

Mi kell egy machine vision rendszerhez?

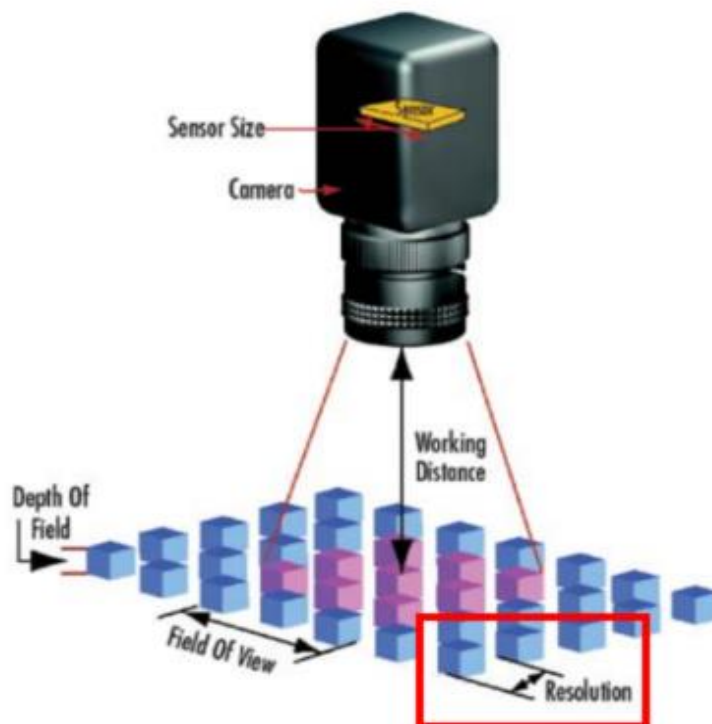
1. Kamera
2. **Objektív**
3. Megvilágítás
4. Képfeldolgozó szoftver
5. Számítógépes hardver
6. Kommunikációs interfészek

2. Objektív

Gépi látás lencsék és felbontása

1. A gépi látás lencsék fő paramétereit

- Fókusz távolság (f): Meghatározza a látómező nagyságát adott tárgy távolság mellett.
- Blende (F-érték): Szabályozza a bejutó fény mennyiségét, befolyásolja a mélységélességet és az expozíciós időt.
- Látómező (FoV): Függ a fókusz távolságtól, a szenzor méretétől és a tárgy távolságától.
- Szenzorméret kompatibilitás: A lencse képátlója legyen nagyobb vagy egyenlő, mint a szenzor átlója.
- Felbontás: A kép részletességét határozza meg optikai és digitális szinten egyaránt.



2. Felbontás részletesen

A felbontás a gépi látásban két fő aspektusból értelmezhető:

1. Kamera szenzorának felbontása (digitális felbontás): az érzékelő által rögzíthető képpontok száma. Minél nagyobb ez az érték, annál részletesebb képet kapunk. Például egy 1920×1080 képpontos kamera 2 MP felbontású, míg egy 4000×3000 pixeles kamera már 12 MP.

2. Lencse optikai felbontása: a lencse fizikai képessége arra, hogy a részleteket továbbítsa a szenzorra. Ez gyakran megapixelben van megadva (pl. 5 MP lencse), de még pontosabban a MTF (Modulation Transfer Function) érték jellemzi.

A nagy felbontás előnyei:

- Precíz mérési képesség
- Finom részletek detektálása (pl. repedések, karakterek)
- Jobb OCR, hibadetektálás, szegmentáció

3. Ajánlott lencse optikai felbontások

| Kamera felbontás | Ajánlott lencse optikai felbontása |
|------------------|------------------------------------|
| ≤ 2 MP | 2–3 MP lencse |
| 3–5 MP | 5 MP lencse |
| 6–12 MP | 10–12 MP lencse |
| >12 MP | 16 MP vagy telecentrikus optika |

4. Fókusz távolság számítása

A megfelelő látómező eléréséhez szükséges lencse kiválasztásához kiszámítható a szükséges fókusz távolság egy egyszerű képlettel:

$$f = (\text{szenzorszélesség} \times \text{munkatávolság}) / \text{látómező}$$

Ahol:

- f : a szükséges fókusz távolság (mm)
- Szenzorszélesség: a kamera érzékelőjének szélessége (mm)
- Munkatávolság: a kamera és a vizsgált tárgy közötti távolság (mm)
- Látómező: a tárgy kívánt lefedett szélessége (mm)

Ez a képlet segít meghatározni, hogy adott szenzorhoz és tárgytávolsághoz mekkora fókusz távolságú lencsére van szükség.

5. Gyakorlati példa – fókusz távolság kiszámítása

Tegyük fel, hogy egy 80 mm széles tárgyat szeretnénk teljes egészében lefotózni egy ipari kamerával, amely 1/2.3” szenzorral rendelkezik (ez kb. 6.3 mm széles). A kamera 300 mm-re van a tárgytól.

A számításához behelyettesítjük az értékeket a képletbe:

$$f = (6.3 \times 300) / 80 = 1890 / 80 = 23.625 \text{ mm}$$

A legközelebbi szabványos fókusz távolságú lencse 25 mm, így ezt választjuk.

Ez a számítás lehetővé teszi, hogy előzetesen meghatározzuk, mekkora területet tud a kamera lefedni, és elkerüljük a túl kicsi vagy túl nagy látómezőt.

