

KISFORMÁTUMÚ KÉPBONTÓK HATÁRFELBONTÁS KORLÁTAI

LIMITATIONS OF CAPTURE RESOLUTION IN SMALL-FORMAT IMAGE RECEIVERS

TÓTH Levente

(ORCID ID: 0000-0003-2979-5911)

toth.levente@uni-nke.hu

Absztrakt

A biztonságtechnikai területen alkalmazott videó megfigyelő rendszer a kezdetektől fogva több ponton is támaszkodik a konzumer piac technológiai vívmányaira, fejlesztéseire. Nincs ez másképp az Ultra HD (4K) tekintetében. Bár az ultra nagyfelbontású Broadcast technológia térhódítása jóval lassabb, mint azt korábban prognosztizálták, ennek ellenére a 4K felbontás szép lassan beszivárog a videó megfigyelő rendszerek területére. Egyre több gyártó portfóliójában tűnik fel az Ultra HD felbontású kamera. A kérdés csupán csak annyi: Valóban felkészült ez a terület ennek a technológiának az implementációjára? Ténylegesen több információt szolgáltat a nagyobb felbontás? Kiaknáztuk a full HD adta lehetőségeket, vagy lenne mit javítani még ezen a területen?

Kulcsszavak: UHD, 4K, felbontás, diffrakció, határfelbontás

Abstract

Safety video surveillance systems have been relying on the technological achievements and developments of the consumer market in a number of respects from the very beginning. It is no different in the case of Ultra HD (4K). Although in spite of the fact that the market penetration of the ultra-high definition Broadcast technology is considerably slower than previously predicted, 4K-resolution slowly but surely infiltrates into the domain of video surveillance systems. More and more manufacturers include Ultra HD cameras in their portfolios. The question, however, is rather simple: is this sector really prepared to implement this technology? Does higher resolution actually provide more information? Have all the opportunities provided by full HD been fully exploited, or is there still room for improvement in this area?.

Keywords: keywords1, keywords2, keywords3

A kézirat benyújtásának dátuma (Date of the submission): 2018.04.22.

A kézirat elfogadásának dátuma (Date of the acceptance): 2018.05.02.

BEVEZETÉS

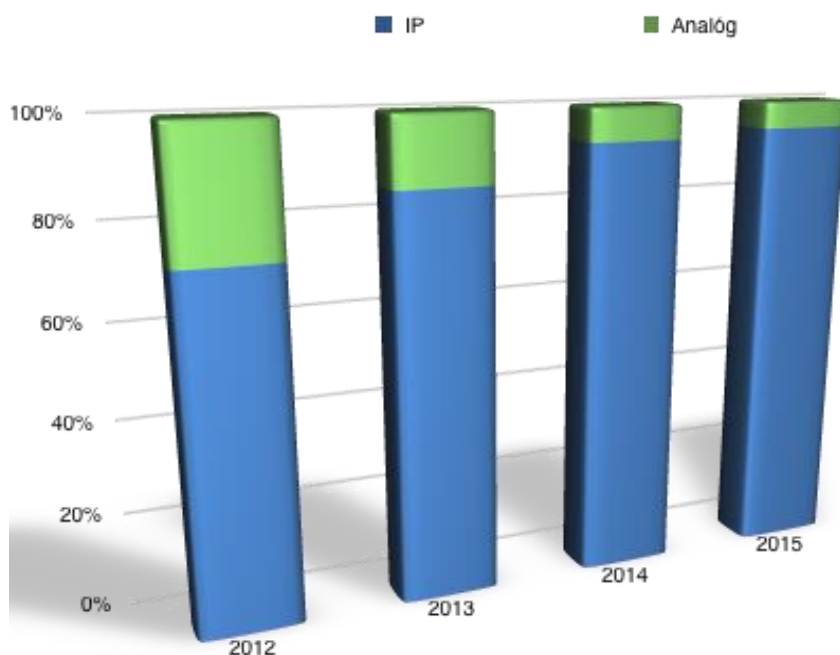
A technológiai versenyfutás az élet számos területén tapasztalható. Legyen ez például az autópia, vagy a mobil telefonok piaca, napról napra jelennek meg az adott terület újabbnál újabb technikai fejlesztései. A gyártók egymást túllícitálva próbálják a lehető legnagyobb piaci részesedést megszerezni. Ehhez számos marketing eszközt bevetnek. A mobiltelefonok piacán dúl a pixelháború, míg a televíziós technológiánál még igazán bevezetésre sem került a 4K-s felbontás, a kiállításokon már találkozhatunk a 8K-s továbbfejlesztett változatával is.

Ez az irány nem kerülte el a videó megfigyelő rendszerek területét sem. Egyre több gyártó portfóliójában található már meg a Full HD-nál nagyobb felbontású kamera. Sokan gondolják azt, hogy a nagyobb képelem szám, jobb képminőséget és ezzel párhuzamosan részletgazdagabb megjelenítést tesz lehetővé.

Ennek a cikknek az a nem titkolt célja, hogy rávilágítson arra, hogy a kapott képünk minősége nem csak a képérzékelő felbontásától függ. Elérkeztünk egy olyan szintre, amikor már számolni kell olyan fizikai korlátokkal is, mely pontosan ellene hat a részletgazdag képmegjelenítésnek.

