

Regina Tokarczyk
Adam Boroń

BADANIE CYFROWYCH APARATÓW FOTOGRAFICZNYCH DLA ZASTOSOWAŃ FOTOGRAMETRYCZNYCH

Wstęp

Jesteśmy świadkami dokonującej się rewolucji w fotografii. Materiały fotograficzne oparte na związkach srebra zostają powoli ale systematycznie zastępowane przez dwuwymiarowe matryce światłoczułych elementów elektronicznych. W trakcie wykonywania zdjęcia obraz optyczny tworzony przez obiektyw, przekształcony zostaje w ciąg danych liczbowych opisujących fotografowaną scenę. Powstaje obraz cyfrowy – informacja o jasności światła docierającego do światłoczułego detektora i o położeniu detektora. Informacja pełna – również o barwie światła, powstaje przez wykorzystanie metody analizy podstawowych składowych światła białego. Przez ten sposób szybkiej rejestracji została pokonana podstawowa przeszkoda, powodująca, że metody geodezyjne, a nie fotogrametryczne były wykorzystywane tam, gdzie wynik pomiaru był wymagany natychmiast lub w bardzo krótkim czasie. Dotyczy to głównie aplikacji inżynierskich, niestety wymagane są tu zazwyczaj wysokie dokładności pomiaru, co wiąże się z koniecznością użycia kamer cyfrowych o bardzo dużej rozdzielczości, a te są jeszcze bardzo drogie.

Jest jednak wiele zastosowań, gdzie można do pozyskania obrazów cyfrowych używać nawet zwykłych cyfrowych aparatów fotograficznych, lekkich, poręcznych, łatwych w obsłudze i coraz tańszych.

1. Charakterystyka aparatów cyfrowych

Cyfrowe aparaty fotograficzne wytwarzają prawie wszyscy liczący się producenci aparatów analogowych. Część z nich skonstruowano na bazie klasycznych aparatów fotograficznych, są to najczęściej modele oparte na dobrych lustrzankach jednoobiektywowych, takie rozwiązanie pozwala na stosowanie wymiennych obiektywów będących na wyposażeniu aparatu bazowego. Jednak większość aparatów cyfrowych to konstrukcje nowe, najczęściej typu *compact*, z wbudowanym na stałe obiektywem. Rolę materiału światłoczułego spełnia matryca elementów CCD lub CMOS (*complementary metal oxide semiconductor*). Informację o barwach fotografowanej sceny uzyskuje się przez rzutowanie obrazu na matryce uczulone na barwy podstawowe (np. w Minolcie RD 175) lub przez wykorzystanie matrycy, w której każdy element światłoczuły analizuje tylko jedną składową koloru. Pełną informację o barwie piksela dostaje się przez wyinterpolowanie danych o pozostałych składowych za pomocą pikseli sąsiadujących.

W matrycach CCD ładunki elektryczne powstające w skutek pobudzenia danego elementu światłoczułego są zrzucane kolejnymi rzędami do rejestrów odczytu, stamtąd za pośrednictwem wzmacniacza kierowane są do konwertera analogowo-cyfrowego. Jest to procedura spowalniająca zapis obrazu, ponadto produkcja matryc CCD jest droga. Wydajniejsza jest procedura rejestracji i zapisu obrazu na elementach CMOS, gdzie każdy element posiada swój wzmacniacz i rejestr odczytu, a technologia wytwarzania stosowana jest między innymi do masowej produkcji pamięci i procesorów komputerów.

Warto tu wspomnieć o jeszcze jednym rodzaju aparatów fotograficznych, dających obrazy cyfrowe o bardzo dużej rozdzielczości. Powstają one przez skanowanie obrazu za pomocą ruchomej liniiki sensorów CCD przesuwającej się po płaszczyźnie tłowej aparatu. Ponieważ proces skanowania trwa kilka minut, aparaty te nadają się do rejestrowania obiektów statycznych.

Czułość elementów światłoczułych podaje się jako ekwiwalentną klasycznemu materiałowi fotograficznemu, na którym przy identycznych parametrach ekspozycji otrzymano podobny wizualnie rezultat.

