

**Ocena dokładności rekonstrukcji obiektu z wykorzystaniem aparatu cyfrowego
Kodak DC 260^{**}.**

Wstęp

Tradycyjnym i nadal jeszcze stosowanym rodzajem zobrazowania w fotogrametrii jest zdjęcie – obraz fotograficzny. Uzyskanie go wymaga przeprowadzenia procesu negatywowego. Czynność ta eliminuje zastosowanie tego rodzaju zobrazowań do pomiarów w czasie rzeczywistym lub w sytuacjach, gdzie wynik jest oczekiwany już na miejscu pomiaru.

Aktualnie bardzo dynamicznie rozwija się fotogrametria cyfrowa, która bazuje na obrazach cyfrowych, a do opracowań fotogrametrycznych stosuje komputery wyposażone w specjalistyczne oprogramowanie tzw. cyfrowe stacje robocze.

Obrazy cyfrowe stosowane w fotogrametrii można otrzymać generalnie dwoma sposobami. Pierwszy z nich polega na zeskanowaniu zdjęć analogowych (fotograficznych) stosując wysokorozdzielcze skanery fotogrametryczne, drugi na pozyskaniu obrazów za pomocą specjalnych sensorów: kamer cyfrowych lub skanerów. Obecnie najczęściej wykorzystywany jest pierwszy ze sposobów, jednak nie eliminuje on „wąskiego gardła” fotogrametrii – procesu negatywowego.

Najbardziej optymalnym jest wykorzystanie kamer cyfrowych, zaopatrzonych w matrycę CCD, w których pozyskiwany jest obraz od razu w postaci cyfrowej. Niestety z wysoką rozdzielczością tych kamer idzie w parze ich wysoka cena, a i tak nie dorównują rozdzielczością obrazom analogowym ; również formaty płytek CCD cyfrowych kamer są jeszcze bardzo małe. Niemniej jednak kamery cyfrowe mają już znaczący udział w pozyskiwaniu obrazów cyfrowych, zwłaszcza w zastosowaniach nietopograficznych.

Jak już wspomniano powyżej kamery cyfrowe o dużej rozdzielczości (rzędu kilku do kilkunastu milionów elementów pojedynczego obrazu) są urządzeniami bardzo drogimi, powstały one zazwyczaj na bazie analogowych kamer metrycznych lub też wysokiej klasy aparatów fotograficznych, elementy konstrukcyjne oraz optyka są pozostawione, natomiast w miejscu pomieszczenia na materiał negatywowo umieszczono płytkę CCD.

Oprócz kamer cyfrowych produkowany jest szereg fotograficznych aparatów cyfrowych, o znacznie mniejszej rozdzielczości, ale i też niższej cenie. Ze względu na niewielkie rozmiary płytek CCD mają one niewielki kąt widzenia obrazu. Są to często aparaty typu *compact*, zatem nie ma możliwości stosowania wymiennych obiektywów. Wiele z nich pracuje tylko w trybie automatycznego ustawiania ostrości, odległość obrazowa jest dostosowywana każdorazowo do odległości fotografowanego obiektu, w związku z tym nie ma możliwości

^{*} Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska

^{**} Praca wykonana w ramach badań statutowych 11.150.47 „Metody i przyrządy fotogrametrycznych, teledetekcyjnych i geoinformatycznych systemów pozyskiwania, przetwarzania i udostępniania informacji o terenie

ich kalibracji poza pomiarem, wymuszana jest samokalibracja. Wiąże się ona z wykonaniem dla opracowania fotogrametrycznego co najmniej kilku zdjęć (najlepiej zbieżnych), wymaga stosowania skomplikowanego aparatu obliczeniowego i nadaje się głównie do opracowań punktowych. Tymczasem wiele opracowań fotogrametrycznych wymaga stereoskopowego pomiaru par zdjęć o znanych elementach orientacji wewnętrznej i dystorsji obiektywu.

Charakterystyka aparatu cyfrowego Kodak DC260

Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH aktualnie posiada dwa fotograficzne aparaty cyfrowe: Minolta RD 175 i Kodak DC 260. Wyniki badania dokładności pomiaru fotogrametrycznego z wykorzystaniem Minolty były prezentowane na Ogólnopolskim Sympozjum Naukowym. "Obrazy cyfrowe w Fotogrametrii, Teledetekcji oraz GIS" w czerwcu 1998 r w Krakowie [Boroń A. 1998].

Kodak DC260 jest aparatem typu *compact* z obiektywem o zmiennej ogniskowej (zoom) w zakresie ekwiwalentnym 38,4 do 115,2 mm, co odpowiada rzeczywistemu zakresowi ogniskowej 8 – 24 mm. Pozwala na uzyskanie obrazów barwnych o maksymalnej rozdzielczości 1536 x 1024 zapisywanych na karcie PC, o pojemności 8 MB.

