

Piotr Sawicki*

WSPÓŁCZESNE CYFROWE SENSORY WIZYJNE W FOTOGRAMETRII BLISKIEGO ZASIĘGU

1. Wprowadzenie

W fotogrametrii bliskiego zasięgu bezpośrednia akwizycja obrazów za pomocą optyczno-elektronicznych systemów stała się w ostatnich kilkunastu latach powszechną techniką rejestracji. Optyczne sensory cyfrowe są podstawowym komponentem hardware'u fotogrametrycznych systemów typu on-line i off-line do pomiarów punktowych lub rekonstrukcji powierzchni ciągłej obiektu [12]. W nowoczesnych fotogrametrycznych systemach pomiarowych zastosowane techniki przetwarzania obrazów, numeryczne algorytmy pomiaru i obliczeń osiągnęły bardzo wysoki poziom dokładności oraz niezawodności, dlatego w najbliższej przyszłości decydujący wpływ na jakość tych systemów będą miały parametry zastosowanych wizyjnych sensorów cyfrowych.

Współczesne systemy cyfrowej rejestracji stosowane w fotogrametrii bliskiego zasięgu są ściśle związane z rozwojem elektronicznych technologii zastosowanych do budowy cyfrowych sensorów *solid state* typu CCD/CMOS. Sensory wizyjne oparte na technologii CCD (*Charge Coupled Device*), którą stworzono na początku lat 70. ubiegłego stulecia, występują w różnej architekturze i w swym rozwoju osiągnęły wysoką rozdzielczość oraz jakość sygnału. Wynikiem rozwoju technologii CCD/CMOS jest wzrastająca rozdzielczość, format sensorów oraz jakość radiometryczna obrazów. Jednak w ostatnich kilku latach coraz większe znaczenie zyskuje technologia CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*), która ewoluuje w kierunku architektury sensora typu SOC (*System on Chip*). Sensory w technologii CMOS są stosowane coraz częściej, szczególnie w cyfrowych profesjonalnych aparatach fotograficznych.

* Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Katedra Fotogrametrii i Teledetekcji

Klasyfikacja sensorów wizyjnych stosowanych w rejestracji fotogrametrycznej jest trudna ze względu na różnorodność występujących konstrukcji i rozwiązań. Jako jedno z możliwych kryteriów klasyfikacji autor przyjął tryb generowania sygnału cyfrowego.

Cyfrowe sensory obrazowe można podzielić według tego kryterium na następujące dwa główne typy:

- 1) kamery wideo CCD (na wyjściu sygnał analogowy);
- 2) kamery cyfrowe (na wyjściu sygnał cyfrowy):
 - cyfrowe kamery pomiarowe,
 - aparaty cyfrowe *still video*,
 - cyfrowe kamery skanujące,
 - szybkie kamery cyfrowe.

Praca zawiera, według stanu wiedzy przypadającej na połowę 2006 r., omówienie podstawowych parametrów budowy i działania współczesnych cyfrowych sensorów wizyjnych oraz analizę ich potencjału pomiarowego w aplikacjach bliskiego zasięgu.

2. Sensory CCD *versus* CMOS

Przetworniki CCD/CMOS (*solid state sensors*) działają na zasadzie zjawiska fotoelektrycznego. Światło składające się z fotonów, padając na materiał półprzewodnikowy matrycy, wybija elektrony (zawierają informację o natężeniu światła) i przenosi je z pasma podstawowego do pasma przewodzenia. Proporcjonalnie do absorpcji padającego światła wytworzony jest ładunek elektryczny, który zostaje odczytany i zdigitalizowany.

Podczas generowania cyfrowego obrazu barwnego detektor światła CCD/CMOS zapisuje obraz przechodzący przez zestaw kolorowych filtrów RGB Bayera (najczęściej stosowana metoda), w którym 50% informacji przenosi kanał G, natomiast po 25% kanały R i B. Każdy fotodetektor może rejestrować inną składową światła. Informacja o dwóch pozostałych składowych jest interpolowana na podstawie danych z kilku sąsiednich pikseli.

