

Infravörös képalkotó rendszerek

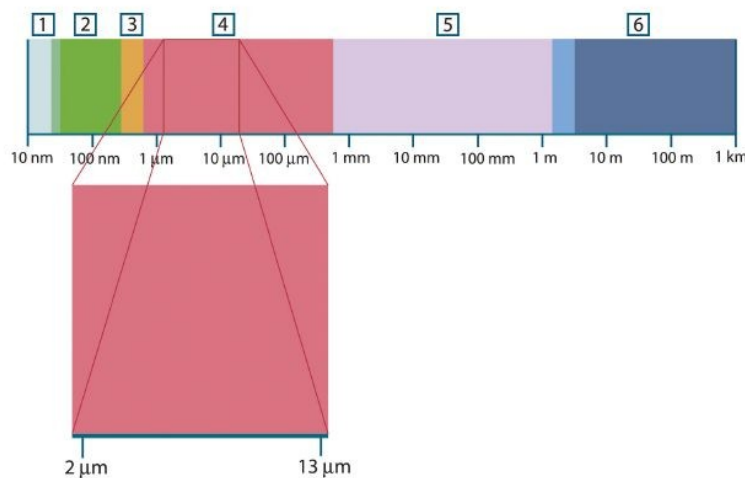
Wesser Csaba

okleveles anyagmérnök

1. Infra képalkotó rendszerek elméleti működése

1.1 Az elektromágneses spektrum

Az elektromágneses spektrum a sugárzás létrehozására és érzékelésére használt módszerektől függően több tetszőleges hullámhossz-tartományra, más néven *sávra* osztható. Az elektromágneses spektrum, különböző sávjain belüli sugárzás között nincs lényeges különbség. Ugyanazok a törvényszerűségek érvényesek minden sávra, és az egyetlen különbséget a hullámhossz eltérései jelentik.



Ábra: Infravörös teljes spektrumtartománya

Az infravörös spektrum tartomány [4] a 780nm-től 1000μm-ig helyezkedik el, amely 300GHz –384THz frekvencia tartománynak felel meg. Az infravörös tartomány rövid hullámhosszúságú végén a határ a mélyvörös tartományban már a vizuális érzékelés határát súrolja. A hosszú hullámhosszúságú végén pedig összeolvad a milliméter-tartományba eső mikrohullámú rádió-hullámhosszakkal.

Az infravörös sáv négy kisebb sávra osztható, melyek határai a következők: a *közeli infravörös* (0,75–3 μm), a *közepes infravörös* (3–6 μm), a *távoli infravörös* (6–15 μm) és a *szélsőséges infravörös* (15–100 μm). A négy spektrumtartomány közül az intenzitási görbéket figyelembe véve csak kettő fog minket érinteni, amelyekre az infravörös detektálást kiélezzük. Ezek közül a közeli és közepes némileg átfedésben lesz, mivel egy széles

spektrumú detektálást szükséges végrehajtani különböző környezeti változók miatt. A továbbiakban a különböző sugárzók típusait mutatjuk be.

1.2 Fekete test sugárzása

A fekete test definíció szerint olyan tárgy, amely minden ráeső sugárzást elnyel, függetlenül annak hullámhosszától. A tárgyak által kibocsátott sugárzás esetén a fekete megnevezésre Kirchhoff fontos törvénye nyújt magyarázatot, mely kimondja, hogy egy test sugárzáselnyelő képessége arányos a sugárzás kibocsátó képességével.

A feketetest-sugárforrás szerkezete elvben egy átlátszatlan, sugárzást elnyelő anyagból készült testben kialakított, izotermikus üreg nyílásán kilépő sugárzás jellemzői csaknem pontosan megegyeznek egy fekete test tulajdonságaival.

A tökéletes sugárzást elnyelő test szerkezete a gyakorlatban egy olyan dobozzal valósítható meg, amelyből csak az egyik oldalán kialakított nyíláson léphet ki a fény. Az üregbe belépő sugárzás szétszóródik, majd többszörösen visszaverődve elnyelődik, így csupán végtelenül kicsi mennyisége tud távozni. A nyílással létrehozott feketeség megközelítően egyenlő a fekete testével, és szinte tökéletes valamennyi hullámhossznál.

