

# Fénysűrűség karakterisztika mérési pontosságának vizsgálata Monte-Carlo szimulációval

## Error analysis of luminance distribution measurements using Monte-Carlo simulation

PIZÁG Bertalan<sup>1</sup>, NAGY Balázs Vince PhD.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék (MOGI), 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.  
E-mail: pizag@mogi.bme.hu, nagyb@mogi.bme.hu

### Abstract

*Near-field goniophotometry is a developing new approach to the characterization of light-sources. Instead of the more common luminous intensity measurements, it records the luminance characteristics, providing a more detailed description with less restrictions to the system. However, these devices are still characterized by converting their data into intensity distributions. The aim of this article is to provide new models for the direct characterization of such devices, through the use of a simulated measurement system and Monte-Carlo simulation.*

**Keywords:** goniophotometry, luminance measurement, error analysis, simulation, Monte-Carlo method

### Kivonat

*A near-field goniofotometria módszere egy új megközelítést biztosít fényforrások karakterizálására. A bevett fényerősség mérésre alapuló rendszerekkel szemben fénysűrűség eloszlást rögzít, ami részletesebb leírást ad, kevesebb kötöttséggel a mérőrendszerre vonatkozóan. Viszont ezek az eszközök jellemzése továbbra is fényerősség konverzió át történik. A cikk célja modellek bemutatása near-field goniofotométer konstrukciók közvetlen jellemzésére egy szimulált mérőrendszer és Monte-Carlo módszer alkalmazásával.*

**Kulcsszavak:** goniofotometria, fénysűrűség mérés, hibaanalízis, szimuláció, Monte-Carlo módszer

## 1. BEVEZETÉS

Fényforrások karakterizálásának alapvető módszere a goniofotometria, azaz a források fényerősségének rögzítése egy gömbi koordináta-rendszerben [1]. A méréseknek kritikus szerepe van tervezési, valamint szimulációs folyamatokban, közvetve kihatva a munka- és közlekedésbiztonság területeire is [2]. Fényerősség, azaz elemi térszögbe kibocsátott fényáram [1] mérésére közvetlenül csak a fényforrás pontszerű közelítésével van lehetőség [3]. Ehhez a detektornak a fényforrástól messze, a kibocsátó felület legnagyobb átmérőjének 8-10-szeresénél [3] távolabb kell elhelyezkednie, ami nagy lámpák esetében rendkívül nagy, speciális kialakítású mérőrendszereket igényel. Fénysűrűség, azaz elemi felületen elemi térszögbe kibocsátott fényáram [1] mérésével az úgynevezett távolságtörvény elhagyható. A detektor tetszőlegesen közel helyezkedhet a fényforráshoz, mivel azt kiterjedt kibocsátóként vizsgálja.

