

**BADANIE PRZEMIESZCZENIA OBIEKTU WZGLĘDEM KAMERY NA  
PODSTAWIE ANALIZY OBRAZÓW SEKWENCYJNYCH**

**RESEARCH INTO THE TRANSLOCATION OF THE OBJECT  
WITH REGARD TO THE CAMERA POSITION  
ON THE BASE OF SEQUENTIAL IMAGE ANALYSIS**

**Michał Kowalczyk**

Zakład Fotogrametrii Teledetekcji i Systemów Informacji Przestrzennej,  
Wydział Geodezji i Kartografii, Politechnika Warszawska

SŁOWA KLUCZOWE: fotogrametria, obrazy sekwencyjne, orientacja wzajemna, trajektoria ruchu

STRESZCZENIE: Niniejszy referat przedstawia wyniki badań, które porównują zastosowanie standardowych procedur wyznaczenia orientacji wzajemnej dla fragmentu sekwencji filmowej względem zastosowania procedury numerycznej. W prezentowanych eksperymentach wykorzystano dane symulowane oraz rzeczywiste, stosując różne kierunki najazdu kamery. Po wyznaczeniu parametrów liniowych i kątowych orientacji wzajemnej została wykonana analiza dokładności i porównanie niezawodności działania obu metod. Prezentowana praca stanowi fragment analiz dotyczących technologii wykorzystania sekwencyjnych obrazów cyfrowych do inwentaryzacji obiektów znajdujących się w bliskim zasięgu kamery filmowej. Wszystkie badania zostały zrealizowane za pomocą narzędzi programowych, wykonanych we własnym zakresie.

## **1. WSTĘP**

Wykorzystanie obrazów sekwencyjnych w fotogrametrii bliskiego zasięgu jest obecnie szeroko omawiane przez wielu autorów. Pojawienie się na rynku stosunkowo niedrogich kamer rejestrujących obraz w standardzie HD daje odpowiedni potencjał do niektórych zastosowań pomiarowych. Inwentaryzacja otoczenia, nie wymagająca wysokiej precyzji, ale działająca szybko i niezawodnie, jest zadaniem odpowiednim do realizacji właśnie poprzez wykorzystanie filmu.

Do wyznaczenia trójwymiarowego modelu badanych obiektów, kluczową rolę spełnia odpowiednia trajektoria ruchu aparatu wraz z kierunkiem obserwacji. W celu jej wyznaczenia określa się parametry wzajemnego usytuowania stanowisk rejestracji pojedynczych ramek obrazu. Przemieszczenie stanowisk obserwacyjnych względem obiektu można też traktować jako ruch obiektu względem kamery.

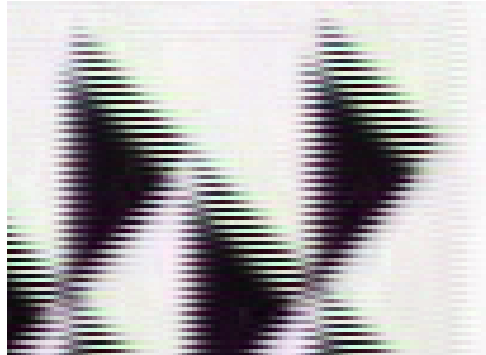
Z ruchem obiektu względem kamery związanych jest szereg problemów, na które należy zwrócić uwagę projektując sesję zdjęciową lub filmową.

## 2. ZAGADNIENIA ZWIĄZANE Z REJESTRACJĄ RUCHU OBIEKTÓW WZGLĘDEM KAMERY

Wykonanie filmu, który mógłby być wykorzystany do celów pomiarowych, związane jest z uwzględnieniem wielu istotnych czynników. Potencjał pomiarowy zależy zarówno od zawartości informacji w pojedynczych kadrach filmu jak i od częstotliwości jego rejestracji. Współczesne, dostępne na rynku, kamery cyfrowe rejestrują obraz o wymiarach dochodzących do formatu określanego jako 4K tzn. liczba pikseli w linii poziomej wynosi ponad 4000.

