

**METODA OPRACOWYWANIA ULTRAWYSOKOROZDZIELCZYCH
ORTOFOTOPLANÓW ZABYTKOWYCH POLICHROMII
Z WYKORZYSTANIEM ZDJĘĆ O RÓŻNEJ ROZDZIELCZOŚCI**

**METHOD OF MAKING ULTRA-HIGH RESOLUTION
ORTHOPHOTOPLANS OF HISTORIC FRESCOES USING VARIOUS
RESOLUTION IMAGES**

Adam Boroń, Elżbieta Pastucha

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

SŁOWA KLUCZOWE: inwentaryzacja fotogrametryczna, malowidła ściennie, ortofotoplan cyfrowy, aerotriangulacja, odległości obrazowe, rozdzielczość obrazów cyfrowych

STRESZCZENIE: W artykule zaprezentowano metodę fotogrametrycznej inwentaryzacji malowideł ściennych z wykorzystaniem linii technologicznej tworzenia ortofotomap w fotogrametrycznej stacji cyfrowej SocetSet. Zaadoptowana dla potrzeb inwentaryzacji malowideł ściennych metoda dopuszcza zmienność elementów orientacji wewnętrznej zdjęć oraz ogranicza prace terenowe poprzez zmniejszenie ilości zdjęć pomiarowych i punktów osnowy fotogrametrycznej. Opisana w artykule metoda zweryfikowana została przy inwentaryzacji malowideł gotyckich zza stali w prezbiterium katedry w Sandomierzu. Fotogrametryczna rejestracja ściany z malowidłami wykonana została w dwóch etapach. W pierwszym wykonano rejestrację dwuobrazową całej ściany z niską rozdzielczością (ok. 1mm) oraz pomierzono minimalną ilość fotopunktów. W drugim etapie, metodą jednoobrazową, wykonano zostały fotogramy pomiarowe malowidła z rozdzielczością docelową ok. 0.25 mm. Zdjęcia z metody dwuobrazowej posłużyły do zagęszczenia osnowy fotogrametrycznej (aerotriangulacja) oraz pozyskania Numerycznego Modelu Powierzchni Ściany (NMPS). Natomiast zdjęcia jednoobrazowe, po analitycznym dołączeniu ich do bloku zdjęć niskorozdzielczych, posłużyły do wygenerowania wysokorozdzielczych ortofotoplanów polichromii. Uzyskane wyniki dowiodły, że przy mniejszym nakładzie prac terenowych i kameralnych w stosunku do postępowania standardowego można uzyskać nie gorsze rezultaty. Dlatego opisana metoda może być z powodzeniem stosowana do wysokorozdzielczej inwentaryzacji polichromii w innych obiektach zabytkowych.

1. WSTĘP

Ortofotografia, nowoczesna technologia fotogrametryczna, wykorzystywana jest głównie do tworzenia ortofotomap cyfrowych ze zdjęć lotniczych. W nowoczesnych fotogrametrycznych stacjach cyfrowych (FSC) wykonanie ortofotomap połączone jest w ciąg technologiczny z aerotriangulacją, pomiarem i obliczeniem Numerycznego Modelu Terenu, generowaniem ortobrazów oraz ich mozaikowaniem. Najczęściej

aerotriangulacja i pomiar do NMT wspomagane są automatycznym pomiarem zdjęć, co znacznie przyspiesza proces powstania ortofotomapy.

Metodyka fotogrametrycznej inwentaryzacji malowideł ściennych sięga po technologię ortofoto stosunkowo rzadko. Najczęściej, dla wykonania fotoplanów polichromii stosuje się prostsze metody bazujące na przekształceniach rzutowych (Boroń *et al.*, 2009 i 2010). Są one stosowane tam, gdzie malowidła występują na powierzchniach płaskich. Ponieważ powierzchnia pokryta malowidłem nigdy nie jest idealną płaszczyzną, dlatego w trakcie mozaikowania przetworzonych rzutowo fotogramów zdarzają się problemy z ich poprawnym (bez widocznych przesunięć) montażem. Błędy te są tym większe im większe są niepłaskości powierzchni ścian oraz mniejszy piksel obiektowy fotoplanu. W technologii cyfrowej, gdzie w komputerze istnieje możliwość oglądania fotoplanu w dowolnym powiększeniu, błędy łączenia obrazów, nawet rzędu pojedynczych pikseli, są wyraźnie zauważalne. Dlatego w przypadku gdy powierzchnia pokryta malowidłami nie jest wystarczająco płaska (np. nierówne tynki ścian gotyckich, malowidła na murach kamiennych, malowidła naskalne itp.) lub rozdzielczość fotoplanu ma być bardzo wysoka to jedyną metodą umożliwiającą wykonanie dokumentacji cyfrowej bez widocznych błędów łączenia zdjęć jest metoda „ortofoto”, wykorzystująca Numeryczny Model Powierzchni Ściany.

