

Regina Tokarczyk, Władysław Mierzwa

PORÓWNANIE METOD ROZWIĄZANIA SIECI FOTOGRAMETRYCZNYCH STOSOWANYCH DLA POMIARÓW OBIEKTÓW INŻYNIERSKICH

Wstęp

Kilkuletnie prace w ZFiIT nad metodami wyrównania sieci zdjęć fotogrametrycznych doprowadziły do powstania kilku programów: są to programy samokalibracji SCAT R. i A. Tokarczyków oraz program równoczesnego wyrównania modeli z równoczesną korektą ich deformacji - W. Mierzwy.

Od przeszło roku w posiadaniu naszym znajduje się ORIENT - austriacki system programów służących do fotogrametrycznego wyznaczania współrzędnych punktów, zawierający również wyrównanie sieci fotogrametrycznych.

Mając do dyspozycji te narzędzia można było przebadać ich przydatność do rozwiązywania różnych sieci fotogrametrycznych, porównać ich wyniki, a wnioski wykorzystać do udoskonalenia naszych programów.

Badania przedstawione w tej pracy prowadzone były w ramach grantu KBN "Analityczne i numeryczne metody opracowania wielostanowiskowych zdjęć fotogrametrycznych".

1. Programy SCAT i ich modernizacja

W latach 1987-91 powstało kilka programów samokalibracji SCAT, różniących się modelem funkcjonalnym oraz sposobem rozwiązywania układu równań normalnych. Są to programy:

- SCAT 02 - równoczesne wyrównanie zdjęć w oparciu o bezpośrednią transformację liniową (z dystorsją obiektywu lub bez),
- SCAT 03a - samokalibracja oparta na równaniu kolinearności z indywidualnym
- SCAT 03b - wyznaczeniem elementów orientacji wewnętrznej dla każdego zdjęcia (z dystorsją lub bez). W wersji b wyznacza się ponadto deformację afiniczną materiału negatywowego;
- SCAT 03c - tak jak SCAT 03a, jedynie elementy orientacji wewnętrznej są wspólne dla wszystkich zdjęć;
- SCAT 04a - rozwiązywanie samokalibracji przez sieć swobodną przy indywidualnych elementach orientacji wewnętrznej dla każdego zdjęcia;
- SCAT 04c - jak wyżej, elementy orientacji wewnętrznej są wspólne dla wszystkich zdjęć.

Programy te powstawały dla doraźnych potrzeb, toteż były ograniczone w stosowaniu: przygotowane były dla wyrównania tylko trzech zdjęć, dodatkowo każdy punkt mierzonego obiektu musiał być odfotografowany i pomierzony na każdym zdjęciu.

wybierać (na razie) cztery opcje obliczeń - odpowiadające wersjom 3a, 3c, 4a i 4c. Przygotowanie danych odbywa się drogą sumowania plików wsadowych: przybliżonych współrzędnych mierzonych punktów, współrzędnych tłowych dla poszczególnych zdjęć, przybliżonych elementów orientacji zdjęć. Po wywołaniu programu i zadeklarowaniu pliku danych wejściowych należy z klawiatury wybrać opcję obliczeń, zadeklarować ilość fotopunktów, wersję liczenia (bez dystorsji, z dystorsją).

Słabe uwarunkowanie układu równań normalnych pokonywane jest drogą regularyzacji lub "ręcznego" sterowania współczynnikiem korygującym przekątną macierzy RN (równań normalnych). Proces iteracyjny może być prowadzony do zadanej zbieżności lub też "popychany" z iteracji na iterację.

Program SCAT został przetestowany na teście teoretycznym w kilkunastu wersjach obliczeniowych, o różnej ilości zdjęć (od dwu do sześciu), różnej ich konfiguracji, przy zastosowaniu różnej ilości punktów dostosowania. Uzyskano zadowalające wyniki, ale satysfakcjonujące było porównanie ich z wynikami uzyskanymi innym programem - ORIENTem.

2. ORIENT- budowa systemu, wykorzystanie go do samokalibracji.

ORIENT jest systemem służącym do fotogrametrycznego wyznaczania położenia punktów, zawiera programy służące do podstawowych obliczeń fotogrametrii, a także wyrównanie sieci fotogrametrycznej - również z samokalibracją.

Obserwacjami w wyrównaniu mogą być współrzędne punktów na zdjęciach, na modelach, obserwacje geodezyjne, pseudoobserwacje jakimi są współrzędne fotopunktów, do wyrównania można dołączać warunki parametryczne. ORIENT umożliwia dokonanie większości obliczeń, z jakimi można się spotkać w fotogrametrii, poczynając od transformacji płaskich, przez wyznaczenie elementów orientacji zdjęcia, wcięcie w przód, budowę modelu, przestrzenną transformację modelu.

