

ADOTT NÉZŐPONTBÓL HELYES TARTALOM VETÍTÉSE TETSZŐLEGES FELÜLETRE

VIEWPOINT CORRECT CONTENT PROJECTION ON ARBITRARY SURFACE

Bajusz László ², Kátai-Urbán Gábor ¹, Pintér István ¹, Megyesi Zoltán ²

¹ Informatika Tanszék, Gamf Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

² Számítógépes Optikai Érzékelés és Feldolgozás Kutatólaboratórium, MTA-SzTAKI, Magyarország

Kulcsszavak:

3D Rekonstrukció
Aktív fény szkennelés
Gray-Kód
Vetítés
3d tartalom

Keywords:

3D Reconstruction
Active Light Scanning
Gray Code
Projection
3D content

Cikktörténet:

Beérkezett 2018. szeptember
21.
Átdolgozva 2018. október 29.
Elfogadva 2019. március 01.

Összefoglalás

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).

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

Abstract

The geometrical distortion of an unknown and uneven surface may limit or even render the use of that surface as a projection surface impossible. Compensating the geometrical distortion, an arbitrary surface can be used as a projection surface, giving way to numerous applications (including keyboard projected on tables, artistic pattern projection on buildings, or even 3D augmented reality applications)

In this article we show that the geometrical distortion of a Lambertian surface can be compensated using Gray Code based active light reconstruction and show example usage.

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 a hagyományos 2D megjelenítők esetén a vetítési felület minden pontja minden irányban azonos színt bocsát ki, továbbra is fennáll az a feladat, hogy felületi pontoknak a tartalom szerint megfelelő színt kell kibocsátaniuk.

* Kátai-Urbán Gábor. Tel.: +36-76-516-425

E-mail cím: katai-urban.gabor@gamf.uni-neumann.hu

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 színtér 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 (homográfiaival) kompenzálható. A transzformáció automatikus

megtalálásához általában valamilyen speciális mintát vetítenek a felületre, amit egy (vagy több) kamera segítségével detektálnak[1][2].

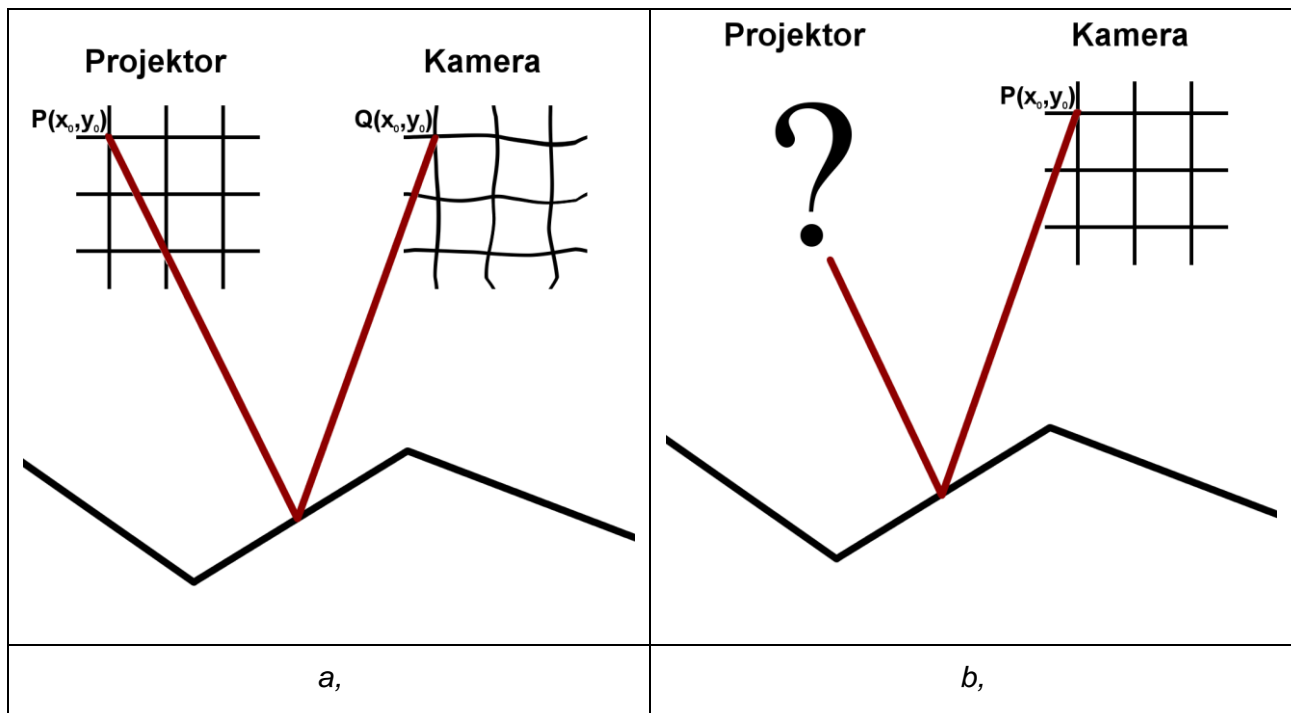
Általános felületre való vetítés esetén a kompenzálásban a legnagyobb nehézséget a felület pontos modellezése adja. Szabályos geometriai alakzatok esetén, mint például gömb, vagy íves felületek a modell közvetlenül megadható egy négyzetes függvény segítségével, amivel egyszerűbben boldogulhatunk. Azonban 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 színtérre 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-féle felület legyen, vagyis minden irányban diffúzan szórjon.