Częstotliwość rejestracji pojedynczych ramek jest uzależniona od ustawionego rozmiaru pojedynczego obrazu i waha się zwykle w granicach 24-120 klatek na sekundę. Ta zależność wynika z ograniczonej przepustowości informacji przesyłanej w jednostce czasu przez scalony analizator bądź analizatory obrazu, zamontowane w płaszczyźnie tłowej kamery. Występują też kamery rejestrujące film dla zjawisk szybkozmiennych i wtedy jest możliwość rejestrowania przynajmniej kilkuset obrazów na sekundę, zazwyczaj jednak kosztem jakości pojedynczego obrazu. Na jakość uzyskanego filmu wpływają więc wymiary pojedynczej ramki, podawane w pikselach, stopień kompresji filmu oraz liczba takich obrazów w jednostce czasu. Ogólnie te wszystkie parametry są zawarte w wartości przesyłu danych, jakie kamera rejestruje w ciągu sekundy. Maksymalnie, dla kamer obecnie dostępnych na rynku, wartość ta zawiera się w przedziale 28 - 225 Mbps (megabitów na sekundę).

Kolejną ważną cechą rejestracji jest czas ekspozycji. Wpływa on na jakość powstającego pojedynczego kadru filmu, pokazującego przemieszczające się względem kamery obiekty. Zbyt długi czas otwarcia migawki powoduje rozmycie obrazu, zdecydowanie bardziej drastycznie widoczne dla bliskiego zasięgu niż dla kamer rejestrujących z pułapu lotniczego. Kompensacja rozmazania działa w przypadku kamer naziemnych, jedynie uwzględniając wpływ chwilowego przyspieszenia ruchu. Poruszając się ze stałą prędkością, układy kompensujące rozmazanie nie działają odpowiednio. Ważne jest zatem, dla niedostatecznego oświetlenia sceny, ustawienie wysokiej światłoczułości lub powiększenie otworu przysłony, jeżeli skracany jest czas naświetlenia. Oba te rozwiązania, jak wiadomo, powodują degradację obrazu, z punktu widzenia przydatności pomiarowej, a więc ziarnistość oraz spadek głębi ostrości. Efekt rozmazania jest widoczny w różny sposób, zależnie od typu rejestracji wykonywanej przez kamerę. Kamery rejestrujące obraz z tzw. przeplotem (interlaced ang.) rejestrują dla danego półobrazu parzyste lub nieparzyste linie. Procedury późniejszej obróbki takiego obrazu zajmują się odpowiednią jego konwersją poprzez rozmycie obrazu między liniami (rys. 1).



Rys. 1. Powiększenie obrazu pochodzącego z przemieszczającej się kamery typu interlaced przed konwersją

Stosując kamerę rejestrującą każdą kolejną linię pojedynczego obrazu - progresywnie (progressive ang.), może się okazać, że linie są rejestrowane w różnym czasie (np. od góry do dołu obrazu). Efektem jest znaczne systematyczne zniekształcenie obrazu uzależnione od prędkości kątowej obiektów względem płaszczyzny tłowej kamery, oraz skali obrazu (rys. 2).



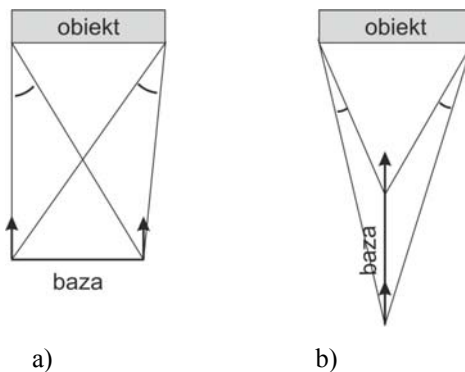
Rys. 2. Przykład zniekształcenia obrazu samochodu, poruszającego się w lewo, prostopadle do osi celowej kamery

### **3. PROBLEM ROZMAZANIA OBRAZU I ODTWORZENIA ORIENTACJI WZAJEMNEJ**

Dla wartości rozmycia obrazu istotna jest konfiguracja stanowisk kamery względem rejestrowanego obiektu. Jeżeli kamera porusza się tak, że kąt między linią bazy a osiami celowymi poszczególnych stanowisk ekspozycji jest zbliżony do prostego (rys. 3a), to występuje maksymalne rozmazanie obrazu (wśród innych kierunków linii bazy względem celowej).

