

Sławomir ZATOR, Łukasz ŻŁOBICKIPOLITECHNIKA OPOLSKA, INSTYTUT ELEKTROWNI I SYSTEMÓW POMIAROWYCH,
ul. Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole**Metoda fotogrametryczna w śledzeniu zmian położenia obiektów****Dr hab. inż. Sławomir ZATOR**

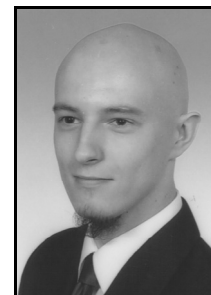
Profesor na Wydziale Inżynierii Produkcji i Logistyki Politechniki Opolskiej. Autor ponad 70 i współautor ponad 110 publikacji, w tym 3 książek. Członek Komisji Metrologii i Komisji Elektroniki Oddziału PAN w Katowicach. Działalność naukowa obejmuje miernictwo przemysłowe, w tym pomiary przepływów cieczy z wykorzystaniem anemometrii laserowej oraz diagnostykę instalacji przemysłowych w zakresie zmian ich parametrów geometrycznych.



e-mail: s.zator@po.opole.pl

Mgr inż. Łukasz ŻŁOBICKI

Absolwent Wydziału Elektrotechniki Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej na kierunku informatyka. Ukończył specjalność komputerowe wspomagania projektowania. Interesuje się muzyką, nowoczesnymi technologiami, a także psychologią i filozofią. Obserwator i aktywny uczestnik rynku finansowego.



e-mail: lukasz.zlobicki@o2.pl

Streszczenie

Przedstawiono wykorzystanie metod stosowanych w fotogrametrii i rozpoznawania kształtów do śledzenia zmian położenia obiektów czy ich geometrii w trybie off-line. Do wyznaczenia współrzędnych znaczników wykorzystano metodę równań kolinearności dla elementów orientacji zewnętrznej zdjęć. Jako markery wykorzystano znaczniki 12-bitowych kodów z programu Photomodeler. Aby rozpoznawanie tych samych punktów na zdjęciach odbywało się automatycznie zaimplementowano algorytm rozpoznawania znaczników. W wersji testowej wykorzystano aparat fotograficzny Canon EOS 30D oraz środowisko LabView.

Słowa kluczowe: fotogrametria, analiza obrazu, rozpoznawanie kształtów.

Photogrammetric method for tracking objects**Abstract**

The paper presents application of the methods from photogrammetry and shape recognition to tracking changes in the position of objects and their geometry in the off-line mode. To determine the coordinates of markers, the collinearity equations method was used for elements of the external orientation of images. The targets of 12-bit codes from the program Photomodeler were used as markers. An automatic recognition algorithm was implemented to identify the same points on the images. The prototype uses a Canon EOS 30D camera and the LabView platform. The algorithms, which record information about the geometry of the markup, recognize them for any angle during the recognition. Three markers whose relative position cannot be changed are used for orientation of the camera. Changes of the location of successive markers are determined on the basis of at least two images. However, to obtain the satisfactorily low measurement uncertainty, it is advisable to perform a series of 4-5 images. For series pair of photos without calibration the difference in the position for the coordinate more or less parallel to the plane of the images does not exceed 19 mm at the distance of about 1.2 m.

Keywords: photogrammetry, image analysis, shape recognition.

1. Wprowadzenie

Metody fotogrametryczne zasadniczo wykorzystywane są w inżynierii odwrotnej do tworzenia siatek istniejących obiektów [1]. Oprogramowanie dostępne komercyjnie pozwala na pracę w trybie off-line. Do osiągnięcia sukcesu, jakim jest poprawnie zbudowany model typu Mesh 3D należy wykonać szereg czynności oraz właściwie przyjąć wiele parametrów. Ostatecznie otrzymują się model obiektu w jednym stanie. Chcąc uzyskać informację o zmianach geometrii w czasie cały proces należy powtórzyć. Ze względu na to, że metody fotogrametryczne skutecznie konkurują z metodami opartymi na pomiarach bezpośrednich wykorzystujących dalmierze laserowe (tachimetry, skanery) podjęto próbę ich wykorzystania do śledzenia zmian topologii obiektów.

