

# Kamera-projektor rendszer radiometrikus kalibrációja

Egri Attila, Fodor Bálint

MTA SZTAKI

Geometriai Modellezés és Számítógépes Látás labor  
egri@vision.sztaki.hu, fodor@vision.sztaki.hu

**Absztrakt.** Módszerünk kamera-projektor rendszerben az eszközök radiometrikus kalibrációját végzi. A kalibráció eredményeként meghatározott paraméterek alapján a mérési környezetben biztosítható, hogy a kivetített és a kamera digitális képének pixelértéke arányos legyen a színtér adott pontjában vett valódi fény mennyiséggel. Az eljárás a fény mennyiség szuperpozíciós elvén alapul. A mérés alapját szolgáló színtértől és a kamera-projektor konfigurációtól azt várjuk el csupán, hogy a fényforrásból induló, a kameraszenzorra a színtéren való egyszeres visszaverődés után eső fénysugarak (direkt megvilágítás) mellett legyenek olyanok is, amelyek közvetetten, több visszaverődés után jutnak el a kamerába. A gyakorlatban ez például a színtérbe egy üvegtárgy elhelyezésével oldható meg.

## 1. Bevezetés

Az általános, kereskedelemben elterjedt kamerák a színtér adott pontjának radianciáját egy nemlineáris torzítással vetítik át a pontnak megfelelő pixel értékére a kapott digitális képen. Projektorok esetében hasonló jellegű az átvitel a kép pixelintenzitása és a pixel által megvilágított területről a kamerába eső valódi fény mennyiség között. Munkánk a kamerából és projektorból álló mérőrendszerben lévő torzítások meghatározására irányul, azzal a céllal, hogy a kinyert nemlineáritások felhasználásával a kívánt intenzitással arányos fény mennyiség kerüljön kivetítésre és a kameraszenzorra vetülő fény mennyiséggel arányos legyen a kapott pixelérték.

Számos képfeldolgozási algoritmus alapszik azon a feltételezésen, hogy a kép pixeleinek értéke a színtérről a kamerára eső fény mennyiséggel megegyezik, de legalábbis arányos azzal. Általában a képkalkotó eszközök gyártási hibából vagy a tervezésből adódóan nem elégitik ki ezt a feltételt. Ennek okán szokás a mért képeket az eszköze jellemző torzítás inverzével kompenzálni. Az így kapott kép értékei tehát arányosak a valós fény mennyiséggel.

Különböző megoldások léteznek a radiometrikus kalibrációra. Ezek közül a legtöbb azonos helyzetű kamerával, de különböző expozíciós idővel készített képek sorozatát igényli. Mann és Picard [1] parametrikus görbeillesztést végez az expozíciós idők közti arányok ismeretében. A használt görbe az  $x^\gamma$ ,  $x \in [0, 1]$  gamma függvény, mely gyakran indokolt és alkalmazott [1]. Debevec és Malik

[2] munkája ismert záridők alapján, a görbe elemeit külön számítva működik. A meghatározott átviteli görbe simasága egy paraméterrel állítható. Az expozíciós idők arányára vonatkozó bizonytalanabb becslésből indul ki [3]. Feltételezve, hogy a torzítás polinom alakú Mitsunaga és Nayar [3] iteratíván határozza meg az átvitelt.

Lin és társai [4] által javasolt módszer egyetlen színes kép alapján becsli a torzítást. A feltételezés az, hogy a képen két különböző színű tartomány határán a pixelek színei lineárisan változnak a két tartomány színei között, ha nem lenne torzítás. Megfelelő számú tartományhatár átmenetét vizsgálva meghatározható a nemlineáritás. Lin és Zhang [5] kiterjeszti az előbbi ötletet egyetlen szürkeárnyalatos képre.

Manders és társai [7] alapötlete a fény mennyiség szuperpozícióján alapszik. Kettő vagy több fényforrást külön-külön, majd együttesen felgyújtva végzi a mérést. Lineáris torzítás esetén az egy-egy aktív lámpával készített képek összegének ki kell adnia az együttesen kapott képet.

