VILLAMOS BERENDEZÉSEK TERMOGRÁFIAI VIZSGÁLATA I.

A hőképfelvételek készítése, azaz a termográfia rendkívül sokoldalú mérési eljárás. A modern hőkamerák kezelése már-már hasonlít az elterjedt digitális videokamerákéhoz, a beszerzési áruk pedig a korábbi évekhez képest a töredékére esett. Nem meglepő tehát, hogy a villanyszerelők is egyre közelebb kerültek ehhez az új technológiához. Amint régen csupán a fáziskereső, majd a feszültség- és ellenállásmérő, később a multiméter, a földelésvizsgáló és az oszcilloszkóp vált mindennapos munkaeszközzé, rövidesen várhatóan a hőkamera is bevonul a villamos szakemberek mindennapjaiba.

A fent említett egyszerűség viszont ne tévesszen meg senkit: a mérési szempontból helyes hőképfelvételek készítéséhez szakmai tudás, megfelelő mérés-előkészítés és a feladat igényeinek eleget tevő mérőeszköz (hőkamera) is szükséges. Ellenkező esetben a mérési eredmények helyett csak kiértékelhetetlen „színes képek" keletkeznek. Szomorú tapasztalat, hogy több hőkamera-forgalmazó és hőképfelvétel-készítő szolgáltató súlyos szakmai hibákat vét a hőképek készítése során. Itt tehát – ennek elkerülése végett – kezdjük a fizikai alapelvekkel!

Az infravörös sugárzáson alapuló hőmérsékletmérés elve

Az infravörös sugárzás (hősugárzás) keletkezése

Az érintésmentes hőmérsékletmérés, illetve a termográfia azt a fizikai jelenséget használja fel, hogy az abszolút nulla K hőmérséklet (-273,15 °C) felett a testek elektromágneses hullámokat bocsátanak ki, így például rádióhullámokat, fényt, illetve hő(sugárzás)t. Az infravörös sugárzás (hősugárzás) az elektromágneses spektrumban a 760 nm és 1 mm közötti hullámhossz-tartományban található. A hőmérsékletmérés technikai szempontjából a 20 μm-ig terjedő tartománynak van jelentősége. Ez a következő részekre tagolható.

Hullámhossz	Infravörös résztartomány
0,8 μm...2 μm	ultrarövidhullámú infravörös
2 μm...6 μm	rövidhullámú infravörös
6 μm...20 μm	hosszúhullámú infravörös

A hőmérsékletmérés tehát a mérendő test által kibocsátott elektromágneses hullámoknak csak egy része – az infravörös sugárzás – révén történik. Ahhoz, hogy e sugárzás alapján a tárgy hőmérsékletére következtetni lehessen, a testhőmérséklet és a leadott sugárzás közötti összefüggést kell szemügyre venni. Ezt az összefüggést az ideális sugárzó (fekete test) által kibocsátott sugárzás spektrális eloszlását leíró Planck-féle sugárzási törvény (1. ábra) adja meg.

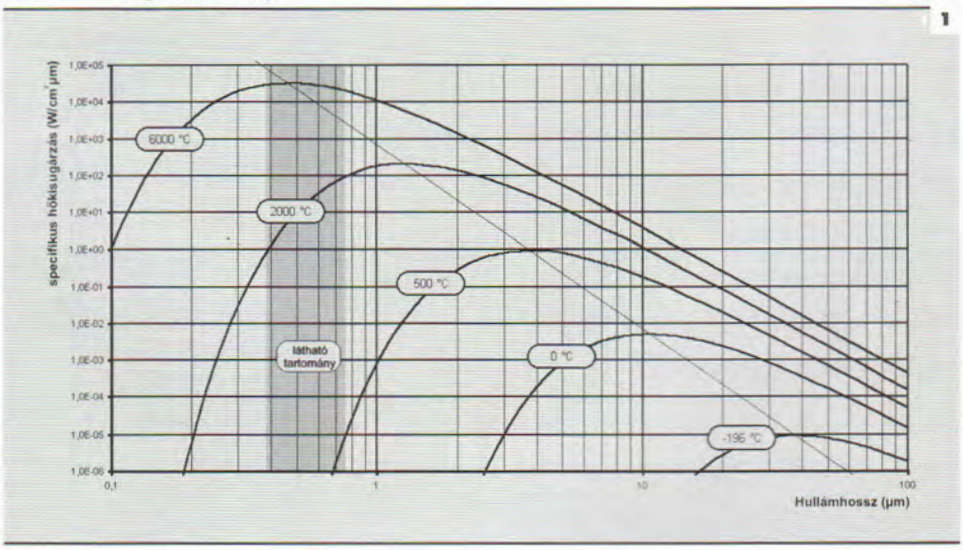
Röviden összefoglalva a fentieket, minél melegebb egy test, annál több sugárzást bocsát ki, és annál rövidebb a legerősebben kisugárzott sugárzás hullámhossza. Figyelemre méltó még, hogy a hosszú hullámhosszak mindig megtalálhatók (a hőmérséklet növekedésével erősödnek fel), a rövid hullámhosszak pedig csak forró testek esetén kerülnek kibocsátásra.

