

**BADANIE WPŁYWU FILTRACJI CYFROWEJ
NA DOKŁADNOŚĆ ROZWIĄZANIA METODĄ WIĄZEK SIECI ZDJĘĆ
BLISKIEGO ZASIĘGU**

**ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF DIGITAL FILTERING ON THE
ACCURACY OF CLOSE RANGE BUNDLE BLOCKADJUSTMENT**

Piotr Sawicki

Katedra Fotogrametrii i Teledetekcji, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

SŁOWA KLUCZOWE: lustrzanka cyfrowa, obraz cyfrowy, filtr cyfrowy, pomiar automatyczny, metoda wiązek, kalibracja równoczesna

STRESZCZENIE: Zastosowanie filtracji cyfrowej umożliwia korekcję wpływu nieostrości (rozmycia) oraz wyeliminowanie szumów na obrazach cyfrowych. W pracy badano wpływ 6. liniowych filtrów górnoprzepustowych (*high-pass filters*), wyostrzających obrazy rozmyte, oraz 5. filtrów liniowych dolnoprzepustowych (*low-pass filters*) i nieliniowego filtra medianowego, służących do eliminacji szumów, na dokładność pomiaru i rozwiązania sieci zdjęć bliskiego zasięgu. Badania przeprowadzono na 11. zdjęciach cyfrowych (4500×3000) pola testowego (220 punktów sygnalizowanych, w tym 65 punktów kodowych), z których wygenerowane zostały obrazy JPG nieostre (rozmycie gaussowskie, promień $r=2$, $r=3$ piksele) i obarczone szumem (gaussowski losowy, poziom = 25, gęstość = 50). W systemie AICON 3D Studio wykonano automatyczny pomiar punktów metodą ważonego środka ciężkości (*Center Weighted Method*) oraz rozwiązanie terratriangulacji metodą wiązek, łącznie z kalibracją lustrzanki cyfrowej. Stwierdzono, że filtracja górnoprzepustowa obrazów nieostrych (rozmycie $r=2$) jest niezbędna przy pomiarze punktów strukturalnych metodą ważonego środka ciężkości. W przypadku pomiaru obrazów silnie rozmytych ($r=3$) jedynym skutecznym filtrem górnoprzepustowym, który umożliwia pomiar punktów, jest laplasjan gaussowski (maska 5×5 pikseli). Filtracja dolnoprzepustowa i medianowa obrazów zaszumionych nie wpływa na dokładność pomiaru oraz zmianę wartości wyznaczanych parametrów. Metoda ważonego środka ciężkości działa skutecznie przy pomiarze sygnalizowanych punktów na nieznacznie rozmytych obrazach cyfrowych bliskiego zasięgu oraz jest odporna na występowanie szumów losowych. W analizowanych wariantach obliczeń otrzymano dokładności: $\sigma_0 = 0.07$ piksela ($p'_{HV} = 7.9 \mu\text{m}$), średniokwadratowe poprawki do współrzędnych tłowych $\text{RMS } V_x = 0.05$, $\text{RMS } V_y = 0.06$ piksela, oraz średniokwadratowe błędy współrzędnych wyznaczonych w układzie obiektu $\text{RMS } S_X = 0.05 \text{ mm}$, $\text{RMS } S_Y = 0.1 \text{ mm}$, $\text{RMS } S_Z = 0.04 \text{ mm}$.

1. WPROWADZENIE

Automatyczny tryb pomiaru punktów występuje w wielu typowych opracowaniach cyfrowych bliskiego zasięgu, m.in. w procesie laboratoryjnej i polowej kalibracji aparatów i kamer cyfrowych oraz w rekonstrukcji (*reverse engineering*) i badaniu deformacji

maszyn, urządzeń i obiektów inżynierskich. Sygnalizowane punkty pomiarowe odwzorowane są w postaci prostych form strukturalnych lub dyskretnych, o wyodrębnionych cechach (Atkinson, 1996; Chen, Clarke, 1992; Luhmann, 1966, 2003, Luhmann *et al.*, 2006; Schenk 1999). Technika semiautomatycznego lub w pełni automatycznego pomiaru współrzędnych środków sygnalizowanych punktów (*targets*) opiera się na zastosowaniu operatorów centroidalnych lub dopasowania korespondujących fragmentów (*matching*), co najmniej dwóch obrazów cyfrowych (*image matching*) oraz sekwencji obrazów (*multi image matching*). Semiautomatyczne oraz automatyczne procedury pomiaru zapewniają szybkość, wiarygodność i podpikselową dokładność, nawet rzędu ± 0.005 piksela (Luhmann, 2003; Luhmann *et al.*, 2006).

Skuteczną techniką automatycznego pomiaru punktów na pojedynczych, niezależnych obrazach cyfrowych okazała się metoda (operator) ważonego środka ciężkości (*Center Weighted Method*), którą zastosowano w wielu komercyjnych cyfrowych systemach pomiarowych, np. AICON 3D Studio firmy AICON 3D Systems (AICON 3D STUDIO, 2012), PHIDIAS firmy PHOCAD (PHIDIAS, 2012), V-Stars firmy Geodetic Systems, Inc. (V-STARS, 2012).

