

# Adott nézőpontból helyes 3D tartalom vetítése tetszőleges felületre

Bajusz László<sup>2</sup>, Kátai-Urbán Gábor<sup>1</sup>, Pintér István<sup>1</sup>, Megyesi Zoltán<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Informatika Tanszék, Gamf Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem,  
Magyarország

<sup>2</sup> Számítógépes Optikai Érzékelés és Feldolgozás Kutatólaboratórium, MTA-SzTAKI,  
Magyarország

**Abstract.** Egy ismeretlen, nem egyenletes felületre vetített képi tartalom torzulása jelentősen korlátozza, adott esetben lehetetlenné teszi a színtér használatát vetítési felületként. Ha azonban a torzulás kompenzálható, tetszőleges felület válhat vetíthetővé és lehetővé téve számos alkalmazás megvalósítását (pl.: asztalra vetített billentyűzet, épületre vetített minta de akár 3D kiterjesztett valóság is megvalósítható).<sup>1</sup>

A cikkben megmutatjuk, hogy egy lamberti felület geometriai torzítása kompenzálható aktív fény (azon belül is gray-kód) alapú fénysugár rekonstrukció használatával, és példákat hozunk az alkalmazásra.

**Keywords:** 3D Rekonstrukció, Aktív fény szkennelés, Gray-kód, Vetítés, 3d tartalom

## 1 Bevezetés

A megjelenítési technológiák közös problémája, hogy meghatározható legyen a néző által látott kép. Általános esetben ez azt jelenti, hogy a szemlélő irányába induló fénysugarakat meghatározott színnel kell ellátni ezáltal a megjelenített tartalom láthatóvá válik. Mivel a szemünk vetítési modellje jól közelíthető egy középpontos vetítéssel, szükséges egy felület (továbbiakban vetítési felület) ahonnan kiindulva a fénysugarak megfelelően magas felbontással a szemünk felé indulnak akár fény kibocsátás útján (például sík, illetve hajlított képernyős LCD megjelenítők), vagy visszaverődéssel (pl. sík vászon LED vagy hagyományos fényű projektorok). A 3D megjelenítés esetében különleges nehézség, hogy a két szem irányába más színű fénysugarak kibocsátása szükséges, ami elérhető speciális vetítési felület vagy a megjelenítővel összehangolt szemüvegek alkalmazásával. Bár hagyományos 2D megjelenítők esetén a vetítési felület minden pontja minden irányban azonos színt

---

<sup>1</sup> Bajusz László, Kátai-Urbán Gábor, Pintér István, Megyesi Zoltán, ADOTT NÉZŐPONTBÓL HELYES TARTALOM VETÍTÉSE TETSZŐLEGES FELÜLETRE, Gradus, ISSN 2064-8014, 2018

bocsát ki, továbbra is fennáll az a feladat, hogy felületi pontoknak a tartalom szerint megfelelő szint kell kibocsátaniuk.

Ez kihívást jelenthet a projektorokon alapuló megjelenítők esetében (ahol a vetített tartalom egy matt felületről verődik a néző felé). Ilyen esetekben kompenzálás nélkül a vetített kép csak akkor látszik helyesen, ha a vetített felület egy sík, és a vetítési tengely a síkra merőleges. Egyéb esetben a vetített tartalom a vetítési felülettől függően torzul. A torzulás kompenzálása segítségével azonban bármely matt felület válhat vetítési felületté, ezzel utat adva számos alkalmazásnak. Ezek közé tartozik az épületek falára vetített tartalom (ahol a fal egyenetlenségei és színbeli eltéréseinek kompenzálása szükséges), az asztalra vetített billentyűzet (amikor a billentyűknek egy meghatározott metrikus, és a detektor által jól ismert pozícióban kell elhelyezkedniük) avagy a vetítésen alapuló 3D kiterjesztett valóság, ahol a vetített tartalom kapcsolatban áll a színtérrel és kiegészítő információt szolgáltat. Ez utóbbira jó példa egy műtéti tervezést elősegítő rendszer, amellyel a beteg saját szerveiről mért információt lehet a műtétet végző orvos elé tární (lásd 1. ábra).