Dla dokumentacji malowideł ściennych nie spełniających kryteriów dokładnościowych metody przekształcenia rzutowego podjęto próbę opracowania metody wytwarzania ortofotoplanów malowideł bazującej na wykorzystaniu klasycznej linii technologicznej zaimplementowanej w FSC dla wykonywania ortofotomap ze zdjęć lotniczych.

Jednak w stosunku do metody klasycznej starano się ograniczyć ilość prac terenowych, poprzez zmniejszenie ilości zdjęć i gęstości osnowy fotogrametrycznej oraz dopuszczono zdjęcia o przybliżonych elementach orientacji wewnętrznej do generowania ortoobrazów. Założono, że oba przyjęte warunki, poprawiające z jednej strony ekonomikę pomiaru i opracowania, a z drugiej jakość obrazu nie wpłyną negatywnie na parametry wynikowej ortofotomapy.

2. ZAŁOŻENIA METODY

Klasyczne ortofotomapy ze zdjęć lotniczych wykonuje się w FSC na podstawie bloku zdjęć szeregowych wykorzystywanych zarówno do zagęszczenia osnowy fotogrametrycznej i wyznaczenia elementów orientacji zewnętrznej zdjęć (aerotriangulacja), pomiaru i tworzenia NMT oraz generowania ortoobrazów. W naszym przypadku chcąc wykorzystać wprost tą technologię, należałoby wykonać bardzo dużą ilość quasi lotniczych zdjęć ściany z malowidłami oraz pomierzyć dość liczną grupę fotopunktów. Dla ograniczenia ilości fotopunktów i wykonanych zdjęć, a tym samym pracochłonności opracowania przyjęto, że fotogrametryczna rejestracja ściany z malowidłami wykonana zostanie w dwóch etapach. W pierwszym nastąpi rejestracja dwuobrazowa, (stereoskopowa) całej ściany z rozdzielczością mniejszą od docelowej oraz pomierzona zostanie minimalna ilość fotopunktów. Natomiast w drugim etapie, metodą jednoobrazową wykonane zostaną fotogramy pomiarowe malowidła z rozdzielczością

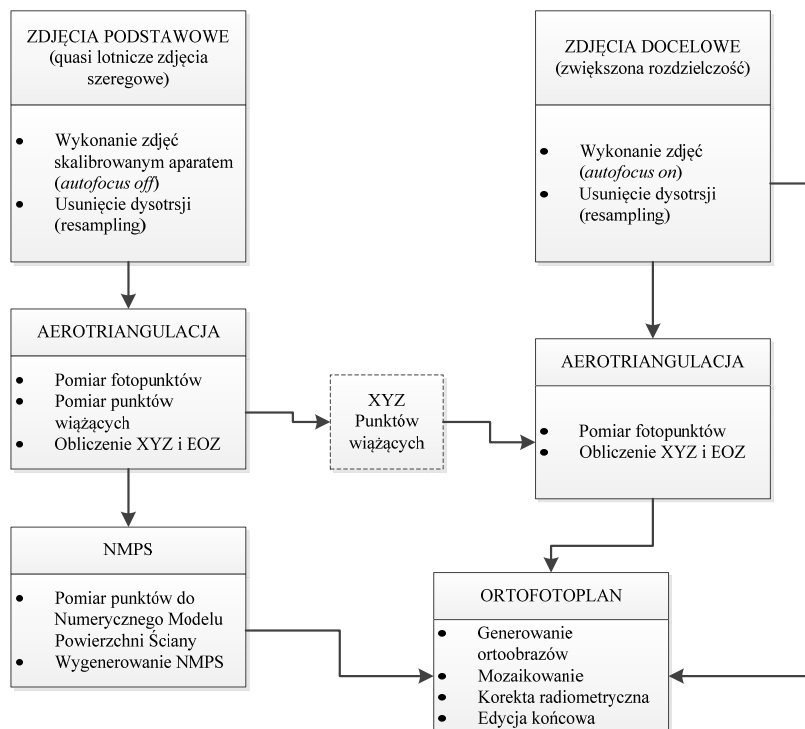
docelową. W ten sposób wyraźnie zmniejszy się ilość zdjęć pomiarowych i fotopunktów ograniczając w sposób zasadniczy ilość prac terenowych.