Dokładność automatycznych metod pomiaru obniża niehomogeniczności cech geometrycznych i radiometrycznych obrazów cyfrowych (Sawicki, Ostrowski, 2005). Przyczyną pogorszenia jakości obrazów cyfrowych są najczęściej czynniki bezpośrednio związane z fotograficzną rejestracją obrazu lub wywołane sposobem działania sensora, m.in.: nieprawidłowe ogniskowanie obiektywu, ruch sensora lub rejestrowanego obiektu, niewłaściwe oświetlenie sceny, nieprawidłowo określone parametry ekspozycji, ustawienie zbyt dużej czułości ISO sensora cyfrowego, błędne poziomy szarości pikseli sensora powstałe na etapie generowania obrazu, szumy własne sensora, zakłócenia w przewodowej transmisji sygnału w fotogrametrycznych cyfrowych systemach pomiarowych typu *on-line* (Sawicki, Suchocki, 2009).

W aplikacjach bliskiego zasięgu niejednokrotnie występuje w zarejestrowanych sekwencjach obrazów cyfrowych problem przypadkowych lub systematycznych zniekształceń radiometrycznych. W przypadku obrazów nieostrych lub zaszumionych, poprawę cech radiometrycznych można uzyskać m.in. za pomocą filtracji cyfrowej obrazów.

W pracy wykonano badanie wpływu cyfrowej filtracji obrazów nieostrych i zaszumionych na podpikselową dokładność pomiaru punktów sygnalizowanych zmodyfikowaną metodą ważonego środka ciężkości oraz dokładność rozwiązania sieci zdjęć bliskiego zasięgu z kalibracją równoczesną lustrzanki cyfrowej.

2. POMIAR PUNKTÓW METODĄ WAŻONEGO ŚRODKA CIĘŻKOŚCI

Metoda środka ciężkości (*Center of Gravity*) (Luhmann 2003, Luhmann *et al.*, 2006) umożliwia wyznaczenie lokalnego centrum znaku (*target*) jeśli wykazuje on symetryczny rozkład poziomów jasności (szarości). Środek ciężkości zostaje więc określony jako ważony środek współrzędnych pikselowych otoczenia:

$$x_s = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i \cdot T \cdot g_i)}{\sum_{i=1}^n (T \cdot g_i)} \quad y_s = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i \cdot T \cdot g_i)}{\sum_{i=1}^n (T \cdot g_i)} \quad (1)$$

gdzie: n – liczba pikseli otoczenia,

g_i – wartość poziomu szarości dla piksela o współrzędnej pikselowej x_i względnie y_i ,

T – jest funkcją decyzyjną, określającą użycie danego piksela w obliczeniach.

T można zdefiniować wprowadzając t jako wartość progową poziomu szarości:

$$T = \begin{cases} 0 & \text{dla } g < t \\ 1 & \text{dla } g \geq t \end{cases} \quad (2)$$

Właściwa metoda ważonego środka ciężkości (*Center Weighted Method* – CWM) jest rozszerzona o funkcję gradientu. Wyznaczenie środka szukanego znaku, którego struktura jest zdefiniowana przez wyraźną, progową zmianę poziomu szarości, np. krawędź koła, następuje przez wprowadzenie funkcji wag zależnych od gradientu jasności pikseli w obrazie:

$$x_s = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot grad^2(g_{x,i})}{\sum_{i=1}^n grad^2(g_{x,i})} \quad y_s = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot grad^2(g_{y,i})}{\sum_{i=1}^n grad^2(g_{y,i})} \quad (3)$$

Teoretyczna dokładność wyznaczenia środka ciężkości określona zostaje na podstawie prawa przenoszenia się błędów dla funkcji (1, 3). Odchylenie standardowe środka ciężkości zależy liniowo od szumu σ_g oraz odległości piksela od centrum znaku (Luhmann, 2003, 2006; Trinder, 1989; Trinder *et al.*, 1995).

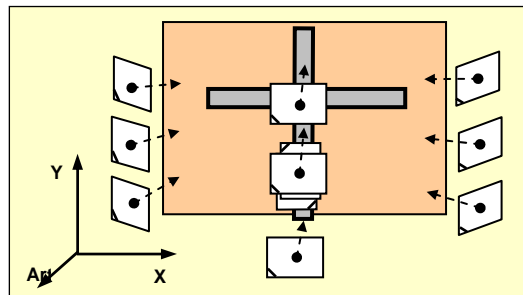
Metoda ważonego środka ciężkości nie wymaga definiowania wzorca z fragmentu (wycinka) rzeczywistego obrazu cyfrowego lub tworzenia syntetycznego obrazu wzorca (*template*) na podstawie znanej struktury poziomów szarości sygnałów pomiarowych. Umożliwia pomiar na obrazach cyfrowych, tworzących przestrzenne konfiguracje zdjęć, punktów o zmiennej wielkości, kształcie i cechach radiometrycznych. Operator ważonego środka ciężkości charakteryzuje się krótkim czasem obliczeń i jest stosowany z powodzeniem dla bardzo małych (średnica $\phi < 5$ pikseli) i nieznacznie rozmytych znaków. Jego działanie jest bezpośrednio zależne od rozkładu jasności otoczenia i funkcjonuje zasadniczo tylko dla jednorodnych, symetrycznych znaków. Szum w postaci pojedynczych pikseli, o odstających poziomach szarości w stosunku do otoczenia punktu, prowadzi do zakłócenia wyznaczenia centrum znaku.

