

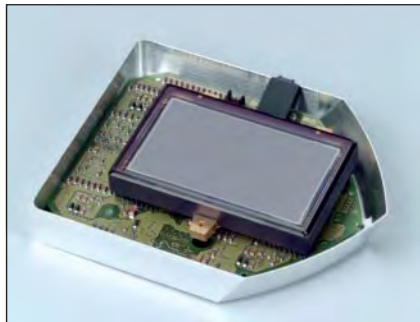
Cyfrowa kamera fotogrametryczna DMC

Widać jak na dłoni

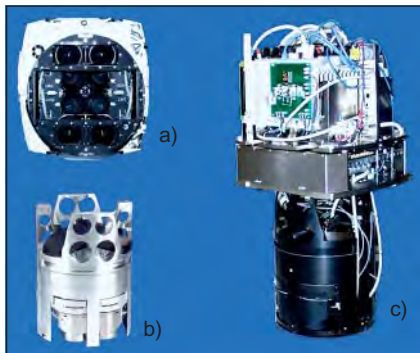
TOMASZ BEREZOWSKI

Idea lotniczej kamery cyfrowej nie jest skomplikowana, w przeciwieństwie do... jej realizacji. Jak osiągnąć rozdzielczość porównywalną z kamerami tradycyjnymi? Gdzie gromadzić zarejestrowane dane? Jak przesyłać je z sensora do nośnika? Te trzy podstawowe pytania czynią z konstrukcji kamery cyfrowej niezwykle wyzwanie.

Działanie kamery cyfrowej opiera się na wykorzystaniu elektronicznych elementów światłoczułych, czyli takich, które mają zdolność przetwarzania światła w uporządkowane impulsy elektryczne. Najpopularniejszym elementem tego typu jest CCD (*charge-coupled device*). CCD występuje w formie linijek bądź



Rys. 1. Sensor o wymiarach 8,4 x 4,8 cm



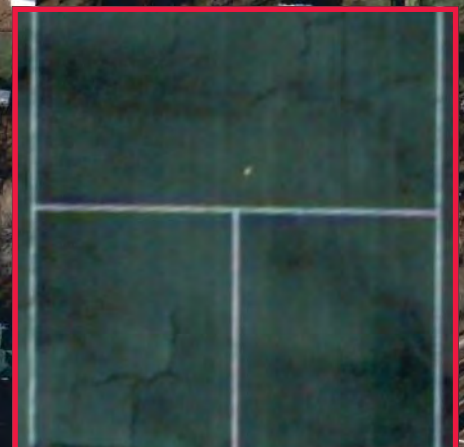
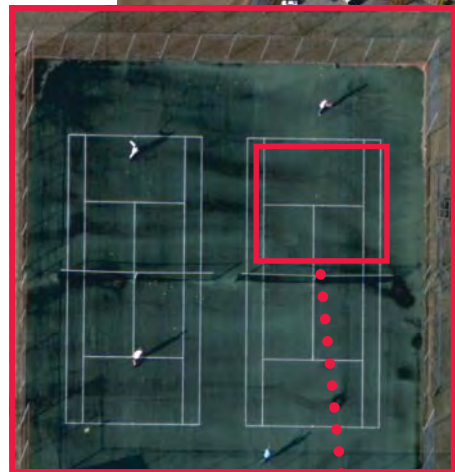
Rys. 2. a) widok kamery od dołu – 8 obiektywów; b) i c) wnętrze kamery

prostokątnych matryc (rys. 1). Linijki są wykorzystywane do tworzenia obrazu poprzez skanowanie, tzn. rejestrację obrazu linia po linii. Matryca natomiast rejestruje cały obraz w jednym krótkim ujęciu. Wśród dostępnych fotogrametrycznych kamer cyfrowych istnieją przykłady wykorzystania obu technik.

● Rozdzielczość

Zdolność rozdzielcza i precyzja geometryczna to podstawowe cechy kamery fotogrametrycznej. Obecnie łatwo dostępne są linijki sensorów CCD zapewniające wystarczającą rozdzielczość, niemniej z ich wykorzystaniem wiąże się wiele niedogodności. W kamerze o takiej konstrukcji obraz powstaje linia po linii, zgodnie z ruchem postępowym samolotu, co skutkuje inną orientacją zewnętrzną każdej linijki obrazu. Takie zobrazowanie ma geometrię odmienną od tradycyjnych zdjęć i jego opracowanie wymaga zastosowania nowego oprogramowania fotogrametrycznego. Dla firmy fotolotniczej może to oznaczać utratę klientów, którzy zainwestowali poważne środki w cyfrowe linie produkcyjne, szkolenia kadry i posiadają duże doświadczenie w obecnej technologii.

