

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
PATTANTYÚS-ÁBRAHÁM GÉZA GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK
DOKTORI ISKOLA
MECHATRONIKA, OPTIKA ÉS GÉPÉSZETI INFORMATIKA TANSZÉK

PIZÁG BERTALAN
MOBIL FOTOMETRIAI ÉS
FÉNYSÚRÚSÉGMÉRŐRENDSZEREK
ANALÍZISE

Tézisfüzet

Témavezető:

Dr. Nagy Balázs Vince
egyetemi docens

Budapest, 2023

1. TÉMA ISMERTETÉSE, CÉLKITÚZÉSEK

A modern világítástechnikai megoldások napjainkban komoly kihívások elé állítják a szakterület mérés technikai megoldásait, viszont hasonlóan a fényforrások technológiájának fejlődéséhez, új eszközök és megoldások váltak elérhetővé mérés technikai oldalról is.

A fotometriai mennyiségek a radiometriai teljesítményből származtathatóak az emberi látás spektrális érzékenységet jellemző súlyfüggvény, az úgynevezett $V(\lambda)$ figyelembevételével [1]. Fényforrások és világítórendszerek vizsgálatokor alapvetően négy alapmennyiség alkalmazott, ezek rendre a fényáram, megvilágítás, fényerősség és fénysűrűség. Az első a teljesítmény megfelelője [2], a többi pedig annak egységnyi területre, térszögbe, illetve a kettő kombinációjába eső értéke [2].

Ezek közül legegyszerűbben mérhető a megvilágítás [3], amit alapvetően világítási szituációk egyszerű jellemzésére alkalmaznak (például belső terek [3]), mert irányra vonatkozó információt nem tartalmaz. A mérés közben hordozott eszközzel, manuálisan végrehajtható.

Fényerősség méréséhez már szigorú előírásoknak megfelelő laborfelszerelés szükséges [3]. A mérés az úgynevezett goniofotometriai eljárás, ami a fényforrást pontszerűen modellezve határozza meg annak kibocsátási karakterisztikáját. Ehhez egy legalább kéttengelyű mozgató rendszer szükséges, ami nagy mérési távolságot kell biztosítson (a kibocsátó átmérő tízszeresét) [3]. A fényerősség adatsorok képzik a bemenetét a hagyományos tervezési számításoknak, valamint az egyszerűbb szimulációknak [4].

Fénysűrűség méréséhez a detektor egy képalkotó optikát tartalmaz, amit a felület egy megfelelő pontjára élesítve meghatározható annak fénysűrűsége az optika által összegyűjtött térszögben [3]. A modern fénysűrűségmérők speciális kamerák (ILMD), amik

minden egyes képpontja megfeleltethető fénysűrűség-értékeknek. A fénysűrűség alapvetően kritikus ellenőrzési paraméter [3], [4], mivel ez a mérték áll legközelebb az ember által látottakhoz. Egy fényforrás fénysűrűség-karakterisztikájának meghatározásával az kiterjedt formájában írható le. Erre szolgál a még kiforrotlan technológiájú [5] near-field goniofotometria [6] eljárása, ami az elmúlt évtized során kezdett több figyelmet kapni [7]. A fénysűrűség-karakterisztika felvételének számos előnye van, viszont új kihívásokat is támaszt, így a mérőrendszer kidolgozásához feltétlen szükséges a témakör vizsgálata.

Ezek a mérések mindegyike vagy időigényes, manuális folyamat, vagy speciális mérőrendszert vesz alapul. Napjaink ipari trendje a hasonló minőségű folyamatok drónokra alapozott automatizálása [8]. Számos példa létezik különböző kamerafelvételek készítésére épülő megoldásra ipari és mezőgazdasági alkalmazásban, valamint specifikus fotometriai alkalmazásra is van példa [9]–[11].

Az értekezés egy mobil mérőrendszer képességeire fókuszál, ami különféle fotometriai mérések automatizálására, de kifejezetten fénysűrűség mérésére alkalmazható. Alapvetően három aspektusa vizsgált a mérőrendszernek: a fénysűrűségmérés technológiájának jellemzése, a mobil eszköz pozicionálásából származó kihívások vizsgálata, valamint korrekciós eljárások kidolgozása a felvételekre.

