

WYKORZYSTANIE PAKIETU PHOTOMODELER ORAZ ŚRODOWISKA MATLAB, DO BADANIA PARAMETRÓW RUCHU OBIEKTÓW NA PODSTAWIE OBRAZÓW SEKWENCYJNYCH

APPLICATION OF THE PHOTOMODELER SOFTWARE AND MATLAB ENVIRONMENT FOR ANALYSIS OF OBJECTS MOVEMENT PARAMETERS BASED ON IMAGE SEQUENCES

Tomasz Markowski

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

SŁOWA KLUCZOWE: fotogrametria bliskiego zasięgu, obrazy sekwencyjne, badanie parametrów ruchu, PhotoModeler, Matlab, cyfrowa kamera filmowa, kamera niometryczna

STRESZCZENIE: Tematem artykułu jest badanie parametrów ruchu obiektów na podstawie monokularnych zobrazowań sekwencyjnych. Zaproponowany algorytm został oparty na wykorzystaniu do pomiarów fotogrametrycznych oraz ich wyrównania standardowego oprogramowania fotogrametrycznego - pakietu PhotoModeler Scanner oraz do późniejszych obliczeń - używanego powszechnie środowiska obliczeniowego - pakietu Matlab. W opisywanych eksperymentach rejestracje ruchu, w postaci filmów i sekwencji zdjęć wykonano przy użyciu kamer JVC GZ-HD5 oraz Nikon D5000. W przypadku filmów, poszczególne klatki wyodrębniono w postaci osobnych plików graficznych z zastosowaniem czterech różnych programów. Następnie, używając pakietu PhotoModeler, wykonano pomiary automatyczne na (naniesionych przed rejestracją na obiekty i otoczenie) znakach kodowanych oraz wyrównanie metodą niezależnych wiązek. Kolejnym etapem były obliczenia realizowane przy użyciu pakietu Matlab. Algorytm przewidywał trzy typy wyznaczeń - ruch kamery względem otoczenia, obiektu względem kamery i obiektu względem otoczenia. W przypadku dwóch z nich konieczna była zmiana układu odniesienia, którą zrealizowano poprzez odpowiednie transformacje współrzędnych. Ostatnim etapem było wyznaczenie parametrów ruchu z użyciem uśrednionej częstotliwości obrazowania. Algorytm przetestowano, wykonując szereg wyznaczeń parametrów ruchu dla różnych obiektów. Badania wykazały bardzo duże zróżnicowanie dokładności, spowodowane szeregiem różnych czynników, jak również umożliwiły ocenę możliwości i ograniczeń opracowanej metody wyznaczeń.

1. WPROWADZENIE

Obserwacja i analiza parametrów ruchu jest przedmiotem badań wielu dziedzin nauki i techniki. Istnieje przy tym bardzo duże zróżnicowanie pod względem celu badań, charakterystyk badanych obiektów, sposobów ich prezentacji fizycznej (jako punkt materialny, bryła sztywna, ciało odkształcalne), szybkości ruchu, jak również oczekiwanej szczegółowości i dokładności wyników. Jako przykłady zastosowań pomiarów parametrów ruchu wyróżnić można między innymi badania ruchu pojazdów i ich elementów, w celu

określenia ich charakterystyk technicznych, analizy ruchu drogowego i pieszego, kontrolę prędkości pojazdów, przeprowadzaną przez odpowiednie służby, badania ruchu ciała człowieka, prowadzone między innymi dla celów medycznych, różnego rodzaju badania przyrodnicze, w tym zarówno analizy geologiczne, jak i obserwacje ruchu zwierząt, czy też badania parametrów ruchu Sztucznych Satelitów Ziemi (Markowski, 2012).

Z tak dużym zróżnicowaniem celów badań parametrów ruchu łączy się również bardzo szeroki wachlarz stosowanych metod. W ogólności, badania różnych, zależnych od siebie parametrów ruchu, prowadzone są najczęściej poprzez bezpośredni pomiar jednego z nich, a następnie wyznaczenie parametrów wtórnych na drodze różniczkowania lub całkowania. Dobrym przykładem jest wyznaczenie prędkości i przyspieszenia, jako pierwszej i drugiej pochodnej położenia względem czasu, ale istnieją również metody, w których wartością mierzoną bezpośrednio jest prędkość lub przyspieszenie (Popowski, Dąbrowski, 2007).

Stosowane metody badań parametrów ruchu, kierując się kręgiem zainteresowań niniejszej serii wydawniczej, podzielić można na te związane z szeroko pojętą fotogrametrią oraz wszystkie pozostałe. Do metod niefotogrametrycznych zalicza się między innymi zastosowanie hodometrów, tachometrów, akcelerometrów, żyroskopów, zespołów detektorów obecności (detektorów nacisku, czujników magnetycznych, detektorów akustycznych, indukcyjnych wykrywaczy obecności, czujników elektromagnetycznych), wielokrotnych elektromagnetycznych pomiarów odległości, pomiarów dopplerowskich, czy też systemów GNSS. Wśród metod fotogrametrycznych wyróżnić można natomiast monokularne i multisensoralne zobrazowania sekwencyjne, skaning laserowy, kamery odległościowe oraz interferometrię radarową. W niektórych zastosowaniach wykorzystywane są również całe rozbudowane systemy, wykorzystujące zarówno metody fotogrametryczne, jak i niefotogrametryczne (np. w przypadku mobilnych systemów pomiarowych (ang. *Mobile Mapping Systems*)) (Markowski, 2012).