Model funkcjonalny wyrównania sieci pojedynczych zdjęć opiera się na równaniu kolinearności, rozwiązanie dokonywane jest algorytmem Cholesky'ego. W rozwiązaniu przez samokalibrację elementy orientacji wewnętrznej zdjęć oraz błędy obrazu mogą być wyznaczone dla każdego zdjęcia oddzielnie lub wspólnie dla grup zdjęć. Można wybierać jeden spośród kilku wielomianów aproksymujących błędy obrazu.

ORIENT zawiera również detekcję błędów grubych i odstających przez: analizę znormalizowanych odchyłek, estymację mocną oraz data-snooping.

3. Porównanie wyników samokalibracji SCAT-em i ORIENT- em.

W celu porównania działania samokalibracji programami SCAT oraz ORIENT obliczono 18 przykładów sieci fotogrametrycznej testu teoretycznego, którego budowę przedstawia Rys.1. Składa się on ze 125 punktów rozmieszczonych w sześcianie $5 \times 5 \times 5$ punktów, obiekt sfotografowany jest na ośmiu zdjęciach. Samokalibracje wykonano dla trzech zdjęć o różnej konfiguracji, różna też była konfiguracja i ilość wyznaczanych punktów, ilość punktów dostosowania.

Charakterystykę wersji obliczeniowych podaje Tabela 1, a wyniki wyrównania SCAT-em i ORIENT-em Tabela 2. Porównywano: błędy prawdziwe na punktach testu, precyzję wyznaczenia elementów orientacji wewnętrznej oraz odbieganie wartości tych elementów od ich wielkości prawdziwych.

Jak widać z Tabeli 2, wyniki otrzymane programem SCAT są porównywalne z ORIENT-em, a niekiedy nawet lepsze (wersje 5,6,7,10,12,14,18). Ponieważ ORIENT został utworzony dla typowych sieci fotogrametrycznych, nie zastosowano tu specjalnej metody numerycznej

rozwiązania równań słabo uwarunkowanych, zatem można spodziewać się, że może mieć trudności z obliczeniem źle skonfigurowanych (niekorzystnych) sieci.

W SCAT-cie natomiast, jeżeli proces iteracyjny okazuje się być słabo zbieżny lub rozbieżny, można przez narzucenie odpowiedniego współczynnika korygującego przekątną macierzy RN uzyskać rozwiązanie. Narzucone zostaje w ten sposób obciążenie na rozwiązanie - z czego należy sobie zdawać sprawę, ale dla wielu praktycznych przypadków ta metoda daje dobre rezultaty.

Oba programy posłużyły również do obliczenia sieci zdjęć niometrycznych, wykonanych kamerą Rolleiflex 6006 z płytką reseau. Obiektem mierzonym był zabytkowy pawilon kolei miejskiej w Wiedniu. Pomierzone na Stecometrze współrzędne punktów na zdjęciach zostały wstępnie przetransformowane na płaszczyznę siatki reseau transformacją afiniczną. Wyrównanie oparto na trzech fotopunktach. W wyniku wyrównania otrzymano na punktach kontrolowanych błędy położenia punktów: ORIENT-em - $m_p = \pm 0.009$ m, SCAT-em - $m_p = \pm 0.008$ m, a więc wyniki wyrównania są prawie identyczne.

4. Równoczesne wyrównanie grupy modeli z korekcją ich deformacji.

Podstawową jednostką budującą sieć fotogrametryczną w tej metodzie jest model złożony z dwu zdjęć, na których elementy orientacji nie nakłada się specjalnych warunków i które to elementy są dane (orientacja wewnętrzna) lub znane z dobrym przybliżeniem (orientacja zewnętrzna).

Obliczone na podstawie powyższych danych oraz pomierzonych współrzędnych tłowych współrzędne przestrzenne poszczególnych punktów są obciążone pewnymi błędami systematycznymi.

Deformacje poszczególnych modeli mogą się różnić, tak więc przy równoczesnym wyrównaniu należy przewidzieć określenie współczynników korygujących deformacje indywidualnie dla każdego modelu. Analiza deformacji szcztątkowych modelu wykazała, że największe deformacje posiadają współrzędne Y i można je skorygować wielomianem drugiego stopnia.