4. Strukturált fény

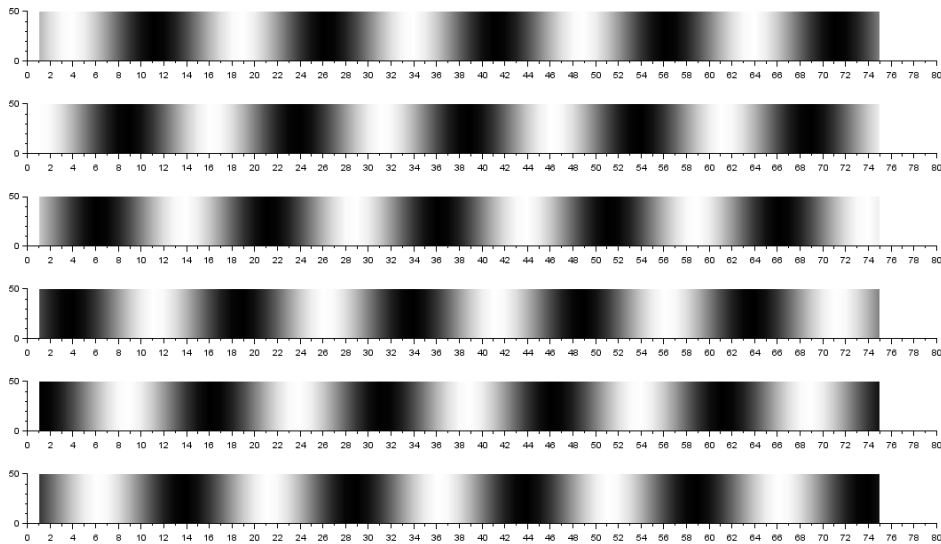
A strukturált fény előállítására a térbeli felület alakjának mérésére szolgáló egyik érintésmentes eljárás alapja. Ebben az esetben megváltozik a felületre vetített fény mintázata a referencia-síkhoz képest, és ebből becsülhetők meg a felület pontjainak koordinátái. Az alapelrendezésben egy kamera és 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* lézertfény-csíkokat vetítenek a tárgyfelületre, és a vett kamerakép alapján végzik el a felületelemek referencia-síktól mért távolságának számítását. Másik megközelítésben - a *mozgatást 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 szinuszfüggvény 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.

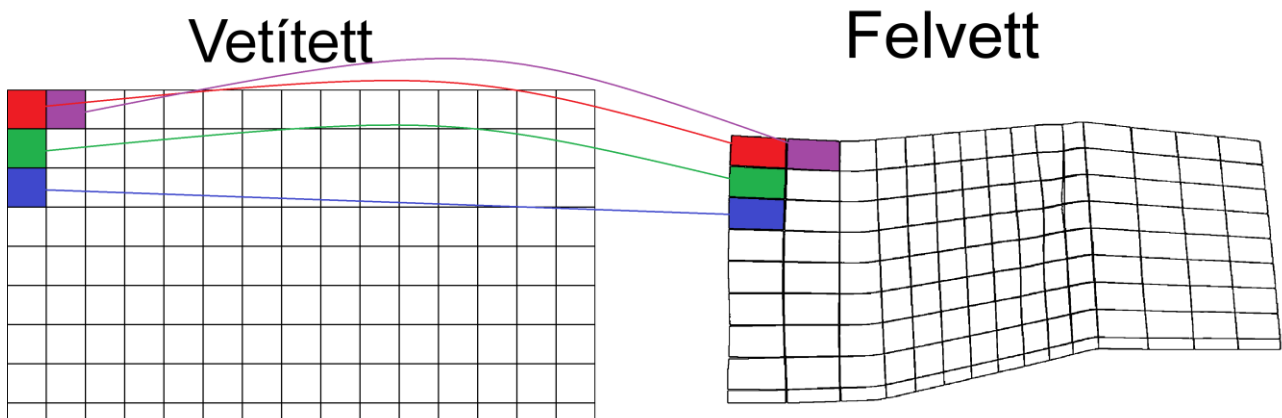
Megjegyzendő, hogy az egyetlen kép vetítésére alapozott módszer mozgó tárgyak esetében is alkalmazható, míg a képsorozat vetítése nem mozgó helyzetben lévő tárgyak esetén jellemző. A képsorozat esetében azonban a zaj hatása kevésbé jelentkezik, mint egyetlen kép vetítésekor. A fent említett módszereket 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.