6. Pixel/mm számítása

A részletesség másik fontos mérőszáma, hogy a kamerakép hány képpontot tartalmaz milliméterenként. Ez különösen fontos optikai karakterfelismerés (OCR) vagy precíziós mérések esetén.

$$\text{pixel/mm} = \text{horizontális pixel szám} / \text{látómező szélessége}$$

Például, ha a kamera 1920 pixel széles képet készít és a látómező 80 mm, akkor:

$$\text{pixel/mm} = 1920 / 80 = 24$$

Ez azt jelenti, hogy 1 mm széles objektum kb. 24 pixel szélesen jelenik meg a képen.

Általános ajánlások:

- 10–15 pixel/mm: alap detektálás (pl. jelenlét, pozíció)
- 25–50 pixel/mm: részletes vizsgálat, OCR, finom hibák keresése

7. Lencse ajánlások gyakori kombinációkra

| Tárgy szélessége (mm) | Munkatávolság (mm) | Szenzorméret (mm) | Ajánlott fókusztávolság (mm) |
|-----------------------|--------------------|-------------------|------------------------------|
| 100 | 300 | 6.4 | 19 |
| 80 | 300 | 6.4 | 24 |
| 50 | 200 | 6.4 | 25.6 |
| 30 | 200 | 6.4 | 42.7 |

8. Gyakorlati tanácsok

- A túl nagy látómező csökkenti a részletességet.
- A szenzorméret befolyásolja a szükséges lencsét.
- A nagyobb felbontás jobb precizitást ad, de több feldolgozást igényel.
- A gyenge minőségű lencse az egész rendszer teljesítményét visszafogja.
- A számítások segítségével könnyedén előre tervezhető a kamera pozíciója és az elérhető felbontás.

Az optikák szerepe a machine vision rendszerekben

Az objektív a vision rendszer „szeme”, meghatározza a nagyítást, a látómezőt (field of view – FOV) és a képminőséget.

Focal Length (fókusz távolság)

A lencse fókusz távolsága egy alapvető paraméter, amely azt írja le, hogy a lencse milyen mértékben fókuszálja vagy szórja szét a fényt. A nagy fókusz távolság azt jelzi, hogy a fény enyhébb szögben hajlik meg, míg a rövid fókusz távolság esetén a fény meredekebb szögben törik. Általánosságban elmondható, hogy a pozitív fókusz távolsággal rendelkező lencsék a fényt összegyűjtik (converge), míg a negatív fókusz távolságú lencsék szórják (diverge) azt – bár vannak kivételek, különösen az objektum és a lencse közötti távolságtól függően.

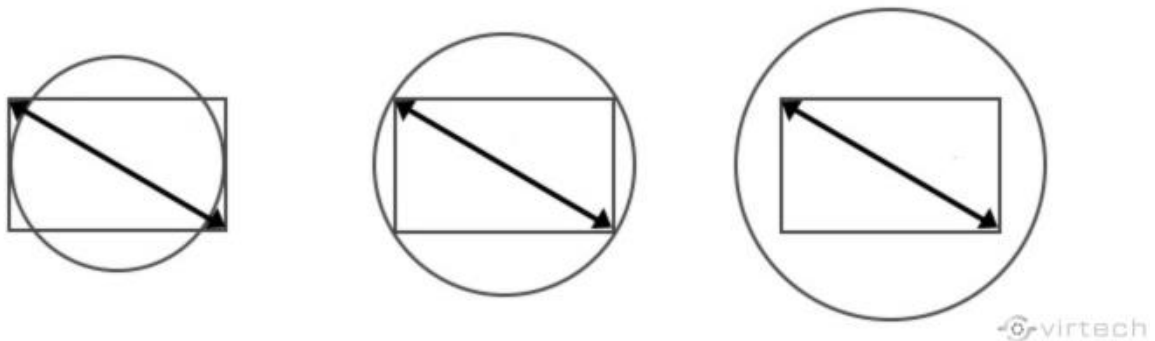
Field of View (FOV) – látómező

A Field of View azt a területet írja le, amelyet egy lencserendszer képes megjeleníteni. Ez az a tárgyfelület, amely kitölti a kamera szenzorát. Meghatározható fizikai méretekkel (például vízszintes vagy függőleges, mm-ben), vagy szögben kifejezve, fokban (angular FOV).

Képarány (Aspect Ratio) magyarázata

A digitális képérzékelők és az optikák geometriai kapcsolatban állnak. A **képarány** a szenzor szélességének és magasságának aránya (pl. 4:3 vagy 16:9). Ez különbözik a **szenzorformátumtól** vagy mérettől (gyakran az átlóval megadva), ami meghatározza, mekkora **image circle**-t (leképezési kör) kell az objektívnek biztosítania.

Az objektív kör alakú képet vetít a szenzorra, amely viszont téglalap alakú – a szenzor képaránya meghatározza, a körnek mely részét rögzíti.



Ha a szenzor képaránya és az objektív image circle-je nem egyezik, a szenzor egy része kihasználatlan lehet, vagy a látómezőn kívül eshet. Például egy 4:3-ra optimalizált objektív 16:9 szenzoron használva sötét (nem megvilágított) sávokat eredményezhet felül és alul.