Sensory CCD i CMOS różnią się w zasadniczy sposób budową i zasadami działania. Przetworniki CCD posiadają światłoczułe detektory (fotodiody), które uporządkowane są w postaci linijki lub matrycy pikseli. Elementy detektora matrycy CCD są zbudowane z kondensatorów typu MOS (*Metal Oxide Semiconductor*). W sensorze CCD odczyt wykonywany jest całymi wierszami lub kolumnami, a pomiar usuwa zarejestrowane wartości. Przetworniki CCD nie mają własnej elektroniki sterującej.

Ze względu na budowę i sposób dwuwymiarowej transmisji ładunków sensory CCD dzielą się na następujące typy:

- *Frame Transfer*,
- *Full-Frame Transfer*,
- *Interline Transfer*.

Zgromadzone ładunki przesuwane są sekwencyjnie do kolejnych rejestrów odczytu, co wyraźnie wydłuża czas transportu. Powstaje w ten sposób ciągły sygnał analogowy, który zostaje wzmacniony i zdigitalizowany w przetworniku A/D. Transport ładunków

może powodować dodatkowe zakłócenia i utratę pierwotnej informacji. Kolejnym problemem jest zjawisko rozmazania obrazu typu blooming, związane z nadmiarem fotonów (tzw. przeświecenie pikseli). Stosunkowo prosta budowa matrycy typu FFT umożliwia konstruowanie wysokorozdzielczych sensorów, ponad $10K \times 10K$, z małym pikselem ($6\div 9 \mu m$), co ma szczególnie duże znaczenie dla dokładności opracowań fotogrametrycznych.

Sensory z transferem IL są stosunkowo mniej czułe na światło. W standardowej rozdzielczości $0,75K \times 0,58K$ są produkowane jako kamery wideo CCD i kolorowe kamery telewizyjne. Max rozdzielczość przetwornika typu IL wynosi *ca* $1,9K \times 1K$.

Sensory z linią CCD posiadają nawet ponad 10K pikseli i znajdują zastosowanie w specjalnych typach kamerach cyfrowych oraz skanerach. W typowej fotogrametrycznej rejestracji stosowane są wyłącznie matrycowe przetworniki CCD, które mają bardziej skomplikowaną budowę.

W sensorze CMOS każdy element matrycy wyposażony jest we wzmacniacz i rejestr odczytu. Wytworzony przez fotony ładunek steruje przepływem prądu przez zespół tranzystorów (wzmacniaczy) podłączonych i zintegrowanych z fotodetekтором. Nie następuje sekwencyjny transport ładunków, dzięki czemu ten typ przetwornika jest mniej podatny na wpływ szumów i zakłóceń rodzaju *blooming*. Układy CMOS tworzą niezależną macierz, z której odczytywane są wartości natężenia z dowolnej fotodiody (piksela). Pomiar może być przeprowadzony wielokrotnie, bez utraty zarejestrowanej informacji. Architektura CMOS pozwala na sterowanie, odczyt i przetwarzanie sygnału na poziomie pojedynczego piksela (*camera on the chip*). Ten sposób działania umożliwia korekcję pikseli w wybranych fragmentach obrazu (*area of interest*). Przetworniki CMOS umożliwiają ich integrację z dowolnym elementem półprzewodnikowym, służącym do przetwarzania obrazów, sterowania sensorem lub pamięcią RAM.

Matryce CMOS wytwarzają obraz gorszej jakości w słabych warunkach oświetleniowych (są bardziej czułe na natężenie światła). Przy dłuższych czasach ekspozycji generują lepszy obraz, mniej zakłócony szumami – są sprawniejsze przy małych natężeniach światła.

