

Légi fotogrammetriai, távérzékelési feladatokra tervezett korszerű digitális mérőkamerák

A 2011/2. lapszámban megjelent cikk a légi felvételek minőségét meghatározó tényezőket ismerteti. Már korábban is bemutattuk a mérőkamera típusokat, ám azóta a technológia jelentős fejlődésen ment keresztül, ami elsősorban az újabb digitális képérzékelők megjelenésének köszönhető. Így most azokat a térképészeti és speciális földfelszíni jelenségeket, objektumokat térben és időben vizsgáló légi felmérések során alkalmazott, digitális mérőkamerákat mutatja be, amelyek minőségi és gazdasági kritériumok alapján jelenleg korszerűnek tekinthetők.

A kritériumok közé tartozik a felmérés során gazdaságosan elérhető geometriai pontosság, és a nagy sebességű felvételezés során elérhető részletesség, amit terepi felbontásban fejezünk ki. A geometriai felbontás azért kiemelt fontosságú, mert nemcsak az objektumok és a felszínen lejárló folyamatok felismerése függ ettől, hanem a foltterképezés során az egyes felszínborítási elemek lehatárolási pontosságának is egyik meghatározója. A terepi felbontásból, a túlsugárzásból és a kevert pixelek terepi méretének a vizsgálat léptékéhez viszonyított arányából is adódik a geometriai eltolódás mértéke. Mindez statisztikai hibákat eredményez a térinformatikai adatbázisban és az elemzésben.

Világszerte a következő terepi felbontástartományt alkalmazzák:

- A légi fotogrammetria szempontjából még gazdaságosan, legalább 200 km/h terephez viszonyított repülési sebességgel elérhető terepi felbontás jelenleg 2,5 cm.
- A gyakorlatban leginkább 20–5 cm terepi felbontású légifelvételek használatosak kataszteri, topográfiai és egyéb térképek aktualizálására.¹

A terepi felbontás megválasztása hazánkban:

- Magyarországon a légi fotogrammetria szempontjából elérhető terepi felbontás jelenleg 0,5 cm,
- Magyarországon a gyakorlatban leginkább 50–5 cm terepi felbontású légifelvételek használatosak.

Az átlagok ismertetésekor felfigyelhetünk arra, hogy Magyarországon leginkább a gazdaságos problémamegoldás és az egymástól független, több területen zajló, eredményes kutatás-fejlesztés hangsúlyos. Előbbinek az előnye a gazdaságos, gyors előrehaladás, ugyanakkor a felvételek interdiszciplináris felhasználását gátolja, hogy az országos vizsgálatok léptéke kizárólag a közigazgatási szektor egyes fontos részterületeit elégíti ki, ugyanakkor részletessége (felbontása és adattartalma) nem minden eset-

Légi fotogrammetriai, távérzékelési feladatokra tervezett korszerű digitális mérőkamerák

ben elégíti ki a területi gazdálkodók és különböző tudományterületek (talajtan, agrokémia, vízügy, és számos más ágazat) igényeit. Részben ennek köszönhető, hogy a kisebb területekre összpontosító, nagyfelbontású, speciális eljárások fejlődése felgyorsult, sőt az automatizálás, és mérés technikai előrelépések következtében nagyobb területek felmérésére is alkalmassá vált.

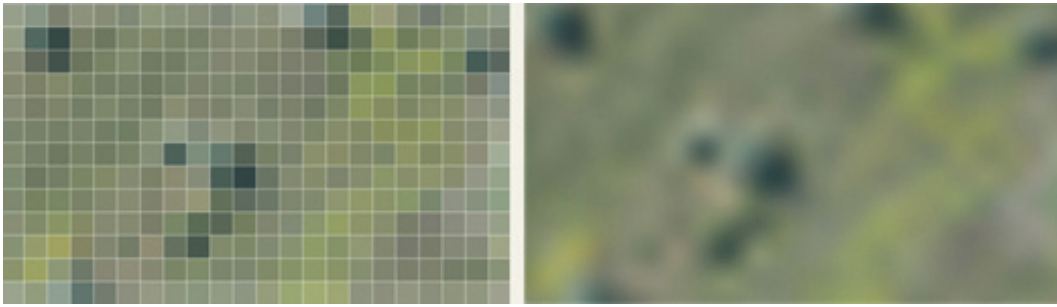
Nem szabad csupán a felbontást szem előtt tartva figyelmen kívül hagyni a légifelvételek további paramétereit egy felmérés megtervezésekor. Nagyon lényeges a felvételek képi minősége az elemzés, a későbbi kiértékelés szempontjából. Ezért a kamerák dinamikai sajátosságainak vizsgálata nem korlátozódhat kizárólag a digitális értelemben vett radiometriai felbontás, bitmélység ellenőrzésére. A digitálisan tárolt állomány fizikai mérete nem garancia a benne