Przyjęte rozwiązanie powinno zapewnić wykonanie aerotriangulacji i NMPS ze zdjęć o niższej rozdzielczości, gwarantując wystarczającą dokładność geometryczną współrzędnym punktów wiążących i punktów tworzących NMPS. W dalszej kolejności włączenie do tego samego projektu zdjęć o podwyższonej rozdzielczości pozwoli na wyznaczenie ich elementów orientacji zewnętrznej, oraz wygenerowanie na ich podstawie ortoobrazów wynikowych z wykorzystaniem utworzonego wcześniej NMPS. Należy zaznaczyć, że w tym procesie punkty wiążące, które uzyskały współrzędne w pierwszym wyrównaniu, wezmą udział jako fotopunkty, a zdjęcia docelowe zostaną wyłączone z ponownego wyrównania.

Zdjęcia o niższej rozdzielczości (zdjęcia podstawowe) powinny tworzyć blok złożony z szeregow zdjęć o założonym (najlepiej standardowym) pokryciu podłużnym i poprzecznym. Zdjęcia pojedyncze o podwyższonej rozdzielczości (zdjęcia docelowe) mogą co prawda być wykonane w dowolny sposób, niemniej jednak wykonanie ich jako zdjęcia szeregowe, o jednakowym pokryciu podłużnym i poprzecznym, jest najbardziej optymalną metodą zarejestrowania malowidła. Zarówno zdjęcia podstawowe jak i docelowe powinny posiadać wyznaczone elementy orientacji wewnętrznej. O ile kalibracja aparatu do wykonania zdjęć podstawowych i wykonywanie zdjęć z zablokowanym wysuwem obiektywu i wyłączonym trybem *autofocus* jest oczywista, o tyle wykonywanie w taki sam sposób zdjęć docelowych już budzi wątpliwości. O efekcie końcowym opracowania, czyli jakości ortofotoplanu decyduje przede wszystkim jakość zdjęć z których powstał. Blokowanie funkcji *autofocus* w aparacie powoduje, że musimy zdać się na głębię ostrości, która powinna zapewnić ostrość odwzorowania wszystkich szczegółów na zdjęciu. Nie zawsze jest to możliwe do uzyskania. Natomiast wykorzystując automatyczne ustawianie ostrości obiektywu na pewno uzyskamy optymalny pod względem ostrości obraz. Biorąc to pod uwagę podjęto próbę wykorzystania w proponowanej metodzie zdjęć docelowych o zmiennych (w niedużych granicach) elementach orientacji wewnętrznej. Przeprowadzona analiza wpływu zmienności stałej kamery na błędy ortoobrazu (Pastucha, 2012) potwierdziła, że postępowanie takie jest dopuszczalne. Jednak zdjęcia docelowe, opracowywane w FSC, powinny posiadać określone elementy orientacji wewnętrznej, dlatego znając średnią odległość przedmiotową wykonanych zdjęć należy, najlepiej po powrocie z pomiaru, wykonać kalibrację obiektywu dla tej odległości. Dla stałej rozdzielczości obrazów docelowych, przy zróżnicowanym dostępie do obiektu należy stosować obiektywy przeznaczone do różnych odległości fotografowania. Wykonanie kalibracji po wykonaniu zdjęć jest uzasadnione, ponieważ znamy wtedy średnie odległości fotografowania dla wszystkich stosowanych obiektywów. W przypadku zdjęć podstawowych wystarczy kalibracja wykonana przed pomiarem, ponieważ stała kamery nie zmienia się wraz ze zmianą odległości fotografowania.