Te przesłanki skłoniły inżynierów firmy Z/I Imaging do wybrania konstrukcji



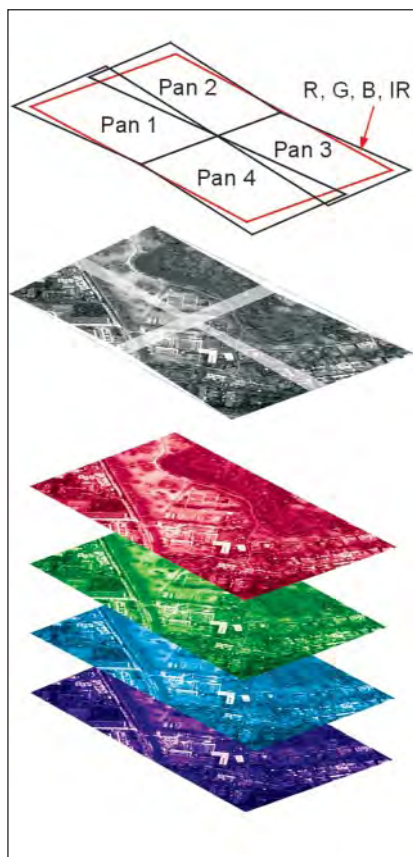


Kolejne obrazy uzyskane w wyniku powiększania zdjęcia wykonanego z wysokości 2400 m, skala 1:4000 (biały obiekt na rysunku dolnym to piłka tenisowa)

opartej na matrycy CCD. Największą trudnością w budowie takiej kamery są ograniczone rozmiary dostępnych elementów CCD. W Digital Mapping Camera – DMC (rys. 2) zastosowano aż osiem niezależnych matryc. Każda z nich umieszczona jest w oddzielnej głowicy składającej się z obiektywu dostosowanego do obrazowanego pasma, przysłony i migawki. Cztery wysokorozdzielcze matryce rejestrują kolejne ćwiartki finalnego zobrazowania, pozostałe cztery – odpowiednio kanały: czerwony, zielony, niebieski i podczerwony (rys. 3). Złożenie obrazów odbywa się w sposób całkowicie zautomatyzowany w tzw. postprocessingu. Ostateczny obraz ma wymiary 13 824 x 7680 pikseli i geometrię identyczną ze zdjęciami tradycyjnymi.

W przypadku kamer tradycyjnych układ tłowy zmaterializowany jest w postaci znaczków tłowych, ich geometryczna stabilność gwarantuje poprawność opracowania. W kamerze cyfrowej układ tłowy realizują same elementy światłoczułe zamontowane na stałe w hermetycznych głowicach. Oznacza to, że położenie każdego elementu obrazu jest znane i stałe, a zatem nie jest konieczny proces wyznaczania orientacji wewnętrznej w tradycyjnym tego słowa znaczeniu.

Dodatkowym mechanizmem podnoszącym jakość obrazu jest technika kompensacji rozmycia (FMC). Technika ta nie wymaga żadnych ruchomych części i opiera się na trybie pracy sensora CCD zwanym TDI (*Time Delayed Integration*) – rys. 4. Rezultaty tak realizowanej kom-



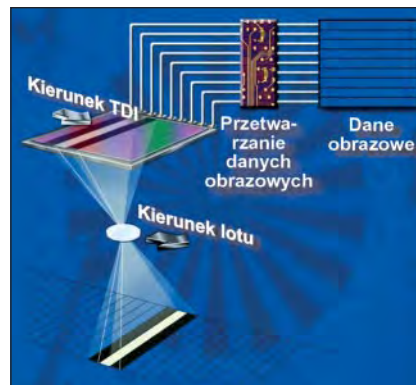
Rys. 3. Obraz finalny tworzą 4 zmontowane zdjęcia panchromatyczne oraz R, G, B, IR

pensacji są niezawodne, a wartości możliwego do skompensowania stosunku prędkości do wysokości (V/H) – znacznie wyższe niż w przypadku rozwiązań mechanicznych. Ten typ kompensacji nie może być zastosowany w przypadku linii CCD.

