

Józef Jachimski, Adam Boroń, Aleksandra Piłat

EMPIRYCZNA OCENA DOKŁADNOŚCI WYMIAROWANIA OBIEKTÓW ZABYTKOWYCH Z WYKORZYSTANIEM APARATÓW FOTOGRAFICZNYCH I SYSTEMU "ORIENT"

1. Wstęp.

Międzynarodowe pole testowe "Karlsplatz", które stanowi średniej wielkości zabytkowy budynek w Wiedniu, jest obiektem zainteresowania co najmniej 23 ośrodków naukowych na świecie. Wielu fotogrametrów zajmujących się technologią inwentaryzacji zabytków podjęło trud opracowania zdjęć tego budynku, wykonanych różnymi aparatami fotograficznymi. Celem eksperymentu jest praktyczne potwierdzenie możliwości stosowania aparatów fotograficznych jako pełnowartościowego narzędzia pomiarowego w inwentaryzacji zabytków.

Trzeba tu złożyć wyrazy uznania Profesorowi Peterowi Waldhauslowi, który nie tylko był pomysłodawcą tego międzynarodowego przedsięwzięcia, ale uzyskał środki na dofinansowanie szkoleń jakie od trzech lat organizuje w Wiedniu. Wyposażył też szereg ośrodków biorących udział w eksperymencie (w tym Zespół Zakładu Fotogrametrii AGH w Krakowie) w komputer PC 386 SVGA i opracowany w wiedeńskim Uniwersytecie Technicznym program ORIENT, który umożliwił nam obliczenie wielu wariantów sieci terratriangulacji.

Poniżej przekazujemy relację z przebiegu naszego uczestnictwa w międzynarodowym eksperymencie "Karlsplatz" i przedstawiamy uzyskane rezultaty, w pełni potwierdzające ideę przewodnią eksperymentu, którą Prof. Waldhausl przedstawił przed czterema laty w słowach: " Praktyczne wykorzystanie niemetrycznych kamer w fotogrametrii architektonicznej nie jest już utopią. Obecnie można uznać, że jest to już realne, albo conajmniej może być traktowane jako szansa technologiczna w nagłych przypadkach. ... W ostatnich kilku latach, często odnosiłem wrażenie, że profesjonalni fotogrametryści nie wierzyli w tę technologię".

Udział w eksperymencie pozwolił nam zgromadzić materiały i doświadczenia umożliwiające praktyczne stosowanie aparatów fotograficznych w inwentaryzacji zabytków na skalę produkcyjną

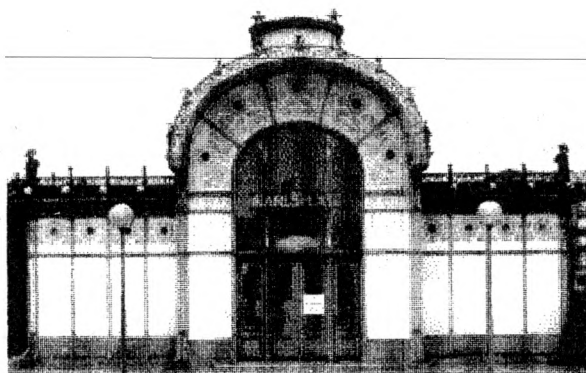
2. Charakterystyka testowego obiektu architektonicznego "OTTO WAGNER PAVILION"

Uniwersytet Techniczny w Wiedniu (TUW) jako organizator międzynarodowego testu dotyczącego badania dokładności metrycznych, semimetrycznych i niemetrycznych aparatów fotograficznych jako obiekt testowy wybrał budynek stacji metra - Karlsplatz w Wiedniu. Budynek ten jest zabytkiem architektury zaprojektowanym przez Otto Wagnera, stąd znany jest pod nazwą Otto Wagner Pawilion. Jego niezbyt duże wymiary oraz dostęp ze wszystkich

stron stwarzały bardzo dobre warunki dla przeprowadzenia terratriangulacji tego obiektu z wykorzystaniem różnych aparatów fotograficznych.