- Ha nagyobb formátumú objektívet használunk kisebb szenzorral, az egyszerűen „levágja” a képszeleket, de nem okoz vignettálást (sötétedés a sarkokban).

A képarány-eltérés a felbontás elvesztéséhez is vezethet: ha az optika egy adott arányra van optimalizálva, a szenzor egyik dimenziója kihasználatlan maradhat, vagy nem az optimális leképezési régióban dolgozik.

Gyakorlati tanács: a legjobb, ha a használt optika formátuma illeszkedik a szenzorhoz. Azaz az objektív image circle-je teljes egészében lefedi a szenzor átlóját, és a kívánt látómező jól kihasználja a szenzor szélességét és magasságát. Például a legtöbb machine vision kamera 4:3 szenzort használ (pl. 1/2", 2/3"). Egy 4:3-as objektív használata 16:9 szenzorral képvágást és kihasználatlan pixeleket eredményezhet, míg egy nagyobb formátumú optika 4:3 szenzorral teljes lefedést biztosít – kompromisszum nélkül.

További szempontok az objektív kiválasztásánál: **torzítás** és **mélységélesség** (Depth of Field – DOF).

- **Torzítás** egyenes vonalakat görbévé tesz, és eltolja a kép pontjait a valódi helyükről, ezáltal csökkenti a mérési pontosságot.
- **Mélységélesség** (DOF): az objektumtér azon tartománya, amely élesnek látszik a képen. Függ a rekesztől (f-szám):
 - kisebb rekesz (nagyobb f-szám) → nagyobb mélységélesség (DOF)
 - nagyobb rekesz → kisebb mélységélesség (DOF).

Összefoglalva: az optikaválasztás során egyensúlyt kell találni a látómező, nagyítás (fókusz távolság), és a képminőség szempontjai (felbontás, torzítás, mélységélesség) között – az adott alkalmazáshoz igazítva.

A leggyakoribb objektívtípusok:

Fixed Focal Length objektívek:

Ezek fix fókusz távolságú (pl. 25 mm) objektívek, így rögzített szögű látómezőt (angular field of view – AFOV) biztosítanak. A lencse fókuszálásával (az optikai elemek mozgásával) különböző munkatávolságok (WD) esetén eltérő látómező (FOV) érhető el, ugyanakkor a látószög állandó marad. Az AFOV általában fokban van megadva, és a szenzor vízszintes méretéhez viszonyított teljes szögértéket jelöli.

- Rövidebb fókusz távolság → szélesebb látómező
- Hosszabb fókusz távolság → szűkebb látószög, nagyobb nagyítás

Egy egyszerű, vékony konvex lencsénél a fókusz távolság (focal length) az objektívtől hátralévő mért távolság. Általánosságban azonban a fókusz távolságot (focal length) a hátsó fő síktól (rear principal plane) mérjük, amely ritkán esik egybe a lencse mechanikai hátsó végével – emiatt a paraxial számításokon alapuló munkatávolság-értékek (WD) csupán közelítő értékek. A rendszer mechanikai tervezésekor ajánlott a gyártói adatlapokon vagy szimulációkon alapuló adatok használata. A paraxial számítások (mint amilyenek az online lens calculator-ok is) hasznos kiindulópontot adnak, de az eredményeket óvatosan kell kezelni.

Zoom (Variable Focal Length) objektívek:

A fókusz távolság – és ezáltal az AFOV – folyamatosan állítható. Akkor hasznos, ha különböző nagyításokra vagy látómezőkre van szükség objektívcseré nélkül. Például egy 8–48 mm zoom 6×-os arányt kínál. Ugyanakkor mechanikailag bonyolultak: több lencsecsoport egyidejű mozgatása szükséges a fókusz megtartásához, ami drágítja a rendszert, és gyakran rontja a képminőséget. A zoom objektívek nem érik el a fix optikák élességét vagy kontrasztját. Akkor javasoltak, ha menet közbeni látómező-állítás szükséges, máskülönben a fix objektívek jobb felbontás és torzítás szempontjából.

Telecentric objektívek:

Ezek speciális, fix nagyítású optikák, ahol az objektívbe belépő fény sugarai (object-side telecentric) párhuzamosak az optikai tengellyel. Ennek eredménye: a nagyítás konstans marad egy adott munkatávolság-tartományon belül. A **telecentric objektív** gyakorlatilag torzításmentes képet ad: különböző mélységben lévő tárgyak azonos méretűnek látszanak, megszüntetve a perspektivikus hibát (parallaxis). Ez különösen fontos nagy pontosságú méréseknél. Emellett rendkívül alacsony geometriai torzítással dolgoznak. Hátrányuk: méretük nagyobb, drágábbak, és csak egy adott nagyítással használhatók. Olyan alkalmazásokban használatosak, ahol a méretmérés kulcsfontosságú.

A látómező (FOV) módosításának lehetőségei fix fókusztávolságú (focal length) lencsékkel

Három lehetőség van a rendszer FOV-jának megváltoztatására:

1. A legegyszerűbb módja a munkatávolság (WD) módosítása – ha a lencsét távolabb helyezzük a tárgyról, a látómező (FOV) nő.
2. A lencse cseréje egy más fókusztávolságú (focal length) típusra.
3. A szenzorméret módosítása – nagyobb szenzor nagyobb látómezőt (FOV) eredményez ugyanazon munkatávolság (WD) mellett.