Kalibracja obiektywu w aparacie dostarcza zarówno elementy orientacji wewnętrznej (c_k, x_0, y_0) jak i parametry dystorsji radialnej i tangencjalnej. Ze względu na występujące często różnice w modelach dystorsji implementowanych w FSC i programach do kalibracji aparatów cyfrowych, najkorzystniej jest przed opracowaniem zdjęć pozbawić je wpływu dystorsji poprzez resampling (*image calibration*). Dotyczy to zarówno zdjęć podstawowych jak i docelowych.

Schemat blokowy proponowanej metody pokazany jest na rysunku 1.

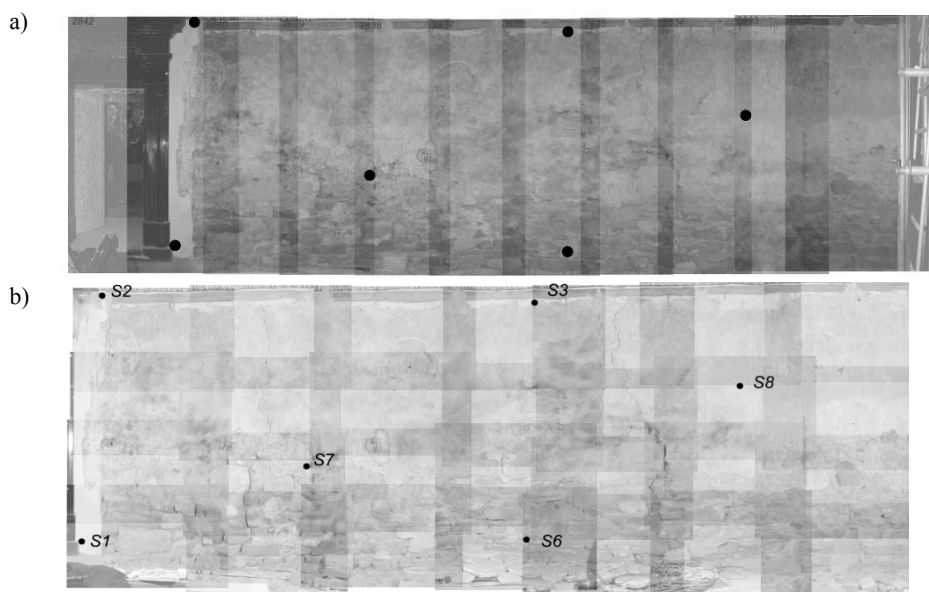


Rys. 1. Schemat blokowy metody wykonywania ortofotoplanów ze zdjęć o różnej rozdzielczości

3. PRAKTYCZNA WERYFIKACJA METODY

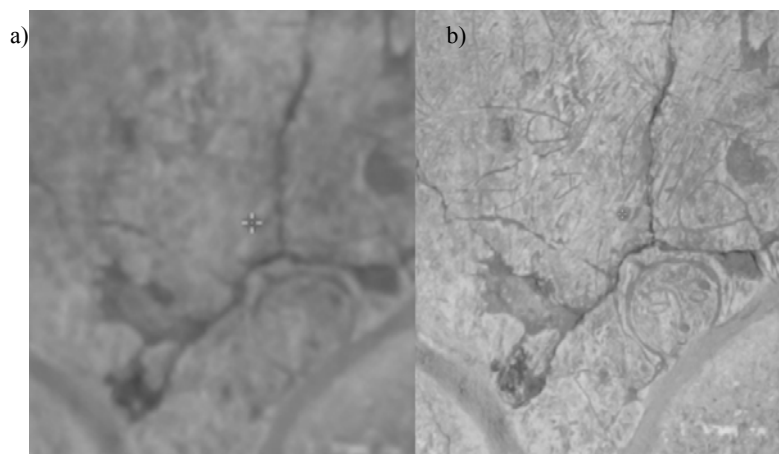
W ramach testowania proponowanej metody dokumentowania malowideł ściennych wykonano, zgodnie z jej założeniami, pomiar i opracowanie ortofotoplanu malowidła wczesno gotyckiego z prezbiterium katedry sandomierskiej. Odkryte, przy okazji konserwacji stali, malowidła posiadają bardzo dużą wartość zabytkową. Konieczność ponownego ich zasłonięcia, po wykonanej renowacji stali, stworzyła potrzebę wykonania inwentaryzacji zapewniającej możliwość bardzo wszechstronnego wykorzystania jej wyników, łącznie z odtworzeniem ściany z malowidłami w skali naturalnej (1:1). Mając na uwadze, że dokumentacja cyfrowa malowidła będzie wykorzystana do jego odtworzenia w skali naturalnej ustalono rozdzielczość zdjęć docelowych równą 0.25 mm zapewniającą rozdzielczość wydruków w skali naturalnej na poziomie 100 dpi.