**1. Ábra.** Vetítő alapú kiterjesztett valóság műtéti tervezéshez.

A torzulás kompenzálása azonban nem minden esetben kézenfekvő. Egy ismert sík felület esetében, a torzulás jól modellezhető egy perspektív transzformációval, más esetben a torzulás csak egy általános képpont megfeleltetés segítségével írható le. Ha ismertek a vetítő és a megfigyelő vetítési modelljei (pozíció, forgatás, látószög), valamint ismert a vetítési felület 3D modellje a felületi normálisokkal és visszaverődési függvényekkel együtt, úgy a néző szemébe érkező fénysugarak visszakövethetők a vetítő által vetített képpontokhoz. Ez azonban összetett modellezés, és szükséges hozzá a projektor kalibrációja, a vetítési felület 3D rekonstrukciója, valamint a néző szemének a követése, amelyek összetett számítógépes látási problémák. Ezek a feladatok elkerülhetők, illetve egyszerűsíthetők, ha a nézőpont ismert és a színtér statikus.

Ebben a cikkben egy módszert mutatunk egy általános felület vetítési felületként való használatára. A módszer alkalmazásához a tartalom vetítése előtt az ismert nézőpontban elhelyezett kamerára van szükség, és a szintér előzetes mérésére, amelynek célja a nézőponti kamera és a vetítő fénysugár megfeleltetése. A cikk felépítése a következő: a 2. fejezetben a kapcsolódó munkákat mutatjuk be, majd a problémát formalizáljuk. Ezt követi a javasolt módszer bemutatása és a kísérleti eredmények ismertetése.

## 2 Kapcsolódó munkák

Több megvalósítás is született előzőleg különböző felületekre történő vetítés torzulásának kompenzálására. Sík vetítési felület esetén a projektor vetítési síkja és a felület közötti torzulás egy sík-sík transzformációval (homográfiával) kompenzálható. A transzformáció automatikus megtalálásához általában valamilyen speciális mintát vetítenek a felületre, amit egy (vagy több) kamera segítségével detektálnak[1][2].

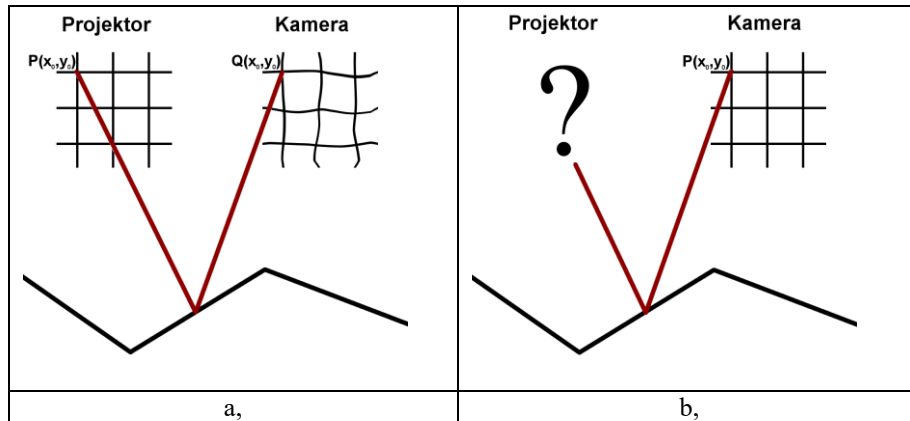
Általános felületre való vetítés esetén a kompenzálásban a legnagyobb nehézséget a felület pontos modellezése adja. Szabályos geometriai alakzatok esetén, mint például gömb, vagy íves felületek a modell közvetlenül megadható egy négyzetes függvény segítségével, amivel egyszerűbben boldogulhatunk. Azonban összetett felületek esetén ez a módszer nem alkalmazható.