megtalálható képi információ árnyaltságára és terjedelmére. Előfordulhat, hogy egy nyolc bites csatorna több interpretálható információt rögzít egy rosszul exponált, vagy gyenge szenzorral azonos spektrális tartományban és geometriai felbontással készített tizenkét bites csatornánál. Ebben az esetben a nagyobb tárhely igényű fájl adattartalma a kisebb.

A digitális felvétel dinamikáját nem csak a fényképezőgép szigorú értelemben vett képérzékelője, de a hozzá tartozó, a szenzoron jelentkező elektromos jeleket átalakító processzor és algoritmus minősége is befolyásolja. A valóság leképzése több lépésen át eredményezi a digitális kép létrejöttét. Az expozíció eleve meghatározza a rögzíthető felvétel részletességét, minőségét. A digitális képérzékelőben kiváltott kép természetesen az árnyalatoknak csak egy



1. ábra. A terepi felbontás csökkenésével az objektumok felismerhetősége és pontos lokalizálásának esélye is csökken



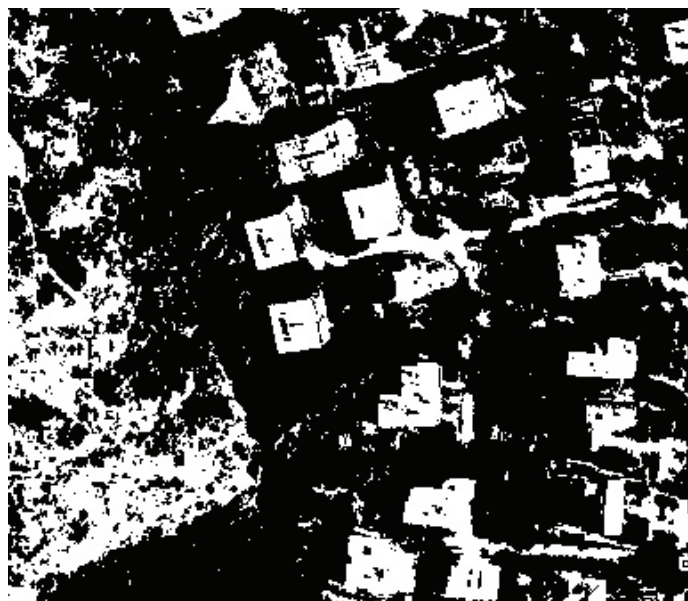
2. ábra. Példa a vizsgálat léptékéhez elégtelen részletességre

részét tartalmazza. Ezt az analóg jelet egy analóg/digitális jelátalakító formálja digitális információvá, aminek minőségén szintén nagyon sok múlik. A digitális jelnek egy értelmezett, eltárolt része alkotja az elkészült fényképet. Ennek az állománynak a dinamikai tulajdonságait tekintjük véglegesnek, és természetesen ennek árnyalatterjedelme és gazdagsága jóval elmarad a leképzett képétől.

A képen található legsötétebb és legvilágosabb pont közti különbség az árnyalatterjedelem szélessége. Minél több különböző fényességű pontot tud a fényképezőgép érzékelője elkülöníteni a két szélsőérték között, annál pontosabban ábrázolja a valóságot, és ezt a tulajdonságot a felvétel árnyalatgazdagságának nevezzük. Ha az árnyalatterjedelem nagy, de az

árnyalatgazdagság kicsi, vagy fordítva, az természetesen a képminőség rovására megy, így a két tényezőt egymás függvényében kell figyelembe venni (3. és 4. ábrák).

A felvételi tágasság, vagy megvilágítás-terjedelem az érzékenységi küszöb és a maximális érzékenység expozíciós tengelyen mért távolságától függ. Minél nagyobb ez a távolság, annál nagyobb az anyag tágassága. Az árnyalatterjedelem és a tágasság meghatározza az eszközzel a csatornákra jellemző spektrumtartományban elérhető árnyalatgazdagságot. Fontos tényező a spektrális érzékelési tartomány is, hiszen a különböző spektrumszakaszokon különböző felszíni jelenségek válhatnak megkülönböztethetővé, lokalizálhatóvá.



