



Piotr Sawicki

**KALIBRACJA RÓWNOCZESNA APARATU CYFROWEGO
KODAK DC4800 W PROCESIE FOTOGRAMETRYCZNEGO
POMIARU PUNKTÓW W BLISKIM ZASIĘGU**

**SIMULTANEOUS CALIBRATION OF A DIGITAL CAMERA
KODAK DC4800 IN CLOSE RANGE PHOTOGRAMMETRIC
POINT MEASUREMENT**

*Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Katedra Fotogrametrii i Teledetekcji
University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Department of Photogrammetry & RS*

STRESZCZENIE: W fotogrametrii bliskiego zasięgu aktualnym zagadnieniem jest badanie technik kalibracji oraz praktycznych możliwości zastosowania niemetrycznych aparatów cyfrowych typu *compact* w pomiarach metrologicznych, rekonstrukcji inżynierskiej *as-built*, w inwentaryzacji architektonicznej etc. Możliwości i warunki kalibracji aparatu cyfrowego typu *compact* Kodak DC 4800 o rozdzielczości 2.2 K × 1.4 K pikseli, badano w warunkach praktycznego pomiaru przemysłowego kotła parowego. 24 fotopunkty wyznaczono z dokładnością $m_{XZ} = \pm 0.2$ mm i $m_Y = \pm 0.3$ mm. Wykonano 16 zdjęć słabo zbieżnych. Punkty na obrazach cyfrowych pomierzono w trybie semiautomatycznym metodą *matching*'u LSM i manualnie. Kalibrację aparatu cyfrowego wykonano przy użyciu metody kalibracji równoczesnej *on-the-job*, stosując model korekcji błędów systematycznych wg Luhmann'a. Parametry kalibracji aparatu cyfrowego i terratriangulację rozwiązano metodą wiązek przy użyciu programu PICTRAN B.

W procesie kalibracji równoczesnej występują istotne korelacje między wyznaczanymi parametrami, co nie obniża dokładności fotogrametrycznego wyznaczenia współrzędnych punktów. Użycie tych parametrów jako stałe do innych rozwiązań spowoduje zafałszowanie wyników obliczeń. Metoda kalibracji równoczesnej *on-the-job* niemetrycznego aparatu cyfrowego najdokładniej odpowiada rzeczywistym warunkom rejestracji i reprezentuje optymalny model funkcjonalny analitycznego opracowania. Metoda ta umożliwia otrzymanie najwyższej dokładności fotogrametrycznego wyznaczenia punktów.

SŁOWA KLUCZOWE: kamera cyfrowa, kalibracja, parametry, pomiar, bliski zasięg

1. WSTĘP

Kamery cyfrowe stosowane współcześnie w fotogrametrii bliskiego zasięgu, w zależności od cech i warunków technicznych opracowania, charakteryzują się różną konstrukcją, rozdzielczością sensora CCD, trybem i czasem akwizycji obrazu cyfrowe-

go. W pomiarach fotogrametrycznych, które nie wymagają rejestracji w czasie rzeczywistym, stosowane są w ostatnich latach powstałe na bazie lustrzanek jednoobiektywowych cyfrowe kamery typu *still video* o max. rozdzielczości $4.5K \times 3K$. Alternatywą, ze względu na znacznie niższą cenę, jest zastosowanie amatorskich cyfrowych aparatów typu *compact* o max. rozdzielczości $2.7K \times 2K$. Konstrukcje obu typów kamer charakteryzują się jednak istotnymi dystorsjami optycznymi i geometrycznymi, w mniejszym stopniu dystorsją sygnału przetwornika CCD oraz często niestabilnością elektronicznych parametrów rejestracji. Z tych względów, należy je traktować w pomiarach fotogrametrycznych jako kamery niometryczne.

Aktualnym zagadnieniem w fotogrametrii bliskiego zasięgu jest więc badanie technik kalibracji amatorskich aparatów cyfrowych typu *compact* oraz praktycznych możliwości ich zastosowania, np. w pomiarach metrologicznych, rekonstrukcji inżynierskiej *as-built* obiektów i infrastruktury technicznej, w inwentaryzacji architektonicznej etc.