W praktyce fotogrametrycznej, przy pomiarze strukturalnych, sygnalizowanych punktów, metoda ważonego środka ciężkości okazała się bardzo skuteczna i zapewnia teoretyczną dokładność pomiaru współrzędnych rzędu $0.02 \div 0.05$ piksela, porównywalną z metodą dopasowania najmniejszych kwadratów LSM (*Least Squares Matching*).

3. AKWIZYCJA OBRAZÓW CYFROWYCH DO BADAŃ

Badanie wpływu filtracji cyfrowej na dokładność wyznaczenia metodą wiązek współrzędnych 3D i kalibracji lustrzanki cyfrowej przeprowadzono na podstawie

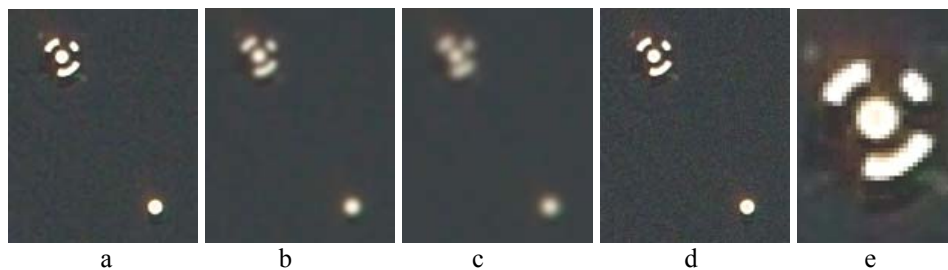
wielokrotnych zdjęć przestrzennego pola testowego (Rys. 1) Instytutu Fotogrametrii i Teledetekcji Uniwersytetu Technicznego w Dreźnie. Pole testowe tworzyło ogółem 220 sygnalizowanych punktów, w tym 65 punktów kodowych 14 bit (Rys. 2) (Sawicki, 2008). Konfigurację 11. zdjęć zbieżnych i normalnych zarejestrowano profesjonalną lustrzanką cyfrową Kodak DCS Pro 14n (rozdzielczość 4500×3000 , wymiar piksela $p'_{HV} = 7.9 \mu\text{m}$) (Sawicki, Ostrowski, 2007) z odległości fotografowania ok. $Y_F = 5 \text{ m}$. Pole testowe nie posiadało fotopunktów, lecz jedynie 2 odcinki skalowe między punktami kodowymi. Parametry rejestracji i opracowania zdjęć odpowiadały warunkom praktycznego fotogrametrycznego pomiaru metrologicznego w bliskim zasięgu.



Rys. 1. Pole testowe i konfiguracja sieci zdjęć cyfrowych

Nieostre i zaszumione obrazy wygenerowano z oryginalnych zdjęć (format JPEG) w programie Corel PHOTO-PAINT pakietu graficznego CorelDRAW Graphics Suite X6 (CorelDRAW, 2012). Obrazy nieostre uzyskano za pomocą efektu „rozmywanie gaussowskie”. Promień r rozmycia (*blur*) gaussowskiego dobrano empirycznie ($r = 2$, oraz $r = 3$ piksele), aby uzyskać efekt wizualny porównywalny z obrazem nieostrym, otrzymanym przy nieprawidłowo zogniskowanym obiektywie lub zdjęciu poruszonym (Rys. 2b, Rys. 2c). Zaszumienie obrazów otrzymano poprzez wprowadzenie szumu (*noise*) gaussowskiego losowego o poziomie $p = 25$ i gęstości $g = 50$ (Rys. 2d, Rys. 2e).

Wygenerowane obrazy, zapisane w formacie JPG, otrzymały poziom rozmycia i zaszumienia, który w wizualnej ocenie, zgodnej z wiedzą autora, odpowiadał prawdopodobnym zniekształceniom radiometrycznym zdjęć cyfrowych, rejestrowanych w fotogrametrycznych opracowaniach bliskiego zasięgu.



