

**ANALIZA WARUNKÓW ODTWORZENIA WZAJEMNEJ ORIENTACJI
OBRAZÓW Z SEKWENCJI FILMOWEJ**

**ANALYSIS OF CONDITIONS FOR RECONSTRUCTION OF RELATIVE
ORIENTATION OF FILM SEQUENCED IMAGES**

Michał Kowalczyk

Zakład Fotogrametrii Teledetekcji i SIP, Wydział Geodezji i Kartografii,
Politechnika Warszawska

SŁOWA KLUCZOWE: fotogrametria bliskiego zasięgu, obrazy sekwencyjne, orientacja, automatyzacja

STRESZCZENIE: Zastosowanie w fotogrametrii bliskiego zasięgu kadrów z filmu ma swoje głębokie uzasadnienie. Specyfika ich generowania umożliwia podniesienie niezawodności działania oraz uproszczenie technologii, mającej na celu wyznaczenie kształtów rejestrowanych obiektów.

Referat prezentuje warunki odtworzenia orientacji wzajemnej na podstawie punktów łączących, w krótkiej sekwencji obrazów. Brany jest pod uwagę zarówno dobór punktów jak i obrazów. Do badań wykorzystane były fragmenty filmu z kamery cyfrowej, rejestrowane wzdłuż prostej trajektorii. Analizy obejmują też użycie w teście punktów sygnalizowanych o znanych współrzędnych jako referencji. Wykorzystywane również są parametry orientacji wewnętrznej kamery, wyznaczone we wcześniejszych eksperymentach, dotyczących obrazów sekwencyjnych. W pracy proponowane jest poprawienie procesu znajdowania wspólnych punktów na takich obrazach.

Eksperymenty stanowią istotny fragment tworzonej technologii automatyzacji pozyskania trójwymiarowego modelu obiektu ze zdjęć o stopniowo zmieniających się elementach orientacji zewnętrznej.

1. WPROWADZENIE

Orientacja wzajemna określa położenie względem siebie pary lub większej grupy lokalizacji kamery (wiązek promieni homologicznych) w momencie ekspozycji, a więc realizacji sesji fotograficznej. Fotogrametria, jako dziedzina prowadzenia pomiaru kształtów i wzajemnego usytuowania obiektów, opiera się w znacznej mierze właśnie na prawidłowym określeniu orientacji wzajemnej. Wyznaczenie parametrów wiążących ze sobą lokalizacje kamery odbywa się za pośrednictwem wykrycia wspólnych fragmentów obiektu na kilku obrazach. Niekiedy to łączenie odbywa się ze wsparciem zewnętrznych systemów referencyjnych, dostarczających informacji o położeniu kamery w momencie ekspozycji (Dong-Gyu *et al.*, 2002; Zhang, Y, 2008)

Dysponując obrazami w formacie cyfrowym możemy posłużyć się daleko idącą automatyzacją, która w znacznej mierze wyręcza człowieka. W znacznej mierze, a nie zawsze, ponieważ występują niestety sytuacje, w których pomoc obserwatora jest nieodzowna.

Dotyczy to wykonania zdjęć ze stanowisk odległych od siebie, o różniących się znacznie elementach orientacji wzajemnej.

Fotogrametria bliskiego zasięgu zajmuje się badaniem i pomiarami obiektów bardziej zróżnicowanych niż teren, będący przedmiotem zainteresowań fotogrametrii lotniczej. Kształt obiektów naziemnych takich jak budynki, hałdy czy rzeźby daleko odbiega od płaskości terenu obserwowanego z wysokiego pułapu. Ten złożony kształt powoduje właśnie konieczność lokalizacji poszczególnych stanowisk obserwacyjnych znacznie różniącej się dla grupy zdjęć. Odtworzenie orientacji wzajemnej odbywa się po wykryciu identycznych fragmentów obiektu na grupie zdjęć.

Jeżeli lokalizacja kamer w istotny sposób różni się między sobą to obiekt jest niepodobny do siebie i wykrycie jego odpowiadających sobie punktów jest trudne i często automatycznie niewykonalne. Współczesna fotogrametria radzi sobie z tym problemem za pomocą sygnalizacji punktów na obiekcie. Ta sygnalizacja odbywa się za pomocą znaków o odpowiednim kształcie i barwie, kodujących dodatkowo unikalny numer (Heuvel *et al.* 1992). Inną metodą, nieinwazyjną, jest rzutowanie z pomocą rzutnika lub wskaźnika laserowego odpowiedniego wzoru na obiekt. Metody te są bardzo skuteczne i powszechnie stosowane w pomiarach bliskiego zasięgu.