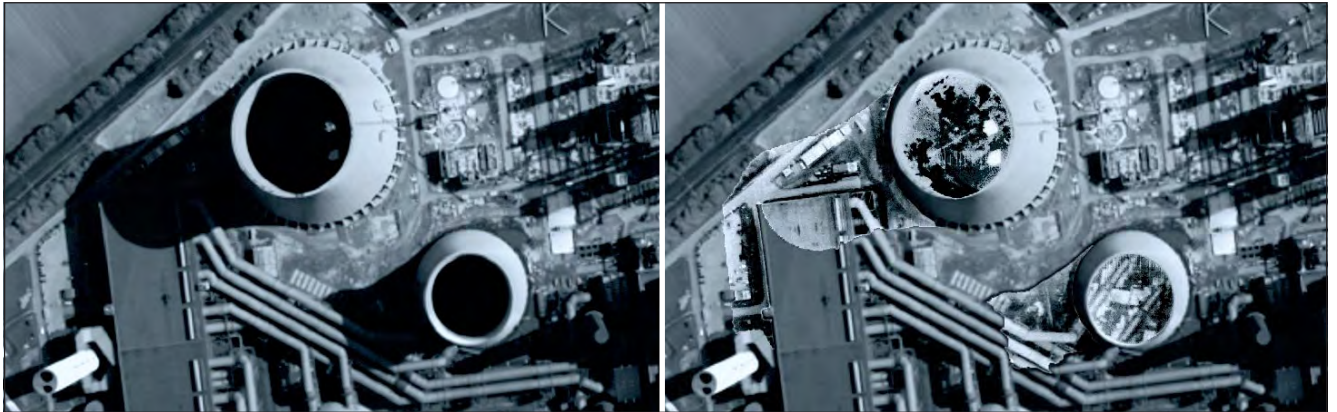
Ostatnim czynnikiem istotnym z punktu widzenia rozdzielczości obrazu jest kształt śladu piksela na powierzchni Ziemi. Obraz zapisywany w postaci elektronicznej jest zawsze podzielony na kwadratowe (względnie prostokątne) elementy i taki też jest ślad piksela kamery DMC. Po-

Dane techniczne DMC

| | |
|---|--|
| Konfiguracja głowic | 4 x panchromatyczna 1 x kanał czerwony 1 x kanał zielony 1 x kanał niebieski 1 x kanał podczerwony |
| Pole widzenia | 69,3° (w poprzek kierunku lotu) x 42° (w kierunku lotu) |
| Rozdzielczość | |
| finalnego zobrazowania | 7680 x 13 824 piksele |
| głowicy panchromatycznej | 7000 x 4000 pikseli |
| głowicy spektralnej | 3000 x 2000 pikseli |
| Obiektyw | |
| głowicy panchromatycznej | 4 x f = 120 mm/1:4,0 |
| głowicy spektralnej | 4 x f = 25 mm/1:4,0 |
| Migawka | 1/50-1/300 płynna regulacja |
| Rozdzielczość radiometryczna | 12 bitów |
| Pojemność pokładowych nośników pamięci | 840 GB (>2000 klatek) |
| Cykl kamery | 2 s |
| Waga kamery | ok. 80 kg |
| Waga z osprzętem | ok. 115 kg |



Rys. 4. Zasada kompensacji rozmycia obrazu



Rys. 5. Większa czułość to lepsze obrazowanie kontrastowych obiektów – równie czytelne są obszary zacienione i nasłonecznione

zwala to uniknąć efektu interpolacji właściwego eliptycznym pikselom systemów opartych na linijce CCD, aco za tym idzie – osiągać dokładności pomiarów znacznie poniżej samego wymiaru piksela.

● Radiometria

Głębina barw na tradycyjnym filmie fotograficznym to mniej niż 8 bitów na kanał; sensor CCD ma znacznie większą czułość, rejestruje dla każdego kanału aż 12 bitów. Większa czułość to lepsze obrazowanie kontrastowych obiektów, równie czytelne są obszary głęboko zacienione i silnie nasłonecznione (rys. 5). Brak kontaktu głowic z otoczeniem zewnętrznym zapewnia całkowite uwolnienie zdjęć od zanieczyszczeń i kurzu. Ponieważ obraz powstaje zawsze za pomocą tych samych skalibrowanych elementów światłoczułych, bez dodatkowego procesu wywoływania, odwzorowanie barw jest znacznie bardziej powtarzalne. Jest to znaczący postęp, zwłaszcza w przypadku obrazowania w podczerwieni, którego standaryzacja nastęrczała wielkich trudności.