A mérendő objektumok tulajdonságai

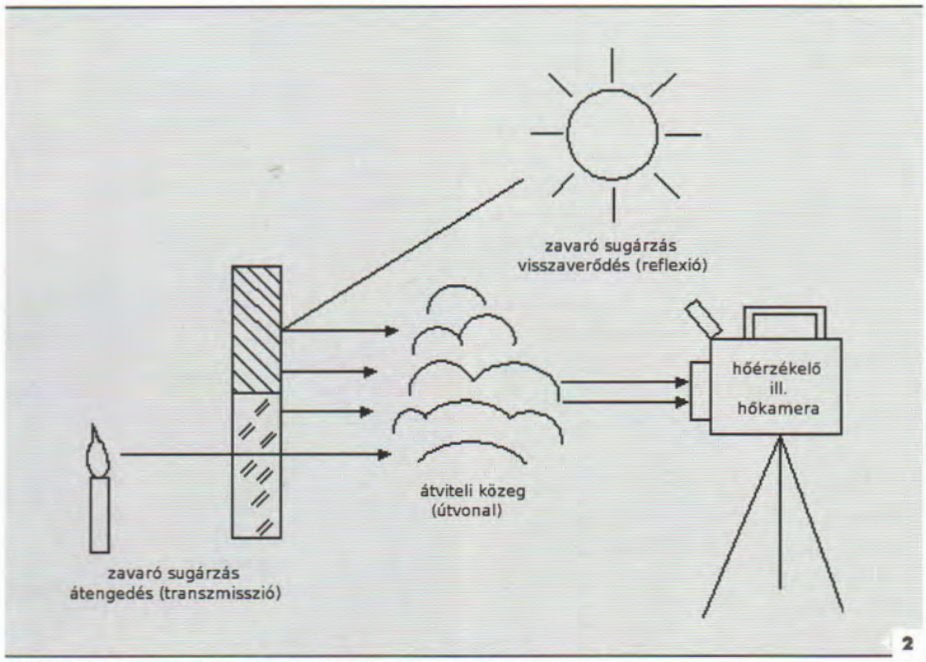
Az úgynevezett fekete test az ideális fizikai sugárzó modellje, amely 100 százalékosan kibocsátja azt a hősugárzást, ami a hőmérséklete alapján a Planck-féle sugárzási törvény szerint várható. A valódi testek sugárzási képessége viszont elmarad a feketetest-modelltől, az eltérés figyelembe vételére az emissziós tényező (ε) szolgál, amely a test hősugárzás-kibocsátási képességét írja le, összehasonlítva a fekete test képességével. Az emissziós tényező elsősorban az anyagtól függ (leginkább a felületétől), továbbá a felület érdességétől, a látószögtől, valamint a hullámhossztól (tehát így a test hőmérsékletétől is). A hosszúhullámú tartományban számos nemfémes anyagot nagy értékű, viszonylag szé-

A Planck-féle sugárzási törvény

1



forrás: Infratec



2

Infravörös távhőmérési, illetve termográfiai méréselrendezés

les hőmérséklettartományban állandó, a felület megmunkálásától független emissziós tényező jellemez. Jó példa erre az emberi bőrfelület és sok ásványi anyag (pl. beton, vakolat stb.), továbbá a műanyagalapú festékek. A fémek emissziós tényezője rendszerint kicsi, ráadásul nagymértékben függ a felületi jellemzőktől, valamint csökken a hullámhossz növekedésével (csökkenő hőmérséklettel).