Większość aparatów cyfrowych analizuje obraz w sposób ciągły, spust „migawki” umożliwia przejście z pracy w trybie jałowym na czynny, ustawienie parametrów fotografowania i zapis obrazu cyfrowego do pamięci. Migawka – element nieodzowny w klasycznych aparatach jest urządzeniem montowanym w droższych modelach aparatów cyfrowych. Tradycyjna migawka zapobiega szybkiemu zużyciu się sensorów wystawionych na ciągle działanie światła realizując w ten sposób wydłużenie ich żywotności.

Ciąg impulsów elektrycznych wzbudzonych w elementach światłoczułych matrycy CCD jest sukcesywnie zrzucany rzędami, poddawany konwersji, kompresowany i zapisywany w pamięci aparatu. Może to być pamięć wbudowana na stałe lub wymienna karta pamięci typu Smart Media lub Compact Flash, które to przez odpowiednie urządzenia lub adaptery do gniazd PCMCIA pozwalają na transfer obrazów do komputera. Standardem jest transmisja obrazów z aparatu przez port szeregowy, co przy dużych plikach trwa niestety dość długo.

Najtańsze „aparaty cyfrowe posiadają automatyczne ogniskowanie i stosunkowo niewielką rozdzielczość (640x480 pikseli), nieco droższe wyposażone są w obiektyw zmiennoogniskowy *zoom*, najdroższe modele wyposażone są w funkcje manualnego ustawiania parametrów ekspozycji takich jak: przysłona, czas otwarcia migawki, odległości nastawiania na ostro, te modele mają też największą rozdzielczość dochodzącą do kilku milionów pikseli.

Z punktu widzenia fotogrametrii najbardziej interesujące są aparaty o dużej rozdzielczości i powtarzalności elementów orientacji wewnętrznej. Dla pomiarów wymagających szybkiego uzyskania wyników na stanowisku pomiarowym ważna jest też prędkość transferu obrazów do komputera, natomiast dla prac w czasie rzeczywistym wymagane są kamery cyfrowe z *frame grabberami*.

W Zakładzie Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH od kilku lat prowadzi się prace, w których wykorzystujemy aparaty cyfrowe. Związane są one z inwentaryzacją zabytków [Tokarczyk, Gul 1999], [Boroń 1998], pomiarami ciała ludzkiego dla celów medycznych [Tokarczyk, Mikrut 1999]. Obecnie prowadzone są badania fotogrametrycznego systemu pomiarowego dla kolei i systemu pomiaru lin odciągowych wieżomasztów (w ramach grantu KBN).

W związku z tym przebadaliśmy kilka aparatów cyfrowych pod kątem ich przydatności do pomiarów fotogrametrycznych. Są to następujące aparaty:

- Minolta RD175;

- Kodak DC260 (trzy egzemplarze);
- Kodak DC200 (dwa egzemplarze);
- Camedia C-1400L (Olympus);
- Camedia C-2000 (Olympus).

W Tabeli 1 przedstawiono zestawienie najważniejszych parametrów tych aparatów.

Tabela 1.

Model	Minolta RD175	Kodak DC260	Kodak DC200	Camedia C-1400L Olympus	Camedia C-2000 Olympus
Maksymalna rozdzielczość	1528(h) x 1146(v)	1536(h) x 1024(v)	1154(h) x 864(v)	1280(h) x 1024(v)	1600(h) x 1200(v)
Ogniskowa obiektywu [mm]	20 mm	8-24 mm 37-115mm (ekwiw.)	6 mm 39 mm (ekwiw)	9 –28 mm	6,5-19,5mm
Czułość	800 ISO	100 ISO	140 ISO	150 ISO	100,200,400 ISO
Przysłona	W zależności od obiektywu	F/2.8 do f/22	F/4 do f/13,5	F/2,8 do f/5,6	F/2,0 do f/11
Migawka min/max	½-1/2000s	¼-1/400s	½-1/362s	¼ - 1/10000s	½ - 1800s
Automatyczne ustawianie ostrości	tak	tak	nie	tak	tak
Manualne ustawianie ostrości	tak	tak	nie	nie	tak
Pamięć	Karta PCMCIA	8MB Kodak Digital Science Picture Card	4MB Kodak Digital Science Picture Card	Smart Media 2,4,8 MB	Smart Media 8-32 MB
Rodzaj obiektywu	wszystkie obiektywy Minolta Maxxum	Kodak Ektanar F3,0-4,7 Autofocus 3x zoom	Free focus	Olympus 9,2-28/2,8	Olympus Multi-variator 6,5-19,5/2,0
Wizjer: optyczny/LCD	Tak/nie	Tak/tak	Tak/tak	Tak/tak	Tak/tak
Formaty zapisu zdjęć	Własny/ TWIN	JPEG, Flashpix	JPEG, Flashpix	JPEG, Tiff	JPEG, Tiff
Połączenie z PC	SCSI-2	Port seryjny RS-232, USB, IrDA	Port seryjny RS-232	Port seryjny RS-232	Port seryjny RS-232