Problem może się pojawić wtedy, gdy nie możemy ingerować w obiekt i jego oświetlenie jest niekorzystne do rzutowania czegokolwiek. Pomocne wówczas okazuje się zastosowanie sekwencji obrazów. Znalezienie podobieństw na takich obrazach jest o wiele łatwiejsze niż dla osobnych zdjęć z odległych stanowisk.

2. TRENDY W DZIEDZINIE AUTOMATYZACJI ORIENTACJI WZAJEMNEJ

Problem łączenia poszczególnych obrazów tego samego obiektu jest obecnie szeroko rozpatrywany w publikacjach. Jego rozwiązania pojawiają się w działających aplikacjach. Orientacja wzajemna służy do realizacji dwóch podstawowych celów, z których zasadniczym jest konstrukcja modelu fotogrametrycznego zarejestrowanej sceny. Kształt tego modelu zależy właśnie od poprawnego odtworzenia orientacji wzajemnej oraz parametrów geometrycznych kamery. Te ostatnie czasem są wyznaczane dopiero po wstępnym lokalizowaniu zdjęć względem siebie. Ważna jest niezawodność lokalizacji szczegółów na zdjęciach, nawet jeżeli nic o nich nie wiemy.

Kolejnym z zadań orientacji wzajemnej, ściśle związanym z tym pierwszym, jest wyznaczenie kierunku promieni rdzennych, które pozwalają na pewne ułatwienia w procesie technologicznym (Kang, 2008). Te ułatwienia związane są przede wszystkim z ograniczeniem obszarów poszukiwania obrazów tych samych punktów na zdjęciach. Poszukiwanie wzdłuż linii jest mniej pracochłonne niż przeszukiwanie całych obszarów. Fakt ten jest wykorzystywany przy uproszczeniu procesu ostatecznego dopasowania obrazów. Rezultatem tego dopasowania jest wyznaczenie przestrzennego położenia punktów, przedstawionych na zdjęciach.

Pierwsze przybliżenie w orientowaniu między sobą obrazów opiera się na prawidłowym wyznaczeniu pewnej niewielkiej grupy punktów homologicznych, stanowiącej niezbędne minimum do wykonania orientacji. Istotne jest tu zachowanie zgodności wykrytych punktów między poszczególnymi obrazami. Od tego zależy niezawodność całego procesu orientacji zdjęć. Jeżeli te początkowe punkty zostaną błędnie przyporząd-

kowe, to niestety cały proces tworzenia trójwymiarowego modelu będzie narażony na niepowodzenie (Mayer, 2006).

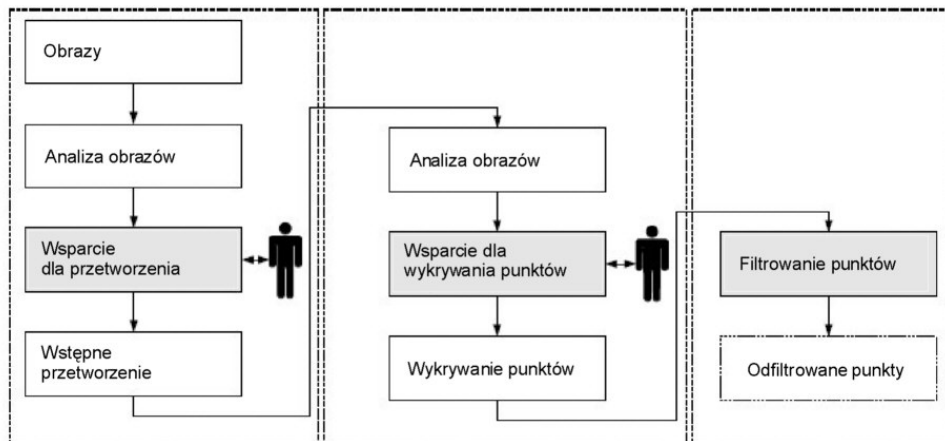
Z pomocą przychodzi tu stosowanie metod statystycznych, wybierających najbardziej niezawodne grupy odpowiadających sobie punktów w parze lub bardziej liczny zestawie obrazów. Często na początku takiego procesu występuje zaledwie 20% poprawnie przyporządkowanych fragmentów zarejestrowanej sceny. Porównanie działania poszczególnych metod łączenia punktów zostało wcześniej opisane (Martin, 2006). Dla przyspieszenia i poprawy działania procesu przyporządkowywania stosuje się redukcję rozmiaru obrazu tworząc jego piramidę (Kraus *et al.* 1997).

