

Lotnicze kamery cyfrowe – stan obecny i perspektywy

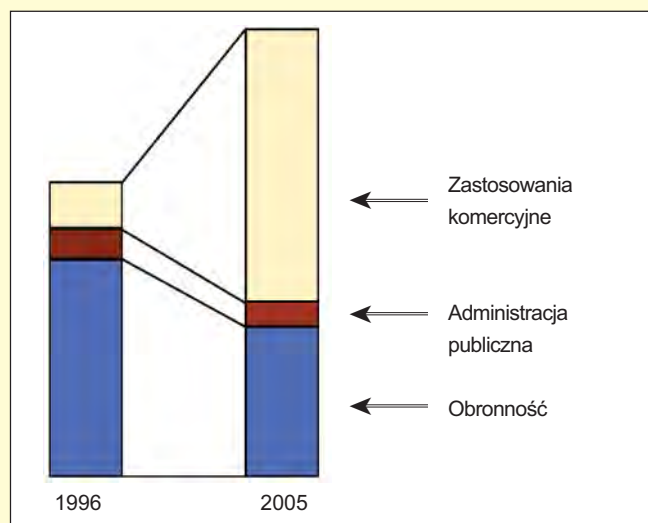
Zmierzch tradycyjnej kamery lotniczej?

ZDZISŁAW KURCZYŃSKI

Badania rynku i prognozy na najbliższe lata wskazują na gwałtowny rozwój zastosowań GIS. Stanie się tak w znacznej mierze z powodu dostępności cyfrowych, satelitarnych obrazów o „metrowej” rozdzielczości. W zakresie fotogrametrii lotniczej obserwuje się przechodzenie na technologie cyfrowe. Jakie – na tym tle – są prognozy dla zdjęć lotniczych? Dlaczego do tej pory nie skonstruowano lotniczej kamery cyfrowej?

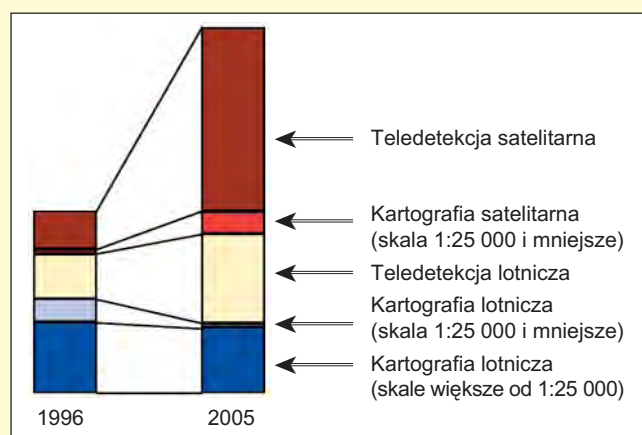
Prognozy rozwoju rynku GIS

Różnorakie i wiarygodne prognozy przewidują gwałtowny rozwój zastosowań GIS. Wzrost ten jednak nie będzie proporcjonalny dla głównych sektorów tego rynku. W sektorze „obronność” przewiduje się nawet wyraźne zmniejszenie rynku. Lokomotywą rozwoju będą zastosowania komercyjne, których udział do 2005 r. wzrośnie 5-krotnie w stosunku do 1996 r. (rys. 1) [Heier, 1999]. Na tych prognozach opiera się zakładany sukces kilku komercyjnych programów satelitarnych, które będą dostarczały stereoskopowe obrazy o terenowym wymiarze piksela 1 m [Kaczyński, 1997; Kurczyński, 1997].