Właściwa korekcja wymaga jednak pewnej liczby odpowiednio rozmieszczonych punktów kontrolnych lub wiążących występujących na sąsiednich modelach. Jeżeli ten warunek nie będzie spełniony, może wystąpić silne skorelowanie niewiadomych, uniemożliwiające ich dokładne określenie. Aby tego uniknąć, musi być możliwość elastycznego doboru kształtu wielomianu korygującego w zależności od liczby i rozmieszczenia punktów na modelu.

Zaproponowano ogólną postać wielomianu korygującego współrzędne Y:

$$Y_F = a_1 X_F + a_2 X_F^2 + a_3 Y_F^2 + a_4 X_F Z_F + a_5 Y_F Z_F$$

Pierwszy przebieg obliczeń powinien być przeprowadzony bez uwzględnienia parametrów korygujących, co pozwoli na eliminację błędów grubych. Korekcja deformacji modelu powinna następować w ostatecznej fazie obliczeń po analizie deformacji szcztątkowych występujących na poszczególnych modelach, można wtedy wybrać właściwą postać wielomianu, w razie potrzeby rezygnując z niektórych wyrazów. Według powyższych założeń opracowano program TERTRIAN. Wykorzystuje on jako dane wejściowe: współrzędne poszczególnych modeli, współrzędne punktów kontrolnych (oraz środków rzutów, jeśli są znane), współrzędne przybliżone punktów wiążących.

Jako wynik otrzymuje się zbiory zawierające: dokumentację przebiegu obliczeń, zmodyfikowane współrzędne modelu po każdej iteracji oraz odchyłki współrzędnych, ostatecznie wyrównane współrzędne punktów.

5. Obliczenie sieci fotogrametrycznej zdjęć naziemnych dużego obiektu przemysłowego programami ORIENT i TERTRIAN.

Badanie możliwości programu ORIENT prowadzono między innymi na przykładzie naziemnych zdjęć fotogrametrycznych chłodni kominowej elektrowni Bełchatów. Zdjęcia wykonywano kamerami Photheo i UMK, miały one wyznaczone środki rzutów, na płaszczy chłodni rozmieszczone były punkty dostosowania.

Programem ORIENT wykonano kilka wersji obliczeniowych dla jednej z sześciu chłodni elektrowni. Wersje różniły się ilością punktów dostosowania, ilością i rodzajem niewiadomych. Jako miernik dokładności pomiaru użyto błędy na punktach kontrolowanych oraz błędy na środkach rzutów (Tabela 3). Z wyników można wnioskować, że najkorzystniejszą wersją pomiaru jest ta, w której wyrównanie opiera się na znajomości elementów orientacji wewnętrznej oraz środków rzutów kamer.

Jeżeli kamery nie mają aktualnej kalibracji, wyznaczenie elementów orientacji wewnętrznej kamer w wyrównaniu pociąga za sobą niewielki spadek dokładności pomiaru.

Cztery modele utworzone ze zdjęć tej samej chłodni zostały poddane wyrównaniu programem TERTRIAN. Założono znajomość środków rzutów zdjęć. Nie poddano wyrównaniu modeli utworzonych ze wszystkich zdjęć, ponieważ nie wszystkie posiadały odpowiednią "zakładkę", umożliwiającą powiązanie między modelami, czego wymaga metoda równoczesnego wyrównania modeli.

Uzyskano błędy na punktach kontrolowanych odpowiednio:

$m_x = \pm 0.018$ m, $m_y = \pm 0.019$ m, $m_z = 0.021$ m, co daje $m_p = \pm 0.036$ m, a więc nieco lepiej niż przy wyrównaniu ORIENTem dla wersji najbardziej korzystnej.

6. Podsumowanie

Przeprowadzone eksperymenty obliczeniowe, mające na celu wykazanie przydatności programów opracowanych w ZFiIT AGH pozwalają na stwierdzenie, że zarówno program SCAT jak i TERTRIAN dają wyniki obliczeń o dokładności porównywalnej lub przewyższającej dokładności uzyskane programem ORIENT.

Ich zasadniczą wadą jest mała wszechstronność, ograniczenie w stosowaniu do rozwiązywania specyficznych sieci fotogrametrycznych: tylko samokalibracja w przypadku SCAT-u, tylko modele w odpowiednim pokryciu w TERTRIAN-ie.

Również przygotowanie danych nastęrcza w tych programach trudności. Zarówno w jednym jak i w drugim dane wejściowe są przybliżonym rozwiązaniem zagadnienia, zatem aby je uzyskać należy stosować inne programy.

Rozwiązania numeryczne programów są w zasadzie zadowolające, zatem dalsze prace nad nimi winny być ukierunkowane raczej na modyfikacje ułatwiające wykorzystanie programów przez potencjalnego użytkownika.