A mérési elrendezés és az átviteli közeg hatása

Az érintésmentes hőmérsékletmérés esetén figyelembe kell venni az e mérési eljárás fizikai alapjaiból adódó sajátosságokat: egyrészt „optikai" mérési módszerről van szó, tehát a mérési objektumnak láthatónak kell lennie a mérőkészülék felől, másrészt a mérési elrendezés két kulcseleme mellett döntő szerepet játszik a mérésnél a mérési útszakasz jellemző állapota, valamint a sugárforrás(ok) esetleges jelenléte az elő-, illetve a háttérben. Mivel a mérés maga a test által kibocsátott infravörös sugárzás „távoli" érzékelésén alapul, e sugárzásnak valamilyen közegen keresztül kell áthaladnia a mérendő tárgytól a mérőberendezésig, miközben a közeg infravöröstartományú viselkedése (karakterisztikája) természetesen befolyásolja a mérést. A legtöbb esetben ez a közeg a levegő, de más – az infravörös hullámokat átengedő – anyagok (például különleges mérőablakok) is előfordulnak. A levegő esetében az infravörös sugárzás átvitelére hatással van elsősorban a benne levő vízpára és a szén-dioxid (2. ábra).

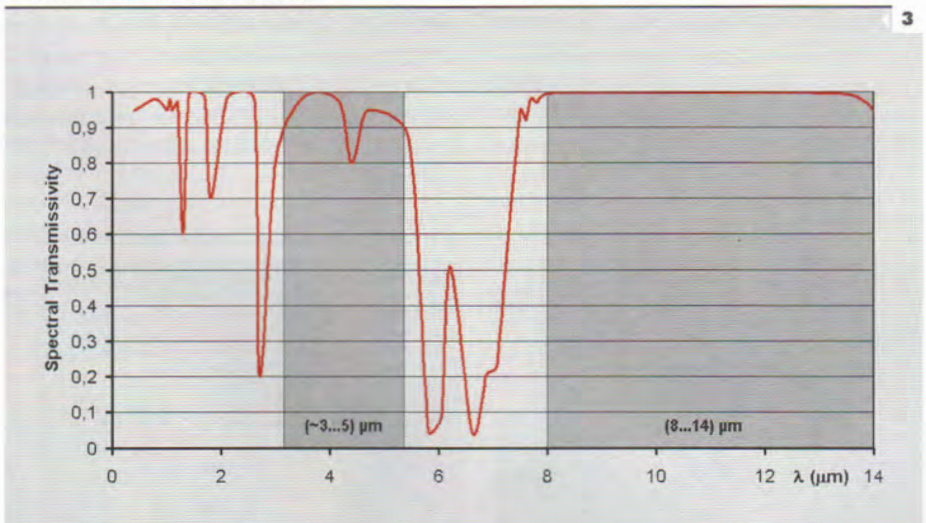
A 3. ábrán látható, hogy a levegő átviteli tulajdonsága nagymértékben függ a hullámhossztól. A nagy átviteli veszteséggel jellemzett tartományok szomszédságában jó átviteli képességű (satírozott) tartományok is megfigyelhetők. Az utóbbiakat atmoszférikus ablaknak is szokás nevezni. Amíg az átviteli tényező a 8...14 μm tartományban – a hosszúhullámú atmoszférikus ablakban – szinte tökéletes átvitelt biztosít akár nagy távolságokra is, a 3...5 μm tartományban – a rövidhullámú atmoszférikus ablakban – az atmoszféra mérhető veszteségeket okoz már néhányszor tíz méteres távolság esetén is.