Sensory wykonane w technologii CMOS charakteryzują następujące różnice w stosunku do sensorów CCD:

- działają szybciej, ze względu na szybszy transfer informacji obrazowych;
- mają mniejsze napięcie zasilające matrycę, niższą temperaturę pracy, mniejsze zużycie energii rzędu $1/10\div 1/3$, co pozwala na dłuższy czas działania na akumulatorach o tej samej pojemności;
- mają wysoką częstotliwość obrazów, przekraczającą nawet 1000 obrazów/s;
- cechuje je większy zakres dynamiki obrazu;
- wykazują nieznaczne szumy, również spowodowane wymaganym mniejszym napięciem zasilania;
- zasada działania umożliwia wielowarstwową konstrukcję sensora i uczulenie na określony zakres spektralny;
- mają niższe koszty wytwarzania, szczególnie w przypadku matryc o dużej liczbie pikseli;
- mała powierzchnia czynna fotodiod matryc CMOS stwarza problemy z miniaturyzacją konstrukcji pojedynczych elementów.

Postępujące udoskonalanie technologii CMOS spowoduje w najbliższych latach coraz powszechniejsze ich zastosowanie w kamerach cyfrowych, szczególnie w segmencie profesjonalnych lustrzanek cyfrowych. Podstawowym obszarem zastosowań będą pomiary metrologiczne, wykonywane szczególnie w złych warunkach oświetlenia.

Szczegółowy opis konstrukcji i zasad działania obu typów przetworników dostępny jest w wielu źródłach, w Internecie [17], jak również w popularnych periodykach z zakresu fotografii cyfrowej.

3. Kamery wideo CCD

Standardowe kamery wideo posiadają matrycę CCD i generują obraz wizyjny w postaci analogowej lub cyfrowej (po digitalizacji), który odpowiada jednej z norm standardu wideo. Dla obrazów monochromatycznych i barwnych stosuje się odpowiednio standardy telewizyjne CCIR i PAL (Europa) oraz RS 170 i NTSC (USA, Japonia). Sygnał CCIR generuje 25 pełnych obrazów na sekundę (25/50 Hz, 625 linii, w tym 576 linii aktywnych), natomiast sygnał RS 170 tworzy 30 obrazów na sekundę (30/60 Hz, 525 linii, w tym 480 linii aktywnych). Sygnał jest tworzony w trybie wybierania międzyliniowego (*interlaced mode*) i jest kompatybilny do standardu wideo [1].

Transmisja obrazu jest możliwa za pomocą następujących typów sygnału:

- zespolony sygnał wideo,
- sygnał wideo z synchronizacją H i V,
- sygnał typu 1 lub 2 wraz z taktowaniem piksela,
- sygnał cyfrowy.

Cyfrowe kamery wideo CCD charakteryzuje mały format sensora – przekątna obrazu $1/4 \pm 1''$ i zdecydowanie najniższa rozdzielczość – od 752×582 pikseli (przekątna $1/4''$) do maksymalnie $1,9K \times 1K$ pikseli. Kwadratowy lub prostokątny piksel matrycy obrazu cyfrowego ma wymiar $4 \pm 12 \mu m$.

W aplikacjach technicznych używane są sensory FT, charakteryzujące się większą czułością na światło, podczas gdy sensory typu IL znalazły powszechne zastosowanie w użytkowych kamerach wideo RGB CCD typu camcoder (maks. rozdzielczość $1,9K \times 1K$) i kamerach telewizyjnych.

Cyfrowe kamery wideo typu CCTV (*Closed Circuit Television*), które stosowane są w telewizyjnych systemach obserwacji, nadzoru i sterowania, nie wymagają digitalizacji sygnału analogowego, inaczej niż w wypadku pomiarów metrologicznych lub aplikacji związanych z analizą obrazów cyfrowych. Digitalizacja sygnału analogowego następuje za pomocą karty *Frame Grabber* [12], a transfer danych do komputera interfejsem PCI, PCMCIA lub *FireWire*. Ostateczna dokładność pomiaru pikseli jest funkcją łańcucha czynników: rejestracji optycznej, wzmocnienia sygnału, transmisji wideo, digitalizacji oraz metody pomiaru na obrazie cyfrowym.