W niniejszym opracowaniu uwaga skupiona jest na metodzie fotogrametrycznej, opartej na monokularnych cyfrowych zobrazowaniach sekwencyjnych. Postawionym w badaniach celem była analiza możliwości jej realizacji z wykorzystaniem standardowego oprogramowania fotogrametrycznego (służącego do tworzenia modeli przestrzennych obiektów bliskiego zasięgu) - pakietu PhotoModeler, wspartego popularnie używanym środowiskiem obliczeniowym - pakietem Matlab.

2. OPIS OPRACOWANEGO ALGORYTMU I JEGO REALIZACJI

Jako główne etapy omawianego algorytmu badania parametrów ruchu obiektów na podstawie obrazów sekwencyjnych można wyróżnić:

- rejestrację ruchu w postaci filmów lub sekwencji zdjęć,
- w przypadku filmów, zapis poszczególnych kadrów w postaci osobnych plików graficznych,
- pomiary fotogrametryczne z użyciem pakietu PhotoModeler,
- opracowanie wyników pomiarów w pakiecie Matlab, w celu wyznaczenia parametrów ruchu,
- ewentualne analizy uzyskanych wartości.

2.1 Rejestracja ruchu obiektów

Pierwszym etapem każdego z badań parametrów ruchu była jego rejestracja w formie filmów lub sekwencji zdjęć. W przeprowadzanych badaniach przyjęto metodę pomiarową, opartą na wykorzystaniu znaków kodowanych, w związku z czym rejestrację należało poprzedzić ich naniesieniem na badane obiekty i ewentualnie ich otoczenie. Wykorzystano do tego celu dwa typy znaków kodowanych pakietu PhotoModeler - RAD (ang. *Ringed Automatically Detected Targets*) i 12-bitowe (Eos Systems Inc., 2011).

W wykonanych badaniach rejestrację przeprowadzono przy użyciu dwóch kamer - cyfrowej kamery fotograficznej Nikon D5000 i cyfrowej kamery filmowej JVC GZ-HD5. Zastosowano kilka różnych trybów rejestracji, zarówno w postaci filmów, jak i sekwencji zdjęć. Otrzymano w ten sposób bardzo zróżnicowany materiał obrazowy, zarówno pod względem wspomnianego trybu rejestracji (filmy, zdjęcia), pikselowych wymiarów obrazów (od 1280×720 i 1920×1080 dla filmów, do 3216×2136 i 4288×2848 dla zdjęć), rodzaju migawki (mechaniczna dla zdjęć i elektroniczna dla filmów), trybu skanowania wideo (progresywne w kamerze Nikon, z przeplotem w kamerze JVC), rodzaju i liczby elementów światłoczułych (CMOS - Nikon i 3 CCD - JVC), długości ogniskowych (ekwiwalenty dla standardu 35 mm: 27 mm i 82.5 mm dla kamery Nikon oraz 39.5 mm dla JVC), jak i częstotliwości obrazowania (od 1 do 24 klatek na sekundę).

Ponieważ zastosowano zobrazowania niemetryczne, należało również pozyskać obrazy do celów kalibracyjnych. Wykonano je w niewielkich odstępach czasu względem rejestracji ruchu, starając się zachować niezmienione parametry obrazowania. W przypadku kalibracji dla potrzeb różnych eksperymentów wykorzystano kilka wariantów jednoarkuszowego i wieloarkuszowego pola testowego pakietu PhotoModeler (Eos Systems Inc., 2011).

2.2 Zapis poszczególnych kadrów filmów w postaci osobnych plików

W przypadku rejestracji filmowej, kolejnym etapem było wyodrębnienie poszczególnych klatek filmów i ich zapis w postaci osobnych obrazów. Dla celów porównawczych, etap ten wykonano przy użyciu kilku różnych programów - Media Player Classic - Home Cinema, VLC media player, GOM Player oraz Matlab (z zastosowaniem przygotowanej do tego celu autorskiej funkcji). W przypadku kamery JVC należało na tym etapie uwzględnić również usuwanie przeplotu, poprzez algorytm wybierający osobno linie parzyste i nieparzyste, a następnie interpolujący pozostałe.