Rys. 1. Prognozy rynku GIS [Heier, 1999]

Pierwsze nieudane próby umieszczenia satelitów na orbicie tylko przesuwają w czasie początek „nowej ery obrazowania satelitarnego”. Kolejna próba została podjęta 24 września. Na orbicie umieszczono satelitę IKONOS 2 [patrz GEODETA 10/99 – red.]. Jeśli wszystko pójdzie zgodnie z planem, z końcem tego roku na rynku pojawią się od dawna zapowiadane obrazy „metrowe”. Łatwy dostęp do tych obrazów znacznie poszerzy krąg odbiorców i upowszechni aplikacje GIS. Przewiduje się, że pojawią się nowi odbiorcy i aplikacje trudne obecnie do przewidzenia. Udział w nowym podziale rynku będą miały również opracowania GIS średnio- i wielkoskalowe, oparte na zdjęciach i obrazach pozyskiwanych z pułapu lotniczego. Spowoduje to wzrost zapotrzebowania na zdjęcia i obrazy, a co jeszcze ciekawsze, istotne przesunięcia w strukturze tego zapotrzebowania (rys. 2) [Heier, 1999].



Rys. 2. Prognozy rynku zdjęć i obrazów [Heier, 1999]

Jakość wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych będzie zbliżona do jakości drobnoskalowych zdjęć lotniczych. Przewiduje się, że obrazy te przejmą ten przedział skalowy rynku zdjęć lotniczych. Obrazy „metrowe” pozwolą na tworzenie i aktualizację map topograficznych w skali 1:25 000 i mniejszych [Spiller, 1999]. W zakresie produkcji ortofotomap ta granica przesunie się nawet do skali 1:10 000.

Przewiduje się stagnację (a nawet kurczenie się rynku) klasycznych opracowań fotogrametrycznych, bazujących na zdjęciach lotniczych, takich jak mapy i DTM. Będzie to spowodowane – oprócz rosnącej roli obrazów satelitarnych – wejściem nowych technologii pomiarowych, jak np. lotniczy skaner laserowy [Kurczyński, 1999]. Wzrost będzie obserwowany w zakresie opracowań tematycznych, bazujących na danych satelitarnych i lotniczych.

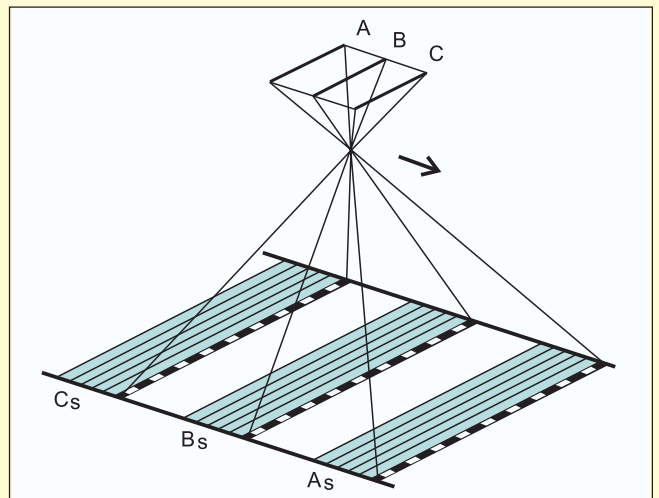
Zmiany dotyczą nie tylko etapu pozyskiwania, ale również – może nawet w większym stopniu – technologii opracowania danych źródłowych. W zakresie klasycznych opracowań fotogrametrycznych przechodzi się na technologie cyfrowe (w zakresie opracowań teledetekcyjnych nastąpiło to wcześniej). Nadal jednak dominującym źródłem danych jest klasyczna kamera pomiarowa na film zwojowy, a pozycja tej kamery wydaje się być niezagrożona. W technologiach zorientowanych na opracowania cyfrowe tradycyjne zdjęcia lotnicze muszą być wprawdzie zamienione na postać cyfrową w dodatkowym procesie skanowania.

Jaka – na tym tle – jest przyszłość klasycznych zdjęć lotniczych? Jakie są perspektywy zastąpienia tradycyjnej lotniczej kamery fotogrametryczną kamerą cyfrową?