Raskar és társai a modellt sztereo kamerarendszer alkalmazásával, 3D rekonstrukcióval határozták meg [3]. Ennek a módszernek a hátránya, hogy teljesen kalibrált kamera-projektor rendszert feltételez és a rekonstrukció hosszú időt vesz igénybe. Ashdown és társai egy gyorsabb, kalibrációt nem igénylő módszert dolgoztak ki [4]. Itt viszont a vetítési felület csak síkokból állhat.

Zhu és társai egy projektorból, kamerából és dőlésszög szenzorból álló rendszert készítettek [5]. A tetszőleges felületet binárisan kódolt strukturált fény segítségével detektálták. A projektor orientációjának változását a dőlésszög szenzor segítségével érzékelték. A kamera-projektor kalibráció elkerüléséhez a kamerát közvetlenül a projektorra szerelték fel. A rendszer gyorsan képes a vetítési felület megváltozására reagálni, de csak a projektor nézőpontjából helyes vetítést képes előállítani.

## 3 Probléma bemutatása

A cél, hogy olyan rendszert készítsünk, amely képes tetszőleges szintérré olyan torzított képet vetíteni, amely egy adott nézőpontból helyesen látszik. Ehhez a kivetített fénysugár mezőt kell rekonstruálni úgy, hogy minden kamera fénysugárhoz hozzárendelünk egy projektor fénysugarat. Az 2.a. ábra és 2.b. ábra szemlélteti, hogy egy adott projektor fénysugár hogyan van hozzárendelve a megfelelő kamera fénysugarához.



**2.Ábra.** Projektor kamera megfeleltetés, amely esetén a kamera szemszögéből torzulás érzékelhető (a), és amely esetén helyes geometria látható (b).

A fénysugár megfeleltetés célja, hogy a kamera minden egyes fénysugarát meg tudjuk színezzni a megfelelő színnel, vagyis tudjunk olyan mintát vetíteni a színtérre, hogy a kamera azt a fénysugarat adott színűnek lássa. A mi megoldásunkban van egy projektor, ami megfelelően megvilágítja ezt a színteret. A megfeleltetést úgy valósítjuk meg, a kamera helyzete tetszőleges lehet a projektor helyzetéhez képest.

Egy gyakori geometria megoldás a színtér rekonstrukcióra az aktív fény szkennelés. A mi speciális problémánknál nincs szükség kalibrációra, vagyis nem kell ismernünk sem a projektor, sem a kamera vetítési tulajdonságait, ugyanis eleve ilyen problémára keressük a megoldást. Szükséges az a feltételezés, hogy a színtér Lambert felülettel rendelkezzen, vagyis minden irányban diffúzan szórjon.

## 4 Strukturált fény

A strukturált fény előállítása a térbeli felület alakjának mérésére szolgáló egyik érintésmentes eljárás alapja. Ebben az esetben megváltozik a felületre vetített fény mintázata a referencia-síkhoz képest, és ebből becsülhetők meg a felület pontjainak koordinátái. Az alapelrendezésben egy kamera és egy LCD projektor szerepel. A projektor vetíti a fénymintázatot a mérendő tárgy felületére - a fénymintázat lehet például egyetlen vagy több fénycsík, a bináris Gray-kódot követő mintázat vagy szinuszos fénymintázat. A referencia-síktól mért távolság becsüléséhez ismerni kell a kamera, a projektor és a világkoordináta-rendszer geometriai viszonyait. Erre szolgál a kalibrációs eljárás. A kamera kalibrálás során meg kell határozni a kamera saját jellemzőit (pl. fókusztávolság, a fényérzékelő szélessége és magassága) és a világkoordináta-rendszerben elfoglalt helyzetét (például pozíció és orientáció). A kalibrált rendszerrel végezhető el a 3D felület-rekonstrukció.