Habár a széles AFOV kényelmes lehet, néhány hátránnyal is jár. Rövid fókusztávolság (focal length) esetén a torzítás (distortion) erőteljesebb lehet, amely hatással van az AFOV-ra és változást okozhat a munkatávolsághoz (WD) képest. Emellett a rövid fókusztávolságú (focal length) lencsék általában nem képesek ugyanolyan magas optikai teljesítményre, mint a hosszabb fókusztávolságúak (focal length), és gyakran nem képesek megfelelően lefedni közepes vagy nagyobb méretű szenzorokat.

A látómező (FOV) megváltoztatható továbbá varifocal vagy zoom lens használatával is, amelyek fókusztávolsága (focal length) állítható. Ezek azonban általában nagyobb méretűek, drágábbak, és ritkán nyújtanak olyan teljesítményt, mint a Fixed Focal Length lencsék.

Gyakori hibák és bevált gyakorlatok

- **Szenzor–Lencse illesztés figyelmen kívül hagyása:** Gyakori hiba, hogy a lencse formátuma vagy image circle-je nem illeszkedik a szenzorhoz. Ha a lencse image circle-je túl kicsi, vignettinghez (sötét sarkok) vezet, míg a nem megfelelő képarány (aspect ratio) a szenzor területének pazarlását eredményezi. Mindig ügyeljen arra, hogy a lencse specifikációjában megadott „format” lefedje a teljes szenzor átlót, és hogy a látómező (field of view) megfelelően fedje a szenzor szélességét és magasságát.
- **Felbontásbeli eltérés:** Egy nagy megapixeles kamera alacsony minőségű lencsével (vagy fordítva) való párosítása pazarló megoldás, nem használja ki a szenzor teljes potenciálját, és ez fordítva is igaz. Másként fogalmazva, ügyeljen arra, hogy a lencse resolving power-e (lp/mm) haladja meg a szenzor pixeljeinek felbontóképességét. Ellenőrizze, hogy a lencse legalább 1–2 pixelt képes feloldani line pairként a kép szélein is a választott f-szám mellett.

- **Rekesznyílás (aperture) és mélységélesség (DOF):** További gyakori hiba a nem megfelelő rekesznyílás használata. Az alacsony f-szám (nagy nyílás) ugyan több fényt enged be, de jelentősen csökkenti a mélységélességet (DOF), így a jelenet azon részei, amelyek nem a fókusz síkban vannak, elmosódhatnak. Ezzel szemben a lencse „leállítás” (magasabb f-szám) növeli a mélységélességet (DOF), de kevesebb fényt enged be. Találja meg az egyensúlyt a megvilágítás, az exposure time és a mélységélesség (DOF) igényei között. Például különböző magasságú objektumok vizsgálatához általában nagy mélységélesség (DOF) szükséges (f/8–f/16 vagy több), tehát ehhez megfelelő világítást kell tervezni.
- **A torzítás és kalibráció elhanyagolása:** Minden lencse rendelkezik bizonyos mértékű torzítással, különösen a széles látószögűek. Ha ez nincs korrigálva, mérési hibákat okozhat (a pontok elmozdulni látszanak). Precizitást igénylő alkalmazásoknál használjon alacsony torzítású optikákat (pl. telecentric vagy „low distortion” lens modellek), vagy kalibrálja a rendszert a torzítás kompenzálásához. Fontos megjegyezni, hogy még ha a torzítást ki is kalibrálja, a nem telecentrikus lencse perspektivikus hibát okoz, ha az objektum távolsága változik.
- **A zoom túlzott használata:** Sokan úgy vélik, hogy egy zoom lencse minden látómező (field-of-view) problémát megold. A valóságban azonban a fix fókuszu objektívek gyakran jobb képminőséget adnak, és költséghatékonyabbak, ha a látómező (FOV) nem változik. Zoom lencsét csak akkor használja, ha valóban szükséges.
- **Chief Ray Angle (CRA) és pixelkompatibilitás figyelmen kívül hagyása:** Ha a lencse CRA értékei nem illeszkednek a szenzor pixeljeinek elfogadási szögéhez, problémák, például színárnyalat-eltérések (color shading) léphetnek fel. Mindig ellenőrizze, hogy a lencse az adott szenzor technológiához készült-e (CCD vs CMOS, illetve azok microlens/pixel geometriája szerint).
- **Mount és mechanikai illeszkedés:** Végezetül, győződjön meg róla, hogy a lencse mount típusa (C-mount, CS-mount, F-mount, stb.) megfelel a kamera számára. Számoljon a back focal distance-szel (a lencse hossza) és bármilyen extension tube alkalmazásával is – ha ezekkel nem kalkulál pontosan, a fókusztávolság megghiúsulhat.

Mindig tanulmányozza át a lencse datasheetjét, különös tekintettel az f-szám tartományra, az image circle-re, torzításra, és a modulation transfer function (MTF) értékekre.

Összegzés

Egy gépi látás alapú képkalkoló rendszer tervezése során különös figyelmet kell fordítani az optikára. A lencse határozza meg, hogy a jelenet mekkora részét rögzíti a rendszer (látómező – field of view), valamint a kép élességét és pontosságát. A legfontosabb, egyensúlyban tartandó paraméterek közé tartozik a fókusztávolság (focal length), az érzékelő mérete és oldalaránya (aspect ratio), a munkatávolság (working distance), valamint a kívánt felbontás vagy nagyítás mértéke.