A multirotoros drónok könnyen irányítható és kellő pontossággal navigálható platformot [12] jelentenek tetszőleges könnyűsúlyú alkalmazások implementációjára. Az értekezés során erre építve kerülnek kidolgozásra megvilágítás, valamint fényerősség/fénysűrűség mérésére szolgáló modellek.

A drón alapú rendszerek egyik legfőbb korlátozó tényezője a repülő platform teherbíró képessége. Belső terekben alkalmazható,

kisméretű drónok képtelenek nagy kialakítású, komolyabb fény-sűrűségmérő detektorok hordozására, helyette kisebb kamerák alkalmazása válhat szükségessé. Az általános kamerák használata fényforrások vizsgálatára viszont problémákba ütközik. Az érzékenységük nem a fényforrások rendkívüli intenzitására van szabva, így csak vagy kicsi apertúrayílást, vagy rendkívül kis átteresztőképességű szűrőket alkalmazva lehetséges az alkalmazásuk. Szűrőket alkalmazva számolni kell azok spektrális karakteristikájával, illetve esetleges zajhatásokkal, míg kis apertúrayílás esetében megjelenhet egy jelentős diffrakciós mintázat [13]. Szélsőséges esetben, például, ha csak a mérést a navigációhoz használt kamerának kell elvégeznie, a detektor telítése a diffrakciós mintázattal egyidejűleg tapasztalható. Az értekezés utolsó szakasza a diffrakciós mintázatokat tartalmazó felvételek korrekciójára fókuszál.

2. KUTATÁSI MÓDSZEREK

2.1. *Drón alapú mérőplatform*

A drón alapú mérőplatform megvalósíthatósága bemutatható a mérőrendszer pozicionálási képességeinek jellemzésével. Ehhez a rendszer modellezése szükséges különböző mérési struktúrák szerint.

Megvilágítás mérése egyszerűen implementálható, elégséges egy függőlegesen elhelyezett fotodetektor a drón tetején, viszont szükséges az abszolút pozícióinformáció biztosítása.

Fényerősség mérésének esetében biztosítani kell, hogy a detektor mindig a fényforrásra irányuljon. Mivel a drónok csak vízszintes állapotukban képesek megtartani pozíciójukat, így a detektor

mozgatása szükséges, megfelelő célzásához pedig a szenzorral közös tengelyen egy kamera elhelyezése szükséges. Egy ilyesformán kialakított rendszerben elégséges pusztán a drón magasságának, illetve orientációjának mérése, mivel a fényforrás magasságának ismeretében a többi paraméter meghatározható.

Hasonló módon konstruálható elrendezés fénysűrűség mérésére, a célzó kamera helyében radiometrikusan kalibrált szenzort alkalmazva.

Megállapítható, hogy megvilágítás mérésének pontossága közvetlenül függ a drón pozíciómeghatározásának pontosságától. Ezzel szemben a fényerősség mérésére alkalmazott modell összetettebb hatással van az eredmények bizonytalanságára. A drónt statikus pozíciókban vizsgálva a munkatér különböző területein, a leképezési modell parciális deriváltjain át vizsgálható egy-egy szenzor bizonytalanságának szerepe a végeredményre. Ezek alapján megállapítható, a munkatér mely pontjaiban várhatóak kiugró mérési hibák.

A megvilágítás- és fényerősség-mérés modelljeit igazolják a gyakorlati mérési sorozatok, amik egy módosított Parrot AR.Drone2-es drón segítségével készültek. Ez az egyszerű prototípus eszköz paramétereiben jelentősen elmarad a professzionális dróntechnológia lehetőségeitől, de a súlyos zajhatásokkal ellenére megvilágítás mérését megfelelően végre tudja hajtani, míg a fényerősség adatsorok, bár elégtelen minőségűek, összefüggésbe hozhatóak a számításokkal.

2.2. Near-field goniofotométer rendszerek minősítése

A fénysűrűség-mérésre alkalmazott near-field goniofotométerek hiányos követelményrendszerét kiküszöbölendő az értekezés külön pontban vizsgálja azok megbízhatóságát.