A PIACI TREND VÁLTOZÁSA AZ ELMÚLT NÉHÁNY ÉVBEN

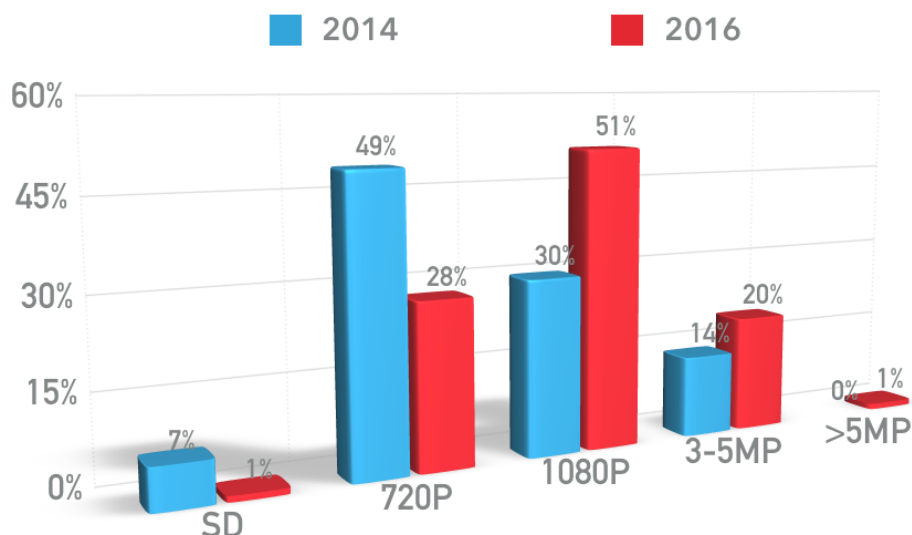
A videó megfigyelő rendszerek piacán vezető szerepet játszó Bosch cég magyarországi kamera eladási statisztikája is jól mutatja ennek a területnek a technológiai fejlődését.



1. grafikon: Bosch magyarországi kamera eladási statisztikája 2012 és 2015 között (saját szerkesztés)

Az analóg kamerák eladása folyamatosan csökken, míg az IP kameráké ugyan ilyen mértékben növekszik¹. Tovább bontva a HD és az a feletti felbontású kamerák eladási statisztikáját, jól látható, hogy az értékesítés egyre inkább a nagyobb felbontású képalkotók irányába tolódik el [1]. Minél nagyobb felbontású kamerát választunk, annál nagyobb az esélye, hogy bizonyos körülmények között a felbontás határokba ütközik.

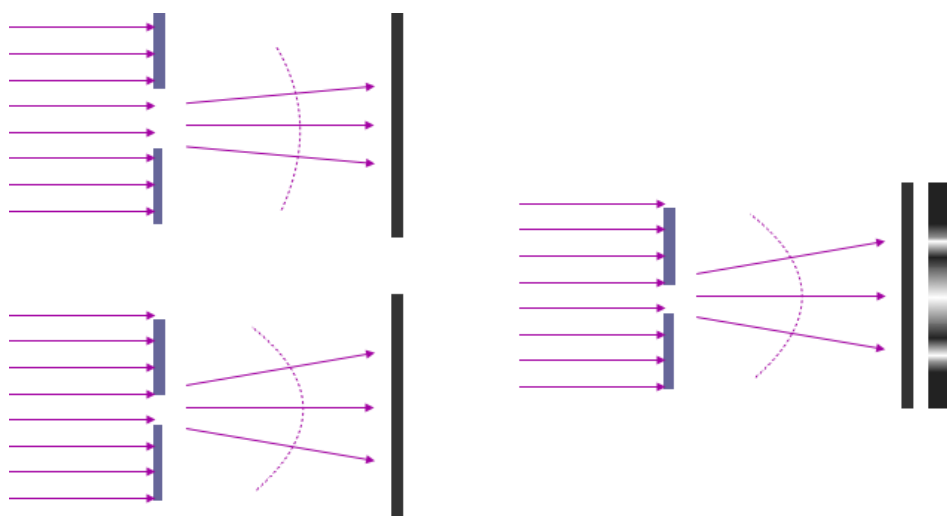
¹ Bárány Attila, Bosch értékesítési üzletág vezető adatai alapján



2. grafikon: Felbontás szerinti kameraeladás 2014 és 2016 között (saját szerkesztés)

DIFFRAKCIÓS LIMIT

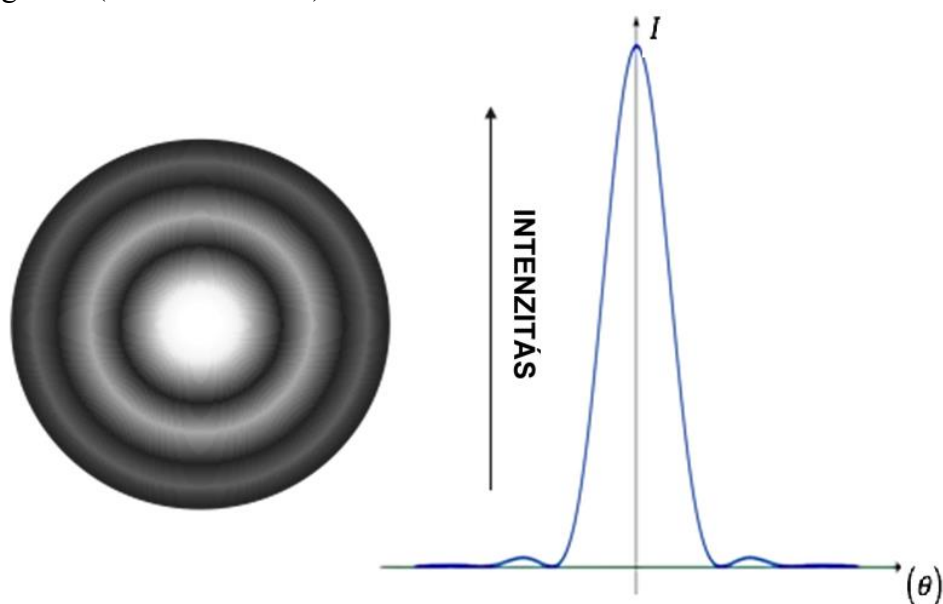
A diffrakcióval, mint fizikai jelenséggel legfőképp a hullámoptikában találkozhatunk. A fény hullámhosszával összemérhető nagyságú résen átengedve a merőlegesen érkező párhuzamos fénynyalábokat azt tapasztalhatjuk, hogy a felfogó ernyő olyan területeire is jutnak fényhullámok, ami az egyenes vonalú terjedést feltételezve optikailag takart.