Po znalezieniu odpowiadających sobie szczegółów następuje proces poprawy geometrii całego modelu poprzez wykorzystanie innych elementów obrazu, przyjmując *a priori* ich określony kształt, jak przykładowo linie, które powinny być proste. Służą one także do kalibracji samej kamery. W czasie wyrównania położenia punktów w przestrzeni, parametry kamery zostają uściślone i minimalizowane są średnie odległości między promieniami homologicznymi.

3. SCHEMATY TECHNOLOGICZNE ODTWORZENIA ORIENTACJI WZAJEMNEJ

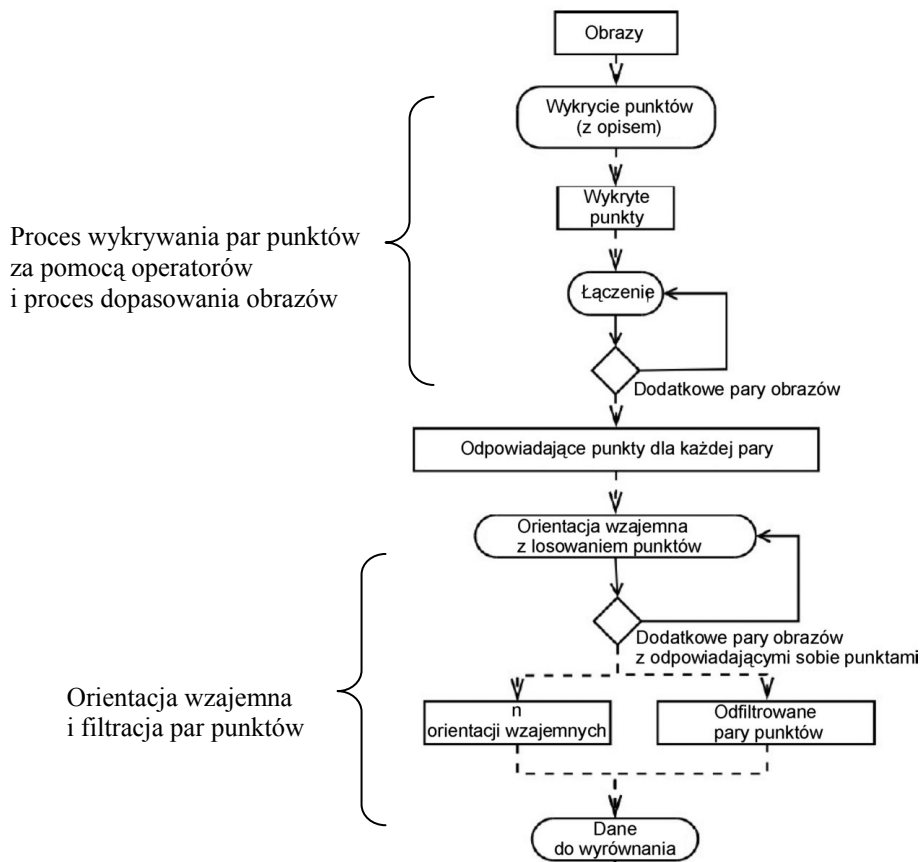
Autorzy publikacji, dotyczących automatycznego wyznaczania parametrów orientacji wzajemnej, posługują się określonymi schematami technologicznymi.

Proces technologiczny budowania trójwymiarowego modelu zarejestrowanych obiektów ma charakter iteracyjny. Realizacja odtworzenia orientacji wzajemnej jest przez to często wykonywana wielokrotnie, zmierzając do ostatecznego wyrównania, z udziałem coraz to pewniejszych punktów. Rysunek 1 przedstawia przykład technologii pozyskania punktów wiążących z dodatkowym nadzorem, prowadzonym manualnie (Reiterer, 2006). Proces ten realizują trzy odrębne podsystemy.



Rys. 1. Technologia pozyskująca punkty wiążące do orientacji wzajemnej, z udziałem kontroli obserwatora (Reiterer, 2006)

Obecnie prowadzone są udane próby automatyzacji procesu pozyskania informacji dotyczącej orientacji wzajemnej. Powodzenie tego przedsięwzięcia jest uzależnione od stopnia komplikacji sceny, powtarzalności tekstur oraz rozbieżności obrazów tych samych obiektów na różnych zdjęciach. Na rysunku 2 pokazany jest przebieg automatyzacji wyznaczenia orientacji wzajemnej z podniesieniem niezawodności za pomocą dodatkowych obrazów (Läbe *et al.* 2006). Dodatkowo na niezawodność procesu wpływa też niedalekie położenie sąsiednich stanowisk kamery w czasie rejestracji filmu.



