpontokban gyűjtött adatok feldolgozását** a templomok 3D-s helyi vonatkoztatási rendszereiben, a munkaterületekre vonatkozóan külön-külön, de azonos adatfeldolgozási lépésekkel végeztük. A **PhotoModeler Premium** programrendszerrel, a digitális fényképek belső és külső tájékozását, utána pedig a fotogrammetriai szkennelést végeztük el. E munkafázis eredményei a helyi vonatkoztatási rendszerekben meghatározott XYZ koordinátájú diszkrét pontok halmazai, a pontfelhők. Az eredmények mennyiségét és pontossági mutatószámait a 4. táblázat tartalmazza.

4. táblázat

Templom	Munkavégzés ideje	Munkaterület	Pozicionált pontok száma			Pontossági mutatók	
			Kapcsoló	Szkenelt	Összesen	Standard hibák	
						Fényképeken	Illesztő pontokban
1	Restaurálás előtt 2020	MTI	74.921	12.942.005	13.016.926	0,00773	0,00450
		MTII	120.183	17.086.146	17.206.329	0,00637	0,00369
		MTIII	149.547	22.895.711	23.045.258	0,00687	0,00404
		MTIV	77.098	9.268.569	9.345.667	0,00471	0,00301
		Összesen	346.828	62.192.431	62.614.180	0,02568	0,01524
	Restaurálás után 2022	MTI	864.276	18.970.934	19.835.210	0,00756	0,00573
		MTII	628.252	14.128.213	14.756.465	0,00780	0,00481
		MTIII	821.721	13.154.922	13.976.643	0,00812	0,00566
		MTIV	706.656	10.063.818	10.770.474	0,00724	0,00419
		Összesen	3.020.905	56.317.887	59.338.792	0,03072	0,02039
2	Restaurálás előtt 2020	MTI	80.148	2.930.149	3.010.297	0,01280	0,00564
		MTII	40.866	959.958	1.000.824	0,00640	0,00438
		MTIII	52.570	2.638.413	2.690.983	0,00396	0,00433
		Összesen	173.584	6.528.520	6.702.104	0,02316	0,01435
	Restaurálás után 2022	MTI	1.054.922	12.559.502	13.614.424	0,00621	0,00378
		MTII	308.650	7.194.902	7.503.552	0,00841	0,00455
		MTIII	553.883	16.499.708	17.053.591	0,01052	0,00501
		Összesen	1.917.455	36.254.112	38.171.567	0,02514	0,01334

A pontfelhőket alkotó pontok pontosságát a $\sigma^P_{(xyz)} = 0,01033m \sim 0,01m$ érték jellemzi. E munkafázis eredménye, a helyi rendszerekben pozicionált különböző számú diszkrét pontból álló pontfelhők a megvalósítandó digitális, nagy pontosságú fotó-realisztikus térmodellezések kiinduló adatai.

4. TERMÉK ELŐÁLLÍTÁS

A termék előállítás első lépésének eredményei az alaptermékek, a megfelelő számú digitális, nagy pontosságú fotó-realisztikus térmodellek. A második lépésben az alaptermékek, mint kiinduló adatok célirányos feldolgozásainak eredményei az, ortofotók, mint melléktermékek. A termék előállítás e két lépését a két templom munkaterületeinek restaurálás előtti és utáni konkrét helyzeteiknek megfelelően tettük meg.

A munkaterületek digitális, nagy pontosságú fotó-realisztikus térmodelljei alkotják a munkáink során előállított **alaptermékeket**. Szerkesztésük kiinduló adatai a választott helyi vonatkoztatási rendszerekben pozicionált diszkrét pontok 3D-s halmazai, a munkaterületek megfelelő pontfelhői, amelyekre támaszkodó, folyamatos, megszakítások nélküli felületeket generáltunk. Ez az automatikus szerkesztési folyamat a pontfelhő pontjaiból egymáshoz kapcsolódó háromszögek, mint elemi felületek létrehozásán alapul. A pontfelhők felületté való átalakításának eredményei a digitális, nagy pontosságú fotó-realisztikus térmodellek. E komplex, digitális térmodellezési feladatot a **PhotoModeler Premium** programrendszer által felkínált megoldások alkalmazásával oldottuk meg, A munkaterületek pontfelhőit alkotó pontok és azokból a térmodellezés során a modellezett felületet optimálisan lefedő szerkesztett elemi felületek, a háromszögek számát a 5. táblázat tartalmazza.