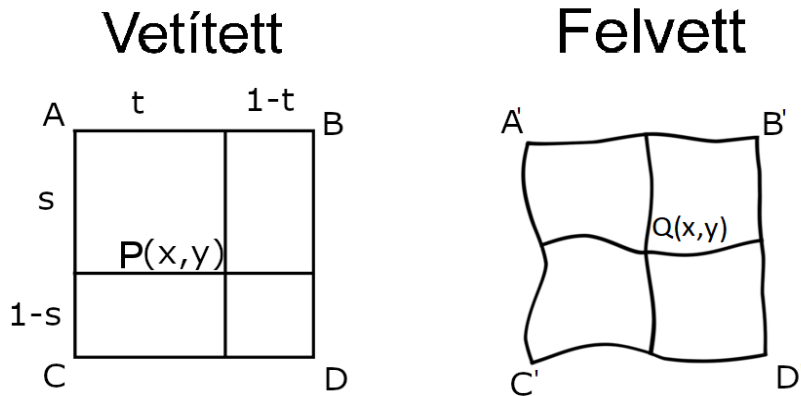


4. ábra. Vízszintes és függőleges rács kialakítása logikai és művelettel.

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 tudunk rendelni a vetített képhez. A másik az interpoláción alapul, amelynél a kivetített Gray-kód mélysége a felület egyenetlenségétől függ.

Az interpolációs módszer esetében bilineáris interpolációt alkalmazunk, amely első lépése, hogy kiválasztunk egy P pontot, és a hozzá tartozó legközelebbi négy középpontot. Ez könnyen elképzelhető úgy, hogy a 4. ábrán látható *vetített* felirat alatti piros négyzet területéről kiválasztunk egy $P(x,y)$ pontot, amely esetén a hozzá tartozó legközelebbi középpontok a piros, lila, zöld, illetve a zöldtől közvetlen jobbra lévő terület középpontja adja meg. Minden $P(x,y)$ pontnak van egy (t,s) értékpárja, amely azt adja meg, hogy a kiválasztott pixelhez tartozó középpontok mekkora súlyt érnek. Az 5. ábra mutatja, hogy az általunk kiválasztott $P(x,y)$ ponthoz az A,B,C,D középpont tartozik, mely téglalap esetén a t és az s változó jelöli az arányokat. Szintén ugyanezen az ábrán, a *felvett* felirat alatti képen a $Q(x,y)$ pontot kiválasztva megkapjuk, hogy a *vetített* kép melyik fénysugara, vagyis melyik $P(x,y)$ pontja tartozik hozzá.



5. ábra. A *vetített* $P(x,y)$ képponthoz tartozó $Q(x,y)$ pont, és a hozzájuk tartozó legközelebbi középpontok.

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 pixelre mely Q pixelhez tartozik a *kivetített* képen. A vesszővel jelzett változók a *vetített* kép legközelebbi középpontjainak koordinátáját jelentik.