A mérőeszköz és hatása a mérési eredményre

Mivel az érintés nélküli hőmérsékletmérés esetén a levegő a leggyakoribb átviteli közeg, természetesen csak a fent említett atmoszférikus ablakok hullámhossztartományaiban szabad méréseket végezni (más esetben nemlineáris hőmérsékletfüggést kapnánk). A mérésekhez ezért 8...14 μm hullámhossz-tartományra érzékeny – a hosszúhullámú atmoszférikus ablak kihasználásával működő –, valamint a 3...5 μm hullámhossz érzékelésére képes – a rövidhullámú atmoszférikus ablakban mérő – infrahőmérők és hőkamerák készülnek. Elnevezésük ennek függvényében hosszúhullámú vagy rövidhullámú infrahőmérő, illetve hőkamera. Ritkábban előfordulnak az ultrarö-

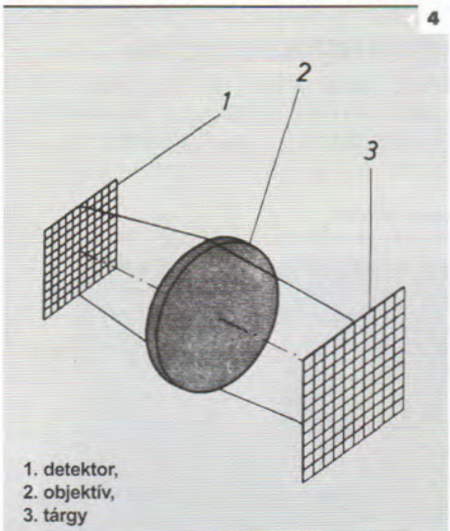
A levegő spektrális átviteli tényezője

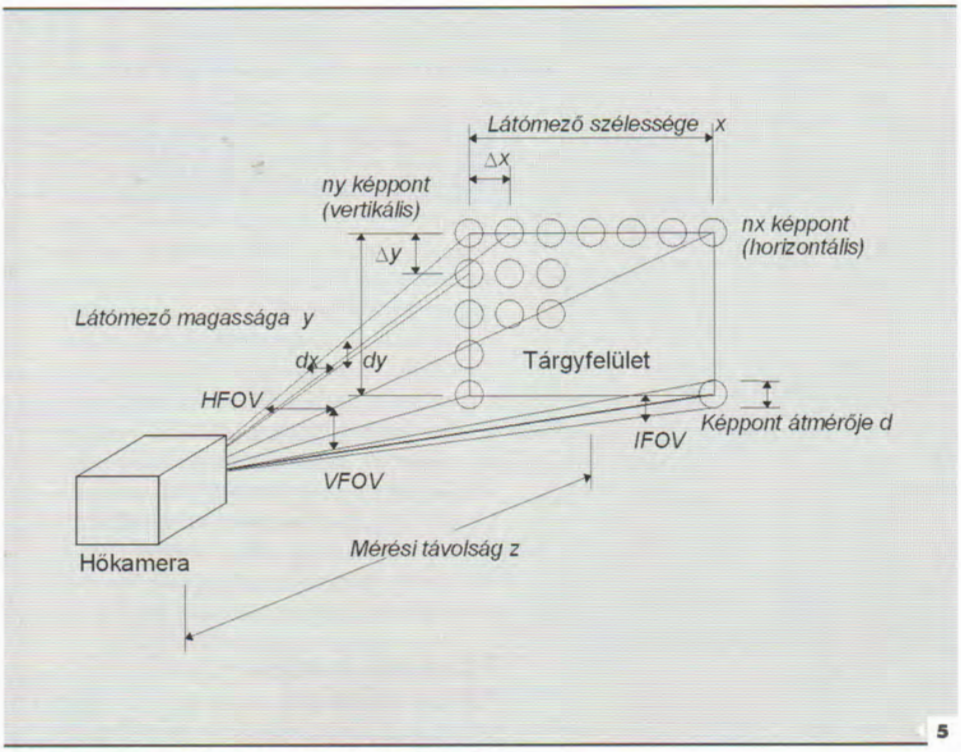
3



Mátrixdetektoros hőkamera elvi sugármenete

4





5

A hőkamera látómezője és geometriai felbontóképessége

Hőkamera

vidhullámú tartományban mérő infrahőmérők is, hőkamerák ebben a tartományban gyakorlatilag nem készülnek.

Az érintés nélküli hőmérsékletmérés mérőeszközeinek spektrális méréstartománya rendszerint tehát a tárgy által kibocsátott teljes sugárzásnak csak egy részét fedi le. A Planck-féle sugárzási törvény alapján a rövidhullámú (3...5 μm) tartományú mérőeszközök eléggé érzéketlenek a viszonylag alacsony hőmérsékletekre, viszont 350 °C felett a sugárzás érzékelhetősége a 3...5 μm tartományban jobb, mint a hosszúhullámú (8...14 μm) tartományban. Ennek az az oka, hogy a sugárzás maximuma eltolódott a rövidhullámú tartományba.