5. táblázat

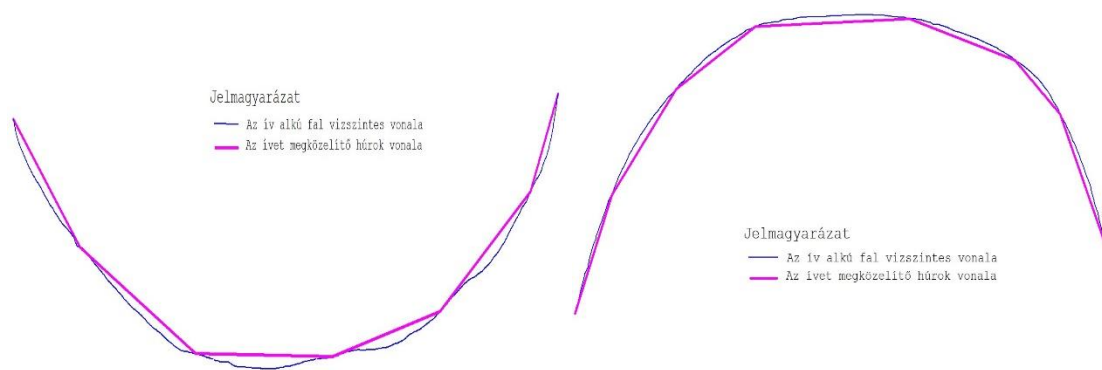
Tempлом	Munkavégzés ideje	Munkaterület	Pontfelhőt alkotó pontok száma	Generált elemi felületek (háromszögek) száma
1	Restaurálás előtt 2020	MTI	13.016.926	193.578
		MTII	17.206.329	88.503
		MTIII	23.045.258	64.905
		MTIV	9.345.667	323.098
		Összesen	62.614.180	670.084
	Restaurálás után 2022	MTI	18.970.934	896.950
		MTII	14.128.213	673.467
		MTIII	13.154.922	673.093
		MTIV	10.063.818	1.029.384
		Összesen	56.317.887	3.272.894
2	Restaurálás előtt 2020	MTI	3.010.297	129.039
		MTII	1.000.824	90.300
		MTIII	2.690.983	233.249
		Összesen	6.702.104	452.588
	Restaurálás után 2022	MTI	12.559.502	1.668.094
		MTII	7.194.902	944.586
		MTIII	16.499.708	866.273
		Összesen	36.254.112	3.478.953

Az előállított digitális, nagy pontosságú fotó-realisztikus térmodellek pontossági minősítését a vektoriális és raszter alapú adatfeldolgozás során, az alkalmazott programrendszerek által számított $\sigma^P_{(xyz)} = 0,01033m \sim 0,01m$ standard hiba, mint a pozicionálás pontossági mutatószáma, határozza meg. Ez a pontossági mutatószám értéke az előállított digitális térmodellek térbeni helyzetének átlagos hibáit jellemzi.

E munkafázis eredményei, a helyi rendszerekben szerkesztett digitális, nagy pontosságú fotó-realisztikus térmodellek, az ortofotók szerkesztéseinek kiinduló adatai.