2. Położenie aparatu i obiektów

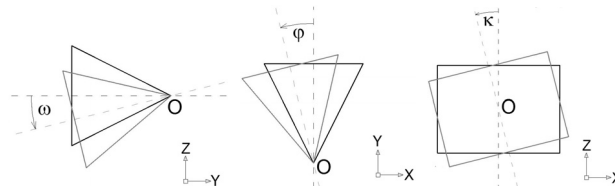
Istnieje wiele sposobów dokonywania pomiarów na zdjęciach opierających się na różnych założeniach i posiadające różne wymagania i ograniczenia. Najchętniej stosowana metoda równań kolinearności nie wymagająca od operatora określania pozycji aparatu, została zaimplementowana w opracowanym programie. Wielkości, które pozwalają na odtworzenie wiązki promieni rzucających oraz określenia jej pozycji w przestrzeni oparte są na elementach orientacji zdjęć, które można podzielić na dwie kategorie: elementy orientacji wewnętrznej oraz zewnętrznej.

Na elementy orientacji wewnętrznej składają się:

- odległość obrazu (stała kamery), czyli odległość środka rzutów od płaszczyzny rzutów. Dla kamer niemetrycznych jest to ogniskowa aparatu,
- punkt główny zdjęcia, czyli rzut prostokątny środka rzutów na płaszczyznę zdjęcia. Położenie punktu głównego definiuje się w lokalnym układzie współrzędnych zdjęcia (układ tzw. tłowy). Położenie punktu głównego zdjęcia wyznacza się podczas kalibracji kamery.

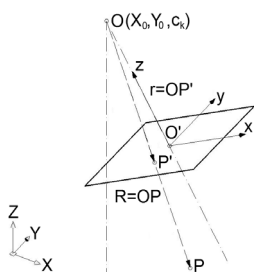
Elementy orientacji zewnętrznej to:

- przestrzenne współrzędne środka rzutów - usytuowanie środka rzutów w terenowym (globalnym) układzie współrzędnych - X, Y, Z ,
- trzy kąty określające położenie osi kamery i płaszczyzny rzutów w przestrzeni terenowej - kąt nachylenia ω , zwrotu φ oraz skręcenia κ (rys. 1).



Rys. 1. Kąt nachylenia ω , zwrotu φ i skręcenia κ w przestrzeni
Fig. 1. Angle of inclination ω , turn φ and twisting κ in the space

Metoda równań kolinearności odnosi się do przypadku ogólnego i stosowana jest najczęściej w fotogrametrii lotniczej. Pozwala ona, w zależności od tego czy zastosowane zostanie fotogrametryczne wcięcie wprzód czy wstecz, obliczyć współrzędne terenowe sfotografowanych punktów (X, Y, Z) lub określenie elementów orientacji zewnętrznej zdjęcia $(\omega, \varphi, \kappa)$. W układzie tłowym współrzędne wektora P' wynoszą $(x, y, -c_k)$, natomiast współrzędne terenowe punktu P $(X-X_0, Y-Y_0, Z-Z_0)$. Zgodnie z rys. 2 wektory R i r są współliniowe i ich początki zaczepione są w tym samym punkcie O i różnią się jedynie długością. Można to wyrazić w postaci równania (1).



Rys. 2. Graficzna prezentacja zagadnienia kolinearności wektorów
Fig. 2. Graphic presentation issue of collinearity of vectors

$$\lambda = \frac{|R|}{|r|} \quad (1)$$

Układy współrzędnych tłowy i terenowy są różnie zorientowane w przestrzeni. Orientacja jest najczęściej opisywana jest w formie uwikłanej w postaci macierzy A o postaci przedstawionej równaniem (2).

$$A = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\kappa & -\cos\varphi\sin\kappa & \sin\varphi \\ \cos\omega\sin\kappa + \sin\omega\sin\varphi\cos\kappa & \cos\omega\cos\kappa - \sin\omega\sin\varphi\sin\kappa & -\sin\omega\cos\varphi \\ \sin\omega\sin\kappa + \cos\omega\sin\varphi\cos\kappa & \sin\omega\cos\kappa + \cos\omega\sin\varphi\sin\kappa & \cos\omega\cos\varphi \end{bmatrix} \quad (2)$$

Warunek kolinearności wektorów R i r można zapisać w postaci równania (3).

$$R = \lambda * A * r \quad (3)$$

Tworząc układ równań dla 3 punktów o znanych współrzędnych tłowych i terenowych otrzymuje się układ 9 równań (po 3 dla każdego punktu) z 9 niewiadomymi.