Ta karta pozwala na zapisanie do 14 skompresowanych obrazów o maksymalnej rozdzielczości i najwyższej jakości, w formacie JPEG lub FLASHPIX. Czułość przeliczeniowa aparatu wynosi 100 stopni ISO, zakres migawki 1/4 do 1/400 sekundy, apertura od $f/2,8$ do $f/22$. Jak wynika z informacji dostarczonych przez firmę KODAK, rozmiar piksela obrazu wynosi 4,85 x 4,85 μm , co daje format matrycy CCD 7,5 x 5 mm.

Zapisany na karcie PC obraz może być przekazany do pamięci komputera złączem USB, IrDA lub przez złącze RS-232. Do komunikacji aparatu z komputerem służy bogate oprogramowanie dostarczane na płycie CD:

- PHOTODELUXE i PAGEMILL Software V2 pozwalające na transport obrazów do programów firmy Adobe,
- KODAK DIGITAL SCIENCE Picture Easy Software , umożliwia obsługę aparatu z komputera i transfer obrazów,
- KODAK DC260 Zoom Camera Properties, pozwalające na obsługę i transfer z systemów WINDOWS,
- KODAK DC260 Zoom Camera Mounter Software dla Windows 95 i Windows NT 4.0, pozwala na obejrzenie, transfer i kasowanie obrazów z pamięci kamery.

Nastawianie parametrów fotografowania może się odbywać *via* komputer z wykorzystaniem dostarczonych programów lub też najczęściej bezpośrednio z aparatu korzystając z menu wyświetlanego na ekranie ciekłokrystalicznym lub pomocniczym displayu na korpusie aparatu. Nastawianie na ostro odbywa się w sposób automatyczny wykorzystując dwie metody pomiaru odległości lub w sposób ręczny wybierając odpowiednią odległość fotografowania z dostępnego menu w aparacie..

Poniżej przedstawiono w tabeli zestawienie najważniejszych parametrów technicznych aparatu Kodak DC 260.

Tabela 1.

Typ aparatu	Aparat cyfrowy z wbudowanym fleszem, funkcją autofocus i funkcją autoekspozycji
Tryby ogniskowania	Multi-Spot Auto Focus - wykorzystuje algorytm ustawiający ogniskowanie na podstawie trzech pozycji obiektywu Single-Spot Auto Focus - ustawia ogniskowanie na podstawie położenia przedmiotu ustawionego w osi obiektywu Manual Focus - ręczne nastawianie odległości fotografowania
Obiektyw	Kodak Ektanar F3,0-4,7 Autofocus 3 x zoom
Tryby ekspozycji	Programmed AE - automatyczny pomiar światła External Flash - ustawienie ręczne przysłony Long Time Exposure - ręczne ustawienie czasu ekspozycji
Finalna ilość pikseli obrazu	1.57 miliona pikseli
Finalna zdolność rozdzielcza	1536(h) x 1024(v) pikseli
Komunikacja z komputerem	Port seryjny RS-232, USB, IrDA
Wielkość obrazu (skompresowan)	526 KB
Metoda kompresji obrazu	Jpeg, Flashpix
Pamięć obrazów	8 MB karta pamięci Kodaka
Max. ilość obrazów.	14 o najwyższej jakości i rozdzielczości na kartę 8 MB
Rozdzielczość optyczna (CCD)	1548(h) x 1036(v) pikseli
Ilość pikseli optycznych (CCD)	1,60 miliona pikseli
Kompensacja bieli	Automatyczna (światło dzienne), świetlówka, żarówka wolframowa, wyłączone
Zapis koloru	24 bity (8 /R, 8/G, 8/B)
Czułość	ISO 100
Zakres migawki	1/4 - 1/400 s.
Obiektywy wymienne	Brak
Wielkość	118 x 57 x 106
Waga	0,5 kg

Badanie stabilności parametrów orientacji wewnętrznej obrazów cyfrowych

Nowoczesne aparaty cyfrowe, w których istnieje możliwość stosowania klasycznych (stałogniskowych) wymiennych obiektywów i pracy w trybie manualnym, umożliwiającym ręczne ustawianie ogniskowania obiektywu zapewniają bardzo wysoką powtarzalność elementów orientacji wewnętrznej obrazów cyfrowych. Badania stabilności obrazów cyfrowych przeprowadzone dla aparatu cyfrowego Minolta RD 175, reprezentującego powyższą grupę aparatów, potwierdziły bardzo wysoką powtarzalność zobrażeń, a tym samym umożliwiły, po wykonaniu kalibracji, wykorzystywanie go jako kamery metrycznej [Boroń, 1998].