Program badań aparatów obejmował następujące zagadnienia:

- stabilność obrazu i powtarzalność realizacji parametrów orientacji wewnętrznej kamer;
- kalibracja;
- dokładność pomiaru przestrzennego lub płaskiego obiektu.

2. Badanie stabilności obrazu i powtarzalności nastawiania elementów orientacji wewnętrznej

Wiele opracowań fotogrametrycznych wymaga znajomości elementów orientacji wewnętrznej kamery i błędów obrazowania. Wyznaczane one są w procesie kalibracji kamery (zazwyczaj poza pomiarem właściwym, na polu testowym) i pozwalają na odtworzenie wiązki promieni rzutujących. Chcielibyśmy, aby raz wyznaczone w czasie kalibracji mogły być aktualne dla tych samych nastawień przy ekspozycjach roboczych.

Na powtarzalność kalibrowanych parametrów wiązki składa się, w przypadku kamer cyfrowych, stabilność obrazu tworzonego na płycie CCD oraz powtarzalność nastawianych elementów orientacji wewnętrznej.

Przez stabilność obrazu należy rozumieć jego powtarzalność geometryczną przy rejestracji nieruchomym aparatem bez zmiany jakichkolwiek nastawień parametrów ogniskowania. W cyfrowych aparatach fotograficznych rolę znaczków tłowych kamer fotogrametrycznych spełniają narożniki formatu, względem których określa się położenie środka rzutów. To założenie jest słuszne pod warunkiem, że aparat wykazuje stabilność rejestracji obrazów. Nie jest ona zupełnie oczywista, co wykazało badanie cyfrowej kamery MINTRON MTV-1801 [Jachimski, Trocha, 1992].

Badanie stabilności przeprowadzono dla aparatów: Minolta i Kodak DC260. Przeprowadzono je na laboratoryjnym polu testowym ZFiIT AGH [Boroń 1998],[Tokarczyk, Mikrut, 1999], [Boroń, Tokarczyk, 1999].

Podstawowym warunkiem prawidłowości prowadzonych badań było założenie stałości orientacji zewnętrznej aparatów. W przypadku Minolty założenie to zrealizowano przez umieszczenie aparatu na ciężkim i stabilnym statywie, wyłączenie funkcji autofocus i stosowanie samowyzwalacza. Badanie przeprowadzono dla wymiennego, stałogniskowego, obiektywu szerokokątnego. Kilka ekspozycji punktów pola testowego wypełniających cały kadr pomierzono na VSD. Wybrane punkty na pierwszym zdjęciu pomierzono kilkakrotnie, wyznaczono wartości średnie ich współrzędnych oraz określono średni błąd pomiaru.

Następnie pomierzone współrzędne tych samych punktów na pozostałych zdjęciach, porównano je ze zdjęciem pierwszym i obliczono odchylenia standardowe. Okazało się, że były one podobne do błędów pomiaru [Boroń 1998], co świadczy o stabilności obrazów Minolty.

Aparat Kodak DC260, ze względu na wbudowany na stałe obiektyw typu *zoom* badany był w dwu aspektach. Pierwszy z nich (analogicznie jak w przypadku Minolty) miał odpowiedzieć na pytanie: czy w trakcie wielokrotnego rejestrowania tego samego obiektu bez zmiany elementów orientacji zewnętrznej i wewnętrznej geometria obrazów nie ulega zmianie. W drugim aspekcie badano powtarzalność zobrazowań przy wielokrotnym realizowaniu tych samych parametrów orientacji wewnętrznej obsługując aparat zarówno manualnie jak również zdalnie za pośrednictwem komputera.