Az általunk javasolt megoldás szintén a szuperpozíció elvén működik. Munkánk célja kamera-projektor rendszer gyors, egyszerű kalibrálása volt úgy, hogy plusz eszköz felhasználására ne legyen szükség. A Mandersék [7] által javasolt módszerhez képest így az alapvető eltérés, hogy mi csak egy fényforrást, a (radiometrikusan kalibrálatlan) projektort használjuk. Mivel a projektor radiometrikusan kalibrálatlan, a mérés során nem használható ki annak intenzitástartománya. (Ekkor ugyanis például két fél intenzitású kép összege eltérhet a teljes intenzitásútól akkor is ha már a kivetítés során torzítás lép fel.) Megoldásunk arra alapszik, hogy érzékelhető indirekt fényvisszaverést tartalmazó színterek esetén egy fekete-fehér bináris kép kivetítése során a bevilágítatlan területekre is eshet fény.

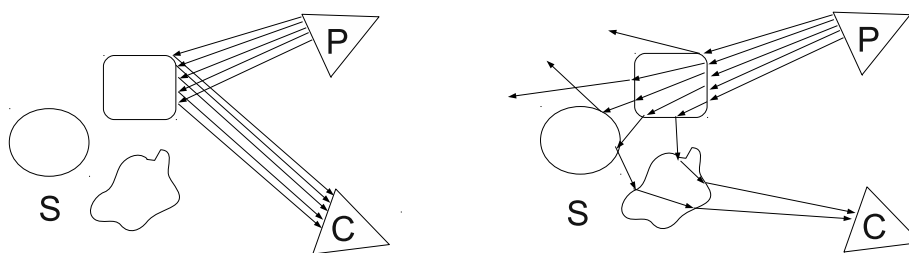
## 2. Radiometrikus kalibráció

A radiometrikus kalibrációnk célja, hogy a szuperpozíció elve teljesüljön, vagyis az hogy két különböző fényforrás által kapott megvilágítás az egyes megvilágítások összege. Speciálisan kamera-projektor rendszer esetén ez a következő két elvárást jelenti:

1. a kamera átvitele legyen lineáris: Kivetítve a projektorral egy olyan bináris képsorozatot, ahol az egyes képek nem átfedőek (minden pixel csak egy képen világos), de az összegük a teljes világos képet adja, akkor a képsorozat alatt készített kameraképek összege egyezzen meg a teljes megvilágításról készített képpel.
2. a projektor átvitele legyen lineáris: Kivetítve a projektorral egy  $p$ , egy  $255 - p$  illetve egy  $255$  intenzitású képet, az első kettőről készített kameraképek összege egyezzen az utolsóról készített kameraképpel.

Algoritmusunk az ebből a két feltételből adódó hibákat minimalizálja.

**Kamera** A színtér képe a kamera szenzorára beeső fénysugarak által jön létre. Ezek közül különböztessük meg azokat a fényforrásból induló sugarakat, melyek a színtér tárgyairól lepattanva közvetlenül, direkt módon a szenzorra esnek. A kamerában végződő maradék fénysugár útja a forrástól indulva közvetetten, indirekt módon éri el a szenzort. Ez a szétválasztás látható az 1. ábrán.



**1. ábra:** P projektorból induló, C kamerába érkező direkt (bal ábra) és indirekt (jobb ábra) fényutak az S színtéren.

Ha egy ideális színtér olyan tárgyakat tartalmazna, hogy a kamerába csak direkt verődő sugarak esnének, akkor a projektoron felgyűjtött pixelek két diszjunkt halmaza, a kameraképeken is diszjunkt halmazokat eredményeznének. Ha viszont a színtéren mérhető indirekt hatás is létrejöhet, akkor van olyan két kivetített diszjunkt minta és a kameraképen egy pixel, mely pixel mindkét megvilágítással pozitív intenzitást kap. Ezt a megfigyelést szemlélteti a 2. ábra.