A telecentrikus lencse (telecentric lens) megszünteti a perspektivikus torzítást, amely elengedhetetlen a precíz mérésekhez, míg a fix fókuszu objektív általában a legjobb ár-érték arányt kínálja számos alkalmazás esetében.

Kérjük, ügyeljen az optika kiválasztásakor és konfigurálásakor az alábbiakra: a képkalkoló kör (image circle) lefedettsége, a peremsötétítés (vignetting) elkerülése, az optikai torzítások (lens aberrations) minimalizálása, valamint a megfelelő mélységélesség (depth of field, DOF) beállítására.

Amennyiben szisztematikusan kiszámítja a szükséges látómezőt és felbontást, valamint ellenőrzi a lencse műszaki adatait, elkerülheti a gyakori hibákat. A gyakorlatban mindig javasolt a teljes képalkotó lánc tesztelése valós környezetben, hogy megbizonyosodjon a lefedettség és a képminőség megfelelőségéről.

A megfelelő lencse kiválasztásával és beállításával a gépi látás rendszerek megbízhatóan képesek az érdekes objektumok felismerésére a legkülönbözőbb ipari területeken – a nagy sebességű gyártósoroktól kezdve a robotkaros tárgy kiválasztási (robotic picking) alkalmazásokig.

Telecentrikus optikák ipari képfeldolgozáshoz és mérés technikához

1. Alapelvek és optikai működés

A telecentrikus objektívek speciális optikai rendszerek, amelyek úgy vannak tervezve, hogy a fő sugarak (chief rays) az objektív optikai tengelyével párhuzamosak legyenek – legalább az egyik oldalon (tárgy- vagy képoldalon), adott alkalmazástól függően. Ez a kialakítás kiküszöböli az ún. perspektivikus torzítást, amely a hagyományos (entocentrikus) lencsénél a tárgy-kamera távolság változásával arányos méretváltozásként jelentkezik.

Típusai:

- Tárgyoldali telecentrikus lencse (object-space telecentric): a fő sugarak a tárgyoldalon párhuzamosak, így a lencse látószöge gyakorlatilag nulla. A kép nagyítása nem függ a tárgy távolságától az optikához képest egy adott tartományon belül.

- Képoldali telecentrikus lencse (image-space telecentric): a párhuzamosság a képoldalon áll fenn. Ilyenkor az objektív kimenete "optikailag végtelen" perspektívából látja az érzékelőt, így csökken a hibák érzékenysége az érzékelő pozíciójára.

- Bi-telecentrikus lencse: mindkét oldalon telecentrikus. Ez a konfiguráció ideális a nagy pontosságú mérés technikai alkalmazásokhoz, mert a nagyítás nem függ sem a tárgy, sem a szenzor pozíciójától.

Standard lens

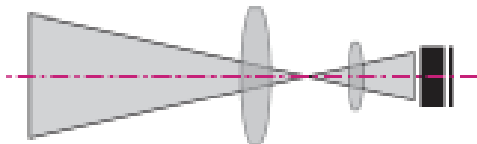
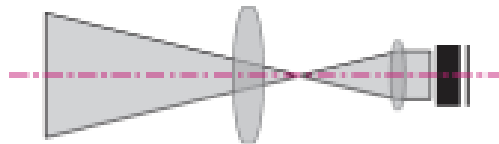
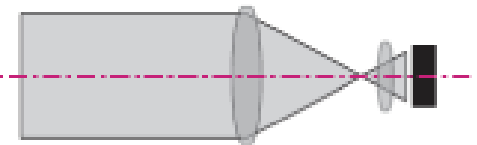


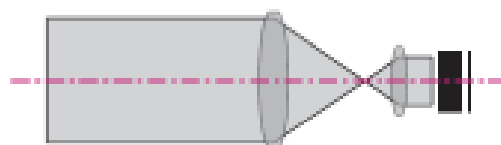
Image-side Telecentric lens



Object-side Telecentric lens



Bi-Telecentric lens



2. Optikai és geometriai előnyök

A telecentrikus optikák főbb előnyei műszaki szempontból:

Konstans nagyítás (magnification invariance):

A telecentrikus optika egyik legfontosabb jellemzője, hogy a nagyítás a tárgy távolság változásától független marad. Ez az alábbi egyszerűsített képlettel jellemezhető:

$$M = f / (f - s')$$

ahol f az objektív fókusz távolsága, s' pedig a képtávolság. A telecentrikus kialakítás miatt a nagyítás M lényegében állandó, még akkor is, ha a tárgy pozíciója kis mértékben változik a munkatávolságon belül.

Minimális geometriai torzítás (<0,1%):

A geometriai torzítást az alábbi képlettel mérjük:

$$D(\rho) = [r'(\rho) - M \times \rho] / (M \times \rho) \times 100\%$$

ahol $r'(\rho)$ a kép sugarának értéke a tárgy sugarához ρ képest, és M a nagyítás. Telecentrikus optikák esetén ez az érték nagyon kicsi, ami garantálja a torzításmentes, lineáris leképezést a teljes látómezőben.