Rys. 2. Technologia pozyskująca punkty wiążące do orientacji wzajemnej i wykonująca orientację wzajemną autonomicznie (Läbe *et al.* 2006)

Każda z przedstawionych technologii zawiera w sobie etap wykrywania punktów. Odbywa się to na podstawie analizy gradientu w otoczeniu badanego miejsca. Obecnie w literaturze występuje szereg operatorów umożliwiających wykrycie charakterystycznych

szczegółów na obrazach cyfrowych, przykładowo takich jak operatory: Moraveca, Foerstnera, Dericha, SUSAN, itd.

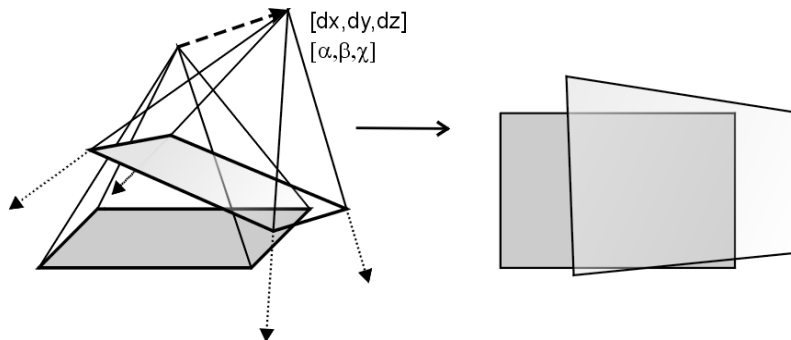
Po wstępnym odtworzeniu orientacji wzajemnej może wystąpić uściślenie założonych na wstępie parametrów orientacji wewnętrznej kamery. Cały proces wyrównania, włącznie z kalibracją ma charakter iteracyjny.

4. PROCES WYKRYCIA WSPÓLNYCH ELEMENTÓW OBRAZU

Automatyczna detekcja odpowiadających sobie punktów na zdjęciach jest możliwa, po rozwiązaniu szeregu problemów. Wykryte punkty charakterystyczne na sąsiednich klatkach często nie odpowiadają sobie. Różnią się zarówno co do liczby jak i lokalizacji. Posługując się nawet wypróbowanym operatorem wytwarzany jest szereg fałszywych rozwiązań wskazujących nieprawidłowe pary punktów.

Zapobiegając takim sytuacjom, należy wprowadzić rozwiązanie bardziej ogólne, odnoszące się do całości wiązanych zdjęć z sekwencji filmowej. Rozwiązaniem powszechnie stosowanym na wstępie jest piramida obrazów, zbudowana dla każdego zdjęcia z sekwencji. Dzięki jej zastosowaniu można poprawić niezawodność działania wykrywania wspólnych punktów, gdy występuje powtarzalna tekstura. Przyspiesza też ona całość procesu, ponieważ kojarzenie punktów odbywa się w mniejszym otoczeniu aktualnie badanego. Wielkość otoczenia wpływająca na komplikację obliczeń mierzona jest w jednostkach obrazu (pikselach), więc im wyższy poziom piramidy tym mniej obliczeń. Innym rozwiązaniem jest prowadzenie orientacji wzajemnej (tak jak w rozdziale 3 rys. 2) metodą losowania i eliminacji obserwacji odstających RANSAC *ang. RANdom SAmple Consensus* (Fischler *et al.* 1981).