W aparacie Kodak DC 260 nastawienie powiększenia obrazu (*zoom*) oraz ogniskowania może się odbywać poprzez wprowadzenie tych parametrów za pomocą jednego z programów komputerowych obsługujących aparat. Zatem ten aspekt stabilności wymaga otrzymania identycznych obrazów za pomocą unieruchomionego aparatu, którego parametry ogniskowania są wielokrotnie nastawiane na te same wartości, zarówno bez wyłączania aparatu jak i z jego wyłączeniem. Nieruchomość aparatu w przypadku jego obsługi z komputera jest zagwarantowana, bo jego sterowanie łącznie z wyzwalaniem migawki odbywa się *via* komputer.

Wykonano 5 zdjęć pola testowego z odległości ok. 3 m, dla nastawienia ogniskowej na 37 mm, odległości nastawienia na ostro 3m, dla wariantów:

- zdjęcie 1 i 2 – bez zmian w nastawianiu i bez wyłączania aparatu;

- zdjęcia 3 i 4 – zmieniając parametry ogniskowej i ogniskowania, a następnie wracając do pierwotnych;
- zdjęcie 5 – wyłączając aparat i powtórnie go włączając (po tym należało ustawić wybrane wielkości, ponieważ wyłączenie powoduje ustawienie *default*-owe na sterowanie automatyczne);

Na zdjęciach po pomiarze na VSD współrzędnych punktów porównywano ich współrzędne. Okazało się, że różnice współrzędnych między zdjęciami nr 1 i 2 mieściły się w granicach błędu pomiaru (0,1- 0,2 piksela), świadczyło to o stabilności tworzącego się obrazu cyfrowego. Natomiast maksymalne różnice między położeniem odpowiadających sobie punktów zdjęcia pierwszego a trzeciego, czwartego i piątego nie przekroczyły 0,5 piksela, co świadczy o istniejącej powtarzalności nastawień elementów orientacji wewnętrznej za pośrednictwem komputera.

Drugim sposobem sterowania aparatem Kodak DC260 jest bezpośrednie nastawianie parametrów z menu aparatu. Wyświetlane jest ono na ciekłokrystalicznym ekranie LDC, wybieranie i zatwierdzanie opcji menu odbywa się za pomocą odpowiednich przycisków na korpusie. Nastawienie ogniskowej umożliwia specjalny przycisk, nie znana jest wartość nastawianej ogniskowej, kontroluje się jedynie skalę kadru w wizjerze. Za manualnie powtarzalne mogą być uznane jedynie nastawienia przycisku „do oporu”, odpowiadające minimalnej i maksymalnej ogniskowej. Wciśnięcie przycisku *zoom* do oporu odbywa się tak długo, aż silnik zmieniający ogniskową obiektywu zatrzyma się w skrajnym położeniu. Ponieważ zarówno realizacja nastawionego ogniskowania jak i ogniskowej odbywa się na drodze przesuwu obiektywu (ogniskowanie) i elementów optycznych obiektywu z wykorzystaniem silnika elektrycznego, dlatego od precyzji działania tego elektryczno-mechaniczno-optycznego zespołu zależy powtarzalność ustawień, a tym samym elementów orientacji wewnętrznej.

W celu przeprowadzenia badań wykonano 5 zdjęć pola testowego według tego samego powyżej opisanego programu, jednak czynności nastawiania, włączania i wyłączania aparatu, spuszczenia migawki wykonywano ręcznie.

Do analizy wybrano tak jak poprzednio punkty rozmieszczone równomiernie na powierzchni obrazu. Różnice współrzędnych punktów zdjęcia pierwszego i drugiego były w granicach błędu pomiaru. Natomiast porównanie punktów zdjęcia pierwszego z pozostałymi pozwoliło zauważyć, że wyodrębnić można w tych różnicach czynniki systematyczne, których wpływ na elementy orientacji wewnętrznej można interpretować jako niestabilność położenia punktu głównego [Boroń, Tokarczyk, 1999]. Wykonanie transformacji Helmerta współrzędnych punktów czterech zdjęć na zdjęcie pierwsze wykazało, że zmiana skali zdjęć wywołana brakiem powtarzalności nastawień ogniskowej i ogniskowania nie ma charakteru systematycznego, zatem będzie obarczać błędem wyniki pomiaru fotogrametrycznego. Zmiana skali w skrajnym przypadku wyniosła 0,11%, co odpowiada zmianie stałej kamery o 1,9 piksela. Wniosek: obsługa manualna nie zapewnia powtarzalności parametrów wiązki wyznaczonych w procesie kalibracji.