Lineáris kameraátvitel esetén a két diszjunkt mintával kapott kép összegének meg kell egyeznie a minták együttes felgyűjtésével kapott képpel.

A valóságban tisztán direkt visszaverődéseket produkáló színteret nem lehet létrehozni. Ahhoz, hogy az indirekt visszaverődések mért intenzitásai nagy változatosságot mutassanak, a színtérbe elhelyezhetünk például egy üvegtárgyat.

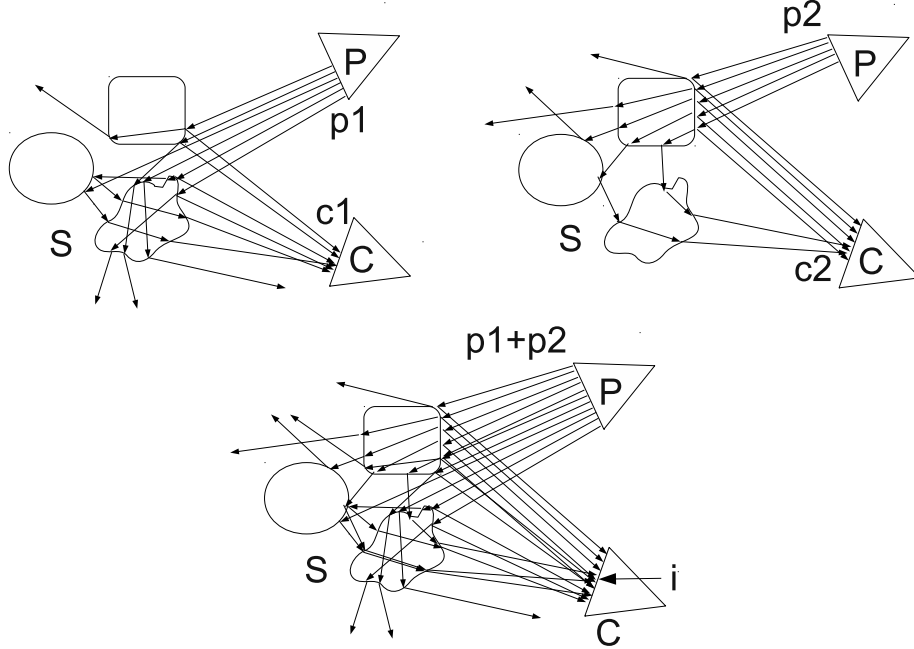
Jelölje  $W$  azt képet, ami akkor készül mikor a projektor minden pixele világít,  $B$  amikor egyik sem,  $C_1$  valamely része és  $C_2$  mikor  $C_1$  inverze. Ekkor lineáris kamera átvitelt feltételezve írható:

$$(C_1 - B) + (C_2 - B) - (W - B) =$$

$$C_1 + C_2 - W - B = 0. \tag{1}$$

A  $B$  képpel történő kivonások amiatt szükségesek, mivel a projektor fekete kép vetítése során is sugároz ki fényt (*black level* jelenség). A kamera nemlineáris átvitelét leíró függvényt jelölje  $f$ . A mérések alapján a következő összeget tudjuk felírni:

$$f(C_1) + f(C_2) - f(W) - f(B), \tag{2}$$



**2. ábra:** Fent balra: az S színtér P projektor p1 pixeleivel való megvilágítása, ami a C kamera c1 képpontjait gyűjtja fel; fent jobbra: a színtér p1-től diszjunkt p2 mintával való megvilágítása; p1 és p2 minták együttes felgyűjtása, a kamera i pixele minden képen meg van világítva.