1. ábra: Fényelhajlás és a rés kapcsolata (saját szerkesztés)

A Huygens-Fresnel elv szerint [2, pp. 413-414] az elemi hullámok a hullámtér különböző tartományaiban interferálnak, azaz gyengítik vagy erősítik egymást. Ez az intenzitásváltozás a felfogó ernyőn jól látszódik. A rés közepével egy vonalban található a legnagyobb intenzitású fénycsík mely jobbra és balra egyre halványodik egészen a teljes kioltás helyig. Abban az esetben, ha a rést egydimenziósnak tekintjük, akkor legnagyobb intenzitású fénypont a felfogó ernyőn a rés középpontján átmenő, az ernyőre merőleges egyenes és az ernyő metszéspontjában van, ettől pozitív és negatív irányban haladva az intenzitás a kioltásig csökken. Innen megint egyre világosodó sávokat láthatunk, mely a maximumát követően ismét halványul a második kioltási pontig (1. ábra jobb oldal).

Az elhajlás mértéke egyenes arányban van a fény hullámhosszával és fordított arányban a rés nagyságával. (1. ábra bal oldal).



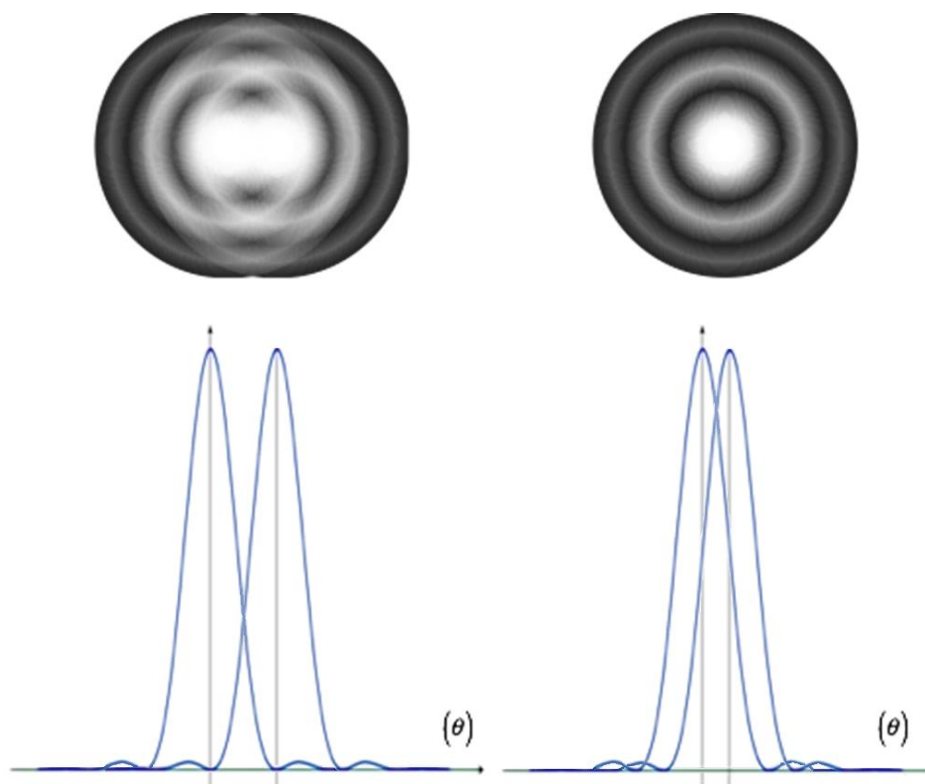
2. ábra: Az Airy korong és intenzitás függvénye (forrás: saját szerkesztés)

Körlakú résen az egy pontból kiinduló fénysugarak koncentrikusan elhelyezkedő, egyre halványodó, váltakozva világos és sötét körgyűrűket vetítenek a felfogó ernyőre. Az így kapott képet Airy² korongnak nevezzük (2. ábra). A korong mellett lévő intenzitás függvényen jól látszódik, hogy az első, fő minimumot követő második maximum érték csak töredéke (1,75 %-a) a fő maximumnak. Az ezt követő maximumok értékei tovább csökkennek. A harmadik maximum érték már csak 0,42 %-a a fő maximumnak (így ezek a körök csak igen erős fényforrás esetén látszódnak).

A képalkotó eszköz határfelbontásának vizsgálatakor fontos fogalom a Rayleigh³ féle feloldási küszöb. Vizsgáljuk két, az átmérőjükhöz képest egymástól távol eső inkoherens pontszerű fénykorong képét kis átmérőjű kör alakú résre! A diffrakció következtében a két pontszerű fényforrás vetített képe már Airy korong lesz. Abban az esetben, ha a két pontszerű fényforrás távolsága összemérhető a rés nagyságával, akkor a képük összemosódik, azaz nem tudjuk egymástól megkülönböztetni őket [3, p. 149]. A Rayleigh kritérium értelmében a két közel azonos fényerősségű pontszerű folt még éppen megkülönböztethető, ha a vetített képen az egyik Airy folt maximuma a másik Airy folt első minimumára esik (3. ábra baloldali kép). Ennél kisebb távolságoknál a két pontszerű korong összeolvad (3. ábra jobboldali kép).

² Sir George Biddell Airy (1801 – 1892) Matematikus és csillagász

³ Lord Rayleigh (1842-1919) angol fizikus



3. ábra: Rayleigh kritérium (saját szerkesztés)

Ahhoz, hogy az Airy korong intenzitás függvényének első minimumát számolni tudjuk, fel kell tudni írni magát a függvényt. Optikai rendszernél vizsgálva a határfelbontást [4, p. 117], a teljes matematikai levezetést mellőzve a függvény első minimum helyéhez tartozó irányra:

$$\theta_0 = \arcsin\left(1,22 \frac{\lambda}{D}\right) \quad (1)$$

összefüggés áll fent, ahol D a kör alakú apertúra átmérője, míg λ a fény hullámhossza. Ebből következik, hogy két α szögtávolságban lévő pont akkor különböztethető meg egymástól, ha:

$$\alpha \geq \theta_0 = 1,22 \frac{\lambda}{D} \quad (2)$$

Mivel ilyen közeli ponttávolságok esetén igen kis szögekről beszélünk, ezért nem tévedünk nagyot, ha azt mondjuk, hogy:

$$\sin \theta_0 = \tan \theta_0 = \frac{r}{f} \quad (3)$$

Ahol r az első minimum kör sugara, míg f az optikai rendszer (objektív) fókusztávolsága.