Stabilność obrazu przebadano również dla aparatu Kodak DC200. Jest to aparat o obiektywie stałoogniskowym, bez możliwości ogniskowania, fotografuje się nim obiekty umieszczone w granicach głębi ostrości. Badanie tego aparatu wykazało stałość jego elementów orientacji wewnętrznej w granicach błędu pomiaru współrzędnych na VSD.

Z powyższych badań wynika, że do opracowań fotogrametrycznych wymagających znajomości danych z kalibracji najlepiej jest wykorzystywać aparaty stałoogniskowe

z możliwością wyłączenia funkcji autofocus (Minolta) lub aparaty bez ogniskowania (Kodak DC200), ewentualnie z obiektywem typu *zoom* lecz tylko przy sterowaniu aparatem za pośrednictwem komputera (Kodak DC 260).

W innych przypadkach należy się spodziewać gorszych dokładności opracowania lub też stosować techniki samokalibracyjne.

3. Kalibracja aparatów cyfrowych

Płaskie pole testowe o współrzędnych punktów wyznaczonych drogą pomiaru geodezyjnego, do kalibracji jest wzbogacane o dodatkowe punkty rozmieszczone na pionowych linkach poza płaszczyznę ściany pola. Nie są one punktami odniesienia (nie mają wyznaczonych współrzędnych), ale ich obecność podnosi dokładność sieci samokalibracji, której rozwiązanie dostarcza parametrów kalibracji. Zdjęcia do kalibracji wykonywane były według ogólnego schematu, który zakłada rozmieszczenie stanowisk kamer zapewniające optymalne wcięcia promieniami jednoimiennymi, z odległości zapewniającej mieszczące się punktów pola testowego w głębi ostrości i jednocześnie dającej możliwe wypełnienie punktami pola całego obrazu. Wykonywano od pięciu do dziewięciu zdjęć kalibracyjnych, współrzędne punktów mierzono na VSD odnosząc je do środka obrazu.

Obliczenie i wyrównanie sieci samokalibracji dokonywano przy pomocy programu ORIENT. Błędy obrazu najlepiej aproksymował wielomian dystorsji o dwu współczynnikach dystorsji radialnej i dwu dystorsji tangencjalnej. Współrzędne pomierzone poprawiane były o wpływ tych błędów według wzorów:

$$\begin{aligned} x_i &= x_e - (x_o + \Delta x) \\ \Delta x &= K_1(x_e - x_o)(r^2 - 1) + K_2(x_e - x_o)(r^4 - 1) + P_1[r^2 + \\ &\quad + 2((x_e - x_o)^2) + P_2 2(x_e - x_o)(y_e - y_o)] \end{aligned} \quad [1]$$

$$\begin{aligned} y_i &= y_e - (y_o + \Delta y) \\ \Delta y &= K_1(y_e - y_o)(r^2 - 1) + K_2(y_e - y_o)(r^4 - 1) + P_1 2(y_e - y_o)(x_e - x_o) \\ &\quad + P_2 [r^2 + 2(y_e - y_o)^2] \end{aligned}$$

gdzie:

$(x_e - x_o)$ i $(y_e - y_o)$ należy znormalizować, to znaczy podzielić przez R_0 ;

x_e, y_e to współrzędne punktów obrazu odniesione do jego środka;

x_o, y_o - położenie punktu głównego zdjęcia;

$r^2 = (x_e - x_o)^2 + (y_e - y_o)^2$;

R_0 - promień normalizujący;

K_1, K_2, P_1, P_2 - współczynniki wielomianu dystorsji.

W Tabeli 2 umieszczono wyniki kalibracji siedmiu aparatów. Kalibrowano trzy aparaty Kodak DC260 (dla dwu z nich ustawienia ogniskowej i ogniskowania dokonywane były przez komputer, dla trzeciego przyciskiem *zoom* na minimum do oporu i ogniskowaniem z menu aparatu) i dwa egzemplarze Kodaka DC200.

