

ROZWIĄZANIA ANALITYCZNE ZWIĄZANE Z OBSŁUGĄ PROCESU ORIENTACJI ZDJĘĆ ORAZ WYKONYWANIEM OPRACOWAŃ WEKTOROWYCH W PROGRAMIE BUNDLAB

ANALYTICAL APPROACHES TO IMAGE ORIENTATION AND STEREO DIGITIZATION APPLIED IN THE BUNDLAB SOFTWARE

Jakub Kolecki

AGH w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska
Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska

SŁOWA KLUCZOWE: orientacja wzajemna, orientacja bezwzględna, algorytm Horna, RANSAC, stereodigitalizacja

STRESZCZENIE: Program Bundlab powstał jako narzędzie głównie dla celów dydaktycznych i badawczych. Niniejszy artykuł stanowi niejako raport opisujący aktualny stan rozwoju tej autorskiej aplikacji, ze szczególnym uwypukleniem stosowanych rozwiązań analitycznych. W pierwszej kolejności przedstawiono ogólną charakterystykę programu, szybko przechodząc do opisu procedury orientacji zdjęć, rozpoczynającej się orientacją wzajemną. Zastosowane tu rozwiązanie bazuje na równaniach komplanarności parametryzowanych macierzą fundamentalną z odpowiednimi warunkami. Problem przekształcany jest do postaci umożliwiającej znalezienie rozwiązania metodami geometrii algebraicznej. W dalszej kolejności realizowane jest rozwiązanie oparte o kryterium najmniejszej sumy kwadratów odchyłek. Łączenie zorientowanych modeli w blok jak również procedurę orientacji bezwzględnej oparto o metodę Horna. W dalszej części przedstawiono narzędzia służące tworzeniu opracowań wektorowych koncentrując się na rozwiązaniach usprawniających pracę operatora i podnoszących dokładność produktu. W ramach artykułu przedstawiono także elementy pochodzące z wykonanych w programie prac. Podano też możliwe dalsze ścieżki rozwoju programu.

1. KRÓTKA CHARAKTERYSTYKA PROGRAMU

Wczesne prace nad programem Bundlab miały miejsce w roku 2010. Realizowane były one w związku z badaniami prowadzonymi w ramach pracy doktorskiej autora (Kolecki, 2013). Obecnie program posiada funkcjonalność wystarczającą do realizacji prostych opracowań fotogrametrycznych – można go określić mianem prostej stacji fotogrametrycznej. Bundlab umożliwia pracę na dowolnej liczbie zdjęć w typowych formatach graficznych takich jak TIFF, JPEG, BMP, PNG. Niestety bieżące czytanie zdjęć z pliku nie jest jeszcze obsługiwane. Wyświetlane zdjęcia wczytywane są w całości do pamięci co stanowi duże ograniczenie dla pracy z obrazami z wielkoformatowych kamer

fotogrametrycznych. Praca na zdjęciach wykonanych lustrzankami przebiega płynnie. Program umożliwia wyświetlanie do 4 zdjęć jednocześnie w maksymalnie dwóch oknach z dwoma widokami. Obserwacja stereoskopowa możliwa jest dzięki zastosowaniu stereoskopu zwierciadlanego lub okularów anaglifowych. Obserwacja przez okulary pasywne lub aktywne nie jest jeszcze możliwa. Możliwy jest pomiar punktów wiążących lub zaimportowanych fotopunktów. Program pozwala na import i eksport elementów orientacji zewnętrznej stosując różne rodzaje parametryzacji obrotu. Możliwy jest import i eksport współrzędnych obrazowych punktów. Program obsługuje model dystorsji Browna (1971). Można również skorzystać z programu Quadro, służącego do usuwania dystorsji ze zdjęć (www: Quadro). Bundlab posiada moduł do orientacji zdjęć pozwalający na przeprowadzanie orientacji wzajemnej, tworzenia bloku oraz orientacji bezwzględnej. Jak dotąd nie zaimplementowano wyrównania sieci zdjęć metodą wiązki – jest ono prototypowane w języku MATLAB. Drugim ważnym modułem jest moduł do wektoryzacji, pozwalający na tworzenie rysunków wektorowych i ich eksport do formatu DXF. Funkcjonalność oraz podłoże analityczne dwóch wyżej wspomnianych modułów zostanie omówione w dalszej części pracy.