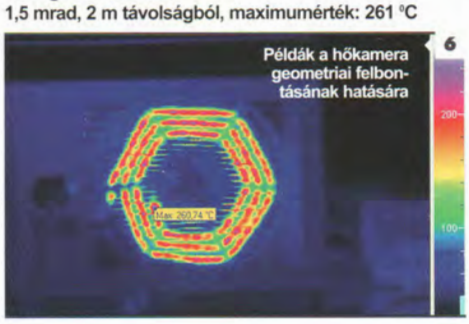
A hőkamerák felépítése és működése

Az utóbbi néhány évben egyre gyakrabban használják a mátrixdetektoros hőkamerákat az infravörös termográfiában. Egy ilyen kamera felépítése sok szempontból egy digitális fényképezőgépre (illetve digitális videokamerára) hasonlít, maguk az alkotóelemek természetesen igen eltérők (4. ábra).

A hőkép minden egyes képpontjának hősugárzási értékét egy-egy egyedi érzékelő alakítja át villamos jellé. A villamos jelet egy kifejezetten zajszegény előerősítő felerősíti, majd ezután történik annak digitalizálása. Az így előállított – pixelenkénti – digitális számadat az érzékelt hősugárzás mennyiségét képviseli. A tárgy felületi hőmérsékletének kimutatásához pedig minden egyes pixelhez tartozó számadatot még a termográfiai alapegyenlet alkalmazásával (egyebek között az emissziós tényezőjének, a környezeti hőmérsékletének, az átviteli szakasz karakterisztikájának ismerete alapján) kell átszámítani hőmérsékletté, amit egy – a hőkamerába integrált – nagy teljesítményű számítógép végez el. A számítógépnek viszont nemcsak ez a feladata, a mátrixos érzékelők esetén ugyanis az egyes pixelek (egyedi érzékelők) karakterisztikája nagyon hasonlíthat a szomszédos eleméhez, de mégis mérhetően különbözik attól. Az egyezőség hiányának kompenzálása komoly mennyiségű, valós idejű, számításalapú jelfeldolgozást (korrekciót) igényel, amit a belső számítógépnek el kell végeznie. Ezért a mátrixdetektorral készült első hőkamerákat hőmérsékletmérési funkciók nélkül ajánlották. A kameragyártók csak később integrálták ezt a technológiát a készülékekbe, előbb csak egy – a kép közepén lévő – mérőponttal, később az összes képpontra kiterjesztve (ahogy természetesen a számítógépek teljesítménye fejlődött).

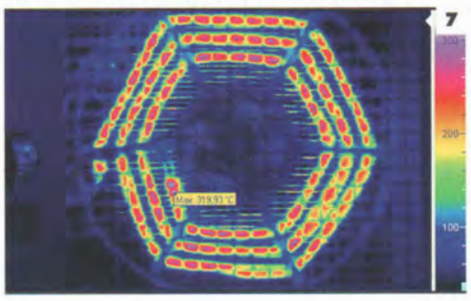
A legtöbb általános célú mátrixdetektoros kamera a viszonylag új, úgynevezett Quantum Well (hőellenállás vagy bolo-

Hősugárzó felvétele,
1,5 mrad, 2 m távolságból, maximumérték: 261 °C



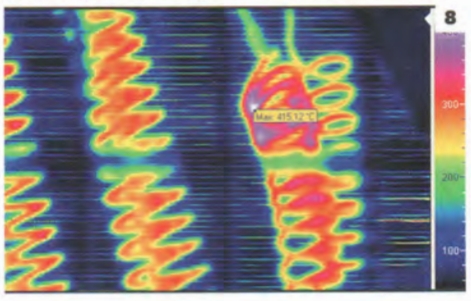
6

Hősugárzó felvétele,
1,5 mrad, 1 m távolságból, maximumérték: 320 °C



7

Hősugárzó felvétele,
1,5 mrad, 0,2 m távolságból, maximumérték: 415 °C



8

méter) érzékelő-technológiával készül, amely a hosszúhullámú tartományon belül nagy hő- és geometriai felbontású érzékelők készítését teszi lehetővé. Egyes esetekben a mátrixos érzékelők egyedi elemeinek reakcióidejével szemben támasztott nem túl szigorú követelmény megengedi a hűtés nélküli detektorok alkalmazását is. Sugárzásfizikai okok miatt azonban az alacsony hőmérsékleten elvárt nagy hőfelbontás elérése a hűtés nélküli berendezésekkel csak a hosszúhullámú tartományban képzelhető el.