Az ilyen izotermikus üreget és a megfelelő sugárzást kibocsátó testet együttesen *üregsugárzónak* nevezzük. Az egyenletes hőmérsékletre felfűtött izotermikus üreg feketetest-sugárzást eredményez, melynek jellemzőit kizárólag az üreg hőmérséklete határozza meg. Általában ilyen üregsugárzókat használnak standard referencia hőmérsékletet adó sugárforrásként a termográfiai műszerek, például a infravörös kamerák kalibrálását végző laboratóriumokban. Ha a feketetest-sugárzás hőmérséklete meghaladja a 525°C hőmérsékletet, a sugárzás forrása fokozatosan láthatóvá válik, így a továbbiakban nem látszik feketének. A sugárzó által kibocsátott hő kezdetben vörös színben jelenik meg, majd ahogy a hőmérséklet tovább emelkedik, a színe narancsszínűre vagy sárgára változik. Egy tárgy úgynevezett *színhőmérséklete* valójában olyan hőmérsékletként definiálható, amelyre a fekete testet fel kellene melegíteni, hogy a sugárzásának a fénybenyomása megegyezzen a figyelembe vett fényforrásával.

1.3 A fekete test sugárzása és spektrális eloszlása

Max Planck (1858–1947) a következőképpen írta le a fekete test sugárzását és spektrális eloszlását, azaz a Planck törvényt. Az abszolút fekete test egy olyan test, amely csak a hőmérséklete miatt sugároz, különben minden elektromágneses hullámot elnyel.

$$W_{\lambda b} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{hc/\lambda kT} - 1 \right)} \times 10^{-6} [\text{Watt} / \text{m}^2, \mu\text{m}]$$

$W_{\lambda b}$ A fekete test spektrális fajlagos kisugárzása λ hullámhosszon

c Fénysebesség = 3×10^8 m/s

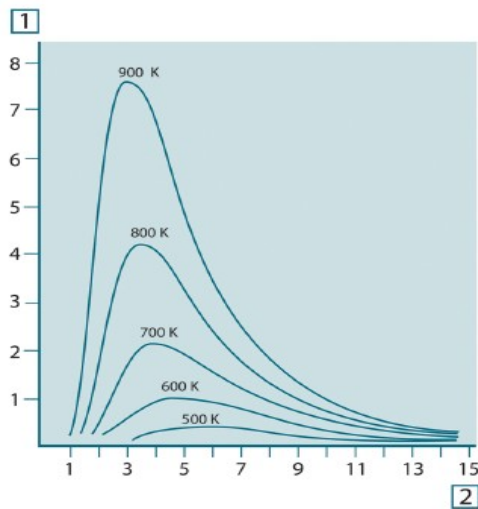
h Planck-féle állandó = $6,6 \times 10^{-34}$ Joule sec.

k Boltzmann-féle állandó = $1,4 \times 10^{-23}$ Joule/K

T Fekete test abszolút hőmérséklete (K)

λ Hullámhossz (μm).

Planck képletét különböző hőmérsékleteken grafikusán megjelenítve egy görbesereget kapunk. Minél magasabb a hőmérséklet, annál rövidebb hullámhosszon éri el a görbe a maximumát.



A fekete test spektrális fajlagos kisugárzása Planck törvénye alapján, különböző abszolút hőmérsékleteken ábrázolva.

1: Spektrális fajlagos kisugárzás ($\text{W}/\text{cm}^2 \times 10^3(\mu\text{m})$)

2: Hullámhossz (μm)

1.4 Wien eltolódási törvény

Wien törvénye (*Wilhelm Wien*, 1864–1928), amely matematikailag fejezi ki azt az általános megfigyelést, hogy a sugárzást kibocsátó test hőmérsékletének növekedésével megjelenő színek vörösről idővel narancssárgára, majd sárgára változnak. A szín hullámhossza megegyezik λ_{max} számított értékével. Adott fekete test hőmérsékletére λ_{max} értéke jó megközelítéssel meghatározható a $2898/T$ μm szabály alkalmazásával. Így például egy nagyon forró csillag, mondjuk a Szíriusz (11 000 K), amely kékesfehér fényt bocsát ki, a láthatatlan ultraibolya spektrumon belüli spektrális fajlagos kisugárzás csúcserkével, 0,27 μm -en sugároz. A nap (kb. 6 000 K) sárga fényt bocsát ki, amely kb. 0,5 μm hullámhosszon veszi fel spektrális fajlagos kisugárzásának maximumát, a látható fény spektrumának közepén. Szobahőmérsékleten (300 K) a fajlagos kisugárzás maximuma 9,7 μm a távoli infravörös tartományban, míg a folyékony nitrogén hőmérsékletén (77 K) az úgyszólván elhanyagolható fajlagos kisugárzás mértékének maximuma 38 μm , a szélsőséges infravörös tartományban jelenik meg.