Pawilon O.Wagnera zbudowany jest na planie prostokąta o wymiarach 8 x 15 m, i wysokości ok.8 m (Rys.1). Na każdej z jego 4 elewacji wybrano i pomierzono w terenie punkty kontrolne. Ogółem pomierzono 46 punktów kontrolnych (punkty grupy I) w tym 15 sygnalizowanych specjalnymi znaczkami naklejanymi na obiekcie a 31 fotopunktów wybrano jako szczegóły sytuacyjne. Te ostatnie zostały wybrane jako jednoznaczne elementy geometryczne malowideł na elewacji, tak aby zapewnić jak największą dokładność ich identyfikacji na zdjęciach.

Współrzędne przestrzenne fotopunktów (X,Y,Z) określono metodą kątowych wcięć wprzód z sześciu wyznaczonych uprzednio stanowisk geodezyjnych. Średni błąd określenia współrzędnych punktów kontrolnych wyniósł dla X i Y ± 1 mm, a dla Z ± 0.5



Rys.1. Otto Wagner Pavilion

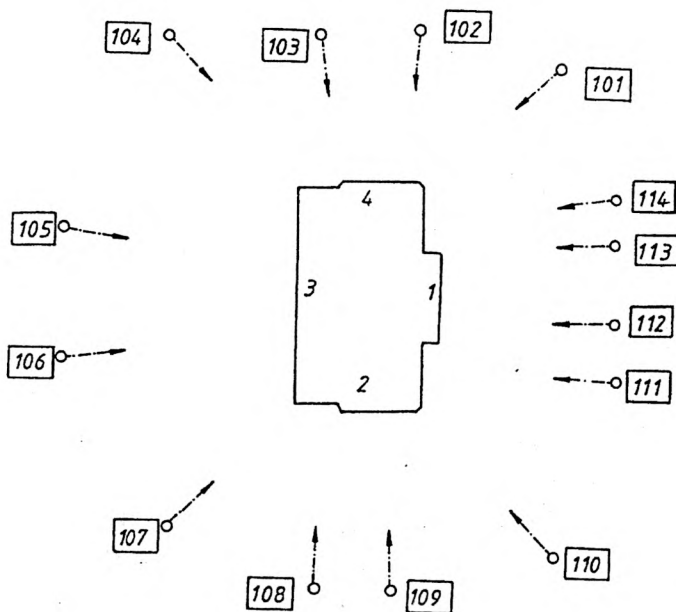
Poza 46 fotopunktami opisanymi powyżej, których współrzędne zostały udostępnione uczestnikom testu, twórcy testu pomierzyli również 102 punkty sytuacyjne na 4 elewacjach (punkty grupy II), zachowując ich współrzędne dla siebie. Uczestnicy testu otrzymali jedynie opisy graficzne na podstawie których mogą te punkty zidentyfikować na dostarczonych zdjęciach. Punkty te są równomiernie rozmieszczone na wszystkich elewacjach.

3. Wykonanie i pomiar zdjęć testowych

Organizator międzynarodowego testu aparatów fotograficznych (TUW) dostarczył do obliczeń terratriangulacji 4 zestawy barwnych diapoztywów pawilonu O.Wagnera wykonanych przy użyciu czterech różnych aparatów fotograficznych. Reprezentowane były aparaty: metryczne (Rolleiflex 6006); semimetryczne (Leica Elcovision) oraz niemetryczne (Hasselblad 500 EL/M, Nikon FE2). Wykonano przy ich pomocy zdjęcia w dwóch formatach: 60 x 60 mm (Rolleiflex 6006, Hasselblad 500 EL/m) i 24 x 36 mm (Leica- Elcovision, Nikon FE2). Pod względem kąta rozwarcia obiektywu podział aparatów był następujący: z obiektywem normalnokątnym - Rolleiflex 6006; z obiektywem szerokokątnym - Hasselblad 500 EL/M, Leica Elcovision i Nikon FE2. Dwa z aparatów wyposażone były w płytki reseau.