Rys. 2. Fragment obrazu z sygnalizowanymi punktami (a – obraz pierwotny, b – obraz rozmyty $r = 2$, c – obraz rozmyty $r = 3$, d, e – obraz zaszumiony $p = 25$ i $g = 50$)

4. TESTOWANE FILTRY CYFROWE

Filtracja cyfrowa stosowana jest przede wszystkim do poprawy jakości radiometrycznej lub wyodrębnienia określonych cech obiektów zarejestrowanych na obrazach cyfrowych. Jest to przekształcenie kontekstowe polegające na wyznaczeniu nowego poziomu jasności piksela wynikowego na podstawie informacji z wielu pikseli obrazu źródłowego, które pochodzą z otoczenia rozważanego piksela (Malina, Smiatacz, 2005).

W przeprowadzonych badaniach obrazy nieostre (rozmyte) poddano cyfrowej filtracji za pomocą 6. liniowych wyostrzających filtrów górnoprzepustowych (*high-pass filters*), z zachowaniem pierwotnej jasności obrazów. W tym celu zastosowano laplasjany, w których maski filtrów posiadały sumę wag równą 1. Eliminację szumów na obrazach wykonano przy pomocy 5. filtrów liniowych dolnoprzepustowych (*low-pass filters*) oraz nieliniowego filtru medianowego. Zestawienie i charakterystykę użytych do badań filtrów cyfrowych zawiera tabela 1.

Tabela 1. Testowane filtry cyfrowe

Oznaczenie	Filtry wyostrzające
HPF1	Filtr Laplace'a (standardowa maska 3×3 piksele)
HPF2	Filtr Laplace'a (uwzględnia wpływ 8. sąsiadów)
HPF3	Filtr Laplace'a (obliczony dla 3. równoległych linii w poziomie i pionie)
HPF4	Filtr Laplace'a (reaguje na krawędzie diagonalne)
HPF5	Modyfikowany filtr Laplace'a (wpływ 8. sąsiadów, wzmacnia sąsiedztwo 4. spójne)
HPF6	Laplasjan gaussowski (maska 5×5 pikseli)
Oznaczenie	Filtry odsumiające
LPF1	Filtr uśredniający (maska 3×3 piksele, sąsiedztwo 8. spójne)
LPF2	Filtr uśredniający (standardowy)
LPF3	Filtr uśredniający (wzmocniona waga piksela środkowego)
LPF4	Filtr Gaussa (standardowy)
LPF5	Zmodyfikowany filtr Gaussa
MED	Filtr medianowy (promień maski $r = 1$)

Cyfrową liniową filtrację nieostrych i zaszumionych obrazów wykonano w programie Adobe Photoshop CS6 (Adobe Photoshop, 2012), który umożliwia zdefiniowanie maski filtru o max. wymiarach 5×5 pikseli. Nieliniową filtrację medianową obrazów zaszumionych przeprowadzono w programie Corel PHOTO-PAINT X6, ustawiając promień maski $r = 1$. Obrazy otrzymane po filtracji cyfrowej zapisano w formacie JPG.

5. ROZWIĄZANIE TERRATRIANGULACJI Z KALIBRACJĄ

Opracowanie zdjęć cyfrowych pola testowego zostało wykonane w module DPA systemu AICON 3D Studio (Version 10.01), firmy AICON 3D Systems GmbH (AICON, 2012). Proces pomiaru, obliczenia współrzędnych 3D łącznie z kalibracją równoczesną lustrzanki cyfrowej przebiegał automatycznie w następujących etapach:

- pomiar sygnalizowanych punktów kodowych i niekodowych,
- przybliżona orientacja przestrzenna zdjęć,
- identyfikacja sygnalizowanych punktów niekodowych,
- iteracyjne wyrównanie obserwacji metodą wiązek.

Program DPA umożliwia w pełni automatyczny pomiar sygnalizowanych punktów na zdjęciach cyfrowych metodą ważonego środka ciężkości. Rozwiązanie terratriangulacji metodą wiązek z kalibracją równoczesną (*self-calibration*) jest realizowane techniką swobodnego wyrównania sieci. Model funkcjonalny metody wiązek jest rozszerzony o dodatkowe parametry aproksymujące błędy systematyczne, tzn. 7. parametrowy standardowy model stosowany do kalibracji aparatów i kamer cyfrowych, który łączy modele Brown'a (1971 r.) i El-Hakim'a (1986 r.) (Luhmann, 2003; Luhmann *et al.*, 2006).

W programie DPA wyznaczane są w wyniku wyrównania następujące niewiadome:

- podstawowe parametry orientacji wewnętrznej: c_K , x'_o , y'_o (Tabela 2, 3),
- parametry dodatkowe: A_1 , A_2 , A_3 (dystorsja radialna symetryczna), B_1 , B_2 (dystorsja radialna asymetryczna i tangencjalna), C_1 (afiniczność), C_2 (nieortogonalność osi układu współrzędnych matrycy sensora) (Tabela 2, 3),
- elementy orientacji zewnętrznej zdjęć: ω_j , ϕ_j , κ_j , X_{0j} , Y_{0j} , Z_{0j} ,
- współrzędne wyznaczanych punktów: X_i , Y_i , Z_i .