3. ábra. Ezt a felvételt nagy árnyalatterjedelem, de gyenge árnyalatgazdagság jellemzi



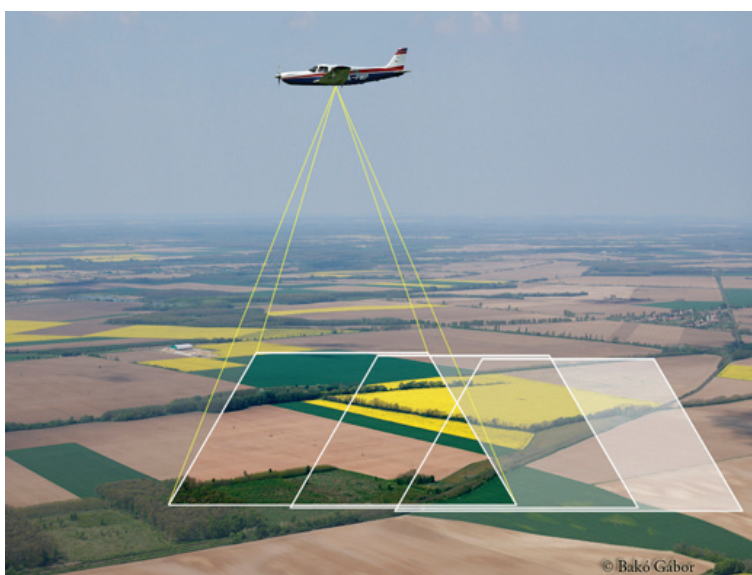
4. ábra. A Szent István Egyetem részlete különböző dinamikával. Megfigyelhető, hogyan változik a felvétel kiértékelhetősége az árnyalatgazdagság növekedésével.

A korszerű frame-rendszerű digitális mérőkamerákkal szemben támasztott követelmények

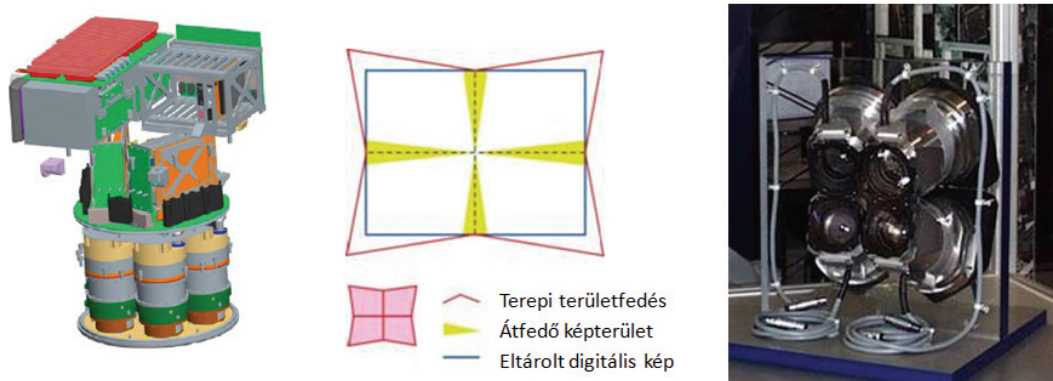
A sorozat-felvételéssel (5. ábra) működő mérőkamerák felvételeinek részletessége és geometriai helyreállíthatósága általában jóval felülmúlja a pásztázó berendezéseket.

A modern digitális légi mérőkamerák radiometriai felbontása legalább 16 bit digitális eltá-

rolást tesz lehetővé (legalább 14 bit A/D átalakításkor). A korszerű mérőkameráknál az érzékelő síkba fektetése ellenőrzött, megoldott, így a több képérzékelővel működő típusoknál is törekedni kell arra, hogy a részegységek felbontása is elérje a 20 megapixelt. A gazdaságosan megvalósítható 6 cm terepi felbontás is az alapkövetelmények közé sorolható úgy, mint a 2000 wattnál kisebb teljesítmény a kisebb energiafelvétel érdekében, vagy a legalább $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -



5. ábra. A kockázó légifényképezés során belül és sorok között átfedő függőleges kameratengelyű légifelvételek készítésén alapul



6. ábra. Példa a nagyfelbontású mérőkamerák moduláris jellegét adó elrendezésre

tól +40 °C-ig terjedő bevethetőség. A mérőkamerák gyártói kalibrációjának geometriai és spektrális értelemben is meg kell valósulnia. Ezeknek a kritériumoknak jelenleg az 1. táblázatban felsorolt eszközök felelnek meg. (A táblázat altípusokra nem tér ki.)