Dość kłopotliwa była kalibracja aparatu Olympus Camedia C-1400L, ponieważ w tym aparacie nie ma możliwości wyłączenia automatycznego nastawiania ostrości. Nie nadawałby się więc do kalibracji, gdyby nie „pamięć ostrości”. Realizowana jest przez wciśnięcie spustu

migawki do połowy i wycelowanie na przedmiot ustawiony w pewnej odległości od aparatu. Obiekt wstawia się wtedy w odległości obrazowej dostosowanej do odległości przedmiotowej. Teraz wystarczy skierować aparat na obiekt fotografowany i wcisnąć spust migawki do oporu. Zdjęcie zostanie wykonane przy zapamiętanej uprzednio odległości obrazowej. Przy każdym następnym zdjęciu procedurę tę należy powtórzyć. Można by z tego wnioskujeć, że aparat ten nie nadaje się do opracowań fotogrametrycznych wymagających większej dokładności przy znanych parametrach kalibracji, ale kalibrowany i testowany był głównie dla poznania jego możliwości zastosowania i dla wyznaczenia dystorsji obiektywu dla fotografowania z dużych odległości.

Z kolei Camedia C-2000 ma tylko dwie możliwości ustawienia ręcznego ogniskowania: na 2,5 m oraz na nieskończoność. Głębłą ostrości można jednak manewrować przez odpowiednie dobranie przysłony.

Tabela 2

Rodzaj aparatu i sposób ogniskowania	C_k m_{ck} [pxl]	x_0 m_{x0} [pxl]	y_0 m_{y0} [pxl]	K_1 m_{K1} R_0 [pxl]	K_2 m_{K2}	P_1 m_{P1}	P_2 m_{P2}
Minolta RD 175 Obiekt w 20 mm, ogniskowany na ∞ (głębokość od 0,6m do ∞)	1925,56 1,02	-5,91 1,22	10,72 1,08	-15,42841 0,10 700	2,138489 0,02	0,3925546 0,03	0,580845 0,02
Kodak DC260 $f=37$ mm, ogniskowanie na 10m, sterowanie z komputera	1686,61 1,08	9,40 1,36	13,44 1,11	-6,725273 0,09 550	1,207439 0,04	0,2232616 0,05	0,280693 0,04
Kodak DC260 $f=37$ mm, ogniskowanie na 10m, sterowanie z komputera	1676,86 1,44	-6,46 1,44	28,61 1,15	-7,462319 0,12 550	1,464036 0,05	0,15084 0,05	0,154061 0,04
Kodak DC260 $f=$ minimum, ogniskowanie na 3m ręczne	1690,67 0,43	-3,38 1,73	18,58 1,90	-6,66655 0,14 550	1,16478 0,05	0,233045 0,06	-0,06334 0,06
Kodak DC200 odległość fotografowania ok. 3m	1305,36 0,37	45,27 0,44	14,44 0,45	-7,783521 0,043 400	0,877886 0,02	- 0,0188987 0,019	0,061188 0,019
Kodak DC200 odległość fotografowania ok. 3m	1309,20 0,40	31,70 0,51	-5,02 0,43	-7,724443 0,042 400	0,847461 0,023	0,044874 0,018	0,082255 0,019
Camedia C-1400L $f=$ minimum, ogniskowanie z pamięcią ostrości na ∞ , odległość fotografowania ok.7m	1374,25 1,10	-42,17 1,97	8,53 1,11	-16,36107 0,168	1,631750 0,094	0,063983 0,058	-0,172825 0,047
Camedia C-2000 $f=$ min. ogniskowanie manualne na ∞ przy przysłonie 11, odl. fotografowania ok. 4m	1645,72 1,55	-19,30 1,97	15,65 2,12	-18,19944 0,291 600	2,54135 0,192	0,0714038 0,0957	-0,050047 0,101

Różne błędy wyznaczenia parametrów kalibracji spowodowane są głównie przez wykorzystywanie różnej ilości zdjęć z różnej odległości, co dawało mniej lub więcej korzystny kształt sieci samokalibracji. Nie mówią one nic o powtarzalności (stabilności) elementów orientacji wewnętrznej, o tym przekonać się można wykonując opisane wcześniej badania lub pomiar testowy.

Zwraca uwagę podobieństwo współczynników dystorsji aparatów tego samego producenta, co można wykorzystać stosując je z pewnym przybliżeniem dla aparatu niekalibrowanego o tym samym typie obiektywu, pamiętając jednak, że dystorsja przypisana jest też do odległości obrazowej.

4. Badanie dokładności pomiaru fotogrametrycznego dla opracowań dwuobrazowych i jednoobrazowych

Badanie dokładności polegało na fotogrametrycznym pomiarze przestrzennego pola testowego wykorzystując parę skalibrowanych wcześniej zdjęć normalnych lub zbieżnych (w zależności od aplikacji metody fotogrametrycznej z użyciem danego aparatu). Niektóre z aplikacji wymagają równoczesnego wykonania zdjęć, zatem muszą być wykonywane dwoma aparatami.