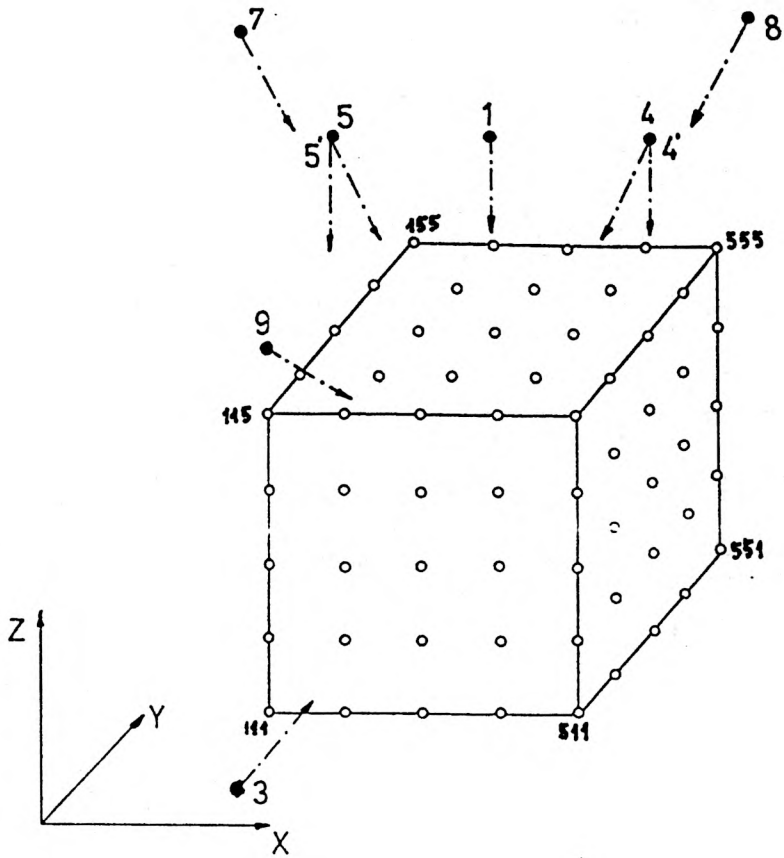
Tabela 1.

Wersja	Nr.zdjęć	Punkty pola	Wariant	Punkty dostosowania
1	1, 2, 3	wszystkie	A	111, 511, 151, 551
2	1, 4, 5	wszystkie	A	111, 511, 151, 551
3	1, 4, 5	wszystkie	B	111, 511, 151, 551
4	1, 4, 5	wszystkie	B	115, 515, 155, 555
5	1, 4, 5	114 do 554 i 115 do 555	A	114, 514, 154, 554
6	1, 4', 5'	115 do 555	B	115, 515, 155, 555
7	1, 4', 5'	114 do 554 i 115 do 555	B	114, 514, 154, 554
8	1, 4', 5'	114 do 554 i 115 do 555	A	114, 514, 154, 554
9	1, 4', 5'	wszystkie	A	111, 511, 151, 551
10	7, 8, 9	wszystkie	A	111, 511, 151, 551
11	7, 8, 9	wszystkie	B	111, 511, 151, 551
12	7, 8, 9	115 do 555	A	115, 515, 155, 555
13	7, 8, 9	115 do 555	B	115, 515, 155, 555
14	7, 8, 9	115 do 555 i 114 do 554	A	114, 514, 154, 554
15	1, 2, 3	wszystkie	B	11, 511, 151, 551
16	1, 4', 5'	wszystkie	A	111, 511, 151, 551 115, 515, 155, 555
17	1, 4', 5'	114 do 554 i 115 do 555	A	114, 514, 154, 554 115, 515, 155, 555
18	1, 4', 5'	114 do 554 i 115 do 555	B	114, 514, 154, 554 115, 515, 155, 555

Wersja A - oznacza zmienność elementów orientacji wewnętrznej zdjęć
 B - te same elementy orientacji wewnętrznej dla wszystkich zdjęć

Tabela 2.

