

## Rozwiązanie terratriangulacji łącznie z samokalibracją połową aparatu cyfrowego Kodak DC4800

Piotr Sawicki

Katedra Fotogrametrii i Teledetekcji  
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie  
10-957 Olsztyn, ul. M. Oczapowskiego 1

### Streszczenie

*Aktualnym zagadnieniem w fotogrametrii bliskiego zasięgu jest zastosowanie niometrycznych aparatów cyfrowych do wyznaczenia geometrii dużych obiektów 3D, np. w inwentaryzacji inżynierskiej oraz architektonicznej. W badaniach zarejestrowano obiekty testowe niometrycznym aparatem cyfrowym Kodak DC4800 o rozdzielczości  $2.2K \times 1.4K$ . Wykonano 12 par zdjęć zbliżonych do normalnych. Terratriangulację zdjęć cyfrowych łącznie z samokalibracją połową aparatu Kodak DC4800 rozwiązano metodą wiązek programem PICTRAN B. Fotogrametryczne wyznaczenie punktów z dokładnością  $M_p < \pm 20$  mm oraz parametry kalibracji aparatu cyfrowego uzyskano przy 20 fotopunktach na obiekcie.*

### 1. Wstęp

Współczesne fotogrametryczne metody bliskiego zasięgu, w zależności od przedmiotu i warunków rejestracji, coraz częściej wykorzystują do pomiaru zdjęcia w postaci cyfrowej. Obrazy cyfrowe pozyskiwane są dwoma sposobami – pośrednim i bezpośrednim. Sposób pośredni polega na skanowaniu zdjęć analogowych, wykonanych przeważnie kamerami metrycznymi lub semimetrycznymi. Bezpośrednią rejestrację wykonuje się za pomocą kamer cyfrowych lub fotograficznych aparatów cyfrowych typu *still video*. Barię powszechnego zastosowania profesjonalnych kamer o wysokiej rozdzielczości jest ich bardzo wysoka cena. Dotyczy to kamer np. UMK SCAN ( $15.4K \times 11K$ ), Rollei RSC ( $4.5K \times 4.5K$ ), JenScan ( $4.5K \times 3K$ ) oraz np. serii aparatów cyfrowych firmy Eastman Kodak – DCS 460, 465, 760 ( $3K \times 2K$ ).

Aparaty cyfrowe stosowane w fotografii amatorskiej dysponują maksymalną rozdzielczością rzędu  $2.5K \times 1.5K$ . Ich zastosowanie w bliskim zasięgu ogranicza się obecnie do rejestracji oraz fotogrametrycznego pomiaru obiektów o niewielkich wymiarach, np. maszyny, urządzenia techniczne, obiekty i detale architektoniczne etc. (IAPRS, 1996, 2000). Wynika to ze zbyt małej rozdzielczości sensorów CCD oraz problemów związanych ze stabilnością parametrów kalibracji systemów optyczno-elektronicznych.

Aktualnym zagadnieniem jest więc zastosowanie amatorskich, fotograficznych aparatów cyfrowych do fotogrametrycznego wyznaczania geometrii i wymiarów dużych

obiektów 3D w różnych aplikacjach bliskiego zasięgu, np. w inwentaryzacji inżynierskiej (*reverse engineering*) oraz architektonicznej.