1.5 Stefan-Boltzmann törvény

A Stefan-Boltzmann (*Josef Stefan*, 1835–1893; *Ludwig Boltzmann*, 1844–1906), törvény kimondja, hogy a fekete test által egységnyi idő alatt kisugárzott teljes energia a test abszolút hőmérsékletének negyedik hatványával arányos. Kimutatható, hogy a fajlagos kisugárzás a $\lambda = 0$ és λ_{max} közötti intervallumban csupán a teljes kisugárzás 25%-a, ami nagyjából a nap látható fény spektrumon belüli kisugárzásának felel meg.

Stefan-Boltzmann képletét az emberi test által kisugárzott energia kiszámítására felhasználva 300 K hőmérsékletet és kb. 2 m^2 külső testfelületet alapul véve 1 kW értéket kapunk. Ez az energiavesztés hosszú távon nem volna lehetséges, ha nem arra szolgálna, hogy kiegyenlítse a testünk hőmérsékletétől jelentősen nem eltérő környezeti

hőmérsékleten a környező felületekről, illetve ruházatunkból érkező, és testünk által elnyelt sugárzást.

1.6 Nem feketetest sugárzók

Az eddigiekben a feketetest sugárzókról és a feketetest sugárzásról volt szó. Azonban a valós tárgyak nagyobb hullámhossz-tartományon belül szinte soha nem igazodnak a fent említett törvényekhez – habár bizonyos spektrális intervallumokban megközelíthetik a fekete testek viselkedését. Így például egy bizonyos fajtájú fehér festék látszólag tökéletesen *fehérnek* tűnhet a fény látható spektrumában, viszont jól kivehetően *szürkének* látszhat kb. 2 μm -en, 3 μm felett pedig már szinte *fekete*. Három folyamat akadályozhatja meg, hogy a valós tárgy a fekete testhez hasonlóan viselkedjen: a beeső α sugárzás bizonyos hányadának elnyelése (abszorpció), ρ hányadának visszaverése (reflexió), és τ hányadának áteresztése (transzmisszió). Mivel ezek a tényezők többé-kevésbé a hullámhossztól függenek, λ index jelzi, hogy értékük a spektrum függvényében határozható meg.

- α_λ Spektrális abszorpció = egy tárgy által elnyelt spektrális fajlagos energia aránya a ráeső sugárzáshoz viszonyítva
- ρ_λ Spektrális visszaverődés = egy tárgy által visszavert spektrális fajlagos energia aránya a ráeső sugárzáshoz viszonyítva.
- τ_λ Spektrális áteresztés = egy tárgy által áteresztett spektrális fajlagos energia aránya a ráeső sugárzáshoz viszonyítva.

E három tényező értékét mindig összegezni kell bármely hullámhossz egészére viszonyítva. Egy másik tényező, a fajlagos emisszió szükséges egy tárgy által meghatározott hőmérsékleten alkotott fekete test fajlagos kisugárzása ϵ hányadának meghatározásához.

- ϵ_λ Spektrális fajlagos emisszió = egy tárgy által kisugárzott spektrális fajlagos energia és egy fekete test által azonos hőmérsékleten és hullámhosszon kisugárzott spektrális fajlagos energia hányadosa.

Általánosságban elmondható, hogy háromféle sugárforrás létezik, melyeket aszerint különböztethetünk meg, miképpen változik spektrális fajlagos kisugárzásuk a hullámhossz függvényében.

- Fekete test, ahol $\epsilon_\lambda = \epsilon = 1$
- Szürke test, ahol $\epsilon_\lambda = \epsilon = 1$ -nél kisebb állandó
- Szelektív sugárzó, ahol ϵ a hullámhosszal változik

Kirchhoff törvénye szerint minden anyagra igaz, hogy egy test spektrális fajlagos emittáló képessége és spektrális abszorpcióképessége bármely meghatározott hőmérsékleten és hullámhosszon egyenlő.