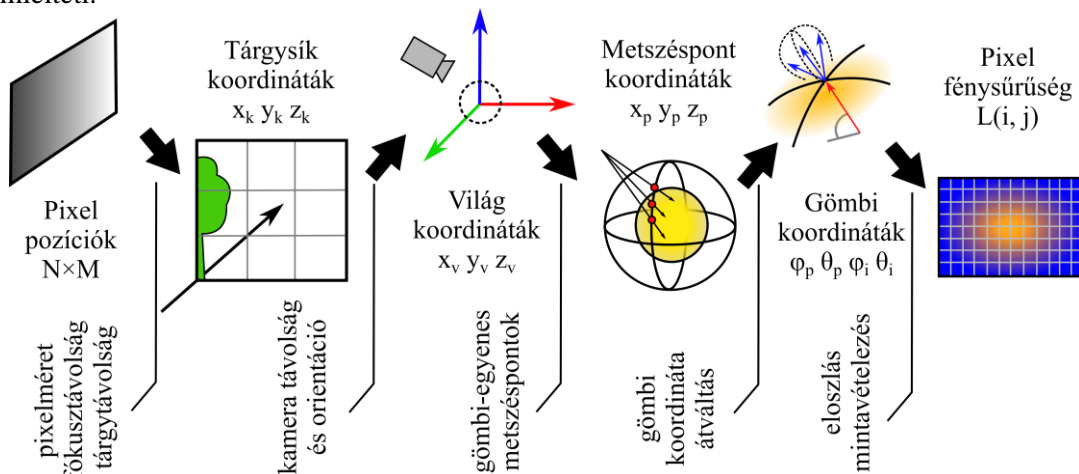
A fénysűrűség mérésre alapuló eljárásokat, másnéven near-field goniofotometriát a '90-es évektől kezdték kidolgozni [4], viszont jelentősen korlátozta a korabeli digitális képalkotó technológia, így a 2010-es évekig kevesen foglalkoztak a témával [5, 6]. Az eljárás alapját egy radiometriailag kalibrált kamera, úgynevezett képalkotó fénysűrűség mérő (Imaging Luminance Measurement Device – ILM) képezi [5]. A mérésre ugyanúgy egy gömbi koordináta rendszerben kerül sor, ami a fényforrás körül képzett virtuális burkoló felületre van fókuszálva [5], annak fénysűrűségét rögzíti. A burkoló felület fénysűrűség eloszlása utána visszavezethető a fényforrás felületére is, konvertálható szimulációkban alkalmazható sugárhalmazokká [5], továbbá képezhető belőle a fényerősség eloszlás. Az eljárás tehát megkerüli a szabványos goniofotometria alapvető korlátait, viszont képalkotó rendszerek alkalmazása számos új kihívást

hordoz magában. Cikkünkben ezen hibák közül kifejezetten kettőre, a pozicionálási hibák pontosságára, valamint az adatkezelés nehézségeire fókuszálunk.

## 2. SZIMULÁCIÓS MODELL

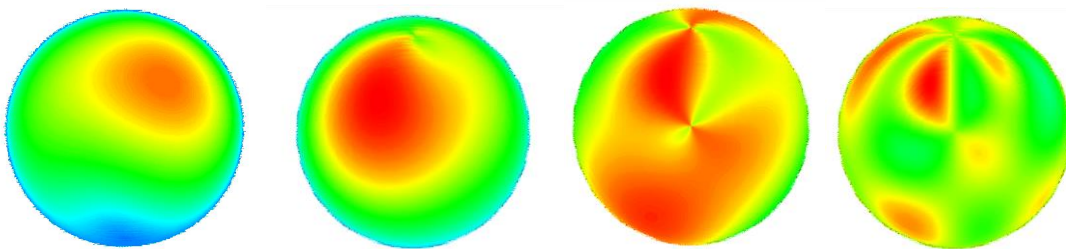
Az átfogó vizsgálat eszközeül egy paraméterezzhető szimuláció szolgál, amin keresztül különböző near-field goniofotométer konfigurációkat vizsgálhatunk. A kamera szimulációjára a vékonylencse vetítési egyenletét alkalmaztuk, hogy jól definiálható lehessen a kép- és tárgysíkok pozíciója, viszont feltételeztük a magas (végtelen) mélység-élességet, azaz lényegében lyukkamera modell szerepel a rendszerben. A detektor felbontása a szokványosnál alacsonyabb  $50 \times 50$  vagy  $100 \times 100$  pixel, mivel egy átlagos,  $1280 \times 1024$  pixeles detektor esetében,  $1^\circ$ -os felbontással mérve hozzávetőleg 85 milliárd mérési pont jön létre, aminek kezelése modern számítógépeknek is komolyabb kihívást jelent. Ezek a pontok, ráadásul a szimuláció keretében többszörösen kiszámításra kerülnek a Monte-Carlo módszer jellegéből adódóan.

A modell fordított sugárvezetést alkalmaz, azaz a sugarak a kamera detektoráról indulnak (egyetlen sugár detektoronként), és a lencse vetítési pontján át az fényforrást burkoló gömbre vetülnek. Ez a modell zárt alakban megoldható minden sugárra egy egyenes és egy gömbfelület metszéspontjának meghatározásával, nincs szükség a felület síkszegmensekre bontására, ami jelentősen gyorsabb futást eredményez. A sugarak a beérkezésük szöge és pozíciója alapján mintavételezik a gömbfelületen definiált fénysűrűség eloszlást, meghatározva a pixelek értékeit. Az 1-es ábra ennek a mintavételezési folyamatnak lépéseit szemlélteti.