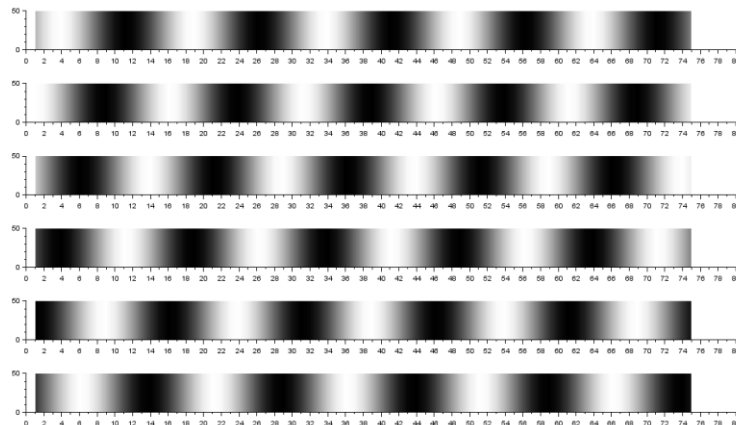
A térbeli felület pontjai koordinátáinak meghatározására a gyakorlatban elterjedt módszer az, amikor mozgó lézervfény-csíkokat vetítenek a tárgyfelületre, és a vett

kamerakép alapján végzik el a felületelemek referencia-síktól mért távolságának számítását. Másik megközelítésben - a mozgást elkerülendő - strukturált fénymintázatot vetítenek a tárgyfelületre. A leggyakoribb fénymintázatok a következők:

- diszkrét (a fénymintázatban az intenzitás-értékek nemnegatív egész számok)
  - egyetlen, összetett mintázatú kép vetítése
    - például a De Bruijn sorozat alapján előállított kép
  - több, időben egymást követő, egyszerű szerkezetű kép vetítése
    - például bináris vagy n-áris Gray-kód alapján előállított kép
- folytonos (a fénymintázatban az intenzitás-értékek nemnegatív valós számok)
  - a szinusz-függvény paramétereinek változtatása
    - egyetlen, a síkfrekvencia-tartományban előállított kép vetítése
    - több, rögzített síkfrekvenciájú, de változó fázisú képből álló képsorozat vetítése
    - rögzített fázisú, de eltérő síkfrekvenciájú képsorozat vetítése
  - a wavelet-transzformáció alkalmazása.

A diszkrét esetre az egyik példa a bináris Gray-kód alkalmazása, melyben a szomszédos kódszavak Hamming-távolsága 1. Másik példa a De Bruijn sorozat. Ez olyan ciklikus sorozat, amely egy  $k$  elemű ABC szimbólumaiból áll úgy, hogy minden  $n$ -hosszúságú részsorozat pontosan egyszer fordul elő benne. Például  $k = 2$  esetén legyen az  $ABC := \{0, 1\}$ , a részsorozatok hossza legyen  $n = 3$ , ekkor a De Bruijn sorozat 00010111 (00)010111 ..., ugyanis 3-hosszú részsorozatokra bontva 000 001 010 101 011 111 110 100 adódik, ami a 8 lehetséges 3-hosszú részsorozat.

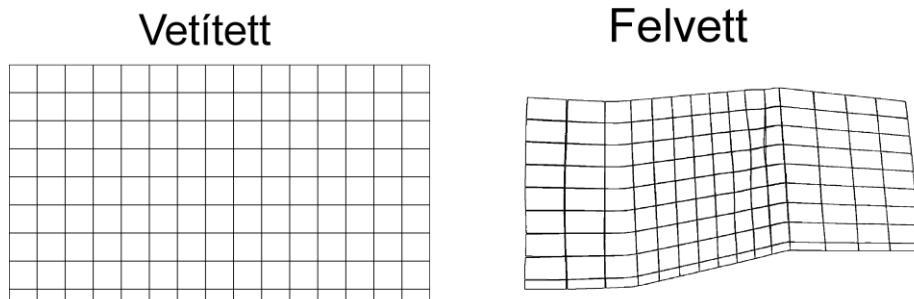
Megjegyzendő, hogy az egyetlen kép vetítésére alapozott módszer mozgó tárgyak esetében is alkalmazható, míg a képsorozat vetítése nem mozgó helyzetben lévő tárgyak esetén jellemző. A képsorozat esetében azonban a zaj hatása kevésbé jelentkezik, mint egyetlen kép vetítésekor. A fent említett módszereket kombinálják is, például síkhullám vivő modulációjával és más színrendszerre való áttéréssel [6]. A fáziseltolás módszerével előállított képsorozat látható a 3. ábrán.