A vizsgálat alapja egy szimulációs modell, ami egy tetszőleges függvényrel leírható kibocsátási karakterisztikájú fényforrás körül forgat két tengely mentén, adott távolságban egy virtuális kamerát. A rendszer geometriai paraméterei mellett meghatározható a műszerkar, valamint a fényforrás pozícionálásának bizonytalansága, így tetszőleges műszerkialakítások vizsgálhatók.

A szimuláció nagymennyiségű virtuális mérési adat előállítására képes, így lehetőség van a bizonytalanságokat Monte Carlo módszer [14] alkalmazásával vizsgálni. Ennek megfelelően egy-egy vizsgált beállítás esetében számos mérés szimulációjára kerül sor, a bemenetek bizonytalanságát véletlenszám-generálás segítségével modellezve. Az így létrejövő eredmény halmazokat pedig statisztikai eszközökkel értékelve lehet következtetéseket levonni a műszer hibaérzékenységre vonatkozóan.

A vizsgálatok alapján származtathatók különböző minősítő paraméterek, valamint tervezési megkötések a rendszergeometriára vonatkozóan.

2.3. Fénysűrűség-felvételek korrekciója

A fénysűrűség-mérésre alkalmazott kamerák a fényforrás és a háttér közti magas kontrasztkülönbség problémáját különböző expozíciójú képek sorozatának alkalmazásával (HDR képalkotás) oldható fel. Ideális környezet hiányában viszont számos hibajelenség lehet a képekre hatással. Az értekezés során kimondottan a telítés jelenségének kompenzációja érintett, mivel ez gyakran tapasztalható egyszerűbb kamerák esetében, illetve olyan szituációkban, ahol például a fényforrás vibrálása miatt nem használható rövid expozíció.

A vizsgálatok alapját laborkörülmények között halogén, illetve LED fényforrásokról készült képek képzik. Mindegyik azonos kamerát vesz alapul különböző apertúrabéállítások esetében. Hogy

biztosítható legyen egy referencia a modellekhez, a képek valójában nem tartalmaznak telített pixeleket, a telítés algoritmikusan szimulált.

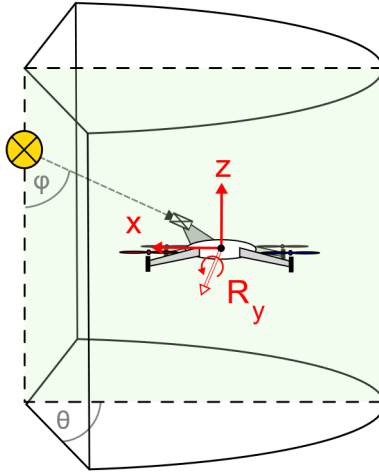
A hatszög alakú apertúra következtében jól felismerhető csillag mintázat jön létre a fényforrás körül. A csillag karjainak azonosításával lehetséges olyan képfeldolgozó algoritmus létrehozása, ami képes a fényforrás középpontjának megállapítására. A középpont pozíciójának, valamint a karok orientációjának ismeretében képezhetők metszetei a mintázatnak.

A metszetek alkalmazásával egyel csökken a probléma dimenziója, egyszerűbben illeszthetők rá próbafüggvények a hiányzó csúcscsérték becslésére.

Egyszerűbb polinom hányados függvényeken túl megközelíthető a probléma a Fraunhofer-diffrakció fizikájának modellezésével is több megközelítésen át [15], [16]. Több paraméter illesztését igénylő modell a zajhatások miatt nem alkalmazható megbízhatóan, viszont a modellek kamerából származó értékeit kalibrálva lehetőségessé válik az intenzitáscsúcs közelítése.

