

Renata Jędrzycka

## AUTOMATYZACJA PROCESU WYZNACZANIA ELEMENTÓW ORIENTACJI ZEWNĘTRZNEJ

### Streszczenie.

Istniejące zasoby map cyfrowych w postaci wektorowej wymagają na ogół dość częstej aktualizacji lub korekty. Szczególnie ma to znaczenie dla obszarów mocno zurbanizowanych. Jednym ze sposobów jest wykonanie poprawek i naniesienie nowych elementów na podstawie zdjęć lotniczych. Ich orientację zewnętrzną można wykonać korzystając z posiadanych baz danych wektorowych. W pracy przedstawiono problematykę automatyzacji wyznaczenia elementów tej orientacji na podstawie pary zdjęć i zbioru danych wektorowych dla tego samego terenu. Wykorzystano w niej materiały testu OEEPE, dotyczącego tego problemu, a zakończonego w 1999.

### 1. Wstęp.

Aktualizacja istniejących map to jedno z naczelných zadań fotogrametrii. Niezbędne do tego celu są elementy orientacji zdjęć. Wykorzystuje się w tym celu pary zdjęć stereo lub bloki zdjęć.

Elementy orientacji zewnętrznej, czyli elementy określające pozycję środka rzutów oraz kąty obrotów osi kamery, wyznacza się mając dane punkty o znanych współrzędnych terenowych oraz współrzędne tłowe odpowiadających im punktów na zdjęciu.

Wiele krajów posiada obecnie mapy zapisane w postaci wektorowej, stąd zrodził się pomysł by wykorzystać je i to w sposób możliwie automatyczny.

W pracy zostaną omówione propozycje zautomatyzowania procesu wyznaczenia elementów orientacji zewnętrznej gdy dane są:

- jeden czarno-biały stereogram obszaru zurbanizowanego;
- dane wektorowe dla terenu zarejestrowanego na zdjęciach, w postaci zbioru ASCII współrzędnych terenowych z kodem obiektu do którego należą, ale bez uporządkowania tzn., że np. odcinki tej samej ulicy składać się mogą z kilku różnie położonych w zbiorze fragmentów;
- metryka kamery;
- przybliżone współrzędne środków rzutów obu zdjęć (z planu lotu).

Prace takie zostały wykonane w ramach testu OEEPE pt. „Automatic Orientation of Aerial Images on Database Information” zakończonego w 1999r. W artykule zostaną

scharakteryzowane cztery zaproponowane wtedy rozwiązania: niemieckie (N), fińskie (F), duńskie (D) i rozwiązanie własne (P), (Höhle J., 1999 r.).

## 2. Wyznaczanie elementów orientacji zewnętrznej.

Elementy orientacji zewnętrznej, czyli trzy elementy liniowe ( $X_o, Y_o, Z_o$ ) oraz trzy elementy katowe ( $\omega, \phi, \kappa$ ) można wyznaczyć wychodząc od warunku współliniowości trzech punktów lub współpłaszczyznowości trzech wektorów. Poniżej krótko zostaną omówione oba przypadki.

### 2.1. Współliniowość punktów

Zakładając, że dane są 3 punkty, a mianowicie: ( $X_o, Y_o, Z_o$ ) – środek rzutów, punkt ( $X_A, Y_A, Z_A$ ) terenu i jego rzut, czyli punkt na zdjęciu ( $x_A, y_A$ ), które powinny leżeć na jednej prostej otrzymujemy dobrze znane w fotogrametrii równania kolinearności. Rozwijając je w szereg Taylora i ograniczając się tylko do części liniowej otrzymujemy równania poprawek postaci:

$$\begin{aligned} v_{x_A} &= b_{11}d\omega + b_{12}d\phi + b_{13}d\kappa - b_{14}dX_o - b_{15}dY_o - b_{16}dZ_o + b_{17} \\ v_{y_A} &= b_{21}d\omega + b_{22}d\phi + b_{23}d\kappa - b_{24}dX_o - b_{25}dY_o - b_{26}dZ_o + b_{27}, \end{aligned} \quad [1]$$

gdzie:

$b_{ij}$  - współczynniki obliczane na podstawie aproksymacyjnych wartości elementów orientacji i danych współrzędnych terenowych  $X_A, Y_A, Z_A$  punktu A i jego odpowiednich współrzędnych tłowych na zdjęciu  $x_A, y_A$  oraz stałej kamery  $f$ ;  $i=1,2$ ;  $j=1...7$ .