**3.Ábra.** A fáziseltolás módszerével előállított képsorozat.

## 5 Javasolt módszer

A kalibráció nélküli fénysugár megfeleltetéshez egy Gray-kód alapú eljárást mutatunk be. A módszer alapja, hogy alkalmazunk egy 2D-2D megfeleltetést, amely a kamera és projektor pixelek közötti kapcsolatot adja meg. A kalibráció hiánya miatt függőleges és vízszintes Gray-kódot is kell vetíteni, amely segítségével egy rácsot hozunk létre, amely a 4. ábrán látható.

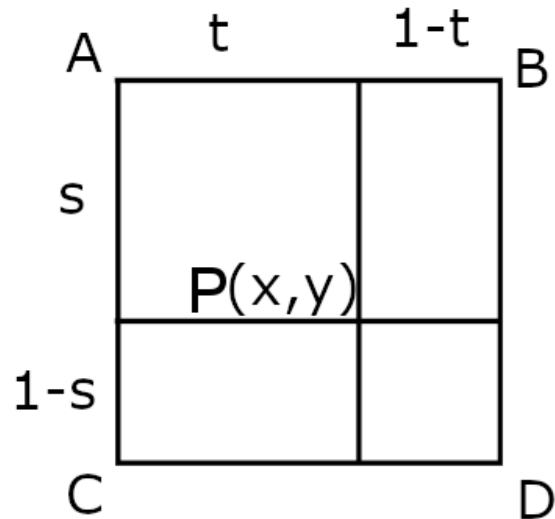


**4.Ábra.** Vízszintes és függőleges rács kialakítása logikai és művelettel.

Megvalósítását az aktív fény rekonstrukcióval készítjük, vagyis egy strukturált fényt vetítünk, majd a felületen torzult képet rögzítjük és ezen detektáljuk a Gray-kóddal meghatározott területeket. Az általunk használt technika, hogy a 4. ábrán található minden vetített téglalapnak megkeressük a közepét, és hozzárendeljük a felvett rács megfelelő eleméhez.

A Gray-kód kivetítés után a visszaállított kép előállításához két módszert alkalmaztunk. Az egyik módszer az interpoláció nélküli visszaállítás, amelynél ha folytonos képet szeretnénk kapni, akkor olyan mélységig kell vetíteni a Gray-kódot, hogy a vetítendő területen minden fénysugarat hozzá tudjunk rendelni a vetített képhez. A másik az interpoláción alapul, amelynél a kivetített Gray-kód mélysége a felület egyenetlenségétől függ.

Ebben az esetben bilineáris interpolációt használunk, amely első lépése, hogy kiválasztunk egy pontot, és a hozzá tartozó legközelebbi négy középpontot. Minden pontnak lesz egy  $(t,s)$  értékpárja, amely azt adja meg, hogy a felvett kép középpontjai mekkora súlyt érnek. Az 5. ábra mutatja, hogy az általunk kiválasztott P ponthoz A,B,C,D középpont tartozik, mely téglalap esetén a  $t$  és az  $s$  változó jelöli az arányokat.



5.Ábra.  $P(x,y)$  pont és a hozzá tartozó legközelebbi 4 középpont.

