

**PORÓWNANIE DOKŁADNOŚCI WYBRANYCH METOD DOPASOWANIA
OBRAZÓW ZDJĘĆ LOTNICZYCH**

**COMPARISON OF THE ACCURACY OF SELECTED METHOD OF AIR IMAGE
MATCHING**

Piotr Pawlik¹, Sławomir Mikrut²

¹ Katedra Automatyki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

² Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska, AGH w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: fotogrametria cyfrowa, sieci neuronowe, korelacja, dopasowanie obrazów

STRESZCZENIE: Problematyka dopasowania obrazów (spasowania, łączenia, matchingu) jest przedmiotem badań w wielu dziedzinach nauki. W celu rozwiązania problemu znalezienia odpowiadających sobie punktów na parze zdjęć lotniczych opracowano różne algorytmy. W niniejszym artykule, autorzy podjęli próbę podsumowania wybranych metod oraz dokonali oceny skuteczności ich działania. Dokonano przeglądu i porównania kilku metod. Zaimplementowano i przetestowano metody SIFT, Harris oraz Hesjan bazując na podstawie wyliczeń na rzeczywistych obrazach zdjęć lotniczych. Testy wykonano na kilku stereogramach dla wybranych skal oraz zmienności terenu. Do oceny wykorzystano parametry takie jak: średnia paralaksa na modelu, ilość wykrytych (dopasowanych) punktów oraz ich rozmieszczenie na modelu. Wyniki badań wskazują na podobną skuteczność wszystkich metod zależną głównie od rodzaju zdjęcia (tekstury obrazu) i skali. Wyniki wskazują, że metody automatyczne dają porównywalne rezultaty, jeśli chodzi o dokładność (średnia paralaksa), natomiast duże zróżnicowanie występuje z rozmieszczeniem punktów na obrazie. Autorzy pracują również nad poprawieniem algorytmów, które wybierałyby punkty o mniejszej dokładności, ale za to w każdym z kluczowych miejsc modelu stereoskopowego (tzw. rejonach Grubera). Wśród badanych metod automatycznych, biorąc pod uwagę paralaksę i rozmieszczenia punktów, relatywnie najlepiej zachowuje się metoda SIFT (najwyższe oceny, jeśli chodzi o rozmieszczenie punktów i stosunkowo dobre dokładności). Przy założonej jednakowej ilości punktów do orientacji (36) stosunkowo dobrze wypadła metoda Hesjan. Zwraca uwagę fakt, że wybrane metody na różnych obrazach prezentują różne dokładności, co może świadczyć o tym, że są czule na „teksturę” obrazu.

1. WSTĘP

Badania nad dopasowaniem obrazów prowadzone są od kilkunastu lat na całym świecie. Swoje doświadczenia mają również specjaliści z dziedziny fotogrametrii, gdzie dopasowywane są obrazy z fotogrametrycznych kamer naziemnych i lotniczych. Istnieje wiele publikacji dotyczących tego zagadnienia. Do jednych z ciekawszych i stosunkowo nowych zaliczyć należy prace doktorską Markety Potuckovej pt. „Image matching and its applications in photogrammetry” (Potuckova, 2004) opisującą najnowsze rozwiązania

w obszarze badań nad Area Based Matching (ABM) i Feature Based Matching (FBM). Rozwiązań i aplikacji dla metod ABM jest stosunkowo dużo. Autorzy w swoich badaniach skupili się testowaniu i rozwijaniu metod FBM porównując je do klasycznych rozwiązań. W ramach badań dokonano przeglądu literatury oraz oprogramowania kilku, wybranych algorytmów. Zaimplementowano metody: SIFT, Harris oraz metodę Beaudeta (bazującą na wyznaczniku hesjanu).

W ramach prac testowano w/w algorytmy na rzeczywistych obrazach zdjęć lotniczych. Testy wykonano na kilku stereogramach dla wybranych skal oraz zmienności terenu, celem sprawdzenia efektywności algorytmów dla obrazów o różnej teksturze. Do badań wykorzystano zdjęcia lotnicze:

- obrzeży Krakowa wykonane w skali 1:5000,
- fragmentu Ostrowca Świętokrzyskiego, w skali 1:13 000,
- rejonu Szczecina w skali 1:26 000,
- fragmentu Bytomia w skali 1:6600,
- rejonu Afryki (pustynia) wykonane kamerą cyfrową USD firmy Vexcel o wielkości piksela terenowego 0,20 m

Zdjęcia analogowe zostały doprowadzone do postaci cyfrowej poprzez skanowanie pikselem 14 mikrometrów (pierwsze trzy) oraz 56 mikrometrów dla miasta Bytom.