2.3 Pomiary fotogrametryczne

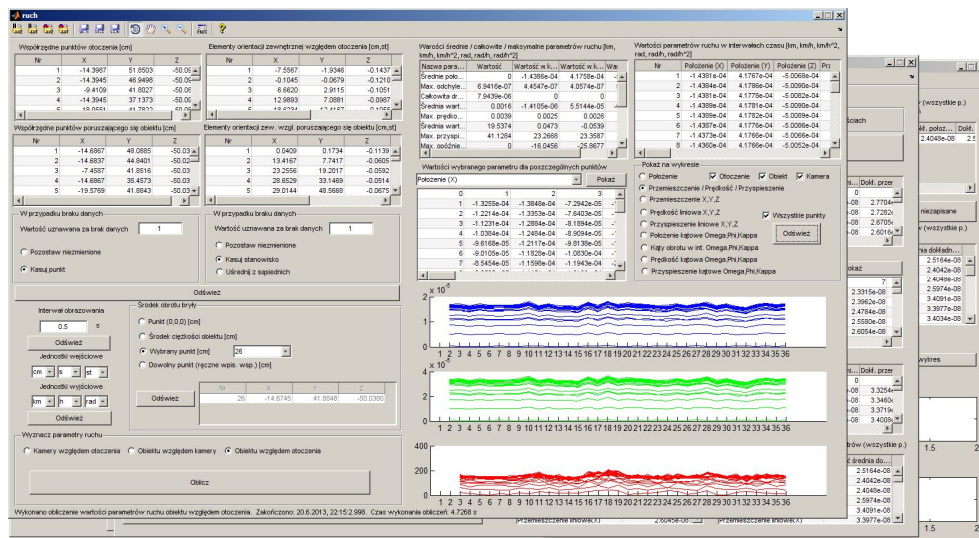
Następnym etapem procedury badania parametrów ruchu były pomiary fotogrametryczne. Aby możliwe było wykorzystanie standardowego oprogramowania, na tym etapie wyznaczeń należało przyjąć taki układ odniesienia, w którym badane obiekty są statyczne, natomiast kamera porusza się względem nich. Konieczne było również przyjęcie założenia, że obiekt jest bryłą sztywną. Wyznaczanymi wartościami były współrzędne punktów oraz elementy orientacji zewnętrznej dla poszczególnych położenia kamery w układzie współrzędnych obiektu.

W omawianych badaniach pomiary fotogrametryczne wykonano przy użyciu pakietu PhotoModeler Scanner. Stosując to oprogramowanie, przeprowadzono zarówno kalibrację kamer, jak i pomiary punktów obiektu oraz terratriangulację metodą niezależnych wiązek (ang. *bundle adjustment*) (Eos Systems Inc., 2011).

Kalibracja kamer w programie PhotoModeler odbywa się poprzez wyznaczenie elementów orientacji wewnętrznej jako niewiadomych w procesie wyrównania sieci obrazów przedstawiających pole testowe, o odpowiedniej konfiguracji. Algorytm opiera się na pomiarach automatycznych na znakach kodowanych typu RAD (w przypadku wieloarkuszowego pola testowego) lub kodowanych 8-bitowych i niekodowanych (dla pola jednoarkuszowego). Całość wyznaczenia odbywa się w sposób w pełni zautomatyzowany i przy przyjęciu domyślnych parametrów (które można również zmodyfikować), właściwie bez udziału użytkownika.

Jak już wspomniano, punkty obiektu pomierzono w sposób automatyczny z wykorzystaniem znaków kodowanych. Algorytm pomiarowy oparty jest na wykrywaniu na obrazach obiektów zarejestrowanych jako elipsy, a następnie rozpoznawaniu otaczających je elementów, zawierających indywidualny dla danego znaku kod.

Obserwacje wyrównano przy użyciu metody niezależnych wiązek, wykorzystującej bezpośrednio relacje pomiędzy współrzędnymi punktów na obrazie i na obiekcie oraz pozwalającej na jednoczesne wyznaczenie elementów orientacji zewnętrznej wszystkich zobrazowań i współrzędnych poszczególnych punktów obiektu (Kraus *et al.*, 2007). Dodatkowo oszacowane zostały również charakterystyki dokładnościowe wyznaczanych wielkości, jako odchylenia standardowe, określone na podstawie macierzy wariancyjno-kowariancyjnej, uzyskanej w wyniku procesu wyrównania (Eos Systems Inc., 2011).



Rys. 1. Interfejs graficzny autorskiej funkcji środowiska Matlab, służącej do wyznaczania parametrów ruchu

2.4 Obliczenia służące wyznaczeniu parametrów ruchu

Kolejnym etapem były obliczenia, zrealizowane przy użyciu stworzonych do tego celu autorskich funkcji środowiska Matlab, służące wyznaczeniu parametrów ruchu obiektów (Rys. 1). Algorytm przewiduje trzy warianty wyznaczeń: ruch kamery względem otoczenia, ruch obiektu względem kamery i ruch obiektu względem otoczenia.