Koncepcje rozwiązań konstrukcyjnych lotniczych kamer cyfrowych

Obrazowanie kamerami cyfrowymi ma szereg zalet w porównaniu z klasycznymi zdjęciami fotograficznymi:

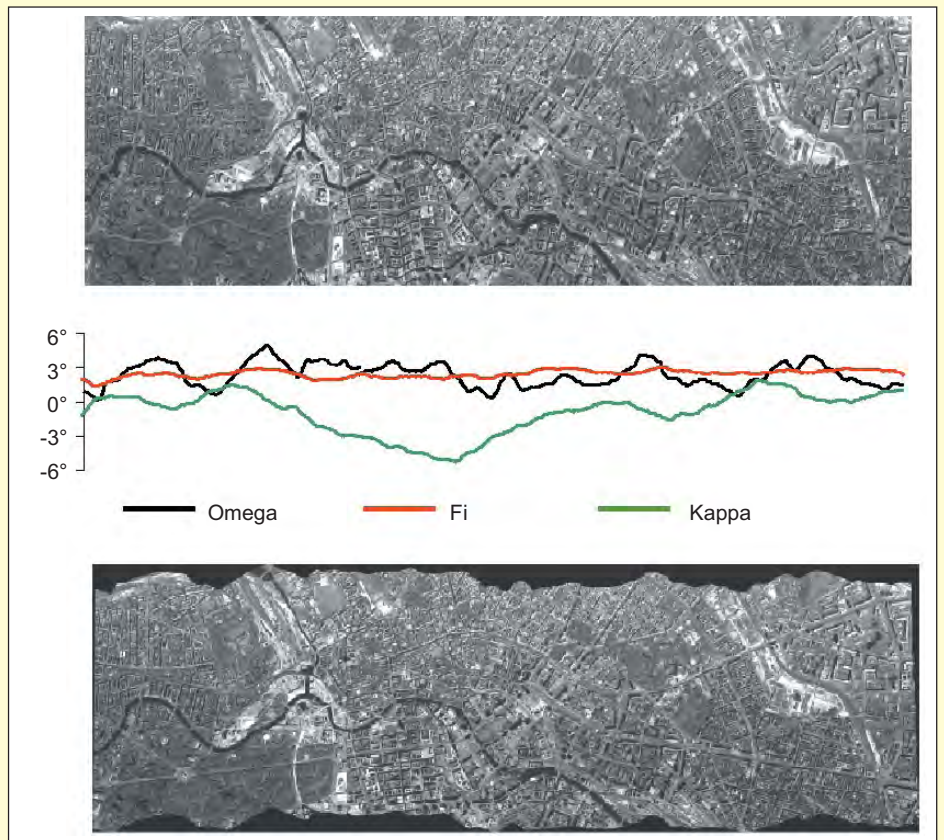
- wyeliminowanie kosztownego filmu i obróbki fotolaboratoryjnej;
- wyeliminowanie czasochłonnego i kosztownego etapu skanowania zdjęć;
- zakres dynamiczny i rozdzielczość radiometryczna obrazów cyfrowych jest znacznie większa od filmu. Zakres dynamiczny (tj. stosunek maksymalnej wartości sygnału z elektronicznego sensora do „szumu” sygnału) jest około 3 500:1, tj. 11-12 bitów, dla porównania, ten zakres dla zdjęć skanowanych wynosi około 6-7 bitów. Ta cecha oznacza znacznie lepszą wyróżnialność szczegółów w najjaśniejszych i najciemniejszych partiach obrazu. Ma to szczególne znaczenie przy obrazowaniu miast (cienie zajmują duże partie obrazu);
- lepsza reprodukcja barw;
- łatwiejsza droga do obrazowania wielospektralnego (ważne dla opracowań tematycznych);
- radykalnie skrócony czas dostarczenia obrazów do odbiorcy.



Rys. 3. Skaner elektrooptyczny z 3 linijkami detektorów

Cywilne systemy satelitarne dostarczające obrazy o globalnym pokryciu liczą sobie prawie 30 lat. Obrazy te od dawna znalazły miejsce w licznych zastosowaniach. Skoro obrazy cyfrowe mają tyle zalet, to dlaczego do tej pory nie przeniesiono bogatego doświadczenia obrazowania satelitarnego na pułap lotniczy?