3. TUDOMÁNYOS MEGÁLLAPÍTÁSOK

- I. **TÉZIS: A mérendő pontszerű fényforrás pozícióját referenciának tekintő, kamerára épülő, multirotoros pilóta nélküli légi jármű alapú fotometriai mérőrendszert pozícionálási hibái szerint minősítve figyelmen kívül hagyhatóak a mérési modell függőleges síkjától eltérő szabadsági fokok, azaz csak a mérési síkba eső tengelyek (x, z), valamint a normális vektor körüli elfordulás (R_y , azaz pitch szög) vizsgálata szükséges a rendszer minősítéséhez. Ezeket az alábbi ábra szemlélteti:**



Tézishez kapcsolódó publikációk: [P1], [P5]

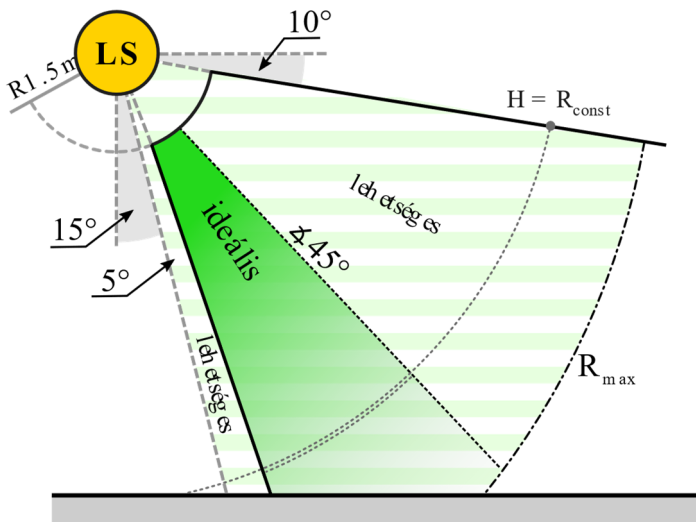
II. TÉZIS: A mérendő pontszerű fényforrás pozícióját referenciának tekintő, kamerára épülő, multitrotoros pilóta nélküli légitársaság alapú fotometriai mérőrendszer pozícionálásból származó hibája minden pontban az átlagtól legfeljebb három szórásnyival tér el az alábbi követelmények teljesülése esetén:

- A mérés iránya a fényforrás vízszintes síkjával legalább 10° -ot zárjon be.
- A mérés iránya a fényforrás függőleges síkjával legalább 15° -ot zárjon be.
- A mérőrendszer a fényforrástól legalább 1,5 méterre helyezkedjen el.
- A mérőrendszer legfeljebb olyan távol helyezkedjen el a fényforrástól, hogy az a kamerán azonosítható kiterjedt elemként (R_{\max}), azaz legalább 3 pixel átmérővel legyen látható.

Kijelenthető továbbá, hogy a mérési bizonytalanságok akkor a legkisebbek, ha a fentiek felül az alábbi feltételek is teljesülnek:

- A mérés vonala a fényforrás vízszintes síkjával legalább 45° -ot zár be.
- A mérés vonala a fényforrás függőleges síkjával legalább 20° -ot zár be.

A határértékeket a mérés függőleges metszeti síkjában az alábbi ábra szemlélteti:



Tézishez kapcsolódó publikációk: [P1], [P5]

- III. TÉZIS:** Egy near-field goniofotométer pozícionálási hibái nem korlátozzák a mérés ismétlődőképességét, amennyiben a mért fénysűrűség-eloszlás minden tengely mentén legfeljebb 5° szélességű részhalmazára kimutatható statisztikailag szignifikáns lineáris kapcsolat az ismételt mérések eredményei között.

A jelentősebb hibahatások a gömbi projekción keresztül nemlineáris módon hatnak a mért fénysűrűségekre, így az ismételt mérések között kimutatható erős lineáris kapcsolattal demonstrálható, hogy a mérések közti eltérések nem a mintavételezés hibájára vezethetők vissza.

Az 5° -os tartományok alkalmazása megfelelőnek bizonyult olyan kibocsátási karakterisztikák esetében, ahol a normalizált eloszlás differenciáljának szélsőértéke ± 1 . Nagyobb változások, például a fénysűrűséget élesen levágó maszkoló elemek közelében szükséges lehet sűrűbb mintavételezés, vagy a nagy gradiensű elem tartományát ki kell hagyni az elemzésből.