ami általában nem egyenlő 0-val. Tegyük fel hogy a  $C_1$  képen egy adott területet megvilágít a projektor és az így adódó direkt komponens látható a kamera képen. Jelölje  $i$  az ennek a területnek megfelelő kamera pixelt. Ekkor az ezen a területen mért intenzitás érték  $D_i + I_i^{C_1}$ , ahol  $D_i$  a direkt, míg  $I_i^{C_1}$  az indirekt részt jelenti. A  $C_2$  inverz kép ugyanezen területén  $D_i$  direkt komponens biztos nem jelenik meg, csak valamikorra  $I_i^{C_2}$  indirekt. Erre a pixelre a 2. összeg:

$$f(D_i + I_i^{C_1}) + f(I_i^{C_2}) - f(W_i) - f(B_i),$$

( $i$  a pixeleken fut végig) ami csak abban az esetben lenne 0, ha  $f$  lineáris. Tehát a 2. összeg azokban a pixeleken lesz csak nulla, ahol vagy csak direkt vagy csak indirekt hatást látunk, mivel ebben az esetben a  $C_{1i}, C_{2i}$  egyike  $B_i$ -vel, másika  $W_i$ -vel egyezik meg. A  $g = f^{-1}$  ( $f$ -ről feltesszük hogy monoton) függvény az 1. egyenletben felírt kényszert felhasználva így a következő hiba minimalizálásával becsülhető:

$$\sum_i (g(f(C_{1i})) + g(f(C_{2i})) - g(f(W_i)) - g(f(B_i)))^2 \rightarrow \min. \quad (3)$$

Hasonlóan Mandersék gondolatmenetéhez [7] a  $g$  függvény csak egy véges számú (a lehetséges pixelintenzitások számával megegyező) értékét kell meghatározni. Ebben a megközelítésben a minimalizálandó hibafüggvény (3. egyenlet) lineáris lesz,  $\mathbf{A}\mathbf{h} = \mathbf{0}$  alakra hozható. Az  $\mathbf{A}$  oszlopindexe jelenti a lehetséges  $h_i$  pixelértékeket míg a hozzájuk tartozó  $g(h_i)$  értékeket a  $\mathbf{h}$  ismeretlen vektor tartalmazza. Például legyenek a  $j$ -edik pixelpozícióban a mért  $f(C_{1i}), f(C_{2i}), f(W_i), f(B_i)$  értékek 20, 30, 46, 2. Ekkor az  $\mathbf{A}$  mátrix  $j$ -edik sorának 20-as és 30-as oszlopában 1, míg a 46-os és 2-es sorában  $-1$  áll (az összes többi pedig nulla), ami pont azt jelenti, hogy  $g(20) + g(30) - g(46) - g(2) = 0$ .

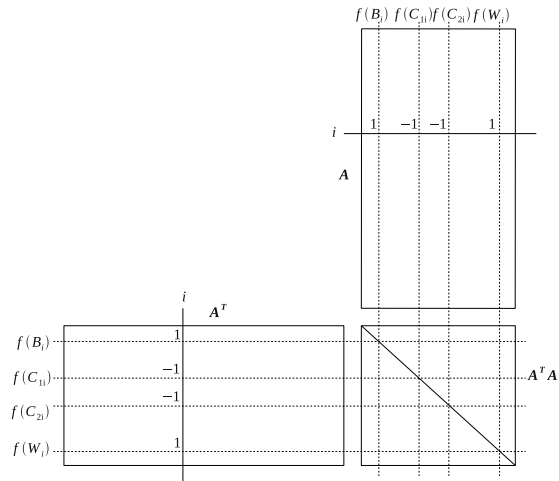
Az így kapott egyenletrendszer megoldása az  $\mathbf{A}$  mátrix szinguláris értékek szerinti felbontásával megkapható:  $\mathbf{A} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}$  és a megoldás  $\mathbf{V}$  legkisebb szinguláris értékhez tartozó oszlopa. Ez megegyezik az  $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$  mátrix legkisebb sajátértékhez tartozó sajátvektorával.  $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$  mátrix méretét  $\mathbf{A}$  oszlopainak száma határozza meg, vagyis a lehetséges pixelértékek száma (legtöbb kamera esetén ez 256).