Zdjęcia podstawowe zdecydowano rejestrować z rozdzielczością trzykrotnie mniejszą (1 piksel = 0.8 mm) i z pokryciem podłużnym ok. 55%. Tak przyjęta rozdzielczość umożliwiła rejestrację całego malowidła w jednym szeregu zdjęć.



Rys. 2. Fotoszkice. a – zdjęcia podstawowe, b- zdjęcia docelowe

Zminimalizowanie ilości zdjęć pomiarowych zrealizowano poprzez wykorzystanie pełnoformatowego aparatu Canon Mark II o dużej matrycy liczącej ok. 21 milionów pikseli. Ogółem dla jednej ściany wykonano jedenaście zdjęć podstawowych (rys. 2). Zdjęcia wykonano skalibrowanym aparatem obiektywem o ogniskowej 50 mm z wyłączoną funkcją *autofocus* i zablokowanym wysuwem obiektywu.



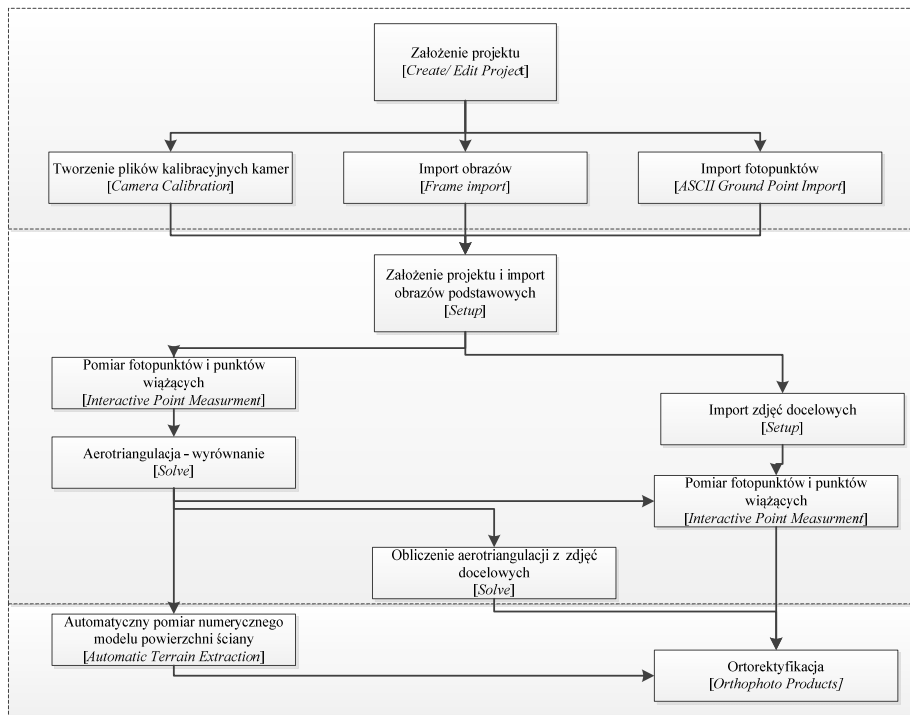
Rys. 3. Ten sam fragment obiektu (a- zdjęcie podstawowe, b- zdjęcie docelowe)