Jednocześnie, z punktu widzenia obliczeń fotogrametrycznych, jest to sytuacja najkorzystniejsza, ponieważ kąt wcinający między stanowiskami kamery a punktami obiektu jest największy. Zatem dokładność wyznaczenia współrzędnych trójwymiarowych, dla zdjęć o konfiguracji określanej jako normalna, jest również największa.

Inna sytuacja, w której kamera najeżdża na obiekt tzn. osie celowe kamer są równoległe do linii bazy (rys. 3b), jest niekorzystna do wykonywania precyzyjnego wycięcia w przód. Centralna część kadru posiada wówczas kąty wcinające o wartościach bliskich zeru, więc poprawne wyznaczenie odległości dla tej części obiektu jest niemożliwe. Jednak rozmycie obrazu jest tu minimalne, więc działanie wszelkiego rodzaju procedur dopasowujących obrazy (Cho, Roth 1996) jest, w tym przypadku, najpewniejsze. Rysunek 3 pokazuje obie omawiane konfiguracje stanowisk kamery względem obiektu.



Rys. 3. Warunki wycięcia w przód dla dwóch różnych konfiguracji osi kamery względem linii bazy; a) baza prostopadła, b) baza równoległa do osi obserwacyjnej

#### 4. CEL EKSPERYMENTÓW

Wyznaczenie orientacji wzajemnej stanowisk kamery jest warunkiem niezbędnym do zbudowania poprawnego modelu badanego obiektu. Parametry tej orientacji podają kierunek przemieszczenia kamery od jednego stanowiska do następnego w czasie zapisu filmu, względem osi obserwacyjnej kamery (łączącej środek rzutów z punktem głównym autokolimacji kamery), a więc kierunku obserwacji.

Przedstawione eksperymenty dotyczą sprawdzenia niezawodności działania procedur wyznaczenia składowych wektora bazy fotografowania:  $b_x$ ,  $b_y$ ,  $b_z$  oraz kątów obrotu następnego stanowiska względem poprzedniego:  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ ; w kąto - liniowym opisie orientacji wzajemnej, dla różnych konfiguracji stanowisk kamery. Metoda spostrzeżeń pośredniczących (Skórczyński, 1976; Wiśniewski, 2005), oparta na równaniach paralaksy poprzecznej (nazywana dalej klasyczną), jest porównywana do metody numerycznej (Nowak, 2000; Kosma, 2004). Jako procedura numeryczna zastosowana została wielopunktowa metoda iteracyjna, polegająca na badaniu kilku, równomiernie rozmieszczonych, punktów z przyjętego przedziału argumentów funkcji błędu (średniej odległości promieni homologicznych). W kolejnym kroku działania tej procedury centrum

zakresu badania jest przesuwane do punktu, o poprzednio wyznaczonej najmniejszej wartości błędu, i przedział jest zawężany.

Obie metody jako kryterium poprawności wyznaczeń przyjmują warunek komplanarności tzn. linia bazy musi leżeć na wspólnej płaszczyźnie z promieniami homologicznymi wyprowadzonymi do tego samego punktu obiektu z obu stanowisk kamery. Podstawowym kryterium oceny dokładności wyrównania jest minimalna odległość między promieniami homologicznymi po wyznaczonym przesunięciu i obrocie.

