



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM  
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR  
MECHATRONIKA, OPTIKA ÉS GÉPÉSZETI INFORMATIKA TANSZÉK

Kis Gábor  
TDK Dolgozat

# A megvilágítás hatása az MTF alapú élesség mérésekre

Konzulens:  
Dr. Nagy Balázs Vince  
egyetemi docens

Budapest, 2023

## **KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS**

Szeretnék köszönetet mondani Dr. Nagy Balázs Vincének, aki bevezetett az optika világába és lelkesített a TDK dolgozatom megírására. Köszönettel tartozom Salem Reydannak, aki a Robert Bosch Kft. optikai csoport vezetőjeként engedélyezte és bátorította a TDK dolgozatom elkészítését, a csoport forrásainak felhasználásával. Továbbá szeretnék köszönetet mondani Kocsis Péternek és Junaid Mohammadnak, akik folyamatosan segítettek a témám elméleti elmélyítésében és a sok kérdésemre kitartóan válaszoltak. Valamint külön köszönetet szeretnék kifejezni Molnár Andrásnak, amiért mechanikailag folyamatos segítséget nyújtott és türelemmel segített az elképzelt összeállításaim építésnek megvalósításában.

# **TARTALOMJEGYZÉK**

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 1. BEVEZETÉS .....                  | 1  |
| 2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS .....    | 2  |
| 2.1. Az élesség mérése.....         | 2  |
| 2.1.1. SSIM.....                    | 4  |
| 2.1.2. SNR & PSNR .....             | 5  |
| 2.1.3. MSE & RMSE.....              | 6  |
| 2.2. SFR.....                       | 7  |
| 2.2.1. MTF.....                     | 8  |
| 3. MÉRÉSEK .....                    | 14 |
| 3.1. A mérőállomás.....             | 14 |
| 3.2. A mérés előkészítése .....     | 15 |
| 3.3. A mérés menete .....           | 16 |
| 4. AZ EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE ..... | 18 |
| 5. ÖSSZEGZÉS .....                  | 20 |
| 6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK .....       | 21 |

## **RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE**

NCAP – Új Autó Értékelési Rendszer

ISO – Internacionális Szabványozó Szervezet

SSIM – Strukturális egyezőségi index módszer

DSSIM – Strukturális különbözőségi index módszer

FSIM – Jellemzői hasonlósági index módszer

PC – Fázis egyezés

GM – Gradiens nagyság

SNR – Jel/zaj arány

PSNR – Csúcs jel/zaj arány

MSE – Átlagos négyzetes hiba

RMSE – Átlagos négyzetgyökös hiba

SFR – Térbeli frekvencia válasz

OTF – Optikai átviteli függvény

MTF – Moduláris átviteli függvény

OECF – Optoelektronikai konverziós függvény

ESF – Él terjedési függvény

LSF – Fényintenzitás eloszlási függvény

SQF – Szubjektív minőségi faktor

CSF – Emberi kontraszt szenzitivitási függvény

CIE – Internacionális Illuminációs Komissió

ND – Semleges sűrűség

CFA – Színszűrő tömb

# 1. BEVEZETÉS

Napjainkban a képfeldolgozás egyre nagyobb fontosságot kap, mivel az autógyártók egyre több szoftveres megoldást keresnek a navigáláshoz és az önvezető képesség növelésére. Az önvezetés bevezetéséhez viszont a fő akadály jelenleg a biztonság garantálása, miszerint ezeknek a rendszereknek képesnek kell lenniük a detektált térben valós idejű döntést hozni. Európában az Euro NCAP (Európai Új Autó Értékelési Rendszer) is különös hangsúlyt helyez erre, mely organizáció a biztonság függvényében ad értékeléseket maximum öt csillagot ad a piacra szánt autóknak [1].

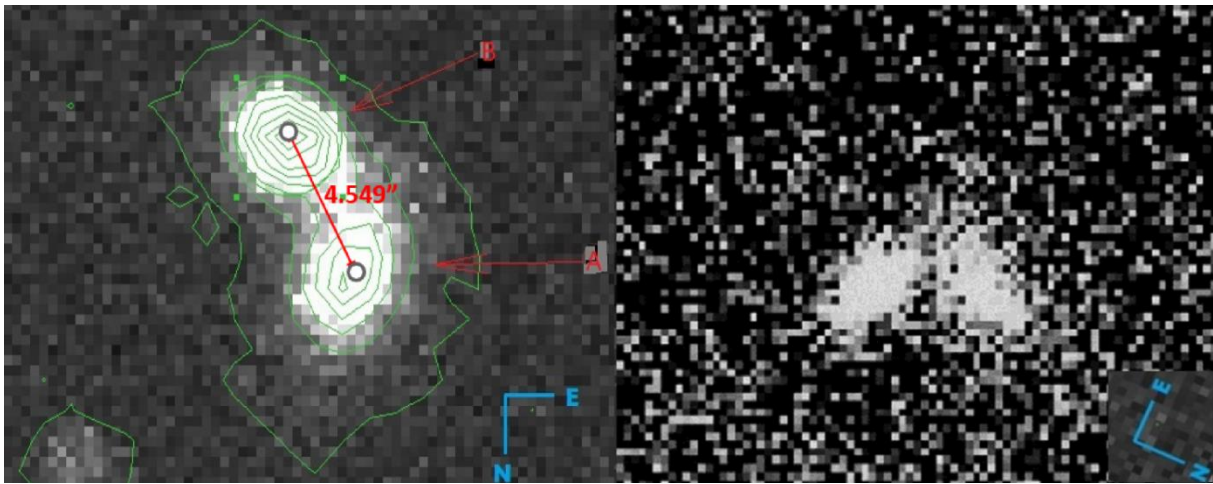
A képfeldolgozás egyik fontos paramétere az éles kép kialakítása, mivel egy általános felhasználó (pl.: fotográfus) azonnali visszacsatolást igényelhet a munkája során. Ennek értelmében egy minőségi paraméterről beszélünk, ahol a cégek és gyártók egyaránt törekednek az éles képalkotó rendszerek kialakítására. Az élesség mérésére sokféle módszer létezik (pl.: PSNR [2]; RMSE [3]), viszont az MTF (Moduláris Átviteli Funkció) módszere képfeldolgozás terén kimagasló, mivel egy átfogóbb mérőszámot képes adni az optikai elemek együttes élességéről. A szabványozó szervezetek közül az ISO (Internacionális Szabványozó Szervezet) meg is határozza az MTF számolások módszertanát a 12233 számú szabványában [4]. Ez már segít a képalkotó rendszerek tervezésében, viszont a megvilágítási környezetre nem tér ki egyáltalán. A dolgozatom során szeretném megvizsgálni, hogy a LED-es (fénykibocsátó diódás) megvilágítás hullámhosszainak megváltoztatásával hatással tudok-e lenni az MTF értékekre és ha lehetséges, megállapítani egy ideális hullámhosszt. Nullhipotézisem, hogy az alacsonyabb hullámhosszú – azaz főként kék színű - megvilágítással élesebb értékeket fogok kapni az átlagoshoz képest, mivel az Robert Bosch Kft. optikai csoport mérések során már tapasztalt hasonló jelenséget, de a bebizonyításra nem került sor. Ezenkívül feltételezem, hogy a fényintenzitás növelésével magasabb kontrasztú képeket tudok létrehozni, így a minőség látszatát is növelve.

A kutatásom során, a Robert Bosch Kft. budapesti kampuszán található élességmérő berendezést használtam, ahol a berendezés körül a már meglévő infrastruktúrát használtam fel a képkinyeréshez, majd a kutatás céljához kiegészítettem azt.

## 2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

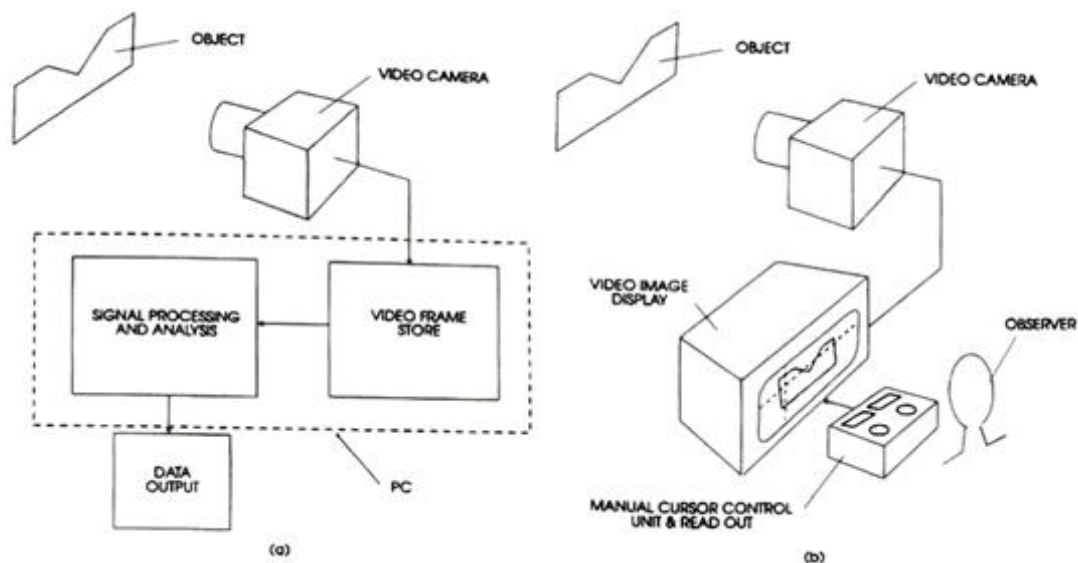
### 2.1. Az élesség mérése

Az első felmerülő kérdés talán az lehet, hogy milyen céllal készüljön az adott kép? Szeretnénk-e minél realiztikusabb, minél pontosabb leképezést mutatni a világról, vagy az űrkutatásban minél messzebbi galaxisokat akarunk látni, még akkor is, ha az pár pixel felbontású? Erre jó példaként szolgálhat a hűrelmélet bizonyításához szolgáló kutatások sokasága, ahol már egy űrkutatásban használt szenzor több fényévre is ellát [5]. Persze nem a kép lesz a bizonyításhoz a mérvadó, inkább ahhoz fontos, hogy egyáltalán érdemes-e vizsgálni az adott teret.