Zgodnie z wnioskami z analizy dokładności (Pastucha, 2012), im dłuższa ogniskowa obiektywu tym mniejszy wpływ niestałości odległości obrazowej na dokładność geometryczną ortobrazów. Dlatego dla wykonania zdjęć docelowych wykorzystano

obiektyw stałoogniskowy o ogniskowej 150 mm. Dla całego malowidła wykonano ogółem 28 zdjęć docelowych. Zdjęcia utworzyły 4 szeregi po osiem zdjęć w szeregu z pokryciem podłużnym i poprzecznym rzędu 10% (rys. 2). Wszystkie zdjęcia wykonano z wykorzystaniem funkcji *autofocus* oraz z podobnych do siebie odległości od ściany. Różnice wizualne w rozdzielczości zdjęć podstawowych i docelowych zobrazowane są na rysunku 3 ukazującym ten sam fragment malowidła.

Zdjęcia docelowe wykonywane były szczególnie starannie w aspekcie ich jakości. Niska wartość ISO (ISO = 100), skalibrowany z wykorzystaniem specjalnego wzorca balans bieli dla światła studyjnych lamp błyskowych, *autofocus*, *bracketing* naświetlenia oraz zapis obrazu w formacie RAW – to wszystko miało zapewnić jak najlepszą jakość zdjęć docelowych, a tym samym wynikowego ortofotoplanu.

Osnowa fotogrametryczna, sprowadzona do niezbędnego minimum, zawierała osiem fotopunktów sygnalizowanych. Współrzędne X,Y,Z wszystkich fotopunktów określone zostały metodą biegunową z jednego stanowiska z wykorzystaniem tachimetru elektronicznego z bezlustrowym pomiarem odległości. Szacowana dokładność określenia współrzędnych fotopunktów wynosiła $\pm 1\text{mm}$.



Rys. 4. Schemat blokowy metody wykonywania ortofotoplanów ze zdjęć o różnej rozdzielczości w Fotogrametrycznej Stacji Cyfrowej SocetSet

Wszystkie prace terenowe związane z wykonaniem zdjęć podstawowych i docelowych oraz zasygnalizowaniem i pomiarem osnowy fotogrametrycznej trwały niespełna dwie godziny, potwierdzając niską czasochłonność terenową opisywanej metody.

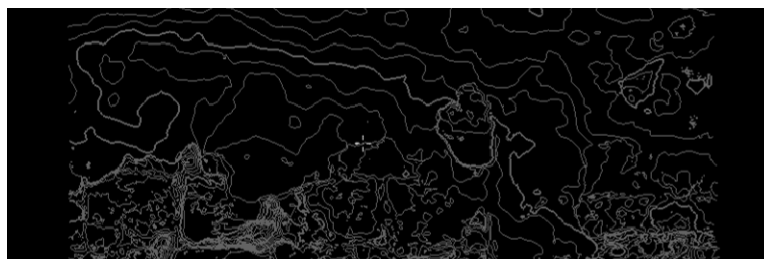
Wstępne opracowanie wyników pomiarów obejmowało:

- wybór zdjęć podstawowych i docelowych do opracowania wraz ze wstępną korektą radiometryczną (RAW) oraz zapis w formacie TIFF,
- resampling obrazów podstawowych w celu usunięcia wpływu dystorsji (*image calibration*),
- kalibracja aparatu z obiektywem do zdjęć docelowych,
- resampling obrazów docelowych dla usunięcia wpływu dystorsji (*image calibration*),
- obliczenie współrzędnych fotopunktów w układach lokalnych poszczególnych ścian z malowidłami.

Kalibracja aparatów oraz resampling obrazów źródłowych wykonywane były z wykorzystaniem pola testowego i programu PI-Calib firmy Topcon.

Zgodnie z przyjętymi założeniami opracowanie ortofotoplanu wynikowego zrealizowano z wykorzystaniem oprogramowania FSC SocetSet. Schemat blokowy etapów pracy pokazany jest na rysunku 4.