Rolleiflex 6006 posiadał płytkę reseau o 121 krzyżach w odstępach co 5 mm, a Leica Elcovision płytkę reseau o 35 krzyżach również w odstępach 5 mm. Dla aparatów Rolleiflex 6006 i Leica Elcovision podane były współrzędne punktu głównego (x_0 , z_0), kalibrowane odległości obrazowe c_k oraz współrzędne krzyży reseau lub znaczków tłowych. Dodatkowo dla aparatu Rolleiflex 6006 podano współczynniki dystorsji radialnej, symetrycznej.

W Zakładzie Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej AGH kilka lat temu powstał prototyp aparatu semimetrycznego zbudowanego na bazie aparatu fotograficznego Pentacon Six (format zdjęć 60 x 60 mm) [1]. W aparat ten wbudowano płytkę reseau o 49 krzyżach (w odstępach 5 i 10 mm) i wykonano jego kalibrację. Wydawało się celowym włączenie tego aparatu do międzynarodowego testu, aby uzyskać porównanie wyników osiągniętych z jego udziałem w stosunku do wyników z innych aparatów fotograficznych. Dla rozszerzenia zakresu testowanych aparatów zdecydowano się również włączyć do obliczeń zdjęcia wykonane niemetrycznym aparatem małoobrazkowym wyposażonym w obiektyw normalnokątny. W efekcie tych decyzji wykonaliśmy we Wiedniu (we własnym zakresie) zdjęcia testowe pawilonu O. Wagnera aparatem Pentacon Six Reseau oraz małoobrazkowym aparatem Nikomat. Zdjęcia wykonywane były ze stanowisk jak najbardziej zbliżonych do tych, z których wykonywane były zdjęcia testowe aparatem Rolleiflex 6006 (ten sam kąt widzenia obiektywu). Ogółem wykonano z tych stanowisk po 14 zdjęć jednym i drugim aparatem (Rys.2). Jako materiału fotograficznego użyto błon negatywowych czarno białych. Zestawienie aparatów i danych technicznych wykonanych zdjęć zawiera tabela 1.



Rys.2 Szkic rozmieszczenia stanowisk, wokół pawilonu O. Wagnera, dla aparatów normalnokątnych

Nazwa aparatu	Rodzaj	Elementy orient. wewnętrz.	Definicja układu tłowego	Obiektyw f	Format zdjęć	Ilość zdjęć	Wykonawca
Rolleiflex 6006 Reseau	metryczny	x_0, z_0, c_k dystorsja radialna symetr.	plytka reseau (121 krzyży)	normalnokątny 80 mm	60 x 60	14	TUW
Hasselblad 500 EL/M	niemetryczny	-	-	szerokokątny 50 mm	60 x 60	13	TUW
Pentacon Six Reseau	semimetryczny	x_0, z_0, c_k	plytka reseau (49 krzyży)	normalnokątny 80 mm	60 x 60	14	AGH
Leica Elcovision Reseau	semimetryczny	x_0, z_0, c_k	plytka reseau (35 krzyży)	szerokokątny 28 mm	24 x 36	13	TUW
Nikon FE2	niemetryczny	-	-	szerokokątny 35 mm	24 x 36	12	TUW
Nikkormat	niemetryczny	-	-	normalnokątny 50 mm	24 x 36	14	AGH

Tabela 1. Charakterystyka aparatów fotograficznych biorących udział w międzynarodowym teście "Karlsplatz"

Ogółem dla 6 aparatów fotograficznych wykonano 80 zdjęć, które pomierzone zostały na Stecometrze. Na każdym zdjęciu mierzono:

- punkty definiujące układ tłowy
- fotopunkty (punkty grupy I), oraz
- punkty wiążące sieci terratriangulacji zdefiniowane przez TUW (punkty grupy II)

Jako punkty definiujące układ tłowy mierzono 4 znaczki tłowe (Hasselblad), 9 krzyży płytki reseau (osiem równomiernie rozmieszczonych na obwodzie siatki i 1 środkowy) i 8 punktów na każdej ramce obrazowej dla zdjęć wykonanych aparatami niemetrycznymi.