Oprogramowane algorytmy miały na celu posłużyć do weryfikacji (sprawdzenia) metod dopasowania obrazów fotogrametrycznych przy pomocy sieci neuronowych.

2. NIEKORELACYJNE METODY WYSZUKIWANIA ODPOWIADAJĄCYCH SOBIE PUNKTÓW (METODY PUNKTÓW CHARAKTERYSTYCZNYCH)

Najczęściej stosowane algorytmy znajdowania odpowiadających sobie punktów obrazu stosowane w fotogrametrii bazują na korelacji. Obecnie coraz większą popularność zdobywają jednak metody wyszukiwania punktów charakterystycznych, a następnie dopasowania ich na podstawie deskryptorów otoczeń. W przypadku zdjęć lotniczych ważnym aspektem jest uzyskanie dokładnych współrzędnych korespondujących punktów. Zaletą metod bazujących na punktach charakterystycznych jest wstępny wybór punktów o dużym kontraście, co ułatwia ich dokładne pozycjonowanie.

W wielu zastosowaniach wymagających wykrycia punktów charakterystycznych najlepiej sprawdza się algorytm SIFT. Jego użyteczność została potwierdzona także w dopasowaniu zdjęć lotniczych (Pawlik P. et al., 2006). Jednakże metoda ta, charakteryzując się dużą niewrażliwością na zmianę skali wydaje się być nadmiarowa w zastosowaniach, w których różnice skali są niewielkie – takich jak zastosowania fotogrametryczne. Z tego powodu w niniejszym artykule została podjęta próba porównania metody SIFT z innymi, prostszymi metodami wyszukiwania punktów charakterystycznych. Istnieją doniesienia, iż w standardowych zastosowaniach przypadkach niewielkiej różnicy skali porównywanych obrazów metodą lepszą od SIFT jest klasyczna metoda Harissa (Harris C. et al, 1988). Należało stwierdzić, czy takie zjawisko zachodzi także w zastosowaniach fotogrametrycznych. Do porównań wybrano jeszcze jedną „klasyczną”- metodę wyznaczania punktów charakterystycznych, jaką jest liczenie wyznacznika hesjanu (detektor Beaudeta) (Romeny B.M. et al, 1994).

3. METODOLOGIA WYSZUKIWANIA NAJLEPSZYCH ODPOWIADAJĄCYCH SOBIE PUNKTÓW WSPÓLNYCH PARY ZDJĘĆ LOTNICZYCH

Najistotniejszą różnicą w sposobie wyznaczania punktów charakterystycznych pomiędzy SIFT-em, a metodami Harrisa i Beaudeta jest występowanie w algorytmie SIFT piramidy rozdzielczości umożliwiającej porównywanie obrazów w różnych skalach. Ponieważ zarówno detektor Harrisa jak i Beaudeta są wyliczane tylko dla jednej skali (co jest wystarczające w wypadku zdjęć lotniczych), na potrzeby porównania metoda SIFT wyliczana była podobnie (bez piramidy). Ponadto metoda SIFT korzystając z obrazów w trzech kolejnych skalach potrafi aproksymować położenie punktu charakterystycznego z dokładnością większą niż jeden piksel (podpikselową). Do bezpośrednich porównań metod ta cecha SIFTa została zablokowana, aby wszystkie trzy metody wyznaczały współrzędne znalezionych punktów z tą samą dokładnością pikselową.

Jako weryfikator dokładności wyznaczania współrzędnych odpowiadających sobie punktów par zdjęć wybrano średnią paralaksę poprzeczną liczoną dla modelu po wykonaniu orientacji wzajemnej zdjęć (Sitek Z., 1990). Średnia paralaksa na modelu liczona dla poszczególnych punktów wchodzących w skład orientacji, daje wyobrażenie o dokładności poszczególnych algorytmów. Wyboru tego parametru dokonano głównie w aspekcie praktycznym, ponieważ w pracach fotogrametrycznych jest to parametr mówiący o dokładności „dopasowania” punktów na modelu i jednocześnie jest kryterium dopuszczającym dane pomiary do dalszych etapów procesu fotogrametrycznego. Do obliczeń wykorzystano procedurę orientacji wzajemnej modelu metodą Schutta (Sitek Z., 1990).