Wszystkie te cechy powodują, że zdjęcia mają doskonałe walory interpretacyjne. Zwiększa się również powodzenie automatycznych procesów pomiarowych. Przypadkowe zanieczyszczenia nie utrudniają pomiarów, głębina barw pozwala na korelację w zacienionych podwórkach i leśnych polankach, powtarzalne odwzorowanie barw ułatwia wiązanie bloków z różnych misji. Połączenie głębi barw

z efektywną kompensacją rozmazania pozwala na wykonywanie zdjęć w gorszych warunkach oświetleniowych.

● Rejestracja i przechowywanie danych

Jedno „ujęcie” (R, G, B, IR, pan) wykonane kamerą DMC ma rozmiar około 200 MB i aby zagwarantować odpowiednie pokrycie stereoskopowe, należało zapewnić transfer rzędu 130 MB/s. Takie wyniki osiągnięto dzięki zastosowaniu trzech równoległych łącz optycznych (światłowodowych) i superszybkich dysków. Pogrupowane dyski instalowane są w wymiennych szufladach – MDR (*Mission Data Recorder*). Jednocześnie do kamery mogą być podłączone dwa urządzenia MDR, które w sumie mieszczą 2200 ujęć (co odpowiada 1250 klasycznym zdjęciom). Operator kamery ma na bieżąco podgląd wykonanych ujęć, dzięki czemu natychmiast może podjąć decyzję o powtórnym nalocie. Wypełnione rejestratory trafiają do naziemnej stacji przetwarzania.

● Droga do produktu finalnego

W kamerze DMC nowy wymiar zyskało pojęcie kalibracji. W trakcie tego procesu wyznaczane są nie tylko kalibrowane odległości ogniskowe, ale również wzajemne położenie głowic i właściwości radiometryczne poszczególnych sensorów. Ze-

staw parametrów dostarczany jest klientowi wraz z kamerą. Na podstawie tych danych naziemna stacja przetwarzania wykonuje korekcję radiometryczną, w tym normalizację ze względu na właściwości elementu CCD i różnicę temperatur (w trakcie kalibracji i misji), a także usunięcie „martwych” pikseli. Następnie wykonywana jest korekcja geometryczna, polegająca na przetworzeniu poszczególnych składników obrazu do wirtualnej płaszczyzny tłowej. Parametry transformacji wyznaczane są na podstawie metryki kamery skorygowanej o wyniki automatycznego pomiaru punktów łącznych. Po tej operacji następuje mozaikowanie i – w zależności od potrzeb – fuzja kanałów. Tak przetworzone zdjęcie ma geometrię identyczną z geometrią zdjęć tradycyjnych i może być wykorzystywane przez dowolne oprogramowanie fotogrametryczne.

Już na pierwszy rzut oka w produkcji finalnym uderza naturalne odwzorowanie barw, brak efektu winietowania oraz wysoka rozdzielczość. To wrażenie potwierdzają wyniki pomiarów (patrz tabela).

● Dlaczego cyfrowe lepsze?

Zalety kamer cyfrowych są oczywiste: nie jest potrzebny film, a co za tym idzie, jego wywołanie i skanowanie. Niższe są koszty operacyjne (podgląd ujęć w trakcie misji), a równocześnie znacznie szybsze rezultaty. Więcej jest lotnych dni (12 bitów, TDI), wyższa jakość radiometryczna (12 bitów, TDI, prostokątny piksel) i geometryczna (elementy światłoczułe wbudowane na stałe, TDI). Znajdują one także nowe zastosowania (jednoczesne obrazowanie w czterech kanałach). Obecnie już dwie kamery DMC zostały dostarczone klientom i przeszły testy akceptacyjne. Następne zlecenia czekają na realizację. Firma Z/I Imaging obecnie ocenia swoją zdolność produkcyjną na około siedem egzemplarzy rocznie. ■

Wyniki testów pomiarowych DMC

| Nazwa bloku | Liczba zdjęć | Skala | Liczba fotopunktów | s_0 [mm] | RMS x; y; z [cm] |
|-------------|--------------|----------|--------------------|------------|------------------|
| EL4 | 30 | 1:4000 | 8 | 1,7 | 1,2; 1,4; 1,8 |
| EL5 | 88 | 1:5000 | 34 | 1,9 | 2,3; 2,5; 3,4 |
| EL10 | 40 | 1:10 000 | 33 | 1,6 | 3,1; 2,1; 4,3 |
| EL15 | 13 | 1:15 000 | 35 | 1,4 | 4,1; 3,6; 2,9 |