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

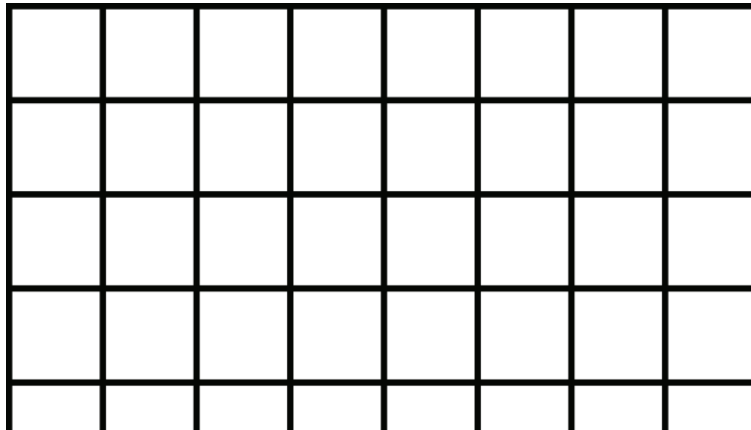
6. Eredmények és értékelés

A 6. ábrán a rendszer kísérleti megvalósulása látható, amely egy projektort, két nézőponti kamerát és egy *vetítési* felületet tartalmaz.



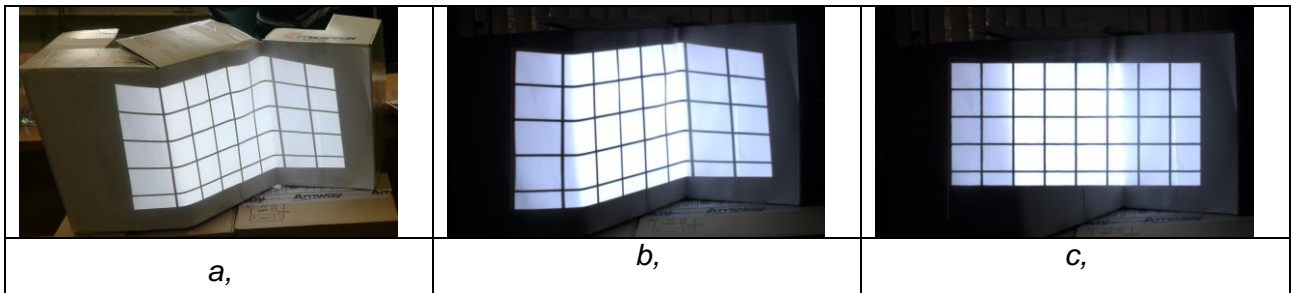
6. ábra. A rendszerben lévő projektor, kamera és színtér elhelyezkedése.

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



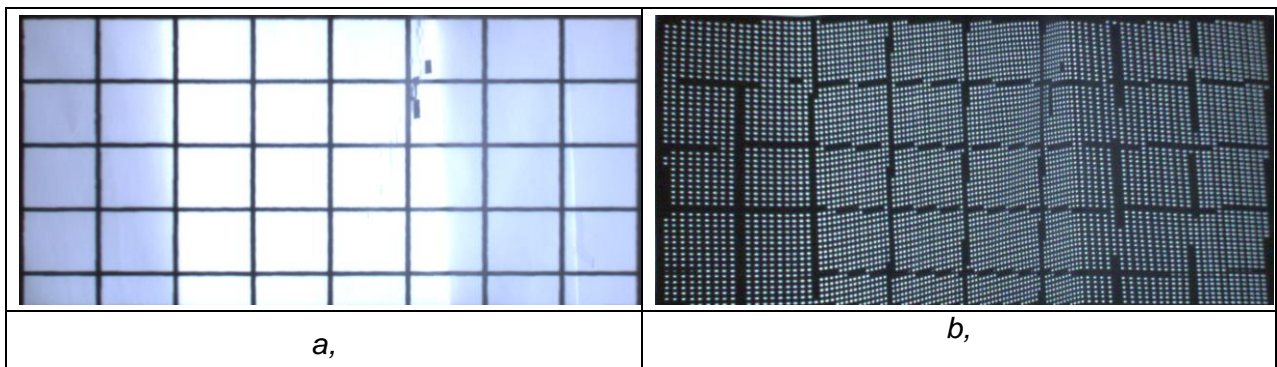
7. ábra. A kivetítéshez használt mintakép.

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 visszaállított kép látható, amelynek a geometriája a kamera szemszögéből helyes.



8. ábra. A mintakép véletlen pozícióból lefotózva (a), a kamera pozíciójából felvéve a visszaállítás előtt (b) és után (c).