A modern kockázó digitális mérőkamerák rövid ismertetése

IGI DigiCam Quatro

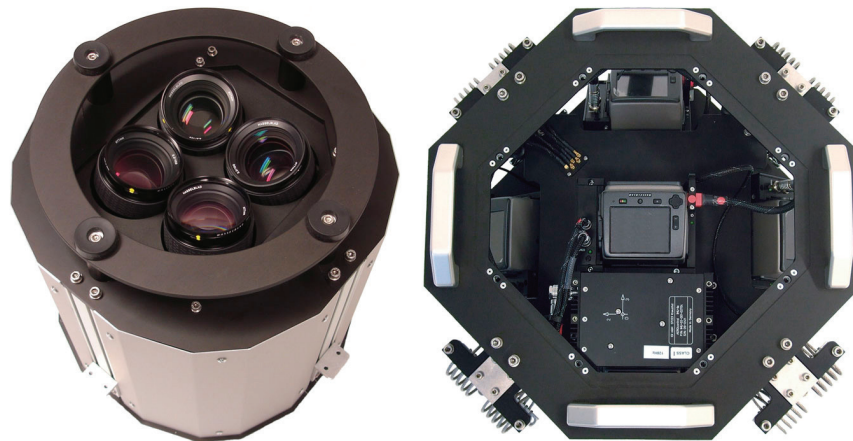
A leggyakrabban alkalmazott IGI mérőkamera a 235 MP (18 500 x 12 750 pixel) felbontású digitális felvételt négy kalibrált középformátumú

fényképezőgéphezen előállító DigiCam Quatro. A rendszerrel elérhető terepi felbontás a gyártói adatai szerint 6,5 cm, de a szenzorok, a kamerák és az optikai rendszer ismeretében 5 cm valószínű. A négyes elrendezés spektrális felbontása három csatornára korlátozódik, ami RGB (71 db dinamikai tartománnyal), vagy közeli infravörös lehet. Szimultán (multispektrális) felvételezésre a 60 megapixelés modifikáció ad lehetőséget. A felvételezés, a felmérés sebességét elsősorban a fejek minimális zárideje (redőnyzárral 1/800), és a kiolvasási sebesség (legrosszabb esetben 3 sec) korlátozzák. A négy CCD 6,0 x 6,0 μ elemi képpontokat tartalmaz. A gyártó a mérőkamerát 80 mm (33°, 25° látószöggel), 100 mm (28°, 21° látószöggel), 150 mm

1. táblázat. A korszerű frame-rendszerű digitális mérőkamerák felbontás- és kiolvasás-adatai

Típus	Pankromatikus felbontás		RGB felbontás (MP)	NIR felbontás (MP)	Elérhető terepi felbontás (cm)	Kiolvasási sebesség (sec)
	(pixel)	(MP)				
DigiCam Quatro	18 500 x 12 750	235	235	-	5,0	3,0
DIMAC Wide +	13 000 x 8900	115,7	60,4	-	5,0	2,0
Intergraph RMK D	6096 x 6500	39,6	39,6 (6096 x 6500)	39,6 (6096 x 6500)	4,0	1,4
Intergraph DMC II	17 216 x 14 656	252,3	41,7 (6846 x 6096)	41,7 (6846 x 6096)	2,5	1,7
Interspect IS 4 SCMC	15 811 x 11 713	185,2	185,2	185,2	1,8	0,7
Interspect IS 4 MS	8984 x 6732	60,5	60,5	60,5	0,5	0,7
Leica RCD 30	8956 x 6708	60,0	60,0	60,0	4,0	2,0
PhaseOne iXA	10 328 x 7760	80,1	80,1	80,1	4,0	1,4
Trimble	10 328 x 7760	80,1	80,1	80,1	4,0	1,4
UltracamEagle	20 010 x 1308	261,7	29,1 (6670 x 4360)	29,1 (6670 x 4360)	3,25	2,0
UltraCam XP	17 310 x 11 310	195,8	21,7 (5770 x 3770)	21,7 (5770 x 3770)	5,0	2,0

Légi fotogrammetriai, távérzékelési feladatokra tervezett korszerű digitális mérőkamerák