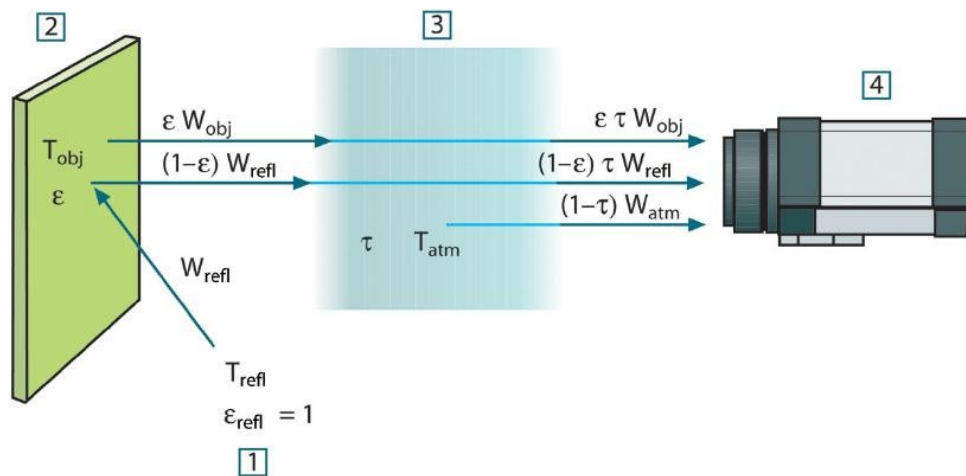
1.7 Infravörös félig átlátszó anyagok

Vegyünk egy nem fémes, félig átlátszó testet – mondjuk egy műanyagból készült vastag, sima lapot. A lap melegítésekor a térfogatán belül keletkező sugárzás utat keres magának a külső felületek felé az anyagon belül, ahol részben elnyelődik. Ezen kívül a felülethez érve bizonyos hányada visszaverődik az anyag belseje felé. A visszavert sugárzás egy része ismét elnyelődik, bizonyos hányada azonban eléri a túlsó felületet, amelyen keresztül legnagyobb része távozik, egy része viszont ismét visszaverődik. Habár az egymást követő visszaverődések egyre gyengébbé válnak, valamennyijüket összegezni kell, ha a lap teljes fajlagos emisszióját keressük. Az eredményül kapott geometriai sorozat összegzésével meghatározható a félig átlátszó lap tényleges fajlagos emissziója.

2. Valós termográfiai mérés elrendezése

A termográfia egy olyan optikai mérési módszer, amely a tárgy megtekintésekor az infravörös hullámokat detektáló berendezés nem csak magából a tárgyból származó sugárzást érzékeli, hanem összegyűjti a környezetből származó és a tárgy felületéről visszaverődő sugárzást is.

A kétféle sugárzást némileg csillapítja a mérés útvonalában lévő légköri atmoszféra. Mind ehhez harmadikként hozzájön még magának a légköri atmoszférának a sugárzása is. Az eddigiekben bemutatott és az alábbi ábrán illusztrált mérési helyzet valóságghűen tükrözi a tényleges helyzetet. A figyelmen kívül hagyott tényezők közül megemlíthető például a napsugárzásból származó légköri fényszóródás, vagy a látómezőn kívül eső forrásokból származó intenzív sugárzás. Az ilyen zavaró hatások mennyisége nehezen határozható meg, azonban ezek szerencsére többnyire elég kicsik, ezért figyelmen kívül hagyhatók. Amennyiben mégsem lennének elhanyagolhatók, akkor a mérési konfigurációból adódóan valószínűleg nyilvánvaló a zavaró hatás, legalábbis a képzett szem számára. Ilyenkor a készülék kezelője köteles megváltoztatni a mérési helyzetet úgy, hogy a zavar elkerülhető legyen, például a nézetirány megváltoztatásával, az intenzív sugárforrások árnyékolásával, stb. A fent leírtak alapján a következő ábrából levezethető a képlet, mellyel a készülék kalibrált kimeneti értékéből kiszámítható a tárgy infra sugárzásának mértéke.



Ábra 1.: Átlagos termográfiai mérési helyzet vázlatos bemutatása.

1: Környezet; 2: Tárgy; 3: Atmoszféra; 4: Detektor

Tegyük fel, hogy a fekete testből származó és a detektor által észlelt T_{source} hőmérsékletű W sugárzási energia rövid távolságon a detektáló rendszer U_{source} kimeneti jelét generálja, amely egyenesen arányos a bemeneti energiával (lineáris detektálók).

Ebben az esetben (1. egyenlet): $U_{source} = CW(T_{source})$, vagy egyszerűsítve: $U_{source} = CW_{source}$, ahol C állandó.