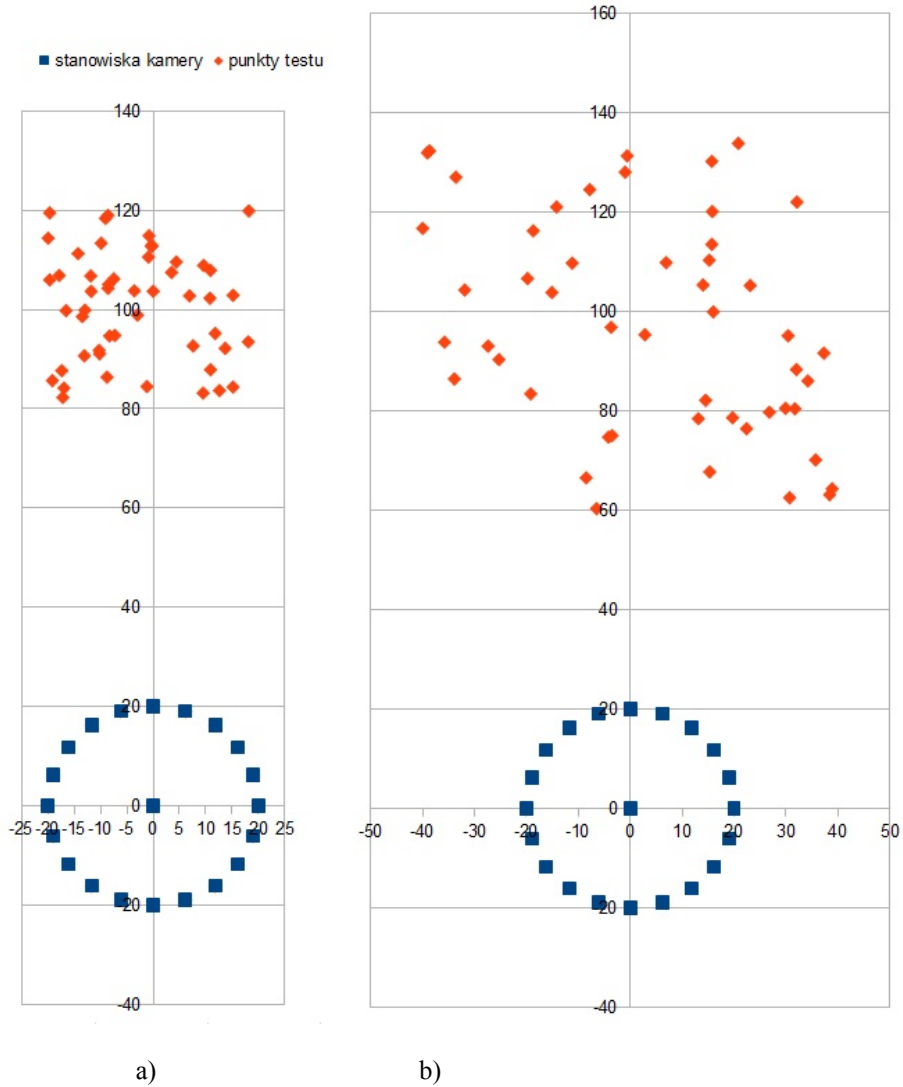
Poprawne działanie kontrolowanych algorytmów powinno zapewnić odpowiednie oddalenie od siebie stanowisk kamery. Punkty w sekwencji filmowej są zwykle przenoszone przez kilka kadrów, aby zapewnić poprawne warunki wykonywanego wcięcia kąтового. Przy minimalnym przesunięciu jednej pozycji kamery względem następnej wyrównanie byłoby, z założeń geometrycznych, niestabilne i podatne na błędy numeryczne, spowodowane potencjalną równoległością, odpowiadających sobie, promieni homologicznych. Określenie punktu najbliższego dla obu promieni byłoby niemożliwe.