Mivel a 2D-2D megfeleltetés megmondja, hogy a vetített képen lévő középpontokhoz mely középpontok tartoznak a felvett képen, ezért az alábbi képlettel ki tudjuk számolni az összes pixelre, hogy a vetítendő kép bármely P pixele mely Q pixelhez tartozik a kivetített képen. A vesszővel jelzett változók a vetített kép legközelebbi középpontjainak koordinátáját jelentik.

$$Q(x,y) = A'(1-t)(1-s)+B'(t)(1-s)+C'(s)(1-t)+D'(s)(t) . \quad (1)$$

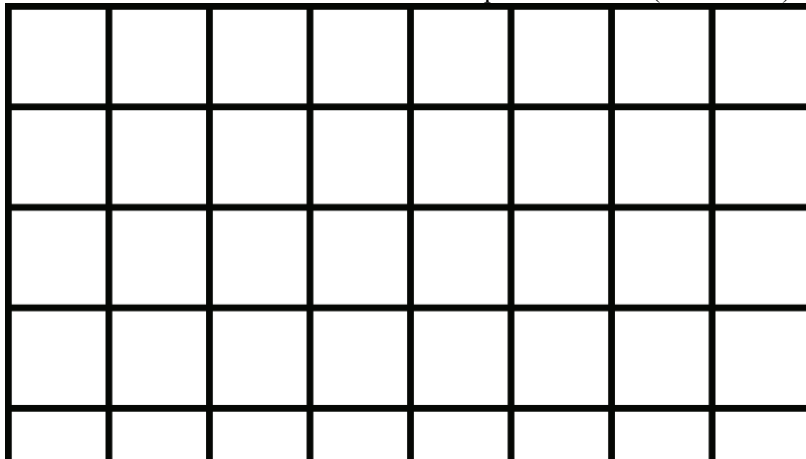
## 6 Eredmények és értékelés

A 6. ábrán a rendszer kísérleti megvalósulása látható, amely egy projektort, két nézőponti kamerát és egy vetítési felületet tartalmaz. Ebben a fejezetben bemutatott eredményképek esetén ezt a rendszert használtuk a kivetítéshez és a rekonstruáláshoz.



**6.Ábra.** A rendszerben lévő projektor, kamera és szintér elhelyezkedése.

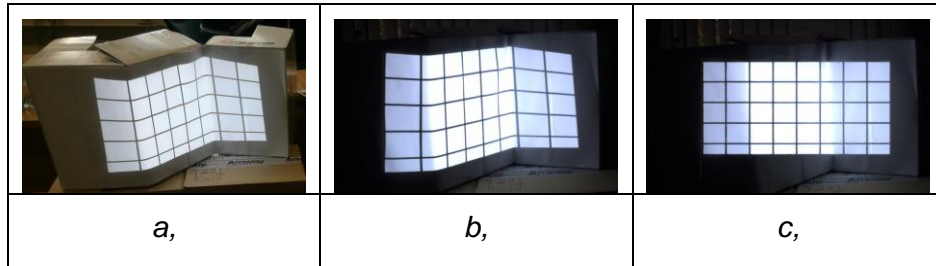
A rekonstrukció illusztrálásához az alábbi képet használtuk: (lásd 7. ábra)



**7.Ábra.** A rekonstrukcióhoz használt mintakép.

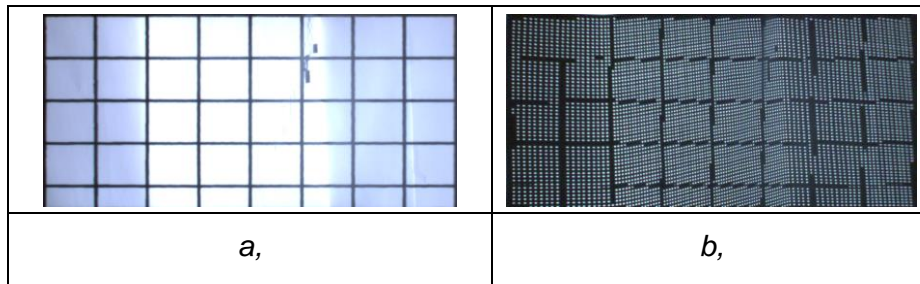
Az 8.a. ábrán látható egy külső kamerából felvett kép, amit azért mutatunk, hogy jobban látszódjon a torzulás az olvasó számára. A 8.b. ábrán ugyanaz a kivetített kép látható, de ez már a kamerán keresztül van felvéve, végül pedig 8.c. ábrán a rekonstruált kép látható, amelynek a geometriája a kamera szemszögéből helyes.