W ujęciu macierzowym można je przedstawić:

$$V = MX + L, \quad [2]$$

gdzie:

M- macierz współczynników;  
X - wektor niewiadomych, w tym przypadku  $X_o, Y_o, Z_o, \omega, \phi, \kappa$ ;  
L - wektor stałych.

Zatem do wyznaczenia niewiadomych potrzebne są co najmniej 3 punkty o znanych współrzędnych terenowych i tłowych.

Układ taki rozwiązywano najczęściej, bo aż w 3 przypadkach (N,D,P), korzystając z metody najmniejszych kwadratów. Proces powtarzano dla każdego zdjęcia.

### 2.2. Współpłaszczyznowość wektorów.

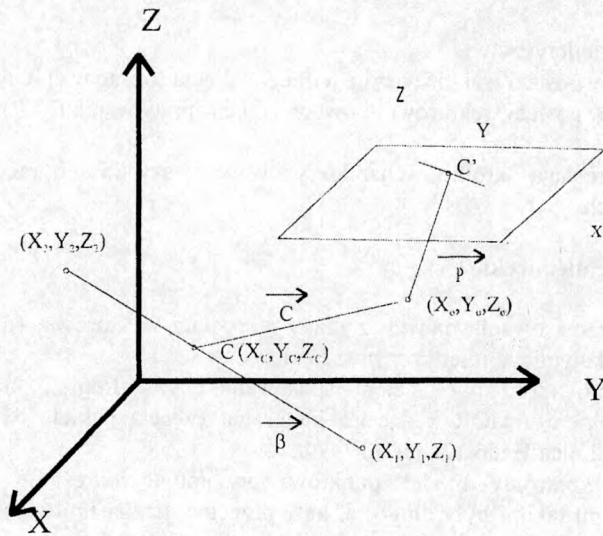
Jeśli rozpatrywać nie punkty ale elementy liniowe (rys.1), jak to zrobiono to w jednym przypadku (F), to podstawą rozwiązania jest równanie współpłaszczyznowości wektorów postaci [Karjalainen M., 1999]:

$$\begin{vmatrix} \vec{\beta} & \vec{C} & \vec{p} \end{vmatrix} = 0, \quad [3]$$

gdzie:

$$\vec{\beta} = [X_2 - X_1; Y_2 - Y_1; Z_2 - Z_1], \quad \vec{C} = [X_C - X_0; Y_C - Y_0; Z_C - Z_0], \quad \vec{p} = R^T[x, y, -f],$$

R- macierz obrotów, f- stała kamery.



Rys. 1.: Elementy orientacji zewnętrznej - współpłaszczyznowość.

Zatem problem sprowadza się do odnalezienia odpowiadających sobie linii oraz dowolnych punktów na nich leżących.

Ponieważ równania postaci [3] są w postaci nieliniowej ze względu na niewiadome  $X_0, Y_0, Z_0$  i  $\omega, \varphi$ , (sprowadza się je tak jak poprzednio do postaci liniowej. Dalsze postępowanie jest analogiczne jak w przypadku pierwszym.

### 3. Proponowane rozwiązania spasowania obrazów.

Automatyzacja procesu dotyczyła we wszystkich czterech proponowanych rozwiązaniach wyznaczenia elementów homologicznych na zdjęciu i mapie.

Trudno wyraźnie podzielić zastosowane metody ze względu na jedną cechę. Jeśli wziąć pod uwagę kształt, a więc geometryczne cechy elementów spasowania, to są to dwie grupy:

- spasowanie elementów liniowych;
- spasowanie elementów punktowych.

Jeśli jako kryterium przyjmujemy rodzaj porównywanych danych, to mamy:

- dopasowanie danych w obszarach dla danych rastrowych (area based matching);
- dopasowanie danych w przestrzeni cech dla danych wektorowych (feature based matching).

Jako miary porównania stosowano:

- współczynnik korelacji;
- suma kwadratów różnic;
- suma wartości bezwzględnych różnic;
- miarę opartą na średniej odległości dyskretnej dla obrazów dwu-wartościowych;
- minimum z ekstremów lokalnych w przestrzeni wybranych cech.

Spasowania dotyczyły:

- danych z mapy w postaci wektorowej i z jednego zdjęcia (opracowanie N i F);
- danych z mapy w postaci wektorowej i dwóch zdjęć (opracowania D i P).