Koncepcja lotniczej kamery cyfrowej jest realizowana dwiema drogami. Pierwsza to koncepcja skanera elektrooptycznego. Sensorem w takim skanerze jest linijka czułych detektorów CCD umiejscowionych w płaszczyźnie tłowej obiektywu i zorientowana prostopadle do kierunku lotu. Obraz tworzy się w sposób ciągły, w miarę ruchu postępowego samolotu (czy satelity).



Rys. 4. Obraz ze skanera elektrooptycznego przed i po korekcji geometrycznej (widoczna na obrazie zrektyfikowanym korekcja pochylenia „omega”) [Fricker, 1999]

Z punktu widzenia potrzeb pomiarowych szczególnie interesujące i perspektywiczne są skanery z trzema linijkami detektorów, obrazującymi ten sam pas terenu: jedna obrazuje „do przodu”, druga „nadirowo”, a trzecia „wstecz”. W rezultacie jednego lotu otrzymuje się trzy obrazy stereoskopowe o dobrej wyznaczalności wysokości (rys. 3). O zdolności rozdzielczej obrazów decyduje liczba czułych elementów – pikseli – w linijce CCD. Dostępne są linijki liczące 12 000 elementów, w zasięgu możliwości jest podwojenie tej liczby. Pod tym względem obraz taki zbliżył się do rozdzielczości klasycznego zdjęcia lotniczego.

Obraz skanerowy tworzy się w sposób ciągły w miarę ruchu samolotu. Geometria obrazu jest inna niż zdjęcia fotogrametrycznego i dodatkowo obciążona zniekształceniami spowodowanymi niestabilnym ruchem samolotu (ciągła zmiana położenia i orientacji katowej – rys. 4). W przypadku obrazowania satelitarnego ten problem nie występuje tak drastycznie ze względu na bardzo stabilny ruch satelity. W przypadku obrazowania z pułapu lotniczego należałoby – z dużą częstotliwością – precyzyjnie rejestrować elementy orientacji zewnętrznej każdej linii obrazowej, tj. trajektorię lotu (X, Y, Z) i kąty nachylenia (ω , ϕ , κ). Brak – do niedawna – takich możliwości, szczególnie rejestracji kątów nachylenia, stanowił przeszkodę w upowszechnieniu tego rozwiązania.

Drugą przeszkodę stanowi możliwa do osiągnięcia prędkość odczytu i zapisu sygnałów z czułych elementów linijki detektorów. Ten czas limituje możliwą do uzyskania rozdzielczość

Producent	Model	Wymiary tablicy [piksele]	Wymiary piksela [μm]	Częstotliwość odczytu [MHz]
Kodak	DCS-460	3 072 x 2 048	9	10
Lockheed Martin	BigShoot™	4 096 x 4 096	15	5
Kodak	Megaplus 16.8i	4 096 x 4 096	9	10
Philips	Icam28	7 168 x 7 168	12	18
Dalsa	CA-260/50	10 080 x 5 040	10	48/64
Lockheed Martin	F-979F	9 216 x 9 216	8,75	160

Dostępne tablice CCD wysokiej rozdzielczości

obrazu, której miarą jest terenowy wymiar piksela. Mówiąc inaczej: samolot musi lecieć na tyle wolno i na tyle wysoko (większy wymiar piksela), aby nadażyć z zapisem danych. Problemy związane ze stabilnością geometryczną obrazu są nieobecne w przypadku drugiej koncepcji: kamery z prostokątną matrycą sensorów CCD. Jest to – z geometrycznego punktu widzenia – cyfrowy odpowiednik kamery fotograficznej. W tym rozwiązaniu występuje za to inna trudność: rozmiar tablicy CCD. Matryca ekwiwalentna (pod względem rozdzielczości) kamery lotniczej musiałaby zawierać około 500 mln elementów (23 000 x 23 000!). Nic nie zapowiada pojawienia się takich sensorów w najbliższym czasie. Matrycę CCD produkuje się na „plastrze” półprzewodnika. Do niedawna bazowano na technologii „4-calowej” (średnica plastra), co pozwalało na produkcję tablic kwadratowych o wymiarach 60x60 mm (4000 x 4000 pikseli przy wymiarach piksela 15 μm). Obecnie dostępna technologia „5-calowa” pozwala produkować tablice o wymiarach 80 x 80 mm (9000 x 9000 pikseli przy wymiarach piksela 8,75 μm). Technologia „6-calowa” jest w fazie eksperymentów.