W przypadku wyznaczania parametrów ruchu obiektu względem kamery lub otoczenia, istotnym etapem była zmiana układu odniesienia, zrealizowana poprzez powielenie współrzędnych punktów oraz zastosowanie wielokrotnych izometrycznych transformacji współrzędnych. Dla ruchu obiektu względem kamery zastosowano transformację odwrotną (1), natomiast dla ruchu obiektu względem otoczenia - połączenie transformacji odwrotnej i prostej (2), których parametrami były odpowiednie elementy orientacji zewnętrznej, opisujące poszczególne położenia kamer (Weng *et al.*, 1993). W ten sposób dla każdego z punktów obiektu wyznaczono cały szereg współrzędnych, odpowiadających kolejnym zobrazowaniom.

$$x_1' = R_1^{-1} \cdot (x_1 - T_1) \quad (1)$$

$$x_2' = R_2 \cdot (R_1^{-1} \cdot (x_1 - T_1)) + T_2 \quad (2)$$

Wyznaczając parametry ruchu, przyjęto jego opis poprzez trzy składowe translacje środka obrotów oraz trzy składowe obroty wokół osi (kąty Eulera). Środek obrotów jest przy tym rozumiany jako punkt przecięcia osi obrotów, bowiem przyjęto, iż wszystkie trzy osie przecinają się w jednym punkcie, są do siebie ortogonalne oraz nie zmieniają swoich położenia względem bryły obiektu. Dodatkowo przyjęto, że osie obrotów w przypadku badania ruchu obiektu są równoległe do osi jego układu współrzędnych, natomiast położenie środka obrotów możliwe jest do ustalenia każdorazowo przy wykonywaniu wyznaczeń. W przypadku ruchu kamery, środkiem obrotów jest środek rzutów obrazu, natomiast osie obrotów są tożsame z osiami jego przestrzennego układu współrzędnych.

Wartości parametrów ruchu wyznaczono na podstawie wzorów, które prezentuje Tab. 1. Warto zwrócić przy tym uwagę, że w przypadku prędkości i przyspieszeń, są one równoznaczne użyciu metody ilorazów różnicowych wstecz.

Tab. 1. Wzory użyte do wyznaczenia parametrów ruchu

	Parametry liniowe	Parametry kątowe
Położenie	r_i	α_i
Przemieszczenie	$\Delta r_i = r_i - r_{i-1}$	$\Delta \alpha_i = \alpha_i - \alpha_{i-1}$
Prędkość	$v_i = \frac{\Delta r_i}{\Delta t}$	$\omega_i = \frac{\Delta \alpha_i}{\Delta t}$
Przyspieszenie	$a_i = \frac{v_i - v_{i-1}}{\Delta t}$	$\gamma_i = \frac{\omega_i - \omega_{i-1}}{\Delta t}$

Jako interwały czasowe, w jakich badane były parametry ruchu (Δt), przyjęte zostały interwały obrazowania. Ich długości zostały natomiast wyznaczone w odrębnych eksperymentach, polegających na rejestracji obrazów sekwencyjnych, przedstawiających

liczniki, a następnie odczytanie ich wskazań na poszczególnych zobrazeniach oraz porównaniu otrzymanych wyników (różnice poszczególnych wskazań, średnie wartości tych różnic i ich odchylenia standardowe). Przyjęto przy tym założenie, że w obrębie konkretnej procedury pozyskiwania i przetwarzania zobrażeń średnie interwały obrazowania są wartościami stałymi. Badania wykazały przy tym, że różnice w długościach interwałów obrazowania i dokładnościach ich wyznaczeń występują zarówno w zależności od modelu kamery, trybu obrazowania, jak i oprogramowania używanego do zapisu kadrów filmów w postaci odrębnych plików graficznych.

Istotnym napotkanym problemem okazało się wyznaczenie położenia kątownych. Było to spowodowane tym, że zmiana układu odniesienia, w tym osi obrotów, znacznie komplikowała bezpośrednie wyznaczenia kątów. W celu rozwiązania tego zagadnienia, zdecydowano się na użycie algorytmu orientacyjnego, przy czym ze względu na nieliniowość równań opisujących ruch, konieczne było zastosowanie wyznaczeń przybliżonych. Jednocześnie okazało się, że z powodu braku podstaw do przyjęcia założeń, pozwalających na zastosowanie wzorów dla małych kątów, konieczne było użycie metody iteracyjnej (Weng *et al.*, 1993). Wykorzystany w opracowaniu algorytm został oparty na wielokrotnym (iteracyjnym) tablicowaniu z zawężaniem przedziałów (Markowski, 2012).

Dodatkowo przeprowadzono również analizę dokładności wyznaczanych parametrów ruchu. Do tego celu stworzono również dwie autorskie funkcje środowiska Matlab. Opracowana procedura szacowania dokładności opiera się na przekształceniach wzorów, użytych do wyznaczania parametrów ruchu, z zastosowaniem formuły Gaussa na przenoszenie błędów średnich, wykorzystując, jako dane źródłowe, odchylenia standardowe współrzędnych punktów, oszacowane na etapie wyrównania obserwacji przy użyciu pakietu PhotoModeler. Ze względu na swoją obszerność, wyprowadzone wzory nie mogły zostać opublikowane w niniejszym artykule. Stanowią natomiast załącznik do pracy dyplomowej magisterskiej autora artykułu (Markowski, 2012).