W przypadku aparatu cyfrowego Kodak DC 260, którego konstrukcja jest różna od Minolty, należało powtórzyć badania stabilności dla uzyskania opinii o przydatności tego aparatu do precyzyjnych pomiarów fotogrametrycznych. Ponieważ Kodak DC 260 jest aparatem typu *compact* z niewymiennym obiektywem zmiennoogniskowym (zoom), z możliwością manualnego trybu ogniskowania ale bez możliwości manualnego ustawiania wartości ogniskowej, dlatego należało sprawdzić czy w tego typu sterowanych elektronicznie aparatach kompaktowych możliwe jest uzyskanie powtarzalności elementów orientacji wewnętrznej, warunkującej wykorzystanie ich w praktyce fotogrametrycznej.

Powtarzalność elementów orientacji wewnętrznej obrazów cyfrowych objawia się poprzez wierność geometryczną zobrażeń tego samego obiektu wykonanych z tego samego stanowiska przy wielokrotnym ustawianiu tych samych parametrów ogniskowania i ogniskowej. Nastawianie tych samych parametrów przy wielokrotnych ekspozycjach sprowadza się w przypadku ogniskowania do nastawiania na display aparatu tej samej odległości przedmiotowej, natomiast w przypadku ogniskowej do tak długiego przytrzymania przycisku „zoom”, aż silnik zmieniający ogniskową obiektywu zatrzyma się w skrajnym położeniu. Ponieważ zarówno realizacja nastawionego ogniskowania jak i ogniskowej odbywa się na drodze przesuwu obiektywu i elementów optycznych obiektywu z

wykorzystaniem silnika elektrycznego, dlatego od precyzji działania tego elektro-opto-mechanicznego zespołu zależeć będzie powtarzalność ustawień, a tym samym elementów orientacji wewnętrznej.

Przyjęty program testowych zobrazowań miał odpowiedzieć, po analizie geometrycznej, na pytanie: czy istnieje ich powtarzalność geometryczna, a w przypadku jej braku : jakimi czynnikami jest spowodowana.

Dla wykonania testowych obrazów aparat umieszczono na stabilnym statywie naprzeciw płaskiego pola testowego z równomiernie rozmieszczonymi punktami kontrolnymi. Zorientowano go w taki sposób aby punkty kontrolne dokładnie wypełniały cały kadr. Następnie wykonano 5 ekspozycji wg następującego programu:

1 ekspozycja: po włączeniu aparatu, nastawieniu ogniskowania (display) na odległość 3m. i doprowadzeniu do minimalnej ogniskowej (przycisk zmiany ogniskowej wciśnięty aż do samoczynnego wyłączenia silnika),

2 ekspozycja: powtórne wciśnięcie migawki bez zmiany jakichkolwiek ustawień,

3 ekspozycja: duża zmiana ogniskowej, a następnie powrót do skrajnego położenia (min. ogniskowa),

4 ekspozycja: zmiana ogniskowej i powrót do skrajnego położenia (tak samo jak w trzeciej),

5 ekspozycja: wyłączenie aparatu i powtórne włączenie z ustawieniem parametrów tak jak przy pierwszej ekspozycji.

Do analizy powtarzalności zobrazowań wybrano 7 punktów kontrolnych rozmieszczonych równomiernie na powierzchni obrazu. Pomiary współrzędnych tych punktów na obrazach cyfrowych wykonano z wykorzystaniem analitycznego autografu cyfrowego VSD, przy stałym 10 krotnym powiększeniu obrazu (rozdzielczość pomiaru 0.1 piksela). Dla określenia dokładności pomiaru wykonano wielokrotny pomiar na jednym obrazie. Przeciętna wartość odchylenia standardowego na mierzonych punktach dla współrzędnej X i Y wyniosła ± 0.15 piksela. Wielkość ta będzie stanowić kryterium powtarzalności położenia tych samych punktów na pozostałych obrazach. Następnie pomierzono te same punkty kontrolne na pozostałych 4 obrazach. Porównanie współrzędnych pomierzonych punktów kontrolnych wykonano w stosunku do pierwszego zarejestrowanego obrazu. Po obliczeniu różnic współrzędnych stwierdzono, że wysoką powtarzalność (w granicach błędu pomiaru) uzyskano jedynie pomiędzy obrazem 1 i 2 (Tab. 2). Wynik ten świadczy o tym, że po ustawieniu parametrów dla obiektywu kolejne wyzwolenie migawki (bez wyłączenia aparatu i bez zmiany tych parametrów) nie powoduje zmian elementów orientacji wewnętrznej obrazu. Wniosek ten, który wydaje się oczywisty, wymagał jednak zbadania ponieważ po wyzwoleniu migawki z aparatu dobiegają się dźwięki wskazujące na pracę silnika elektrycznego obiektywu pomimo, że nie ma powodu do jego uruchomienia. W pozostałych trzech obrazach, dla których ustawiano niezależnie minimalną ogniskową różnice współrzędnych są bardzo duże i zmienne dla różnych obrazów (maksymalnie osiągając wartość powyżej 4 pikseli). Powodem tak dużych różnic jest działanie mechanizmu zmiany ogniskowej obiektywu. Prawdopodobnie nie ma powtarzalności ustawienia kąтового elementów optycznych obiektywu względem siebie, co powoduje zmiany w rzutowaniu środkowym obiektu na płytkę CCD. Potwierdzeniem rzutowego charakteru tych zmian są wyniki transformacji rzutowej poszczególnych obrazów na pierwszy. Przeciętny błąd średni dla wszystkich obrazów, po transformacji rzutowej, wyniósł $m_p = \pm 0.17$ piksela (Tab. 2) i odpowiada dokładności pomiaru punktów.