Nie było możliwości bezpośredniego porównania współrzędnych punktów charakterystycznych wyznaczonych przez poszczególne metody, gdyż każda z metod znajdowała inne punkty.

W celu znalezienia odpowiadających sobie punktów na parze zdjęć lotniczych konieczny był wybór metody opisu otoczeń wyznaczonych punktów w celu ich porównania (i ewentualnego zaklasyfikowania jako punkty wspólne). Badania Mikołajczyka i Schmid (Mikołajczyk K. at al., 2003) wykazały, że najlepszym deskrytorem otoczeń punktów jest wektor cech zaproponowany przez Lowe'a (Lowe D.G., 1999)(Lowe D.G., 2004) w metodzie SIFT. Należy tu podkreślić, że wyznaczanie punktów charakterystycznych i wyznaczanie ich deskryptorów są w metodzie SIFT całkowicie odrębne. Dlatego też użycie deskryptorów SIFT dla wszystkich metod wyznaczających punkty charakterystyczne nie faworyzowało żadnej z nich. Pozwoliło to na skoncentrowaniu się jedynie na dokładności wyznaczenia punktów charakterystycznych, co było głównym przedmiotem badań. Przykładowe punkty dopasowane metodą SIFT przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Fragmenty porównywanych zdjęć lotniczych wraz z wyznaczonymi metodą SIFT punktami charakterystycznymi dla obrazu Bytom.

4. ALGORYTM WYSZUKIWANIA NAJLEPSZYCH PUNKTÓW WSPÓLNYCH PARY ZDJĘĆ LOTNICZYCH

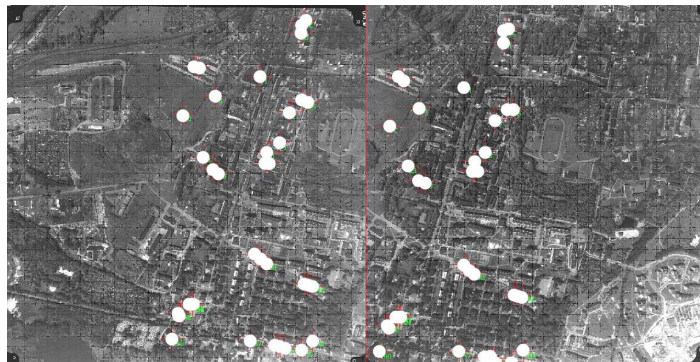
Zastosowanie deskryptorów SIFT pozwala na wyznaczenie par odpowiadających sobie punktów z dużą dokładnością, ale gwarantuje uniknięcia grubych błędów dopasowania. Z tego powodu zaproponowano i zaimplementowano algorytm dokonujący analizy statystycznej współrzędnych wyznaczonych punktów w celu odrzucenia błędnych i wybrania najlepszych dopasowań.

Algorytm zasada się na obliczeniu dyspersji kąta obrotu i przesunięcia dla wszystkich par punktów charakterystycznych. Wektor utworzony przez współrzędne punktów z pierwszej wyznaczonej pary był brany jako wektor przesunięcia pomiędzy oboma obrazami. Natomiast współrzędne pierwszego punktu pary stanowiły środek obrotu. Dane te posłużyły do wyliczenia kątów obrotu w pozostałych parach punktów charakterystycznych i policzenia wartości oczekiwanej oraz odchylenia standardowego kąta obrotu i przesunięcia. Duża dyspersja świadczyła o błędnym dopasowaniu punktów pierwszej pary. Taka para była odrzucana, a obliczenia ponawiano dla kolejnej pary punktów. Powyższa metoda pozwala na skuteczne wyeliminowanie błędnych par punktów charakterystycznych. Ponadto do stworzenia modelu wybiera się zazwyczaj określoną, niewielką liczbę par dopasowanych punktów. Pary o obrocie i przesunięciu jak najmniej odbiegającym od średniej wydają się być dobrymi kandydatami na pary „modelowe”.