geobud

ZAKŁAD USŁUGOWO
PROJEKTOWY
GEOBUD SP. Z O.O.
41-709 RUDA ŚLĄSKA
UL. CZARNOLEŚNA 16
TEL. (032) 248 65 34
(032) 248 78 71
(032) 244 36 61

**TRADYCJA 10 LAT
DOBRA JAKOŚĆ
DOBRA CENA
RABATY HURTOWE**

TACHIMETRY ELEKTRONICZNE
NIWELATORY OPTYCZNE I LASEROWE
RADIOTELEFONY ALINCO
OPRZYRZĄDOWANIE FIRMY RICHTER I NEDO

W tej technologii zbudowano tablice CCD o rozdzielczości 10 000 x 5000. Tabela na poprzedniej stronie pokazuje parametry istniejących tablic CCD wysokiej rozdzielczości [Toth, 1999]. W przypadku kamer z tablicami CCD aktualne pozostają ograniczenia związane z prędkością odczytu i zapisu sygnałów z sensorów.

Integracja danych GPS/INS. Geokodowanie wprost

Przeszkodą pomiarowego wykorzystania lotniczych obrazów skanerowych jest trudność dokładnej rejestracji trajektorii lotu i kątów nachylenia skanera. Rozwiązaniem jest zintegrowanie dwóch systemów: GPS i INS (Inertial Navigation System). System GPS pozwala rejestrować trajektorię lotu (X, Y, Z) z dokładnością nie gorszą niż 10 cm. Inercjalny system nawigacyjny INS mierzy przyspieszenia wzdłuż trzech osi oraz zmiany kątowych pochyłości kamery. Ciągłe integrowanie (sumowanie) tych pomiarów w czasie pozwala wyznaczyć bardzo dokładnie trajektorię lotu samolotu (z błędem rzędu 2 cm) i kąty pochylenia. Wadą systemów INS jest dryft, powodujący spadek dokładności pomiaru pozycji i kątów nachylenia z upływem czasu. Ten błąd systematyczny może być korygowany z danych GPS, zachowujących wysoką i stabilną w czasie dokładność. Z kolei dane INS są wykorzystywane do interpolacji pozycji podczas możliwych krótkich przerw w łączności z satelitami GPS (np. „przesłonięcie” satelity skrzydłem samolotu podczas manewru nawrotu).

Systemy GPS i INS charakteryzują się więc różną i komplementarną propagacją błędów. Ich integracja jest realizowana w procesie obróbki zarejestrowanych danych z wykorzystaniem filtrowania Kalmana. Pozwala to wykorzystać zalety obu systemów. Stosowane w fotogrametrii systemy bazują na dostępnych na rynku systemach GPS i średniej klasy systemach INS (odgrywa tu rolę cena: koszt zakupu systemu INS niskiej klasy jest rzędu 10 tys. USD, średniej klasy – 100 tys. USD, a wysokiej klasy – 1 mln USD). Liczne opracowania testowe wskazują, że zintegrowanie systemów GPS/INS pozwala obecnie z dużą częstotliwością (rzędu 50-250 Hz) rejestrować położenie z dokładnością lepszą niż 10 cm i kąty orientacji z dokładnością 10-30", tj. 0,003-0,008°. (Niektórzy autorzy, cytując wyniki eksperymentalnych opracowań, podają nawet wyższe dokładności: błędy kątowe poniżej 10"). Taka precyzja jest zbliżona do dokładności wyznaczenia elementów orientacji zewnętrznej zdjęć fotogrametrycznych określanych w procesie aerotriangulacji blokowej. Jest to więc dokładność wystarczająca dla potrzeb lotniczych kamer cyfrowych z linijką detektorów.