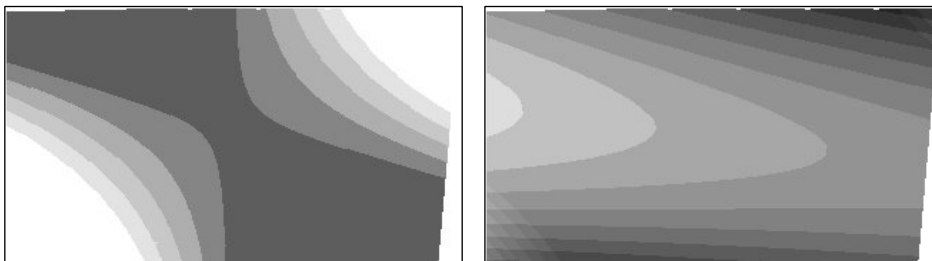
Obrazy sekwencyjne, będące klatkami filmu, nie różnią się bardzo między sobą. Na wyższych poziomach piramidy są niemal identyczne. Można zatem wprowadzić dopasowanie obrazu na całym obszarze pojedynczej klatki, zakładając niewielką zmienność badanych parametrów dopasowania. W niniejszym eksperymencie jako parametry dopasowania służyła lokalizacja przestrzenna jednego obrazu względem drugiego (rysunek 4). Analogicznie do wprowadzenia parametrów orientacji wzajemnej między dwiema klatkami (lewą i prawą). Odbywało się to dla całego obrazu jednocześnie. Prawe zdjęcie było przetwarzane w funkcji trójwymiarowego przesunięcia oraz trzech kątów obrotu i rzutowane na zdjęcie lewe (rysunek 3). Następnie badana była średnia odchyłka między tymi obrazami, wyznaczona na podstawie różnic wartości każdego elementu. Po uzyskaniu minimalizacji następowało przejście do niższego poziomu piramidy. Na końcu została wygenerowana mapa dla inicjalnych przesunięć każdej pary poszukiwanych punktów (rysunek 5). Stopnie szarości na mapie oznaczają wzrastające wartości poprawek do lokalizacji podobnych fragmentów obrazu na prawym kadrze względem lewego. Dzięki zastosowaniu tej proponowanej metody można uzyskać większą pewność odpowiedniego wytypowania pasujących do siebie punktów na dwóch zdjęciach.



Rys. 3. Rzutowanie pojedynczego poziomu piramidy obrazów na odpowiadający poziom, wytworzony z obrazu bazowego



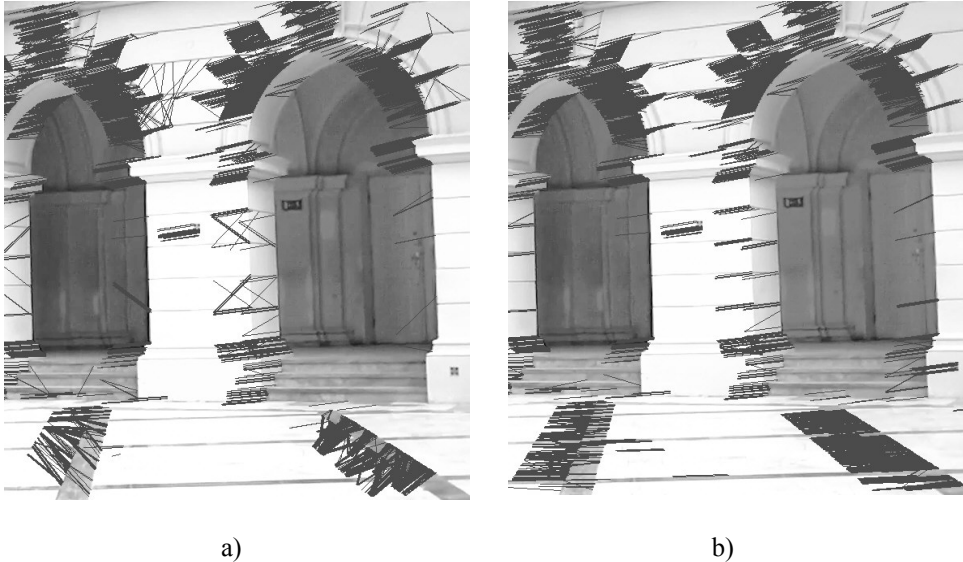
Rys. 4. Wybrane klatki do odtworzenia orientacji wzajemnej



Rys. 5. Wyznaczona mapa początkowych przesunięć punktów, osobno w wierszach i kolumnach $[d_i, d_j]$

Po wyznaczeniu mapy początkowych przesunięć można znacznie zawęzić obszar poszukiwania odpowiadających punktów. Zbędne okazuje się wykorzystanie górnych poziomów piramidy obrazów (o mniejszej rozdzielczości). Na tym etapie zyskuje się znaczne przyspieszenie obliczeń.

Rysunek 6 prezentuje porównanie efektów działania tej procedury względem standardowego podejścia, wykorzystującego jedynie poszukiwanie pojedynczych par punktów. Widoczne jest poprawienie niezawodności i wykryte pary wykazują większą regularność kierunków, łączących je wektorów.