A hőkamera geometriai felbontása

A geometriai felbontás is jelentősen befolyásolja a hőkamera képminőségét, illetve a mérés pontosságát, sőt magának a hőkamerának az alkalmazhatóságát is bizonyos feladatok esetén. Az úgynevezett IFOV-paraméter (legkisebb elemi látószög) azt a látószöget adja meg, amely egy egyedülálló érzékelővel (képponttal) kerül leképezésre. Például az 1,5 mrad érték azt jelzi, hogy minden egyes pixelhez rendelt – a tárgyra vetített – mérési pont 1 m-es távolságon 1,5 mm átmérővel rendelkezik, 2 m távolságon a kivetített felület 3 mm átmérőjű stb. (Ezt úgy kell elképzelni, mint a zseblámpa sugárnyalábját, mely a távolság függvényében egyre nagyobb átmérőjű körfelületet ölel át – 5. ábra.)

Fontos, hogy a mérendő tárgy legalább 3-szor (de minimum 2-szer) nagyobb legyen az adott távolságban kivetített egyedi mérőfelületnél, egyébként a mérőfolt nemcsak a tárgy felületét, hanem annak hátterét is tartalmazhatja. Mivel a mérőfolton belül átlagolás történik, a háttér hőmérsékletének hatására a mérési eredmény akár alacsonyabb, akár magasabb lehet a tárgy valódi hőmérsékleténél. Minél nagyobb a tárgy és a háttér hőmérsékletének a különbsége, annál nagyobb lesz a mérés hibája is! Természetesen a fenti szabály nemcsak kis tárgyak (például vékony vezetékek, izzószálak stb.) esetén érvényesül, hanem nagy tárgyak (például nagy keresztmetszetű kábelek, nyílászárók stb.) mérésekor is. Nyilván más dimenziókról van szó: a kis tárgyak esetén milliméter nagyságrendű mérőfelületekről van szó, amelyek az alkalmazott hőkamera és az optika geometriai felbontóképessége alapján legfeljebb több tíz centiméteres távolságokból mérhetők; nagy tárgyak esetén centiméter méretű mérőfelületek több méteres (akár 10 m-es) távolságból történő érzékeléséről lehet szó. Minden esetben a szabály betartását lehetővé tévő eszköz alkalmazása szükséges!

Mivel a geometriai felbontás mindig csak az éppen alkalmazott optikára vonatkozik, feltétlenül meg kell nézni, hogy a hőkamerára szerelt optika megfelel-e a kívánt látómezőnek és fókusztávolságnak. Amíg egyes hőkamerák cserélhető objektívekkel vagy nagy látószögű, esetleg makroobjektív előtétekkel is kaphatók, addig mások (nagyon-nagyon ritkán!) kiegészítő zoom-lencsével rendelhetők. A villamos berendezések felmérése során gyakran előforduló kisméretű – de fontos információkat hordozó – részletek mérhetősége érdekében a hőkamera-optika együttes geometriai felbontása az egyik legfontosabb paraméter (6., 7., 8. ábra)!

A hőkamera képfelbontása (képpontok száma)

A geometriai felbontáson túl a hőkamerával elérhető képminőséget, illetve pontosabban a mérés részletességét a hőkamera képpontjainak száma határozza meg. Ennek oka az, hogy a grafikai felismerhetőség érdekében bizonyos minimális képpontszámnak kell a mérendő tárgy egyes részeire esnie, ugyanúgy, ahogyan ezt a digitális fényképezés esetén megszoktuk. Könnyen érthető, hogy több képpont esetén a tárgyfelületet nagyobb részletességgel, illetve a nagyobb tárgyfelületet ugyanolyan részletességgel jeleníthetjük meg egyetlenegy hőképen. Ha kevés a képpontok száma, sok felvételt kell készíteni, és összefüggő tárgyak kiértékeléséhez, illetve beszámolók készítéséhez gyakran szükségessé válik a képek montírozása (ami igen időigényes munka).