Zagadnienie integracji GPS/INS ma dla fotogrametrii szersze znaczenie niż tylko wynikające z potrzeb kamer cyfrowych. Systemy takie są sprzężane również z tradycyjnymi kamerami fotogrametrycznymi, skanerami laserowymi czy innymi platformami [Kurczyński, 1999]. Skoro jest możliwe wyznaczenie w locie (z wystarczającą dokładnością) wszystkich elementów orientacji zewnętrznej zdjęć (liniowych i kątowych), to można pomiar fotogrametryczny (tj. wyznaczenie położenia X, Y, Z punktów podlegających opracowaniu, od fotografowanych na zdjęciach) sprowadzić do bezpośredniego „przestrzennego wcięcia w przód” ze znanych elementów orientacji. Jest to realizacja tzw. geokodowania wprost (ang. *direct geocoding*, *direct georeferencing*). Oznacza to wyeliminowanie osnowy polowej i procesu aerotriangulacji. Trwają intensywne, również międzynarodowe, eksperymenty dla określenia zakresu użyteczności tego rozwiązania. Uzyskane

wyniki pokazują, że taka możliwość została osiągnięta, a utrzymywanie technologii aerotriangulacji jest na obecnym etapie nadal pożądane bardziej dla zabezpieczenia niezawodności całego procesu niż dla zwiększenia dokładności. Dalsza dyskusja uwarunkowań technologicznych tego procesu wykracza poza przyjęte ramy niniejszej publikacji.

Prototypy lotniczych kamer cyfrowych

Konstrukcja LH i DLR. Współpraca Leica Helava Systems i Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Niemieckie Centrum Kosmiczne) zaowocowała zbudowaniem prototypu lotniczej kamery cyfrowej. Kamera ta bazuje na doświadczeniach kamery WAOSS (optyczna, szerokokątna kamera stereoskopowa) budowanej dla misji Mars-96, kamery WAAC (szerokokątna kamera lotnicza) i HRSC (kamera stereoskopowa wysokiej rozdzielczości). Kamery te oparte są na koncepcji skanera elektrooptycznego z 3 linijkami detektorów. Dane techniczne [Fricker i inni, 1999]:

Koncepcja	3 linijki CCD, stereo, panchro
Liczba pikseli w linii	12 000
Wymiar piksela	6,5 µm
Zakres dynamiczny	12 bitów
Rozdzielczość radiometryczna	8 bitów
Pole widzenia	52°
Ogniskowa	80 mm
Zasięg z wys. 3100 m	pas o szer. 3000 m, piksel 0,25 m
Kąty wcięć stereo	17°, 25°, 37°
Czas odczytu linii	1,2 ms
Zawieszenie	PAV 30 (stabilizowane)

Zapowiada się zaprezentowanie modelu produkcyjnego w przyszłym roku na Kongresie ISPRS w Amsterdamzie. Model produkcyjny będzie oparty na linijce złożonej z 20 tys. elementów i możliwości rejestracji w kilku kanałach spektralnych.

Kamera HRSC-A. Lotnicza kamera stereo wysokiej rozdzielczości HRSC-A (skonstruowana w DLR z udziałem Politechniki Berlińskiej) powstała na bazie kamery HRSC zbudowanej dla misji Mars-96 i będzie wykorzystana w europejskiej misji na Marsa w 2003 r. Dane techniczne [Neukum, 1999]:

Ogniskowa	175 mm
Pole widzenia	38° x 12°
Liczba linii CCD	9 (kolor: 4, stereo: 5)
Liczba pikseli w linii	5 184
Wymiary pikseli	7 µm
Rozdzielczość radiometryczna	10 bitów zredukowana do 8 bitów
Częstotliwość skanowania	maks. 450 linii/s
Kąty wcięć stereo	±18,9°, ±12,8°
Orientacja	GPS/INS
Zawieszenie	T-AS (stabilizowane)

Testy trwają od 1997 r. We współpracy z firmą ISTAR (znana z pomiarowych opracowań obrazów SPOT) zrealizowano projekty produkcyjne na znaczącą skalę, głównie budowę DTM dla potrzeb telekomunikacji i ortofotomapy dla miast. Doświadczenia z 1999 r. i plany produkcyjne na 2000 r. jednoznacznie wskazują, że kamera z fazy eksperymentów weszła w fazę operacyjną.