Ocenę jakości wyrównania wykonano przy zastosowaniu następujących parametrów dokładności:

- test wykrywania błędów grubych *data-snooping*,
- liczba obserwacji – n oraz liczba niewiadomych – u (Tabela 2, 3),
- Sigma 0: σ_0 (Tabela 2, 3),
- macierz korelacji dla 10. lub 9. wyznaczanych parametrów orientacji wewnętrznej,
- odchylenia standardowe wyznaczonych parametrów kalibracji: Sc_K , Sx'_o , Sy'_o , SA_1 , SA_2 , SA_3 , SB_1 , SB_2 , SC_1 , SC_2 ,
- wartości poprawek do współrzędnych tłowych: $V_{x'}$, $V_{y'}$ oraz ich średniokwadratowe wartości poprawek: RMS $V_{x'}$, RMS $V_{y'}$ (Tabela 2, 3),
- odchylenia standardowe wyznaczonych współrzędnych punktów: SX_i , SY_i , SZ_i oraz ich wartości średniokwadratowe: RMS SX , RMS SY , RMS SZ (Tabela 2, 3).

5.1. Wpływ filtracji cyfrowej obrazów na dokładność rozwiązania sieci zdjęć

W programie DPA wyrównano 22 warianty pomiarowe, które tworzył zespół zdjęć referencyjnych (Wariant $Y_F = 5m_11$ zdjęć JPG_9 parametrów) oraz wygenerowane na ich podstawie zniekształcone radiometrycznie (rozmyte i obciążone szumem losowym) i następnie filtrowane obrazy cyfrowe. Automatyczny pomiar punktów sygnalizowanych i wyrównanie wykonano przy następującym ustawieniu parametrów metody ważonego środka ciężkości (CWM): min. średnica znaku – 4 piksele i max. średnica – 150 pikseli, max. odchylenie standardowe elipsy błędu – 0.07 piksela, max. stosunek osi elipsy – 3.0, min. liczba promieni określających położenie punktu – 4, wartość krytyczna użytego testu *data-snooping* – 4.425. We wszystkich testowanych wariantach parametry pomiaru, kalibracji i wyrównania metodą wiązek były takie same. W procesie kalibracji nie wyznaczano parametru A_3 , ponieważ jego wartość okazała się statystycznie nieistotna.

Tabela 2. Wpływ filtracji górnoprzepustowej obrazów cyfrowych na rozwiązanie terratriangulacji – wyznaczone parametry (c_K , x'_o , y'_o [mm], A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , C_1 , C_2) i dokładności (σ_0 , $V_{x'}$, $V_{y'}$, RMS $V_{x'}$, RMS $V_{y'}$, RMS SX, RMS SY, RMS SZ [mm])

	Wariant zdjęć $Y_F = 5m_11$ zdjęć JPG_9 parametrów							
	Promień rozmycia gaussowskiego r							
	r = 0	r = 2					r = 3	
	Badane filtry górnoprzepustowe – HPF							
	No	HPF1	HPF2	HPF3	HPF4	HPF5	HPF6	HPF6
n	3381	3339	3348	3322	2567	3419	3276	3258
u	675	693	678	681	636	696	675	672
σ_0	0.000525	0.000545	0.000559	0.000564	0.000505	0.000548	0.000534	0.000526
c_K	-26.7986	-26.7994	-26.7988	-26.7952	-26.7922	-26.7986	-26.8015	-26.8013
x'_o	0.09515	0.09541	0.09584	0.09678	0.09758	0.09551	0.09697	0.09724
y'_o	-0.01609	-0.02383	-0.02104	-0.01953	-0.02232	-0.02177	-0.01975	-0.02017
A_1	-1.184e-004	-1.172e-004	-1.175e-004	-1.181e-004	-1.194e-004	-1.181e-004	-1.173e-004	-1.178e-004
A_2	2.093e-007	2.057e-007	2.060e-007	2.073e-007	2.098e-007	2.085e-007	2.062e-007	2.082e-007
B_1	6.203e-006	5.612e-006	6.010e-006	6.555e-006	6.085e-006	5.992e-006	6.733e-006	6.928e-006
B_2	1.374e-006	-2.041e-006	-9.593e-007	-2.789e-007	-2.451e-006	-1.346e-006	-1.444e-006	-1.563e-006
C_1	3.139e-005	2.972e-005	2.622e-005	4.054e-005	4.004e-005	3.135e-005	4.086e-005	4.033e-005
C_2	-1.189e-005	-9.578e-006	-1.018e-005	-1.961e-005	-1.131e-005	-9.486e-006	-1.283e-005	-1.179e-005
RMS $V_{x'}$	0.00040	0.00043	0.00045	0.00045	0.00038	0.00044	0.00042	0.00041
RMS $V_{y'}$	0.00053	0.00053	0.00054	0.00055	0.00049	0.00054	0.00052	0.00052
RMS SX	0.0448	0.0563	0.0472	0.0450	0.0560	0.0498	0.0457	0.0446
RMS SY	0.0965	0.1391	0.1177	0.1085	0.1041	0.1122	0.1013	0.0998
RMS SZ	0.0380	0.0432	0.0399	0.0405	0.0481	0.0417	0.0376	0.0371

Automatyczny pomiar punktów na obrazach nieostrych (rozmycie $r = 2$) był możliwy dopiero po zastosowaniu filtracji górnoprzepustowej. Natomiast, dla obrazów silnie rozmytych (rozmycie $r = 3$), zastosowanie kolejnych 5. testowanych filtrów Laplace'a nie umożliwiło przeprowadzenia pomiarów. Skutecznym filtrem okazał się dopiero laplasjan gaussowski (maska 5×5 pikseli) (Tabela 2).