Jedną z wielu technik kalibracji stosowanych w fotogrametrii bliskiego zasięgu jest kalibracja równoczesna (ang. *simultaneous calibration*). Jest to metoda wyznaczenia standardowych parametrów orientacji wewnętrznej i dodatkowych parametrów modelujących błędy systematyczne zobrazowania na podstawie zdjęć wykonanych do fotogrametrycznego wyznaczenia punktów, gdzie punkty pomiarowe obiektu zastępują pole testowe do kalibracji. Obiekt musi też zostać zarejestrowany w porównywalnej konfiguracji zdjęć. Kalibracja równoczesna jest określana dodatkowo nazwą *on-the-job*. W fotogrametrii bliskiego zasięgu pojęcie samokalibracji odnosi się obecnie do technik kalibracji na podstawie wyłącznie fotogrametrycznych obserwacji [4].

2. REJESTRACJA FOTOGRAMETRYCZNA OBIEKTU

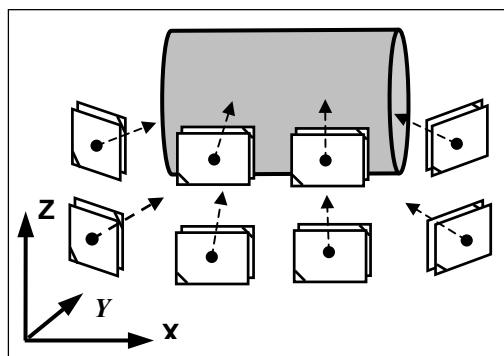
Zbadanie warunków i dokładności kalibracji równoczesnej *on-the-job* niometrycznego aparatu cyfrowego typu *compact* wykonano w warunkach kompleksowego, wizyjno-termalnego pomiaru metrologicznego. Obiektem badań był przemysłowy kocioł parowy SERMET prod. fińskiej o długości 2.83 m i średnicy 1.85 m wraz z infrastrukturą techniczną. Obiekt znajduje się w pomieszczeniach Centrali Ciepłej Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. Do rejestracji fotogrametrycznej (rys. 1) zastosowano średniej rozdzielczości cyfrowy aparat fotograficzny typu *compact* Kodak DC4800 [3, 10], który posiada matrycę CCD o rozdzielczości 3.1 mln pikseli i umożliwia wykonywanie zdjęć o max. rozdzielczości 2160×1440 pikseli. Rejestrację oraz opracowanie termograficzne wykonano przy użyciu kamery termalnej AGEMA 880 i systemu wideo-termalnego VISION PLUS [8, 9].

W pierwszym etapie opracowania wykonano kalibrację aparatu cyfrowego. Fotogrametryczne wyznaczenie współrzędnych przestrzennych punktów sygnalizowanych i dyskretnych oraz jakościowa i ilościowa analiza powierzchniowego rozkładu temperatury elementów obiektu były właściwym zadaniem pomiarów metrologicznych. Ta faza opracowania nie jest przedmiotem niniejszej pracy.



Rys. 1. Obiekt testowy – zdjęcia cyfrowe wykonane aparatem Kodak DC4800 i kamerą termalną AGEMA 880 w fazie opracowania.

Fig. 1. Test object – digital images made with Kodak DC4800 and thermal camera AGEMA 880 in elaboration phase.



Rys. 2. Konfiguracja zdjęć cyfrowych
Fig. 2. Configuration of digital images

Sieć zdjęć utworzyła konfiguracja (rys. 2) 16. zdjęć, w tym 4 pary zdjęć zbliżonych do normalnych i 4 pary zdjęć o kącie zbieżności γ ca 10 grad. Na każdym z 8. stanowisk wykonano dodatkowo zdjęcia o kącie skręcenia κ wokół osi celowej równym 200 grad, przy wypełnieniu kadru obrazu wszystkimi punktami pomiarowymi. Nie wykonano serii zdjęć obróconych o 100 grad i 300 grad, ponieważ niemożliwe było spełnienie tego warunku. Parametry zdjęć cyfrowych zawiera tabela 1.