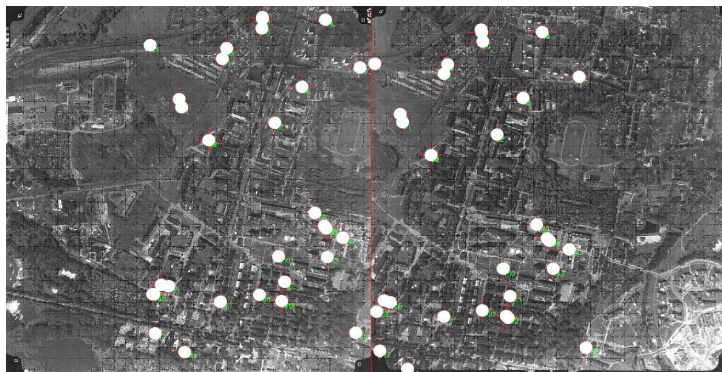
5. WYNIKI TESTOWANIA POPRAWNOŚCI WYZNACZENIA WSPÓLNYCH PUNKTÓW CHARAKTERYSTYCZNYCH

W pierwszym kroku dokonano pomiaru manualnego punktów do orientacji wzajemnej, tj. tych samych punktów na zdjęciu lewym i prawym. Następnie dla tych punktów została policzona orientacja wzajemna, celem policzenia elementów orientacji oraz paralaksy poprzecznej.

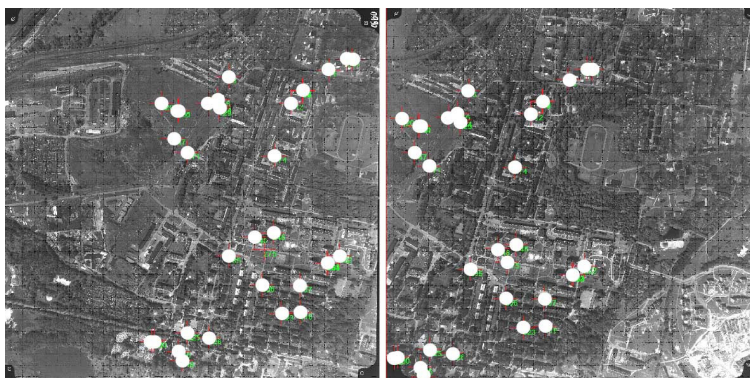
Kolejnym krokiem było znalezienie punktów orientacji wzajemnej metodami SIFT, Harrisa i Beaudeta. Weryfikacja poprawności wyznaczenia tych punktów odbywała się zgodnie z wyżej opisanym algorytmem. Następnie została obliczona orientacja wzajemna dla wszystkich metod. Dodatkowo dokonano oceny wizualnej rozmieszczenia punktów skorelowanych automatycznie w skali od 0 do 6 (gdzie 0 oznacza najgorszej, a 6 – najlepsze rozmieszczenie). Wyniki eksperymentu zamieszczono w tabeli 1. Na rysunkach 2-4 przedstawiono przykład rozmieszczenia punktów na obrazie Bytom po zastosowaniu poszczególnych algorytmów tj. SIFT, Harris, Beaudet.



Rys. 2. Przykład rozmieszczenia punktów w metodzie SIFT dla obrazu Bytom.



Rys. 3. Przykład rozmieszczenia punktów w metodzie Harrisa dla obrazu Bytom.



Rys. 4. Przykład rozmieszczenia punktów w metodzie Beaudeta dla obrazu Bytom.

Porównania metod dokonano w oparciu o ilość wykrytych (dopasowanych) punktów, szczytkową paralaksę poprzeczną oraz rozmieszczenie punktów na obrazie. Jak widać z zamieszczonej tabeli metody automatyczne mimo większej ilości punktów w porównaniu do metod manualnych, cechuje mniejsza paralaksa, co może świadczyć o celowości zastosowania tych metod w praktyce. Jeśli chodzi o porównanie metod trudno tutaj jednoznacznie pokusić się o wskazanie pierwszeństwa jakiejś metody, na co wpływ może mieć różny rodzaj materiału badawczego (zdjęcia o zróżnicowanej teksturze obrazu).

Tab. 1 Wyniki dopasowania obrazów Kraków_1, Kraków_2, Bytom

| Obraz | Metoda pomiaru | Liczba punktów | Szczytkowa paralaksa poprzeczna [piksele] | Rozmieszczenie |
|----------|-----------------|----------------|---|----------------|
| Kraków_1 | Pomiar manualny | 6 | 0,020 | 6 |
| | SIFT | 24 | 0,030 | 4 |
| | HARRRIS | 34 | 0,024 | 3 |
| | BEAUDET | 28 | 0,012 | 3 |
| Kraków_2 | Pomiar manualny | 6 | 0,020 | 6 |
| | SIFT | 36 | 0,017 | 5 |
| | HARRRIS | 51 | 0,093 | 4 |
| | BEAUDET | 30 | 0,012 | 3 |
| Bytom | Pomiar manualny | 6 | 0,012 | 6 |
| | SIFT | 33 | 0,034 | 3 |
| | HARRRIS | 33 | 0,06 | 4 |
| | BEAUDET | 57 | 0,04 | 3 |

W drugim etapie badań analizy punktów dopasowania dokonano w każdym z sześciu wspomnianych obszarów niezależnie. Spowodowano, że wszystkie metody dostarczyły po 6 punktów w każdym obszarze (w sumie 36 najlepszych punktów). Wyniki zestawiono w tabelach 2 i 4.