Warunkiem uzyskania poprawnych wyników obliczeń jest wykonanie korekty zniekształceń geometrycznych (dystorsji) zdjęć oraz określenia efektywnie wykorzystywanych rozmiarów matrycy aparatu wraz z przesunięciem osi optycznej.

3. Rozpoznawanie obrazów i kształtów

Wyróżnić można kilka rodzajów metod rozpoznawania obrazów:

- metody algebraiczne, np. dekompozycja SVD (ang. Singular Value Decomposition), której algorytm polega na rozłożeniu macierzy na iloczyn trzech macierzy: dwóch ortonormalnych oraz jednej diagonalnej,
- metoda pośrednia, opierająca się na cechach wyodrębnionych z obrazu, np. za pomocą transformaty Radona czy współczynników kształtu, a następnie na jego podstawie dokonana zostaje klasyfikacja badanego obiektu,
- korelacja wzajemna badanego obrazu i wyszukiwanego obrazu wzorcowego. Po przeanalizowaniu całego obrazu w macierzy korelacji wyszukana zostaje najwyższa wartość i na podstawie jej pozycji w macierzy określana jest pozycja znalezionego wzorca na obrazie.

W środowisku LabVIEW w pakiecie Vision zaimplementowane zostały trzy funkcje służące do rozpoznawania obrazów:

- IMAQ Match Pattern 2;
- IMAQ Match Color Pattern;
- IMAQ Match Geometric Pattern.

Funkcje te, pomimo, że opierają się na różnych metodach wyszukiwania, oferują możliwość pewnego rozszerzenia funkcjonalności [3].

Pierwsza z funkcji, IMAQ Match Pattern 2, wykorzystuje do rozpoznawania obrazów metodę wzajemnej korelacji. W jej przypadku dodatkową opcją jest określenie kąta, pod jakim może znajdować się wzorec na przeszukiwanym obrazie - w formie

przedziału. Istnieje także możliwość przeszukiwania obrazu z dokładnością podpixelową i ustalenie minimalnego poziomu kontrastu obrazu wzorca.

Funkcja IMAQ Match Color Pattern stanowi hybrydę metody opierającej się na cechach i korelacji wzajemnej. Oferuje ona dokładnie ten sam poziom dostosowania wyszukiwania co funkcja poprzednia, ale z racji obsługi także palety kolorów, daje dodatkowe możliwości, takie jak:

- ignorowanie określonych kolorów znajdujących się na obrazie wzorca (w tym białego i czarnego),
- wyszukiwanie według kształtu i koloru lub tylko jednej z tych cech,
- zadanie poziomu trafności odwzorowania kolorów na przeszukiwanym obrazie.

Ostatnia z funkcji, IMAQ Match Geometric Pattern, opiera się na metodzie wykorzystującej cechy wygenerowane na podstawie wzorca. Funkcja umożliwi precyzyjne określenie czy szukany obiekt jest jednolity, jak ostre są jego krawędzie, minimalną długość krzywizn obiektu identyfikowane przez funkcję, z jaką dokładnością ma być przeszukiwany obraz lub czy tworzy on na obrazie figurę zamkniętą. Dodatkowo można też określić, czy na obrazie obiekt jest obrocony, zasłonięty lub odwzorowany w innej skali. Wszystkie ww. parametry mogą zostać sprecyzowane w formie przedziałów.

Do wykrywania kształtów można również wykorzystać funkcje IMAQ Detect Shapes oraz IMAQ Shape Match Tool. W drugiej z funkcji istnieje jednak dużo ograniczeń co do parametrów wejściowych i korzyść z jej użycia może okazać się niewielka.

W programie wykorzystano 12-bitowe znaczniki celownicze z programu PhotoModeler. Składają się one z centralnego koła oraz fragmentów łuków i przerw pomiędzy nimi o długości łuku będącej wielokrotnością 30° (rys. 3).