## 2. Charakterystyka aparatu cyfrowego Kodak DC4800

Cyfrowy aparat fotograficzny Kodak DC4800 typu *compact* posiada monolityczną budowę sensora CCD o maksymalnej rozdzielczości  $2160 \times 1440$  (3.3 MP). Wyposażony jest w obiektyw o zmiennej ogniskowej (zoom) w zakresie  $28 \text{ mm} \div 84 \text{ mm}$ . Zakres wartości ogniskowej w przeliczeniu na format 35 mm wynosi  $6 \text{ mm} \div 18 \text{ mm}$ . Kodak DC4800 może pracować w trybie automatycznego ogniskowania *Auto Focus* (pomiar TTL) oraz w trybie ze stałym ogniskowaniem *Fix Focus* w dwóch przedziałach:  $0.2 \text{ m} \div 0.5 \text{ m}$  i  $0.5 \text{ m} \div \infty$ . Układ optyczny posiada powiększenie obrazu:  $3 \times$  zoom optyczny i  $2 \times$  zoom cyfrowy. Ogniskowanie odbywa się za pomocą silnika elektrycznego poprzez osiowy ruch obiektywu. Precyzja działania tego elektryczno-mechaniczno-optycznego układu ma wpływ na powtarzalność ustawień, a tym samym na stabilność elementów orientacji wewnętrznej. Dobór czułości odpowiada standardowi ISO – 100, 200 lub 400. Czas otwarcia migawki realizowany jest w zakresie  $1/2 \div 1/1000 \text{ s}$ . a przy długich ekspozycjach  $0.7 \div 16 \text{ s}$ . Apertura przyjmuje wartości  $f/2.8$ ,  $f/5.6$ ,  $f/8$  a balans bieli w zakresie temperatury barwowej  $2.500 \div 10.000 \text{ }^\circ\text{K}$ . Aparat Kodak DC4800 może rejestrować zdjęcia pojedyncze i seryjne – przy małej rozdzielczości do 5 zdjęć/s. Nastawianie parametrów fotografowania oraz wstępne przetwarzanie obrazów odbywa się bezpośrednio z menu, wyświetlanego na ciekłokrystalicznym ekranie LDC aparatu (przekątna 45 mm) lub poprzez komputer za pomocą programu. Transfer zdjęć do komputera odbywa się łączem USB.

Wymiary matrycy CCD i piksela aparatu Kodak DC4800 nie zostały podane przez producenta. Wyznaczenie parametrów obrazu wykonano laboratoryjnie metodą przybliżoną, w warunkach rejestracji odpowiadających praktycznej realizacji zdjęć w terenie, tj. ogniskowa 6 mm, stałe ogniskowanie *Fix Focus*  $0.5 \text{ m} \div \infty$  i optyczny zoom = 1. Otrzymano następujące średnie wartości  $7.8 \text{ mm} \times 5.1 \text{ mm}$  ( $s'_H \times s'_V$ ) wymiarów sensora CCD oraz  $3.6 \text{ } \mu\text{m} \times 3.5 \text{ } \mu\text{m}$  ( $p'_H \times p'_V$ ) pojedynczego piksela. Elementy orientacji wewnętrznej  $c_K$ ,  $x'_0$ ,  $y'_0$  oraz dodatkowe parametry opisujące błędy systematyczne obrazu wyznaczono w trakcie samokalibracji laboratoryjnej (wyniki przedstawiono w tabeli 2), którą wykonano na podstawie silnie zbieżnych zdjęć przestrzennego pola testowego.

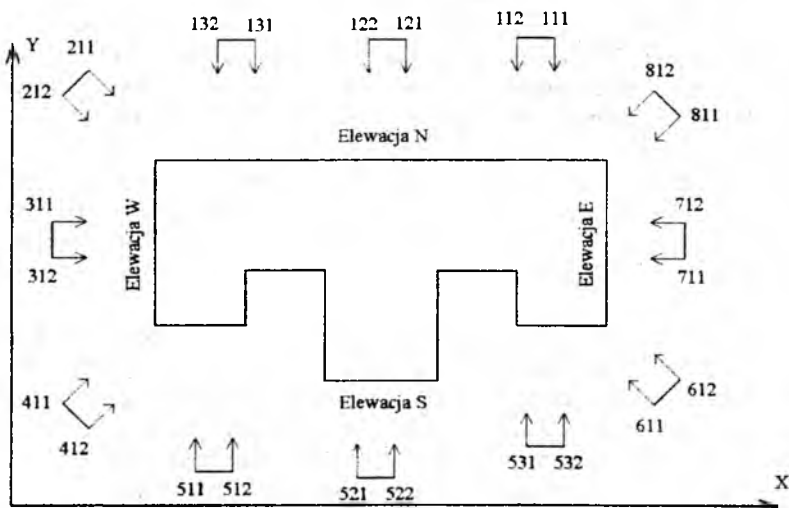
## 3. Założenia i warunki techniczne eksperymentu

Przeprowadzony eksperyment miał na celu zbadanie warunków i dokładności fotogrametrycznego wyznaczenia punktów obiektu o znacznych wymiarach na podstawie zdjęć cyfrowych o rozdzielczości  $2160 \times 1440$  wykonanych niemetrycznym aparatem cyfrowym Kodak DC4800. Podstawowym założeniem było wykonanie zdjęć o orientacji, która jednocześnie umożliwiałaby pełne opracowanie stereofotogrametryczne. W praktyce przypadek ten ma miejsce przy fotogrametrycznym zagęszczeniu osnowy na podstawie zdjęć zarejestrowanych w celu opracowania autogrametrycznego.