Poniżej zostaną krótko scharakteryzowane wszystkie opracowania pod kątem dopasowania danych.

### 3.1. Rozwiązanie niemieckie (N).

Dotyczyło dopasowania danych z mapy w postaci wektorowej (dalej będzie używane pojęcie mapa) z danymi na pojedynczym zdjęciu.

Elementami, które były celem dopasowania były drogi i krawędzie budynków. Korzystano z pakietu AMOR będącego integralną częścią pakietu SOCET SET w stacji fotogrametrycznej Leica/Helava [Läbe T., 1999].

Ustalono kontrolny model punktów, przyjmując określone kształty elementów liniowych (cechami takimi były długości, kąty przecięć, liczba linii wychodzących z jednego punktu, czyli „rodzaje skrzyżowań”), czyli zbiór cech dopasowania.

Jak podaje autor można wyodrębnić następujące etapy:

1. Rzutowanie wybranego modelu punktów kontrolnych mapy, czyli elementów 3-wymiarowych, korzystając z przyjętych wartości elementów orientacji zewnętrznej na płaszczyznę zdjęcia;
2. Ekstrakcja (wydobycie) segmentów liniowych ze zdjęcia, ale tylko w wybranych, na podstawie kroku 1, fragmentach całego zdjęcia;
3. „Pose clustering”, czyli wyszukanie ekstremum lokalnego w przestrzeni dwóch cech: różnicy wierszy i różnicy kolumn. Szukano jedynie wektora przesunięć między danymi z mapy a danymi ze zdjęcia, czyli elementami liniowymi z kroku 1 i 2 odpowiednio [Förstner W., 1995]. Przy czym dopasowanie dotyczyło elementów liniowych (feature matching).
4. Wykrycie elementów odstających (outlier detection) w zbiorze do dalszego dopasowania i wyznaczenia elementów orientacji. Na podstawie wyestymowanych minimalnych różnic wybrano nowy zbiór elementów. Jednocześnie korzystano z procedury RANSAC w celu wyeliminowania błędnych punktów kontrolnych.
5. Przecięcie przestrzenne (spatial resection) – krok ten dotyczył końcowego dopasowania w przestrzeni 3-D modelu punktów kontrolnych, przez sprawdzenie całego zbioru

kontrolnego czy stanowi on zbiór homologicznych elementów liniowych, czyli czy odpowiadające sobie elementy liniowe leżą w jednej płaszczyźnie.

W zależności od poziomu piramidy identyfikowano drogi (na większych pomniejszeniach piramidy zdjęć) lub budynki (na mniejszych pomniejszeniach) i drogi jako elementy kontrolne.

### 3.2. Rozwiązanie fińskie (F).

Polegało na spasowaniu odcinków (fragmentów dróg, brzegów dachów, itp.), [Karjalainen M., 1999]. Program działał interaktywnie, tzn. operator ręcznie dokonywał pomiaru wektora  $\vec{p}$  (rys.1), a właściwie współrzędnych punktu C. Następowo do automatycznym rzutowaniu jednego z końców odcinka na obraz zdjęcia. Ułatwiało to odnalezienie homologicznych fragmentów. Punkt C( $X_C, Y_C, Z_C$ ) wybierano dowolnie z pośród punktów leżących na danym odcinku, o znanych współrzędnych terenowych.. W ten sposób przeglądano interaktywnie cały zasób danych liniowych z mapy. Nie podano jakie kryterium decydowało o wyborze linii do spasowania.

Można więc mówić o spasowaniu manualnym.

### 3.3. Rozwiązanie duńskie (D).

Wykorzystano elementy liniowe z danych wektorowych; skrzyżowania dróg i zakręty oraz elementy punktowe: kratki ściekowe i studzienki odpływowe na ulicach. [Petersen B., 1999]. Wyszukanie odpowiednich elementów liniowych odbywało się automatycznie na podstawie analizy gęstości rozmieszczenia punktów je określających. Skrzyżowania i zakręty są zwykle opisywane gęstszą liczą punktów, stąd szukano lokalnych ekstremów w przestrzeni różnic odległości między kolejnymi punktami. Wszystkie wyszukane dane wektorowe były następnie rzutowane na obrazy obu zdjęć przyjmując przybliżone wartości elementów orientacji zewnętrznej.