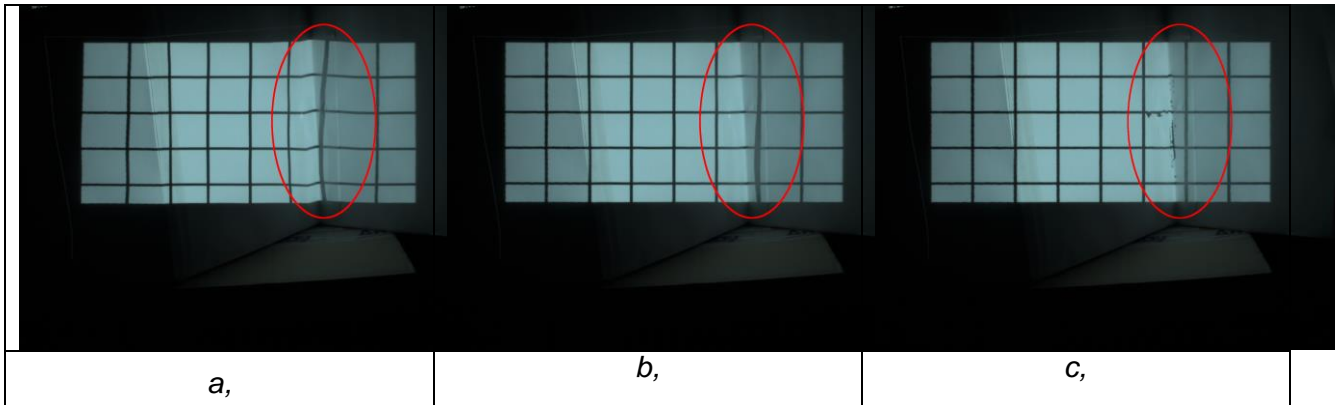
A 9.a. ábrán látható a visszaállítás, amely esetén interpolációt használtuk, a kép pedig a kamera szemszögéből van felvéve. A 9.b. ábrán az interpoláció nélküli eredményt látjuk, szintén a kamera szemszögéből.



9. ábra. Visszaállítás interpoláció használatával (a), és interpoláció nélkül (b).

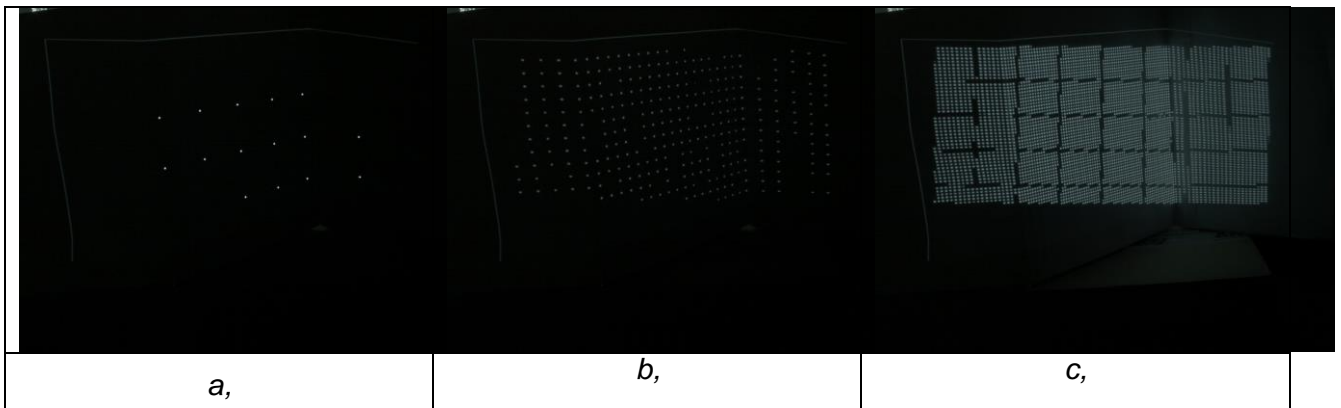
Minél magasabb szintű Gray-kódot vetítünk ki, vagyis minél több sort és oszlopot tudunk a logikai és művelet segítségével összekapcsolni, annál helyesebb lesz a visszaállított kép geometriája.

A 10. ábrán a kamerából felvett, visszaállított képek láthatóak. A piros ellipszissel jelölt terület a vetítendő felszín nagymértékű torzulását jelzi (a felszínen körülbelül 60°-os változás látható), amely esetén a Gray-kód szint növelésével a tartalom geometriai javulását érzük el.



10. ábra. 3-as (a), 5-ös (b) és 7-es (c) Gray-kód szinttel történő visszaállítás interpolációval.

Az interpolációs módszerrel szemben az interpoláció nélküli visszaállítás kisebb szinten sokkal pontatlanabb tartalmi megjelenítést eredményez, ugyanis itt a középpontok közötti képpontokat nem számoljuk ki (lásd 11. ábra). Ez a módszer akkor ad tartalmilag is pontos eredményt, hogyha a Gray-kód olyan magas szintű, hogy a felvett képen a középpontok közvetlenül egymás mellett és alatt helyezkednek el, vagyis nincs szükség azon képpontok meghatározására, amelyet az interpolációval végzünk.