Fotogrametryczne rozwiązanie sieci zdjęć naziemnych połączone z samokalibracją aparatu Kodak DC4800 badano na obiekcie testowym, tj. budynku o wymiarach  $39 \text{ m} \times 15.5 \text{ m} \times 12 \text{ m}$ , który znajduje się na terenie Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie przy ul. R. Prawochenskiego 1. Na elewacjach budynku rozmieszczono równomiernie 49 specjalnych sygnałów *target* o wymiarach

odpowiadających liczbie 5–7 pikseli w skali obrazu cyfrowego (Dołd, 1996) oraz dodatkowo zidentyfikowano 75 strukturalnych punktów sytuacyjnych. Współrzędne 49 punktów sygnalizowanych wyznaczono w jednym globalnym układzie obiektu. Pomiar wykonano metodą wielokrotnych wcięć kątowych w przód z 7 punktów wcześniej założonej i wyrównanej osnowy geodezyjnej. Średni błąd określenia współrzędnej punktów sygnalizowanych wynosił  $m_{X,Y,Z} = \pm 4.5$  mm (Cieślik, Sobierańska, 2001). Współrzędne 75 punktów sytuacyjnych wyznaczone były fotogrametrycznie w procesie rozwiązania terratriangulacji.

Projekt wykonania zdjęć uwzględnił parametry techniczne kamery, kształt i wymiary obiektu oraz oszacowane a priori dokładności opracowania analitycznego. Ze stanowisk niestabilizowanych wykonano 12 stereogramów cyfrowych zdjęć naziemnych w przybliżeniu normalnych, lekko nachylonych. Zarejestrowano 8 stereogramów dla 4 elewacji oraz dodatkowo 4 stereogramy wiążące zdjęcia elewacji (Rys. 1). W istniejących warunkach opracowania geometrię sieci przestrzennej wzmocniono przez maksymalne powiększenie stosunku bazowego i wartości pokrycia podłużnego.



Rys. 1. Rozmieszczenie stanowisk fotografowania dla obiektu testowego 3D

Zdjęcia wykonane do opracowania analitycznego charakteryzowały następujące parametry zestawione w tabeli 1.

Tab. 1. Parametry zdjęć obiektu testowego

PARAMETRY ZDJĘĆ	
Ogniskowa	6 mm
Tryb ogniskowania; zoom	Fix Focus 0.5 m + ∞; zoom = 1
Format	JPEG bez kompresji
Rozdzielczość	2160 × 1440
Wielkość pliku	1MB
Odległość fotografowania $Y_f$	~ 16 m
Skala zdjęć I: Mz	~ 1: 2600
Stosunek bazowy $\nu$	1/4 ÷ 1/5
Pokrycie podłużne $p_x$	~ 80 %

#### 4. Rozwiązanie metodą wiązek fotogrametrycznej sieci naziemnych zdjęć cyfrowych

Wyznaczenie współrzędnych X,Y,Z z wysoką i homogeniczną dokładnością przez wyrównanie fotogrametrycznej sieci zdjęć naziemnych zależy od kompleksu czynników. Składają się na to m.in. parametry sensorów, konfiguracja zdjęć, parametry fotopunktów, jakość pomiaru oraz model funkcjonalny. Dokładność zależy też od metody rozwiązania bardzo często słabo uwarunkowanego i mało stabilnego numerycznie układu równań.

W przypadku opracowania cyfrowego istotne znaczenie odgrywa jakość obrazów, tj. wymiar matrycy, rozdzielczość, poprawność geometrycznego i radiometrycznego odwzorowania. Na obrazach pozyskanych kamerami i aparatami cyfrowymi występują typowe zniekształcenia geometryczne spowodowane błędami optycznymi obiektywu, takimi jak dystorsja radialna i tangencjalna. Dodatkowo pojawiają się charakterystyczne dla sensora CCD zniekształcenia geometryczne wywołane efektem zmiany stabilności i synchronizacji elektronicznego układu rejestracji, zmianą skali wzdłuż osi x sensora, błędem ortogonalności osi sensora, drganiem obrazu *line jitter* oraz błędami radiometrycznymi. Parametry te mogą być wyznaczone w trakcie skomplikowanego procesu laboratoryjnej kalibracji kamery. Konstrukcja aparatów cyfrowych, szczególnie gdy są one wyposażone w obiektywy typu *zoom* (Tokarczyk, Boroń, 2000), nie gwarantuje stabilności elementów orientacji wewnętrznej. W takim przypadku powinno się stosować technikę samokalibracji polowej *on the job*. Jest ona realizowana w trakcie rozwiązania zadania fotogrametrycznego i wymaga 20 ÷ 100 punktów o znanych współrzędnych (Regensburger, 1990). Wiarygodność i dokładność określenia parametrów kalibracji kamery zależy w decydującym stopniu od warunków opracowania.