Cyfrowe kamery wideo CCD, najczęściej w konfiguracji multisensoralnej, wykorzystywane są w stacjonarnych systemach on-line [2, 9, 13] do pomiarów w czasie rzeczywistym szybkozmiennych procesów kinematycznych, do kontroli jakości produktów przemysłowych, w robotyce, widzeniu maszynowym, w diagnostyce medycznej, etc. Ze względu na stosunkowo niską rozdzielczość mają ograniczony zasięg rejestracji, maksymalnie do kilku metrów. Dla systemów opartych na tym typie kamer względną dokładność pomiaru szacuje się na poziomie 1: 3000÷1: 15 000 odległości rejestracji [5].

4. Kamery z cyfrowym sygnałem na wyjściu

4.1. Cyfrowe kamery pomiarowe

Metryczne kamery cyfrowe charakteryzuje monolityczna budowa przetwornika, bezpośredni sygnał cyfrowy na wyjściu, wysoka rozdzielczość, geometryczna stabilność sensora i obiektywu oraz niezmienność parametrów orientacji wewnętrznej. Niektóre z kamer, np. Imetric Icam 6 (3072 × 2048), Imetric Icam 28 (7168 × 4096), GSI/Leica INCA 6.3 (3060 × 2036) lub GSI/Leica INCA 4.2 (2029 × 2044), posiadają dodatkowo wbudowany procesor przetwarzania obrazu, który umożliwia rozpoznanie i automatyczny pomiar sygnalizowanych punktów. Przewodowe połączenie z komputerem umożliwia zapis sekwencji obrazów cyfrowych w czasie rzeczywistym. Systemy on-line, wykorzystujące metryczne kamery cyfrowe, umożliwiają pomiary metrologiczne z względną dokładnością rzędu 1: 20 000÷1: 50 000 [5].

4.2. Aparaty cyfrowe *still video*

Odrębną grupę, uznawaną za kamery niemetryczne, stanowią fotograficzne aparaty cyfrowe typu *still video*, które posiadają własne zasilanie, moduł sterowania i wewnętrzną kartę pamięci.

Aparaty fotograficzne *still video* dzielą się na następujące typy:

- standardowe aparaty cyfrowe typu *compact*,
- cyfrowe aparaty hybrydowe Prosumer (*Professional and Consumer*),
- lustrzanki cyfrowe DSLR (*Digital Single-Lens Reflex Camera*).

Standardowe cyfrowe aparaty kompaktowe posiadają matryce o rozdzielczości globalnej do *ca* 5 megapikseli. Bardziej zaawansowane technicznie wersje, tzw. aparaty hybrydowe, dysponują matrycą o rozdzielczości 5÷8 megapikseli, formacie 2/3", obiektywem ze zmienną ogniskową i wyświetlaczem LCD. Warunkiem ich zastosowania w fotogrametrii jest tryb ogniskowania *Fix Focus* oraz wyłączenie funkcji zoom i autofokus. Ze względu na brak dostatecznej stabilności wszystkich parametrów kalibracji traktowane są jako kamery niemetryczne. Przy zastosowaniu techniki samokalibracji stosowane są z powodzeniem

w systemach *low-cost* do pomiaru obiektów o niewielkich wymiarach, względnie przy dopuszczalnej mniejszej dokładności opracowania.