Mivel egy objektív rekeszértéke (N),

$$N = \frac{f}{D} \quad (4)$$

ahol D jelen esetben az optika belépő pupilla nyílása, így ezt valamint az (1) és (3) egyenleteket felhasználva, meghatározhatjuk a különböző rekeszértékekhez tartozó Airy korong első minimumának a sugarát:

$$r = 1,22 \cdot \lambda \cdot N \quad (5)$$

Az (5) egyenlet alapján tehát az Airy korong nagysága egyenes arányban van a hullámhosszal és a rekesz nagyságával. F8.0 rekeszértéknél, zöld fény hullámhosszával (520 nm) számolva az Airy korong átmérője

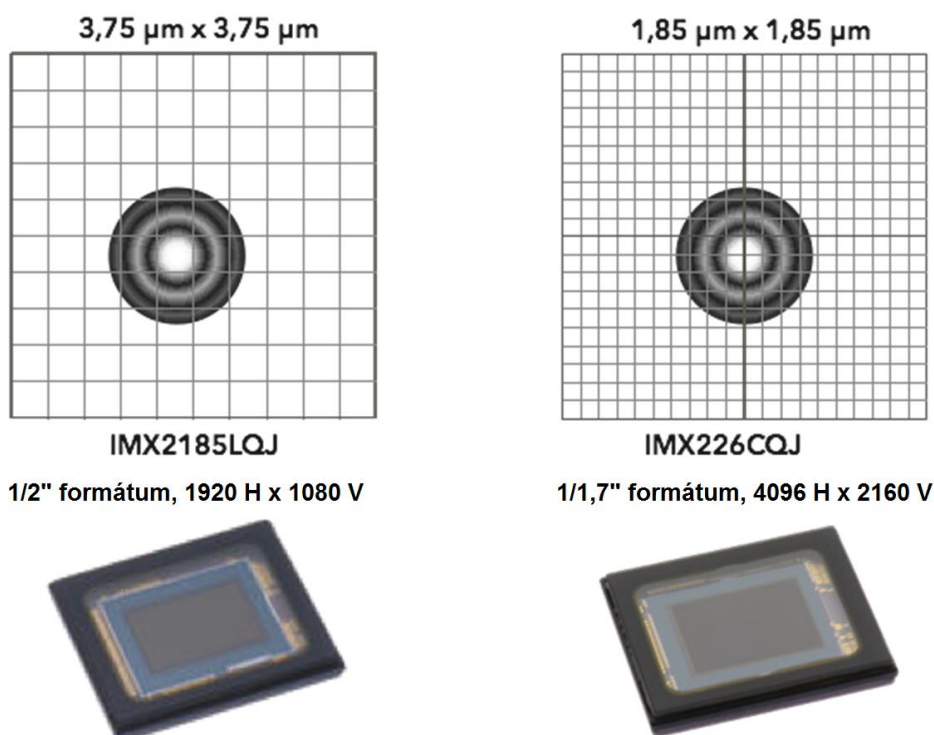
$$2r = 2,44 \cdot 5,2 \cdot 10^{-7} \cdot 8 = 10,15 [\mu\text{m}] \quad (6)$$

Egyes autóíriszes optikáknál a maximális rekeszérték akár F64 is lehet, ami a (6) egyenlet eredményéhez képest 8-szor nagyobb Airy korong átmérőt jelent.

A DIFFRAKCIÓS LIMIT ÉS A PIXELMÉRET ÖSSZEFÜGGÉSE

A gyártási technológia fejlődésével a CCD⁴ és CMOS⁵ képbontók elemi pixel méretei egyre kisebbé válnak. Az elmúlt közel húsz évben az elemi pixel mérete több mint 100-ad részére csökkent, miközben az egységnyi felületi érzékenységet ($\text{mV}/\mu\text{m}^2$) ugyanilyen arányban sikerült növelni. Ezt olyan technológiai újításoknak köszönhetjük, mint az OCML⁶, OCCF⁷ és a wolfram árnyékolás, mely 20-40 %-kal alacsonyabb reflexióval rendelkezik, mint a korábban használt alumínium réteg [5, pp. 27-30]. Míg a mobiltelefonok látványos zsugorodása egyfajta elvárást támaszt a kamera és optika gyártók felé, ugyanez nem lenne igény a videó megfigyelő rendszerek területén. Ennek ellenére a képbontó elem és az objektív formátumának csökkenése folyamatos. Manapság használt 5MP, vagy ennél nagyobb felbontású képérzékelők többnyire 1/1,8" (7,17 mm · 5,32 mm), vagy jobb esetben esetleg 1/1,7" (7,6 mm · 5,7 mm) méretűek. Ezzel szemben a DSLR⁸ fényképezőgépek formátuma a felbontással párhuzamosan folyamatosan növekszik. Egy Canon PowerShot G1 X Mark II típusú DSLR fényképezőgép közel 13 megapixeles (MP) képbontója 1,5"-os (18.7 mm · 14 mm) [6]. Ez 6,8-szor nagyobb felületű, mint az 1/1,8" formátumé.

Ha összehasonlítjuk a Sony IMX185LQJ típusú Full HD [7] és a IMX226CQJ típusú 4K [8] felbontásra képes CMOS érzékelőit, akkor láthatjuk, hogy az elemi pixel mérete a kisebb felbontású eszközénél $3,75 \mu\text{m} \cdot 3,75 \mu\text{m}$, míg ugyanez 4K esetében $1,85 \mu\text{m} \cdot 1,85 \mu\text{m}$. Mivel kis méretekről beszélünk, ezért nem tűnik nagynak a különbség. Kiszámolva azonban az elemi pixel felületének a nagyságát, az előbbi esetben $14,06(25) \mu\text{m}^2$ -t, míg a nagy felbontású eszközénél csak közel negyedét, azaz $3,42(25) \mu\text{m}^2$ -t kapunk.