W omawianym eksperymencie do badań zastosowano komercyjny pakiet PICTRAN B/D/E firmy technet GmbH, który pracuje w środowisku Windows. Program PICTRAN B realizuje metodę wiązek i umożliwia kombinowane wyrównanie obserwacji fotogrametrycznych i geodezyjnych. Standardowo wyznacza elementy orientacji przestrzennej zdjęć, współrzędne X,Y,Z punktów oraz opcjonalnie parametry kalibracji. W procesie kalibracji wyznaczane są podstawowe elementy orientacji wewnętrznej  $c_K, x'_0, y'_0$ . Możliwe jest też określenie 6 dodatkowych parametrów A1 ÷ A6, które opisują błędy systematyczne obrazu. Dystorsja radialna (parametry A1, A2) i tangencjalna (parametry A5, A6) aproksymowana jest za pomocą współczynników wielomianu Torlegard'a (Kraus, 1997). Dodatkowe parametry modelują zmianą skali sensora CCD wzdłuż osi x (parametr A3) i błąd ortogonalności osi (parametr A4). Program PICTRAN D/E wykorzystano do automatycznego (metoda LSM) i manualnego pomiaru współrzędnych pikselowych na obrazach cyfrowych.

We wszystkich wariantach obliczeniowych wykonano rozwiązanie metodą wiązek fotogrametrycznej sieci 24 niemetrycznych zdjęć cyfrowych. Badano wpływ liczby i konfiguracji fotopunktów (empirycznie szukano optymalnego rozmieszczenia w badanej przestrzeni) oraz wpływ modelu korekcji błędów systematycznych obrazu na dokładność estymacji współrzędnych punktów. Wyznaczane były współrzędne X, Y, Z punktów obiektu i elementy orientacji zewnętrznej każdego zdjęcia. Parametry kalibracji aparatu Kodak DC4800 traktowano jako niewiadome, przyjmując wartości przybliżone  $c_K = 1678.32, x'_0 = 0, y'_0 = 0$  oraz  $R_0 = 780$  pikseli. Optymalny model stochastyczny wyrównania określono empirycznie. Dokładność pomiaru współrzędnych pikselowych przed wyrównaniem oszacowano na  $\pm 0.33$  piksela, co w skali sensora CCD aparatu

Kodak DC4800 odpowiada wartości  $\pm 1.2 \mu\text{m}$ . Przyjęty średni błąd współrzędnych fotopunktów, które otrzymały status wielkości obserwowanych, wynosił  $m_{X,Y,Z} = \pm 4.5 \text{ mm}$  i był zgodny z dokładnością otrzymaną z pomiaru geodezyjnego.

Ocenę wyników wyrównania przeprowadzono na podstawie analizy błędów i kryteriów dokładności, które są wyliczane przez program PICTRAN B, tj. odchylenie standardowe  $\sigma_0$ , parametry wewnętrznej i zewnętrznej dokładności, parametry wewnętrznej i zewnętrznej wiarygodności, test wykrywania błędów grubych. Analizę uzupełniono o przeciętne wartości średniego błędu wyznaczenia współrzędnych  $M_X$ ,  $M_Y$ ,  $M_Z$  i punktu  $M_P$  oraz średnią odchyłkę kwadratową  $\Delta$  dla współrzędnych, liczoną na podstawie różnic współrzędnych fotogrametrycznych i geodezyjnych. We wszystkich analizowanych wariantach wartość odchylenia standardowego  $\sigma_0$  wynosiła  $\sim 1$  ( $0.7 < \sigma_0 < 1.3$ ), co świadczy o poprawności wpasowania wiązek. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 2.