1. ábra. A vetítési modell lépései

Fénysűrűség eloszlás bár szimulálható valós mérési, vagy szimulációs adatsor alapján, azok diszkrét mintavételezett adathalmazként alkalmazhatóak csak, ezáltal egy további hibaforrásként szolgálhatnak. Ezt megkerülendő, valós eloszlások helyett a fénysűrűség modell periodikus függvényekből került összeállításra, aminek eredménye a 2-es ábrán látható. Magas frekvenciájú függvények alkalmazhatóak radikális karakterisztikák (például reflektorszerű fényforrások) modellezésére. Viszont a pozicionálás vizsgálatához sokkal alkalmasabb egy pozíció szempontjából homogén intenzitású, koszinusz iránykarakterisztikájú (Lambert sugárzó) modell alkalmazása.



2. ábra. Lambert sugárzó (balra) és egyéb periodikus modellek közös kamera nézetből

A mérésadatok szimulációja a Monte-Carlo eljárás alapelvét követi, azaz a bemeneteket véletlen hibaértékek terhelik megfelelő valószínűségi eloszlások szerint, a kiértékelés pedig statisztikai módszerekkel történik [7, 8]. Jelen modell esetében különböző, nulla átlagú normális eloszlásokat alkalmazunk mind az állandó, mind pedig a sztochasztikus hibajelenségek modellezésére. A rendszer bemenetei a kamera két pozícionálási szöge, továbbá a fényforrás centráltságának bizonytalansága, utóbbiak konstans 0 alapértékűek, csak hibaértékeket tartalmaznak. A modell lehetőséget ad a hibaforrások szignifikanciájának összevetésére különböző alapértékek és geometria paraméterek esetében. A szimuláció implementálása Python 3.7 programnyelvben történt, a matematikai számítások a NumPy [9] könyvtárra épülnek, míg a görbék formázásához a Matplotlib [10] könyvtár került felhasználásra.

### 3. FELDOLGOZÁS, MUTATÓSZÁMOK

A Monte-Carlo szimuláció kiértékeléséhez egy adott paramétersor kiértékeléséhez a beállítással több vizsgálat elvégzésére is szükség van. Az alábbi kísérletek mindegyikében 8 sorozat képezi a kiértékelések alapját, ami egy átlagos rendszer modellezésére elégtelen lenne. Itt jön szóba a fénysűrűség eloszlások sajátossága, szokatlanul magas dimenzionalitással rendelkeznek, rendes leírásához négy paraméterre van szükség. Az adatmennyiség sokasága már rögzítését és tárolását tekintve is kihívást jelent, a feldolgozást pedig különlegesen körülményessé teszi. Részint ebből adódóan célszerű a Lambert-sugárzó modellének alkalmazása, mivel a tetszőleges forgásszimmetria, valamint a viszonylag alacsony gradiens lehetőséget ad az adatok csoportosítására. Minden paraméter mentén az értékek intervallumokba sorolhatóak, amiken belül a koordinátákat azonosnak tekintjük. Ezen csoportok számossága egészül ki a Monte-Carlo szimuláció iterációs szorzójával, ami már elégséges a statisztikai kiértékeléshez. A kiértékelésnek csak azok az adatpontok képzik részét, amik mindegyik iterációban sikeresen mintavételeznek. A Monte-Carlo szimuláció iterációin felül szimulálásra kerül az ideális, minden hibaforrástól mentes rendszer eredménye is. Alapvetően három jelzőszám vizsgálatára került sor:

#### 3.1 Szórások különbségének szórása

Az első összehasonlítás a csoportok szórását viszonyítja az ideális esethez, és ezeknek a különbségi értékeknek a szórását vizsgálja a csoportok között. A létrejövő jelzőszámok látványos jellemzést adnak a karakterisztika jellegéről, viszont a többszörös átlagolása az adatoknak elnyomja a kisebb részleteket. További problémát jelent, hogy a jelzőszám nagysága a rendszergeometriától függ, így nehezen általánosítható.