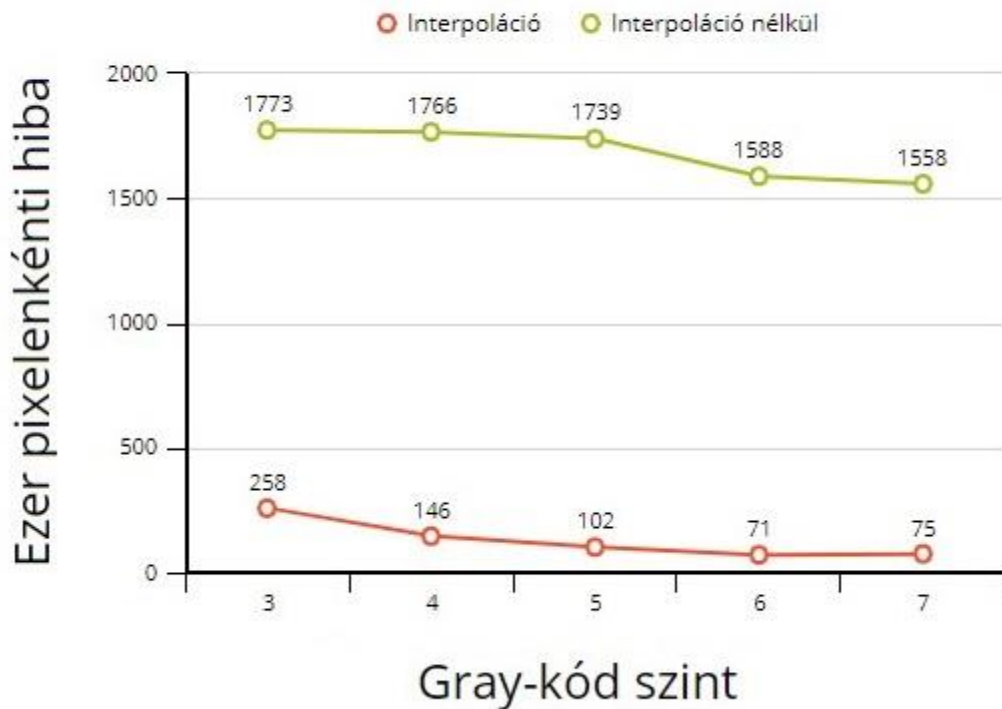


11.a. ábra. 3-as (a), 5-ös (b) és 7-es (c) Gray-kód szinttel való visszaállítás interpoláció nélkül.

A kamerából felvett, visszaállított kép tartalmi pontosságának méréséhez szükség van a kamerából felvett kép azon részére, amelyre a visszaállított tartalmat vetítettük, illetve a 7. ábrán látható mintaképre. Az eltéréshez ezek különbségét vettük. Mind a két képet átalakítottuk binárisra, vagyis az egyes képekhez tartozó képpontok értékei 0-át (feketét) vagy 255-öt (fehéret) tartalmaznak. A különbségkép esetén azok a pixelek, amelyek nem egyeznek meg, fehér színnel vannak megjelenítve, a megegyező pixelek pedig feketével. A fehér pixelek száma megadja, hogy mekkora a különbség a visszaállított, illetve a kivetítéshez használt kép esetén.

A 12. ábra megmutatja a 3. szinttől egészen a 7. szintig terjedő Gray-kód esetében interpolációval és interpoláció nélkül a hibaarányt az eredeti kép és a visszaállított kép között.

Interpoláció és interpoláció nélküli hibaérték összehasonlítás



12. ábra. Hibaszám változása a kivetített Gray-kód növelésével.

Az 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 értük el a legjobban hasonlító visszaállított képet.

Ahhoz, hogy egy adott nézőpontból helyes geometriai tartalmat lássunk, miközben tetszőleges felületre vetítünk, az általunk használt módszer esetén szükséges a bilineáris interpoláció használata. Ezen módszer a megtalált középpontok meghatározása után elkészíti a teljes 2D-2D megfeleltetést. A megfeleltetés segítségével pedig helyesen tudjuk megszínezni a fénysugarakat úgy, hogy a kamera szemszögéből a kivetített tartalmat torzulás nélkül lássuk.

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, 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