Tabela 1
Table 1

Fotogrametryczne parametry zdjęć cyfrowych
Photogrammetric parameters of digital images

Parametry 16 zdjęć cyfrowych	
Rozdzielczość obrazu	2160 × 1440
Wymiar piksela $p'_H \times p'_V$	3.6 μm × 3.5 μm
Format zapisu	JPEG bez kompresji
Ogniskowa c_K	6 mm
Ogniskowanie	Fix Focus 0.5 m ÷ ∞
Zoom optyczny	1
Y_F	~ 5 m
$I: M_Z$	~ 1: 850
$v = B/Y_F$	1/1 ÷ 1/20

W przestrzeni pomiarowej o wymiarach 5 m × 7 m × 3 m założono w lokalnym układzie współrzędnych osnowę fotogrametryczną, składającą się z 32. punktów, sygnalizowanych znakiem o wielkości ca 7 pikseli w średniej skali obrazu cyfrowego, w tym 24 równomiernie rozmieszczone fotopunkty. Uwzględniając wymiary i kształt przestrzeni pomiarowej, uznano tę ilość fotopunktów za wystarczającą [7, 10]. Pomiar fotopunktów wykonano tachimetrem elektronicznym Leica TC 2002 (dokładność pomiaru kątów wynosi 0.15 mgrad). Współrzędne przestrzenne fotopunktów wyznaczono z dokładnością $m_{X,Z} = \pm 0.2$ mm i $m_Y = \pm 0.3$ mm. Obniżenie dokładności pomiaru spowodowały małe kąty zbieżności podczas wcięć w przód oraz wibracja powietrza wzdłuż celowych, wywołana wysoką temperaturą.

3. KALIBRACJA RÓWNOCZESNA *ON-THE-JOB*

Podstawowy model funkcjonalny metody wiązek zostaje rozszerzony o dodatkowe parametry modelujące błędy systematyczne zobrazowania.

3.1. Modele eliminacji błędów systematycznych

W kalibracji kamer cyfrowych stosuje się obecnie rozszerzone matematyczne modele korekcji błędów systematycznych, które oprócz dystorsji obiektywów uwzględniają również geometryczne i radiometryczne zniekształcenia obrazu spowodowane działaniem sensora CCD [1, 4]. Rozwiązaniem, które eliminuje problemy ze stabilnością mechaniczną i geometryczną kamer cyfrowych jest kalibracja polegająca na wyznaczeniu podstawowych elementów orientacji wewnętrznej, niezależnie dla każdego z obrazów i stałej dystorsji dla wszystkich zdjęć [6].

Przy zastosowaniu kamer cyfrowych o wysokiej rozdzielczości, których potencjał dokładności jest rzędu poniżej 0.5 μm wymagana jest dodatkowo korekcja dystorsji, zależna od zmiany skali zobrazowania dla punktów położonych w różnej odległości od środka rzutów [2].

W przeprowadzonych badaniach wykorzystano uogólnione modele Beyer'a [1, 4]:

$$\Delta x' = \Delta x'_0 - x' \Delta c_k / c_k + K_1 x' r^2 + K_2 x' r^4 + K_3 x' r^6 + P_1 (r^2 + 2x'^2) + 2P_2 x' y' - C_1 x' + C_2 y' \quad (1)$$

$$\Delta y' = \Delta y'_0 - y' \Delta c_k / c_k + K_1 y' r^2 + K_2 y' r^4 + K_3 y' r^6 + 2P_1 x' y' + P_2 (r^2 + 2y'^2) + C_2 x'$$

oraz Luhmann'a [4]:

$$\Delta x' = A_1 x' (r^2 - r_0^2) + A_2 x' (r^4 - r_0^4) + B_1 (r^2 + 2x'^2) + 2B_2 x' y' + C_1 x' + C_2 y' \quad (2)$$

$$\Delta y' = A_1 y' (r^2 - r_0^2) + A_2 y' (r^4 - r_0^4) + 2B_1 x' y' + B_2 (r^2 + 2y'^2) + C_2 x'$$

gdzie: parametry K_i i A_i odpowiednio opisują dystorsję radialną symetryczną, P_i i B_i dystorsję radialną asymetryczną i tangencjalną oraz C_i afiniczność (zmianę skali wzdłuż osi x i nieortogonalność osi (ang. *shear*) matrycy sensora CCD.

Modele te zostały zaimplementowane w autorskim oprogramowaniu fotogrametrycznym POPOS [8, 9]. Wprawdzie w modelu Beyer'a nie występuje w jawnej postaci 2 punkt zerowy przebiegu krzywej dystorsji radialnej, ale oba modele są matematycznie ekwiwalentne. Fakt ten potwierdziły nieistotne różnice wyników wyrównania sieci kalibracyjnej zdjęć przeprowadzone w programie POPOS. Do ostatecznej analizy przyjęto więc funkcjonalny model Luhmann'a, na którym oparta jest strategia kalibracji w profesjonalnym programie PICTRAN B.

3.2. Pomiar fotogrametryczne oraz wyrównanie metodą wiązek

Rozwiązanie metodą wiązek sieci terratriangulacji połączonej z kalibracją równoczesną polega na wyznaczeniu wszystkich niewiadomych w procesie łącznego, kombinowanego wyrównania obserwacji fotogrametrycznych i geodezyjnych. Wyznaczenie orientacji zewnętrznej zdjęć $X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}, \omega_i, \varphi_i, \kappa_i$

- współrzędne przestrzenne X_n, Y_n, Z_n punktów
- elementy orientacji wewnętrznej:
stała kamery c_K i współrzędne punktu głównego x'_0, y'_0
- dodatkowe parametry opisujące błędy systematyczne obrazu:
 $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2$

Rozwiązanie fotogrametrycznej sieci 16. niometrycznych zdjęć cyfrowych wykonano metodą wiązek. Parametry kalibracji aparatu Kodak DC4800 traktowano jako niewiadome, przyjmując wartości przybliżone $c_K = 1678.32$ ($c_K = 6$ mm) i $x'_0 = 0, y'_0 = 0$ oraz $r_0 = 780$. Empirycznie badano wpływ liczby i rodzaju parametrów modelu korekcji błędów systematycznych oraz konfiguracji fotopunktów na dokładność kalibracji i estymacji współrzędnych punktów obiektu. Optymalny model stochastyczny wyrównania określono empirycznie. Dokładność pomiaru współrzędnych pikselowych mierzonych w trybie semiautomatycznym metodą LSM oraz manualnie oszacowano na wartość $\pm 0.1 \pm 0.15$ piksela. W skali sensora CCD aparatu Kodak DC4800 odpowiada wartościom $\pm 0.36 \pm 0.54$ μm . Przyjęty do wyrównania średni błąd współrzędnych fotopunktów, które otrzymały status *quasi* obserwacji, wynosił $m_{X,Z} = \pm 0.2$ mm i $m_Y = \pm 0.3$ mm i odpowiadał dokładności pomiaru geodezyjnego.

Ocenę dokładności wyrównania wykonano za pomocą następujących kryteriów oceny jakości i błędów:

- test *data-snooping*
- sigma $0 \sim 1$ ($0.7 < s_0 < 1.3$)
- odchylenia standardowe wyznaczenia niewiadomych:
 $sc_K, sx'_0, sy'_0, sA_1, sA_2, sB_1, sB_2, sC_1, sC_2, sx, sy, sy$
- przeciętne wartości średniego błędu wyznaczenia współrzędnych i punktu:
 M_X, M_Y, M_Z, M_P
- macierz korelacji
- testy statystyczne (rozkład - t , - F)

Pomiary fotogrametryczne i ostateczne obliczenia wykonano przy zastosowaniu niemieckiego profesjonalnego pakietu PICTRAN B/D/E firmy technet GmbH.