Dokonano także sprawdzenia efektywności porównywanych metod w dopasowaniu obrazów, które nie zawierają łatwo wyróżnianych obiektów. Do testów wybrano cyfrowe zdjęcia pustyni. Wyniki zamieszczone w tabeli 3 potwierdzają skuteczność metod automatycznych także w przypadku „trudnych” zdjęć.

Tab. 2. Wyniki dopasowania obrazów z uwzględnieniem algorytmu wyboru punktów wg ich położenia (jednakowa liczba pkt– 36)

| Obraz | Metoda pomiaru | Szczytkowa paralaksa poprzeczna. [piksele] | Obraz | Metoda pomiaru | Szczytkowa paralaksa poprzeczna [piksele] |
|---------|----------------|--|-----------|----------------|---|
| Kraków1 | SIFT | 0,02 | Ostrowiec | SIFT | 0,04 |
| | HARRRIS | 0,03 | | HARRRIS | 0,04 |
| | BEAUDET | 0,02 | | BEAUDET | 0,03 |
| Kraków2 | SIFT | 0,02 | Ostrowiec | SIFT | 0,04 |
| | HARRRIS | 0,02 | | HARRRIS | 0,03 |
| | BEAUDET | 0,02 | | BEAUDET | 0,04 |
| Bytom | SIFT | 0,03 | Szczecin | SIFT | 0,05 |
| | HARRRIS | 0,05 | | HARRRIS | 0,04 |
| | BEAUDET | 0,03 | | BEAUDET | 0,05 |

Tab 3. Wyniki dopasowania „trudnych” obrazów cyfrowych

| Obraz | Metoda pomiaru | Liczba punktów | Szczytkowa paralaksa poprzeczna [piksele] |
|------------|----------------|----------------|---|
| Pustynia_1 | SIFT | 30 | 0,01 |
| | HARRRIS | 26 | 0,02 |
| | BEAUDET | 30 | 0,01 |
| Pustynia_2 | SIFT | 30 | 0,02 |
| | HARRRIS | 15 | 0,005 |
| | BEAUDET | 29 | 0,01 |

Tab. 4 Wpływ zastosowania poprawki podpikselowej w metodzie SIFT na dopasowanie obrazów Ostrowiec_1, Ostrowiec_2 i Szczecin dla jednakowej liczby punktów – 36

| Obraz | Metoda pomiaru | Szczytkowa paralaksa poprzeczna [piksele] |
|-------------|----------------|---|
| Ostrowiec_1 | SIFT | 0,04 |
| | SIFT_podpiksel | 0,03 |
| Ostrowiec_2 | SIFT | 0,04 |
| | SIFT_podpiksel | 0,03 |
| Szczecin | SIFT | 0,05 |
| | SIFT_podpiksel | 0,04 |

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Praca miała na celu porównanie metod znajdowania (dopasowania) odpowiadających sobie punktów na parze zdjęć lotniczych. Do porównania wybrano trzy algorytmy: SIFT, Harrisa i Beaudeta, a następnie porównano je z pomiarem manualnym. Metody te przetestowano na rzeczywistych obrazach zdjęć lotniczych.

Celem porównania wyników wybrano następujące parametry: ilość pomierzonych punktów, średnia paralaksa poprzeczna na modelu oraz rozmieszczenie punktów na modelu. Wyniki (Tabela 1) wskazują na to, że metody automatyczne dają porównywalne rezultaty, jeśli chodzi o dokładność (paralaksa), natomiast gorzej kształtuje się kwestia rozmieszczenia punktów. Warto zauważyć, że metody automatyczne dobrze radzą sobie także z „trudnymi” zdjęciami tzn. nie posiadającymi wyraźnych charakterystycznych obiektów (np. zdjęcia pustyni) (Tabela 3).