Automatyczny pomiar punktów w systemie AICON 3D Studio na obrazach obarczonych szumem (poziom $p = 25$, gęstość $g = 50$) był możliwy na wszystkich testowanych wariantach zdjęć. Zastosowanie 5. badanych filtrów dolnoprzepustowych i medianowego nie wpłynęło na zmianę jakości pomiarów w stosunku do wariantu referencyjnego (Tabela 3). Okazało się, w przeciwieństwie do teorii (Luhmann, 2003; Luhmann *et al.*, 2006), że zdefiniowany w badaniach poziom szumu w postaci pojedynczych pikseli o odstających poziomach szarości nie zakłóca wyznaczenia centrum znaku operatorem CWM.

W analizowanych wariantach obliczeń przeciętna wartość Sigma 0 wyniosła $\sigma_0 = 0.07$ piksela (piksel $p'_{HV} = 7.9 \mu m$), natomiast średniokwadratowe wartości poprawek do współrzędnych tłowych otrzymały wartości RMS $V_{x'} = 0.05$ oraz RMS $V_{y'} = 0.06$ piksela, oraz średniokwadratowe błędy wyznaczenia współrzędnych w układzie współrzędnych

obiektu wyniosły: $RMS SX = 0.05$ mm, $RMS SY = 0.1$ mm, $RMS SZ = 0.04$ mm. W stosunku do wariantu referencyjnego, dla wariantów filtrowanych obrazów nieostrych, max. wartość zmiany stałej kamery nie przekracza wartości: $\Delta c_K = 0.8$ piksela, poprawek do położenia punktu głównego $\Delta x'_o = 0.3$ i $\Delta y'_o = 0.98$ piksela oraz odpowiednio dla wariantów filtrowanych obrazów zaszumionych: $\Delta c_K = 0.3$ piksela, $\Delta x'_o = 0.09$ oraz $\Delta y'_o = 0.7$ piksela.

Tabela 3. Wpływ filtracji dolnoprzepustowej oraz filtru medianowego obrazów cyfrowych na rozwiązanie terratriangulacji – wyznaczone parametry (c_K , x'_o , y'_o [mm], A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , C_1 , C_2) oraz dokładności (σ_0 , $V_{x'}$, $V_{y'}$, $RMS V_{x'}$, $RMS V_{y'}$, $RMS SX$, $RMS SY$, $RMS SZ$ [mm])

	Wariant zdjęć $Y_F = 5m_11$ zdjęć JPG_9 parametrów							
	Szum gaussowski losowy o poziomie p i gęstości g							
	p = 0, g = 0		p = 25, g = 50					
	Badane filtry dolnoprzepustowe – LPF i nieliniowy filtr medianowy – MED							
	No	No	LPF1	LPF2	LPF3	LPF4	LPF5	MED
n	3381	3381	3444	3430	3441	3427	3407	3525
u	675	681	708	702	696	690	684	720
σ_0	0.000525	0.000524	0.000551	0.000553	0.000534	0.000533	0.000535	0.000545
c_K	-26.7986	-26.7991	-26.7964	-26.7967	-26.7976	-26.7989	-26.7995	-26.7962
x'_o	0.09515	0.09536	0.09553	0.09538	0.09488	0.09484	0.09464	0.09583
y'_o	-0.01609	-0.01682	-0.02160	-0.02048	-0.02009	-0.01999	-0.02048	-0.01988
A_1	-1.184e-004	-1.184e-004	-1.175e-004	-1.176e-004	-1.179e-004	-1.180e-004	-1.180e-004	-1.181e-004
A_2	2.093e-007	2.089e-007	2.060e-007	2.060e-007	2.073e-007	2.085e-007	2.083e-007	2.069e-007
B_1	6.203e-006	6.106e-006	6.023e-006	5.819e-006	5.672e-006	5.681e-006	5.585e-006	6.008e-006
B_2	1.374e-006	1.250e-006	-6.549e-007	-1.729e-007	-3.089e-007	-9.574e-008	-4.091e-007	-2.381e-007
C_1	3.139e-005	2.960e-005	2.989e-005	2.723e-005	2.490e-005	2.439e-005	2.265e-005	2.114e-005
C_2	-1.189e-005	-5.452e-006	-1.188e-005	-6.434e-006	-4.957e-006	-4.132e-006	-4.962e-006	-7.286e-006
$RMS V_{x'}$	0.00040	0.00041	0.00044	0.00044	0.00042	0.00042	0.000418	0.000424
$RMS V_{y'}$	0.00053	0.00052	0.00053	0.00054	0.00053	0.00053	0.00053	0.00054
$RMS SX$	0.0448	0.0456	0.0461	0.0470	0.0811	0.0477	0.0485	0.0498
$RMS SY$	0.0965	0.1001	0.1136	0.1148	0.1163	0.1000	0.0999	0.1225
$RMS SZ$	0.0380	0.0386	0.0387	0.0390	0.0398	0.0395	0.0398	0.0406