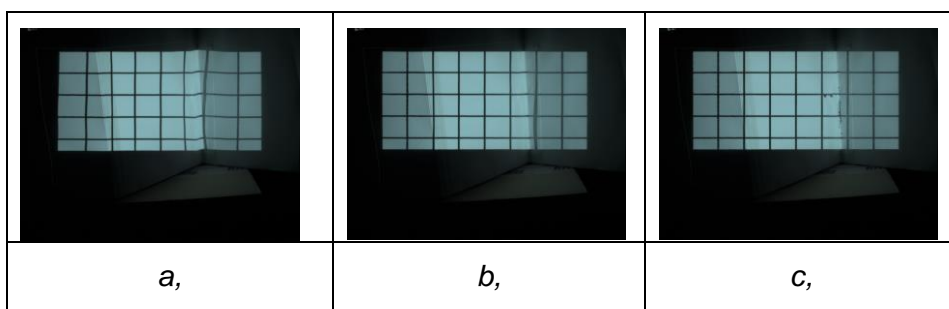
**8.Ábra.** Mintakép véletlen pozícióból lefotózva (a), kamera pozíciójából felvéve (b) és a visszaállított mintakép a kamera pozíciójából felvéve (c).

A 9.a. ábrán látható a visszaállítás, amely esetén interpolációt használtuk, a kép pedig a kamera szemszögéből van felvéve. A 9.b. ábrán pedig az interpoláció nélküli eredményt látjuk, szintén a kamera szemszögéből.



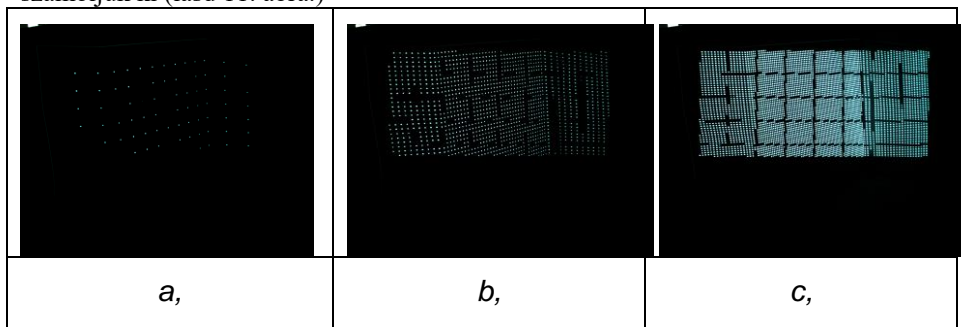
**9.Ábra.** Rekonstrukció interpolációval (a) és interpoláció nélkül (b).

Minél magasabb szintű Gray-kódot vetítünk ki, vagyis minél több sort és oszlopot tudunk logikai és művelettel összekapcsolni, annál pontosabb lesz a rekonstrukciónk. Interpolációval a geometria feljavulását a 10.a. , 10.b., illetve a 11.c. ábrán láthatjuk.