2. ORIENTACJA ZDJĘĆ

2.1. Orientacja wzajemna

Wyznaczenie elementów orientacji wzajemnej bazuje w fotogrametrii tradycyjnej na założeniu, że zdjęcia tworzą stereogram prawie normalny. Stosowne rozwiązania można odnaleźć w literaturze przedmiotowej (Kraus, 1993). Metoda wykorzystana w programie Bundlab odchodzi od tego założenia. Zaimplementowany algorytm przebiega dwuetapowo. W pierwszym etapie odnajdywana jest macierz fundamentalna pary zdjęć. Wystarczająca jest tutaj znajomość współrzędnych obrazowych minimum 5 punktów homologicznych, dla których uzyskujemy pięć równań opisujących warunek linii epipolarnej (Kraus, 2007; Hartley *et al.*, 2003):

$$x^T E x = 0 \quad (1)$$

gdzie E to macierz fundamentalna a x to pionowy wektor współrzędnych w układzie współrzędnych związanym ze zdjęciem. Ponieważ macierz E jest niepełnego rzędu można zapisać, że:

$$|E| = 0 \quad (2)$$

Dla skalibrowanej kamery zachodzi także warunek równości dwóch niezerowych wartości własnych macierzy E , który można zapisać jako (Philip, 1996):

$$2EE^T E - tr(EE^T)E = 0 \quad (3)$$

W celu wyznaczenia macierzy E wykorzystano algorytm opracowany przez Stewéniusa, Engelsa i Nistéra (Stewénius, 2006). Stewénius proponuje przekształcenie problemu wyrażonego równaniami (1) ÷ (3) do postaci układu 10 równań trzeciego stopnia

z trzema niewiadomymi i rozwiązaniu go z wykorzystaniem bazy Gröbnera. Istnieć może do 10 rozwiązań macierzy E , ale istotne są jedynie te rzeczywiste.

Każda z rzeczywistych macierzy E jest następnie dekomponowana na wektor bazy i macierz obrotu zdjęcia prawego w przestrzennym układzie zdjęcia lewego. Na tym etapie można uzyskać 4 rozwiązania, ale tylko jedno reprezentuje sytuację, w której dla obu zdjęć promień przechodzi kolejno przez: środek rzutu, punkt na zdjęciu, punkt na modelu. Dekompozycja macierzy E kończy zasadniczy etap orientacji wzajemnej.

Opisana metoda ma zamkniętą, nieiteracyjną formułę, pozwala na obliczenie elementów orientacji wzajemnej w pełnej przestrzeni parametrów, bez konieczności uprzedniego znajdowania przybliżeń, korzystając z minimalnego zbioru 5 punktów. Pozwala to na ujęcie obliczeń w procedurę RANSAC (Fischler i Bolles, 1981), celem detekcji ewentualnych błędów grubych (ang. *outliers*) i znalezienia optymalnej pięciopunktowej próbki. Ewaluacja każdej z wylosowanych próbek opiera się na kontroli przecięcia promieni jednoimiennych. Realizowane jest tu klasyczne, fotogrametryczne wcięcie w przód a wyznaczony punkt rzutowany jest na zdjęcie celem obliczenia odchyłek wyrażonych w pikselach. Za błędy grube uważane są też wszystkie obserwacje reprezentujące punkty leżące z tyłu kamery, a więc punkty o ujemnej wartości współrzędnej Z w układzie modelu. Wygrywa próbka z najmniejszą liczbą błędów grubych i najlepszą zgodnością pozostałych promieni. Użytkownik sam ustala liczbę losowań oraz próg odrzucenia. Procedura RANSAC pozwala na wypracowanie rozwiązania bliskiego optymalnemu w warunkach dużej (np. ponad tysiąc) liczby punktów z dużym udziałem błędów (np. około 50%). Tego typu zbiory danych mogą być wynikiem pomiaru automatycznego wykorzystującego algorytmy detekcji punktów charakterystycznych oraz ich dopasowania w oparciu o deskryptory. Przykład działania zaimplementowanego w Bundlabie algorytmu przedstawiono na rysunku 1. Punkty zostały pomierzone automatycznie za pomocą prototypowych narzędzi (Kolecki, 2015), nieimplementowanych jeszcze w Bundlabie.