W pierwszym etapie wykonano aerotriangulację metodą niezależnych wiązek w oparciu o osiem fotopunktów i dwanaście zdjęć podstawowych. Dalej w oparciu o wyznaczone elementy orientacji zewnętrznej zdjęć podstawowych pomierzono automatycznie w siatce o oczku 5 mm punkty dla utworzenia Numerycznego Modelu Powierzchni Ściany. Fragment NMPS w rysunku warstwicowym pokazany jest na rysunku 5.

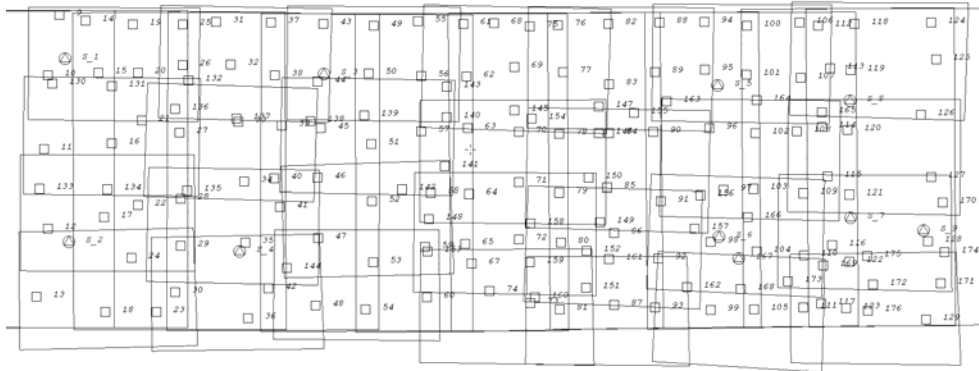


Rys. 5. Fragment Numerycznego Modelu Powierzchni Ściany
rysunek warstwicowy

Zmieniając status wszystkich punktów wiążących na punkty stałe, wykonano teraz ich pomiar na zdjęciach docelowych. Pozwoliło to obliczyć elementy orientacji zewnętrznej zdjęć wysokorozdzielczych. W drugim wyrównaniu nie wzięły udziału zdjęcia podstawowe. Szkic aerotriangulacji zawierający zakresy 40 zdjęć projektu wraz z punktami wiążącymi pokazany jest na rysunku 6.

Błąd wpasowania zdjęć docelowych w fotopunkty (punkty wiążące zdjęć podstawowych) wyniósł po X 0.204 mm, po Y 0.232 mm, i po Z 0.310 mm. Przeciętne odchylenie standardowe wyniosło odpowiednio 0.20 mm, 0.33 mm, 0.94 mm. Średni błąd

wpasowania wiązek w zdjęcia pomiarowe wyniósł ± 0.3 piksela. Biorąc pod uwagę uzyskane wartości błędów, aerotriangulację można uznać satysfakcjonującą.



Rys. 6. Szkic bloku aerotriangulacji ze zdjęciami podstawowymi i docelowymi (SocetSet)

Ostatnim etapem było wygenerowanie ortoobrazów z 28 zdjęć docelowych i zmozaikowanie wynikowego ortofotoplanu (rys. 7)



Rys. 7. Ortofotoplan wynikowy - zmontowany z 28 ortoobrazów

4. UWAGI KOŃCOWE

Zaproponowana metoda, wykorzystania obrazów o różnej rozdzielczości dla uzyskania wysokorozdzielczych ortofotoplanów małowidel ściennych, ograniczyła znacznie ilość prac terenowych nie powodując zmniejszenia dokładności wynikowego ortofotoplanu. Poprawne, quasi lotnicze wykonanie zdjęć pomiarowych i ich kalibracja umożliwiło wykorzystanie wszystkich modułów technologicznych FSC SocetSet: począwszy od aerotriangulacji po mozaikowanie ortoobrazów. Automatyczny pomiar punktów do NMPS wykonany został szybko i dokładnie, ponieważ z powodu dobrej jakości zdjęć podstawowych praktycznie nie zawierał błędnych pomiarów. Używanie funkcji *autofocus* zmieniającej odległość obrazową w zdjęciach docelowych, przy wykorzystaniu obiektywu długoogniskowego ($f=150$ mm) nie miało żadnego praktycznego

wpływu na błędy ortobrazów. Wspólne części sąsiednich ortobrazów praktycznie nie różniły się od siebie, nawet w miejscach gdzie występował mur o dużych deniwelacjach.