4. ábra: Diffrakció hatása nagy és kis felbontás esetén (saját szerkesztés)

⁴ Charged Couple Device – Töltés csatolt elem

⁵ Complementary Metal-Oxide Semiconductor - komplementer fém-oxid félvezető

⁶ On-chip microlenses – Elemi pixelre felvitt mikrolencse

⁷ On-chip color filters – Elemi pixelre felvitt színszűrő

⁸ Digital Single Lens Reflex - Tükörreflexes

Eltekintve a színes kameránál használt Bayer színszűrőtől⁹, valamint attól a tényről, hogy ezen képbontó eszközök szín információját 3 db elemi pixel adja és ezek nem szorosan csatlakoznak egymáshoz, vizsgáljuk meg a diffrakció okozta Airy korong hatását a képalkotásra.

A 4. ábra jól szemlélteti, hogy kis felbontás esetén az Airy korong pontosan egy teljes pixelt fed le. Ugyanakkora rekeszértéket feltételezve a nagyfelbontású szenornál már több pixelre esik az egy pontból kiinduló fénysugár. Ez pedig azt jelenti, hogy az egymás közelében lévő pixelek azonos információt fognak megjeleníteni. Különböző méretű képbontó elemeknél különböző lesz az a rekeszérték, amely limitálja a maximális felbontást. Általánosságban elmondható, hogy ugyanakkora képérzékelő formátum mellett a nagyobb felbontású elemnél nagyobb rekeszértéknél következik be a felbontás romlása. Ez a jelenség a régebbi 1/4"-os, vagy 1/3"-os full HD, vagy esetleg 3 megapixeles biztonságtechnikában alkalmazott kameráknál ismeretlen volt. Ez alól kivétel a hosszú hullámhosszú infravörös sugárzás (LWIR¹⁰) tartományban működő hőkamerák, ahol az 1 megapixelnél nagyobb felbontásnál már jelentős korlátozó tényező, így polgári felhasználás esetén meg kell elégednünk az 1024 x 768-as felbontással [9, p. 21].

ÉRZÉKENYSÉG ÉS PIXELMÉRET ÖSSZEFÜGGÉSE

A képbontó eszközök felbontásának növelése egy másik problémával is együtt jár. Ez pedig az érzékenység csökkenése. Könnyű belátni, hogy a kisebb elemi pixel felületre adott állandó megvilágítás mellett egységnyi idő alatt kevesebb foton fog becsapódni, mint a nagyobbra. Ennek köszönhetően romlik az eszköz érzékenysége és dinamikatartománya. A kevesebb foton becsapódás ugyanakkora kvantum hatásfokot (QE)¹¹ feltételezve kevesebb elektront eredményez. Ez a kevesebb töltés pedig már összemérhető lesz a képbontó által termelt kiolvasó-, és sötétáram-zajjal. Ezek összességében szintén negatív hatással vannak a felbontásra. [9, pp. 35-36]

A megnövekedett jel-zaj viszony további problémát okozhat a képfeldolgozás, átvitel és tárolás terén is. A zajos kép szoftveres analitikával történő feldolgozása nehezebb, például mozgásérzékelés esetén megnövekedhet a téves riasztások száma, vagy ellenkezőleg: a küszöbszint megemelése miatt a valós mozgások felismerése csökkenhet. A nagyobb zaj rosszabb képtömörítési hatásfokot eredményez. Ez nagyobb átviteli sáv szélességhez és a tárterület igény megnövekedéséhez vezet.

TESZT EREDMÉNYEK

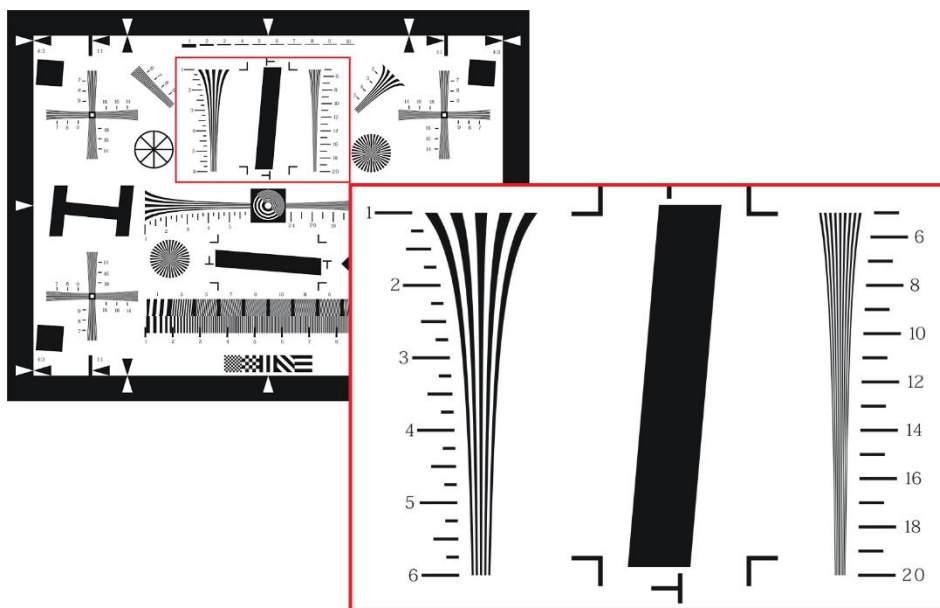
Az eddigiekben leírtak azt sugallják, hogy az említett fizikai korlátok jelentősen rontják a kép minőségét.

Az elméleti számítások helytállóságát mérésekkel igazoltam. A megfelelő tesztkörnyezet kialakításánál figyelembe vettem a készülő IEC 62676-5 szabvány 5.3 pontját, amely részletesen meghatározza a tesztábra típusát, valamint a kamerának a megvilágításnak és a fénymérőnek az egymáshoz képest történő elhelyezkedését. A méréshez használt tesztábra a szabványban is ajánlott ISO 12233.