Wersja	PROGRAM	Różnice między prawdziwymi a estymowanymi niewiadomymi i błędy niewiadomych									M_p
		Δx_o	Δy_o	Δc_k	Δx_o	Δy_o	Δc_k	Δx_o	Δy_o	Δz_o	
		m_{x_o}	m_{y_o}	m_{c_k}	m_{x_o}	m_{y_o}	m_{c_k}	m_{x_o}	m_{y_o}	m_{c_k}	
1	SCAT	0.04	0.00	-0.06	0.06	-0.01	0.00	0.04	0.01	0.06	0.65
		0.02	0.01	0.03	0.03	0.00	0.02	0.02	0.03	0.02	
	ORIENT	0.06	-0.03	-0.12	0.06	-0.02	0.01	0.01	0.00	0.07	0.64
		0.06	0.06	0.38	0.38	0.06	0.04	0.06	0.38	0.04	
2	SCAT	0.22	-0.06	0.73	0.04	-0.06	0.78	0.40	-0.06	0.76	4.31
		0.07	0.04	0.17	0.08	0.04	0.17	0.09	0.04	0.17	
	ORIENT	-0.40	-0.09	-0.19	-0.35	-0.07	-0.19	-0.55	-0.14	-0.13	3.60
		0.15	0.07	0.04	0.23	0.07	0.04	0.10	0.07	0.00	
3	SCAT	0.18	-0.06	0.00							1.97
		0.10	0.05	0.05							
	ORIENT	0.28	-0.05	0.00							2.07
		0.25	0.06	0.07							
4	SCAT	0.17	-0.06	-0.33							0.89
		0.10	0.08	0.19							
	ORIENT	0.05	-0.03	0.01							1.16
		0.12	0.05	0.07							
5	SCAT	0.11	0.00	0.15	0.16	0.02	0.11	0.16	0.00	0.10	0.70
		0.10	0.05	0.20	0.09	0.05	0.20	0.08	0.05	0.20	
	ORIENT	0.14	-0.06	3.01	-0.72	0.00	3.09	0.96	0.02	3.08	4.65
		0.64	0.11	0.08	0.73	0.12	0.09	0.67	0.12	0.00	
6	SCAT	0.26	0.02	2.28							0.55
		0.02	0.01	0.04							
	ORIENT	nie liczy									-
7	SCAT	0.30	1.73	0.24							8.06
		0.05	0.03	0.10							
	ORIENT	nie liczy									-
8	SCAT	0.08	1.27	0.71	0.63	1.26	0.71	-0.49	1.27	0.76	6.75
		0.04	0.02	0.08	0.07	0.03	0.08	0.07	0.03	0.08	
	ORIENT	0.62	-0.04	1.92	0.20	-0.01	2.00	0.90	0.00	2.00	14.81
		0.91	0.87	2.22	0.00	0.07	2.21	1.82	0.87	2.28	
9	SCAT	0.28	0.99	0.54	0.72	0.99	0.54	-0.17	0.99	0.56	22.33
		0.02	0.02	0.06	0.05	0.02	0.06	0.05	0.02	0.06	
	ORIENT	0.27	0.01	1.95	0.10	0.05	2.00	0.23	0.00	2.00	35.11
		0.04	0.46	0.03	0.00	0.45	0.02	0.00	0.46	0.00	
10	SCAT	-0.04	0.18	-0.06	0.01	0.15	-0.04	0.00	0.09	-0.15	0.71
		0.06	0.06	0.08	0.04	0.06	0.09	0.03	0.06	0.09	
	ORIENT	1.46	-1.62	2.96	-1.39	-1.60	3.00	0.00	1.68	2.86	13.58
		0.47	0.56	0.96	0.47	0.55	0.97	0.08	0.53	0.96	



Rys. 1

Tabela 3

Nr wersji	Charakterystyka wersji	Błędy na pkt. kontrolowanych [m]	Błędy na srodkach rzutów [m]
1	Stałe elementy orientacji wewnętrznej 15 punktów kontrolnych	0.001	0.305
2	Stałe srodki rzutów, elementy orientacji wewn., 3 punkty kontrolne	0.045 (0.045)	-
3	Stałe srodki rzutów, 3 punkty kontrolne	0.058 (0.051)	-
4	Stałe elementy orientacji wewnętrznej, 3 punkty kontrolne	0.073 (0.045)	0.511 (0.369)
5	Wyznaczane wszystkie elementy orientacji zdjęć, 3 punkty kontrolne	0.060 (0.068)	0.614 (0.672)
6	Stałe srodki rzutów, elementy orientacji wewn., bez punktów kontrolnych	0.091 (0.072)	-
7	Stałe elementy orientacji wewn., srodki rzutów jako punkty kontrolne + 3 punkty kontrolne	(0.045)	(0.003)
8	Wyznaczane elementy orientacji wewn., srodki rzutów jako pkt.kontrl. + 3 punkty kontrolne	(0.051)	(0.000)

Recenzował: prof.AGH dr hab.inż. Jerzy Bernasik

dr inż. Regina Tokarczyk
 dr inż. Władysław Mierzwa
 Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej
 Akademia Górniczo-Hutnicza
 Kraków, Al.Mickiewicza 30, paw.C-4