Ráadásul  $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$  meghatározásához a figyelembe vett pixelpozíciókat csak egyszer kell bejárni. A kezdeti  $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$  mátrix elemeit nullára inicializáljuk. Az  $i$ -edik pixelpozíció feldolgozása az  $\mathbf{A}$  mátrix  $i$ -edik sorának meghatározását jelenti. Ennek a sornak a nem nulla elemeit az  $f(C_{1i}), f(C_{2i}), f(W_i), f(B_i)$  értékek adják meg, az  $f(W_i), f(B_i)$  indexű elemekhez hozzá kell adni míg az  $f(C_{1i}), f(C_{2i})$  indexűekből le kell vonni egyet (azért nem  $\pm 1$ -et kell írni, mert előfordulhat, hogy ugyanabban a pixelpozícióban több képen is ugyanazt a pixelértéket kapjuk).

Az így kapott nem nulla elemek összes lehetséges szorzatát kell meghatározni (valójában csak a felét mert az  $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$  mátrix szimmetrikus) és a szorzatpárok indexei által meghatározott  $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$  mátrix elemhez a szorzatértéket hozzáadni (lásd 3. ábra). Abban az esetben ha az adott képsorozat valamely pixelértékről nem hordoz információt (az adott pixelérték egyik képen sem fordul elő, vagy csak olyan pixelpozíciókban, ahol indirekt visszaverődés nem volt mérhető) az  $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$  mátrix ennek megfelelő sora és oszlopa nulla lesz. A sajátérték feladat megoldása előtt ezeket a sorokat/oszlopokat törölni kell.

A gyakorlatban valójában globális hatást okozó tárgy elhelyezése a színtérben nem szükséges. Ez annak köszönhető, hogy megvizsgáltunk a különböző technológiákat (LCD, DLP, LCoS) alkalmazó projektorokat, és azt tapasztaltuk, hogy a felgyújtott pixelek körül egy jelentős holdudvart képeznek (4. ábra). Azokon a területeken ahol ez a holdudvar hatás megjelenik a 2. egyenletben felírt összeg nem lesz nulla, mivel  $C_1, C_2$  kép egyikén a holdudvar hatást látjuk, míg a másikon a holdudvar plusz direkt komponenset.

**Projektor** A radiometrikusan kalibrált kamera esetén a projektor kalibrációja egyszerű a 2. elvárás alapján. Kivetítve két  $(0 - 255), (255 - 0)$  gradiens és egy 255 teljesen felgyújtott képet, a radiometrikusan kompenzált kameraképre igaznak kell lennie, hogy az első kettő összege megegyezik az utolsó képpel.



**3. ábra:** Az  $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$  mátrix számítása.  $i$  jelöli az  $i$ -edik pixelpozíciót vagyis az  $\mathbf{A}$  mátrix  $i$ -edik sorát.  $f(C_{1i}), f(C_{2i}), f(W_i), f(B_i)$  ebben a pixelpozícióban mért pixelértékek adják  $\mathbf{A}$  mátrix  $i$ -edik sorának nem nulla értékeit. Az  $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$  mátrixot az  $i$ -edik pixelpozíció figyelembevételkor úgy kell módosítani, hogy a kapott nem nulla értékek szorzatait a megfelelő indexű elemekhez hozzá kell adni.