Jednoobiektywowe lustrzanki cyfrowe SLR (*Single Lens-Reflex Camera*) przeznaczone do fotografii amatorskiej i profesjonalnej są to konstrukcje oparte na korpusie lustrzanek analogowych, co umożliwia zastosowanie dużych formatów i wysokorozdzielczych (6÷39 mln pikseli) matryc cyfrowych. Obok sensorów o pełnym formacie *High-End* stosowane są sensory w formacie APS (ca 24 mm × 16 mm), co powoduje około 1,5-krotne wydłużenie ogniskowej obiektywu. Lustrzanki wyposażone są w stabilny pod względem geometrycznym sensor CCD lub CMOS. Aparaty SLR charakteryzują wymienne obiektywy, stałe wartości ogniskowych, manualny i automatyczny tryb ustawień parametrów ekspozycji, szybki zapis obrazów, wymienne karty pamięci o dużej pojemności, możliwość zapisu danych w różnych formatach, bogate wyposażenie dodatkowe i duży komfort użytkowania. Podłączenie do komputera umożliwia natychmiastową radiometryczną korekcję obrazu lub opracowanie fotogrametryczne off-line lub opcjonalnie on-line.

W zależności od konstrukcji aparatu *still video*, bezpośredni transfer on-line danych cyfrowych do komputera następuje za pomocą jednego z typu interfejsów: SCSI, PCMCIA, USB i ostatnio *FireWire* (IEEE 1394). Zapis obrazów cyfrowych w lustrzance SLR wykonuje się na wewnętrznych, wymiennych kartach pamięci typu: CompactFlash I, II (maks. 8 GB), MultiMediaCard (maks. 4 GB), SmartMedia (maks. 128 MB), SecureDigital (maks. 4 GB), xD PictureCard (maks. 1 GB) lub dyskach MicroDrives (maks. 8 GB).

Od 2003 r. dostępne są cyfrowe lustrzanki SLR Kodak DCS Pro (14n, SLR/c, SLR/n) z matrycą CMOS w formacie filmu małoobrazkowego typu 135 (36 mm × 24 mm) o efektywnej liczbie pikseli 13,7 mln (4536 × 3024) i rozdzielczości radiometrycznej RGB 36 bitów. Kolejną bardzo nowoczesną konstrukcją jest średnioformatowa lustrzanka Mamiya ZD [6] wyposażona w matrycę CCD Dalsa typu FF (format 36 mm × 48 mm), która zawiera 21,5 mln efektywnych pikseli (4008 × 5344) i zapis 3 × 12 bitów odpowiednio w kanałach R, G, B. Wśród produkowanych aktualnie lustrzanek największą rozdzielczość ma lustrzanka cyfrowa Hasselblad H2D-39 [3] z matrycą CCD High-End (format 37 mm × 49 mm) i 39 mln pikseli.

Jednoobiektywowe lustrzanki cyfrowe SLR traktowane są w fotogrametrii jako kamery niemetryczne. Pomimo to stanowią od kilkunastu lat wyposażenie różnorodnych systemów pomiarowych, przede wszystkim w konfiguracji off-line. W grupie fotograficznych aparatów cyfrowych *still video* jedną z nielicznych metrycznych kamer pomiarowych jest 5-megapikselowa kamera Rollei d7 metric⁵ (2552 × 1920). W przypadku sygnalizacji punktów pomiarowych, optymalnej konfiguracji zdjęć oraz wyrównania obserwacji hybrydowych metodą wiązek, połączonego z kalibracją równoczesną uzyskuje się względną dokładność opracowania analitycznego rzędu $ca\ 1: 50\ 000 \div 1: 100\ 000$ [5].

W stosunku do lustrzanek cyfrowych SLR alternatywne rozwiązanie stanowi przystawka cyfrowa (*digital back*) montowana do korpusu średnioformatowego aparatu analogowego. Przystawki cyfrowe, np. firmy PhaseOne [8], w tym P45 o największej rozdzielczości 35 mln pikseli (matryca FF CCD, 7216 × 5412, format 49 mm × 37 mm) można zamontować do korpusów średnioformatowych aparatów Contax, Hasselblad, Mamiya. Najnowsze przystawki cyfrowe firmy Hasselblad CF-39 i CFH-39 (format 37 mm × 49 mm) tworzą obraz, który ma 39 mln pikseli. Eksperymentalne badania [4] aparatu Kodak DCS

ProBack 645M potwierdziły pełną przydatność konstrukcji przystawki cyfrowej do pomiarów w bliskim zasięgu. Zastosowanie odpowiedniego modelu błędów aproksymujących niezależnie dla każdego zdjęcia niestabilność położenia przystawki cyfrowej pozwoliło na uzyskanie błędu względnego pomiarów *ca* 1: 150 000.