Z reguły do obliczenia badanej pary wykorzystywano ORIENT lub VSD. Pierwszy z wymienionych programów pozwala na wykonanie fotogrametrycznego wcięcia w przód w oparciu o metodę wiązki, z równoczesnym wyrównaniem współrzędnych szukanych punktów i elementów orientacji zewnętrznej zdjęć, elementy orientacji wewnętrznej i parametry wielomianu dystorsji mogą być indywidualne dla każdego zdjęcia. Inaczej jest w przypadku użycia VSD, gdzie opracowanie pary zdjęć poprzedzone jest orientacją wzajemną i bezwzględną. Różne położenie punktów głównych i wielkości stałych kamer można uwzględnić na etapie orientacji wewnętrznej [*Kolondra, 1999*], ale program nie przewiduje wprowadzenia indywidualnych wielomianów dystorsji.

Jak wspomniano uprzednio, pole testowe składa się z punktów o współrzędnych określonych metodą geodezyjną, rozmieszczonych na ścianie, zatem w przybliżeniu na płaszczyźnie. Dla celów kalibracji i badań dokładności wzbogacane jest o zestaw punktów umieszczonych na pionowych linkach w pewnej odległości od ściany, współrzędne ich określa się w trakcie samokalibracji. Są one zatem znane do celów badania dokładności, aczkolwiek dokładność wyznaczenia ich położenia jest inna niż punktów na ścianie i zależy od sieci samokalibracji.

Warunki fotogrametrycznego wcięcia w przód podczas testowania były różne, ponieważ miały odpowiadać przewidywanej konfiguracji położenia kamer względem mierzonego obiektu dla danego zastosowania. I to wydaje się mieć decydujący wpływ na dokładność otrzymanych wyników. Nie, jak przypuszczano, rozdzielczość i powtarzalność elementów orientacji wewnętrznej. Wyraźnie to widać przy porównaniu wyników otrzymanych za pomocą zobrazowań z Minolty (najwyższa rozdzielczość i bardzo dobra stabilność orientacji wewnętrznej ale słabe warunki wcięcia) z wynikami z Kodaka DC200 (najmniejsza rozdzielczość, korzystna konfiguracja). Zaskakuje wysoka dokładność otrzymana z pomiaru za pomocą aparatu z pamięcią ostrości – Camedią C-1400L. Okazuje się, że umiejętnie postępowanie z tym aparatem może zapewnić dobre wyniki. Zdjęcia z tego aparatu posłużyły również do zbadania dokładności pomiaru płaskiego obiektu. Wykonano przetworzenie zdjęcia na płaszczyznę testu za pomocą transformacji rzutowej płaszczyzny na

plaszczynę. Zdjęcie wykonano z odległości około 3m od testu dla ogniskowej wynikającej z wypełnienia testem kadru i automatycznego ogniskowania, po transformacji na cztery punkty dostosowania otrzymano średni błąd wpasowania na 161 punktach kontrolowanych odpowiednio: $m_x = \pm 8,1$ mm i $m_z = \pm 11,5$ mm. Po poprawieniu współrzędnych obrazowych o wpływ dystorsji błędy na punktach kontrolowanych uległy wyraźnemu zmniejszeniu do: $m_x = \pm 1,6$ mm i $m_z = \pm 1,0$ mm. Mimo, iż dystorsja wyznaczona była dla innej ogniskowej i innej odległości obrazowej ($f = \text{minimum}$ i $d = \infty$) wprowadzone poprawki znacznie poprawiły pomiar.

Tabela 3.