Kamery IGN. Institut Geographique National – Francja ma bogate doświadczenia z wykorzystaniem kamer cyfrowych bazujących na tablicy sensorów CCD. Dane techniczne obecnie używanych prototypów [Thom, 1999]:

Parametr	Kolor	Cz.-b.
Tablica CCD	KODAK	
Wymiar piksela	9 μ m	
Wymiar tablicy	3072 x 2048	4096 x 4096
Zakres dynamiczny	2 000	3 000
Optyka	30 mm, 40 mm, 50 mm, 80 mm	
Min. interwał fot.	1,4 s	3,8 s
Min. wymiary terenowe piksela (dla p=60%, V=80 m/s)	15 cm	20 cm
Kompensacja rozmazania (FMC)	tak, elektroniczna dokładność: 1 piksel	tak, elektroniczna dokładność: 1/2 piksela
Liczba prototypów	2	2

W 1999 r. wykonano około 20 tys. obrazów. Wykorzystuje się je do realizacji bazy danych topograficznych BDTPOPO®, produkcji kolorowych ortofotomap i zastosowań teledetekcyjnych. Skala wykorzystania kamer wskazuje, że z etapu badawczego nastąpiło przejście do etapu produkcyjnego. Dalszy rozwój widzi się w wykorzystaniu nowych sensorów KODAK oraz zbudowaniu kamery wieloobiektywowej dla zwiększenia szerokości obrazowanego pasa.

Kamera Z/I Imaging. Nowa firma Z/I Imaging, powstała z połączenia wydziału fotogrametrycznego Carl Zeiss i firmy Intergraph, jako priorytetowe zadanie stawia sobie zbu-

downie komercyjnej kamery cyfrowej. Jest to koncepcja bazująca na dostępnych tablicach sensorów CCD [Hinz, 1999]. Dla zwiększenia rozdzielczości i pola widzenia przyjmuje się, że będzie to kamera wieloobiektywowa o konstrukcji modułowej. Na przykład kamera 7-modułowa składałaby się z 4 kamer panchromatycznych oraz 3 kamer pozwalających rejestrować w kolorze. 4 kamery panchromatyczne dawałyby obrazy z minimalnym wzajemnym pokryciem. W procesie obróbki wstępnej z tych czterech obrazów generowany będzie jeden ekwiwalentny obraz (rys. 5). Kiedy pojawią się tablice CCD o znacznie większej rozdzielczości, kilka modułów kamer panchromatycznych będzie zastąpionych jedną kamerą. Nie są znane bliższe dane techniczne.