Az ortogonális vetítésű digitális fényképek, az ortofotók alkotják a **melléktermékeket**, amelyek szerkesztéséhez a kiinduló adatok az alaptermékek, a digitális, nagy pontosságú fotó-realisztikus térmodellek. Az ortofotókat a térmodellek megfelelően választott síkokra való ortogonális vetítésével, a **PhotoModeler Premium** programrendszer által felkínált megoldások alkalmazásával oldottuk meg, A falak alakját a munkaterületek digitális, nagy pontosságú fotó-realisztikus térmodelljeinek a padlózatok fölött elhelyezett vízszintes síkokkal való metszése által generált vonalak alapján állapítottuk meg. Két vonaltípust kaptunk: egyenest és ív alakú görbét. **Az egyenes vonalú falak** esetén vetítési síknak egy, a fallal párhuzamosan elhelyezett függőleges síkot választottunk. Erre a síkra ortogonálisan vetítettük a megfelelő digitális, nagy pontosságú fotó-realisztikus térmodellt. E munkafázis eredménye az ortofotó. Ennek megfelelően a vetítési síkokat két, egymástól eltérő módon választottuk.

Az ív alakú, görbe vonalú fal esetén több függőleges vetítési síkot alkalmaztunk, amelyek számát és helyzetét egy, erre az esetre kidolgozott módszerrel határoztuk meg. A módszer alapján az ívet húrokkal helyettesítjük és a húrokkal párhuzamos függőleges síkokra ortogonálisan vetítjük a digitális, nagy pontosságú fotó-realisztikus térmodelleket. A húrok hosszát a húrhoz tartozó ívrész és a húr hosszának különbsége függvényében határoztuk meg, azzal a feltétellel, hogy a különbség ne legyen nagyobb, mint a digitális, nagy pontosságú fotó-realisztikus térmodellek pontossági mutatószáma, $\sigma^P_{(xyz)} = 0,01033m \sim 0,01m$. Az ívek és a húrok kölcsönös helyzetét a 3. ábra szemlélteti.



3. ábra

Az ívek és húrok kölcsönös helyzete

A húrok meghatározták a függőleges vetítésíkok helyzetét. Az így meghatározott függőleges vetítésíkokra ortogónálisan vetítettük a térmodellt. A vetítések eredményei a rész-ortofotók, amelyek egyesítő szerkesztés eredményei az egységes ortofotók. Az ortofotók pontossága megegyezik a digitális, nagy pontosságú fotó-realisztikus térmodell pontosságával.

A szerkesztett ortofotókra vonatkozó információkat a 6. táblázat tartalmazza.

6. táblázat

Templom	Munkavégzés ideje	Munkaterület	Húrok száma	Vetítési síkok száma	Ortofotók	
					Száma	Területe (m ²)
1	Restaurálás előtt 2020	MTI	6	6	1	80
		MTII	0	1	1	48
		MTIII	0	1	1	52
		MTIV	0	5	5	34
		Összesen	6	13	8	214
	Restaurálás után 2022	MTI	6	6	1	80
		MTII	0	1	1	48
		MTIII	0	1	1	52
		MTIV	0	5	5	34
		Összesen	6	13	8	214
2	Restaurálás előtt 2020	MTI	8	8	1	41
		MTII	0	1	1	22
		MTIII	0	2	2	53
		Összesen	8	11	4	116
	Restaurálás után 2022	MTI	8	8	1	41
		MTII	0	1	1	22
		MTIII	0	2	2	53
		Összesen	8	11	4	116

5. KÖVETKEZTETÉSEK

A megrendelő megfogalmazta számunkra a megoldandó feladatot: ábrázoljuk a műemlék templomok azonosított falképeinek állapotát (formák, alakzatok és azok kölcsönös helyzetei, méretek, színezet), valósághűen, megfelelő módon értelmezhető és célirányosan felhasználható módon, a restaurálás előtt és után. Megoldásaink a digitális, nagy pontosságú fotó-realisztikus térmodellezési technológiánkra épültek, célirányosan alkalmaztuk az adatgyűjtési, adatfeldolgozási és termék előállítási módszereinket.

A feladat két különböző célterületen, különböző időbeni megoldásához azonos módszereket alkalmaztunk. Előadásunkban a megoldásaink folyamatát csak egyszer írtuk le, megfelelő módon kiemeltük a célterületek különbségeit és az azokból eredő formai és mennyiségi különbségeket.

Az elért eredményeket elemezve megállapíthatjuk, hogy digitális térmodellezési technológiánk kitűnően alkalmazható a műemlék restauráció ezen területén is.