Wyniki porównania współrzędnych z wszystkich obrazów z obrazem wyjściowym pokazują, że można wyodrębnić w tych różnicach czynniki systematyczne, których wpływ na elementy orientacji wewnętrznej interpretować można jako niestabilność położenia punktu głównego w układzie obrazu cyfrowego. Po wyeliminowaniu tych czynników błędy

powtarzalności m_p dla obrazów 3, 4 i 5 zawierają się w przedziale od 0.62 do 0.85 piksela, co odpowiada w skali obrazów przedziałowi 3.0 - 4.2 μm . Wydaje się, że błędy określenia położenia punktu głównego dochodzące nawet do kilku pikseli (Tab. 2) nie muszą mieć bardzo istotnego znaczenia ponieważ spowodowana nimi decentracja odtwarzanej wiązki promieni rzutujących jest korygowana w trakcie analitycznego określania kątowych elementów orientacji zewnętrznej.

Wykonanie transformacji Helmerta pozwoliło na określenie zmian skali pomiędzy pierwszym obrazem, a pozostałymi. Z analizy wyników zawartych w tabeli 2 widać, że maksymalną zmianę skali Δm o 0.11% zaobserwowano pomiędzy obrazem 1 i 3. Taka zmiana skali odpowiada zmianie długości ogniskowej o 1.9 piksela oraz maks. błędowi odtworzenia kierunku promienia rzutującego 0.03^g. Stwierdzone błędy niestabilności elementów orientacji wewnętrznej obrazów nie mają charakteru systematycznego, dlatego obciążać one będą wyniki opracowania. Podsumowując można stwierdzić, że im bardziej parametry zobrazowania będą zbliżone do tych przy których wykonano kalibrację aparatu tym wyższą uzyskamy dokładność opracowania. Jedynym sposobem eliminacji tych błędów jest opracowanie zdjęć metodą samokalibracji.