Jeśli chodzi o metody automatyczne, biorąc pod uwagę paralaksę i rozmieszczenia punktów relatywnie najlepiej zachowuje się metod SIFT (najwyższe oceny, jeśli chodzi o rozmieszczenie punktów i stosunkowo dobre dokładności). Po wprowadzeniu dodatkowego algorytmu wyboru punktów uwzględniającego ich rozmieszczenie różnice pomiędzy metodami jeszcze bardziej zmały. Wzrosła dokładność metody SIFT z jednoczesną poprawą rozmieszczenia punktów w pozostałych dwóch metodach (Tabela 2). Wprowadzenie (klasycznie stosowanej) podpikselowej poprawki w wyznaczeniu położenia punktów w metodzie SIFT spowodowało, że dokładność jej przewyższyła dokładność pozostałych metod (Tabela 4). Trzeba jednak zaznaczyć, iż różnice w dokładności są niewielkie (rzędu 0,01) natomiast rośnie czas wyliczania i tak już najbardziej złożonej obliczeniowo metody SIFT. Można zatem rekomendować metodę SIFT z poprawką podpikselową w tych przypadkach, kiedy szczególnie istotna jest dokładność (paralaksa), natomiast nie jest wymagany krótki czas obliczeń.

7. LITERATURA

- Haar Romeny B.M. et al., *Higher order differential structure of images*, Image and Vision Computing, 12(6) str. 317-325, 1994
- Harris C., Stephens M.J., *A Combined Corner and Edge Detector*, Alvey Vision Conference, str. 147-152, 1988
- Lowe D.G., *Object recognition from local scale-invariant features*, International Conference on Computer Vision, str. 1150-1157, 1999
- Lowe D.G., *Distinctive image features from scale-invariant keypoints*, International Journal of Computer Vision, 60, 2, str. 91-110, 2004
- Mikolajczyk K., Schmid C., *A performance evaluation of local descriptors*, Proceedings of the 2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2003
- Pawlik P., Mikrut S., *"Wyszukiwanie punktów charakterystycznych na potrzeby łączenia zdjęć lotniczych"*, Automatyka, Półrocznik, tom 10, zeszyt 3, str. 407-412, Wydawnictwa AGH, Kraków 2006
- Potuckova M., *"Image matching and its application in photogrammetry"*. Rozprawa doktorska, Czeska Wyższa Uczelnia w Pradze, Aalborg, 2004
- Sitek Z., *Fotogrametria Ogólna i Inżynieryjna*, PPWK im. E .Romera, str. 154-160 Warszawa 1990

Pracę wykonano w ramach grantu projektu badawczego KBN Nr 4 T12E 001 27

COMPARISON OF THE ACCURACY OF SELECTED METHOD OF AIR IMAGE MATCHING

KEY WORDS: digital photogrammetry ,neural networks, correlation, images matching

SUMMARY: The issue of images matching is a subject of research in many fields of science. The demand for systems of matching exists not only in photogrammetry. Various algorithms have been developed in order to solve the problem of finding corresponding points within a pair of aerial photos. In this paper, the authors made an attempt at recapitulating selected methods of image matching, and assessed their efficiency. Several methods were reviewed and compared. The SIFT, the Harris, and the Hesse-Matrix methods were implemented and tested on the basis of calculations performed on actual aerial photos. The tests were made on several stereograms, in relation to selected scales and terrain changeability.

During the assessment, the following parameters were applied: average parallax on a model, the number of detected (matched) points, as well as their distribution on a model. The test results proved similar efficiency of all methods, depending mainly on the photo type (image texture) and scale.

The results show that the automatic methods yield comparable results, as far as their accuracy is concerned (the average parallax), whereas there is a high diversification as regards the distribution of points in the image.

The authors also work on improving the algorithms, so that they would select points of perhaps a lower accuracy but, instead, in each of the key places in a stereoscopic model (the so-called von Gruber areas).

As far as the automatic methods are concerned, and considering the parallax and distribution of points, the SIFT method was relatively the best one (highest scores, as regards the distribution of points and comparatively good accuracies). Upon the assumption of an identical number of points to be oriented (36), the Hesjan method proved to be quite successful.

It should be noted that the selected methods, when applied to various images, demonstrate different accuracy levels, which may be a proof of their sensitivity to the image "texture."

dr inż. Piotr Pawlik
e-mail: piotrus@agh.edu.pl
telefon: (012) 617 3855

dr inż. Sławomir Mikrut
e-mail: smikrut@agh.edu.pl
telefon: (012) 617 2302
fax: (012) 617 3993