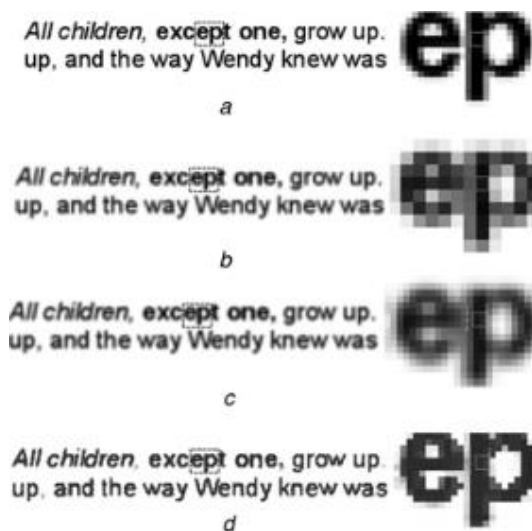
1. ábra: A hűrelmélet bizonyítására jelölt legújabb képek [5]

Az élesség mérésnek általában két mérési módja van: szubjektív és objektív [6]. A szubjektív méréseknél az emberi ítéletet használjuk mérvadó paraméterként, miszerint nem nevezünk meg számszerű értékeket, csak az adott operátor érzékelését vesszük figyelembe [7]. Ezt a módszert fontos megemlíteni, mivel a képalkotás egyik meghatározó területe az, hogy mi hogyan látjuk egy képet. Viszont exponenciálisan csökken az emberi szubjektivitás mértéke ezen a téren, mivel a képfeldolgozó rendszereket napról napra egyre többet használjuk fel az életünk megkönnyítésére. Ezen rendszerek pedig nem tudnak szubjektív méréseken alapul döntést hozni – bár a mesterséges intelligencia lehet ezen az úton fog tovább haladni – ezért szükséges objektív mérőszámokat bevezetni, ezeket a továbbiakban ismertetem.



2. ábra: Objektív (a) és szubjektív (b) mérési összeállítás [8]

Manapság már a legtöbb ember által érzékelt szubjektív paramétert objektív mérésekkel is végre tudjuk hajtani. Legyen szó homályosításról, fényvisszaadásról, zajos képről, vagy akár a körvonalazás mértékéről, ezeket ma már algoritmusokkal tetszőlegesen tudjuk állítani. Léteznek olyan algoritmusok, amelyek régen beszakentelt könyvek írását képesek élessebbé, és ez által olvashatóbbá tenni, több minőségi paraméter kihasználásával. Erre látványos metódusokat hoztak létre a Tarbiat Modares Egyetem kutatói [9], amely a kontúrok szélessége alapján az írás minőségét javítani képes.



3. ábra: Egy írás javító algoritmus lépései [9]

Fontos megjegyezni, hogy a képfeldolgozás területén bevett szokás, hogy minden felhasznált képet szürkeárnyaltosra konvertálunk (általában RGB képekről). Ennek sok oka lehet, többek között az, hogy egy szintévesztő nézőnek egy jó minőségű szürkeárnyaltos kép több információt ad át, mint egy színes kép. Valamint a nyomtatás árainak csökkentésére is egy megoldás lehet, ha egy publikáció csak fekete-fehérben nyomtat, ilyenkor a szürkeárnyaltos kép megőrzi a fontos információt [10].

### 2.1.1. SSIM

Az SSIM (Strukturális egyezőségi index módszer) egy érzékelés alapú modell, ahol a strukturális információk vannak a főszerepben. Ez azt jelenti, hogy az egyes pixelek nem önmagukban érdekesek, hanem a környező pixelek egészében értelmezhetőek. Ennek megfelelően az SSIM a vizsgált kép (y) fénysűrűségét, kontrasztját és szerkezetét vizsgálja a referencia kép (x) függvényében, ha mindkét kép mérete azonos:

$$SSIM(x, y) = l(x, y) * c(x, y) * s(x, y) \quad (1)$$

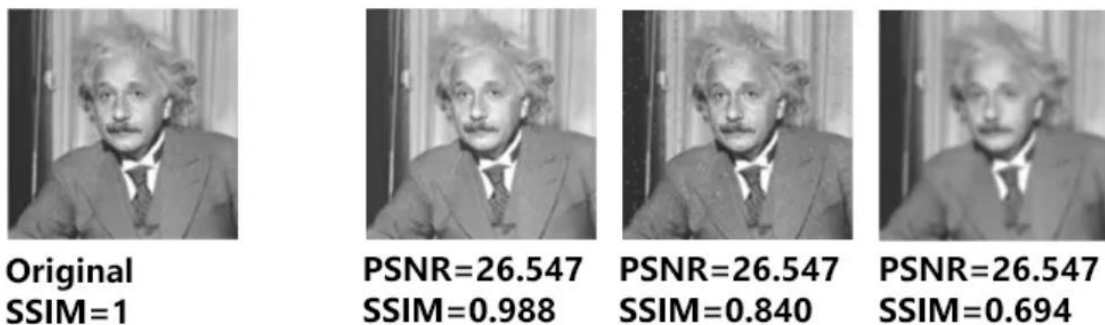
ahol,

l – A fénysűrűség különbség mértéke.

c – A kontraszt különbség mértéke.

s - A szerkezeti különbség mértéke.

Érdeemes megemlíteni, hogy az SSIM indexe mindig a referencia képet veszi 1-nek, és -1-től 1-ig ad a vizsgált képnek értéket, miszerint 1 a tökéletes egyezést, 0 az egyáltalán nem egyezést, a -1 pedig a tökéletes antikorrrelációt fejezi ki [2]. Mértékegysége nincs.



4. ábra: Az SSIM használata homályosításnál [11]

Az SSIM két fő variációja a DDSIM és az FSIM:

**DDSIM (Strukturális különbözőségi index módszer):** Az SSIM-ből származtatott strukturális különbözőség, itt az 1-hez közelítéssel egyre kevésbé fog azonosnak tűnni a vizsgált kép [2].

$$DSSIM(x, y) = \frac{1 - SSIM(x, y)}{2} \quad (2)$$

**FSIM (Jellemzői hasonlósági index módszer):** Két fő alkotórésze a PC (fázis egyezés) és GM (gradiens nagyság). A PC invariáns a kontraszthoz és a fény eltérésekhez, valamint a kép frekvencia függvényeit emeli ki. A GM az adott kép horizontális és vertikális gradienseit



veszi alapul. A paraméterek a relevanciától függően súlyozhatók hatványtényezők megadásával, általában 1-nek szokták értelmezni a felhasználók [2]. Ennek megfelelően az FSIM felírható a két alkotórész – PC és GM - szorzataként:

$$FSIM(x, y) = S_{PC}(x, y) \cdot S_{GM}(x, y) \quad (3)$$

### 2.1.2. SNR & PSNR

Az SNR (Jel/Zaj arány) a legegyszerűbb értelemben egy arányszám, ami meghatározza, hogy egy referencia képhez (x) képest mennyire zajos a vizsgált kép (y). Logaritmikus számolása miatt decibelben szokásos megadni az értékét, aminek a skálája pont ellentétesen működik, a zajosabb kép kevesebb decibel értéket fog adni [12].

$$SNR(x, y) = 10 * \log_{10} \left( \frac{x}{y} \right) \quad (4)$$

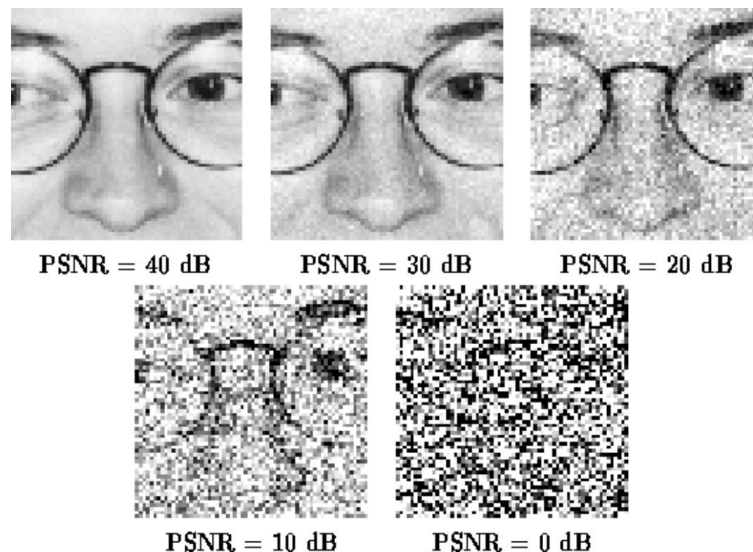
A PSNR (Csúcs jel/zaj arány) az SNR tovább fejlesztett változata, ami az MSE-t (Átlagos négyzetgyök hiba) veszi alapul, ami a referencia képtől való eltérés mértékének a gyökeinek az átlagát számolja. Az MSE önmagában is egy jó képminőségi mérőszámként funkcionál, erről a következő fejezetben bővebben is kitérek. Ennek a segítségével, az SNR-hoz hasonlóan megtudjuk határozni a referencia kép (x) és a vizsgált kép (y) közti zajkülönbséget, ahol a nagyobb érték jobb minőségre utal [12]. Ha mindkét kép értelmezhető az  $M \times N$  koordináta rendszerben, akkor:

$$PSNR(x, y) = 10 * \log_{10}(n^2 / MSE(x, y)) \quad (5)$$

Ahol n a fényintenzitási szintek száma, és:

$$MSE(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (x_{ij} - y_{ij})^2 \quad (6)$$

Ahol i és j az adott pixel elhelyezkedésére utal az  $M \times N$  koordináta rendszerben.