Rys. 1. Efekt działania algorytmu RANSAC. Odcinki łączą położenie punktu wiążącego na zamieszczonym oraz na kolejnym zdjęciu. Po lewej: efekt pomiaru automatycznego, po prawej: sytuacja po orientacji wzajemnej (Kolecki, 2015).

Znając optymalną próbkę oraz powiązane z nią elementy orientacji wzajemnej można przejść do drugiego, nieobligatoryjnego etapu orientacji, jakim jest wyrównanie z kryterium najmniejszej sumy kwadratów poprawek uwzględniające wszystkie nieodrzucone

na pierwszym etapie punkty. Wykorzystano model funkcjonalny bazujący na klasycznych równaniach kolinearności, zastępując jednak kąty Eulera parametryzacją poprzez kwaternion, co pozwala na uniknięcie konfiguracji krytycznych lub niekorzystnego uwarunkowania układu równań.

Efektom orientacji wzajemnej, niezależnie od tego czy zakończono ją na pierwszym czy na drugim etapie jest model – para zdjęć o znanych elementach orientacji wzajemnej wraz ze zbiorem punktów wiążących o znanych współrzędnych x, y, z wyrażonych w przestrzennym układzie tłowym zdjęcia lewego, czyli w układzie modelu.

2.1. Budowa bloku

Budowa bloku polega na odnalezieniu dla każdego z modeli parametrów transformacji do wspólnego układu współrzędnych zwanego układem bloku. Zaimplementowane rozwiązanie zakłada, że układ ten jest tożsamy z układem wybranego przez użytkownika modelu. Obliczenie parametrów transformacji odbywa się w oparciu o punkty dostosowania. Są nimi wspólne punkty wiążące oraz wspólne środki rzutu (dwa sąsiednie modele współdzielą jedno zdjęcie). Rozwiązanie spotykane w Bundlabie ma charakter sekwencyjny. Użytkownik wskazuje model początkowy a następnie program szuka modelu o największej liczbie punktów wspólnych, przy czym przyjęto, że wspólny środek rzutu jest premiowany tysiąc razy bardziej niż wspólne punkty wiążące. Po dołączeniu znalezionego modelu poszukiwany jest kolejny model i blok rozrasta się do puki nie zostaną dołączone wszystkie modele bądź do czasu aż dołączenie kolejnego modelu nie będzie już możliwe ze względu na brak punktów dostosowania.