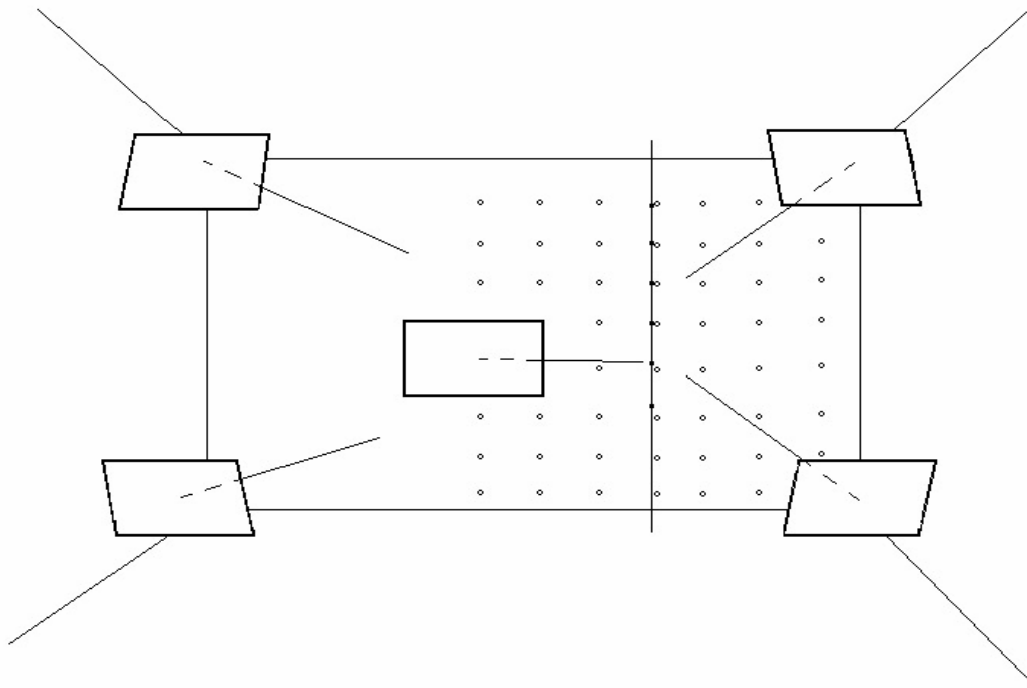
Tabela 2

Obrazy	Porównanie współrzędnych					Transformacja Helmerta				Transformacja rzutowa		
	Czynnik System. X	Czynnik system. Y	m_x	m_y	m_p	m_x	m_y	m_p	Δm	m_x	m_y	m_p
	[piksele]	[piksele]	[piksele]	[piksele]	[piksele]	[piksele]	[piksele]	[piksele]	%	[piksele]	[piksele]	[piksele]
1 i 2	0.04	-0.01	0.16	0.21	0.27	0.13	0.09	0.15	0.02	0.10	0.06	0.12
1 i 3	4.07	-1.94	0.61	0.57	0.85	0.22	0.20	0.30	0.11	0.12	0.18	0.22
1 i 4	0.38	-1.01	0.42	0.46	0.62	0.21	0.15	0.26	0.08	0.13	0.10	0.17
1 i 5	3.36	-2.78	0.56	0.62	0.84	0.29	0.29	0.41	0.10	0.06	0.18	0.19

Kalibracja aparatu

Pole testowe użyte do badań nad stabilnością posłużyło też do skalibrowania aparatu. Kalibracja ma na celu określenie parametrów rzutu środkowego, za jaki uważa się zarejestrowany obraz utworzony przez obiektyw. Parametrami kalibracji są wielkości pozwalające na umiejscowienie środka rzutów względem płaszczyzny obrazu oraz parametry określające błędy obrazu (zazwyczaj jest to dystorsja obiektywu). Użycie do pomiarów zdjęć wykonanych skalibrowaną kamerą daje wiele korzyści: pozwala na zmniejszenie ilości punktów dostosowania, zmniejszenie ilości wykonywanych zdjęć, uproszczenie aparatu obliczeniowego, umożliwia również opracowanie zdjęć na autografach.

Do 160 punktów płaskiego pola, którego współrzędne zostały określone drogą pomiaru geodezyjnego z dokładnością: $m_x = \pm 0,2$ mm, $m_y = \pm 0,3$ mm, $m_z = 0,2$ mm dodano 6 punktów o nieznanymi współrzędnymi, znajdujących się na pionowym drucie umieszczonym w odległości około 1m od ściany z polem testowym. Wykonano pięć zdjęć z odległości około 3 m rozmieszczonych tak, aby sieć z nich utworzona była optymalna dla kalibracji (Rys 1). Dla wyeliminowania, stwierdzonych wcześniej, błędów niestabilności obrazów obiektywu zmiennoogniskowego zdjęcia do kalibracji wykonane zostały bez wyłączania aparatu i bez zmiany parametrów pomiędzy ekspozycjami (przypadek zdjęć 1 i 2 w Tab. 1).



Rys.1 Szkic rozmieszczenia zdjęć do kalibracji

Parametry kalibracji określono dla najmniejszej wartości ogniskowej (pokrętko zoom-a w lewo do oporu) i ogniskowaniu na odległość 3 m.

Współrzędne wszystkich punktów pola widocznych na obrazach pomierzono na VSD, zredukowano je do środka formatu obrazu wykorzystując funkcję orientacji wewnętrznej autografu. Punkty mierzono przy powiększeniu dziesięciokrotnym, dla zwiększenia dokładności pomiaru obraz był filtrowany.

Obliczenie i wyrównanie sieci metodą samokalibracji dokonano z użyciem pakietu ORIENT. Jest to program obliczenia i wyrównania sieci fotogrametrycznych metodą niezależnych wiązek. Przyjęto jako znane współrzędne wszystkich punktów pola na ścianie wyznaczone z pomiaru geodezyjnego, natomiast współrzędne punktów na drucie, elementy orientacji zdjęć i parametry kalibracji były niewiadomymi obliczanymi w procesie samokalibracji. Dodanie punktów na drucie do płaskiego pola miało swoje uzasadnienie w zwiększeniu dokładności rozwiązania sieci samokalibracji.