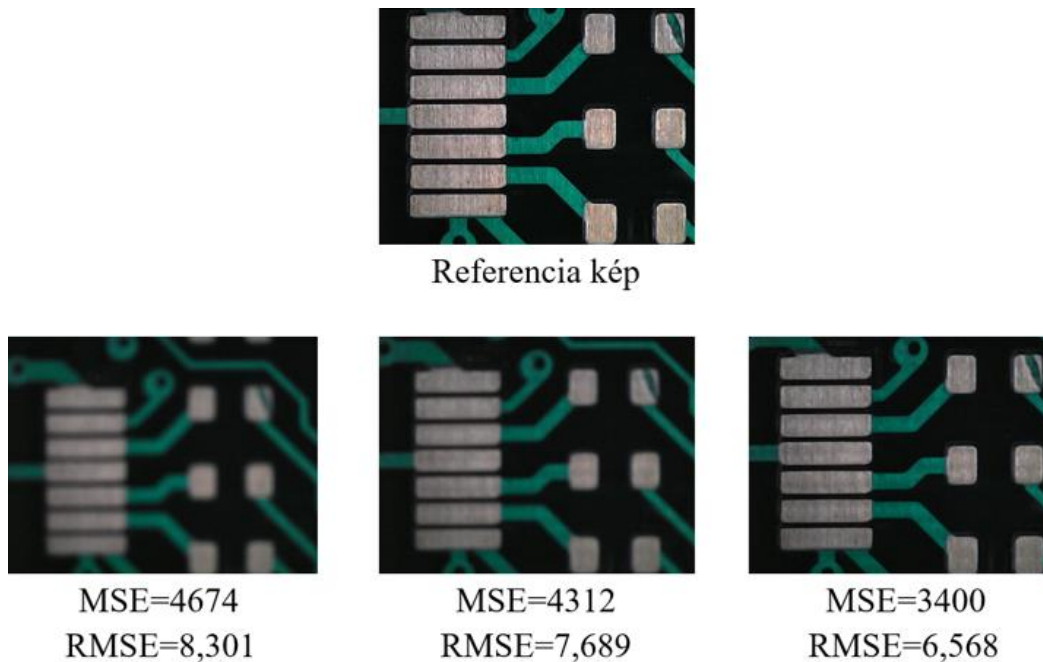
5. ábra: A PSNR értékek különböző zajszinteken [13]

### 2.1.3. MSE & RMSE

Az MSE (Átlagos négyzetes hiba) az egyik leggyakoribb képminőségi számítási módszer, ahol a referencia képtől való eltérés mértékének a gyökének az átlagából kapunk egy értéket, a nullához közelítve tekintjük jobbnak [2]. A (6)-os egyenletből látható, hogy az abszolút hiba mértékét fejezzük ezzel ki. Az MSE az egyik legdominánsabb mennyiségi teljesítménymutató a jelfeldolgozásban. Bár köztudott, hogy főleg képfeldolgozásban az MSE-nek gyenge a teljesítménye, ettől függetlenül ugyanolyan elterjedt, és a mai napig nagy mértékben használt [14].

Az RMSE (Átlagos négyzetgyökös hiba) egy kiterjedten használt statisztikai számítási módszer, ami egy jó megközelítést ad például meteorológiai, levegő minőségi, és klíma kutatási modellek teljesítményére [3], de általánosan szinte minden területen használható. Egyszerűen az MSE számításából von gyököt, így a módszertana megegyező, az értékek általában 0-hoz közelítők lesznek. A nagyobb érték, nagyobb eltérésre utal. Mértékegysége nincs.

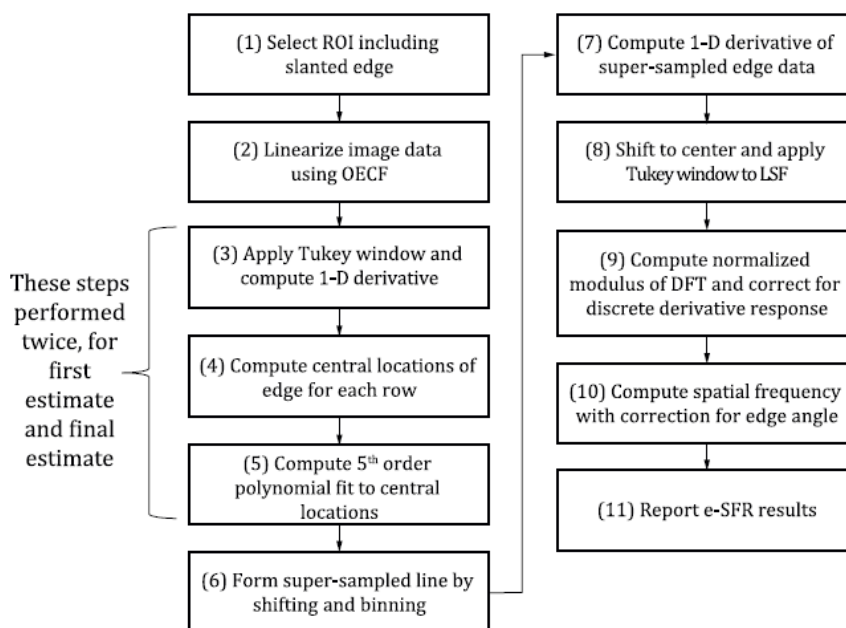
$$RMSE = \sqrt{MSE(x, y)} \quad (7)$$



6. ábra: Az MSE és RMSE használata különböző homályosítási szinteken [15]

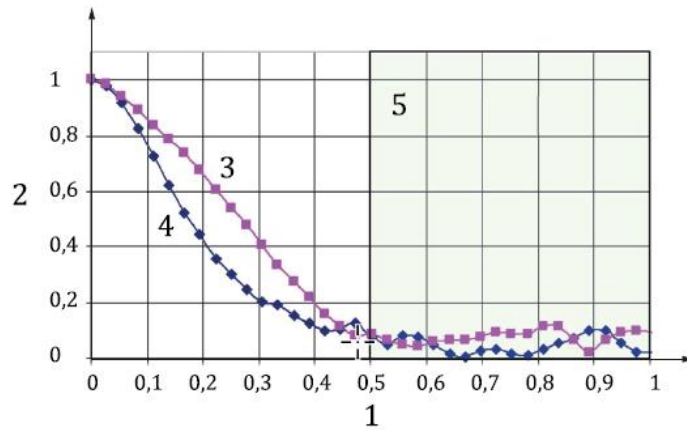
## 2.2. SFR

Az SFR (Térbeli frekvencia válasz) általános definíciója szerint egy több értékű optikai mérési érték, ami megadja a kontraszt veszteség mennyiségét a térbeli frekvencia függvényében. Lényegében az adott optikai rendszer teljesítményét méri, hogy milyen pontossággal tudja az vizsgált objektum részleteit visszaadni. Az ISO 12233 szabvány meghatározza ennek a számolási metódusát, hogy a digitális kamerák minőség vizsgálatát lehetőleg mindenki egységesen végezze el [4]. A 7. ábra blokkdiagramja ismerteti a számolási lépéseket.



7. ábra: Az SFR számolásának folyamata az ISO 12233 szerint [16]

Először kiválasztjuk a vizsgált elemet, amiben benne van egy ferde él. Ezután, hogy a kamera fotometriai válaszával tudjunk kompenzálni, linearizáljuk a képet OECF (Optoelektronikai konverziós függvény) segítségével. Majd matematikai algoritmusok segítségével megbecsüljük a legjobb illesztés a kapott fényintenzitási függvényeinkre, és ezeket normalizáljuk, ez lesz az ESF (Él terjedési függvény). Miután megkaptuk az adott térbeli frekvenciákra az ESF-et, egy deriválás segítségével ezt egy LSF-é (Fényintenzitás eloszlási függvény) alkotjuk, majd korrigáljuk [16]. A ferde él SFR-ját az LSF Fourier transzformációjával kapjuk meg. Az SFR grafikus megjelenítéséről is rendelkezik az ISO 12233, miszerint egy függvény vízszintes tengelyén a normalizált térbeli frekvenciát jelenítjük meg [cycles/pixel]-ben, a horizontális tengelyen pedig az él-SFR-t. Ezt a függvényt a kijelölt frekvenciákon nevezzük SFR-nak. Az SFR egy általános mérőszám, ennek speciális esetét, az MTF-et használjuk főként az élesség vizsgálatához.