Pomiar tylko 9 krzyży reseau na zdjęciach, zamiast wszystkich, usprawiedliwiony był bardzo dużą ilością tych punktów na wszystkich zdjęciach reseau (ogółem 2835 krzyży) oraz wynikami naszych badań [2], z których wynika, że ograniczona ilość mierzonych krzyży do 9 i wykonywanie transformacji w ćwiartkach nie powoduje istotnego obniżenia dokładności określanych punktów.

Dla aparatu Hasselblad 500EL/M jako punkty odniesienia na ramce obrazu wybrano 8 punktów charakterystycznych na każdym zdjęciu. Natomiast dla zdjęć niemetrycznych małoobrazkowych, ze względu na brak charakterystycznych punktów na ramce niemetrycznych (narożniki ramki nie były jednoznaczne) na każdym z boków ramki mierzono po dwa punkty i wyliczono analitycznie punkty przecięcia boków ramki ze sobą. Tak wyliczone punkty stanowiły odniesienie dla wszystkich zdjęć wykonanych tym samym aparatem niemetrycznym.

Na każdym z 80 zdjęć pomiarowych pomierzono ponadto fotopunkty i punkty wiążące sieci wg zasady, że wszystkie punkty z tych dwóch grup odfotografowane na zdjęciu podlegają pomiarowi. Wszystkie punkty były mierzone dwukrotnie.

4. Dokładność określania przestrzennego położenia punktów metodą terratriangulacji z wykorzystaniem programu ORIENT

Bezpośrednim celem przedsięwziętych obliczeń eksperymentalnych było doświadczalne określenie dokładności z jaką można określić wymiary bryły budowli, stosując różne kamery.

Jak wspomniano wyżej udostępniono nam wzorcowe współrzędne terenowe 46 punktów (Grupa I) spośród ogółem 148 punktów obiektu będących przedmiotem analizy. Punkty o nieznanymi współrzędnych (102) stanowiły II grupę punktów obiektu.

Dodatkowe współrzędne wzorcowe dla 102 punktów grupy II określiliśmy ze zdjęć wykonanych metrycznym aparatem fotograficznym Rolleiflex (60 x 60mm, $c_k = 80.17$, reseau). Dysponując pełnym wykazem wzorcowych współrzędnych 148 punktów obiektu, ocenialiśmy dokładność wyznaczenia współrzędnych ze zdjęć wykonanych pozostałymi kamerami.

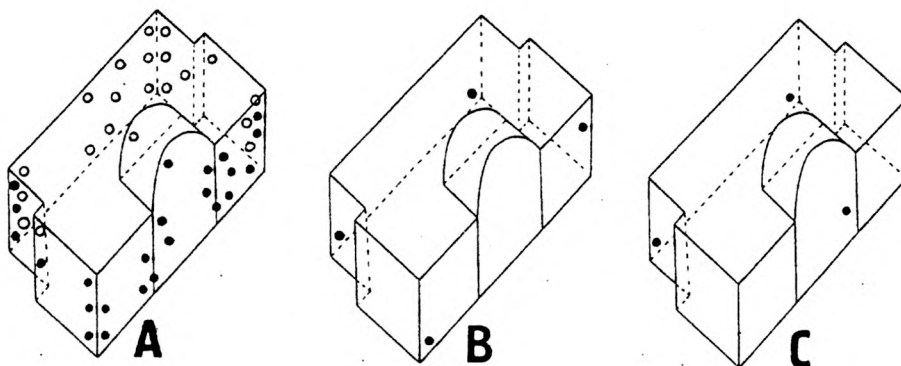
W procesie wyrównania terratriangulacji ze zdjęć z Rolleiflexa, mającej na celu wyznaczenie fotogrametrycznych współrzędnych wzorcowych 102 punktów grupy II wykorzystano wszystkie punkty grupy I jako punkty dostosowania. Porównanie wyznaczonych współrzędnych grupy I z danymi wykazało błąd średni $m_{x,y} = \pm 1$ mm, zaś sigma 0 z wyrównania uzyskaliśmy równe 7.5 μ m. Uogólniając wyniki analizy można założyć, że punkty grupy II wyznaczone zostały również z błędem średnim $m_{x,y} = \pm 1$ mm. Tak wyznaczone punkty grupy II w liczbie 102 uzyskały fotogrametryczne współrzędne wzorcowe, będące -wraz ze współrzędnymi geodezyjnymi punktów grupy I - podstawą oceny dokładności wyników uzyskanych z pozostałych kamer biorących udział w eksperymencie przy różnych układach punktów dostosowania.