**10.Ábra.** Interpolációval való visszaállítás 3-as Gray-kód (a), 5-ös Gray-kód (b) és 7-es Gray-kód esetén (c).

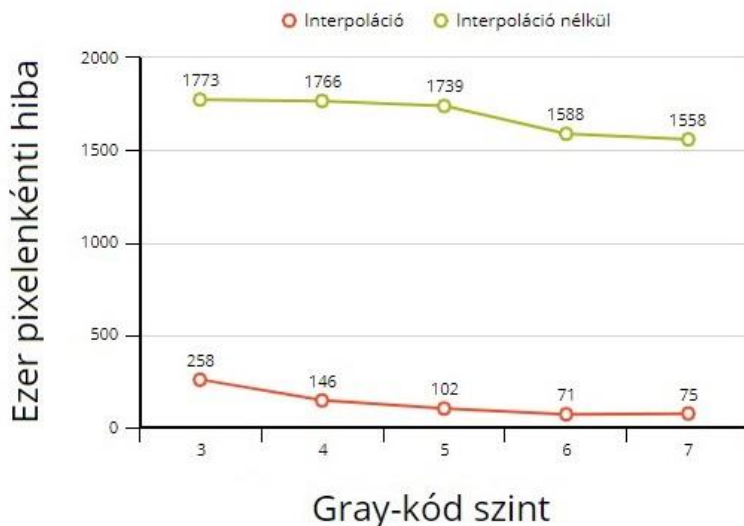
Az interpolációs módszerrel szemben az interpoláció nélküli visszaállítás kisebb szinten sokkal pontatlanabb, ugyanis itt a középpontok közötti képpontokat nem számoljuk ki (lásd 11. ábra.)



**11.Ábra.** Interpolációval nélküli visszaállítás 4-es Gray-kód (a), 6-os Gray-kód (b) és 7-es Gray-kód esetén (c).

Az eltérés méréséhez a visszaállított kép, illetve a 7. ábrán látható mintakép különbségét vettük. Mind a két képet átalakítottuk binárisá, majd megszámoltuk az eltérő pixeleket. A 12. ábra megmutatja, hogy 4., 5., 6. szinten mekkora a hibaarány az eredeti kép és a visszaállított kép között.

### Interpoláció és interpoláció nélküli hibaérték összehasonlítás



**12.Ábra.** Hibaszám változása a kivetített Gray-kód növelésével.

A grafikon azt mutatja, hogy az interpolációs esetben a 6. szintű Gray-kód kivetítés reprodukálta a legjobb eredményt, míg az interpoláció nélküli esetben a 7. szintű Gray-kód kivetítéssel érték el a legjobban hasonlító visszaállított képet.

## **Köszönetnyilvánítás**

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely az EFOP-3.6.1-16-2016-00006 „A kutatási potenciál fejlesztése és bővítése a Neumann János Egyetemen” pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával, a Széchenyi 2020 program keretében valósul meg.

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, mely a GINOP-2.2.1-15-2017-00083 „Kiterjesztett valóság alapú, 3D orvosi képek és a valóság egyesített vizualizációját megvalósító, innovatív egészségügyi segédeszköz (zMed) fejlesztése az orvos-beteg kapcsolat és az oktatás támogatására” pályázat keretében a Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet együttműködésével valósul meg.

## **Irodalomjegyzék**

1. Surati, Rajeev Jayantilal, Scalable Self-Calibrating Display Technology for Seamless Large-Scale Displays, Massachusetts Institute of Technology, 1999.
2. Ruigang Yang, David Gotz, Justin Hensley, Herman Towles, PixelFlex: A Reconfigurable Multi-Projector Display System, Proceedings of IEEE Visualization, 2001.
3. Ramesh Raskar, Jeroen van Baar, Paul Beardsley, Thomas Willwacher, Srinivas Rao, Clifton Forlines, iLamps: Geometrically Aware and Self-Configuring Projectors, ACM Transactions on Graphics, 22(3), 2003.
4. Mark Ashdown, Matthew Flagg, Rahul Sukthankar, James M. Rehg, A Flexible Projector-Camera System for Multi-Planar Displays, Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2004.
5. B. Zhu, L. Xie, Q. Wang, T. Yang and Y. Zheng, An Intelligent Projection System Adapted to Arbitrary Surfaces, 2011 First International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, Beijing, 2011, pp. 293-298.
6. T. Petkovic, T. Pribanic, and M. Donlic: Single-Shot Dense 3D Reconstruction Using Self-Equalizing De Bruijn Sequence. IEEE Transactions on Image Processing, Volume: 25, Issue: 11, Nov. 2016. pp. 5131 – 5144