Uzyskane wyniki dowiodły, że przy mniejszym nakładzie prac terenowych i kameralnych w stosunku do postępowania standardowego można uzyskać nie gorsze rezultaty. Dlatego opisana metoda może być z powodzeniem stosowana do wysokorozdzielczej inwentaryzacji polichromii w innych obiektach zabytkowych.

5. LITERATURA

Boroń A., Borowiec M., Pirowski T., 2010. Fotoplan trudnodostępnych polichromii bizantyjskich w absydzie katedry w Sandomierzu. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji vol.21*.

Boroń A., Borowiec M., Wróbel A., 2009. Rozwój cyfrowej technologii inwentaryzacji obiektów zabytkowych na przykładzie doświadczeń zakładu Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej AGH. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji vol.19*.

Bujakiewicz A., Zawieska D., Arcisz M., 2008. Wykorzystanie różnoskalowych zdjęć do zasilania bazy Danych 3d obiektów architektonicznych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji vol.18*.

Pastucha E., 2012. Research on influence of approximated principal distance on accuracy of orthophotoplans out of historic polychrome (on flat and quasi-flat surface). *Geomatics w druku*.

Streilein André and van den Heuvel Frank A., 1999. Potential and limitation for the 3D documentation of cultural heritage from a single image. *CIPA International Symposium*.

Praca została wykonana w ramach projektu o numerze 11.11.150.949.

METHOD OF MAKING ULTRA-HIGH RESOLUTION ORTHOPHOTOPLANS OF HISTORIC FRESCOES USING VARIOUS RESOLUTION IMAGES

KEY WORDS: photogrammetric heritage documentation, frescoes, digital orthophotoplan, aerotriangulation, principal distance, digital images resolution

Summary

The paper presents a method for photogrammetric documentation of historic frescoes using workflow in photogrammetric station SocetSet designed for orthophoto production from aerial photographs. Adapted for the needs of frescoes documentation method allows variation of the internal orientation elements of images and minimizes field work by reducing the amount of test images and photogrammetric control points. Method described in the article has been tested in the documentation of Gothic frescoes behind the choir stalls in the Sandomierz cathedral. Photogrammetric registration of frescoes was made in two stages. In the first photographs were taken in the way to allow stereoscopic observations with low resolution (1 mm) and minimal amount of control points. In the second stage photographs were taken with the object resolution of approximately 0.25 mm with overlay about 10 %. Stereoscopic measurement (both manual and automatic) were conducted to increase amount of control points (aerotriangulation) and to obtain digital surface model. Whereas single, high resolution photographs were taken to create resultant orthophotoplans. The adoption of a

solution in which the orthophoto is generated from different pictures than those who underwent the aerotriangulation and were used to obtain digital surface model minimizes field work and reduces time-consuming computing. Collecting of stereoscopic images was conducted using quasi-aerial technique of taking series of photos with overlay around 55%. Calibrated SLR-camera Canon 5D - Mark II with 50 mm lens was used in the process. Control points were determined with an accuracy of ± 1 mm. High resolution photographs were taken with SLR-camera Canon 5D - Mark II with 150 mm lens. The pictures were taken using autofocus mode which provided highest possible sharpness. Conducted analysis of influence of variability of internal orientation elements on resultant orthophotoplans showed that in this conditions automatic focus shouldn't reduce orthophotoplans accuracy. Digital photogrammetric station SocetSet was used to perform aerotriangulation of basic images. Then automatic measurement was performed to create digital surface model. Afterwards, using resection exterior orientation elements of high resolution images were calculated. In the end orthoimages were created and put together into one resultant orthophotoplan. The results showed that with no loss to accuracy, field and desk work can be reduced. Therefore, the described method can be successfully applied to the high resolution documentation of frescoes in other historic buildings.

Dane autorów:

Adam Boroń
e-mail: aboron@agh.edu.pl
telefon/fax: 12 617 39 93

Elżbieta Pastucha
e-mail: epast@agh.edu.pl
telefon/fax: 12 617 39 93