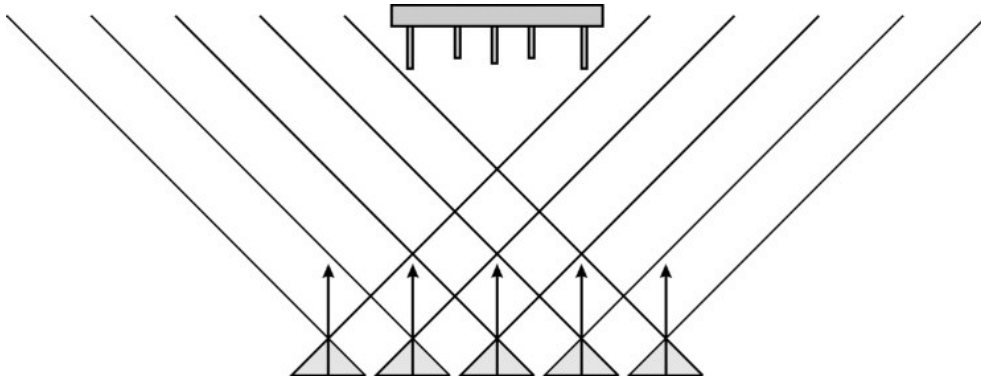


Rys. 6. Detekcja par odpowiadających sobie punktów: a) tylko na podstawie badania otoczenia; b) ze wstępnym przetworzeniem prawego obrazu

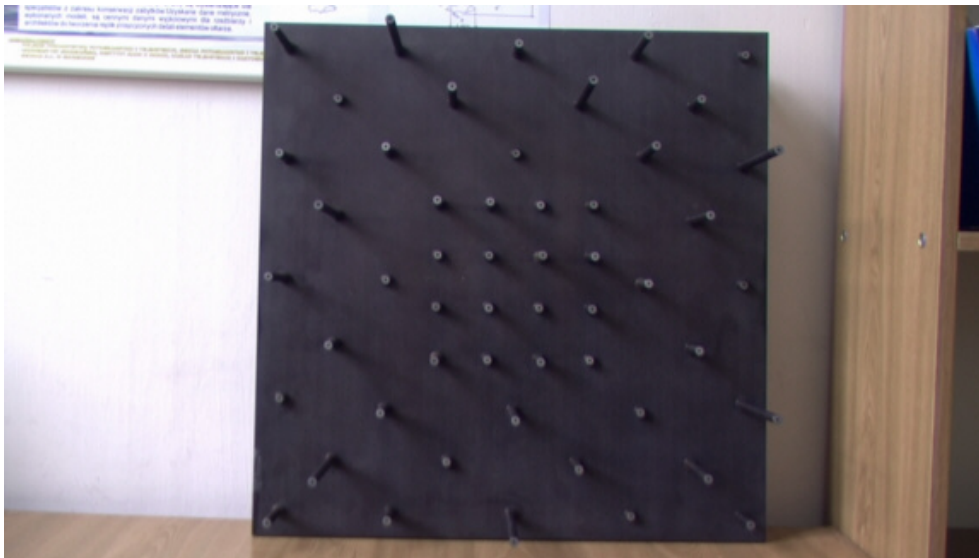
5. WYBÓR KADRÓW DO ODTWORZENIA MODELU OBIEKTU

Znajdowanie wspólnych elementów obrazu to krok do uzyskania informacji na temat wzajemnej orientacji obrazów. Poza tym problemem istotna jest także selekcja klatek, które ostatecznie należy brać pod uwagę przy realizacji fotogrametrycznego wycięcia w przód. Sekwencja filmowa daje ich sporą liczbę, dającą możliwość łączenia, ale wycięcie w przód jest realizowane dla odpowiedniego kształtu obszaru wyznaczalności punktów. Wstęgi błędów powinny się przecinać pod odpowiednim kątem, aby dokładność określenia głębi obiektu była jak najlepsza.

Przedmiotem badania była dokładność wyznaczeń punktów na podstawie pomiarów sekwencji obrazów. Eksperyment został wykonany w ramach pracy dyplomowej Daniela Wiszowatego na Politechnice Warszawskiej. Ramki pochodziły z filmu wykonanego kamerą rejestrującą obraz w standardzie $1920 \times 1080i$. Sekwencję tworzyło 12 ujęć, z których były wybierane różne konfiguracje obrazów. Stanowiska były rozmieszczone co około 24 mm, w odległości 1.25 m od testu. Rysunek 7 pokazuje schematycznie lokalizację stanowisk kamery względem testu trójwymiarowego. Szacowana dokładność osnowy wynosiła około ± 0.2 mm dla każdej osi układu współrzędnych. Na rysunku 8 przedstawiony jest przykładowy obraz z filmu.