Obliczanymi parametrami kalibracji wspólnymi dla wszystkich zdjęć były współrzędne

punktu głównego x_0 i y_0 , odniesione do środka obrazu, odległość obrazowa c_k oraz parametry wielomianu dystorsji postaci:

$$\Delta x = K_1 x(r^2 - 1) + K_2 x(r^4 - 1) + P_1(r^2 + 2x^2) + P_2 2xy$$

$$\Delta y = K_1 y(r^2 - 1) + K_2 y(r^4 - 1) + P_1 2xy + P_2(r^2 + 2y^2)$$

gdzie:

Δx , Δy to poprawki do współrzędnych tłowych x i y wyrażające wpływ dystorsji obiektywu,

K_1 , K_2 to parametry dystorsji radialnej,

P_1 , P_2 - parametry dystorsji tangencjalnej,

R - promień radialny od punktu głównego zdjęcia do punktu mierzonego,

x i y - znormalizowane współrzędne tłowe, czyli wydzielone przez taką wartość promienia radialnego R_0 , dla której chcemy, aby wpływ dystorsji był równy zeru.

Wielomian zawiera dwa parametry dystorsji radialnej (pierwszego i trzeciego stopnia) i dwa parametry dystorsji tangencjalnej. Taką postać dystorsji przyjęto jako najlepiej aproksymującą błędy obiektywu korzystając z wieloletnich doświadczeń z kalibracją kamer niometrycznych.

W wyniku kalibracji otrzymano następujące parametry z błędami ich wyznaczenia:

$$x_0 = -3,38 \text{ pxl} \pm 1,73 \text{ piksela}$$

$$y_0 = 18,58 \text{ pxl} \pm 1,90 \text{ piksela}$$

$$c_k = 1690,67 \text{ pxl} \pm 0,43 \text{ piksela}$$

$$K_1 = -6,66655 \pm 0,14$$

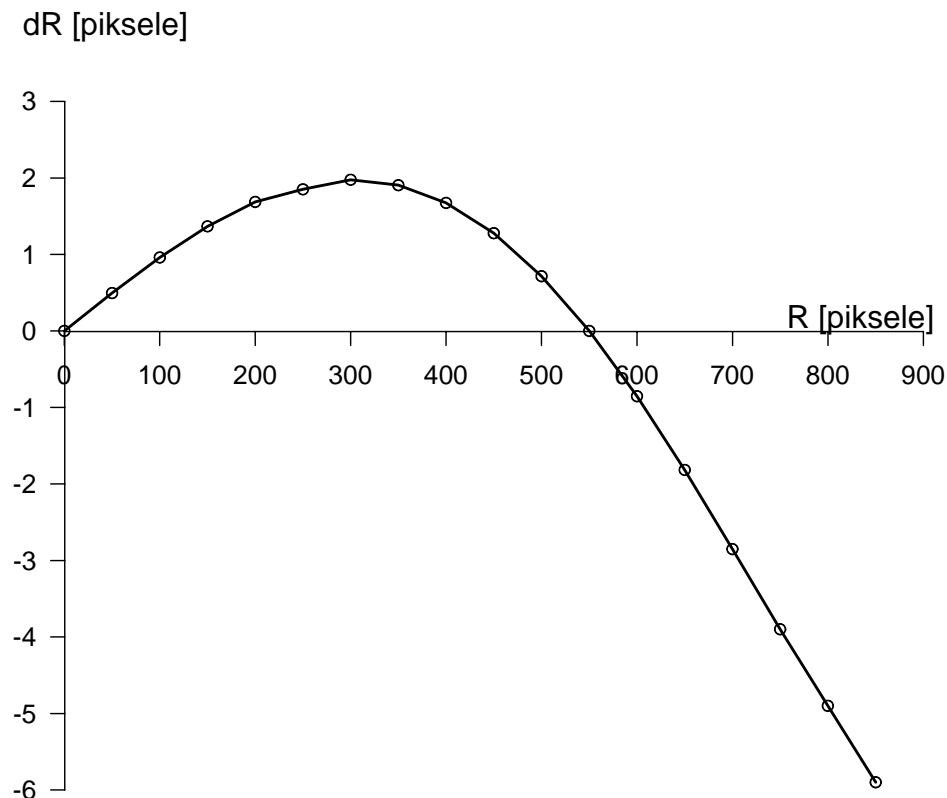
$$K_2 = 1,16478 \pm 0,05$$

$$P_1 = 0,233045 \pm 0,06$$

$$P_2 = -0,063340 \pm 0,06$$

dla promienia normującego R_0 (promienia zerowej dystorsji radialnej) równego 550 pikseli.

Na Rys.2 przedstawiono wykres dystorsji radialnej. Dla przyjętego promienia normującego maksymalne wartości tej dystorsji wewnątrz okręgu o średnicy R_0 sięgają około 2 pikseli, natomiast gwałtownie rosną na brzegach obrazu, osiągając około 6 pikseli.