Nagy mélységélesség (Depth of Field, DOF):

A telecentrikus optikákban a látószög alacsony, így a mélységélesség a következő képlettel közelíthető:

$$DOF = 2 \times \lambda \times (f/\#)^2 / n$$

ahol λ a megvilágítás hullámhossza, $f/\#$ az objektív relatív rekeszszáma (fókusz távolság / nyílás átmérő), és n a közeg törésmutatója (általában levegőben kb. 1). Ez a paraméter azt jelzi, hogy mekkora tárgy távolság-változás mellett marad éles a kép, ami a telecentrikus optikák egyik nagy előnye.

Numerikus apertúra (NA):

Az optikai rendszer felbontóképességét az NA határozza meg:

$$NA = n \times \sin(\theta)$$

ahol θ a legnagyobb beesési szög az optikai tengelyhez képest. Telecentrikus lencsénél θ közel 0° , ezért az NA alacsony, ami hozzájárul a nagy mélységélességhez és a torzításmentes képképzéshez.

Parallaxismentes képalkotás:

A párhuzamos fősugarak kiküszöbölik az oldalsó nézetből eredő eltolódásokat, így a mérési pontosság magasabb, különösen belső élek, furatok és precíziós kontúrok esetén.

3. Tipikus alkalmazások

Iparágak és alkalmazásaik:

- Elektronika: Furatátmérő-mérés, forrasztási pontok ellenőrzése, BGA pozícióelemzés
- Félvezetőgyártás: Maszkillesztés, rétegeltolódás vizsgálata
- Orvostechika: Katéter, implantátum geometriai ellenőrzése
- Autóipar: Fogaskerekek, precíziós alkatrészek dimenzióellenőrzése
- Precíziós mechanika: Mikromechanikai alkatrészek méret- és formaellenőrzése
- Mikroszkópia / kutatás: Szubmikron szintű geometriai képelemzés, szilícium wafer vizsgálat

4. Műszaki tervezési szempontok

Amikor telecentrikus optikát választunk, figyelembe kell venni:

- Munkatávolság (Working Distance, WD): Az objektív által fókuszált tárgysík távolsága. A telecentrikus rendszerben a nagyítás ezzel szemben nem érzékeny, de a torzítás növekedhet a túl nagy eltérések esetén.
- Numerikus apertúra (NA): A NA befolyásolja a felbontást és a mélységélességet.
- Nagyítás (Magnification, M): Meg kell felelnie a felbontási és látómező követelményeknek.
- Torzítás: Minél kisebb a torzítás, annál precízebb a mérés.
- Illeszkedés a képérzékelőhöz: Fontos a vignettálás elkerülése és a teljes látómező kihasználása.

5. Technológiai újdonságok

A modern telecentrikus optikák gyártása magában foglalja:

- Kompakt kivitelű, nagy pontosságú rendszerek fejlesztése (pl. Opto Engineering TC CORE sorozat).
- Szenzorspecifikus optikák, melyek maximalizálják a képminőséget adott CMOS vagy CCD érzékelőkhöz.
- Moduláris rendszerek, amelyekben könnyen cserélhető nagyítású elemek és adapterek vannak.

6. Összefoglalás

A telecentrikus optikák a precíziós mérés technika és ipari képfeldolgozás alappillérei, melyek biztosítják a geometriai torzításmentes, nagy mélységélességű és konzisztens nagyítású képalkotást. A fenti fizikai paraméterek és képletek segítségével tervezhető és optimalizálható a rendszer, hogy megfeleljen a legszigorúbb mérési követelményeknek.

Makró objektívek jellemzői a gépi látásban

A **makró objektív** a gépi látásban olyan speciális, fix fókusztávolságú optika, amellyel kis tárgyakat nagyítva tudunk leképezni. Jellemzőjük, hogy nagy nagyítási arányt és rövid tárgytávolságot biztosítanak. Ilyen lencsék például a 12–75 mm gyújtótávolságú C-mount makróobjektívek. Telecentrikus makró lencsék esetén a nagyítást nem befolyásolja a tárgy távolsága, ami mérési feladatoknál hasznos lehet.

Iparági alkalmazási példák

- **Elektronikai gyártás:** PCB-k és félvezetők vizsgálata. A makró objektívek lehetővé teszik az apró áramköri elemek és forrasztások nagyfelbontású képét. Ilyenkor fontos, hogy a lencse torzításmentes és magas felbontású legyen az apró részletek pontos leképezéséhez.
- **Élelmiszeripar:** Idegen anyag-ellenőrzés és minőségellenőrzés. Például folyadékfeltöltésnél gépi látás segítségével azonosítják az esetleges szennyeződések vagy idegen részecskéket (pl. zselés töltetben) a palackokban. Komplex csomagolási folyamatokban a makró szemléltetés pontosan mutatja az apró hibákat is.
- **Gyógyszeripar:** Tabletták, kapszulák és palackok ellenőrzése. A kis méretű gyógyszerformákon előfordulhatnak felületi hibák, törések vagy rosszul nyomtatott szövegek. Ezek a kis tárgyak nagyon nehezen vizsgálhatók emberi szemmel, ezért gépi látás vált szükségessé. Például gyógyszeres tubusok vagy blister-csomagolások feliratozását és integritását makrókamerával ellenőrzik. A magas kontrasztú, éles makrófelvétel segít felismerni az eltéréseket vagy hiányosságokat.