3.3. Synteza wyników kalibracji równoczesnej

Wyznaczony model kalibracji aparatu cyfrowego Kodak DC4800 zawiera 5 parametrów dodatkowych A_1, A_2, B_1, B_2, C_1 . Statystycznie nieistotny parametr C_2 opisujący błąd nieortogonalności został wyeliminowany (rozkład Studenta: wartość sprawdzianu $t = 1.2$ dla sprawdzianu $t_p = 1.645$). W badaniach stwierdzono duże korelacje między parametrami dodatkowymi A_1 i A_2 ($k = -0.95$), x'_0 i C_1 ($k = 0.92$) oraz y'_0 i C_2 ($k = 0.80$). Wypadkowa wartość poprawki dla dystorsji radialnej symetrycznej wyniosła średnio $dr' = 6.5$ piksela. Różnice między wyznaczonymi w różnych wariantach współrzędnymi X, Y, Z punktów weryfikowano za pomocą testu Fishera, okazały się nieistotne.

Ukształtowanie przestrzenne obiektu pomiarowego, konfiguracja i fotogrametryczne warunki wykonania zdjęć mają wpływ na jakość modelowania błędów systematycznych. Fakt ten potwierdzają różnice pomiędzy omawianymi wynikami kalibracji równoczesnej aparatu cyfrowego Kodak DC4800 a wcześniejszymi badaniami autora [10].

Tabela 2
Table 2Wyniki kalibracji równoczesnej *on-the-job*
Results of simultaneous *on-the-job* calibration

Parametry kalibracji, błędy	Warianty obliczeniowe kalibracji			
	Kalibracja laboratoryjna	16 zdjęć 6 parametrów	16 zdjęć 5 parametrów	8 zdjęć 5 parametrów
c_K [pxl]	1699.7	1696.8	1696.8	1696.1
mc_K	0.6	0.2	0.2	0.2
x'_0 [pxl]	-14.8	-10.1	-10.1	-12.5
sx'_0	0.5	0.3	0.3	0.6
y'_0 [pxl]	33.2	30.6	30.6	25.7
sy'_0	0.4	0.2	0.2	0.4
A_1	-0.34402D-02	-0.33493D-02	-0.33482D-02	-0.33309D-02
sA_1	0.29780D-04	0.18780D-04	0.18730D-04	0.18270D-04
A_2	0.56024D-04	0.52130D-04	0.52112D-04	0.52288D-04
sA_2	0.14800D-05	0.89540D-06	0.89500D-06	0.91080D-06
B_1	-0.19882D-03	-0.17109D-03	-0.17104D-03	-0.16485D-03
sB_1	0.13080D-04	0.71050D-05	0.71040D-05	0.15040D-04
B_2	-0.80255D-04	-0.79554D-04	-0.79529D-04	-0.10457D-03
sB_2	0.10000D-04	0.56820D-05	0.56820D-05	0.10920D-04
C_1	0.98478D-02	0.96864D-02	0.96869D-02	0.98209D-02
sC_1	0.52520D-04	0.32640D-04	0.32630D-04	0.30590D-04
C_2	–	-0.27624D-04	–	–
sC_2	–	0.32220D-04	–	–
M_X [mm]	–	0.14	0.13	0.13
M_Y [mm]	–	0.28	0.28	0.26
M_Z [mm]	–	0.13	0.13	0.14
M_P [mm]	–	0.35	0.34	0.33

Analiza wyników badań kalibracji, którą przeprowadzono w wielu wariantach obliczeniowych (tabela 2 prezentuje wyniki rozwiązań wybranych wariantów), pozwala sformułować następujące ogólne wnioski:

1. Dokładność wyznaczenia po wyrównaniu elementów orientacji wewnętrznej c_K , x'_0 , y'_0 powinna odpowiadać dokładności pomiaru współrzędnych pikselowych, jeśli wyniki kalibracji mają być użyte jako stałe parametry w innych niezależnych rozwiązaniach.
2. Optymalny model matematyczny korekcji błędów systematycznych powinien zawierać parametry modelujące:
 - dystorsję radialną symetryczną A_1 i A_2
 - dystorsję radialną asymetryczną B_1 i tangencjalną B_2
 - afiniczność C_1 i nieortogonalność C_2 matrycy sensora CCD

Dystorsja ogólna obiektywu jest spowodowana przede wszystkim dystorsją radialną i do jej eliminacji nadaje się szczególnie model Torlegard'a [4, 5], który jest zaimplementowany w ogólnym modelu Luhmann'a. Parametry A_1 , A_2 są dodatkowymi parametrami o największym wpływie eliminacji dystorsji symetrycznej radialnej. Dodatkowy parametr A_3 modelujący dystorsję radialną jest wyznaczany z dostateczną dokładnością tylko w szczególnych przypadkach, np. dla obiektywów typu „rybie oko” (*Fisheye*).

Dystorsja radialna asymetryczna i tangencjalna – parametry B_1 i B_2 , jest spowodowana przede wszystkim decentracją soczewki w obiektywie. Użycie stosunkowo prostych obiektywów, jakie są stosowane w aparatach cyfrowych wymaga w każdym przypadku wyznaczenia dystorsji radialnej asymetrycznej i tangencjalnej. W obiektywach o wysokiej jakości jej wartość jest w stosunku do dystorsji radialnej symetrycznej znacznie mniejsza i powinna być wyznaczana tylko przy bardzo wysokich dokładnościach opracowania.

Zmianę skali wzdłuż osi x oraz nieortogonalność osi sensora CCD modelują parametry C_1 i C_2 . Zniekształcenie afiniczne spowodowane jest prostokątnym pikselem w sensorze CCD lub digitalizacją sygnału analogowego za pomocą karty *Frame Grabber*. Błąd ortogonalności wynika z nieprostokątności płaszczyzny sensora (pikselowego układu współrzędnych) do osi optycznej sensora. Kamery cyfrowe i wideo CCD powinny być kalibrowane koniecznie z uwzględnieniem tych parametrów.

3. Korelacje występują między następującymi parametrami:

- elementami orientacji wewnętrznej i zewnętrznej: c_K i X_0, c_K i Y_0, x'_0 i φ, y'_0 i ω
- współczynnikami dystorsji radialnej symetrycznej: A_1 i A_2
- współrzędną punktu głównego: x'_0 i afinicznością C_1 lub y'_0 i nieortogonalnością C_2

W procesie kalibracji równoczesnej dochodzi z reguły do korelacji pomiędzy wyrównanymi parametrami. Wysokie wartości współczynników korelacji wskazują na liniowe zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami. Korelacje między parametrami orientacji wewnętrznej, jak też pomiędzy parametrami orientacji wewnętrznej a zewnętrznej, powinny być minimalizowane przez odpowiednią geometrię zdjęć. Korelacje między parametrami kalibracji nie mają istotnego wpływu na dokładność fotogrametrycznego wyznaczenia współrzędnych, gdy rozwiązanie następuje w tym samym systemie matematycznym, w jednoczesnym procesie wyrównania wszystkich obserwacji. Jeśli jednak wyznaczone techniką kalibracji równoczesnej parametry orientacji wewnętrznej zostaną przyjęte jako stałe w innych obliczeniach, np. w niezależnej terratriangulacji metodą wiązek lub fotogrametrycznym wcięciu w przód, nie reprezentują tym samym określonego wcześniej matematycznego modelu kamery. Powstaje błędny model funkcjonalny, co może spowodować zafałszowanie wyników obliczeń.