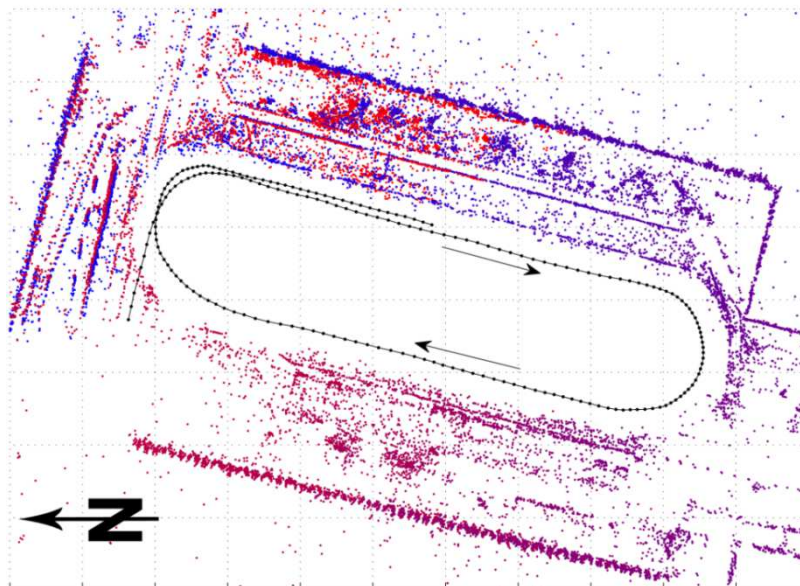
Zaimplementowane rozwiązanie oparto na zmodyfikowanym algorytmie Horna (Horn, 1987). Hornparametryzuje obrót poprzez kwaternion, uzyskując możliwość estymacji parametrów w pełnej ich przestrzeni. Wprowadzona do algorytmu modyfikacja wynika z założenia, że punkt dostosowania jakim jest wspólny środek rzutu powinien cechować się zerowymi odchyłkami położenia. Dlatego przyjmuje się że translacja układu dodawanego modelu do układu bloku jest znana a estymować należy jedynie kwaternion i skalę. Algorytm Horna nie ma charakteru iteracyjnego i nie wymaga znajomości przybliżeń parametrów. Został więc wpisany w procedurę RANSAC. Użytkownik sam ustala wartość progu odrzucenia oraz liczbę próbek. Zastosowanie procedury RANSAC pozwala automatycznie usuwać błędy grube co jest przydatne gdyż nie wszystkie błędnie pomierzone punkty wiążące są wykrywane na etapie orientacji wzajemnej ponieważ mogą leżeć na odpowiadających sobie liniach epipolarnych i generować dobre przecięcie promieni jednoimiennych. Procedura RANSAC jest opcjonalna. W przypadku jej zastosowania algorytm testuje próbki 4-punktowe a po znalezieniu najlepszej i odrzuceniu błędów grubych przeprowadzane jest obliczenie wykorzystujące wszystkie nieodrzucone punkty. Algorytm Horna posiada tę zaletę, że zachowuje kryterium najmniejszej sumy kwadratów, dlatego nie jest konieczne realizowanie jakichkolwiek dalszych obliczeń. Wynikiem tego etapu orientacji jest blok rozumiany jako zestaw elementów orientacji zewnętrznej zdjęć i współrzędnych punktów wiążących wyrażonych wewspólnym układzie współrzędnych.

2.2. Orientacja bezwzględna

Przedmiotem orientacji bezwzględnej może być blok lub model. W obu przypadkach Bundlab wykorzystuje algorytm Horna. Punktami dostosowania są fotopunkty. Użytkownik może wykorzystać procedurę RANSAC oraz zdefiniować jej parametry. Metoda Horna pozwala też na określenie, który ze zbiorów współrzędnych – współrzędne terenowe czy współrzędne w układzie modelu mają być traktowane jako referencyjne. Jeżeli wybór użytkownika padnie na współrzędne punktów w układzie modelu program dokona wyznaczenia parametrów transformacji układu terenowego do układu modelu a następnie wyliczy transformację odwrotną. Takie postępowanie jest jednak rzadko spotykane w praktyce.

Po przeprowadzeniu orientacji bezwzględnej użytkownik dysponuje zorientowanym modelem bądź też, jeżeli orientacji podlegał blok, posiada (przybliżone) elementy orientacji zewnętrznej wszystkich zdjęć bloku. Następnym krokiem może być eksport elementów orientacji zewnętrznej i pomiarów na zdjęciach w celu przeprowadzenia wyrównania sieci zdjęć metodą wiązki w zewnętrznym module w środowisku MATLAB.

Rysunek 2 przedstawia efekt orientacji sekwencji zdjęć pozyskanych z platformy montowanej na rowerze (Kolecki, 1015). Przejazd zrealizowano na terenie kampusu AGH. Orientację zdjęć odtworzono budując modele, łącząc je ze sobą a następnie obliczając orientację bezwzględną. Przy okazji uzyskano rzadką chmurę punktów. Wszystkie prace poza automatycznym pomiarem punktów zrealizowane zostały w programie Bundlab.