W dalszych obliczeniach stosowano 3 warianty rozmieszczenia punktów dostosowania, które przedstawiono na rys.3:

Wariant A: wszystkie punkty grupy I wykorzystywano jako punkty dostosowania

Wariant B: jako punkty dostosowania wykorzystywano 4 punkty grupy I, rozmieszczone w narożach budynku

Wariant C: jako punkty dostosowania wykorzystywano tylko 3 punkty dostosowania rozmieszczone na 3 fasadach budynku, możliwie daleko od siebie.




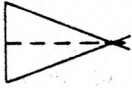

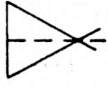

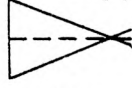




Rys.3. Rozmieszczenie punktów dostosowania wykorzystywanych w wariantowych obliczeniach terratriangulacyjnych

Obliczenia przy 46 i 3 punktach dostosowania wykonano dla wszystkich sześciu kamer.

W jednoczesnym wyrównaniu, do którego użyto programu fotogrametrycznego "ORIENT", obliczono współrzędne wyznaczanych punktów oraz elementy orientacji zewnętrznej, a także dla kamer niometrycznych, elementy orientacji wewnętrznej i współczynniki dystorsji. Przy kolejnych iteracjach wyrównania eliminowano obserwacje, których wskaźnik Robust znacznie odbiegał od pozostałych.

Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli nr 2.

Tabela 2

Aparat fotograficzny	liczba aktywnych pktów kontrol.	m_0 [mm] punkty grupy I	m_0 [mm] punkty grupy II	Parametry kamery	
Rolleiflex 6006 reseau metryczny	46 4 3	1 9 10	- 7 7	 60 x 60 mm	 $C_k = 80.17$ mm
Hasselblad 500 niometryczny	46 4 3	1 7 9	7 8 10	 60 x 60 mm	 $C_k \sim 51$ mm
Pentacon Six reseau semimetryczny	46 3	3 18	7 18	 60 x 60 mm	 $C_k \sim 80$ mm
Leica Elcovision reseau metryczny	46 4 3	1 33 33	20 37 38	 24 x 36 mm	 $C_k = 34.61$ mm
Nikon FE2 niometryczny	46 3	2 62	28 72	 24 x 36 mm	 $C_k \sim 28$ mm

Średni błąd kwadratowy wyznaczonych współrzędnych dla kamer formatu 60 x 60 mm (Rolleiflex, Hasselblad i Pentacon) przy 46 i 4 punktach dostosowania wyniósł 7-9 mm, przy 3 punktach kontrolnych 7-10 mm dla Rolleiflexa i Hasselblada, a 18 mm dla Pentacona.

Dla kamer małoobrazkowych średni błąd kwadratowy przy 46 punktach dostosowania wyniósł:

- 20 mm dla kamery semimetrycznej szerokokatnej (Leica)
- 28 mm dla kamery niometrycznej szerokokatnej (Nikon)
- 14 mm dla kamery niometrycznej normalnokątnej (Nikkormat)

Przy 3 punktach kontrolnych błąd średni wyniósł 33 - 38 mm dla kamery semimetrycznej Leica i 59 - 73 mm dla obu kamer niemetrycznych (i tu nie zaobserwowano różnicy dokładności przy różnej długości ogniskowej).