7. ábra. A Digicam Quatro és az IGI pentakamera

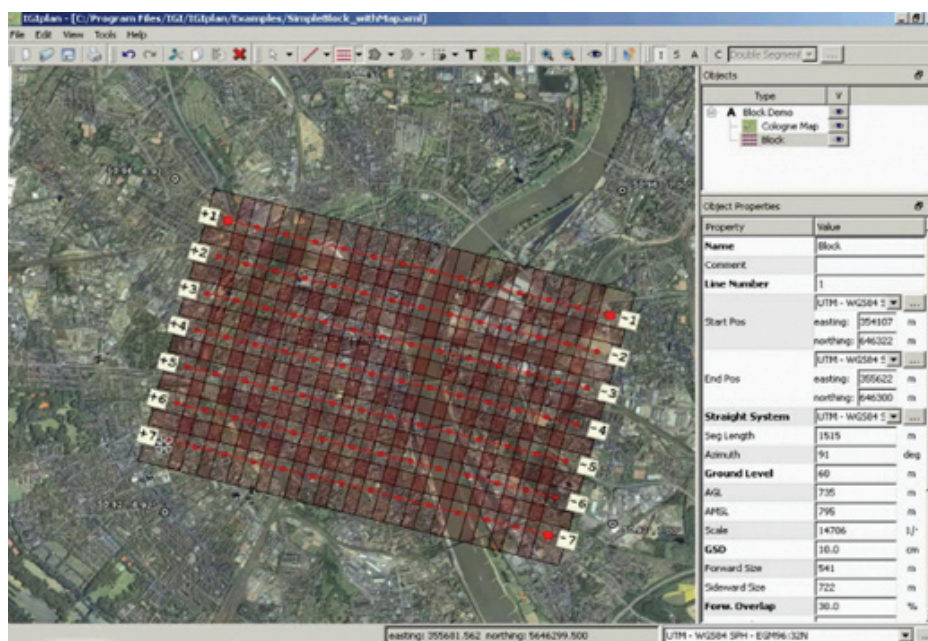
(19°, 14° látószöggel) objektívekkel szállítja. A repülés tervezéséről a felhasználóbarát Digi-Control szoftver gondoskodik. A kamera tömege 30 kg, teljesítménye 60 W.

DiMAC Wide +

A mérőkamera felbontása 115,7 megapixel (13 000 x 8900 pixel) vagy 60,4 megapixel (8984 x 6732) specifikációtól függően. Az elérhető terepi felbontás az érzékelő ismeretében

valószínűleg 5 cm, spektrális felbontása RGB (> 67 db dinamikai tartománnyal) vagy közeli infravörös.

A minimális zár idő 1/250 másodperc, ami megköveteli az FMC használatát (Forward motion compensation, azaz a repülésirányú mozgás-kompenzáció, a kamerát az expozíció időintervallumában hátrasiklató berendezés). Kiolvadási sebessége 2 másodperc alatt tartható, és 70, 120, valamint 210 mm fókusztávolságú objektívek használhatók hozzá. 2 db egyenként 53,9 x 40,4 mm méretű, 60,4 megapixeles



8. ábra. IGIplan szoftver könnyen kezelhető repüléstervező és felvételezés-vezérlő szoftver



9. ábra. A DiMAC mérőkamerájának vázlata és a kamera a hozzá tartozó fedélzeti számítógéppel

CCD-ből nyeri ki 115,7 megapixeles felvételeit, $6,0 \times 6,0 \mu$ elemi képponttal. A tömege 45 kg, energiafelvétele 28 V DC, 20 A.

Intergraph RMK D

Az egyik legjobb képminőségű multispektrális mérőkamera. A csupán 39,6 megapixeles (6096×6500 pixel) vagy más modifikációban 36,9 megapixeles (6400×5760) felvétel dinamikája széleskörű elemzést tesz lehetővé. Spektrális felbontása R (591–700 nm) G (482–591 nm) B (400–502 nm) (71 db dinamikai tartománnyal) és közeli infravörös (700–900 nm).

A gyártó által megadott 8 cm legnagyobb terpi felbontásnál a kamera valószínűleg többre is képes. Erre utal az 1/4000 másodpercre csökkenthető záridő és az 1,4 másodperces kiolvasási sebesség. 45–120 mm fókusztávolságú objektívekkel szerelhető. A CCD szenzorok elemi képpontja $7,2 \times 7,2 \mu$. A repüléstervezést és -lebonolyítást a Flight management system (FMS) segíti. Tömege: 59 kg, teljesítménye 350 W.