## 2.1. Eredmények

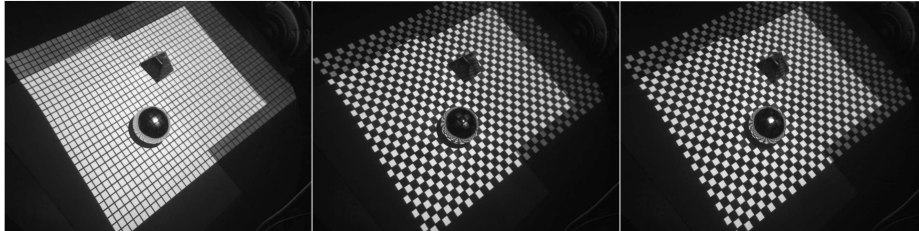
Az eljárásunkat pontosság szempontjából Mandersék [7] módszerével hasonlítottuk össze, mivel az az expozíciós alapú algoritmusoknál jobb eredményt hozott. Mandersék módszeréhez a két különböző megvilágításhoz két asztali lámpát használtunk. A projektoros megvilágításnál egy olyan sakktábla mintát használtunk, ahol az élátmeneteket kimaszkoltuk (lásd 5. ábra). Erre azért volt szükség, mert a kamera az élátmeneteket kismértékben elmossa. Két színteret vizsgáltunk. Az első esetben (sc0) semmilyen tárgyat (a projektor holdudvar hatását használtuk ki), míg a másodikban (sc1) egy csillogó golyót és egy üvegből készült piramist helyeztünk el a kamera látóterében. Az eredményeket az 1. táblázat mutatja. Az oszlopok a különböző módon számolt kalibrációkat jelenti (például Manders/sc1: Manders módszere az egyes színtér esetén), a sorok a színterekre számolt hibákat (például sc1/lámpa: hiba lámpás megvilágítás és egyes színtér esetén). A hiba a 3. egyenlettel számolt összeg egy pixelre adódó része. Az eredményekből látszik, hogy abban az esetben ha tárgyat is elhelyeztünk a színtérben az általunk javasolt módszer mind a négy esetben jobb eredményt ad.

## 2.2. Konklúzió

Munkánk célja kamera-projektor rendszer radiometrikus kalibrációja volt. Az általunk javasolt eljárást egy azonos elvű másik kalibrációs módszerrel hasonlítottuk össze. Kamera-projektor rendszer esetén a mi módszerünk prak-



**4. ábra:** Projektor holdudvar effektusa, a holdudvar intenzitástartományát gamma torzítással kiemeltük.



**5. ábra:** A projektoros megvilágítás  $W, C_1, C_2$  képe. Az élatmeneteket 3 pixel szélességben kimaszkoltuk.

tikusabb, mivel nem igényel plusz fényforrást a projektoron kívül. A mérési eredmények azt mutatták, hogy az általunk javasolt módszer pontosabb abban az esetben, ha nem csak a projektor holdudvar effektusát használjuk ki.

**1. táblázat:** Mérési eredmények

	Manders/sc0	Manders/sc1	saját/sc0	saját/sc1
sc0/lámpa	3.741	2.850	3.720	0.871
sc1/lámpa	4.337	3.446	5.255	1.283
sc0/projektor	5.074	3.386	3.759	0.870
sc1/projektor	4.937	3.226	3.703	0.891

## Irodalom

1. S. Mann and R. Picard. Being 'undigital' with digital cameras: extending dynamic range by combining differently exposed images. In *Proc. of IS & T, 48th annual conference*, pp.422-428, 1995.
2. P. E. Debevec and J. Malik. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. In *Proc. of ACM SIGGRAPH*, pp. 369-378, 1997.
3. T. Mitsunaga and S. K. Nayar. Radiometric self-calibration. In *Proc. of Computer Vision and Pattern Recognition. (CVPR)*, vol. 2, pp. 374-380, 1999.
4. S. Lin, J. Gu, S. Yamazaki and H. Y. Shum. Radiometric calibration from single image. In *Proc. of Computer Vision and Pattern Recognition. (CVPR)*, vol. 2, pp. 938-945, 2004.
5. S. Lin and L. Thang. Determining the radiometric response function a single grayscale image. In *Proc. of Computer Vision and Pattern Recognition. (CVPR)*, vol. 2, pp. 66-73, 2005.
6. Y. Matsushita and S. Lin. Radiometric calibration from noise distributions. Google Patents, 2008.
7. C. Manders, C. Aimone and S. Mann. Camera response function recovery from different illuminations of identical subject matter. In *Proc. of International Conference on Image Processing. (ICIP)*, vol. 5, pp. 2965-2968, 2004.