

**FOTOGRAMETRYCZNA REKONSTRUKCJA MODELU
POSĄGU WIELKIEGO BUDDY NA PODSTAWIE ZDJĘĆ ARCHIWALNYCH**

**PHOTOGRAMMETRIC RECONSTRUCTION OF MODEL
OF THE GREAT BUDDHA STATUE BASED ON ARCHIVAL PHOTOS**

Dorota Zawieska¹, Tomasz Markowski²

¹ Zakład Fotogrametrii, Teledetekcji i SIP, Wydział Geodezji i Kartografii,
Politechnika Warszawska

² Wydział Geodezji i Kartografii PW, student studiów magisterskich specjalności FiT

SŁOWA KLUCZOWE: zdjęcia archiwalne, Posąg Wielkiego Buddy, rekonstrukcja modelu, rzeczywisty model przestrzenny

STRESZCZENIE: Pomnik Wielkiego Buddy z miejscowości Bamyan w Afganistanie został wybudowany między III, a VII w. n. e. Dzięki swym monumentalnym rozmiarom był dziełem unikatowym na skalę światową. Stanowił największy starożytny pomnik, przedstawiający stojącą postać Wielkiego Buddy, który w 2001 roku został doszczętnie zniszczony. W prezentowanym artykule, wykorzystano zdjęcia archiwalne posągu, które zostały wykonane kamerą stereometryczną, w czasie Studenckiej Wyprawy Azjatyckiej studentów Wydziału Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej w 1974 roku. Wykorzystując oprogramowanie PhotoModeler Pro 4.0. opracowano szkieletowy i rzeczywisty model przestrzenny posągu Wielkiego Buddy. Na podstawie przedstawionego opracowania dokonano weryfikacji wykorzystania oprogramowania dla postawionego celu oraz dokonano oceny posiadanych zdjęć archiwalnych. Oszacowane błędy wyznaczenia współrzędnych punktów modelu, wahają się od kilkunastu centymetrów do kilku metrów, w zależności od położenia punktu. Uzyskano wysoką wewnętrzną spójność pomiarów punktów homologicznych, która wyniosła średnio 0.07% dla poszczególnych elementów posągu. Uwzględniając rzeczywiste rozmiary Wielkiego Buddy, oraz fakt, że niewiele jest zachowanych zdjęć archiwalnych tego pomnika, stwierdzono, że opracowane dane można uznać za wystarczająco dokładne do odbudowy zniszczonego obiektu zabytkowego.

1. WPROWADZENIE

Fotogrametria bliskiego zasięgu jest doskonałym źródłem informacji dla celów dokumentacyjnych. Pozwala na uzyskanie danych geometrycznych, nawet wiele lat po wykonaniu zdjęć. Dzięki takiej dokumentacji możliwe jest odtworzenie kształtu i wymiarów obiektu, nawet, gdy ten w rzeczywistości już nie istnieje. Dane takie, umożliwiają z kolei jego fizyczną rekonstrukcję (Zawieska, 2008). Dokumentacja fotogrametryczna przedstawia przestrzenny stan obiektu oraz pozwala na wykonywanie pomiarów na utworzonym modelu. Wiele zabytków architektury, w tym rzeźb, a także obiektów archeologicznych zostało pomierzonych i udokumentowanych w oparciu o analogowe metryczne kamery pomiarowe (mono lub stereometryczne) oraz graficzne, bądź analityczne opracowania.

Dzisiaj, kompletne rekonstrukcje obiektów 3D są głównie wykonywane, poprzez zastosowanie fotogrametrii cyfrowej bliskiego zasięgu.

Dla wielu nowoczesnych systemów informacyjnych związanych z różnymi zastosowaniami niezbędne są rzeczywiste bądź wirtualne modele 3D określonych obiektów. Dzięki wykorzystaniu nowoczesnych urządzeń i technologii istnieje możliwość odtworzenia nieistniejących już zabytków na podstawie odpowiedniego opracowania zdjęć archiwalnych.

2. METODYKA KALIBRACJI SYSTEMU REJESTRACJI I MODELOWANIA

Znaczenie modelowania 3D zostało zdefiniowane o wiele wcześniej, niż metody fotogrametrii cyfrowej stały się popularne. Pierwszym etapem fotogrametrycznego modelowania obiektów jest odtworzenie kształtu wiązek promieni rzutujących i ich orientacji zewnętrznej względem obiektu. W przypadku wykonania kalibracji aparatu cyfrowego, na etapie poprzedzającym pomiar, dokładność rekonstrukcji wiązek promieni jest uzależniona od powtarzalności parametrów orientacji wewnętrznej aparatu i wpływu błędów systematycznych zdjęć, w trakcie ekspozycji. W przypadku zdjęć wykonanych z bliskich odległości, istotne jest posiadanie danych z kalibracji wykonanej dla takich zakresów odległości fotografowania, jakich używa się w trakcie pomiaru obiektu. Orientacja zewnętrzna zdjęć może być wykonana w dwojaki sposób: albo poprzez realizację niezależnego wcięcia wstecz dla każdego zdjęcia w oparciu o znane położenie wybranej grupy punktów osnowy w układzie współrzędnych obiektu i obrazu, albo poprzez jednoczesne rozwiązanie terratriangulacji dla całego bloku zdjęć. Wybór metody orientacji zewnętrznej zależy od liczby zdjęć wykonanych dla danego obiektu i determinuje wymaganą liczbę punktów osnowy polowej.