Rys.2. Wykres dystorsji radialnej

Odchylenie standardowe dla sieci zdjęć po wyrównaniu wyniosło $\sigma_0 = \pm 0,17$ piksela.

Należy zwrócić uwagę na znaczące wielkości parametrów dystorsji tangencjalnej, wpływ tej dystorsji jest większy niż w aparatach fotograficznych o obiektywach o stałej ogniskowej, co jest spowodowane bardziej złożonym optycznie obiektywem zmienneogniskowym.

Bardzo mała wartość błędu σ_0 dla sieci zdjęć, odpowiadająca w skali obrazu $0,8 \mu\text{m}$ świadczy o stabilności obrazów użytych do kalibracji.

Sprawdzenie dokładności pomiaru testowego

Opracowania stereoskopowe stanowią znaczną część pracowań fotogrametrycznych, zwłaszcza tam, gdzie nie ma możliwości sygnalizacji wyznaczanych punktów obiektu.

Aby przekonać się, jakie dokładności takiego pomiaru fotogrametrycznego można uzyskać wykorzystując do tego celu obrazy z badanego aparatu, wykonano stereogram zdjęć (w przybliżeniu normalnych i poziomych) tego samego pola testowego, na którym wykonywano kalibrację. Nastawienia ogniskowej i odległości fotografowania były takie jak przy kalibracji, stosunek bazowy 1:4.

Do opracowania stereogramu użyto pakietu ORIENT oraz VSD. Należy wspomnieć, że oba te systemy rozwiązują zagadnienie obliczenia współrzędnych punktów innymi sposobami: ORIENT metodą wiązki z równoczesnym wyrównaniem wyznaczanych współrzędnych punktów i elementów orientacji zdjęć, natomiast na VSD wykonuje się orientację wzajemną, budowę modelu i jego orientację bezwzględną.

Dla porównania wyników obu metod w obu przypadkach użyto tych samych 5 punktów dostosowania, cztery w płaszczyźnie ściany, jeden na drucie, (współrzędne tego ostatniego wyznaczone zostały w procesie samokalibracji) oraz tych samych współrzędnych tłowych punktów kontrolowanych. Uwzględniano wszystkie parametry dystorsji obiektywu wyznaczone z kalibracji.

Współrzędne tłowe zdjęć do obliczeń metodą wiązki zostały wykorzystane z pomiaru na

VSD, przy opracowaniu stereogramu. Obliczenia ORIENTEM dały następujące błędy na punktach kontrolowanych:

$$m_x = \pm 0,46 \text{ mm}$$

$$m_y = \pm 2,02 \text{ mm}$$

$$m_z = \pm 0,42 \text{ mm}$$

Przy opracowaniu stereogramu na VSD w pierwszym etapie dokonano transformacji do środka zdjęć, potem wykonano orientację wzajemną wykorzystując do tego celu 24 punkty rozmieszczone równomiernie na modelu (w płaszczyźnie ściany i na drucie). Orientacja wzajemna poprzedzona została wprowadzeniem elementów orientacji wewnętrznej i dystorsji radialnej i tangencjalnej. Szczątkowa paralaksa poprzeczna po orientacji wzajemnej wyniosła $m_q = \pm 0.24$ piksela, czyli $1.1 \mu\text{m}$ w skali obrazu. Następnie wykonano orientację bezwzględną na pięć punktów dostosowania. W wyniku transformacji modelu na punkty dostosowania uzyskano dokładność wpasowania:

$$m_x = \pm 1,36 \text{ mm}$$

$$m_y = \pm 1,47 \text{ mm}$$

$$m_z = \pm 1,17 \text{ mm}$$

W dalszej kolejności pomierzono na VSD wszystkie punkty przestrzennego pola testowego (punkty na ścianie i drucie). W wyniku porównania współrzędnych tych punktów z pomiaru na VSD ze współrzędnymi wzorcowymi (z pomiaru geodezyjnego – na ścianie i samokalibracji – na drucie) uzyskano następujące błędy:

$$m_x = \pm 0,49 \text{ mm}$$

$$m_y = \pm 1,90 \text{ mm}$$

$$m_z = \pm 0,50 \text{ mm}$$

Jak widać z porównania, obie metody dają prawie identyczne dokładności wyznaczanych punktów. Mimo, że należałoby się spodziewać przewagi dokładności obliczenia metodą równoczesnego wyrównania sieci wiązek (ORIENT), algorytm obliczeniowy stosowany w VSD przy dobrze zbudowanym modelu po orientacji wzajemnej daje równie dobre wyniki.