⁹ A képbontó felületén mozaik szerűen elhelyezett RGB színszűrő

¹⁰ Long Wave Infrared

¹¹ A kvantumhatásfok (Quantum Efficiency, QE) megmutatja, hogy egységnyi becsapódó fotonból hány elektron (töltéshordozó) keletkezik



5. ábra: ISO 12233 tesztábra és a kinagyított seprűék alakzat (saját szerkesztés)

A tesztábra középső-felső részén található seprűék alakzat szolgál a vízszintes felbontás megállapítására. Azt a pontot ahol az egyre sűrűsödő fekete és fehér vonalak már nem különböztethetők meg (egybeolvadnak), nevezzük a kamera határfelbontásának. Ehhez a ponthoz tartozó vonalpár/milliméter (lp/mm) érték a skáláról leolvasható. Azért, hogy leolvasásból adódó pontatlanságot elkerüljem, a felbontást az Olympus HYRes 3.1 szoftverrel állapítottam meg.

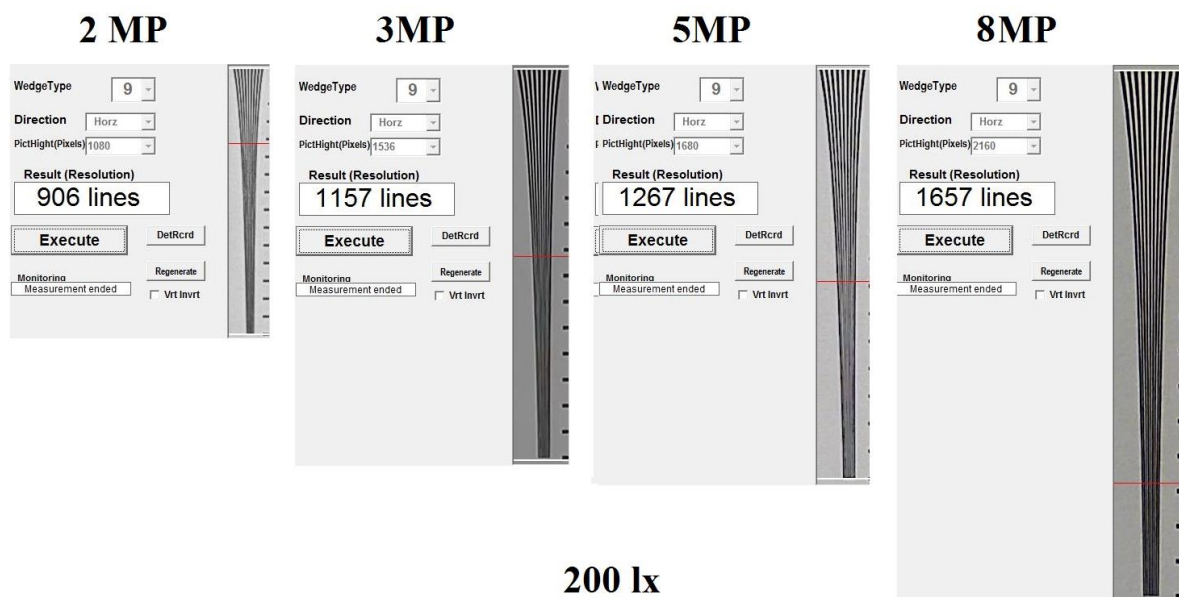
A különböző felbontású kamerák kiválasztásánál figyelembe vettem, hogy vezető gyártók közel azonos (prémium kategóriás) eszközeit válasszam. Felbontás szerint a vizsgált típusok: 2 MP (Full HD), 3 MP, 5 MP (3K) és 8 MP (4K). A tesztben résztvevő kamerák gyártói: Axis, Bosch, Hikvision és Samsung¹².

Fontos megjegyezni, hogy a felbontást nagymértékben befolyásolja az objektív határfelbontása is. Ezért a teszteszközök összeválogatásánál figyelembe vettem a gyártói ajánlást, illetve a 2 MP-es és 3 MP-es kameráknál ugyanazt a 3 MP-es objektívet használtam.

A mérés célja az volt, hogy megállapítsam: a változó környezeti megvilágítás értékek, miként befolyásolják a kép részletgazdagságát a különböző felbontású kameráknál.

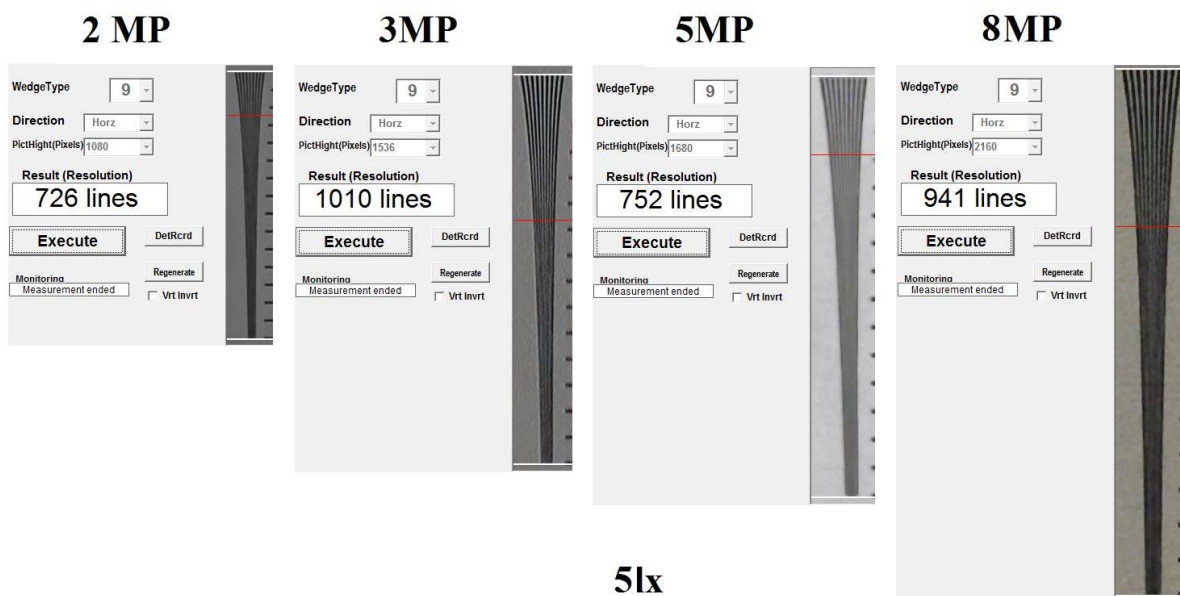
A 6. ábra az átlagos 200 lx környezeti megvilágítási értéknél kapott eredményeket mutatja. Ennél a megvilágításnál a kamerák képminősége a felbontásuknak megfelelő.