Wyniki wyrównania testowanych wariantów sieci zdjęć cyfrowych nie wykazują statystycznie istotnych różnic. Niewielkie różnice wartości wyznaczonych parametrów kalibracji lustrzanki Kodak DCS Pro 14n oraz dokładności współrzędnych 3D wynikają z liczby oraz rozmieszczenia sygnalizowanych punktów, rozpoznanych i identyfikowanych podczas automatycznego pomiaru w systemie AICON 3D Studio. W konsekwencji, różna konfiguracja przestrzenna punktów pomiarowych w testowanych wariantach zdjęć spowodowała zmianę wartości korelacji liniowej między parametrami kalibracji a elementami orientacji zewnętrznej zdjęć, co z kolei powodowało zmianę wartości wyznaczanych niewiadomych.

6. PODSUMOWANIE, WNIOSKI

W aplikacjach fotogrametrii bliskiego zasięgu niejednokrotnie występuje w zarejestrowanych sekwencjach obrazów cyfrowych problem przypadkowych lub systematycznych zniekształceń radiometrycznych. Korekcja nieostrości (rozmycia) i wyeliminowanie szumów na obrazach cyfrowych jest możliwa przez zastosowanie cyfrowej filtracji obrazów.

W pracy badano wpływ 6. liniowych wyostrzających filtrów górnoprzepustowych (*high-pass filters*) oraz 5. filtrów liniowych dolnoprzepustowych (*low-pass filters*) i nieliniowego filtru medianowego, służących do eliminacji szumów, na podpikselową dokładność pomiaru punktów sygnalizowanych zmodyfikowaną metodą ważonego środka ciężkości (*Center Weighted Method*) oraz dokładność rozwiązania sieci zdjęć bliskiego zasięgu z kalibracją równoczesną lustrzanki cyfrowej.

Badania przeprowadzono na podstawie wielokrotnych zdjęć cyfrowych pola testowego, z których wygenerowane zostały, zapisane w formacie JPG, obrazy nieostre (rozmycie gaussowskie) i obciążone szumem (szum gaussowski losowy).

Filtracja górnoprzepustowa obrazów nieostrych (promień rozmycia $r = 2$ piksele) jest niezbędna przy automatycznym pomiarze sygnalizowanych punktów strukturalnych metodą ważonego środka ciężkości. W przypadku pomiaru obrazów silnie rozmytych (rozmycie $r = 3$ piksele), typowe filtry Laplace'a, nie wyostrzają obrazów cyfrowych w stopniu umożliwiającym pomiar punktów. Jedynym skutecznym filtrem górnoprzepustowym okazał się laplasjan gaussowski (maska 5×5 pikseli).

Filtracja dolnoprzepustowa i medianowa obrazów zaszumionych nie wpływa na dokładność pomiaru punktów i w konsekwencji na zmianę wartości wyznaczanych metodą wiązek współrzędnych 3D oraz parametrów kalibracji.

Metoda ważonego środka ciężkości (CWM) działa skutecznie przy pomiarze sygnalizowanych punktów strukturalnych na nieznacznie rozmytych obrazach cyfrowych bliskiego zasięgu oraz jest odporna na występowanie szumów losowych.

W cyfrowych punktowych pomiarach bliskiego zasięgu optymalnym rozwiązaniem jest zastosowanie sygnalizacji punktów, w tym sygnalizacji kodowej oraz automatycznego pomiaru punktów metodą ważonego środka ciężkości.

7. LITERATURA

Adobe Photoshop CS6, 2012: <http://www.adobe.com>

Atkinson K.B., 1996. *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. Whittles Publishing.

AICON 3D STUDIO, User manual. 2012: <http://www.aicon.de>

Chen J., Clarke T.A., 1992. *The Automatic Recognition, Location and Labelling of Targets in Digital Photogrammetric Engineering Measurement*, ISPRS Washington, Com.V.