Rys. 3. Przykładowe znaczniki o kodach 2, 5, 7 i 93
Fig. 3. An example of marker with code 2, 5, 7 and 93

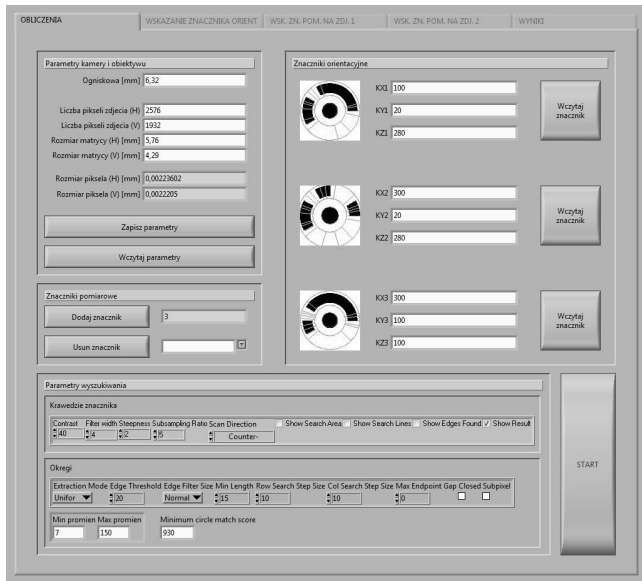
Oferowane w pakiecie Vision gotowe procedury wyszukiwania wzorców nie dawały satysfakcjonujących rezultatów. Opracowano złożony algorytm rozpoznawania składający się z dwóch etapów. W pierwszym wyszukiwane są centralne okręgi znacznika. W drugim sprawdzane fragmenty pierścieni z uwzględnieniem możliwego obrotu znacznika. Zarówno łuki pierścienia jak i ostatnia przerwa nie mogą być dłuższe niż 150° . Ograniczenie wynika z niejednoznacznej interpretacji długości kąta większego niż 180° . Tak więc znacznik o kodzie 93 pokazany na rys. 3 nie zostanie prawidłowo rozpoznany. Na obrazach o stosunkowo niskiej rozdzielczości (promień znacznika mniejszy niż 8 pikseli, które przy odpowiednich warunkach oświetleniowych gwarantowały odpowiedni kontrast) opracowany algorytm potrafił znaleźć poprawnie 70-80% znaczników. Standardowe algorytmy w Vision znajdowały ich niewiele ponad połowę. Wynik ten byłby nawet lepszy, gdyby nie niepewne działanie funkcji IMAQ Find Concentric Edge, która znajdowała czasami krawędzie w całkowicie nieoczekiwanych miejscach.

4. Implementacja

Działanie programu można podzielić na trzy główne etapy. Dodatkowo w etapie drugim można wyszczególnić trzy główne procesy. Pierwszy etap jest ściśle związany z pierwszą zakładką interfejsu, która została przedstawiona na rys. 4. W etapie tym użytkownik ma możliwość wprowadzenia podstawowych parametrów aparatu i obiektywu takich jak ogniskowa, rozdzielczość zdjęć oraz rozmiary aktywnego obszaru matrycy aparatu.

Dane te konieczne są do ustalenia rzeczywistej wielkości pojedynczego piksela na matrycy. Dane te można zapisać w pliku lub je z niego odczytać.

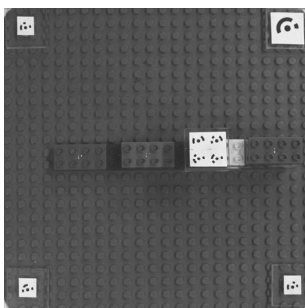
Interfejs programu pozwala wczytać obrazy znaczników, którymi oznakowano punkty i których zmiany pozycji program ma za zadanie monitorować. Program wymaga również wczytania trzech plików graficznych ze znacznikami orientacyjnymi, których współrzędne są znane oraz wprowadzenia przez użytkownika ich współrzędnych terenowych. Można też zmodyfikować parametry wyszukiwania znaczników m.in. kontrast krawędzi, gęstość wyszukiwania krawędzi pierścieni, promień wewnętrzny okręgu znacznika.



Rys. 4. Pierwsza zakładka interfejsu programu z widocznymi znacznikami
Fig. 4. First formant of the program with visible markers

W drugim etapie program automatycznie wyszukuje na kolejnych zdjęciach znaczniki orientacyjne, określa ich współrzędne tłowe. Jeśli któryś ze znaczników nie zostanie odnaleziony automatycznie użytkownik ma możliwość manualnego wskazania go. Po obliczeniu orientacji zewnętrznej wszystkich zdjęć następuje określanie pozycji w przestrzeni punktów oznaczonych znacznikami, które mają być monitorowane.