Hőkamerák esetén ez a kérdés nem is jelentéktelen. Míg a digitális fényképezőgépeknél 5, 6, 7 vagy akár több mint 10 Mpixeles (10 millió képpontos) felbontásról beszélünk, mátrixos hőkamerák esetén a képpontok száma tipikusan 320x240, tehát 76 800 képpont. Vannak kisebb képességű kamerák is (gyakoriak a 160x120-as, tehát csupán 19 200 képponttal rendelkező készülékek), amelyek ennél fogva csak kisebb felületek elfogadható részletességű megjelenítésére képesek, ami a felhasználási területüket természetesen erősen korlátozza (cserébe nagyon kedvező az áruk). A hőkamerák érzékelői fejlődésének köszönhetően egyre több képpontú hőkamerák készülnek. Elfogadható áron kaphatók 384x288 elemi érzékelőt tartalmazó, érzékelőmátrixszal rendelkező hőkamerák, sőt akár 640x480 képpontos érzékelőmátrixos készülékek is (méghozzá 50, illetve 60 Hz-es képfrissítéssel). Speciális feladatokra még nagyobb felbontású mátrixos hőkamerák is készülnek, amelyek egy kis műszaki trükkel a beépített érzékelőmátrix felbontásának négyszeres pixelszámával bírnak. A lencserendszer mikromozgatásával megváltoztatják az érzékelőmátrixra vetített sugárnyaláb pozícióját, így az eredetileg két-két elemi érzékelő (képpont) közötti üres helyre vetített sugárzás is érzékelésre kerül, és ezáltal a képalkotáshoz felhasználható. Ez a módszer természetesen 50 Hz-nél lassúbb (nagyjából 1 másodperc alatt végezhető el egy négyszeres felbontású kép felvétele), de lehetőséget ad nagyon nagy felbontású kamerák készítésére (pl. Jenoptik VarioCAM research 780: 1,23 millió képpont!). Ilyen készülékekkel akár igen nagy tárgyfelületekről is nagyon részletes felvételek készíthetők (kevesebb felvétellel és utólagos montírozás nélkül – 9., 10., ábra).

Hőmérséklet-felbontás

A jelenleg kapható hőkamerák hőmérséklet-felbontási képessége elsősorban az érzékelő technológiájától függ. A legelterjedtebb mátrixos (hosszúhullámú) hőkamerák többnyire mikrobolométer-érzékelőkön alapulnak. Eme technológia – az alkalmazott érzékelő minőségétől (és egyben árfekvésétől) függően – lehetővé teszi a 120 mK, 80 mK vagy akár a 30, illetve 25 mK termikus felbontást.

10

Hőkamera

Az utóbbi két értéket csupán nagyon jó minőségű készülékek érik el, többnyire képátlagolás alkalmazásával. Sajnos a gyártók által megadott felbontóképesség (pl. a 80 mK) mátrixos kamerák esetén csupán az egyedi képpontokra vonatkozik. A teljes képre ennek duplája (esetünkben 160 mK) érvényes, aminek magyarázata az, hogy míg az egyik képpont esetlegesen -80 mK-t téved, a mellette lévő pont akár +80 mK-t tévedhet. Vannak azonban kameragyártók, akik kiegészítésképpen a teljes képre is specifikálnak egy felbontás-paramétert (pl. 100 mK-t), amely a fenti módon megadott hőmérséklet-felbontási adatnál jobb képminőséget dokumentál. A hőmérséklet-felbontóképesség korlátozza a kamera alkalmazhatóságát, amennyiben kisebb hőmérsékletkülönbségek kimutatása szükséges. Ilyen feladatok például az épület-termográfia (min. 80 mK felbontás szükséges), az orvosi alkalmazások (ezekhez min. 80 mK, de inkább 30 mK felbontás kell) vagy a növénybiológiai kutatások (min. 30 mK, de inkább 10 mK felbontás ajánlott). Természetesen ez a felsorolás nem teljes. Általános szabály az, hogy min. kétszer-háromszor olyan jó felbontóképességgel rendelkező készüléket kell választanunk, mint a legkisebb megjeleníteni kívánt hőmérsékletkülönbség. Villamos berendezések felmérése esetén a hőmérséklet-felbontóképesség nem túl kritikus paraméter. Fontos megjegyzés: a termikus felbontás nem egyenlő a hőkamera abszolút mérési pontosságával. Ez az érték többnyire +/-2 K. Ennek oka az érintésmentes hőmérsékletmérés technológiájában keresendő, a hőkamera ugyanis lebegő szintű mérőrendszer, aminek viszonyítási referenciája a belső referenciafelület (chopper) hőelemmel, illetve Pt100-zal meghatározott hőmérséklete.