Intergraph DMC II 250

Az Intergraph nagyfelbontású mérőkamerája 252,3 megapixeles felvételeket produkál, maxi-



10. ábra (a). Az RMK D színes infravörös felvétele



10. ábra (b). Az RMK D mérőkamera

mum 2,5 cm terepi felbontással. Spektrális felbontása RGB (> 67 db dinamikai tartománnyal) és közeli infravörös. Redőnyzárának minimális zárideje 1/4000 másodperc, kiolvasási sebessége 1,7 másodperc. A gyártó 112 mm fókusztávolságú objektívekkel szereli, ami 46,6° repülésirányra merőleges látószöget eredményez. Látószöge repülésirányban 40,2°. Az 5 db RGB CCD 5,6 x 5,6 μ elemi képponttal bír. További 1 db NIR fejjel rendelkezik. Tömege: 68 kg, teljesítménye 350 W.



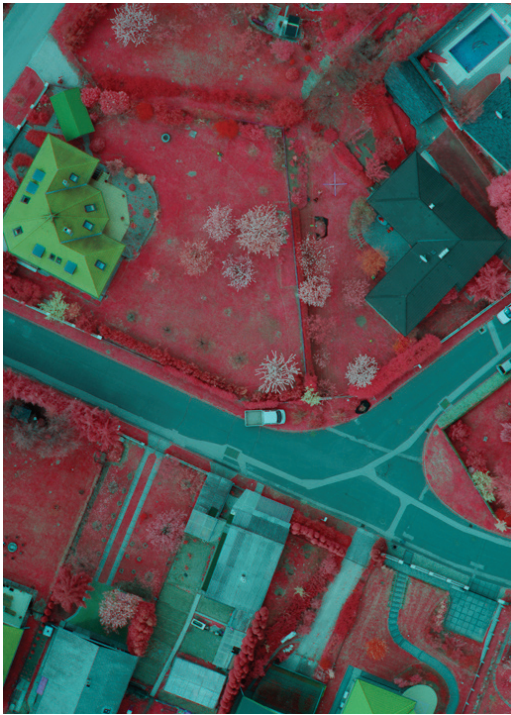
11. ábra. A DMC II 250 mérőkamera

Interspect IS 4 MS

Az Interspect IS 4-es mérőkamera multispektrális változatának felbontása 60,5 megapixel (8984 x 6732 pixel), de készült 26 megapixeles változat is. A rendszerrel elérhető terepi felbontás 0,5 cm, spektrális felbontása variálható. Az R (580–740 nm), G (500–585 nm), B (380–510 nm) (12,5 f-stops (> 72 db) dinamikai tartománnyal) és két közeli infravörös csatorna (580–970 nm, 790–1040 nm) mellett további három speciálisan beállítható spektrumú csatornából (az adódó feladatokhoz beállított csatornák a 355–1150 nm közötti tartományon belül alkalmazhatóak) 16 csatornás digitális felvétel nyerhető ki. A kamera 1/8000 másodperces minimális zárideje, 0,4 másodperces kiolvasási sebessége, a nagy érzékenység és alacsony zajszint miatt rendkívül gyors felvételezést tesz lehetővé, vagy gyenge megvilágítás esetén is jó minőségű felvételeket készít. 24–500 mm fókusztávolság között az objektívek széles választékával szerelhető (FOV f-80 mm esetén 40°, repülésirányban 27°). Az érzékelő egy 53,9 x 40,4 mm DALSA CCD (6,0 x 6,0 μ elemi képponttal) és két 21 MP CMOS (6,1 x 6,1 μ elemi képponttal). A kamerát az INTERSPECT CONTROL PRO 1.1 szoftvercsomag vezérli. A kamera tömege az érintőképernyős vezérlőegység nélkül 74 kg, a teljesítménye 70 W.



12. ábra (a). Az IS 4 MS



12. ábra (b). Az IS 4 MS színes infravörös felvétele

Interspect IS4 SCMC

Az IS 4 települési, kataszteri, térképészeti mérőkamera felbontása 185,2 MP (15811 x 11713 pixel), ami nagy területek átfogó, gazdaságos, nagyfelbontású légi felmérését teszi lehetővé.

A rendszer akár 1,8 cm terepi felbontást is lehetővé tesz. Minimális zárideje 1/8000 másodperc, kiolvasási sebessége 1,7 másodperc. Spektrális felbontása három csatornára kor-

látozódik, de egy RGB és egy közeli infravörös tartományban érzékelő rendszer moduláris installálásával, összekapcsolásával ez kiterjeszhető. F-28, 35, 45, 55, 80, 110, 120, 150, 210 mm és 240 mm objektívekkel szerelhető. 80 mm fókusztávolságú objektívek esetén a repülésirányra merőleges látószög 37°, míg repülésirányban 28°. A rendszer 4 db 53,9 mm x 40,4 mm, 6,0 x 6,0 μ elemi képponttal rendelkező DALSA CCD-vel épül. Tömege 280 kg, a kamera egység teljesítménye 140 W.