Kolejnym etapem obliczeń było wyłączenie z wyrównania tych obserwacji, których błąd na zdjęciu przekraczał $30 \mu\text{m}$ i włączanie ewentualnych współrzędnych, których błąd był mniejszy od $30 \mu\text{m}$, a zostały wcześniej wyłączone z obliczeń ze względu na wysoki wskaźnik Robust. Ogółem w obliczeniach jednego bloku terratriangulacji wykorzystywano w zależności od ilości zdjęć, około 1100 obserwacji. Dla trzech kamer $60 \times 60 \text{ mm}$ wyłączono po 2 obserwacje, dla kamery Leica - 13 obserwacji, dla kamery Nikon TUW - 48 obserwacji, dla kamery Nikormat - 11 obserwacji.

Dane dokładnościowe uzyskane z tego etapu obliczeń zamieszczono w tabeli 3. Błędy średnie przestrzennego położenia punktu dla 5 kamer zmniejszyły się od 0 do 3 mm.

Tabela 3

Aparat fotogr. wersja obliczeń	Ilość wyłącz. obserw.	liczba aktywnych pktów kontrolnych	m_0 [mm] punkty grupy I	m_0 [mm] punkty grupy II	Sigma 0 [μm] zewnątrz. <i>zew.</i>	Sigma 0 [μm] wewnątrz. <i>wewn.</i>	Parametry kamery	
							fomat zdj.	C_x , kąt rozw. ob.
Rolleiflex 6006 metryczny	2	46 3	1 7	- 5	7.5 7.3	16	60x60mm	$c_x=80,17\text{mm}$ normalny
Rolleiflex 6006 semimetryczny		3	10	9	6.7	30		60x60mm
Hasselblad 500 niemetryczny	2	46 3	1 6	7 8	6.3 5.8	17 19	60x60mm	$c_x=50,6\text{mm}$ szeroki
Pentacon Six semimetryczny	2	46 3	1 17	7 16	7.2 6.9	23 53	60x60mm	$c_x=80,5\text{mm}$ $c_x=80,0\text{mm}$ normalny
Pentacon Six metryczny		46 3	1 11	7 10	8.2 7.8	23 33		60x60mm
Leica Elcovision metryczny	13	46 3	1 30	20 35	12.1 10.2	33 38	24x36mm	$c_x=34,61\text{mm}$ szeroki
Nikon FE2 niemetryczny	48	46 3	1 61	29 69	15 12.7	38 90	24x36mm	$c_x=27,4\text{mm}$ $c_x=27,5\text{mm}$ szeroki
Nikkormat niemetryczny	11	46 3	2 25	12 18	7.7 5.2	25 38	24x36mm	$c_x=50,7\text{mm}$ normalny

Następny eksperyment, który podjęliśmy, polegał na innym potraktowaniu elementów orientacji wewnętrznej. Przeprowadzono ponownie obliczenia dla Rolleiflexa, ale jako kamery semimetrycznej (uzmienniono elementy orientacji wewnętrznej) i dla Pentacona jako kamery metrycznej. Średni błąd kwadratowy przy 3 punktach kontrolnych dla Rolleiflexa zwiększył się o 3-4 mm. Dla Pentacona przyjęto elementy orientacji wewnętrznej na podstawie kalibracji kamery na polu testowym; średni błąd kwadratowy położenia punktu zmniejszył swoją wartość o 6 mm (tab.3).

Dla wszystkich rozpatrywanych przypadków zbadano dokładność zewnętrzną i wewnętrzną wyrównania. Miernikiem dokładności wewnętrznej wyrównania jest średni błąd kwadratowy ($\Sigma \sigma_{\text{wewn}}$) położenia obrazu w stosunku do hipotetycznego optymalnego położenia obrazu wyznaczonego z wyrównania dla wszystkich zdjęć. Dokładność zewnętrzną otrzymano poprzez przybliżone przeskalowanie błędu średniego wyznaczenia położenia punktów w terenie na błąd na zdjęciu ($\Sigma \sigma_{\text{zewn}}$).