Képrögzítési frekvencia

A hőkamerák ma a felvételkészítési frekvencia széles tartományát fedik le. Általában különbséget teszünk a lassú, mintegy 1 Hz letapogatású és a valós idejű, 50 Hz körüli berendezések között. De vannak még nagyobb, akár 6 kHz képfelvételi frekvenciát szolgáltató hőkamerák is. Ez a paraméter természetesen nagymértékben befolyásolhatja az árat, így a maximális képfrekvencia gondosan mérlegelendő. Kevés kivétellel a termikus folyamatok rendszerint nagy időállandójúak, és ha a tárgy nem mozog, másodpercenként akár egy kép is elégséges lenne. Mi alapján kell a mérésünk esetén szükséges minimális képfelvételi frekvenciát meghatároznunk? Mivel a hőképek készítése egy állandó időközzel végbemenő mintavételi eljárás jeldigitalizálással, a digitális jelfeldolgozásból ismert Shannon-törvényt kell kielégíteni az úgynevezett „alul-mintavételezés" elkerülése végett. Ez a törvény arról szól, hogy a mérendő folyamat legnagyobb frekvenciájánál minimum kétszeres mintavételezési frekvenciával kell az adatokat rögzíteni. Mivel a legtöbb termikus folyamat akár több percnél is lassúbb lefolyású, akár több másodperces képfelvételi gyorsaság is elegendő a hőfolyamat helyes rögzítésére.

Vannak azonban olyan gyors lefolyású melegedési vagy hűlési folyamatok, melyek másodpercek vagy akár másodpercek töredéke alatt zajlanak le. Amennyiben a folyamat időtartama másodperces nagyságrendű, a legtöbb mátrixos hőkamera által nyújtott 50 (illetve 60) Hz-es képfelvételi frekvencia bőségesen elég. Ennél gyorsabb (25 Hz-nél gyorsabb) hőfolyamatok viszont már csak speciális képességű hőkamerákkal rögzíthetők, amelyek akár 6 kHz-es képfrissítési sebességgel is bírnak (természetesen magas ár mellett).

Az érintésmentes hőmérsékletmérés gyakorlati szempontjai

Míg az előző részben elmagyaráztuk az infrasugárzás alapú hőmérsékletmérés elméleti hátterét és a hőkamerákra jellemező műszaki paraméterek jelentését, a következőkben az ezzel a technológiával kivitelezett mérések gyakorlati szempontjaira térnénk ki.

Mérési pontosság anyagfüggősége, mérhető felületek

A termográfiai (hőkamerás), illetve az infrahőmérős (tévesen lézeres hőmérőnek elnevezett) eszközökkel történő hőmérsékletérzékelés mérési pontossága elsősorban a mért felület sugárzás-kibocsátási (emissziós) képességétől függ. Minél jobb ez a képessége (minél inkább hasonlít egy ideális sugárzóra), annál kevesebb átengedett és visszaverődött sugárzás lép fel. A mérőeszköz által érzékelt sugárzás is egyre inkább csak a test hőmérsékletével összefüggő sugárzásból tevődik össze, kevesebbet kell tehát a hőmérsékletérték kiszámítása során a többi sugárzás hatását korrigálni. Minél kisebb egy test emissziós képessége, annál fontosabb a korrekciós számítás, amelynek alapja az úgynevezett emissziós tényező. Az anyagok emissziós tényezője pedig az anyagtól, a felület érdességétől, a hullámhossztól és a látószögtől függ.

Rahne Erric

(Folytatása következik!)