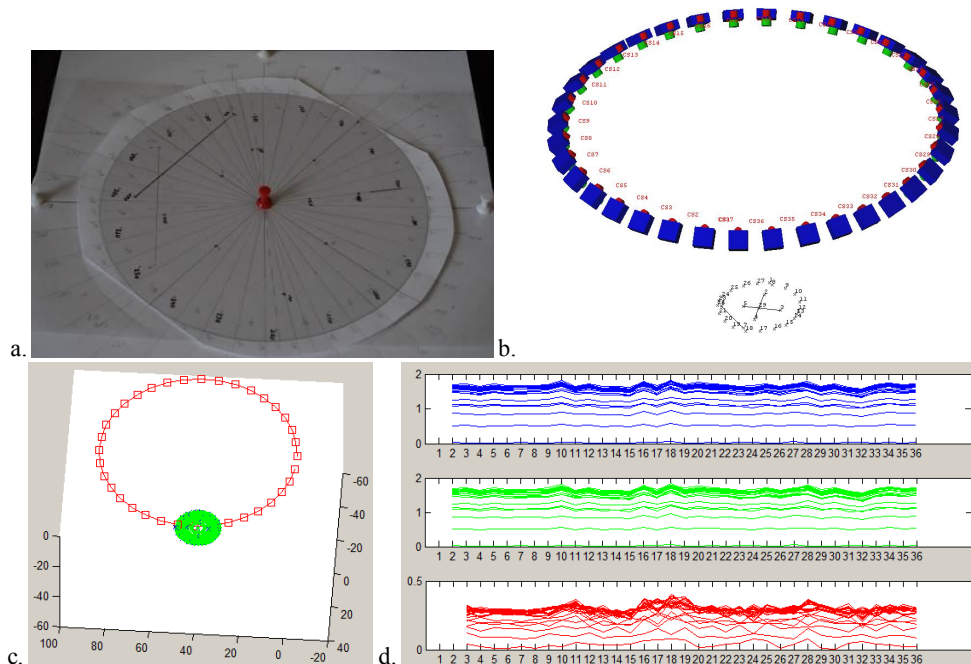
3. OPIS PRZEPROWADZONYCH EKSPERYMENTÓW

W ramach badań przeprowadzono szereg eksperymentów, polegających na wyznaczeniach parametrów ruchu wybranych obiektów, w tym symulacje z wykorzystaniem autorskiego pola testowego, badania ruchu kamery względem otoczenia, oraz analizy ruchu samochodu. Aby możliwe było zbadanie powtarzalności wyników oraz ich zależności od parametrów i warunków pomiarów, przeprowadzono w sumie 177 wyznaczeń, wykorzystując do tego celu 14675 zobrażeń. Niestety, tak duża liczba wyznaczeń uniemożliwia szczegółowe zaprezentowanie ich wyników, na przykład w postaci tabelarycznej.

Pierwszy eksperyment, został określony jako symulacja wyznaczeń parametrów ruchu z użyciem autorskiego pola testowego, bowiem polegał on na wykonaniu serii zdjęć, przedstawiających symulację poszczególnych faz ruchu, realizowaną poprzez odpowiednie przestawianie, pomiędzy poszczególnymi zobrazeniami, wzajemnych położenia obrotowych tarcz, których punkty były interpretowane jako punkty obiektu i otoczenia. Pomimo symulacyjnego charakteru opracowań, dalsza część wyznaczeń przebiegała standardowo, według opracowanego algorytmu badania parametrów ruchu (Rys.). W stosunku do pozostałych eksperymentów wystąpiły jedynie dwie zasadnicze różnice - zastosowanie pomiarów manualnych zamiast automatycznych oraz użycie fikcyjnych

Wykorzystanie pakietu PhotoModeler oraz środowiska Matlab, do badania parametrów ruchu obiektów na podstawie obrazów sekwencyjnych

wartości danych czasowych. Głównym celem omawianych badań było przetestowanie opracowanego algorytmu, poprzez porównanie uzyskanych wyników z rzeczywistymi obrotami tarcz pola testowego. W ramach eksperymentu zbadano wszystkie trzy warianty ruchu - kamery względem otoczenia, obiektu względem kamery i obiektu względem otoczenia. Rejestrację przeprowadzono w formie zdjęć z kamery Nikon D5000.