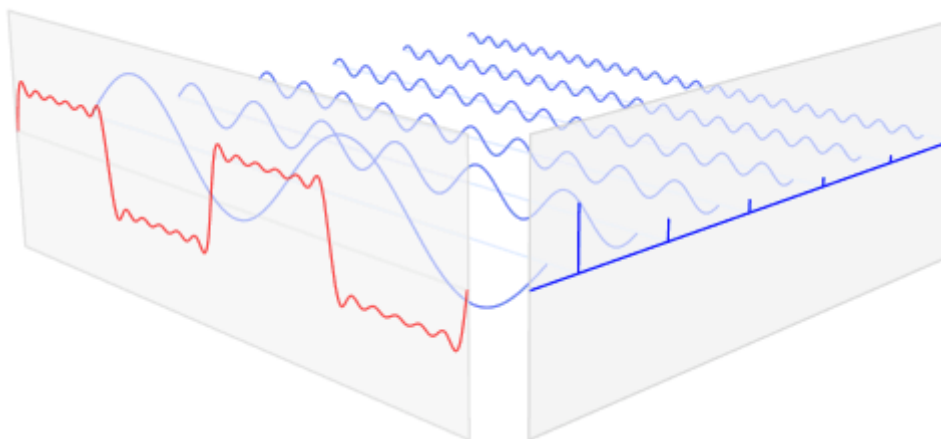


- Key**
- 1 normalized spatial frequency (cycles/pixel)
  - 2 edge spatial frequency response (e-SFR)
  - 3 horizontal e-SFR
  - 4 vertical e-SFR
  - 5 aliased region

8. ábra: Az SFR grafikus megjelenítése az ISO 12233 szerint [4]

### 2.2.1. MTF

Az MTF (Moduláris átviteli függvény) meghatározásához szükséges az a feltétel, hogy a vizsgált kép harmonikus legyen. Ez földi körülmények között mindig teljesül, mivel minden objektum ilyen értelemben harmonikus, ezért minden, a Földön készült kép is harmonikus [17]. Ekkor különböző frekvenciákon különböző hullámhosszokat tudunk megfigyelni, ezt pedig a Fourier transzformáció ki tudja használni. A Fourier transzformáció segítségével minden nemlineáris függvényt át tudunk alakítani végtelen mennyiségű szinuszcömbévé [18].



9. ábra: Az egységugrás függvény szinuszcömbékre bontva [18]

Az a folyamat, ami a felhasznált optikai rendszerünk által feldolgozza a látott objektum képét, nevezzük OTF-nek (Optikai átviteli függvény) [17]. Az OTF alatt az LSF-nek a Fourier transzformáltját is tudjuk érteni, de csak is akkor, ha egy dimenziós térben gondolkodunk.

$$OTF(s) = \mathcal{F}[LSF(x)] \quad (8)$$

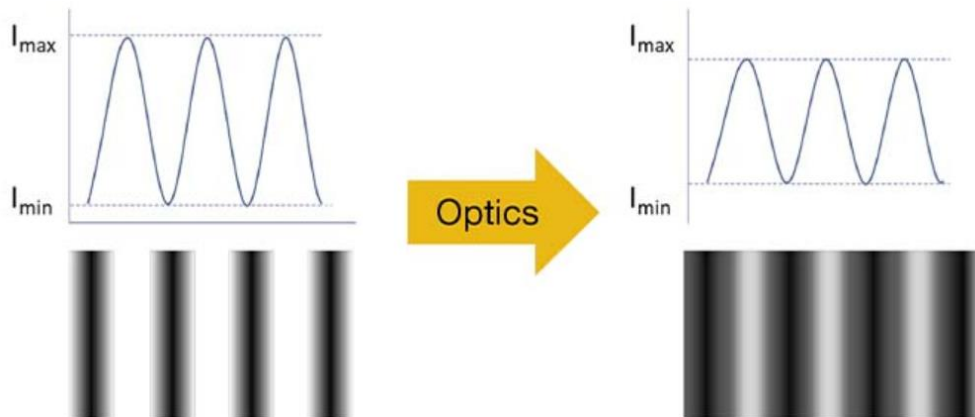
Mivel minden nemlineáris függvény végtelen szinuszgörbévé alakítható, ezért minden térbeli frekvencián kell venni az abszolút értékét az OTF-nek ahhoz, hogy megkapjuk az MTF-et [19]. Egy másik oldalról közelítve, a kontraszt, avagy moduláció, egy potenciálisan nagyon hasznos paraméter lehet arra, hogy egy adott rendszer teljesítményét értékeljük. A kép és tárgy modulációjának arányszámát minden térbeli frekvenciánál definiáljuk MTF-nek [17]. Ezt a modulációt használjuk fel az MTF számolásokban is, miszerint:

$$Moduláció = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (9)$$

ahol,

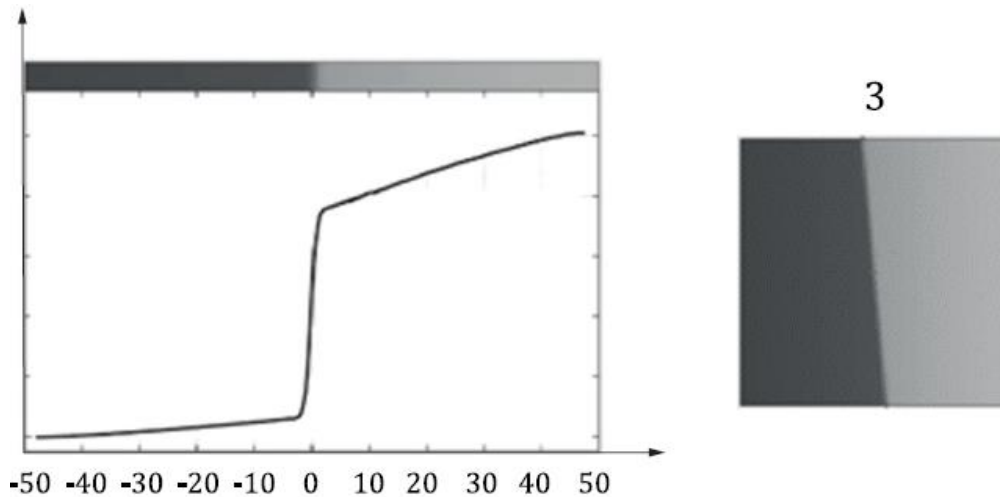
$I_{max}$  – A képen talált maximális fényintenzitás értéke.

$I_{min}$  – A képen talált minimális fényintenzitás értéke.



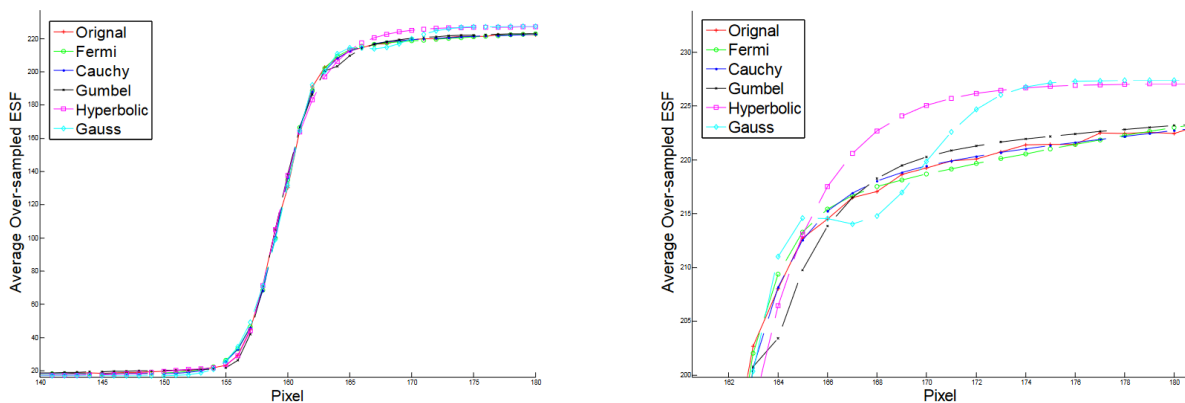
10. ábra: A valós kép optikai leképezése [20]

Gyakorlatban viszont az egyik legjobban ismert módszer arra, hogy egy adott átviteli függvényt meghatározzunk mérések által az, hogy az ESF-t használjuk fel [19]. Ilyenkor a vizsgált képen kiválasztunk egy erőteljes élet, ahol nagy kontraszt változás következik be kis térben. Ezekben az éleken az OTF az egységugrás függvényhez fog hasonlítani. Mérések során a 11. ábra jobb oldali képrészlethez hasonló képeket keresünk, majd az összes fényintenzitás értékét beolvassuk. Ha ESF-et keresünk, akkor a kép soraiként kapunk egy-egy függvényt a fényintenzitásról, majd a kiválasztott tartomány összes ilyen függvényét tekintjük az ESF-nek.



11. ábra: Egy ESF görbe (bal) és egy ideális képrészlet (jobb) [4]

Az ESF függvény meghatározása során a mért pontjaink többsége a két szélsőértéken fog elhelyezkedni, és csak pár érték az átmeneten. Emiatt szükséges egy függvény illesztés a kapott adatokra, tapasztalatok alapján a logisztikai (Fermi) illesztés lesz a legpontosabb [21]. A Fermi-függvényeket nemlineáris, legkisebb négyzetek technikájával írjuk fel, így az ESF függvény minden részén törekszik az optimalizációra. A 12. ábra vizuálisan is mutatja, hogy az eredeti görbéhez legjobban a Fermi illesztés tart.