Rys. 2. Rzadka chmura punktów (punkty wiążące) oraz trajektoria ruchu uzyskane w programie Bundlab. Strzałkami oznaczono kierunek ruchu. Czarne kropki na linii trajektorii reprezentują środki rzutu. Siatka: 10 m (Kolecki, 2015)

3. STERIODIGITALIZACJA

Bundlab zapewnia podstawową funkcjonalność w zakresie tworzenia opracowań wektorowych obiektów. Samo rysowanie realizowane jest w sposób bardzo intuicyjny – obsługa za pomocą podstawowych klawiszy myszki. Rysunek można dzielić na warstwy, wygaszać lub wyświetlać poszczególne z nich, dowiązywać się do już narysowanych linii. Model stereoskopowy może być obserwowany poprzez tradycyjny stereoskop zwierciadlany bądź też przez okulary anaglifowe. Nie zaimplementowano jeszcze opcji obserwacji poprzez okulary aktywne lub ze zmienną polaryzacją. Obserwacja modelu w trybie anaglifowym wiąże się oczywiście z zafałszowaniem kolorystyki zdjęć oraz rysowanych linii, jednak użycie wysokiej jakości okularów i skalibrowanego kolorystycznie monitora pozwala, w zależności od preferencji użytkownika, na uzyskanie akceptowalnego komfortu pracy. Dla poprawy komfortu obserwacji stereoskopowej możliwe jest wygenerowanie obrazów epipolarnych. Okno służące obserwacji stereoskopowej modelu przedstawiono na rysunku 3.



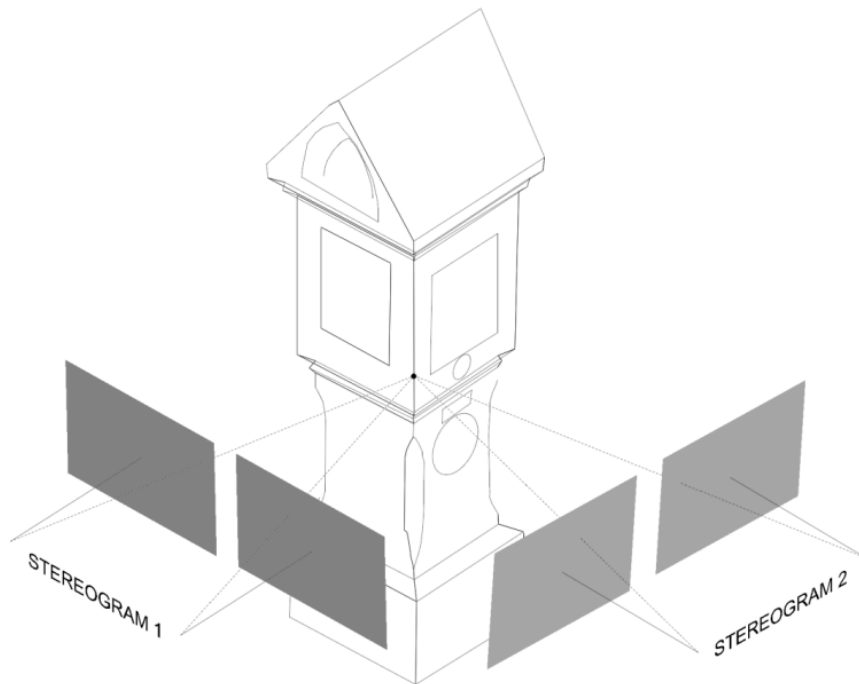
Rys. 3. Okno programu służące wyświetlaniu zdjęć. Tworzenie dokumentacji wektorowej dla zabytkowej lokomotywy.