Tézishez kapcsolódó publikációk: [P2], [P4]

- IV. TÉZIS:** Near-field goniofotométeres mérés során a fénysűrűség-eloszlás rekonstrukciójára szolgáló felületet úgy kell megválasztani, hogy az azon áthaladó sugarak egyikének beesési szöge se legyen 45° -nál nagyobb. Ennek biztosítására a burkoló felület átmérőjét a fényforrás legnagyobb átmérőjének másfélszeresénél nagyobbra kell választani.

Ezáltal a virtuális felületen a fénysűrűség-eloszlás nem tartalmazza a komoly hibajelenségeket mutató beesési szögeket, mivel az abba eső sugarak a háttérrel mintavételezik, így nem járulnak hozzá az eredményhez.

Tézishez kapcsolódó publikációk: [P2], [P4]

- V. TÉZIS: Near-field goniofotométerek műszerkarjának szögpozicionálási hibája elhanyagolható a másik jellemző hibaforráshoz, a fényforrás centrálási hibájához viszonyítva, ami a műszerkar hossza alapján az alábbi módon fejezhető ki:

$$E_{pos}(R \cdot \sin(\varepsilon)) \gg E_{ang}(\varepsilon)$$

ahol R a műszerkar hossza, ε pedig a szögérték, az E_{pos} és az E_{ang} pedig rendre a rendszer pozíció különbségen, illetve szögelforduláson alapuló mérési hibája.

Tézishez kapcsolódó publikációk: [P2], [P4]

- VI. TÉZIS: Pontszerűnek tekinthető fényforrások fény-sűrűségének csúcserőértéke becsülhető egy telítésbe vitt kamera-felvételen a $10^{\log(I_0) \pm 0.5}$ határértékeken belül a diffrakciós mintázat metszetére r radiális koordináta mentén:

$$f(r) = \begin{cases} f_1(r) = \frac{1}{(ar + b)^4} + c & \left| \frac{\partial f}{\partial r} \right| \geq \tan(89.75^\circ) \\ f_2(r) = er + f & \left| \frac{\partial f}{\partial r} \right| \leq \tan(89.75^\circ) \end{cases}$$

alakú függvény illesztésével, ahol:

$$f_1(r_{crit}) = f_2(r_{crit}) \text{ és } \dot{f}_1(r_{crit}) = \dot{f}_2(r_{crit}),$$

továbbá a , b és c identifikált paraméterek, r_{crit} a két függvény találkozási pontja a 89.75° -os meredekségnél, I_0 pedig az intenzitáscsúcserőértéke.

Tézishez kapcsolódó publikációk: [P3]

VII. TÉZIS: Hatszög apertúrájú kamerával készített telített diffrakciós foltok intenzitáscsúcsa becsülhető spektrális teljesítményeloszlásuk ismeretében a $[0.5I_0; 1.5I_0]$ határértékeken belül, anélkül pedig a $[0.5I_0; 2I_0]$ határértékeken belül a mintázat karjaira az alábbi modellt illesztve:

$$I_\lambda(\tau) = \frac{64}{81} \frac{I_1}{x^4} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} x \sin\left(\frac{\sqrt{3}}{2} x\right) - \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2} x\right) + 1 \right)^2, \quad x = \frac{2\pi}{\lambda} \tau R$$

$$I(\tau) = \frac{\sum w_\lambda \cdot I_\lambda(\tau)}{\sum w_\lambda}$$

ahol I_0 a pontos, I_1 pedig az identifikált intenzitásérték, $0 \leq \tau \leq 1$ a sugárirányú koordináta és az ernyő sugarának hányadosa, λ a hullámhossz, w_λ a fényforrás kibocsátásának és a kamera érzékenységének kombinált spektrális teljesítményeloszlása a vizsgált hullámhosszokon, R pedig egy referencia fényforrás segítségével meghatározott kalibrációs érték.