## 5. SYMULACJA OBSERWACJI TRÓJWYMIAROWEGO POLA TESTOWEGO

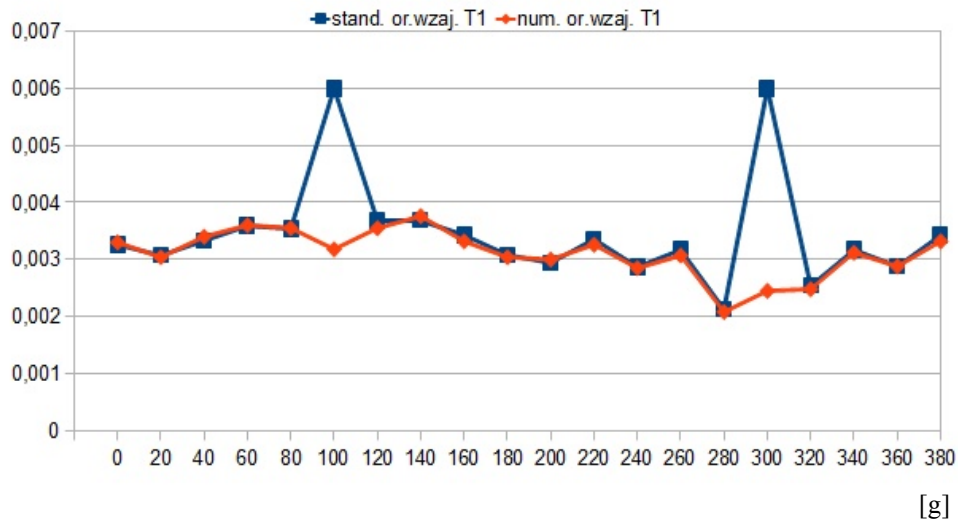
Pierwszy eksperyment został wykonany na podstawie losowo wygenerowanego zbioru 50-ciu punktów osnowy, które zostały poddane projekcji na płaszczyznę flowe zadanych lokalizacji kamery. Wygenerowane zostały dwa zbiory punktów o zakresie współrzędnych  $\pm 20$  jednostek oraz  $\pm 40$  jednostek w kierunku każdej osi współrzędnych. Założeniem testu była bezbłędność współrzędnych punktów obiektu oraz obserwacji wykonanych na powierzchni obrazów. Wartość  $c_k$  została przyjęta jako 10 jednostek. Pierwsze stanowisko kamery było ustawione w punkcie o współrzędnych  $(0, 0, 0)$ , drugie było oddalone o 20 jednostek liniowych i każdorazowo obracane wokół pierwszego o kąt 20 gradów (kąt 0 gradów dla stanowiska z prawej strony centralnego i dalej zgodnie z ruchem wskazówek zegara). Konfigurację punktów testu oraz stanowisk kamery dla obu przypadków punktów osnowy (test 1 i test 2) przedstawia rysunek 4. W eksperymencie dla każdego ustawienia pary stanowisk kamery były wyznaczane elementy orientacji wzajemnej, dwiema porównywanymi metodami. Następnie był budowany model fotogrametryczny i wpasowywany w układ punktów osnowy.

Średnią odległość między odpowiednimi promieniami homologicznymi po wyrównaniu dla testów 1 i 2 prezentują rysunki 5 i 7, dla każdego ustawienia obu pozycji kamery. Standardowa procedura wyrównania metodą parametryczną (spostrzeżeń pośredniczących) nie sprawdziła się dla ustawienia kamery przód - tył (pozycja 100 i 300 gradów). Uzyskane wyniki charakteryzowały się niestabilnością i wartościami przekraczającymi znacznie zakres prezentowanych wykresów (pokazane są na nich jedynie symbolicznie).