4.3. Cyfrowe kamery skanujące

Pierwsze konstrukcje kamer-skanerów powstały kilkanaście lat temu jako propozycja alternatywna w stosunku do matryc CCD, które posiadały wówczas stosunkowo niską rozdzielczość. Współczesne kamery cyfrowe o sekwencyjnym trybie skanowania obrazu charakteryzuje bardzo wysoka rozdzielczość.

W tej grupie kamer występują dwie metody skanowania obrazu:

- 1) *Micro-Scanning*,
- 2) *Macro-Scanning*.

Metoda *Micro-Scanning* polega na wielokrotnym skanowaniu pojedynczego piksela obrazu za pomocą przesuwanego przetwornika CCD typu *Interline Transfer*, co powoduje pomniejszenie rzeczywistego piksela obrazu. Według tej zasady działają wysokorozdzielcze kamery cyfrowe RJM JenScan (4488×3072), Kontron ProgRes 3012 (4608×3480), Jenoptik Eyelike (6144×6144), dla których czas skanowania wynosi odpowiednio 5÷40 sekund.

Metoda *Macro-Scanning* polega na przesuwaniu liniiki lub matrycy CCD w płaszczyźnie obrazu. Zaletą takiego systemu jest duży format powstającego obrazu oraz wysoka rozdzielczość, przy stosunkowo niskich kosztach wytwarzania konstrukcji. Rozdzielczość pionowa obrazu (pozioma dla kamery skanującej z liniijką CCD) zdefiniowana jest krokiem lub prędkością mechanicznego systemu sterowania ruchem sensora. Rozdzielczość pozioma (pionowa dla kamery-skanera z liniijką CCD) określona jest rozdzielczością liniiki CCD. Zastosowanie metody skanowania przy użyciu liniiki CCD pozwala na użycie 3 równoległych liniiek CCD rejestrujących niezależnie w kanałach R, G, B, bez konieczności interpolacji barw. Generowanie obrazu w trybie *Macro-Scanning* trwa powyżej 300 sekund.

Na zasadzie *Macro-Scanning*, z wykorzystaniem matrycy CCD, działa kamera Rollei RSC (4500×4500) (*Réseau-Scanning-Camera*) wyposażona w siatkę *Réseau*, oraz kamera Zeiss UMK HighScan (15414×11040) wyposażona w cztery sensory CCD, której konstrukcję oparto na korpusie analogowej kamery pomiarowej Zeiss UMK (zdjęcie 120 mm $\times$ 166 mm). Przykładem kamery-skanera cyfrowego (*digital high-end scanner*), która wykorzystuje trzy liniiki RGB CCD do skanowania obrazu, jest Pentacon Scan 3000 (5363×5363) i najnowszy Pentacon Scan 5000 (1200×8192) [16].

W porównaniu z tradycyjnymi kamerami cyfrowymi, kamery z sekwencyjnym trybem skanowania *Macro-Scanning* cechuje bardzo wysoka rozdzielczość. Mniejsza dokładność, która jest spowodowana pracą mechanicznego systemu sterowania, ogranicza jej typowo fotogrametryczne zastosowanie. Długi czas generowania obrazu cyfrowego (*ca* 5÷330 sekund) pozwala na użycie tych kamer do archiwizacji i dokumentacji wielkoskalowej obiektów nieruchomych, w stałych warunkach oświetlenia.