Elementy punktowe rzutowano nadając im postać kół i prostokątów o zadanych wielkościach, zależnych od poziomu piramidy na którym dokonywano analizy. Fragmenty dróg określano wielokątami zamkniętymi. Przy rzutowaniu przyjęto następujące wartości pikseli: 255 dla pikseli wewnętrznych, 0 dla pikseli brzegowych.

Spasowanie elementów homologicznych prowadzono między obrazami obu zdjęć. Stosowano trzy różne miary podobieństwa: współczynnik korelacji, sumę wartości różnic bezwzględnych i sumę kwadratów różnic. Przeszukiwano cały obszar wspólnego pokrycia przyjmując progowe wartości dla miar w celu wyszukania elementów homologicznych. Dla dróg np. minimalna wartość współczynnika korelacji wynosiła 0.4, a odchylenie standardowe 0.5, dla kraterów i studzienek odpowiednio: 0.6 i 0.2. Wykorzystano moduł Match-T.

Zastosowano zatem spasowanie w obszarach.

### 3.4. Rozwiązanie polskie (P).

Idęą tego rozwiązania [Jędryczka R., 1999] było również spasowanie w obszarach, przy czym korzystano z dwóch miar podobieństwa: współczynnika korelacji  $r$  (dla obrazów

o poziomach szarości 0...255) i miary („dyskretnej”)  $d_b$  dla obrazów dwu-wartościowych (piksele o wartościach 0 i 1), opartej na macyryce dyskretnej.

Współczynnik korelacji obliczano ze znanego wzoru na podstawie poziomów szarości w otoczeniach danego piksela. Miara  $d_b$  określona była wzorem:

$$d_b = 1 - \left( \sum_{k=1}^n d_k \right) / n, \quad [4]$$

gdzie:

$n$  – liczba pikseli otoczenia,

$$d_k = \begin{cases} 1, & \text{gdy } b_1(i_1, j_1) = b_2(i_2, j_2) \\ 0, & \text{gdy } b_1(i_1, j_1) \neq b_2(i_2, j_2) \end{cases} \quad [5]$$

$b_k$  wartości pikseli o indeksach  $(i_s, j_s)$ =(wiersz, kolumna);  $s=1$  dla obrazu lewego i  $s=2$  dla obrazu prawego.

Spasowanie przeprowadzono tylko dla wybranych typów elementów: dróg- na największym pomniejszeniu obrazów (na piątym poziomie piramidy), dachów domów na poziomach 4 i 3, studzienek na poziomie 4 i 3, oraz krątek ściekowych – na poziomach 3, 2, 1 i poziomie 0 czyli obrazie oryginalnym. Wybrano te elementy ze względu na ich dużą liczbę na obrazach i rozłożenie na całym obszarze.

### 3.4.1.Elementy liniowe.

W pierwszym etapie utworzono obrazy rastrowe poprzez rzutowanie (na podstawie przybliżonych elementów orientacji) danych liniowych, z mapy wektorowej, na płaszczyznę zdjęcia.

Zatem punktom  $(X, Y, Z)$  terenu przyporządkowywano punkty  $(x, y)$  według wzorów:

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{a_{11} * (X - X_0) + a_{12} * (Y - Y_0) + a_{13} * (Z - Z_0)}{a_{31} * (X - X_0) + a_{32} * (Y - Y_0) + a_{33} * (Z - Z_0)} \\ y &= -f \frac{a_{21} * (X - X_0) + a_{22} * (Y - Y_0) + a_{23} * (Z - Z_0)}{a_{31} * (X - X_0) + a_{32} * (Y - Y_0) + a_{33} * (Z - Z_0)}, \quad [6] \end{aligned}$$

gdzie:

$x, y$  współrzędne tłów,

$a_{ij}$  - współczynniki macierzy obrotu,

$(X_0, Y_0, Z_0)$  współrzędne środka rzutów.

Obliczenia wykonano stosując przybliżone wartości elementów orientacji zewnętrznej. Wzory [6] zastosowano dla obliczenia współrzędnych dla obrazów lewego i prawego. Punktem  $(x, y)$  następnie przyporządkowano indeksy  $(w, k)$  odpowiednich pikseli, dla których przyjmowano wartość 1. Korzystano przy tym z przekształceń afinicznych. W ten sposób otrzymano rastrowe obrazy dwu-wartościowe odpowiadające zdjęciom lewemu i prawemu.