Podsumowanie

Dokładność sytuacyjna na punktach wyznaczonych $m_x = m_z = \pm 0.50$ mm odpowiada we współrzędnych obrazowych wartości $m_x = m_z = \pm 0.3$ piksela, a we współrzędnych tłowych $m_x = m_z = \pm 1.4 \mu\text{m}$. Błąd w kierunku Y (w kierunku głębokości pola) jest czterokrotnie większy, zgodnie ze współczynnikiem bazowym 1:4.

Uzyskanie tak dobrych wyników wskazuje na bardzo dobre wyeliminowanie błędów systematycznych tzn. poprawne wyznaczenie parametrów kalibracji oraz uzyskanie dla obrazów stereogramu dobrej powtarzalności elementów orientacji wewnętrznej w stosunku do obrazów wykorzystanych do kalibracji. Należy się liczyć jednak z wynikami gorszymi od uzyskanych, gdy ustawienie obiektywu zoom będzie odbiegać od zrealizowanego podczas kalibracji. Wyniki badań stabilności zobrazowań pokazują, że błąd określenia punktu na zdjęciu może być nawet dwukrotnie większy ($m_x = m_z = \pm 0.6$ piksela) niż uzyskany dla testowego stereogramu. Niemniej jednak uzyskane wyniki świadczą o tym, że aparaty

kompaktowe o dużej rozdzielczości, których przedstawicielem jest Kodak DC 260 mogą być z powodzeniem stosowane

Literatura

Boroń A.,1998, *Przydatność aparatu cyfrowego Minolta RD 175 w fotogrametrycznych opracowaniach cyfrowych*. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol.8, Kraków.

Adam Boroń

Regina Tokarczyk

**Ocena dokładności rekonstrukcji obiektu z wykorzystaniem aparatu cyfrowego
Kodak DC 260**

Streszczenie

Przedmiotem artykułu jest przedstawienie wyników badania aparatu cyfrowego typu *compact* Kodak DC 260 w aspekcie wykorzystania go w dokładnych opracowaniach fotogrametrycznych. Wykonano badania powtarzalności elementów orientacji wewnętrznej obrazów. Stwierdzono brak powtarzalności zobrazowań charakteryzujących się max. błędem położenia punktu głównego rzędu 4 pikseli i max. zmiennością stałej kamery o 0.11%. Skalibrowano aparat na przestrzennym polu testowym wyznaczając elementy orientacji wewnętrznej oraz parametry dystorsji radialnej i tangencjalnej. Wykonano testowy stereogram dla uzyskania informacji o dokładności rekonstrukcji obiektu przestrzennego z wykorzystaniem wyznaczonych w procesie samokalibracji elementów orientacji wewnętrznej. Stereogram opracowano analitycznie programem Orient metodą wiązek oraz na analitycznym autografie cyfrowym VSD jako pojedynczy model. Otrzymano praktycznie takie same wyniki dla obydwu metod: $m_x = m_z = \pm 0.50$ mm, co odpowiada we współrzędnych obrazowych wartości $m_x = m_z = \pm 0.3$ piksela, a we współrzędnych tłowych $m_x = m_z = \pm 1.4$ μ m. Dokładność w kierunku Y (głębokość) wyniosła $m_y = \pm 2.0$ mm. Uzyskanie tak dobrych wyników wskazuje na bardzo dobre wyeliminowanie błędów systematycznych oraz prawdopodobnie dobrą zgodność elementów orientacji wewnętrznej stereogramu z elementami wyznaczonymi z kalibracji.

Adam Boroń
Regina Tokarczyk

Accuracy of object reconstruction with using digital amateur camera Kodak DC 260

Abstract

Possibilities of the application of digital camera like Kodak DC 260 in photogrammetric works were tested. Results of the researches were in the paper presented. Repeatability of inner orientation elements of the images was evaluated. Repeatability of accuracy of principal point position about 4 pixels and maximal variability of camera constant about 0.11% was obtained. Camera was calibrated using a spatial test and radial and tangential distortion was calculated. Test stereogram was recorder for the estimation of the accuracy of spatial object reconstruction basing on inner orientation elements, calculated in self-calibration procedure.

Stereogram was analytical adjusted by bundle method using Orient program. Stereogram was calculated also on digital stereoplotter: VSD as a single model. Two methods gave similar results: $m_x=m_z= \pm 0.50$ mm, in pixel coordinates, respectively: $m_x=m_z= \pm 0.3$ of pixel and in image coordinates: $m_x=m_z= \pm 1.4$ μ m. Accuracy in Y direction (depth) was equal $m_y= \pm 2.0$ mm. Finally high accuracy was obtained because of very good removal of systematic errors and good corresponding of inner orientation elements of stereo images to elements calculated in calibration procedure.