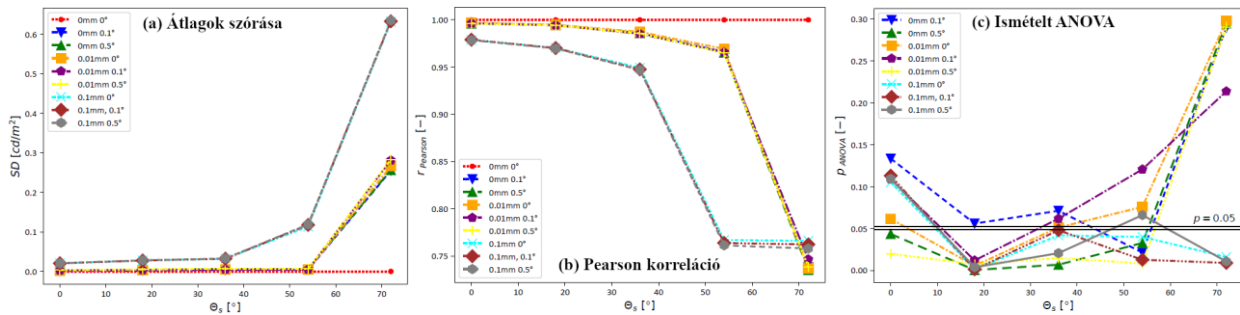
#### 3.2 Pearson korreláció az ideális és zajos adatsorok között

A vizsgálatra csoportonként került sor. Az adott csoportba eső ideális modell sugarak értékei és a Monte-Carlo szimuláció eredményének sugarankénti átlaga között Pearson korreláció [1] alkalmazásával vizsgálható az átlagértékek eltolódása a pozícióhibák hatására. Ez a mutató érzékenyebb lokális jellemzőkre, így az adott csoportot érő sugárszámra is, valamint torzíthatja a mintavételezett karakterisztika, aminek szempontjából szintén a koszinusz eloszlás ideális. Az eredmény egy általánosított paraméter 0 és 1 között, ami már felhasználható komparatív célokra.

#### 3.3. Ismételt mérések ANOVA

A harmadik módszer nem veszi alapul az ideális méréseredményt, helyette csak a hibával terhelt adatokra fókuszál. Az eljárás nullhipotézise, hogy egy csoporton belül a különböző iterációkhoz tartozó értékeknek egyező az átlaguk [11], azaz a hibahatás nem változtatta meg az eredmények várható értékét. A nullhipotézist cáfolja, ha az eredmény szignifikanciája  $p = 0.05$  -nél kisebb. Ez a mutató már közvetlen igen-nem eredményeket képes szolgáltatni a rendszerre vonatkozóan, de az ANOVA módszer használatához szükséges feltételek teljesülése nem garantált (függetlenség és normális eloszlás).

A különböző méréseredmények három rendszerkonfigurációban lettek tesztelve, a 3-as ábrán látható eredményekhez egy  $50 \times 50$ -es szimulált detektor,  $5^\circ$ -os mozgatósi lépésköz, valamint egy  $20 \times 10 \times 20 \times 5$ -ös csoportosítási struktúra (pozíció azimut és eleváció, irány azimut és eleváció) került alkalmazásra.