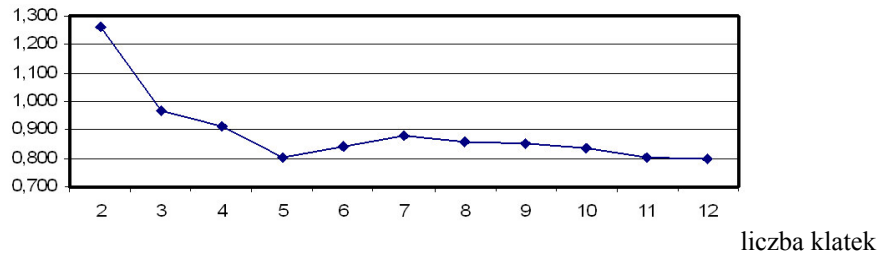
Rys. 7. Orientacyjne rozmieszczenie stanowisk kamery względem pola testowego



Rys. 8. Przykładowy kadr z analizowanego filmu

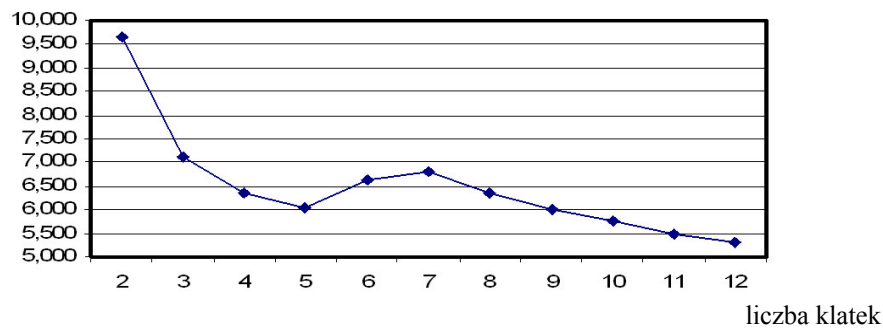
Obrazy zostały przetworzone do rzutu środkowego wykorzystując wcześniej wyznaczone w procesie kalibracji parametry błędów odwzorowawczych kamery. Przyjęto $c_k=2084$ piksele. Następnie zmierzone były współrzędne tłoze 52 punktów sygnalizowanych osnowy, na każdym obrazie. Obliczenia prowadzono wykorzystując moduł ISDM firmy Intergraph. W trakcie wyrównania punkty podzielono na część referencyjną i kontrolną (po połowie). Wykresy 9 i 10 prezentują średnie odchyłki od wartości nominalnych współrzędnych punktów kontrolnych, dla zmieniającej się liczby branych pod uwagę kolejnych stanowisk kamery.

V_{xy} [mm]



Rys. 9. Średnia odchyłka wyznaczenia punktów kontrolnych w płaszczyźnie testu, w zależności od wykorzystanej liczby kolejnych klatek

V_z [mm]

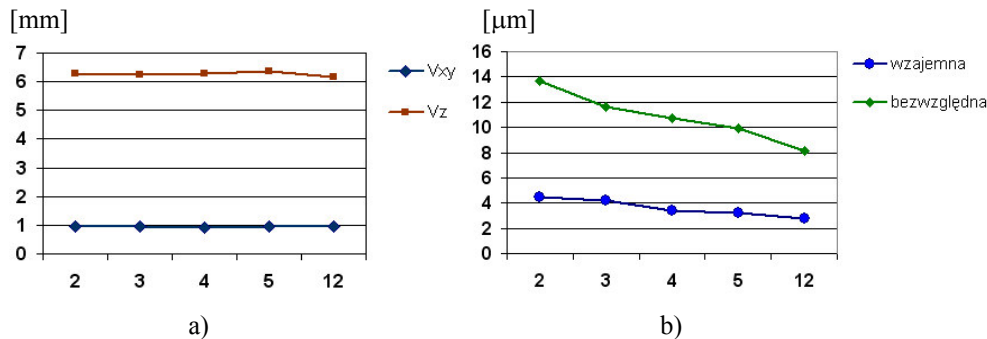


Rys. 10. Średnia odchyłka wyznaczenia punktów kontrolnych prostopadle do płaszczyzny testu, w zależności od wykorzystanej liczby kolejnych klatek

Odchyłki dla punktów kontrolnych, gdy przyjęta jest określona liczba stanowisk wraz ze stanowiskami skrajnymi:

2: klatki 1,12; **3:** 1,7,12; **4:** 1,5,8,12; **5:** 1,4,7,9,12; **12:** 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12 są przedstawione na wykresie 11a. Błąd wpasowania w zależności od uwzględnienia współrzędnych obiektu przedstawia wykres 11b.

W tym badaniu baza między skrajnymi stanowiskami, brany pod uwagę przy każdym wyrównaniu, pozostawała niezmienna i wynosiła około 264 mm, a stosunek bazowy wyniósł w przybliżeniu 1:5.