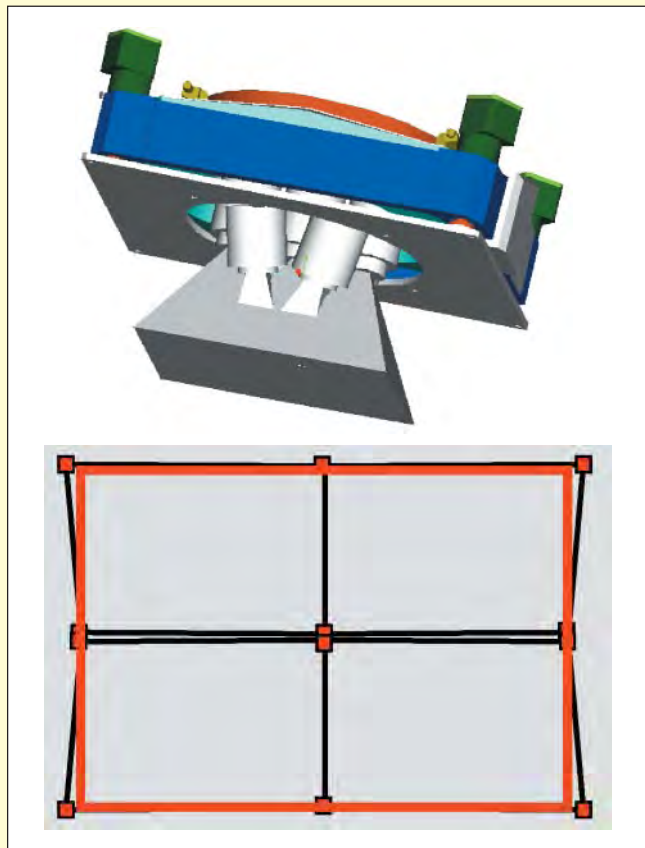
Wnioski

Jesteśmy świadkami wzrostu rynku GIS. Nastąpią zmiany w strukturze podziału tego rynku. Zapowiada się silna konkurencja między obrazami satelitarnymi o „retrowej” rozdzielczości a danymi pozyskiwanymi z pułapu lotniczego. Zapotrzebowanie na obrazy o wyższej rozdzielczości (piksel poniżej 1 m) będzie pokrywane przez tradycyjne kamery fotogrametryczne i lotnicze kamery cyfrowe. Te ostatnie wychodzą z fazy eksperymentalnej i przechodzą w fazę operacyjną. Już w przyszłym roku można się spodziewać wypuszczenia na rynek pierwszych egzemplarzy komercyjnych. Nie należy jednak przewidywać szybkiego zastąpienia kamery tradycyjnej przez kamery cyfrowe. W dającej się przewidzieć perspektywie (najbliższe 5-10 lat) obie drogi będą koegzystować z właściwymi sobie zakresami użyteczności, z ewolucyjnym przechodzeniem na cyfrowe kamery bazujące na tablicach CCD.

Dr Zdzisław Kurczyński jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym w Instytucie Fotogrametrii i Kartografii Politechniki Warszawskiej. W latach 1995-98 w ramach programu PHARE sprawował merytoryczny nadzór nad wykonaniem zdjęć lotniczych dla obszaru Polski. Obecnie jest indywidualnym konsultantem Banku Światowego do realizacji zadania „Numeryczne modele rzeźby terenu oraz numeryczne mapy topograficzne”.

Literatura:

- Fricker P., Sandau R., Walker A. S. (1999), *Digital Photogrammetric cameras: possibilities and problems*, Photogrammetric Week '99.
- Heier H. (1999), *Application and market for digital airborne cameras*, Photogrammetric Week '99.
- Hinz A. (1999), *The Z/I Imaging Digital Aerial Camera System*, Photogrammetric Week '99.
- Kaczyński R., Sujkowska W. (1997), *Nowa generacja zobrażeń satelitarnych*, GEODETA nr 4 (23) kwiecień 1997.
- Kurczyński Z. (1997), *Zdjęcia lotnicze i zobrażenia satelitarne – stan obecny i perspektywy*, GEODETA nr 7 (26) lipiec 1997 i nr 8 (27) sierpień 1997.
- Kurczyński Z. (1999), *Lotniczy skaner laserowy – nowa technologia pozyskiwania danych o rzeźbie terenu*, GEODETA nr 2 (45) luty 1999.
- Neukum G. (1999), *The Airborne HRSC-A: Performance Results and Application Potential*, Photogrammetric Week '99.
- Spiller R. (1999), *Z/I Imaging: A New System Provider for Photogrammetry and GIS*, Photogrammetric Week '99.
- Thom C., Souchon J. P. (1999), *The IGN digital camera system in progress*, Photogrammetric Week '99.
- Toth C. (1999), *Experiences with frame CCD arrays and direct georeferencing*, Photogrammetric Week '99.



Rys. 5. Kamera wielomodułowa. Pokrycie terenowe modułów panchromatycznych i zasięg obrazu ekwiwalentnego [Hinz, 1999]