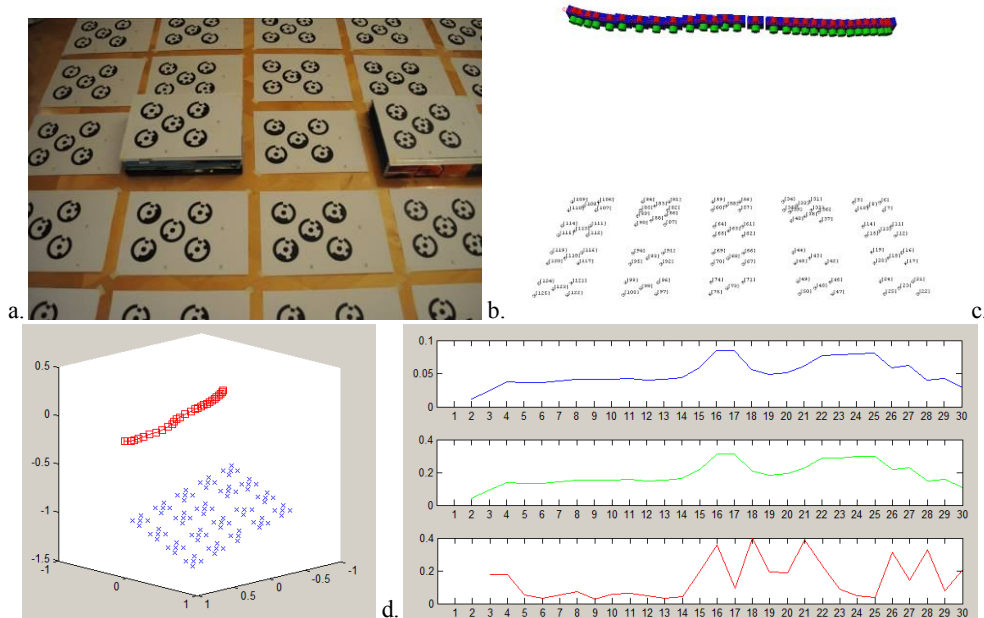


Rys. 2. Wyniki poszczególnych etapów przykładowej symulacji z wykorzystaniem autorskiego pola testowego: a. przykładowe zdjęcie, b. wizualizacja wyników uzyskanych w pakiecie PhotoModeler, c., d. przykładowe wykresy parametrów ruchu

Niestety, najprawdopodobniej z powodu ograniczeń użytego oprogramowania, nie było możliwe wyznaczenie charakterystyk dokładnościowych, co znacznie ograniczyło możliwość wykonania analizy dokładności w opisany wcześniej sposób. Uwzględniając jedynie błędy położenia punktów, oszacowano dokładności położenia i przemieszczenia liniowych na, odpowiednio, 0,2 i 0,3 mm, natomiast kątowych na 0,3" i 0,4". Jednak, ze względu na niepełne dane, użyte do tych wyznaczeń, za bardziej zaufane oszacowanie dokładności można uznać porównanie wyznaczonych przemieszczeń kątowych z rzeczywistymi obrotami tarcz o konkretne wartości kątów, w oparciu o naniesione na nie podziałki (widoczne na Rys. .2a). Wynika z nich, że błędy przemieszczeń kątowych nie przekraczają 1°.

Drugim z wykonywanych eksperymentów były analizy parametrów ruchu kamery względem otoczenia, przy czym jako punkty otoczenia wykorzystano punkty wieloarkusowego pola kalibracyjnego pakietu PhotoModeler (Rys. 3). W tym przypadku

wyznaczenia przeprowadzono z użyciem zarówno rejestracji zdjęciowej z kamery Nikon, jak i filmów z obu kamer.

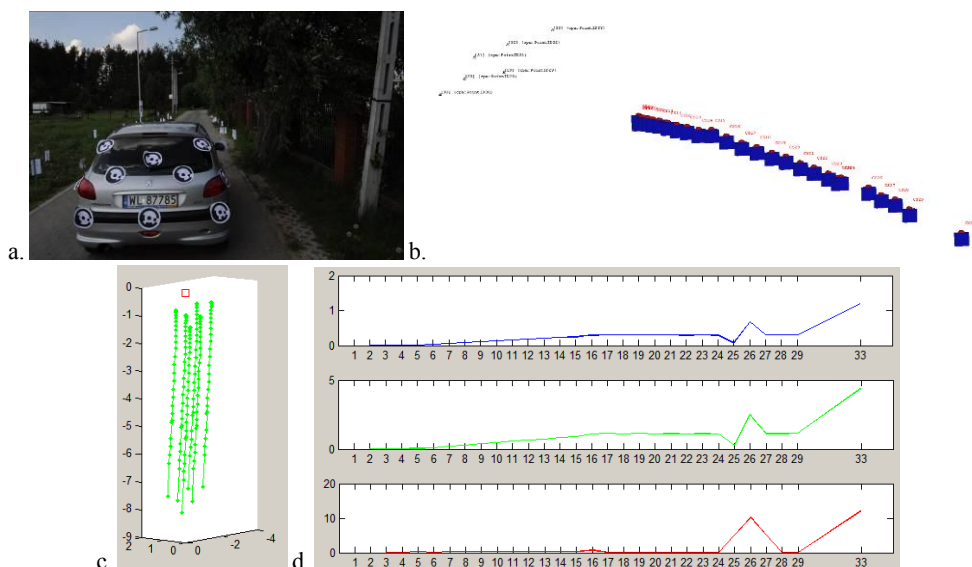


Rys. 3. Wyniki poszczególnych etapów przykładowego badania parametrów ruchu kamery względem otoczenia (oznaczenia poszczególnych rysunków (a., b., c., d.) jak na Rys. 2)

W przypadku tego oraz kolejnego eksperymentu, analizę błędów przeprowadzono przy użyciu omówionej wcześniej metody, opartej na wykorzystaniu charakterystyk dokładnościowych uzyskanych na etapie wyrównania. Porównując uzyskane dokładności zauważono wśród nich bardzo duże rozbieżności. Dla opracowań bazujących na zdjęciach seryjnych, średnia wartość błędu przemieszczeń liniowych to ok. 0.07 mm, natomiast dla filmów z kamer Nikon i JVC, odpowiednio, 31 i 38 cm. Podobne różnicowanie uzyskano w przypadku przemieszczeń kątowych - ok. 24" dla zdjęć i ok. 4-5° dla filmów. Wprowadzenie danych czasowych spowodowało dodatkowe obniżenie dokładności prędkości liniowych do, odpowiednio, 0.012, 6.0 i 2.7 m/s oraz kątowych, do ok. 18'/s i ok. 11°/s, jak również przyspieszeń liniowych - 0.051, 2.2 i 24.4 m/s² oraz ok. 2 i ok. 30°/s².