Sterowanie położeniem znacznika pomiarowego odbywać się może w układzie wybranego modelu, w układzie terenowym, lub w układzie zdefiniowanym przez użytkownika (tzw. *ACS* – ang. *AuxiliaryCoordinate System*). Układ modelu jest tożsamy z przestrzennym układem tłowym lewego zdjęcia modelu. Program przechwytyje zdarzenie (ang. *event*) w postaci ruchu myszą lub ruchu scrolla i wyznacza odpowiednie przyrosty do współrzędnych X , Y , Zdefiniujących aktualne położenie przestrzennego znacznika pomiarowego. Następnie obliczane są nowe współrzędne x i y znacznika w układach obu obrazów modelu. Znacznik nie jest jednak rysowany w nowym miejscu – znajduje się on zawsze na środku widoku. Zamiast tego obrazy tworzące model przesuwane są w takie położenie aby znacznik znalazł się nad odpowiednim punktem – przyjął odpowiednią współrzędną obrazową. Rozwiązanie takie, występujące także w innym oprogramowaniu

(Dephos, Socet Set), uwalnia użytkownika od konieczności ciągłego centrowania widoku (jak np. w VSD).

Użytkownik może w dowolny sposób i niezależnie dla każdej ze współrzędnych, sterować szybkością ruchu znacznika. Istnieje też możliwość szybkiej zmiany współrzędnej Z poprzez ruch scroll'em z jednoczesnym wciśnięciem klawisza ALT. Daje to efekt pięciokrotnie szybszej zmiany położenia znacznika, co może być pomocne podczas opracowywania obiektów o większej głębi.

Definiowanie pomocniczego układu współrzędnych realizowane jest przez pomiar na modelu trzech punktów definiujących początek układu, płaszczyznę xy oraz zwrot osi z . Zaimplementowano także rozszerzenie tej metody polegające na pomiarze przez użytkownika dowolnej liczby punktów celem interpolacji płaszczyzny xy . Interpolacja płaszczyzny realizowana jest z wykorzystaniem rozkładu macierzy układu równań normalnych na składowe osobliwe (Inkilä, 2005). Użytkownik ma dostęp do długości wektorów punkt - wpasowana płaszczyzna a więc może ocenić dokładność rozwiązania. Definiowanie pomocniczego układu współrzędnych jest przydatne np. podczas tworzenia opracowań wektorowych fasad budynków. Wykorzystanie lustrzanek cyfrowych nie daje możliwości wykonania stereogramu z osiami kamer prostopadłymi do fasady. Czyni to proces wektoryzacji bardziej kłopotliwym – obserwator musi często regulować głębokość znacznika pomiarowego, co także może być źródłem pomyłek. Przyjęcie ACS rozwiązuje ten problem.



Rys. 4. Idea pomiaru autogrammetrycznego na dwóch stereogramach równocześnie

Kolejnym rozwiązaniem wspomagającym tworzenie dokumentacji wektorowej jest możliwość równoczesnej pracy w trybie autogrametrycznym na dwóch modelach. Okna można wyświetlić na jednym monitorze – jedno pod drugim. Praca na dwóch monitorach wymaga korzystania z okularów anaglifowych. Praca w trybie podwójnej obserwacji stereoskopowej pozwala na lepszą interpretację szczegółów obiektu. Reguła wiążąca błąd składowej głębokościowej ze stosunkiem bazowym dla takiego pomiaru przestaje mieć znaczenie. Ideę pomiaru w trybie podwójnej obserwacji stereoskopowej przedstawia rysunek 4.

4. PODSUMOWANIE I KIERUNKI PRZYSZŁYCH PRAC

Program Bundlab posiada elementarną funkcjonalność dla potrzeb tworzenia prostych, fotogrametrycznych opracowań wektorowych. Możliwa jest pełna orientacja stereogramu zdjęć cyfrowych, stereodigitalizacja w trybie autogrametrycznym, import i eksport podstawowych danych. Opracowane algorytmy orientacji wzajemnej i tworzenia bloku zdjęć cechuje:

- ukierunkowanie na zamkniętą formułę rozwiązania – odejście od rozwiązań iteracyjnych,
- zachowanie kryterium najmniejszej sumy kwadratów,
- możliwość estymacji parametrów przy minimalnej z matematycznego punktu widzenia liczbie obserwacji,
- możliwość estymacji parametrów w pełnej ich przestrzeni – brak konfiguracji krytycznych,
- brak konieczności podawania przybliżeń parametrów oraz uwzględniania jakichkolwiek założeń dotyczących geometrii zobrażeń, poza jednym: zdjęcia muszą być pozyskane skalibrowaną kamerą,
- możliwość obsługi dużej liczby obserwacji, charakterystycznej dla pomiarów automatycznych,
- odporność na błędy grube, nawet jeżeli stanowią one znaczny (ponad 50%) udział w ogólnej liczbie obserwacji – cecha charakterystyczna pomiarów automatycznych,
- możliwość przeprowadzenia oceny dokładności.