¹² Mivel a tesztnek nem volt célja, hogy rangsorolja a kamerákat, ezért a mérések eredményei szándékosan nem tartalmaznak típust és gyártót, a felsorolás alfabetikus sorrendben történt és semmilyen kapcsolatban nincs a tesztábrák sorrendjével.



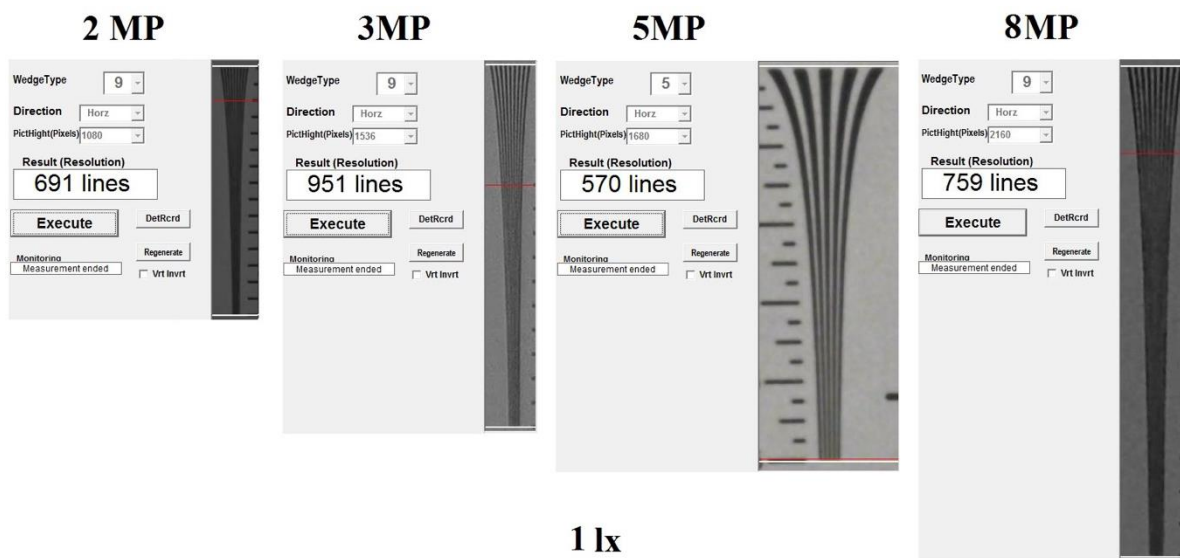
6. ábra Felbontás összehasonlítás 200 lx környezeti megvilágításnál (saját szerkesztés)

A környezeti megvilágítási értéket 5 luxra csökkentve az 8 MP-es és 5 MP-es kamerák felbontása drasztikusan romlik. Az előbbinél a csökkenés 43 %-os, míg az utóbbinál 41 %-os. Az alacsonyabb pixelszámú eszközöknél ez a felbontás-romlás csupán 13 %-os és 20 %-os (7. ábra).



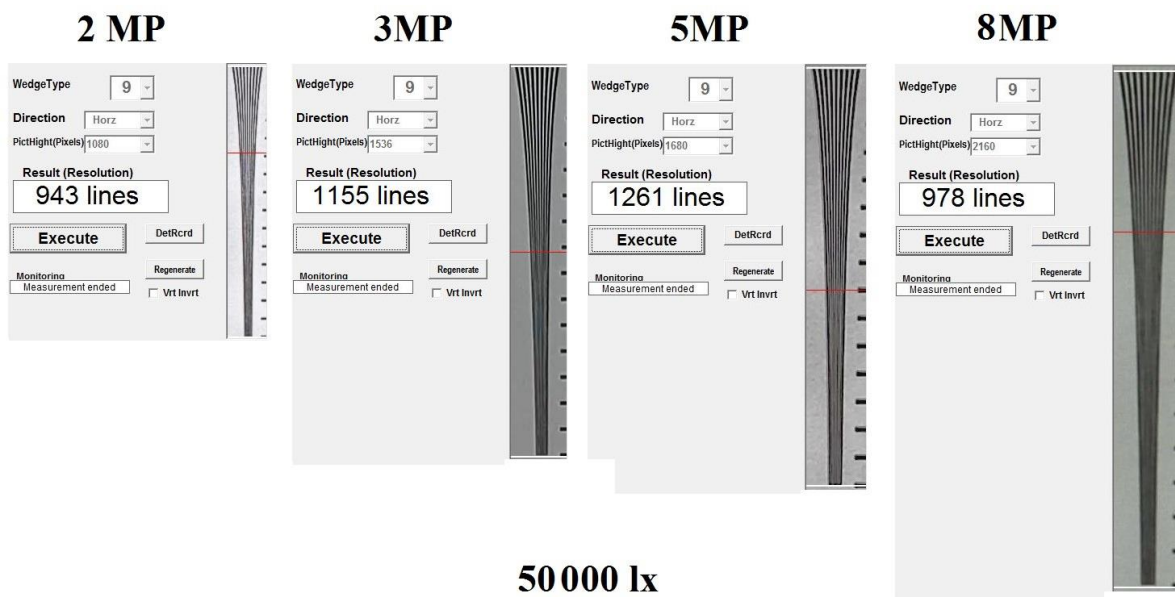
7. ábra Felbontás összehasonlítás 5 lx környezeti megvilágításnál (saját szerkesztés)

A megvilágítási értéket tovább csökkentve a felbontás tovább romlik. Az 5 MP-es és 8 MP-es kamerák egyaránt 54 %-os felbontás-csökkenést szenvedtek. A 3 MP-es eszközönél ez az érték mindössze 18 %. Az 5 MP-es kamera felbontása ennél a megvilágítási értéknél szinte a Full HD-s eszköz értékével egyezik meg, míg a legnagyobb felbontású 4K-s kamera alulmúlja a 3 MP-es képalkotót.