Ze zdjęć wyodrębniono elementy liniowe stosując operator Laplace’a do wyszukania krawędzi:

$$\nabla^2 g = \frac{\delta^2 g}{\delta^2 w^2} + \frac{\delta^2 g}{\delta^2 k^2} \quad , \quad [7]$$

gdzie:

g- funkcja poziomów szarości, w, k- kierunki (wiersze, kolumny).

$$\begin{matrix} -1 & -1 & -1 \end{matrix}$$

W praktyce stosowano maskę  $\begin{matrix} -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{matrix}$  w otoczeniu 3 x 3 piksele.

$$\begin{matrix} -1 & -1 & -1 \end{matrix}$$

Otrzymano więc po dwa (dla obrazu lewego i prawego odpowiednio) czarno-białe (dwu-wartościowe) obrazy rastrowe, na których dokonywano poszukiwań elementów homologicznych za pomocą miary „dyskretnej”  $d_b$  z przyjętym doświadczalnie progiem. Operator mógł śledzić przebieg operacji w dwu oknach. To spasowanie odbywało się na największym - 6 i kolejnym 5 pomniejszeniu. Chodziło w tym przypadku jedynie o pierwsze przybliżone spasowanie, aby odnaleźć na obu obrazach elementy homologiczne, między sobą i w stosunku do mapy. Ostateczne spasowanie następowało automatycznie po sprawdzeniu wartości współczynnika korelacji dla wyszukanych w ten sposób obszarów na obrazie lewym i prawym. Podobnie postępowano przy identyfikacji krawędzi domów.

### 3.4.2. Elementy punktowe.

Na niższych poziomach piramidy obrazów zdecydowano się poszukiwać elementów punktowych: kratak ściekowych i studzienek, które różniły się na ogół znacznie barwą od otoczenia. Wybrano ręcznie z obrazu reprezentanta, który służył za wzorec. Kolejno rzutowano elementy z mapy na płaszczyznę obrazu. Poszukiwania odbywały się we fragmentach obrazu zdeterminowanego pozycją rzutu obiektu. W rzutowaniu korzystano z przybliżonych elementów orientacji zewnętrznej. Szukano lokalnych ekstremów w przestrzeni poziomów szarości w otoczeniach elementów. Odbywało się to dla każdego obrazu osobno, a następnie następowało skorelowanie obrazów z obu zdjęć, jeśli elementy leżały w obszarze wspólnego pokrycia. Proces ten był w pełni automatyczny, przy ustalonym progu miary podobieństwa jaką w tym przypadku był współczynnik korelacji oraz wykorzystując estymator jego odchylenia standardowego.

### 3.4.3. Wybór punktów homologicznych.

Na koniec otrzymywano zbiór punktów homologicznych na zdjęciach o znanych współrzędnych terenowych. Ponieważ ich liczba była znaczna cały obszar każdego zdjęcia podzielono na  $m \cdot n$  (wartości  $m$  i  $n$  ustalał operator na danym poziomie piramidy) prostokątów i z nich w sposób losowy wybierano po 1 punkcie otrzymując zbiór  $K$ . Na punktach z obszaru wspólnego pokrycia wykonywano orientację wzajemną w celu usunięcia punktów o zbyt dużej odległości od płaszczyzny rdzennej. Do dalszych operacji brano więc nowy nie większy zbiór punktów  $K_o \subset K$ .

Operator wizualnie sprawdzał rozmieszczenie punktów na zdjęciu. Wyodrębniano kilka takich podzbiorów na jednym poziomie, tak długo aż średnie błędy kwadratowe dla współrzędnych punktów zbioru nie przekraczały ustalanych empirycznie progów.

Punkty 3.4.2 i 3.4.3 powtarzano na danym poziomie piramidy tak długo, aż dla zbioru punktów kontrolnych z mapy (wszystkie kratki ściekowe):

- średni współczynnik korelacji między obrazami otrzymanymi po zrzutowaniu ich na obrazy zdjęć był dostatecznie duży (poziom przyjęty empirycznie);
- średnia suma wartości bezwzględnych różnic między współrzędnymi obliczonymi na podstawie obliczonych elementów orientacji a współrzędnymi z mapy ustalała się, tzn. w kolejnych iteracjach nie przekraczała ustalonej wartości.

#### 4. Estymacja elementów orientacji zewnętrznej.

W każdym z rozwiązań uzyskano zbiory punktów potrzebnych do estymacji elementów orientacji zewnętrznej.