Cyfrowe kamery panoramiczne (rotacyjne) (*line-scanning camera*) tworzą konstrukcje również oparte na zasadzie skanowania w trybie *Macro*, w których pionowo ustawiona linijka CCD obraca się wokół osi pionowej. Zobrazowanie wykonane jest w kierunku poziomym w projekcji równoległej, natomiast w kierunku pionowym – w rzucie środkowym. W konsekwencji obraz obiektu zeskanowany zostaje na powierzchnię cylindryczną. Podstawową ich zaletą jest ciągłe obrotowe, o 360° wokół osi, zobrazowanie całego obiektu (wnętrze budynku, krajobraz, panorama miasta) z jednego stanowiska, bez konieczności wykonywania pojedynczych zdjęć o dużym pokryciu. Zobrazowania panoramiczne i sferyczne stosowane są w projektowaniu urbanistycznym, zarządzaniu nieruchomościami, inwentaryzacji zabytków, fotografii kryminalistycznej, reklamie i prezentacjach internetowych.

Kamery panoramiczne: KWD Rotascan-Noblex (42379×8600), KST EyeScan M3 (54000×10200), PanoCam (2300×5300) [7] oraz ich odmiana, kamery sferyczne z pionowym kątem widzenia 180° [18] – charakteryzuje bardzo wysoka rozdzielczość, długi czas oraz głębokość bitowa ≥ 36 bit (RGB) zapisu obrazu. Modelowanie geometryczne i kalibracja fotogrametryczna muszą uwzględnić cylindryczny układ współrzędnych oraz specjalny model korekcji błędów z parametrami dodatkowymi (m.in. mimośród środka rzutów oraz nachylenie i skręcenie linijki CCD w stosunku do osi obrotu, mimośród linijki CCD do osi optycznej) [14, 15], które opisują błędy zobrazowania panoramicznego. Analityczne opracowanie wielokrotnych zdjęć panoramicznych wykonywane jest metodą wiązek lub fotogrametrycznego wcięcia w przód.

4.4. Szybkie kamery cyfrowe

Szybkie kamery cyfrowe (*high-speed cameras*) umożliwiają rejestrację sekwencji obrazów z częstotliwością ponad 10 000 obrazów/s, znacznie przewyższającą częstotliwość standardowych kamer wideo CCD. Liczni producenci tego typu kamer oferują rozdzielczość obrazu od 640×480 do *ca* $1,6K \times 1,2K$ pikseli. Stosowane są przeważnie sensory CMOS, zamiast CCD z progresywnym trybem skanowania, ponieważ zintegrowana z sensorem migawka zapewnia czasy rejestracji liczone w mikrosekundach. Przykładem nowoczesnej konstrukcji jest kamera Phantom v 9.0 (sensor CMOS 1600×1200 , 10 bit b/w, rejestruje 1000 obrazów/s) [19] lub kamera Weinberger SpeedCam Visariog2 (sensor CMOS 1536×1024 , 30 bit RGB, rejestruje 1000 obrazów/s, a przy zredukowanej rozdzielczości 10 000 obrazów/s) [20]. Szybkie kamery cyfrowe [10] stosuje się w procesie śledzenia zjawisk dynamicznych w przemyśle, w inżynierii materiałowej, komunikacji, medycynie, w badaniach naukowych.

5. Kierunki rozwoju

W ostatnich kilku latach cyfrowe sensory wizyjne stosowane w jedno- i multisensoralnych (*multiculaire*) fotogrametrycznych systemach pomiarowych osiągnęły bardzo wysoką rozdzielczość geometryczną i radiometryczną. Seryjnie produkowane monolityczne matry-

ce cyfrowe *still video* posiadają już *ca* 40 mln pikseli, natomiast kamery panoramiczne, pracujące w trybie skanowania generują obraz o liczbie 550 mln pikseli.