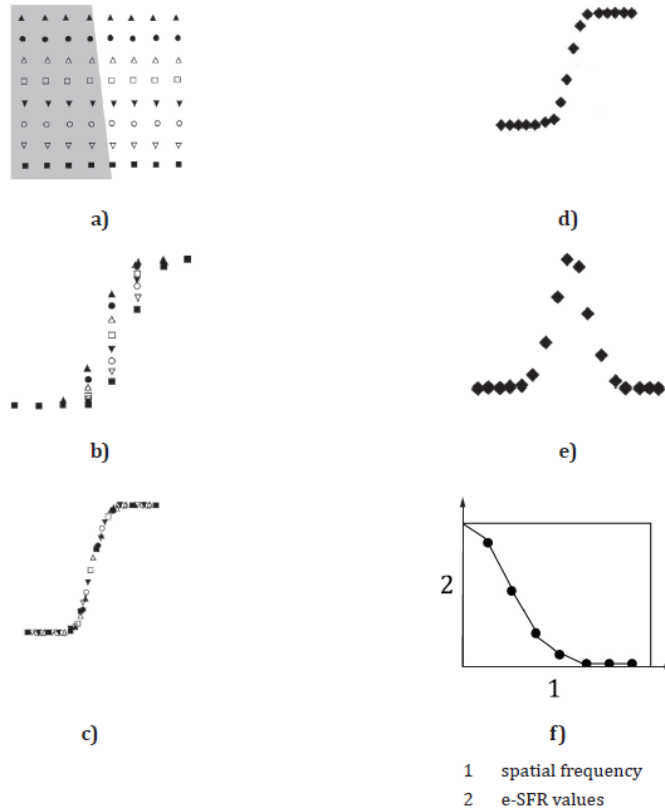


12. ábra: A különböző illesztések egy ESF-re (bal), a görbék felső részére benagyítás [21]

Az ESF-ből LSF-et a függvény deriválásával kapunk, ez egy Gauss görbéhez fog hasonlítani két dimenzióban, a 13. ábra e) pontjában ez látható. Végül az LSF Fourier transzformációjából meg kapjuk az MTF-et adott frekvencián, a 13. ábra f) pontjában ennek egy általános függvénye látható.

$$LSF(x) = \frac{dESF(x)}{dx} \quad (10)$$

$$MTF(x) = \mathcal{F}(LSF(x)) \quad (11)$$



13. ábra: Az ISO 12233 szerinti MTF számolás fő lépései [4]

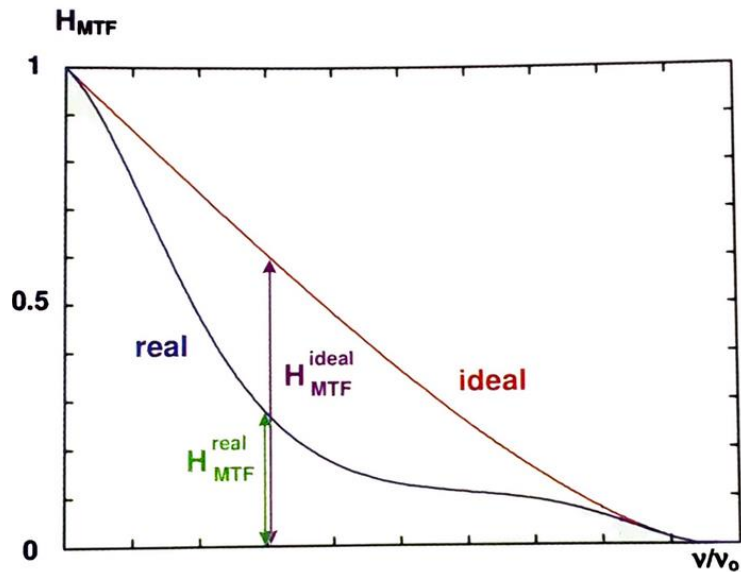
Az ISO 12233 szabvány szerint először vesszük a vizsgált kép fényintenzitás értékeit (a), majd ezeket a nagyságuk szerint függvénybe foglaljuk (b). A függvények összességét normalizáljuk és függvényt illesztünk rá (c), majd a túl mintázott értékeket eltávolítjuk (d), ez lesz az ESF. Végezetül deriváljuk az ESF-et (e), ez lesz az LSF, majd Fourier transzformájuk (f), ez lesz az MTF [4].

### 2.2.2. Az MTF minőségi paraméterei

**Hopkins faktor:** A valós optikai rendszerek az ideálisnál kevesebb információt tudnak átadni, így a kontraszt csökken a magasabb térbeli frekvencia függvényében. Ennek lehetséges oka a véges számú apertúra, valamint a diffrakció mértéke. Ahhoz, hogy egy adott apertúrából ki tudjuk szűrni az aberrációk hatását, általában normalizáljuk a valós MTF-et az ideális MTF-hez [19]. Ennek megfelelően Hopkins ezt a különbséget egy minőségi paraméterként definiálja, miszerint:

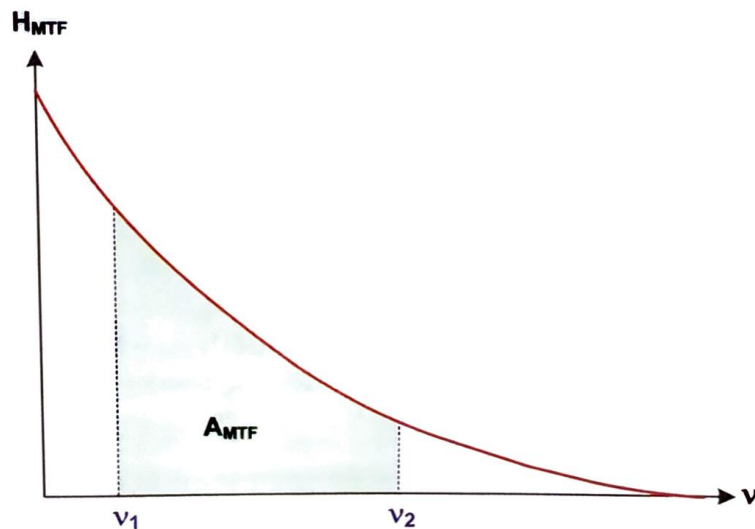
$$\Delta H_{MTF}(v) = \frac{H_{MTF}^{(valós)}(v)}{H_{MTF}^{(ideális)}(v)} \quad (12)$$

ahol  $v$  az adott térbeli frekvencia.



14. ábra: A Hopkins faktor definíciója [19]

**SQF (Szubjektív Minőségi Faktor) kritérium:** Az SQF a releváns térbeli frekvenciákra utal, ahol csak azokat a frekvenciákat vizsgáljuk, amelyek az adott felhasználáshoz kellene. Így az MTF görbe alatti terület nagyságát jelöljük ki minőségi faktornak [19].



15. ábra: Az SQF definíciója [19]

$$A_{MTF} = K \int_{\vartheta_1 < \vartheta < \vartheta_2} H_{MTF}(\vartheta) d\vartheta \quad (13)$$

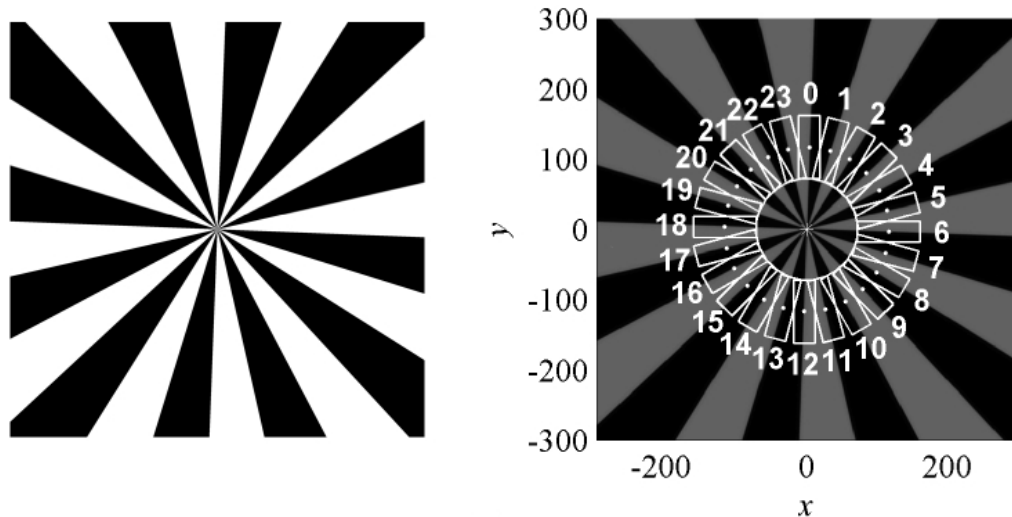
ahol  $K$  a méretezési faktor.

Ha az SQF-et megszorozzuk a CSF-fel (Emberi kontraszt szenzitivitási függvény), akkor megkapjuk azokat a térbeli frekvenciákat, amelyek az emberi látáshoz relevánsak, így a gyakorlatban ez az általános viszonyítási függvény [19].



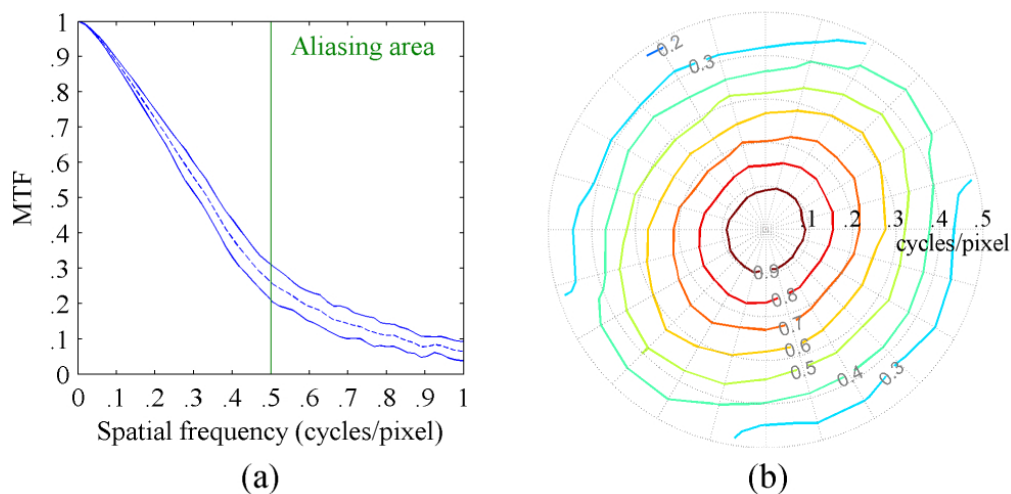
### 2.2.3. Többirányú MTF

Egy érdekes kísérleti ága az MTF-nek a többirányú MTF, amely az ISO 12233 mérési technikáit veszi alapul, viszont több irányba kiterjeszti az adott képre az MTF számítását. Ez a módszer magas felbontású kamerákra teljesítmény mérésére lett kitalálva, mivel jelenleg nincsenek magas pixel számú kamerák térbeli felbontására tiszta kritériumok. Elméletben jobb pontosságú, és kevésbé érzékeny a külső zajra, a sima MTF-hez képest. A többirányú MTF mérésekhez egy Siemens csillag mintát használnak célpontnak, amely szinuszosan van modulálva úgy, hogy a térbeli frekvencia a sugár csökkenésével nő [22].