W przypadku rozwiązania:

- (N) zbiór ten był weryfikowany automatycznie pod względem jego konfiguracji geometrycznej na zdjęciu;
- (F) zbiór był wybierany przez operatora;
- (D) zbiór weryfikowano na podstawie różnic między obliczonymi współrzędnymi terenowymi, a danymi z mapy;
- (P) zbiór wybierano losowo, biorąc pod uwagę rozkład punktów na obszarze zdjęcia, ze zbioru spasowanych punktów, dokonując jedynie weryfikacji dla punktów obszaru wspólnego pokrycia.

W rozwiązaniach układów równań korzystano we wszystkich przypadkach z metody najmniejszych kwadratów, a ocenę poprawności wykonywano na podstawie średnich błędów kwadratowych.

W propozycji (D) przeprowadzono kontrolnie wyrównanie dla pary zdjęć.

#### 6. Podsumowanie.

Żadne z rozwiązań nie było w pełni automatyczne, a wręcz rozwiązanie (F) można nazwać manualnym. Autorzy próbowali rozwiązać zagadnienie stosując dostępne na rynku oprogramowania i dokładając własne brakujące elementy lub tworząc zupełnie nowe (P). Żadne z nich nie rozpatrywało również obrazów zdjęć jako całości. Skupiono się na wyborze punktów.

W większości (N, D, F) rozpoczynano nie z elementami orientacji danymi z planu lotu, ale poprawionymi przez pomiar ręczny (głównie chodzi o przybliżoną wartość  $Z_0$ )

Na ogół rozwiązywano zagadnienie niezależnie dla każdego zdjęcia (N, F), dwa rozwiązania łączyły informacje z pary obrazów stereo (D i P). W propozycji (D) spasowano zaburzony obraz oryginalny, w (P) spasowanie przebiegało dwuetapowo: wstępne korzystające z danych wektorowych, ostateczne zaś na zdjęciach.



Często dokonywano redukcji wygenerowanego zbioru punktów jedynie na podstawie analizy różnic w wartościach współrzędnych terenowych obliczonych, a danych z mapy. Nie było natomiast pewności czy dane te są poprawne..

W propozycji (P) dokonywano pseudo losowego wyboru punktów kierując się różnicami w wartościach aproksymowanych elementów orientacji.

## 6. Zakończenie.

W artykule nie podano przykładów praktycznych. Będą one tematem posteru, na którym pokazane zostaną wyniki uzyskane przez autorkę (rozwiązanie P).

Jeśli chodzi o wyniki testu:

- elementy orientacji porównywano z danymi otrzymanymi poprzez pomiar manualny za pomocą programu Match-T;
- do porównania użyto zbioru punktów kontrolnych, których współrzędne terenowe nie były znane uczestnikom.

Kompletne wyniki można znaleźć w opublikowanym oficjalnym raporcie [Höhle, 1999].

Generalnie na punktach kontrolnych (które nie były wolne od błędów) otrzymano dla RMSE dokładności rzędu 7-10 cm dla X, Y i 13 cm dla Z, spójne z jakością użytych danych.

Jedynie rozwiązanie (F), które oparte było na poszukiwaniu elementów liniowych okazało się mniej stabilne, jeśli chodzi o położenie punktów na obrazach i przy tym mniej precyzyjne.

Rozwiązania tu przedstawione dały wyniki zadowalające i będą miały zastosowania tak długo aż wkraczające szybkim krokiem nowe techniki GPS/INS będą rozwiązaniami bardzo drogimi i nie wystarczająco precyzyjnymi.

## 7. Literatura.

1. Höhle J., 1999, *Automatic Orientation of Aerial Images on Database Information*, OEEPE Official Publication, No 36;
2. Förstner W., 1995, *Matching Techniques, 2nd Course on Digital Photogrammetry*, Bonn;
3. Jędryczka R., 1999, *Semi-Automatic Exterior Orientation Using Existing Vector Map Data*, OEEPE Official Publication, No 36;
4. Läbe T., 1999, *Experiences with AMOR*, OEEPE Official Publication, No 36.
5. Karjalainen M., Kuittinen R., 1999, *Interactive Exterior Orientation Using Linear Features from Vector Map*, OEEPE Official Publication, No 36;
6. Petersen B. M., 1999, *OEEPE test on Automatic Orientation- a Solution from Aalborg*,
7. *OEEPE Official Publication*, No 36.

Recenzował: dr inż. Krystian Pyka