Leica RCD30

A Leica korán felismerte a 60 MP (8956 x 6708 pixel) CCD nyújtotta előnyöket, így a 4 cm elérhető terepi felbontás mellett a nagy képterület kedvező térképészeti alkalmazást biztosít.

Spektrális felbontás RGB (70 db dinamikai tartománnyal) és NIR (780–900 nm).

A gyártó a rendszert 50 mm és 80 mm fókusztávolságú objektívekkel ajánlja.

Phase One iXA

A Phase One 2012 elején döntött úgy, hogy a professzionális középformátumú fényképezőgépek gyártását légi modifikáció kialakításá-



13. ábra. A Leica RCD30 és a hozzá tartozó vezérlő egység és fedélzeti számítógép



14. ábra. Phase One iXA

val egészíti ki. A legnagyobb egyedi CCD felbontása 80,1 megapixel (10 328 x 7760 pixel, 53,7 x 40,4 mm érzékelőlap 5,2 x 5,2 μ elemi képponttal), de kínál 60 MP (8984 x 6732 pixel) felbontású változatot is. Az eszközzel elérhető terepi felbontás 4 cm, spektrális felbontása RGB (12,5 f-stops (> 72 db) dinamikai tartománnyal) vagy NIR. A kamerák szinkronkábellel kapcsolhatóak.

A redőnyzár 1/4000 másodperces minimális záridőt biztosít, a fejek kiolvasási sebessége 1,4 másodperc (CF kártya sebességétől is függ, de fedélzeti számítógépre is tölthető). A gyártó a 28, 35, 45, 80, 120, 150 és 240 mm fókusztávolságú objektíveket kínálja a vázhoz.

Moduláris kiterjesztési lehetősége 2, 4, illetve 5 fejre terjed ki háromcsatornás felvételezés esetén.

Trimble Aerial Camera

A trimble légi kamerájának felbontása szintén 80,1 MP (10328 x 7760), paramétere, így elérhető terepi felbontása (4 cm) nem véletlenül hasonlóak. 1 db 53,7 x 40,4 mm 60,4 MP CCD-vel rendelkezik, 5,2 x 5,2 μ elemi képponttal. Spektrális felbontás RGB (70 db dinamikai tartománnyal), vagy közeli infravörös tartományban érzékenyítve. A legrövidebb záridő 1/1000 másodperc, a kiolvasási sebessége 1,4 másodperc, 35–100 mm fókusztávolságú objektívekkel ajánlják. A digitális hátfal és a váz tömege 1,5 kg, energia felvétele 30 V DC, 2 A.

Ultracam Eagle

Az osztrák mérőkamera által rögzített pankromatikus felvétel felbontása 261,7 megapixel (20 010 x 1308 pixel), 5,2 x 5,2 μ elemi képponttal, így az elérhető legnagyobb fekete-fehér terepi felbontás 3,25 cm. Spektrális felbontását 29,1 MP-es (6670 x 4360 pixel) RGB (71 db dinamikai tartománnyal) és ugyanekkor közeli infravörös érzékelő terjeszti ki. Minimális zárideje 1/500 másodperc, ezért TDI és FMC képvándorlás-gátlókat alkalmaz. Kiolvasási sebessége 1,8 másodperc, a felvételeket összesen



15. ábra. A Trimble légi kamerája



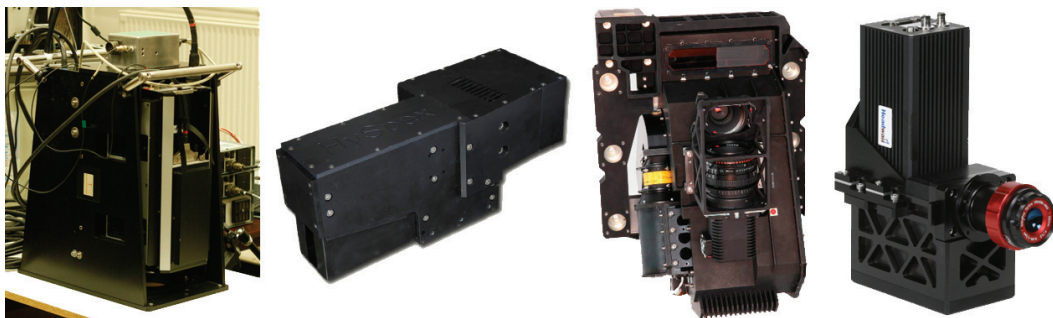
16. ábra. Az Ultracam Eagle

80 kg tömegű 4 pankromatikus és RGB, valamint NIR érzékelőkből állítja össze. 80 mm fókusztávolságú objektívvel 66° repülésre merőleges és 46° repülésirányú látószöge van, ami 210 mm fókusztávolság esetén 28°-ra és 20°-ra módosul. A kameraegység teljesítménye 350 W.