8. ábra Felbontás összehasonlítás 1 lx környezeti megvilágításnál (saját szerkesztés)

Az eddigiekben ismertetett méréseket beltéri környezetben, mesterséges (2700 K színhőmérsékletű) fényforrással végeztem. Azonban a diffrakciós limit hatásának vizsgálatához szükség volt több tízezer lux környezeti megvilágítási értékre, ezért a további mérések kültéren, késő tavaszi délelőtt (május 20.-án) 11 órakor, napos időben történtek. Az eredmények a 4K-s kameránál igazolták a várakozásomat: az eszköz felbontása 41 %-kal romlott, a mért érték közel van a Full HD-s kamera felbontásához. Az 5 MP-es és a 3 MP-es, valamint a 2 MP-es kameránál a diffrakció nem okoz felbontás csökkenést (9. ábra). A két utóbbi eszköznél ez elfogadható, azonban az 5 MP-es kameránál ez némi magyarázatra szorul. Ennél az eszköznél használt optika rekeszértéke F1.8 és F8 között változik. F8-as rekesznél pedig ennél az 1/1.8"-os formátumú képbontónál nem mérhető számottevő diffrakciós hatás.



9. ábra: Felbontás-összehasonlítás 50.000 lx környezeti megvilágításnál (saját szerkesztés)

KÖVETKEZTETÉSEK

A gyártástechnológia fejlődésének köszönhetően folyamatosan csökken a videó megfigyelő rendszerek kameráinak CCD és CMOS képérzékelő mérete. Ezzel párhuzamosan egyfajta verseny indult meg a gyártók között a minél nagyobb felbontású kamerák gyártása terén és mint azt a statisztikai mérés is igazolja már az eladások is elmozdultak ebbe az irányba.

A formátumcsökkenés és a felbontás-növekedés következménye az elemi pixelméret zsugorodása. Ez viszont olyan nem kívánt hatásokkal jár, amelyek ellene hatnak a részletgazdag, nagyfelbontású képnek. A 1/1,7"-os formátumba zsugorított 4K, vagy e feletti pixelszámú kamerák felbontása környezeti megvilágítás szempontjából alulról és felülről is korlátos lesz. Alacsony megvilágítás esetén romlik a jel-zaj viszony és ezzel együtt a felbontás. A zajos kép tömörítési határfoka rosszabb, így a kép átvitelekor nagyobb sávzélességet, rögzítéskor több tárhelyet igényel. Kültéri alkalmazás esetén, ahol nyáron számolni kell az akár 100.000 lx környezeti megvilágítási értékkel, az autóíriszes objektív összehúzódo rekeszének köszönhető diffrakciós elhajlás okoz felbontás-romlást. A két szélső esetben a minőségromlás olyan mértékű is lehet, hogy egy jó minőségű Full HD felbontású kamera akár kisebb zajú, részletgazdagabb képet is produkálhat.

Az eddig leírtak nem azt jelentik, hogy az ilyen kis formátumú 4K feletti felbontású kamerák nem használhatók. Állandó és elégséges (néhány száztól pár ezer lux) megvilágítás mellett a kamera auto shutter (elektronikus írisz) funkciójára célszerű rábízni a fényerő szabályzást és inkább kézi rekeszű objektívet kell alkalmazni. A rekeszt javasolt maximálisra kinyitni, bár ekkor számolni kell a mélységélesség csökkenésével. Szélsőségesebb környezeti megvilágítás esetén a kamera elektronikus írisz funkciója nem képes lekezelni a nagy fényátfogást. Ekkor olyan optikát kell választani, amelynek a maximális rekeszértéke nem haladja meg F8-as értéket, míg sötétedéskor kiegészítő világitást kell alkalmazni. Végző esetben megfontolandó több, kisebb felbontású kamera alkalmazása is.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] HONOVICH, J. IPVM, <http://ipvm.com/reports/resolution-stats-2016>, (letöltve: 2018.05.26.)
- [2] WOLF, E. és BORN, M.: *Principles of Optics*, Cambridge, Cambridge University Press, 1999.
- [3] WAGH, S.M és DESHPANDE, D.A.: *Essentials of Physics*, Delhi, PHI Learning Private Limited, 2013.
- [4] RAGHUVANSHI, G.: *Engineering Physics*, New-Delhi, PHI Learning Private Limited, 2010.
- [5] SUZUKI, T.: *Challenges of image-sensor development*, San Francisco, IEEE, 2010.
- [6] Canon PowerShot G1 X Mark II
http://www.canon-europe.com/for_home/product_finder/cameras/digital_camera/powershot/powershot_g1x_mark_ii/-specification, (letöltve: 2018.05.26.)
- [7] http://www.sony.net/Products/SC-HP/new_pro/september_2013/imx185lqj_e.html, (letöltve: 2018.05.26)
- [8] http://www.sony.net/Products/SC-HP/new_pro/february_2014/imx226_e.html, (letöltve: 2018.05.26)

- [9] HORVÁTH T. és KOVÁCS T.: *Possible application of thermal cameras with regard to security engineering*; *Hírvillám* IV. 1. (2013) 17-31. o.
- [10] JANESICK, J. R. in *Scientific Charge-coupled Devices*, Bellingham, Washington: Press, SPIE, 2001.