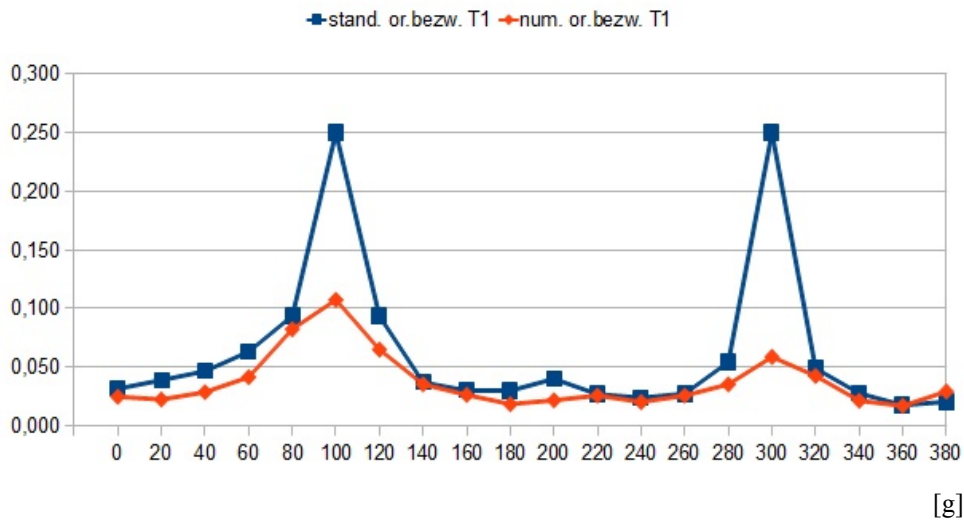
Wyniki dokładności wpasowania modeli w układ punktów osnowy (orientacja bezwzględna i transformacja) są prezentowane, dla obu testów, na rysunkach 6 i 8. Podawane są średnie odległości między punktami danymi a wyznaczonymi po transformacji.



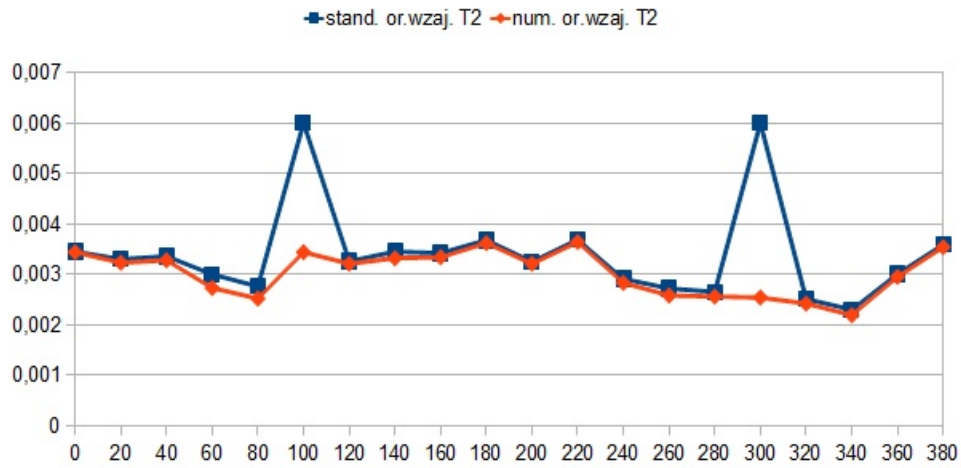
Rys. 4. Rozmieszczenie stanowisk kamery względem punktów rejestrowanego obiektu.  
a) Test 1, b) Test 2



Rys. 5. Średnie wartości odległości przestrzennej między promieniami homologicznymi dla procedury standardowego wyrównania oraz procedury numerycznej. Test 1