Stwierdzono, że błędy obrazu najlepiej aproksymuje wielomian dystorsji zawierający pierwszy współczynnik dystorsji radialnej A1 i tangencjalnej A5 oraz dodatkowo parametr A3 modelujący zmianę skali wzdłuż osi x sensora CCD. Zdefiniowany model zgodny był z wynikami kalibracji laboratoryjnej (Tab. 2).

Parametry kalibracji, błędy wyrównania	Kalibracja laboratoryjna	Warianty rozwiązzań							
		1	2	3	4	5	6	7	8
		S - 49FP	S - 20FP	S - 16FP	SN - 49FP	SN - 20FP	SN - 16FP	SN - 8FP	SN - 8FP
$c_k$ [pxl]	1699.19	1698.97	1701.75	1698.78	1700.11	1697.13	1695.00	Dane z samokalibracji połowej (wariant 4)	
$m_{c_k}$ [pxl]	1.68	3.10	8.48	1.68	2.60	6.21	6.80		
$x'_0$ [pxl]	-9.91	-10.83	-12.74	-10.19	-12.32	-13.83	-10.37		
$m_{x'_0}$ [pxl]	1.48	2.83	4.42	1.51	2.29	3.22	4.45		
$y'_0$ [pxl]	22.60	23.36	33.23	23.48	25.54	27.65	29.91		
$m_{y'_0}$ [pxl]	1.90	4.59	8.56	1.79	3.64	7.02	9.26		
A1	-0.2400D-02	-0.2321D-02	-0.2289D-02	-0.2430D-02	-0.2426D-02	-0.2351D-02	-0.2371D-02		
$m_{A1}$	0.2572D-04	0.4663D-04	0.6037D-04	0.2015D-04	0.2683D-04	0.3850D-04	0.5131D-04		
A3	0.9726D-02	0.9844D-02	0.1069D-01	0.9746D-02	0.9785D-02	0.1028D-01	0.1347D-01		
$m_{A3}$	0.1364D-03	0.3667D-03	0.5831D-03	0.1523D-03	0.3222D-03	0.5241D-03	0.1246D-02		
A5	-0.1815D-03	-0.2793D-03	-0.3321D-03	-0.1481D-03	-0.1403D-03	-0.1991D-03	-0.1934D-03		
$m_{A5}$	0.3908D-04	0.7064D-04	0.9313D-04	0.3310D-04	0.4842D-04	0.6582D-04	0.8742D-04		
$M_x$ [mm]	-	2.7	9.9	7.7	9.7	12.3	17.2	15.9	
$M_y$ [mm]	-	3.2	18.9	9.8	13.7	19.6	25.9	22.7	
$M_z$ [mm]	-	2.5	7.8	4.7	6.2	8.4	12.8	9.8	
$M_p$ [mm]	-	4.9	23.8	13.2	18.5	25.5	34.8	30.5	
$\Delta$ [mm]	-	-	18.9	-	15.5	20.2	32.0	25.8	

Oznaczenia:

S - wariant wyrównania sieci 24 zdjęć z 49 punktami sygnalizowanymi

SN - wariant wyrównania sieci 24 zdjęć z 49 punktami sygnalizowanymi i 75 naturalnymi

FP - fotopunkt

Tab. 2. Wyniki rozwiązania terratriangulacji łącznej z samokalibracją on the job

Wyrównanie sieci 24 zdjęć z 49 fotopunktami i 75 punktami nowo wyznaczanymi (wariant 4) wykonane zostało z przeciętnymi wartościami błędów średnich estymacji współrzędnych  $M_X = \pm 7.7$  mm,  $M_Y = \pm 9.8$  mm,  $M_Z = \pm 4.7$  mm i położenia punktu  $M_P = \pm 13.2$  mm. Jednoczesne wyznaczenie metodą samokalibracji elementów orientacji wewnętrznej  $c_K, x'_0, y'_0$  nastąpiło z dokładnością rzędu  $\pm 1.7$  piksela. Przy rozwiązaniu sieci zdjęć z 20 fotopunktami (wariant 2 i 5) uzyskano zaskakująco wysokie dokładności. Otrzymano przeciętne błędy  $M_X = \pm 8.6$  mm,  $M_Y = \pm 13.3$  mm,  $M_Z = \pm 5.9$  mm i  $M_P = \pm 17.6$  mm oraz średnią odchyłkę dla współrzędnych  $\Delta = \pm 13.9$  mm. Jednocześnie wyznaczono elementy orientacji wewnętrznej z błędem  $\pm 3.2$  piksela. Ograniczenie liczby fotopunktów do 16 spowodowało obniżenie o ca 40% dokładności wyznaczenia wszystkich niewiadomych. Wyrównanie sieci zdjęć skalibrowanych (wariant 8) w oparciu o 8 fotopunktów dało niezadawalające dokładności. Prawdopodobną przyczyną jest niewystarczająca do wpasowania wiązek liczba fotopunktów umieszczonych na przestrzennym obiekcie (dla elewacji południowej  $\Delta Y = 8.0$  m).