3. ábra A vizsgálatok eredményei egy felületi pontban, az elevációs irányszög mentén

### 3.4 Eredmények

A szóráskülönbségekből képzett paraméterek látványosan reprezentálják a rendszer sajátosságait és a bemeneti bizonytalanságok hatását. A szög és pozícióhiba úgy lett meghatározva, hogy mindkettő hatása megfigyelhető legyen, a két típus összes értéke egy szimuláción belül azonos szórással rendelkezik. A szöghiba hatása egy nagyságrenddel kisebb a pozícióhíbnál, így a kettő egymástól látványosan elválik. Megfigyelhető, hogy a hibahatások alacsony beesési szögek esetén elhanyagolhatóak a magas szögekhez képest, ez a súroló sugarak magas gradiensével magyarázható, jellemző tulajdonsága az összes vizsgálatnak. A korrelációs vizsgálat szintén a pozícióhíba dominanciáját mutatja, erősen összefügg a megelőző vizsgálattal, ami nem meglepő a számítási módjának hasonlósága miatt. Az ANOVA vizsgálat eredményei viszont nem megbízhatóak, az eredményül kapott görbék számos helyen a módszer teljes összeomlására utalnak. Utóbbi nem meglepő a módszer alapfeltételeinek hiányára, valamint az egyetlen mintavételezésre való tekintettel.

## 4. ÖSSZEFOGLALÁS

Near-field goniofotométerek pontosságának önálló minősítésére szolgáló jelzőszámok közül a legpraktikusabb mutatónak a Monte-Carlo szimuláción át kinyerhető lokális eloszlások korrelációja bizonyult az ideális értékkel. Hasonló, de nem általánosított eredményeket mutat a különbségek szórásának vizsgálata, viszont az ismételt méréses ANOVA eljárás alkalmazása sikertelennek bizonyult. Utóbbi a jövőben alávethető további teszteknek, hogy a mintavételezés növelésével közelítve a normális eloszlást, érvényes alapfeltevések esetében is hasonló eredményeket nyújt-e, viszont a szükséges szimuláció erőforrásigénye számottevően magasabb a jelenleginél. Minden eljárásra érvényes, hogy 40°-os beesési szög fölött a növekedő gradiens miatt elszálló pontosságot jeleznek (a pontos hely és az eltérés mértéke a paraméterektől függ), ami egy kritikus határérték hasonló rendszerek tervezésekor. A burkolófelület átmérőjének növelésével elérhető, hogy a magas beesési szögek fénysűrűsége geometriai okokból 0 legyen, ami potenciálisan felhasználható egy, a near-field goniofotométerekre alkalmazható távolságtörvény meghatározására.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutatás a BME-NVA-02 számú projekt részeként az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatással, a TKP2021 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

---

**IRODALMI HIVATKOZÁSOK**

- [1] CIE, *International Lighting Vocabulary (CIE S 017/E:2011)*, 2011.
- [2] EN, *Light and lighting – Lighting of work places – Part 1: Indoor work places (EN 12464-1)*, 2002.
- [3] CIE, *The Photometry and Goniophotometry of Luminaires (CIE 121:1996)*, 1996.
- [4] Ashdown I., *Near-Field Photometry: A New Approach*, Journal of the Illuminating Engineering Society, 1993, 22(1):163–180, doi: 10.1080/00994480.1993.10748029.
- [5] López M., Bredemeier K., Rohrbeck N., Véron C., Schmidt F., Sperling A., *LED near-field goniophotometer at PTB*, Metrologia, 2012, 49 S141. doi: 10.1088/0026-1394/49/2/S141
- [6] Schmähling F., Wübbeler G., Lopez M., Gassmann F., Krüger U., Schmidt F., Sperling A., Elster C., *Virtual experiment for near-field goniophotometric measurements*, Appl. Opt. 2014, 53, 1481–1487.
- [7] Rubinstein R. Y., *Simulation and Monte-Carlo method*, Wiley Series in Probability and Statistics 2nd ed., Wiley-Interscience, 1991.
- [8] Cox M. G., Siebert B. R. L., *The use of a monte carlo method for evaluating uncertainty and expanded uncertainty*, Metrologia, 2006, 43, S178–S188.
- [9] Walt S. van der, Colbert S. C., Varoquaux G., *The numpy array: A structure for efficient numerical computation*, Comput. Sci. Eng., 2011, 13, 22–30.
- [10] Hunter J. D., *Matplotlib: A 2d graphics environment*, Comput. Sci. Eng., 2007, 9, 90–95.
- [11] Rasmussen K., *Encyclopedia of measurement and statistics*, vol. 1, Sage, 2007.