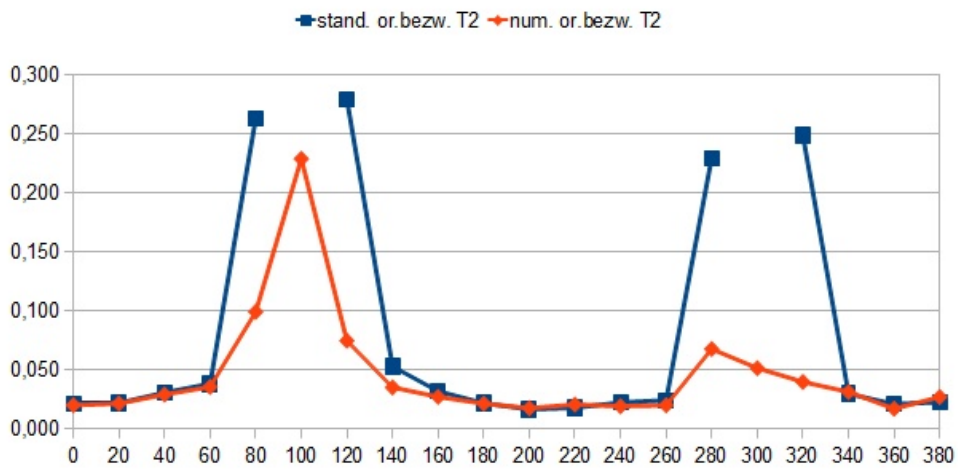


Rys. 6. Średnie wartości odległości przestrzennej między punktami osnowy a ich wyznaczonymi odpowiednikami. Orientacja wzajemna wyznaczona dwiema porównywanymi metodami. Test 1



[g]

Rys. 7. Średnie wartości odległości przestrzennej między promieniami homologicznymi dla procedury standardowego wyrównania oraz procedury numerycznej. Test 2



[g]

Rys. 8. Średnie wartości odległości przestrzennej między punktami osnowy a ich wyznaczonymi odpowiednikami. Orientacja wzajemna wyznaczona dwiema porównywanymi metodami. Test 2



## 6. TEST WYKONANY NA PODSTAWIE FILMU

Badanie to opiera się na wykorzystaniu fragmentu sekwencji filmowej nakręconej z elektrowozu pociągu. Występuje tu, w przybliżeniu, równoległość osi celowych kamery względem kierunku ruchu, a więc linii bazy rejestracji. Taka konfiguracja występuje jako próba zastosowania pojedynczej kamery do budowy uproszczonego modelu otoczenia linii kolejowej, w odróżnieniu do prezentowanej w literaturze (Mikrut *et al*, 2012), gdzie baza jest prostopadła do kierunku ruchu. Wymiary obrazu: 854 x 480 pikseli. Przyjęte  $c_k$  wynosiło 1000. Początkowym etapem była detekcja punktów wspólnych, a następnie wyznaczenie parametrów orientacji wzajemnej.

Wyniki wartości liniowych są podane w jednostkach związanych z obrazem, elementy kątowe podane są w gradach (Tabela 1 i 2). Niestety w tym eksperymencie nie była możliwa weryfikacja wyznaczonych punktów modelu. Obraz kadru z wykrytymi parami punktów prezentuje rysunek 9.



Rys. 9. Kadr z filmu wraz z wykrytymi parami punktów (względem następnej klatki filmu)

Tabela 1. Wyznaczone elementy orientacji wzajemnej dla podstawowej metody wyrównania

Stanowiska	bx	by	bz	$\omega$	$\varphi$	$\kappa$
1,2	81.768	6.015	57.252	0.19990	-1.96039	-0.26342
2,3	33.123	-14.567	93.224	-0.23523	-0.65492	0.11001
3,4	78.857	-3.673	61.385	-0.15451	-6.77951	-0.25193

Tabela 2. Wyznaczone elementy orientacji wzajemnej dla numerycznej metody wyrównania

Stanowiska	bx	by	bz	$\omega$	$\varphi$	$\kappa$
1,2	2.075	4.694	-99.868	0.00200	0.02430	0.03683
2,3	10.025	0.476	-99.495	0.16802	0.40416	0.26552
3,4	-3.456	5.424	-99.793	-0.03910	-0.13428	-0.25294

Wyniki świadczą o znacznej niestabilności wyrównania dla klasycznej metody obliczeń. Przyczyna tego zróżnicowania rezultatów, dla tej procedury, jest związana z uzależnieniem wyznaczeń od paralaksy poprzecznej, ustawionej prostopadle do przyjętej wzdłuż osi X zdjęcia orientacji bazy, pomiędzy porównywanymi stanowiskami kamery. Dla tego sposobu obliczeń musi być przyjęta określona, przybliżona orientacja wzajemna.