16. ábra: A Siemens csillag célpont (bal), és a mért képrészletek (jobb) [22]

Az egyes képrészletekből való MTF számolás ugyanazon a metóduson meg végig, mint a sima MTF-nél, és az átlagos MTF értékek poláris koordináta rendszerben vannak reprezentálva. Ennek tesztelésére egy 8K (7680 x 4320 pixel) videokamerát használt Kenichiro et al. (2014), amely egy 33 megapixeles CMOS (Kiegészítő metáloxidos félvezető) szenzort használt egy ultra magas felbontású lencsével [23], majd a 17. ábra szerint MTF becsléseit meg tudták határozni.



17. ábra: Egy 8K felbontású kamerának az MTF becslései (a) és a poláris koordinátarendszerben reprezentált értékei (b) [22]

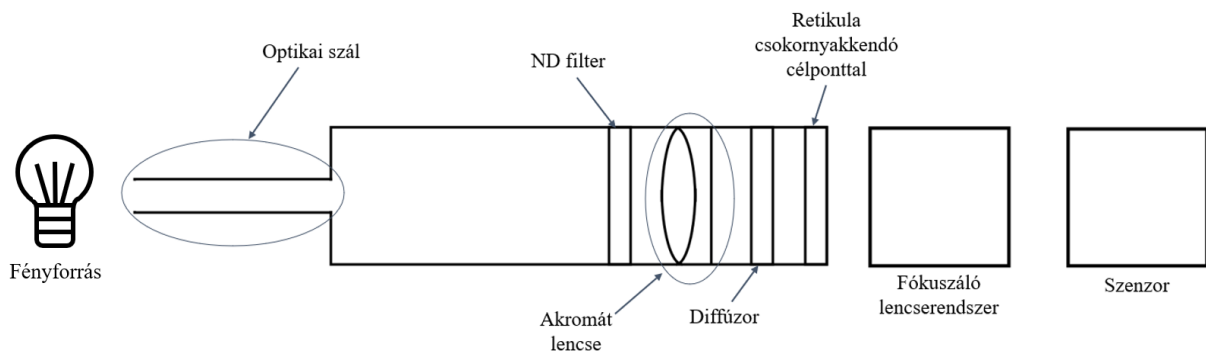
### 3. MÉRÉSEK

#### 3.1. A mérőállomás

A mérések elvégzéséhez a Robert Bosch Kft. budapesti optika csoport egyik élesség mérőállomását használtam. A mérőállomás a vizsgált kamerához csatlakozik fizikális kommunikációs csatornákon keresztül, majd a projektált képet képes megjeleníteni valós időben a mérőállomáshoz tartozó monitoron. A valós idejű képalkotás feldolgozását egy Robert Bosch Kft. által fejlesztett képkinyerő szoftver biztosítja.

A mérésekhez egy kommunikációs csatornán keresztül vezérelhető LED-et használtam megvilágításként, amely képes egy színcsatornát megjeleníteni, vagy két színcsatornát keverve megjeleníteni, különböző fényintenzitásokon. Később ezt egy hullámhossz szerint változtatható LED-re cseréltem, ennek az okait a továbbiakban ismertetem. Ezen felül lehetséges a kollimátor távolságát, a mérőasztal orientációját, és a mérőasztalra helyezett goniométert mozgatni akár programon keresztül, viszont az egyszerűség kedvéért ezeket a mérések során nem vettem igénybe, a mérések továbbfejlesztéshez a jövőben hasznos lehet.

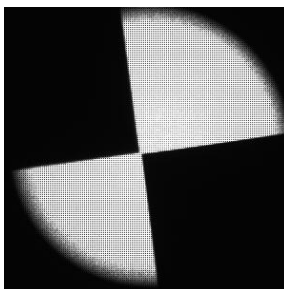
Fontos megjegyezni, hogy a mérőállomás szobahőmérsékleten üzemel, valamint a mérés összeállítása után egy csapó ajtó segítségével teljes sötétségben zajlik a mérés. Ennek oka, hogy a külső megvilágítások hatással lehetnek a célpontra, és így az élesség mértékére is. A mérési összeállítást tetszőlegesen tudtam módosítani a Thorlabs weboldalán [24] található optikai elemek különböző kombinációival. Végül a 18. ábra szerinti összeállításból származó képeket használtam fel a kiértékelésnél.



18. ábra: A mérőállomás elméleti összeállítása

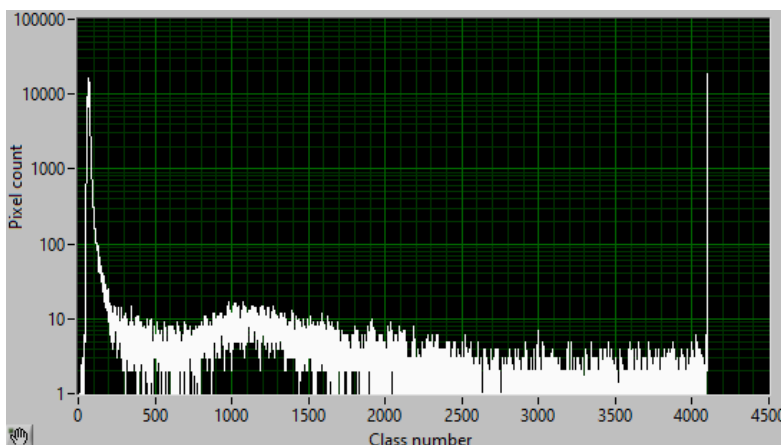
## 3.2. A mérés előkészítése

A mérések lefolyása előtt fontos volt, hogy a LED fényintenzitásának mértékét olyan keretek között határozzam meg, amely nem telíti túl a vizsgált kamera szenzorát, mert így a kiértékelésnél értelmetlen értékeket keletkeznének. Értelemszerűen a maximális megvilágítástól sokkal alacsonyabb értékekkel dolgoztam, mivel a káprázás mértéke miatt nem kapnék realiztikus értékeket. A 19. ábrán látványosan megfigyelhető, hogy a célpont megvilágítása szinte teljesen egységes, érdemleges kontraszt a háttértől nem lesz.



19. ábra: A célpont megvilágítása 387,5 [lux] zöld fényvel

Természetesen a vizuális ellenőrzés nem elégséges, így a fényerősséget ábrázoló hisztogramot is megvizsgáltam. A 20. ábra logaritmikus skálájú függvényen látható, hogy a 387,5 [lux] zöld fény megvilágításnál a pixel vesztesség mértéke óriási. A hisztogram balról jobbra az egyre nagyobb fényintenzitásokat demonstrálja, miszerint az abszolút feketéhez és abszolút fehérhez közelítve találjuk a pixelek túlnyomó többségét. A fekete pixelek száma nem meglepő, hiszen a valós idejű képen a célpont egy sötét környezetben helyezkedik el, így ennek az értéke mindig magas lesz. Viszont a nagyon magas fényintenzitáshoz tartozó pixelek mértéke miatt az MTF számolások során szinte tökéletes átvitelt tapasztalnánk minden frekvencián, ami nem realiztikus.



20. ábra: A célpont pixel vesztése 387,5 [lux] zöld fénynél

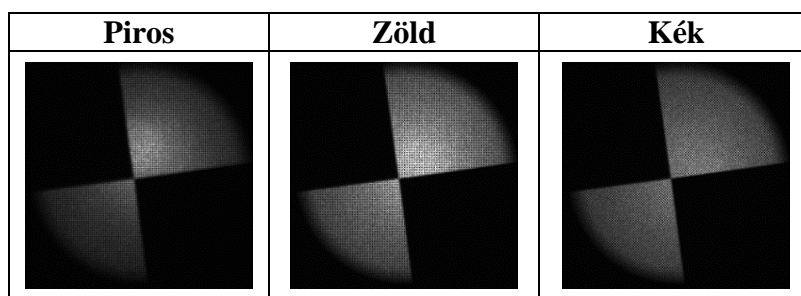
Végül a maximálishoz képest 3,125%-os relatív fényintenzitásokat határoztam meg maximálisként minden hullámhosszon, mivel a fényerősség eloszlása már itt érdemi kereteket adott. Ennek megfelelően meghatároztam nyolc értéket a 0 és 3,125% relatív fényintenzitást között egyenletesen mindegyik szín esetén, majd elkezdtem a méréseket.

### 3.3. A mérés menete

Az egyszerűség kedvéért az összes mérést egy fix pozícióban mértem, a motorokat nem mozgattam, valamint ugyanazt a kamerát használtam. A kép leképzése is hatással lehet az MTF-re, például, hogy milyen orientációban forgatjuk a kamerát a célponthoz képest, vagy a fényforrást milyen messzire tesszük a célponttól. Valamint a kapott képek mind szürkeárnyalatosan vannak megjelenítve, mert jelenleg a színvisszaadás helyett a fényintenzitási értékek a mérvadóbbak.