Elementy orientacji wewnętrznej i dodatkowe parametry modelujące błędy systematyczne wyznaczone metodą kalibracji równoczesnej dotyczą momentu wykonania zdjęć pomiarowych i najdokładniej odpowiadają rzeczywistym warunkom rejestracji. Poza tym, metoda ta stwarza warunki swobodnego wpasowania wiązek w punkty dostosowania i umożliwia otrzymanie najwyższej dokładności opracowania analitycznego.

W warunkach praktycznego wyznaczenia parametrów orientacji wewnętrznej cyfrowego aparatu typu *compact* metodą kalibracji równoczesnej *on-the-job* należy zapewnić następujące warunki rejestracji zdjęć:

1. Przestrzenne pole testowe

Kalibracja w warunkach przestrzennego pola testowego prowadzi do wyznaczenia wiarygodnych parametrów kalibracji i nieznaczących korelacji. W przypadku płaskiego pola testowego stała kamery c_K zostanie wyznaczona niejednoznacznie, jeśli brak jest informacji o skali zdjęć. Niejednokrotnie, wystarcza wprowadzenie obserwacji geodezyjnej w kierunku osi celowej zdjęć, która pozwoli na określenie skali zobrazowania i w konsekwencji na dokładne wyznaczenie stałej kamery c_K .

2. Wielokrotne zdjęcia zbieżne.

Rejestracja obiektu płaskiego bez zdjęć zbieżnych prowadzi do wyznaczenia stałej kamery c_K niejednoznacznie lub z dużymi odchyleniami standardowymi. Nie oznacza to jednak, że punkty wyznaczone zostały z większymi błędami.

3. Zdjęcia na każdym stanowisku obrócone wokół osi celowej co 100 grad.

Konfiguracja 3. dodatkowych zdjęć obróconych wokół osi celowej eliminuje silną korelację między parametrami x'_0 , y'_0 a orientacją zewnętrzną. Pozwala dokładniej wyznaczyć położenie punktu głównego i parametry modelujące afiniczność obrazu cyfrowego, szczególnie w przypadku, gdy pole testowe posiada niewystarczającą gęstość i rozkład punktów lub nie można wykonać zdjęć silnie zbieżnych.

4. Liczba zobrazowań pojedynczego punktu wynosi $5 \div 20$.

Wieloobrazowa rejestracja punktów, szczególnie za pomocą zdjęć zbieżnych w znaczący sposób zwiększa dokładność wyznaczenia współrzędnych punktów.

5. Pełne wykorzystanie formatu obrazu.

Wyznaczenie współczynników wielomianu aproksymującego dystorsję, które będą reprezentatywne dla całej powierzchni obrazu cyfrowego, jest możliwe tylko przy całkowitym wypełnieniu obrazu punktami pomiarowymi. Ma to szczególne znaczenie przy użyciu obiektów szeroko- i nadszerokokątnych, dla których w narożnikach obrazu występują duże dystorsje.

6. Zdjęcia w jednej sesji pomiarowej.

Rejestracja w jednej sesji pomiarowej eliminuje prawdopodobieństwo wystąpienia niedostatecznej stabilności geometrycznej i elektronicznej aparatu cyfrowego.

4. PODSUMOWANIE

Aktualnym zagadnieniem w fotogrametrii bliskiego zasięgu jest kalibracja niemetrycznych kamer cyfrowych i ich zastosowanie do fotogrametrycznych opracowań punktowych. W badaniach zarejestrowano niemetrycznym aparatem cyfrowym typu *compact* Kodak DC4800 o rozdzielczości $2.2 K \times 1.4 K$ obiekt testowy, tj. przemysłowy kocioł parowy z infrastrukturą techniczną w celu wykonania dokumentacji *as-built*.