Makró optika paramétere

- **Nagyítási arány (M):** A lencse optikai nagyítása arányként adja meg, mekkora tényleges tárgy részlet képe jelenik meg a szenzoron.
- **Munkatávolság (WD):** A lencse és a tárgy közötti tényleges távolság fókuszáláskor. Általában a nagyobb gyújtótávolságú makrólencsék hosszabb munkatávolságot biztosítanak (pl. 25 mm gyújtótávolsággal ~50 mm WD az 1:1 állásban). A telecentrikus lencsék ennél általában nagyobb, fix munkatávolságot kínálnak, de drágábbak és nagyobbak.
- **Érzékelő:** A makrólencsét úgy válasszuk, hogy lefedje a kamera szenzorméretet. Egy 2/3"-es lencse például nem alkalmas 1"-es vagy nagyobb szenzor lefedésére.
- **Felbontóképesség:** A makró lencsék igen jó felbontásúak, minimális torzítással. A nagyfelbontású lencsék élesebb képet adnak finom részleteknél (pl. egy kábelcsatlakozó apró tüskéinek felismerése).
- **Példaipari felhasználás:** Elektronikai gyártásban makró objektívvel ellenőrzik a paneltöltéseket, forrasztási hibákat és a chippek egyenletességét. Az élelmiszeriparban például csomagolási hibákat és idegen anyagokat keresnek (pl. üvegbe öntött zselékben) a gépi látás segítségével. A gyógyszeriparban kis tablettákat, kapszulákat vizsgálnak formai hibák és feliratok ellenőrzésére. Ezekben az alkalmazásokban a makró lencsék magas felbontása és kis tárgytávolsága biztosítja a szükséges pontosságot.

Mélységélesség (DOF) a gépi látásban

A **mélységélesség (DOF)** a képalkotás azon zónája, amelyen belül a tárgyról készült kép még „élesnek” tekinthető. Más szavakkal a DOF a lencse és a tárgy közötti távolság azon tartománya, amelyen belül a kép még éles marad. A „élesség” itt alkalmazástól függően tetszőleges elfogadható elmosódást jelenthet; minél finomabb részletek fontosak, annál kisebb DOF-ot kell biztosítani. Általánosan igaz, hogy nagyobb F-szám (kisebb rekesznyílás) növeli a DOF-ot, míg nagyobb nagyítás csökkenti.

A DOF közelítő számítására ismert képlet, amely figyelembe veszi az alkalmazott képpontméretet vagy elfogadható elmosódási kört (c). Egy egyszerűsített forma (Geometriai DOF) a makró tartományban:

$$DOF \approx \frac{2N c(1 + M)}{M^2}$$

ahol N a rekeszérték (F-szám), c a megengedett szóródási kör átmérője (például a kamera pixelének mérete), M pedig a lencse nagyítása. Ebből látszik, hogy DOF fordítottan arányos a nagyítással: minél nagyobb a M , annál kisebb a mélységélesség. Továbbá a kis c (finomabb pixelezés) és a nagy N (zártabb rekesz) növeli a DOF-ot. Például egy 10 μ m-es pixelméretű kamerán és $N=8$ állásban, $M=1$ nagyításnál a képlet $DOF \approx 0,3$ mm nagyságot ad, míg $M=0,5$ esetén már kb. 0,9 mm DOF-ot kapunk – ez jól mutatja, hogy a nagyítás felével több mint duplájára nő a mélységélesség.

A gyakorlatban a pontos DOF meghatározása összetettebb: figyelembe kell venni a képrögzítő érzékelő (pl. CCD) felbontását, valamint az objektív diffrakciós határait. Makró lencséknel különösen fontos, hogy a féherek közötti kontraszt ne essen túl alacsonyra; az elfogadható élességet gyakran úgy definiálják, hogy a diffrakciós folt átmérője nagyjából egy

képpontnyi legyen, a geometriai elmosódás pedig szintén egy pixelnyi. Például 10 μm -es pixelméretre kb. $f/10$ rekesz kell a diffrakciós folt pixel-méretére csökkentéséhez; $f/22$ rekesznél viszont a kép már kevésbé lesz éles a nagyobb diffrakció miatt.

A nagyítás és a DOF kapcsolata

Makró tárgyak fényképezésekor a nagy nagyítás arány a DOF szűkülését eredményezi. Ahogy az előző DOF-képlet is mutatja, M növelése a nevezőben lévő négyzetes tag miatt gyorsan csökkenti a DOF-ot. Gyakorlatban 1:1 nagyítást jelentő makró lencsénél a mélységélesség általában néhány száz mikrométeres, de extrém nagyításnál (például 5:1) ez már csak néhány tíz mikron is lehet. Emiatt makró vizsgálatoknál a tárgy kis háromdimenziós kiállásai (pl. furatok, lekerekített élek) sokszor kilógnak a fókusztartományból, akár kis rekesz mellett is.