Az első méréseim során egyszerűen a vezérelhető LED-et egy diffúzor és egy lencserendszer elé tettem, majd megvizsgáltam a primer csatornás megvilágításokat külön-külön. A használható primerek mérési képei az 1. táblázatban láthatóak. A zöld megvilágítás volt a legdominánsabb és a kék a leggyengébb. Viszont talán egy szembetűnőbb jelenség az lehet, hogy a megvilágítás jellege nem homogén. A célpont közepétől kifelé egyre gyengébb fényintenzitású a megvilágítás, aminek következtében az MTF értékek is teljesen inkonzisztensek lesznek.

1. táblázat: A primerek mérési képei



Ennek megoldására implementáltam egy ND (semleges sűrűségű) szűrőt és egy akromát lencsét, hogy a fény intenzitását tudjam módosítani, és a kromatikus és szférikus abberáció mértékét csökkentsem. Valamint egy új, optikai szálon keresztüli megvilágítást alkalmaztam, annak érdekében, hogy homogénebb legyen az adott hullámhosszú szín mértéke. Ennél a LED-nél már a hullámhossz szerint tudtam a megvilágítást meghatározni, ezért négy egyértelműen elkülöníthető színt választottam ki, majd az eddigiekhez hasonló eljárással egy fényintenzitási spektrumot is. Az adott hullámhosszú színek paramétereit a 2. táblázat tartalmazza. Itt a fényintenzitás mértékét a szenzorhoz legközelebbi pontban vizsgáltam egy gömb integrátoros luxmérővel, figyelve a szenzor túltelítődésére.

2. táblázat: Vizsgált hullámhosszú megvilágítások paramétereit

| Hullámhossz [nm] | Szubjektív színérzet | Fényintenzitás [lux] |
|------------------|----------------------|----------------------|
| 405              | Ibolya               | $1 \pm 1 \notin 0$   |
| 455              | Kék                  | $2 \pm 1$            |
| 530              | Zöld                 | $9 \pm 1$            |
| 625              | Piros                | $4 \pm 1$            |

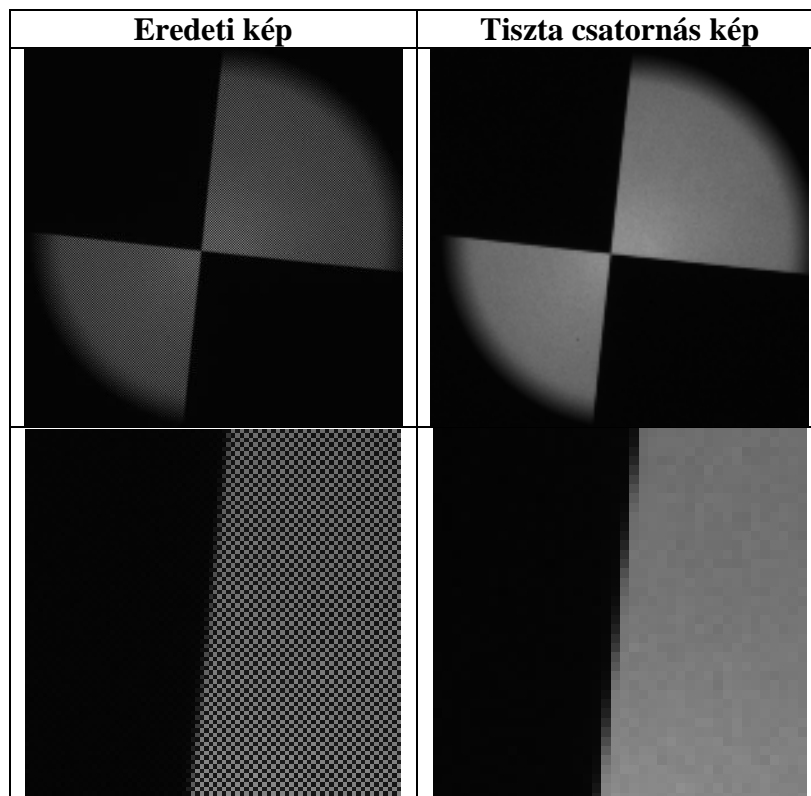
A mérések elvégzése után már látható volt, hogy ez a rendszer sokkal homogénebb. Mielőtt az MTF kiértékelését megtudjam csinálni viszont, szükséges említést tenni a felhasznált szenzor működéséről. Egy adott pixel a CFA (Színszűrő tömb) segítségével tevődik össze, ami kis 2x2-es mátrixok segítségével keveri ki a kívánt színt. Ez a mátrix esetünkben két tiszta, egy kék, és egy piros csatornából áll, mivel a vizsgált kamera egy autóiparban használt alkatrész, így a gyengébb fényre is érzékenyebb lesz, valamint sokkal kevesebb zajt fog tapasztalni [25], ezzel is elősegítve a képfeldolgozás gyorsaságát.

|        |        |
|--------|--------|
| Piros  | Tiszta |
| Tiszta | Kék    |

21. ábra: Az RCCB (piros, tiszta, tiszta, kék) mátrix

Ahhoz, hogy az MTF értékét megtudjam vizsgálni, szükséges volt csak a tiszta csatornájú pixeleket kiválasztani, mivel alacsony fényintenzitásnál mértem. Ez egy saját algoritmus megírásával tettem meg, bár valószínűsítem, hogy hasonló algoritmusok tömegei léteznek az interneten. A kinyert kép és a rekonstruált kép közti vizuális különbsége a 3. táblázatban található. Megjegyzendő, hogy minimális inhomogenitás még mindig mutatkozik a képeken, így a kiértékelés során az élek kiválasztásánál csak a homogén felületek közül választok.

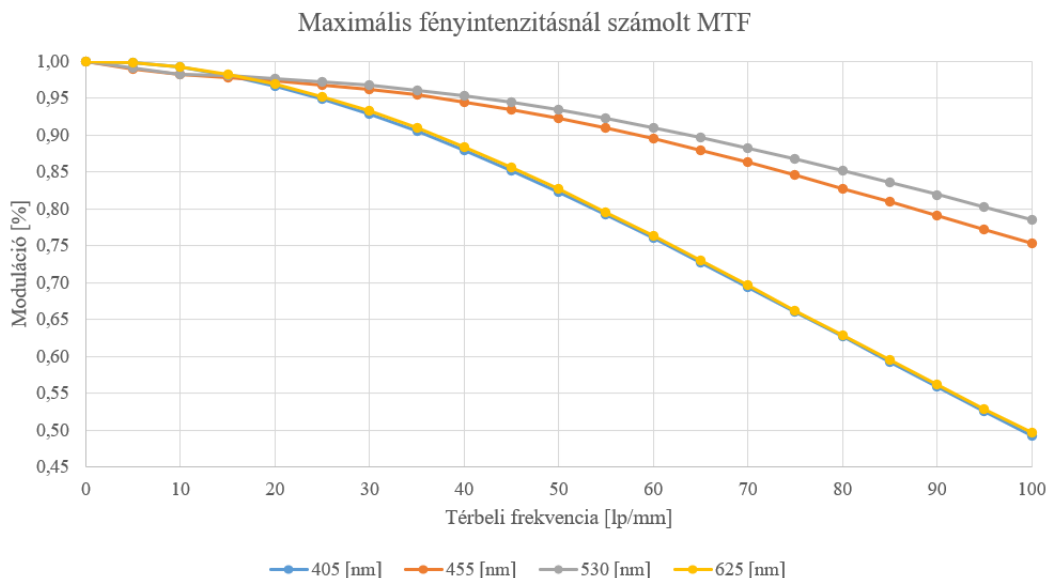
3. táblázat: A különböző összetételű képek



## 4. AZ EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

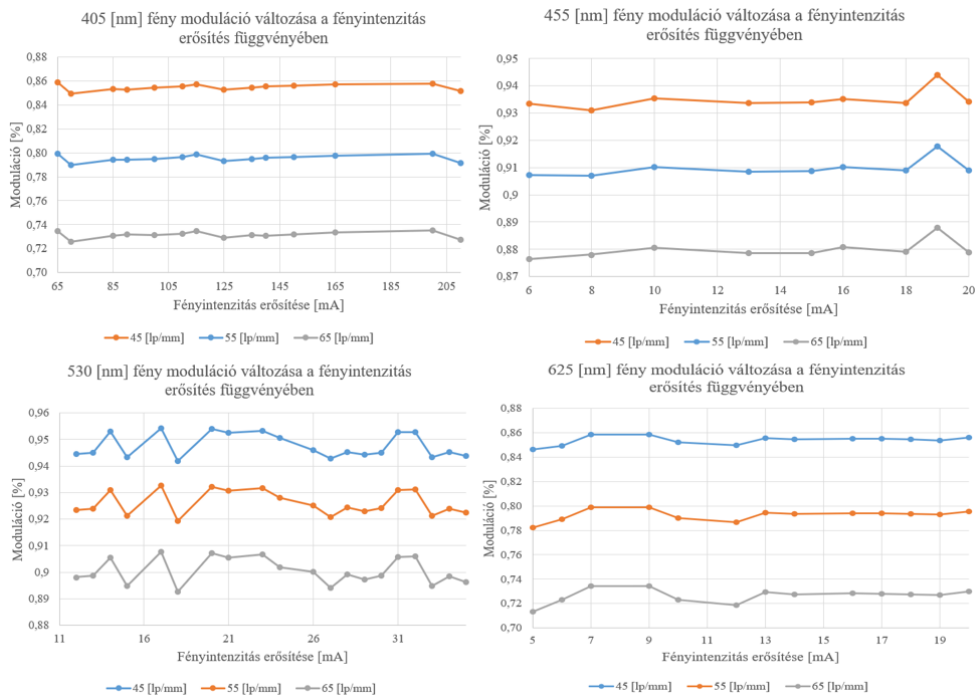
A kiértékeléshez egy Robert Bosch Kft. budapesti optikai csoport által fejlesztett MTF kiértékelő programkódot vettem segítségül. A programkód az MTF számítás elméleti lépéseit algoritmizálja egy adott frekvencián. Először a megvilágításokról egységesen ugyanazt az élet vágtam ki, majd ezeken a képeken a tiszta csatornákon látható pixeleket használtam fel. A fényintenzitások mértékét egy 0-1 [A]-ig állítható elektromos erősítő segítségével tudtam módosítani 1 [mA]-es felbontással, a maximális fényintenzitás mértékét a szenzor túltelítődési határán határoztam meg minden hullámhosszon. Előjáróban arra számítottok, hogy jobb MTF értékeket fognak felvenni a kisebb hullámhosszú megvilágítások.