Rodzaj aparatu	Sposób kalibracji	Warunki wykonania pomiaru	Metoda opracowania pary zdjęć	M_x [mm]	M_y [mm]	M_z [mm]	M_p [mm]	M_p/Y
Minolta RD 175	Kalibrowany obiektyw AF20/2,8 ogniskowanie: ∞	Zdjęcia wykonane jednym aparatem, normalne i poziome B/Y=1/6, punkty pola przestrzenne	Pomiar i opracowanie na VSD, pięć punktów dostosowania	0,9	2,8	0,7	3,0	1/1000
Kodak DC 260	Aparaty sterowane z komputera, kalibracja dla $f=37$ mm, $d=10m$	Zdjęcia wykonywane dwoma aparatami sterowanymi z komputera prawie normalne i poziome, B/Y=1/2, punkty pola przestrzenne	ORIENT, el. or. wewn. i dystorsja indywidualne dla obu aparatów, cztery punkty dostosowania	0,7	4,7	1,5	5,0	1/1400
			VSD el.or.wewn.i dystorsja uśrednione	0,8	5,4	1,6	5,7	1/1228
Kodak DC 260	Aparat sterowany manualnie, dla $f=\text{min}$, $d=3m$	Zdjęcia wykonane jednym aparatem, prawie normalne i poziome, B/Y=1/4, punkty pola przestrzenne	ORIENT, pięć punktów dostosowania	0,5	2,0	0,4	2,1	1/1428
			VSD	0,5	1,9	0,5	2,0	1/1500
Kodak DC 200	Aparaty <i>free focus</i>	Zdjęcia wykonywane dwoma aparatami B/Y=1/1.5, zbieżne, punkty pola przestrzenne	VSD, or. wzajemna i bezwzględna programem autorskim, el. or. wewn. i dystorsja indywidualne, cztery punkty dostosowania	1,0	1,3	1,0	1,9	1/1500
			El.or.wewn. i dystorsja uśrednione	1,3	1,6	1,4	2,5	1/1200
Camedia C-1400L	Aparat z pamięcią ostrości, kalibrowany dla zoom=min i na ∞	Zdjęcia zbieżne, B/Y=1/2, punkty pola przestrzenne	ORIENT cztery punkty dostosowania	1,2	2,6	1,1	3,1	1/2250
Camedia C-2000	Kalibracja dla zoom=min i dla ∞	Zdjęcia zbieżne, B/Y=1/4 punkty pola przestrzenne	ORIENT Cztery punkty dostosowania	0,7	2,7	1,2	3,0	1/1333

Wnioski

1. Wszystkie badane aparaty charakteryzowały się stabilnym systemem zapisu obrazu;
2. Aparaty wyposażone w obiektyw typu *zoom* (Kodak DC 260) nie zapewniają powtarzalności nastawień ogniskowej i ogniskowania przy obsłudze manualnej;
3. Do opracowań fotogrametrycznych wymagających znajomości danych z kalibracji najlepiej jest wykorzystywać aparaty stałogniskowe z możliwością wyłączenia funkcji autofocus (Minolta RD 175), aparaty bez ogniskowania tzw. ślepe (Kodak DC200), lub z ogniskowaniem na stałe wartości (Olympus Camedia C-2000) ewentualnie z obiektywem typu *zoom* lecz tylko przy sterowaniu aparatem za pośrednictwem komputera (Kodak DC 260);
4. Stwierdzono podobieństwo współczynników dystorsji dla aparatów tego samego producenta, co można wykorzystać stosując je z pewnym przybliżeniem dla aparatu niekalibrowanego o tym samym typie obiektywu;
5. Uzyskane dokładności odtworzenia przestrzennych współrzędnych obiektu testowego na podstawie par skalibrowanych obrazów cyfrowych (Tabela 3) pokazują możliwości praktycznych zastosowań tych aparatów w fotogrametrii.

Literatura

1. Jachimski J., Trocha W., 1992, *Determination of the position of crosses with the subpixel accuracy on the image taken with CCD Camera*, The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.XXIX, Washington;
2. Boroń A., 1998, *Przydatność aparatu cyfrowego Minolta RD 175 w fotogrametrycznych opracowaniach cyfrowych*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji;
3. Tokarczyk R., Mikrut S., 1999, *Fotogrametryczny system cyfrowy bliskiego zasięgu do pomiarów ciała ludzkiego dla potrzeb rehabilitacji leczniczej*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol.9;
4. Gul M., Tokarczyk R., 1999, *Przestrzenna rekonstrukcja zabytkowego obiektu*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol.9;
5. Boroń A., Tokarczyk R., 1999, *Ocena dokładności rekonstrukcji obiektu z wykorzystaniem aparatu cyfrowego Kodak DC 260*, Zeszyty Naukowe AGH, Geodezja;
6. Kolondra L., 1999, *Korekcja orientacji wewnętrznej aparatów cyfrowych do opracowań na autografie VSD-AGH*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol.9.

Recenzował: dr inż. Andrzej Wróbel