Egy másik fontos tényező, hogy makró üzemmódban a lencse effektív fényereje csökken: a tényleges F-szám a lencse jelezte értéknél nagyobb lesz

$$\text{hatásos rekesz } N_{eff} = N(1 + M)$$

Ez azt jelenti, hogy adott N beállítás mellett a szenzorra kevesebb fény jut, tehát nagyobb expozíciós idő vagy erősebb megvilágítás szükséges. Összefoglalva: **nagy nagyítás és kis rekesz \rightarrow nagyon sekély DOF, erősebb megvilágítás kell.**

Rekesznyílás, felbontás és DOF kompromisszumok

A lencse rekesznyílásának változtatása alapvetően befolyásolja a DOF-ot és a képminőséget. Kisebb rekesznyílás (nagyobb N) esetén nő a DOF, ám ettől nő a diffrakció hatása és csökken a bejövő fény mennyisége. Mint említettük, nagyon nagy N esetén (pl. $f/22$) a diffrakciós folt már nagyobb lehet, mint egy képpont, ami élességromlást okoz. Ezért általában kompromisszumot kell kötni: a lehető legkisebb rekeszértéket érdemes használni a megnövelt DOF-ért, de közben ügyelni kell, hogy a diffrakció ne rontsa túlzottan a felbontást. Emellett a kisebb rekesznyílás miatt hosszabb záridő vagy erőteljesebb megvilágítás szükséges.

Összefoglalva a fő kompromisszumok:

- *Fényerő vs. DOF:* Zárjuk le a rekeszt (pl. $f/16 \rightarrow f/22$), így nő a DOF, de ugyanakkor nő a diffrakciós elmosódás és kevesebb fény érkezik a szenzorra.
- *Nagyítás vs. DOF:* Nagy M erősíti a DOF csökkenését ($\text{DOF} \approx 1/M^2$ arányban). Ha lehet, válasszunk kisebb nagyítást vagy tartsunk megfelelő távolságot a tárgytól, hogy ne szükséges 100%-os nagyítás.
- *Felbontás vs. DOF:* Nagy felbontású szenzor (kis c) finomabb részleteket enged meg, de kisebb c miatt a DOF is csökken a fenti képlet alapján. Ha nagyon finom részlet akarunk vizsgálni, akkor erős kell legyen az optika és jó fényviszonyokra van szükség.
- *Telecentrikus lencsék:* Speciális esetben, pl. precíziós méretezéshez telecentrikus makró objektívet használnak. Ezek konstans nagyítást és torzításmentes képet biztosítanak, ráadásul nagyobb mérési DOF-ot nyújtanak a normál lencsénél, viszont drágábbak és nehezebbek.

Objektív kiválasztási szempontok

A makró kameraoptika kiválasztásakor a következő főbb szempontokat vegyük figyelembe:

- **Látómező (Field of View, FOV):** Előre definiáljuk a vizsgálandó tárgy méretét, majd ezt a szenzor mérete és a kívánt képbe foglalás alapján kell megszabni a nagyítást. A szükséges nagyítás kiszámítására alkalmas képlet:

$$M = \frac{\text{érzékelő méret (mm)}}{\text{látómező (mm)}}$$

például egy 6 mm széles (2/3") szenzor esetén 1:1 nagyításhoz 6 mm-es látómezőt terítenénk ki. A *Working Distance* ismeretében a megfelelő fókusztávolságú lencsét választjuk (pl. hosszabb fókuszs, ha nagy WD kell).

- **Mélységélességi követelmények:** Ha az alkalmazás szigorú DOF-ot igényel, válasszunk kis rekeszértéket, illetve, ha megoldható, ne használjunk felesleges nagyítást. A mélységélesség-kritikus projektek esetén a lehető legnagyobb mértékben használjuk a legkisebb rekesznyílást; ha magas nagyítású lencsét választunk, akkor válasszunk egy alacsonyabb nagyítású lencsét, amennyire a projekt megengedi.
- **Munkatávolság (WD) és térbeli korlátok:** A fizikai telepítésnél fontos a rendelkezésre álló hely, mivel nagy nagyítás esetén általában közel kell helyezni az objektumot a lencséhez. Ügyeljünk rá, hogy a lencse és a kamera elhelyezése kényelmes legyen, és elegendő hely maradjon a megvilágító berendezéseknek is.
- **Szenzorméret és interfész:** Győződjünk meg arról, hogy a kiválasztott objektív lefedi a kameránk szenzorát. Például a 2/3"-os csatlakozású objektív nem kompatibilis 1"-es kamerával. A szenzor mérete hatással van a látómezőre és a felbontásra is – minél nagyobb a szenzor, annál szélesebb a FOV azonos nagyítás mellett.
- **Felbontás és minőség:** Ha nagy felbontású képet szeretnénk (pl. több megapixel kamerával), érdemes olyan lencsét választani, amely elő van készítve magas felbontás támogatására (MTF-paraméterek, alacsony torzítás). Magasabb kategóriás objektívek jobb kontrasztot és tisztább éleket biztosítanak.
- **Speciális követelmények:** Ha például párhuzamos sugarakat igénylő metrológiai alkalmazásról van szó, telecentrikus objektívet célszerű választani, mert az fix nagyítást és nagy DOF-ot ad.

Összefoglalva, a kiválasztás során ellenőrizzük a látómezőt, a nagyítást és a kívánt működési távolságot (*Working Distance*), illetve vegyük figyelembe a mélységélesség-követelményeket: kis rekesz és alacsonyabb nagyítás növeli a DOF-ot. Ügyeljünk arra is, hogy az objektív mechanikailag illeszkedjen a kamerához (például C-mount) és a telepítési hely korlátaira.