Repülőgép-fedélzetre tervezett hiperspektrális szenzorok

A hiperspektrális kamerák két csoportra oszthatók: frame-rendszerű, általában forgótárcsás laboratóriumi mérőműszerekre és spektrográffal, esetleg lépcsőzetes szűrőzéssel megoldott pásztázó mérőműszerekre. Míg a multispektrális (MS) kamerák négy-hetven nagyfelbontású,

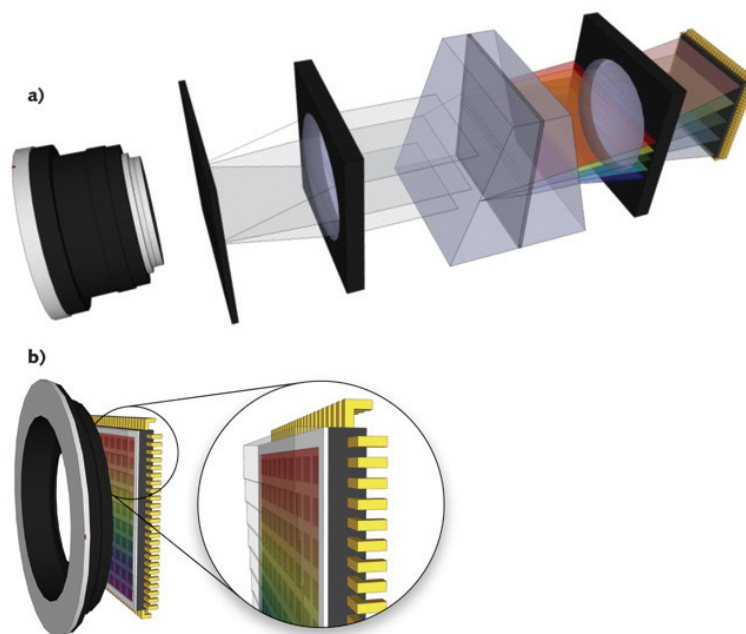
akár különböző spektrális átfogású csatornát rögzítenek, addig a hiperspektrális (HS) eszközök 70–700 csatorna egyidejű rögzítésére képesek. Ezek a csatornák folyamatos színeképet rögzítenek, egymás után következő spektrumszakaszokon képzik le a vizsgált tárgy képét. A hiperspektrális mérőműszerek esetében is alapvető kritérium, hogy a vizsgált terepi foltra jellemző egységnek nagyobbak kell lennie a felvétel terepi felbontásánál, különben a spektrális vizsgálat jelentősen eltolódik, és a pixel hamis értékeket vesz fel a csatornákon. Ezért elsősorban nagyobb szennyezések minőségi és mennyiségi jellemzésére, homogén felszín vizsgálatára alkalmazzák. Számos gyártó készít hiperspektrális műszereket, a kamerák ismertetésére a 2. táblázatban kerül sor.



17. ábra. AISA Dual, HySpex, Elbit és Headwall Photonics hiperspektrális mérőkamerák

2. táblázat. Hiperspektrális szenzorok spektrális és geometriai felbontása

Típus	Spektrális felbontás (nm)	Csatornák száma (db)	Szenzor szélessége (pixel)
AISA Eagle (VNIR)	400–970	488	1024
AISA EagleT (VNIR)	400–1000	200	1600
AISA Hawk (SWIR)	970–2450	254	320
AISA Owl	8 000–12 000	84	384
DALSA	400–1100	nem kalibrált	1,2000
ELBIT	400–2500	215	?
HySpex SWIR-320i	900–700	145	320
HySpex SWIR-320m	1300–2500	240	320
HySpex SWIR-320m-e	1000–2500	256	320
HySpex VNIR-1600	400–1000	160	1600
HySpex VNIR-640	400–1000	128	640
Northrop Grumman HATI SWIR	900–1700	256	320
Northrop Grumman HATI VNIR	400–1000	488	890



18. ábra. A spektrográf és a hiperspektrális szűrő vázlata

Jegyzet

1. Független forrásból: <http://aerometrex.com.au/blog/?p=217>