Program ma za zadanie monitorować przemieszczenie określonych punktów w czasie na podstawie serii zdjęć wykonywanych przynajmniej z dwóch pozycji. Z założenia musi to być proces wolnozmienny, ponieważ samo wykonanie jednej serii zdjęć trwać może do kilkunastu sekund. Wskazane jest wykonanie zdjęć więcej niż z dwóch pozycji aparatu, gdyż można wtedy uśrednić wyniki obliczeń możliwych kombinacji par zdjęć, co zmniejsza niepewność wyznaczania współrzędnych.



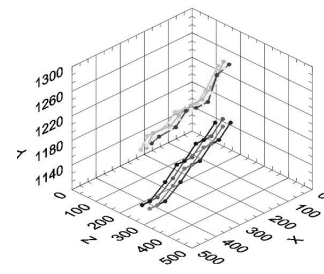
Rys. 5. Zdjęcie obiektu użyte do testu
Fig. 5. Photo of the object used for test

Podczas testów zdjęcia wykonane zostały aparatem Canon EOS 30D o ogniskowej 24 mm w rozdzielczości 3504x2336 pikseli.

Zdjęcia nie były korygowane pod względem dystorsji i przesunięcia punktu głównego.

Pomiary testowe przeprowadzono wykorzystując matrycę pozwalającą w prosty sposób określić zmianę współrzędnych. Znaczniki orientacji zewnętrznej umieszczono w narożnikach. Wykonano kilka serii pomiarów zmieniając trzy współrzędne punktów. Matrycę do pomiarów oraz przykładowe wyniki przedstawiono na rys. 5.

Wyniki średnich błędów 4 znaczników określonych dla 8 położeń pokazanych na rys. 6 przedstawiono w tabeli 1. Pozycję punktów określono na podstawie pary zdjęć.



Rys. 6. Wyniki pomiarów przemieszczenia znaczników
Fig. 6. Results of marker displacement measurement

Tab. 1. Błędy określonych położeń
Tab. 1. Errors of fixed position

	Położenie	1	2	3	4	5	6	7	8
			Błąd położenia [%]						
Współ- rzędna	X	3,1	2,3	1,9	3,8	2,3	4,7	3,2	3,1
	Y	7,3	5,6	7,5	7,1	8,0	9,9	8,8	7,7
	Z	2,4	2,9	1,7	3,5	1,7	1,6	1,4	2,2

Dla zdjęć nieskalibrowanych bezpośrednio wyznaczona różnica położenie dla współrzędnych X i Z nie przekraczała 19 mm, dla $X \in (150;450)$ mm i $Z \in (250;270)$ mm. Współrzędna Y (odległość obiektów od aparatu) wyznaczana jest z większym błędem, dochodzącym do 100 mm, dla $Y \in (1160;1250)$ mm. Pary zdjęć były wykonywane dla osi kamery przesuwanej o 100 mm wzdłuż osi X. To stosunkowo niewielkie przesunięcie rzutowało bezpośrednio na duży błąd wyznaczania współrzędnej Y.

5. Wnioski

Opracowane oprogramowanie pozwala na podstawie serii w czasie przynajmniej pary zdjęć wykonać obliczenia przemieszczeń wybranych punktów oznaczonych znacznikami w sposób automatyczny. Przygotowywane jest oprzyrządowanie pozwalające na wykonanie zdjęć przy użyciu sterowanego trawersu o długości 1 m, na którym zamocowany będzie aparat fotograficzny. Pozwoli to także na całkowicie automatyczny pomiar, czyli wykonywanie zdjęć. Aby poprawić dokładność pomiaru program wymaga także uzupełnienia o moduł wykonujący korektę dystorsji zdjęć, w oparciu o wcześniej przeprowadzoną kalibrację.

6. Literatura

- [1] Brześcińska W.: Fotogrametria, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 2005.
- [2] Sawicki P.: Fotogrametryczne systemy do pomiaru punktów w bliskim zasięgu, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 12b, Warszawa 2002.
- [3] Bitter R., Mohiuddin T., Nawrocki M.: LabVIEW: Advanced Programming Techniques, Second Edition, CRC Press, Boca Raton 2007, USA.