Az első vizsgált paramétereim a maximális fényintenzitás mellett számolt MTF-ek voltak, ezt a 22. ábra mutatja. A moduláció mértéke a térbeli frekvencia függvényében csökken, ami egy általános MTF jelleg. Érdekes, hogy 405 [nm]-től 530 [nm]-ig jobb modulációs értékek lettek, viszont a 625 [nm] hullámhosszú fény értékei nagyon közel lettek a 405 [nm] hullámhosszú fényhez. Ennek megfelelően az MTF értékek nem nőnek lineárisan a hullámhosszal, több hullámhossz megfigyelése szükséges ahhoz, hogy egy teljes képet kapjunk arról, hogy hogyan viszonyul az MTF-hez. Valamint az is egyértelműen megállapítható, hogy a nullhipotézisem nem teljesül, az alacsony hullámhosszú megvilágítás a megfigyelték közül a leggyengébben teljesített.



22. ábra: A moduláció mértéke különböző hullámhosszok esetén

A másik jelenség, amit vizsgáltam, a moduláció változása a fényintenzitás erősítés függvényében volt, ezt a 23. ábra mutatja. A hipotézisem az volt, hogy az erősítéssel lineárisan nőni fog a moduláció értéke, tehát nagyobb fényintenzitás mellett jobb minőségűnek tűnhet az élesség. A mért értékek szerint ez sem teljesült be, a moduláció mértéke 0,003720-os átlagos szórással relatívan stabil maradt. Ez azért is lehetséges, mert az ESF meghatározásakor jelentősen csak a fehér pixelek elhelyezkedése fog megváltozni, az átmeneti – azaz a fontos – része a függvénynek hasonló módon fog viselkedni.



23. ábra: A moduláció változása a fényintenzitás erősítés függvényében

## 5. ÖSSZEGZÉS

A dolgozatom célja az volt, hogy egy tapasztalt jelenségnek utána menjek és megpróbáljam bebizonyítani. Az élesség mérésére alkalmasnak és hatékonynak bizonyul az MTF módszere, viszont nincs minden oldalról lefedve, ezért érdemes volt a fényforrás hatásának oldaláról is megközelíteni. A mérések során több akadályba is ütköztem, miszerint egy ipari LED megvilágítása nagy teljesítményű, így könnyen túl lehet telíteni a vizsgált szenzort. Akadályt képzett az is, hogy a LED-es megvilágítást homogéne el tudjam juttatni a szenzorig, mivel az MTF számolások arra épülnek, hogy csak az átmenetes pixelek képzik az átviteli függvény mértékét.

Összességében elmondható, hogy a hipotéziseim nem teljesültek be, a különböző hullámhosszú fények különböző MTF görbéket képeztek. További kutatásként érdemes lehet megvizsgálni, hogy más hullámhosszokon milyen eredményeket kapunk, mert - számomra váratlanul – a vörös és kék megvilágítás szinte egy az egyben ugyanazt a görbét képezték. Ettől függetlenül belátható, hogy 530 [nm]-en sokkal jobb MTF értékeket tudtam leképezni csak a fény hullámhosszának megváltoztatásával, így létezik egy objektíven legjobb hullámhosszú megvilágítás, ami jobb MTF értékeket képez a többinél. Ennek a hullámhossznak a megtalálása szerintem fontos, mivel ezt az ipari mérések során nincs specifikálva, így lehet, hogy egy cég paraméterei jobbak, mint egy másiké, de nem ugyanazon a hullámhosszon.

Fontos volt belátni azt is, hogy a fényintenzitás változtatásával nem tudtam érdemben változtatni az élességen, ami szintén a hipotézisemmel ellenkezik. Ez az eredmény valamilyen szinten biztató, mivel a fényforrások manuális beállításánál az ember nagy szórással végzi azt el, viszont ebből az derül ki, hogy még a vizuálisan is nagy fényintenzitás különbségek meglétekor nem fogunk drasztikusan különb eredményeket kapni. Így nem érdemes fényintenzitási tartományt létrehozni adott hullámhosszakra, mivel ez már a túlspecifikálás kategóriába lépne át.



## 6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Euro NCAP: How to read the stars. <https://www.euroncap.com/en/about-euro-ncap/how-to-read-the-stars/> (2023. 11. 02.-án látogatva)
- [2] Sara, Umme, Morium Akter, and Mohammad Shorif Uddin. "Image quality assessment through FSIM, SSIM, MSE and PSNR—a comparative study." *Journal of Computer and Communications* 7.3 (2019): 8-18.
- [3] Chai, Tianfeng, and Roland R. Draxler. "Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature." *Geoscientific model development* 7.3 (2014): 1247-1250
- [4] ISO 12233, Photography — Electronic still picture imaging — Resolution and spatial frequency responses
- [5] Safonova, Margarita, et al. "Deep Photometry of Suspected Gravitational Lensing Events: Potential Detection of a Cosmic String." *arXiv preprint arXiv:2309.11831* (2023).
- [6] I . Avcibas, B. Sankur and K. Sayood, "Statistical evaluation of image quality measures", *Journal of Electronic Imaging*, vol. 11, no. 2, pp. 206-223, 2002
- [7] J. E. Farrell, *Image quality evaluation in colour imaging: vision and technology*. MacDonald, L.W. and Luo, M.R. (Eds.), John Wiley, pp. 285-313, 1999
- [8] Tom L. Williams, "The Optical Transfer Function of Imaging Systems", IOP Publishing Ltd, 330-346 (1999)
- [9] Ali Abedi, Ehsanollah Kabir (2015): Stroke width-based directional total variation regularisation for document image super resolution. <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1049/iet-ipr.2014.1021> (2023. 10. 31.-én látogatva)
- [10] Saravanan, C. (2010, March). Color image to grayscale image conversion. In *2010 Second International Conference on Computer Engineering and Applications* (Vol. 2, pp. 196-199). IEEE.
- [11] Data Monsters (2020): A Quick Overview of Methods to Measure the Similarity Between Images. <https://medium.com/@datamonsters/a-quick-overview-of-methods-to-measure-the-similarity-between-images-f907166694ee> (2023. 10. 20.-án látogatva)
- [12] Hore, Alain, and Djemel Ziou. "Image quality metrics: PSNR vs. SSIM." *2010 20th international conference on pattern recognition*. IEEE, 2010.
- [13] Todd Veldhuizen (1998): Measures of image quality. [https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL\\_COPIES/VELDHUIZEN/node18.html](https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/VELDHUIZEN/node18.html) (2023. 10. 20.-án látogatva)

- [14] Wang, Zhou, and Alan C. Bovik. "Mean squared error: Love it or leave it? A new look at signal fidelity measures." *IEEE signal processing magazine* 26.1 (2009): 98-117.
- [15] Rizki Putra Prastio (2023): <https://www.kaggle.com/datasets/rizkiputraprastio/pcb-optical-inspection-autofocus> (2023. 10. 31.-én látogatva)
- [16] Burns, Peter D. "Slanted-edge MTF for digital camera and scanner analysis." *Is and Ts Pics Conference*. Society for Imaging Science & Technology, 2000.
- [17] Eugene Hecht, *Optics*, Fifth Edition, Pearson Education (2017): 579-583. ISBN 9780133977226
- [18] Ritchie Vink (2017): Understanding the Fourier Transform by example. <http://www.ritchievink.com/blog/2017/04/23/understanding-the-fourier-transform-by-example/> (2023. 10. 30.-án látogatva)
- [19] B. Dörband, H. Müller, H. Gross, *Handbook of Optical Systems: Vol. 5. Metrology of Optical Components and Systems*. First Edition., Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. (2012): 930-944.
- [20] Yu Kikuchi: What Is the Modulation Transfer Function? <https://www.olympus-lifescience.com/en/resources/white-papers/what-is-the-modulation-transfer-function/> (2023. 10. 31.-én látogatva)
- [21] Tiecheng Li, Huajun Feng, "Comparison of different analytical edge spread function models for MTF calculation using curve-fitting," *SPIE Proceedings, Remote Sensing and GIS Data Processing*, 2009.
- [22] Kenichiro Masaoka, Takayuki Yamashita, Yukihiro Nishida, and Masayuki Sugawara, "Modified slanted-edge method and multidirectional modulation transfer function estimation", *Opt. Express* 22, 6040-6046 (2014)
- [23] Yamashita, Takayuki, et al. (2011): A camera system using three 33-megapixel CMOS image sensors for UHD TV2. *SMPTE Motion Imaging Journal* 120.8: 24-31.
- [24] Thorlabs: Optical Elements. [https://www.thorlabs.de/navigation.cfm?guide\\_id=7](https://www.thorlabs.de/navigation.cfm?guide_id=7) (2023. 11. 04.-én látogatva)
- [25] Mayank Mangla, Gang Hua, Shashank Darbal: ISS Image Pipe for Alternate CFA Formats. (2017) Texas Instruments (TI). <https://www.ti.com/lit/an/spraca8/spraca8.pdf> (2023. 11. 04.-én látogatva)