Ostatni z przeprowadzonych eksperymentów polegał na wielokrotnych badaniach ruchu samochodu (Rys. 44). Rejestracje w tym przypadku przeprowadzono w postaci filmów z kamery JVC i zdjęć z kamery Nikon, dodatkowo poszczególne obserwacje wykonując ze stanowisk fotografowania lub filmowania różnie usytuowanych względem trasy ruchu.

Wykorzystanie pakietu PhotoModeler oraz środowiska Matlab, do badania parametrów ruchu obiektów na podstawie obrazów sekwencyjnych



Rys. 4. Wyniki poszczególnych etapów przykładowego badania parametrów ruchu samochodu względem otoczenia (oznaczenia poszczególnych rysunków (a., b., c., d.) jak na Rys.)

Odmienne, niż w poprzednim eksperymencie, tym razem zauważono, iż uzyskane dokładności położenia i przemieszczeń są dość jednolite i w niewielkim stopniu uzależnione od sposobu rejestracji. Błędy przemieszczeń liniowych oscylują wokół 3.2 m dla sekwencji zdjęć z kamery Nikon, i 2.5 m, dla filmów z kamery JVC, a kątowych, odpowiednio, 8 i 6°. Większe zróżnicowanie pojawia się dopiero po dodaniu danych czasowych, bowiem średnie wartości błędów prędkości liniowych, to 6.7 i 16.2 m/s, a przyspieszeń - 25.8 i 103.9 m/s². W przypadku prędkości i przyspieszeń kątowych, można zauważyć jeszcze większy spadek dokładności - odpowiednio, do 30 i 79°/s oraz 163 i 732°/s². Tak znaczące wartości błędów świadczą o tym, iż opracowana metoda nie za bardzo nadaje się do tego typu wyznaczeń.

Reasumując, otrzymane w ramach eksperymentów dokładności były bardzo zróżnicowane - np. błędy położenia i przemieszczeń liniowych wahały się od setnych części milimetra, aż po kilka metrów. Nawet przy uwzględnieniu zróżnicowania wymiarów obiektów i odległości, z których były rejestrowane, jest to nadal bardzo duża rozpiętość. Jako główne źródło różnic dokładności należy wskazać zastosowanie odmiennych trybów rejestracji - najmniejsze błędy pojawiły się dla zdjęć z kamery Nikon, natomiast znacznie większe w przypadku filmów z obu kamer. Widoczne są również znaczne różnice, związane z obiektem badań oraz typem badanego ruchu. Najlepsze wyniki uzyskano dla badań ruchu kamery względem pola kalibracyjnego oraz niewiele gorsze w przypadku symulacji z użyciem autorskiego pola testowego. Znacznie niższe dokładności otrzymano natomiast w badaniach ruchu samochodu.

Jako główne źródła błędów wyróżnić można problemy z identyfikacją i pomiarem znaków, spowodowane między innymi niekorzystną skalą, niską rozdzielczością oraz słabą

jakością zobrazowań, błędy elementów orientacji wewnętrznej, wywołane zarówno błędami kalibracji, jak i rzeczywistą niestabilnością geometrii wewnętrznej obrazów (spowodowaną między innymi sposobem zapisu zobrazowań filmowych) oraz problemy z orientacją zewnętrzną, spowodowane między innymi zajmowaniem przez obiekt niewielkiej części kadru, niekorzystnym stosunkiem bazowym sąsiednich obrazów w sekwencji, czy też wykorzystaniem w znacznej części wyznaczeń, niewielkiej liczby pomierzonych punktów. Wspomniane wcześniej bardzo duże zróżnicowanie dokładności oraz znaczne wartości błędów w przypadku niektórych wyznaczeń, mogą świadczyć również o występowaniu błędów grubych. W przypadku prędkości i przyspieszeń należy zwrócić uwagę również na wpływ dokładności danych czasowych. Minimalizację wpływu poszczególnych źródeł błędów na wyniki wyznaczeń, a przez to podniesienie ich dokładności, należy wskazać, jako główny cel dalszych badań w omawianej tematyce.