Przeprowadzony eksperyment w pełni odpowiadał warunkom praktycznego punkowego opracowania analitycznego w bliskim zasięgu. Kalibrację aparatu cyfrowego wykonano przy użyciu metody kalibracji równoczesnej *on-the-job*. Zastosowany model wyznaczenia elementów orientacji wewnętrznej c_K , x'_0 , y'_0 i parametrów dodatkowych modelujących błędy systematyczne zobrazowania cyfrowego, tj. dystorsję symetryczną radialną A_1 i A_2 , dystorsję tangencjalną B_1 i decentrację B_2 , afiniczność C_1 i nieortogonalność C_2 , sformułował Luhmann. Terratriangulację zdjęć cyfrowych z kalibracją równoczesną aparatu cyfrowego rozwiązano przez kombinowane wyrównanie obserwacji metodą wiązek przy użyciu programu PICTRAN B.

Metoda kalibracji równoczesnej *on-the-job* fotograficznych aparatów cyfrowych najdokładniej odpowiada rzeczywistym warunkom rejestracji i reprezentuje optymalny model funkcjonalny analitycznego opracowania. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie najwyższej dokładności fotogrametrycznego wyznaczenia punktów.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Beyer, H.: Geometric and radiometric analysis of a CCD-camera based photogrammetric close-range system. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Mitteilungen Nr 51, ETH Zürich 1992.
- [2] Dold, J.: Ein hybrides photogrammetrisches Industriesystem höchster Genauigkeit und seine Überprüfung. Schriftreihe Studiengang Vermessungswesen, Diss. Heft 54, Universität der Bundeswehr, München 1997.
- [3] <http://www.kodak.com>
- [4] Luhmann, T.: Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Wichman Verlag, Heidelberg 2000.
- [5] Kraus, K.: Photogrammetry. Dümmler Verlag, Bonn 1997.
- [6] Maas, H.G.: Ein Ansatz zur Selbstkalibrierung von Kameras mit instabiler innerer Orientierung. 18. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Publikationen der DGPF, str. 47-53, Hrsg. Albertz/Dech 1998.
- [7] Regensburger, K.: Photogrammetrie – Anwendungen in Wissenschaft und Technik. Berlin 1990.
- [8] Sawicki P., Więcek B.: Cyfrowy system video termalny dla aplikacji w bliskim zasięgu. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 8, str.13/1-13/8, Kraków 1998.
- [9] Sawicki P. Digital multisensoral video-thermal system for close range metrology applications. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII Part B5/2 Com.V, str. 691-698, Amsterdam 2000.
- [10] Sawicki, P.: Rozwiązanie terratriangulacji łącznie z samokalibracją połową aparatu cyfrowego Kodak DC4800. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 11, str. 3/25-3/32, Kraków 2001.

SIMULTANEOUS CALIBRATION OF A DIGITAL CAMERA KODAK DC4800 IN CLOSE RANGE PHOTOGRAMMETRIC POINT MEASUREMENT

S u m m a r y

A current issue in close range photogrammetry is the calibration of non-metric digital cameras and their use for photogrammetric points measurement. In the research the test object, i.e. an industrial steam boiler and its technical infrastructure, was recorded using a non-metric digital camera of the compact type Kodak DC4800 with 2.2 K × 1.4 K resolution, to realize as-built documentation.

The digital camera was calibrated by means of the simultaneous on-the-job calibration method. The calibration model allowing to determine the interior orientation c_K, x'_0, y'_0 and additional parameters modeling systematic errors of digital imaging, i.e., radial symmetric lens distortion A_1 and A_2 , tangential B_1 and decentering distortion B_2 , scale factor C_1 in x and shear C_2 , has been formulated by Luhmann. The phototriangulation of digital images with simultaneous calibration of digital camera was solved by means of a combined bundle adjustment of observations using the PICTRAN B software. The results obtained and the accuracy of digital camera simultaneous calibration are discussed in the paper.

The simultaneous on-the-job calibration of a digital non-metric camera exactly fulfills real conditions of registration and represents an adequate functional model for analytical elaboration. It enables obtaining the highest accuracy of photogrammetric point measurement.

KEY WORDS: digital camera, calibration, parameters, measurement, close range

Recenzent: dr hab. Andrzej Świątkiewicz, prof AR, Akademia Rolnicza, Wrocław