Ogólnie można stwierdzić, że w Bundlabie zaimplementowano „analitikę przygotowaną pod automatyzację”.

Najbliższe kierunki rozwoju oprogramowania będą dotyczyły:

- obsługi bieżącego czytania zdjęć z plików TIFF (w realizacji) – wymóg dla potrzeb obsługi zobrażeń z kamer wielkoformatowych,
- implementacji algorytmów gęstego *matchingu* (w przygotowaniu),
- obsługi obserwacji stereoskopowej przez okulary aktywne lub pasywne.

Praca została wykonana w ramach projektu o numerze: 15.11.150.323/15

LITERATURA

- Brown D. C., 1971. Close-Range Camera Calibration. *Photogrammetric Engineering*, 37(8), s. 855-866.
- Fischler M. A., Bolles R. C., 1981. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with application to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6), s. 381-395.
- Hartley R., Zisserman A., 2003. *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press.
- Horn B. K. P., 1987. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions, *JOSA A*, 4.4, s. 629-642.
- Inkilä K., 2005. Homogenous Least Squares Problem. *The Photogrammetric Journal of Finland*, 19(2), s. 34-42.
- Kolecki J., 2013. *Wyznaczenie elementów orientacji zewnętrznej zdjęć naziemnych z wykorzystaniem obserwacji fotogrametrycznych i inercyjnych oraz satelitarnego systemu pozycjonowania*, Wydawnictwa AGH, wydanie elektroniczne – płyta CD.
- Kolecki J., 2015. Towards the automatic motion recovery using single-view image sequences acquired from bike, FedCSIS 2015, Łódź.
- Kraus K., 1993. *Photogrammetry. Vol. 1, Fundamentals and Standard Processes*, Ferd. DuemmlersVerlag, Bonn.
- Kraus K., 2007. *Photogrammetry – Geometry from Images and Laser Scans*, Walter de Gruyter, Berlin.
- Philip J., 1996. A Non-Iterative Algorithm for Determining all Essential Matrices Corresponding to Five Point Pairs. *Photogrammetric Record*, 15(88), s. 589-599.
- Quadro. 2015: <http://home.agh.edu.pl/~kolecki/programy.htm>
- Stewénius H., Engels C., Nister D., 2006. Recent developments on direct relative orientation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60, s. 284-294.

ANALYTICAL APPROACHES TO IMAGE ORIENTATION AND STEREO DIGITIZATION APPLIED IN THE BUDNLAB SOFTWARE

KEY WORDS: relative orientation, absolute orientation, Horn algorithm, RANSAC, stereodigitization

Summary

The Bundlab software has been developed mainly for academic and research application. This work can be treated as a kind of a report describing the current state of the development of this computer program, focusing especially on the analytical solutions. Firstly, the overall characteristics of the software are provided. Then the description of the image orientation procedure starting from the relative orientation is addressed. The applied solution is based on the coplanarity equation parametrized with the essential matrix. The problem is reformulated in order to solve it using methods of algebraic geometry. The solution is followed by the optimization involving the least square criterion. The formation of the image block from the oriented models as well as the absolute orientation procedure were implemented using the Horn approach as a base algorithm. The second part of the paper is devoted to the tools and methods applied in the stereo digitization module. The solutions that support the user and improve the accuracy are given. Within the paper a few exemplary applications and products are mentioned. The work finishes with the concepts of development and improvements of existing functions.

Dane autorów:

Dr inż. Jakub Kolecki
e-mail:kolecki@agh.edu.pl
telefon: 12 617 3826

Przesłano 12.10.2015
Zaakceptowano 15.12.2015