Dla wszystkich rodzajów kamer Sigma 0 zewn. przy 46 punktach kontrolnych było dukrotnie, trzykrotnie większe niż Sigma 0 wewnętrzne.

Przy wyrównaniu opartym na 3 punktach dostosowania wielkości te były bardziej zróżnicowane dla poszczególnych kamer. I tak dla Hasselblada ok. 3 razy, dla aparatów Rolleiflex i Leica ok.5 razy, oraz ponad 7 razy dla Pentacona, Nikona i Nikormata.

5. Podsumowanie

Przeprowadzony eksperyment potwierdził możliwość uzyskania bardzo wysokich dokładności określania geometrii bryły obiektu zabytkowego aparatami fotograficznymi nawet w przypadku ograniczenia liczby punktów dostosowania do 3 dla bloku terratriangulacji.

Jednostkowy błąd średni obserwacji na zdjęciu, Sigma 0-wewnętrzne po wyrównaniu, uzyskano z programu w ramach eksperymentu w granicach od 7 do 15 mikrometrów, co świadczy o bardzo dobrym wzajemnym dopasowaniu się wiązek.

Jednostkowy błąd Sigma 0-zewnętrzne, wartość przybliżona, uzyskana przez podzielenie średniego błędu położenia punktu na obiekcie m_0 przez średnią wartość mianownika skali zdjęć, waha się dla różnych kamer w granicach od 16 do 90 mikrometrów.

Błędy wyznaczenia położenia punktu na obiekcie przy minimalnej osnowie wahają się w granicach od 5 mm (dla formatu 60 x 60 mm kamery normalnokątnej reseau) do 70 mm (dla formatu 24 x 36 mm, szerokokątnego aparatu fotograficznego bez urządzenia wypłaszczającego film). Ogólnie można stwierdzić, że nawet małoobrazkowe, sze rokokątne amatorskie aparaty fotograficzne mogą być wykorzystywane przy inwentaryzacji obiektów zabytkowych dla sporządzania dokumentacji w skali 1 : 100. Dla skali 1 : 50 i większych dokumentacja fotogrametryczna może być bezpiecznie wykonywana aparatami formatu 60x60 mm, najlepiej wyposażonymi w płytkę reseau.

Fakt, że całą inwentaryzację obiektu architektury można oprzeć na zaledwie trzech punktach dostosowania w pełni uzasadnia twierdzenie, że fotogrametryczne prace terenowe mogą być wykonywane przez niefotogrametrów.

Literatura

1. J.Jachimski, A.Boroń. "The semimetric 6x6 Reseau Camera for the Close Range Project of High Accuracy". International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Washington, 1992.
2. J.Jachimski, A.Boroń. "The accuracy of transformation of photographic picture on to the reseau master pattern". Prace Komisji Geodezji i Inżynierii Środowiska PAN Oddział w Krakowie, Geodezja 37, 1992
3. Waldhausl P. "The International CIPA - Test Karlsplatz, Vienna". CIPA Symposium. Bucharest - Sinaja, 22-25.09.93.
4. Waldhausl P. "3 x 3 rules for simple photogrammetric documentation of architecture". ISPRS Congres, Com V-4., Washington, 1992.
5. Kager H., Waldhausl P., "ORIENT - An universal photogrammetric adjustment system. Product information of the Institute of Photogrammetry and Remote Sensing. Vienna University of Technology, Vienna, 1991.

Recenzował: dr inż. Andrzej Wróbel

prof.dr hab.inż.Józef Jachimski
dr inż.Adam Boroń
mgr inż. Aleksandra Piłat
Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej
Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
al.Mickiewicza 30, paw.C-4, tel.338100 w.3826