Ujemny wpływ na wyniki rozwiązania miała konfiguracja zdjęć normalnych, brak fotopunktów w górnych fragmentach każdej z elewacji obiektu oraz niewielkie zróżnicowanie przestrzennego położenia fotopunktów na trzech elewacjach ( $\Delta Y = 0.15$  m + 0.75 m). Uzyskane błędy były zgodne z rozkładem błędów dla przypadku naziemnych zdjęć normalnych. Rozwiązanie terratriangulacji łącznie z samokalibracją *on the job* aparatu cyfrowego stwarza warunki swobodnego wpasowania wiązek w punkty dostosowania a wyznaczone parametry kamery najdokładniej odpowiadają rzeczywistym warunkom rejestracji zdjęć.

## 5. Wnioski

Przeprowadzony eksperyment odpowiadał warunkom praktycznej realizacji zadania fotogrametrycznego w bliskim zasięgu. Wyniki analiz wykazały, że dla dużych obiektów 3D możliwe jest fotogrametryczne wyznaczenie punktów z błędem  $M_P < \pm 20$  mm na podstawie normalnych zdjęć cyfrowych o rozdzielczości rzędu  $2.2K \times 1.4K$ . Optymalną techniką jest łączne rozwiązanie metodą wiązek terratriangulacji i samokalibracja *on the job* fotograficznego aparatu cyfrowego.

Wyznaczenie punktów oraz parametrów kalibracji aparatu cyfrowego z akceptowaną dokładnością można uzyskać przy użyciu min. 20 fotopunktów równomiernie rozmieszczonych na obiekcie. Warunek ten jest kompromisem między dokładnością rozwiązania a nakładem prac związanych z wyznaczeniem punktów dostosowania. Ze względu na homogeniczną dokładność wyznaczenia współrzędnych przestrzennych należy stosować rozwiązanie oparte na konfiguracji zdjęć zbieżnych.

## Literatura

1. Dold J. Influence of large targets on the results of photogrammetric bundle adjustment. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXI Part B5, Com.V, 1996.
2. Cieślak M., Sobierańska D. Analityczne rozwiązanie fotogrametrycznej sieci cyfrowych zdjęć naziemnych. Praca magisterska, UWM Olsztyn, 2001.
3. <http://www.kodak.com>
4. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXI Part B5, Com.V, 1996.
5. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII Part B5/1, B5/2, Com.V, 2001.
6. Kodak DC4800 – User's Guide. Eastman Kodak Company, New York, 2000.
7. Kraus K. Photogrammetry. Dümmler, Bonn, 1997.
8. PICTRAN B/D/E. Opis programu i instrukcja obsługi. Berlin, 2000.
9. Regensburger K. Photogrammetrie, Anwendungen in Wissenschaft und Technik. Verlag für Bauwesen, Berlin, 1990.
10. Tokarczyk R., Boroń A. Badanie cyfrowych aparatów fotograficznych dla zastosowań fotogrametrycznych. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 10, 2000.

## Terrestrial phototriangulation with digital camera Kodak DC4800 selfcalibration on the job

### Abstract

*A present issue in the close range photogrammetry is the use of nonmetric digital cameras for determination of large 3D objects geometry, e.g. in a reverse engineering and architectural measurement. In research the tested object was recorded by nonmetric digital camera Kodak DC4800 with 2.2K × 1.4K resolution. Twelve pair of photos nearly normal were taken. Terratriangulation of digital images with digital camera Kodak DC4800 selfcalibration on the job was solved by means of a bundle adjustment using software PICTRAN B. Photogrammetric points determination with  $M_p < \pm 20$  mm accuracy and calibration parameters of nonmetric digital camera with 20 control points were received.*