Ha a forrás ϵ fajlagos kisugárzású szürketest, akkor a fogadott sugárzás ebből adódóan ϵW_{source} .

Ebből már meghatározható a háromféle érzékelt sugárzási energia:

- 1 Tárgy emissziója = $\epsilon\tau W_{obj}$, ahol ϵ a fajlagos kisugárzás és τ az atmoszféra hővezető képessége. A tárgy hőmérséklete T_{obj} .
- 2 Környezeti forrásból származó fajlagos emisszió = $(1 - \epsilon)\tau W_{refl}$, ahol $(1 - \epsilon)$ a tárgy reflexiós tényezője. A környezeti forrás hőmérséklete T_{refl} . Az előzőekben feltételeztük, hogy a T_{refl} hőmérséklet a tárgy felületén található pontból kiinduló félgömbön belül minden sugárzó forrás esetén azonos. Természetesen ez bizonyos esetekben a valós helyzet leegyszerűsítése. Azonban erre az egyszerűsítésre szükség van ahhoz, hogy használható képletet kapjunk, és a T_{refl} értékére – legalábbis elméletben – megadható az összetett környezet tényleges hőmérsékletének megfelelő érték. Megjegyzendő, hogy a környezet fajlagos kisugárzására is $= 1$ értéket feltételeztünk. Ennek helyességét Kirchhoff törvényére alapozzuk: Minden felület elnyeli azokat a sugárzásokat, amelyeket ő maga is kibocsátani képes. Így a fajlagos kisugárzás $= 1$. A legújabb elgondolásuk szerint a tárgy körüli teljes gömböt figyelembe kell venni.
- 3 Atmoszféra fajlagos emissziója = $(1 - \tau)\tau W_{atm}$, ahol $(1 - \tau)$ az atmoszféra fajlagos emissziója. Az atmoszféra hőmérséklete T_{atm} . Ebből meghatározható az összes fogadott sugárzási energia (2. egyenlet):

$$W_{tot} = \epsilon\tau W_{obj} + (1 - \epsilon)\tau W_{refl} + (1 - \tau)W_{atm}$$

Tehát a vizsgálatokhoz az alábbi paraméterértéket kell megadni a számításokhoz. Ezek a következők:

- Tárgy fajlagos kisugárzása ϵ
- Relatív páratartalom H_{rel}
- Atmoszférikus hőmérséklet T_{atm}
- Tárgy távolsága (D_{obj})
- Tárgy környezetének (tényleges) hőmérséklete vagy a visszavert környezeti hőmérséklet T_{refl}

Ez a feladat néha komoly akadályokat jelenthet a vizsgálatba, mivel rendszerint nem könnyű meghatározni a konkrét esetben a pontos fajlagos kisugárzást és az atmoszféra hővezető képességét. A két hőmérséklet általában kevesebb gondot okoz, ha a környezetben nincsenek nagyméretű, intenzív sugárforrások. A környezeti sugárforrások, amelyeket a későbbiekben csoportosítunk jelen esetben számunkra zavaró tényezőként fog fellépni és a területtől függően figyelembe kell vennünk.

Az előző összefüggésben természetesen felmerül a kérdés, hogy mennyire fontos a fenti paraméterek pontos értékének az ismerete. Célszerű már most foglalkozni ezzel a problémával, különböző mérési eseteket megvizsgálva, és a háromféle sugárzás viszonylagos nagyságrendjét összehasonlítva. Ebből már következtetni lehet arra, mikor és mely paraméterek helyes értékének használatára van szükség.

Az alacsony tárgy hőmérséklet mérés nyilvánvalóan kritikusabb, mint a magas hőmérsékleté, mivel a 'zavaró' sugárforrások sokkal erősebbek, mint az első esetben. Ha ezen kívül a tárgy fajlagos kisugárzása is alacsony, még ennél is bonyolultabb a helyzet.

Az alap kutatásaink egyik célja felderíteni, hogy mik azok a gyakorlatok, amikkel kiküszöbölhetőek a kritikus mérési feltételek, körülmények és helyzetek.

3. Infravörös képalkotó rendszerek gyakorlati alkalmazása

Az előzőekben tárgyalt elméleti összefüggéseket figyelembe véve az infravörös képalkotó rendszerek gyakorlati alkalmazásánál meg kell vizsgálni még az adott feladatra milyen detektálási rendszerek jöhetnek szóba. A széles spektrumú méréseknél a valóságban két infra tartományban lehet gondolkodni. A közeli-közép tartomány, amely körülbelül 1,5 μ m-5 μ m –ig és a távoli infra tartomány, amely 7 μ m-13 μ m-ig jöhet szóba.