W budowie cyfrowych sensorów wizyjnych i ich wyposażenia dodatkowego należy oczekiwać w najbliższej przyszłości rozwoju w następującym zakresie:

- dalsze powiększenie wymiarów i rozdzielczości przetworników CCD/CMOS,
- stopniowe udoskonalanie i szersze zastosowanie technologii CMOS,
- zwiększanie głębi bitowej zapisu obrazów,
- powszechne stosowanie i standaryzacja formatu RAW,
- stosowanie kart pamięci bardziej wydajnych pod względem szybkości i pojemności,
- tworzenie szybszych interfejsów transferu danych (*CameraLink*),
- budowa kamer „inteligentnych” z wbudowanym modulem przetwarzania danych,
- budowa kamer mierzących odległość według koncepcji *Time-of-Flight*.

Nowe rodzaje aplikacji metod fotogrametrycznych będą możliwe dzięki rozwiązaniu m.in. następujących problemów:

- łączenie sensorów wizyjnych z innymi technikami pomiaru (skaniny laserowy, projekcja światła strukturalnego, GPS/INS) w jeden hybrydowy system pomiarowy;
- budowa dla osób niewidomych systemów sterowizyjnych, które są wspomagane programowalnymi procesorami i bazują na pomiarze dysparycji;
- udoskonalenie modeli opisujących zniekształcenia zobrażeń wykonanych kamerami panoramicznymi i sferycznymi.

Literatura

- [1] Baltsavias E.P., Beyer H.A., Fritsch D., Lenz R.K.: *Fundamentals of Real-Time Photogrammetry*. ETH Zürich, Institute of Geodesy and Photogrammetry 1990
- [2] Bösemann W., Godding R., Huette H.: *Photogrammetric measurement techniques for quality control in sheet metal forming*. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, vol. XXXIII, B5/1, 2000, 291–298
- [3] Hasselblad, 2006: <http://www.hasselblad.se>
- [4] Jantos R., Luhmann T., Peipe J., Schneider C.T.: *Photogrammetric Performance Evaluation of the kodak DCS Pro Back*. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Symposium Com. V, Corfu 2002
- [5] Luhmann T.: *Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Heidelberg, Wichman Verlag 2003
- [6] Mamiya, 2006: <http://www.mamiya.com>
- [7] Parian J.A., Grün A.: *Advanced Sensor Model for Panoramic Cameras*. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, vol. XXXV, B5, 2004
- [8] Phaseone, 2006: <http://www.phaseone.com>

-
- [9] ProCam, 2006: <http://www.aicon.de>
 - [10] Putze T.: *Einsatz einer Highspeedkamera zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern in Gasströmungen*. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Band 13, 2004, 325–332
 - [11] Sawicki P.: *Digital multisensoral video-thermal system for close range metrology applications*. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, vol. XXXIII, Part B5/2, Com. V, 2000, 691–698
 - [12] Sawicki P.: *Fotogrametryczne systemy do pomiaru punktów w bliskim zasięgu*. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 12b, 2002, 345–359
 - [13] Schneider C.T., Bösemann W.: *A new approach to on-line 3D measurement*. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, vol. XXXIII, B5/2, 2000, 707–712
 - [14] Schneider D., Maas H.G.: *Geometric Modelling and Calibration of a High Resolution Panoramic Camera*. [w:] Grün A., Kahmen H. (red.), Optical 3-D Measurement Techniques VI, Institute of Geodesy and Photogrammetry ETH Zürich, vol. II, 2003, 122–129
 - [15] Schneider D., Maas H.G.: *Development and Application of an Extended Geometric Model for High Resolution Panoramic Cameras*. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, vol. XXXV, B5, 2004
 - [16] Schneider D., Pötzsch M., Maas H.G.: *Accuracy and application potential of the 94 megapixel RGB macro-scanning camera Pentacon Scan 5000*. CIPA Archives for Documentation of Cultural Heritage, vol. XX-2005 & Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, vol. XXXVI-5/C34, 2005
 - [17] Sensors, 2006: <http://www.sensors.mag.com>
 - [18] Spheron, 2006: <http://www.spheron.com>
 - [19] Visible Solutions, 2006: <http://www.visible-solutions.com>
 - [20] Weinbergervision, 2006: <http://www.weinbergervision.com>