CorelDRAW Graphics Suite X6, 2012: <http://www.corel.com>

- Luhmann T., 1996. Results of the German Comparison Test for Digital Point Operators. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXI Part B5/2 Com.V, s. 324-329.
- Luhmann T., 2003. *Nahbereichsphotogrammetrie - Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Wichman Verlag, Heidelberg.
- Artykuł I. Luhmann T., Robson S., Kyle S., Harley I., 2006. *Close Range Photogrammetry: Principles, Techniques and Application*, Dunbeath : Whittles Publishing.
- PHIDIAS, 2012: <http://www.phocad.de>
- Malina W., Smiatacz M., 2008. Cyfrowe przetwarzanie obrazów. *Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT*, Warszawa.
- Sawicki P., Ostrowski B., 2005. Badanie wybranych metod matching'u do pomiar punktów na cyfrowych obrazach bliskiego zasięgu. *Roczniki Geomatyki PTIP*, T. III, Zeszyt 2, s. 135-144.
- Sawicki P., Ostrowski B., 2007. Badanie potencjału pomiarowego aparatu cyfrowego typu SLR Kodak DCS Pro 14n (13.5 MP). *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 17, s. 729-738.
- Sawicki P., 2008. Średnioformatowa lustrzanka cyfrowa Mamiya ZD (21.3 MP) – nowy sensor wizyjny do aplikacji bliskiego zasięgu. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 18b, 559-568.
- Sawicki P., Suchocki L., 2009. Wpływ filtracji obrazów cyfrowych bliskiego zasięgu na dokładność pomiaru punktów wybranymi metodami dopasowania. *Geoinformatyka dla środowiska i społeczeństwa - badania i zastosowania*. V Ogólnopolskie Sympozjum Geoinformacyjne, Kraków, 17-19.09.2009.
- Schenk T., 1999. *Digital Photogrammetry*. TerraScience.
- Trinder J.C., 1989. Precision of Digital Target Location. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 55, No. 6, s. 883-886.
- Trinder J.C., Jansa J., Huang Y., 1995. An Assessment of the Precision and Accuracy of Methods of Digital Target Location. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 50(2), s. 12-20.
- V-STARS, 2012: <http://www.geodetic.com>

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF DIGITAL FILTERING ON THE ACCURACY OF CLOSE RANGE BUNDLE BLOCKADJUSTMENT

KEY WORDS: DSLR camera, digital image, digital filter, automatic measurement, bundle adjustment, self-calibration

Summary

Random and systematic radiometric distortion in the images sequence is a common issue in digital photogrammetric close range applications. A digital image filtering enables correction of blur and elimination of noise on digital images.

The paper analyses the influence of digital filtering of blurred and noisy close-range images on the subpixel accuracy of signalized points measurement and accuracy block bundle adjustment. Blurred (out of focus) images were processed with 6 linear high-pass filters, whereas 5 linear low-pass filters and 1 nonlinear median filter were applied for noisy images.

The photogrammetric measurement was conducted on test field in Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Dresden University of Technology. The test field consisted of the total of 220 signalized, retro-reflective points (65 coded points, 14 bit code). The test field was registered on eleven convergent and normal color photos from the distance of ca $Y_F = 5$ m using digital SLR Kodak DCS Pro 14n (resolution 4500×3000) camera.

Adobe Photoshop CS6 and Corel PHOTO-PAINT X6 software were used for generation of blurred images (Gaussian blur, radius $r = 2$ and radius $r = 3$) and noisy images (random Gaussian noise, level = 25, density = 50).

The fully automatic points measurement on the digital images using center weighted method, the bundle adjustment including self-calibration with additional parameters for modeling systematic imaging errors was determined in the AICON 3D Studio software package (AICON 3D Systems GmbH, Germany).

The optimal correction terms contain additional parameters for the compensation of radial-symmetric A_1, A_2 lens distortion and radial-asymmetric tangential B_1, B_2 lens distortion as well as affinity C_1 and shear of the digital sensor coordinate system C_2 .

High-pass filtering of blurred digital images (blur $r = 2$) is essential for measurement of structural signalized points using center weighted method.

In the case of significantly blurred images (blur $r = 3$) the typical Laplace filters do not sharpen the images to the extend enabling measurement. Laplacian of Gauss (mask 5×5 pixel) turned out to be the only efficient high-pass filter.

The low-pass filtering and nonlinear median filter of noisy digital images does not influence the measurement accuracy and values of adjusted parameters.

The center weighted operator is robust in the structural signalized points measurement on the insignificantly blurred images and is resistant to occurrences of random noises.

In all of the analyzed variants Sigma 0 mean value after the combined bundle adjustment with the self-calibration amounted to $\sigma_0 = 0.07$ pixel (sensor pixel size $p'_{HV} = 7.9 \mu\text{m}$). The RMS image coordinates residuals after adjustment amounted to RMS $V_{x'}$ = 0.05 pixel and RMS $V_{y'}$ = 0.06 pixel and the RMS standard deviation of calculated object coordinates respectively amounted to: RMS SX = 0.05 mm, RMS SY = 0.1 mm, RMS SZ = 0.04 mm.

Dane autora:

Dr inż. Piotr Sawicki
e-mail: piotr.sawicki@uwm.edu.pl
telefon: 89 523 32 82
fax: 89 523 32 10