## 7. PODSUMOWANIE

Zalety filmowania, związane z niewielkimi zmianami elementów orientacji pomiędzy sąsiednimi stanowiskami kamery, pozwalają na znaczne uproszczenia w technologii odtwarzania kształtów rejestrowanych obiektów. Możliwe jest użycie procedur numerycznych, wyznaczających właściwe rozwiązania przez stopniowe zawężanie przedziału poszukiwań. Ich zaletą jest mniejsza podatność procesu wyrównawczego na brak zbieżności oraz prostsze zaimplementowanie.

Ocena poszczególnych narzędzi obliczeniowych ma zasadnicze znaczenie dla niezawodności działania technologii pozyskiwania informacji o obiektach, która powinna działać automatycznie i bez koniecznego nadzoru. Etap wyrównania i wyznaczenia orientacji wzajemnej jest podobnie istotny jak początkowa detekcja wspólnych punktów lub obszarów, obrazów sekwencyjnie rejestrowanych przez kamerę filmową.

Zaprezentowane eksperymenty wykazały skuteczność działania procedury numerycznej w określaniu wektora ruchu kamery względem rejestrowanych obiektów. Jednak w ekstremalnych warunkach, przy braku odpowiednio rozmieszczonych punktów wspólnych oraz niekorzystnej konfiguracji stanowisk kamery, dla obu metod niemożliwe jest poprawne wyznaczenie parametrów orientacji wzajemnej.

## 8. LITERATURA

Cho W. 1996: "Relational matching for automatic orientation", *ISPRS Comission III, Working Group 3* [http://www.isprs.org/proceedings/XXXI/congress/part3/111\\_XXXI-part3.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXI/congress/part3/111_XXXI-part3.pdf).

Kosma Z. 2004: "Metody numeryczne dla zastosowań inżynierskich", *Zakład Poligraficzny Politechniki Radomskiej*.

Mikrut S., Pyka K., Tokarczyk R. 2012: "Systemy do pomiaru skrajni kolejowej - przegląd i tendencje rozwojowe", *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 23, 2012, s. 291–301*.

Nowak E. 2000: "Algorytmy numeryczne w geodezji", *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*.

Roth G. 1996: "Automatic Correspondences For Photogrammetric Model Building", *ISPRS Comission III, Working Group 2*.

Skórczyński A. 1976: "Wykłady z rachunku wyrównawczego i obliczeń geodezyjnych", *Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej*

Wiśniewski Z. 2005: "Rachunek wyrównawczy w geodezji", *Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko - Mazurskiego*

## **RESEARCH INTO THE TRANSLOCATION OF THE OBJECT WITH REGARD TO THE CAMERA POSITION ON THE BASE OF SEQUENTIAL IMAGE ANALYSIS**

KEY WORDS: close range photogrammetry, sequential images, relative orientation, trajectory

### **Summary**

The present report introduces the results of research, which compares the use of standard procedures of relative orientation determination for the fragment of film sequence with regard to the use of numerical procedure. The experiments used simulated data and acquired from real environment, applying the different directions of the camera movement, from one station to another. After the determination of linear and angular parameters of a relative orientation, the analysis for valuation of both methods reliability had been applied, comprehended as accuracy and robustness. Presented work represents the part of the technology research of the sequential digital images utilisation to the registration of the objects in the close range of movie camera. All performed tasks had been accomplished with a support of software tools prepared by author.

Dane autora:

Dr inż. Michał Kowalczyk  
e-mail: mikowalczyk@wp.pl  
teefon.: 22 234 76 94