Továbbá a méréseknél figyelembe kell venni a mérendő objektumok nagyságát, részlet gazdagságát. Ettől a két fő paramétertől függ, az optikai rendszer látószöge, és a detektor felbontása. A részlet gazdagság és a minta vételi gyorsaság további változókat von maga után. Ez pedig az adatfeldolgozás és az adatátvitel, amelyek olyan technikai feltételnek tesznek eleget, hogy rövid idő alatt nagy mennyiségű feldolgozott adat továbbítására képes a kezelő személyzet számára. A következő feladat a detektáló rendszerek vezérelhetősége és annak gyors, egyszerű kezelhetősége.

A detektálás további jellemzőit sem figyelmen kívül hagyva, mint a fény optikai rendszereknél egyaránt fontos a térbeli felbontás és az érzékenység. Itt is természetesen a lehető legpontosabb rendszerrel kell rendelkezünk.

A kültéri vizsgálatoknál az időjárási viszonyokat figyelembe véve minimális követelmény a por, víz, és ütés-rezgés állóság.

Ezek után elméleti számításokkal és gyakorlati kísérletekkel kell méreteznünk a detektáló egységet feladattól függően.

3.1 Földközeli detektálás robotrepülő géppel

A földközeli detektálásnál elsősorban a robotrepülőgép terhelhetőségétől függ a rendszerek felszerelhetősége. Itt viszonylag kis terület befogása és kis sebesség is már elegendő lehet a vizsgálatokhoz a részlet gazdagságot és a legkisebb mérendő objektumot figyelembe véve. Ettől függetlenül a mélység élesség, zajszűrés és pontosság itt is nagyon fontos. Ezért egy viszonylag nagy érzékenységű és felbontású rendszer szükséges a szélesebb látószögű lencsékhez a kis távolság miatt.

3.2 Távoli, nagy területek vizsgálata helikopterről

A nagy távolság és nagy sebesség miatt itt egy komplexebb detektáló egységet kell tervezni, mivel a távolság és a sebesség több zajt is von maga után. Így a szélesebb spektrumú mérés elengedhetetlen az adatfeldolgozás és kiértékelés szempontjából. Továbbá a felbontó képesség, pontosság, zaj zavar szűrés, szélhatások, környezeti viszonyok erőteljesebben befolyásolják a mérési körülményeket. Viszont itt a távvezérelhetőség nem annyira cél, mint

az interfészek gyorsasága és sávszélessége. Az optikai rendszereknél itt a teleobjektíveket kell használni.

3.3 Detektáló egységek méretezéséhez szükséges paraméterek

Összességében mindkét rendszerrel figyelembe kell venni az alábbi paraméterek.

Kép és optikai paraméterek:

- Lencse
- Térbeli felbontás
- Érzékenység/NETD:
- Képfrekvencia, digitális képfelvételi sebesség
- Fókusz pontosság, vezérelhetőség
- Valós képfelbontás, interpolálás

Detektálás:

- Detektor típus: Hűtésnélküli detektor (UFPA)
- Spektrális tartományok: 1,5 μm -5 μm , 7–13 μm
- Felbontás: 320 \times 240 pixel vagy 640 \times 480 pixel
- Detektor rácsosztás
- Detektor időállandó
- Pontosság

Interfész:

- Elérhetőség, Vezérlés és képprezentálás
- Képtávitel: min. 16-bit, Jel linearitás, Radiometrikus aktív adatok
- Kompatibilitás, Protokollok

Digital Input/Output:

- Digitális bemenetek: Adatbeolvasás, Programozhatóság, Bemenet külső eszköznek (Programozható olvasás)
- Digitális kimenet: Kimenet külső eszközökhöz (programozható), Adatkiolvasási sebesség, módja

Erőforrás:

- Külső táp egység, Akkumulátor egyaránt

Környezeti adatok:

- Működési hőmérséklet tartomány
- Tárolási hőmérséklet tartomány
- Pára ellenállóság mértéke
- Burkolat: védelem
- Ütés, Rezgés ellenállóság

Fizikai adatok:

- Súly
- Kamera méret
- Burkolat anyaga
- Felszerelhetőség