Rys. 11. a) odchyłki dla punktów kontrolnych; b) błąd po wyrównaniu, w płaszczyźnie obrazu, zależnie od uwzględnienia współrzędnych pola testowego

6. PODSUMOWANIE

Eksperymenty odnoszące się do łączenia odpowiadających sobie punktów dały rezultat zgodny z oczekiwaniami. Wykazały one poprawę niezawodności prowadzonych detekcji, dzięki wstępnemu przetworzeniu jednego obrazu z analizowanej pary. Poświęcony czas na to przetworzenie umożliwia podniesienie niezawodności prowadzonych detekcji. Liczba fałszywych par zmniejszyła się w porównaniu do działania procedury wykorzystującej obraz nieprzetworzone. Dalsze prowadzenie badań powinno usprawnić proces technologiczny w tym zakresie, dając większą pewność wyznaczonej orientacji wzajemnej poszczególnych kadrów filmu.

Badania, zmierzające do określenia najlepszej konfiguracji klatek do wyznaczenia zarówno orientacji wzajemnej jak i samych współrzędnych punktów kontrolnych, wykazały optymalizację wyznaczenia przy kącie wcinającym odpowiadającym stosunkowi bazowemu 1:13. Zwiększająca się liczba klatek redukowałą średnią wartość residuum w płaszczyźnie obrazu, ale nie wpływała znacząco na dokładność wyznaczenia współrzędnych trójwymiarowych punktów kontrolnych.

7. LITERATURA

Dong-Gyu, S, Rae-Hong, P, Rin-Chul, K, Sang Uk, L, Ihn-Cheol, K, 2002: "Integrated Position Estimation Using Aerial Image Sequences" *IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence*, Vol. 24, No. 1, January 2002.

Fischler, M, A, Bolles, R, C, 1981: "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," *Commun. ACM*, vol. 24, no. 6, pp. 381–395, June 1981.

Heuvel F, A, Kroon, R, J, G, A, Le Poole, R, S, 1992: „Digital Close-Range Photogrammetry Using Artificial Targets”, *ISPRS Washington 1992, Commission V*.

Kang, Z, 2008: "Epipolar Image Generation And Corresponding Point Matching From Coaxial Vehicle-Based Images" *ASPRS 2008 Annual Conference Portland, Oregon, April 28 – May 2, 2008*.

Kraus, K, Jansa, J., and Kager, H., 1997. *Photogrammetry*, Vol. 2, Advanced Methods and Applications, Dümmler/Bonn, ISBN 3-427-78684-6.

Läbe, T, Förstner, W, 2006: "Automatic Relative Orientation Of Images", *Proceedings of the 5th Turkish-German Joint Geodetic Days, March 29th – 31st, 2006, Berlin, ISBN 3-9809030-4-4*.

Mayer, H, 2006: "3d Reconstruction And Visualization Of Urban Scenes From Uncalibrated Wide-Baseline Image Sequences", *IAPRS Volume XXXVI, Part 5, Dresden 25–27 September 2006*.

Martin, L, Leroux, C, Pissaloux, E, 2006: "Statistical Feature Point Matching Method", *IAPRS Volume XXXVI, Part 5, Dresden 25–27 September 2006*.

Reiterer, A, 2006: „A Semi-Automatic Image-Based Measurement System”, *IAPRS Volume XXXVI, Part 5, Dresden 25–27 September 2006*.

Zhang, Y, 2008: "Photogrammetric Processing Of Low Altitude Image Sequences By Unmanned Airship", *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing 2008*.

ANALYSIS OF CONDITIONS FOR RECONSTRUCTION OF RELATIVE ORIENTATION OF FILM SEQUENCED IMAGES

KEY WORDS: close range photogrammetry, image sequences, orientation, automation

SUMMARY: The application of film frames in close range photogrammetry has a strong justification. The process of generating them allows improvement in reliability and simplifies the technology. The main aim of this technique is to determine three dimensional shapes of objects.

The paper presents conditions for reconstructing the relative orientation, based on tie points in a short sequence of film frames. Both the selection of points and selection of the images is important. In the research were used parts of a film recorded along a simple trajectory. The analysis takes also advantage of signalized test field reference points, with known coordinates. Interior orientation (IO) of images taken by a single camera has been applied. The IO parameters had been determined in a previous project, and assumed as constant. A proposal for improvement in searching the corresponding tie points is also presented.

The experiments are an important part of the proposed technology which automates the process of creation the three-dimensional model of objects, making use of film image sequences.

dr inż. Michał Kowalczyk
e-mail: mikowalczyk@wp.pl
telefon: (22) 234 76 94