Tézishez kapcsolódó publikációk: [P3]

4. TÉZISEKHEZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK

- [P1] B. Pizag and B. V. Nagy, "Quadcopter Based Automation of Photometric Measurements," in 2018 IEEE 18th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), 2018, pp. 864–869, doi: 10.1109/EPEPEMC.2018.8521871.
- [P2] B. Pizág and B. V. Nagy, "Propagation of positioning uncertainties in near-field goniophotometers using the Monte Carlo method," *Appl. Opt.*, vol. 59, no. 13, p. 4055, May 2020, doi: 10.1364/AO.386451.
- [P3] B. Pizág and B. V. Nagy, "Extrapolation of Saturated Diffraction Spikes in Photographs Containing Light Sources," *Period. Polytech. Mech. Eng.*, vol. 64, no. 3, pp. 233–239, Jun. 2020, doi: 10.3311/PPme.16044.
- [P4] B. Pizág and B. V. Nagy, "Fénysűrűség karakterisztika mérési pontosságának vizsgálata Monte-Carlo szimulációval," in XXX. Nemzetközi Gépészeti Konferencia – OGÉT 2022, 2022.
- [P5] B. Pizág, D. Kacz, and B. V. Nagy, "A drone-based photometric measurement platform," *J. F. Robot.*, vol. 39, no. 8, pp. 1218–1230, Dec. 2022, doi: 10.1002/rob.22105.

5. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] CIE, “Commission Internationale de l’Eclairage Proceedings, 1924,” 1926.
- [2] CIE, “ILV: International Lighting Vocabulary, 2nd Edition,” 2020. doi: 10.25039/S017.2020.
- [3] EN, “EN 13032-1, Light and lighting - Measurement and presentation of photometric data of lamps and luminaires - Part 1: Measurement and file format,” Brussels, 2004.
- [4] EN, “EN 13201-1, Road lighting - Part 1: Selection of lighting classes,” Brussels, 2004.
- [5] CIE, “CIE S 025/E:2015, Test method for LED lamps, LED luminaires and LED modules,” 2015.
- [6] I. Ashdown, “Near-Field Photometry : A New Approach,” *J. Illum. Eng. Soc.*, vol. 22, no. 1, pp. 163–180, 1993, doi: 10.1080/00994480.1993.10748029.
- [7] M. López, K. Bredemeier, N. Rohrbeck, C. Véron, F. Schmidt, and A. Sperling, “LED near-field goniophotometer at PTB,” *Metrologia*, vol. 49, no. 2, 2012, doi: 10.1088/0026-1394/49/2/S141.
- [8] R. Merkert and J. Bushell, “Managing the drone revolution: A systematic literature review into the current use of airborne drones and future strategic directions for their effective control,” *J. Air Transp. Manag.*, no. 89, 2020, doi: 10.1016/j.jairtraman.2020.101929.
- [9] D. S. D. Sitompul, F. E. Surya, F. P. Suhandi, and H. Zakaria, “Runway Edge Light Photometry System by Using Drone-Mounted Instrument,” in *Proceeding - 2019 International Symposium on Electronics and Smart Devices, ISESD 2019*, 2019, doi: 10.1109/ISESD.2019.8909498.
- [10] X. Li, N. Levin, J. Xie, and D. Li, “Monitoring hourly nighttime light by an unmanned aerial vehicle and its

- implications to satellite remote sensing," *Remote Sens. Environ.*, vol. 247, no. April, 2020, doi: 10.1016/j.rse.2020.111942.
- [11] P. Fiorentin, C. Bettanini, and D. Bogoni, "Calibration of an autonomous instrument for monitoring light pollution from drones," *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 23, 2019, doi: 10.3390/s19235091.
- [12] G. Ajay Kumar, A. K. Patil, R. Patil, S. S. Park, and Y. H. Chai, "A LiDAR and IMU integrated indoor navigation system for UAVs and its application in real-time pipeline classification," *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 6, 2017, doi: 10.3390/s17061268.
- [13] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, 2nd ed. The McGraw-Hill Companies, Inc., 1996.
- [14] R. Y. Rubinstein and D. P. Kroese, *Simulation and Monte-Carlo method*, 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [15] J. Komrska, "Fraunhofer Diffraction at Apertures in the Form of Regular Polygons. I," *Opt. Acta Int. J. Opt.*, vol. 19, no. 10, pp. 807–816, Oct. 1972, doi: 10.1080/713818504.
- [16] R. C. Smith and J. S. Marsh, "Diffraction patterns of simple apertures," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 64, no. 6, p. 798, Jun. 1974, doi: 10.1364/JOSA.64.000798.