4. PODSUMOWANIE

W ramach podsumowania należy podkreślić, jako zalety omawianej metody badania parametrów ruchu, jej stosunkowo niskie koszty, w związku z brakiem konieczności tworzenia i wdrażania nowego oprogramowania, prostotę implementacji, fakt, iż użycie powszechnie znanych i sprawdzonych algorytmów (jak np. metoda niezależnych wiązek), powoduje ich większą przewidywalność, niż w przypadku zupełnie nowych rozwiązań oraz możliwość modyfikacji samego etapu pomiarów, bez konieczności przebudowy całości algorytmu. Jako wady, można natomiast wyróżnić niską odporność na błędy pomiarowe, brak wykorzystania faktu sekwencyjności zobrazowań w algorytmie pomiarowo-wyrównawczym oraz spore ograniczenia odnośnie sposobów zastosowania, w związku z koniecznością zachowania odpowiednich warunków pomiaru, w celu uzyskania zadowalających dokładności.

Odnosnie sugestii dotyczących ewentualnego wdrażania opracowanego algorytmu, należy przede wszystkim zwrócić uwagę na trzy kwestie. Po pierwsze, okazało się, że zadowalające dokładności są uzyskiwane jedynie dla sekwencji zdjęć z dość dobrej kamery fotograficznej. W związku z tym w przypadku omawianego algorytmu należy całkowicie zrezygnować z rejestracji filmowej. Po drugie, procedura dobrze sprawdza się dla tych badań, w których rejestrowany obiekt zajmuje dużą część kadru (np. różnego rodzaju badania ruchu obrotowego lub niewielkich oscylacji), natomiast znacznie gorzej we wszystkich pozostałych przypadkach. Po trzecie, ze względu na brak możliwości zastosowania rejestracji filmowej, należy wykorzystywać omawianą metodę jedynie tam, gdzie nie jest wymagana duża częstotliwość obrazowania.

Warto zwrócić również uwagę na potrzebę tworzenia i rozwijania oprogramowania pomiarowo-wyrównawczego, dedykowanego do opracowań z użyciem zobrazowań sekwencyjnych, ponieważ zastosowanie standardowych pakietów fotogrametrycznego nie pozwala na pełne wykorzystanie ich potencjału pomiarowego, jak również na rozwiązanie wielu charakterystycznych dla nich problemów.

LITERATURA

Eos Systems Inc., 2011. *PhotoModeler Help File*.

Kraus, K., Harley, I., Kyle, S., 2007. *Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans*, 2nd ed. Gruyter, Walter de GmbH, Berlin.

Markowski, T., 2012. "Badanie parametrów ruchu obiektów na podstawie obrazów sekwencyjnych". *Praca magisterska*. Politechnika Warszawska, Wydział Geodezji i Kartografii, Zakład Fotogrametrii, Teledetekcji i Systemów Informacji Przestrzennej.

Popowski, S., Dąbrowski, W., 2007. "Pomiar parametrów ruchu na obiektach mobilnych". *Prace Instytutu Elektrotechniki* Vol.232, pp. 113-123.

Weng, J., Huang, T.S., Ahuja, N., 1993. *Motion and structure from image sequences*, Springer-Verlag, Berlin.

APPLICATION OF THE PHOTOMODELER SOFTWARE AND MATLAB ENVIRONMENT FOR ANALYSIS OF OBJECTS MOVEMENT PARAMETERS BASED ON IMAGE SEQUENCES

KEY WORDS: close range photogrammetry, image sequences, analysis of objects movement parameters, PhotoModeler, Matlab, digital video camera, non-metric camera

Summary

Analysis of objects movement parameters is the area of interest of scientists representing many disciplines. Technological progress provides improvement of research methods. One of them is photogrammetry, and more specifically, close-range image sequences processing. Much research on different approaches to this issue are conducted all over the world.

Proposed solution is to carry out photogrammetric measurements using one of the standard programs for close-range objects 3D modeling – PhotoModeler software and their mathematical processing using popular computing environment – Matlab software. Application of existing software's functionality, in many cases seems to be less costly than development and then implementation of specialized measuring and computing applications, dedicated to analysis of movement parameters.

Considered solution is based primarily on the appropriate transformations of the frame of reference with respect to which the movement takes place. Automatic coded targets measurements and bundle adjustment, carried out using PhotoModeler software, were used in the research. In order to calculate objects movements parameters, there were further repeated isometric coordinates transformations, numerical differentiation in method of difference quotient and orientation by iterative tabulation with intervals narrowing additionally applied by building own Matlab environment functions. A number of experiments were performed using registration in the form of

films from JVC GZ-HD5 digital video camera and films and series of photographs from Nikon D5000 digital photographic camera. Accomplished experiments covered different objects of movement parameters analysis and also distinct movement types. There were also three different versions of established frame of reference - movement of the camera in relation to surroundings, movement of the object in relation to the camera and movement of the object in relation to surrounding.

Carried out research revealed that there is a very large variation of the computed objects movement parameters accuracies. As the main sources of errors there can be distinguished some problems with identification and measurements of targets, errors in interior and exterior orientations and also the lowering of speed and acceleration accuracies by low time data accuracies. Therefore, positive and negative aspects of applying the discussed method, as well as its limitations and suggestions for possible ways of implementation have been noticed.

Dane autora:

mgr inż. Tomasz Markowski
e-mail: tomasz.markowski@poczta.onet.pl
telefon: 693121892