Właściwy proces modelowania rozpoczyna się od etapu tworzenia modelu szkieletowego – NFR (*Numeric Frame of Reference*) danego obiektu, w oparciu o wybrane punkty na poszczególnych strukturach jego konstrukcji, określone przez fotogrametryczne wcięcie w przód. Pomiar tych punktów na zdjęciach może być wykonywany w trybie mono lub stereoskopowym w zależności od możliwości fotogrametrycznego systemu cyfrowego oraz geometrii wykonanych zdjęć. Drugi etap modelowania polega na nałożeniu tekstur sztucznych lub naturalnych na wszystkie lub wybrane powierzchnie obiektu. W tym celu możliwe jest definiowanie koloru lub typu powierzchni, nałożenie tekstur, wzorów oraz rysunków pozyskiwanych z przetworzonych obrazów cyfrowych (Bujakiewicz *et al.*, 2004).

W prezentowanym eksperymencie do rekonstrukcji posągu Buddy wykorzystano program PhotoModeler. W pierwszym etapie został wykonany model szkieletowy NFR, a następnie rzeczywisty model przestrzenny – VRM (*Visually Realistic Model*) odtwarzanego posągu.

3. PODSTAWOWE INFORMACJE O OPRACOWYWANYM OBIEKCIE

Opracowywanym obiektem jest pomnik Wielkiego Buddy, który znajdował się w miejscowości Bamyan, na terytorium Afganistanu. Opierając się na analizie konstrukcji i stylistyki pomnika oraz przesłankach historycznych, różne źródła podają, iż został on wykonany między III a VII wiekiem naszej ery (Markowski, 2010). Tak duże rozbieżności

są spowodowane trudnościami w datowaniu, wynikającymi ze specyfiki buddyjskiej sztuki sakralnej. Przybliżony kształt posągu został wykuty w piaskowcu, natomiast detale wykonano z błota zmieszanego z posiekaną słomą. Pierwotnie był on pokryty stiukiem i bogato polichromowany. Twarz i dłonie zostały wykonane prawdopodobnie z drewna, ale podobnie jak polichromie, nie zachowały się do czasów, z których pochodzi posiadana dokumentacja. Pomnik ma charakter, określany jako styl Gandhary, którego rozpoznawalną cechą są znaczne wpływy kultury hellenistycznej. Jego wysokość to 53 metry, co czyni go najwyższym, zachowanym do XX wieku, antycznym przedstawieniem stojącej postaci.

Niestety pomimo ogromnej wartości zabytkowej oraz protestów ze strony całego świata, w dniu 8 marca 2001 roku, został on doszczętnie zniszczony, przy użyciu ładunków wybuchowych i ognia artyleryjskiego, przez Talibów – ortodoksyjne ugrupowanie muzułmańskie. Niedługo po tym zdarzeniu rozpoczęto przygotowania do odbudowy, w które włączyło się wiele organizacji z całego świata. Były one jednak systematycznie przerywane trwającym na terenie Afganistanu konfliktem zbrojnym.

Jednym z ośrodków, który podjął próbę rekonstrukcji posągu Wielkiego Buddy jest zespół naukowy w Zurychu. Realizatorami tego projektu byli prof. dr Armin Gruen, dr Fabio Remondino i dr Li Zhang z Instytutu Geodezji i Fotogrametrii Konfederacyjnej Wyższej Szkoły Technicznej (ETH) w Zurychu. Efektem prac tego zespołu było wygenerowanie czterech odrębnych modeli przestrzennych posągu z różnych danych, różniących się zarówno sposobem wykonania oraz dokładnością. Do wykonania tego zadania, wykorzystano dziesięć zdjęć, spośród zgromadzonych dwudziestu trzech, obejmujących zarówno zdjęcia metryczne, jak i niemetryczne. Na podstawie stworzonych rzeczywistych modeli przestrzennych, wykorzystując odpowiednie urządzenie, sprzężone z komputerem, automatycznie rzeźbiące w tworzywie sztucznym, wykonano fizyczną rekonstrukcję pomnika w skali 1:200 (Gruen *et al.*, 2003, 2004).

4. REKONSTRUKCJA MODELU WIELKIEGO BUDDY

4.1. Pozyskanie archiwalnych danych źródłowych

W dniu 26 lutego 1974 roku, ekipa Studenckiej Wyprawy Azjatyckiej, Wydziału Geodezji i Kartografii, udała się na półroczny rekonesans naukowo-poznawczy do Azji. Trasa wyprawy wiodła przez trzynaście krajów Europy i Azji: ZSRR, Iran, Afganistan, Pakistan, Indie, Cejlon, Nepal, Turcję, Grecję, Jugosławię, Węgry, Austrię i Czechosłowację. Wykonano pomiary i zdjęcia wielu zabytków: w Indiach (Ellora, Mahabalipuram, Konarak), w Nepalu (Kathmandu, Patan), w Pakistanie (Taxila), w Afganistanie (Bamyan) i w Iranie (Persepolis). Do realizacji tego zadania ekipa studencka została wyposażona w kamerę stereometryczną Wild C120.

Na podstawie wykonanych zdjęć została opracowana praca magisterska, w której sporządzono dokumentację fotogrametryczną wybranych zabytków kultury sakralnej Azji (Kanigowski, Książ, 1976).

W czasie pobytu studenckiej wyprawy w Bamyan w dniu 9 lipca 1974, wykonano zdjęcia obu posągów Buddy (Rys. 1). Ze względu na duże wymiary posągów, dużą odległość fotografowania oraz brak możliwości pomiaru osnowy nie wykorzystano wykonanych stereogramów w późniejszych opracowaniach.



Rys. 1. Bamyan – prace fotogrametryczne przy posągu „Małego Buddy” (Konikowski, 1976)

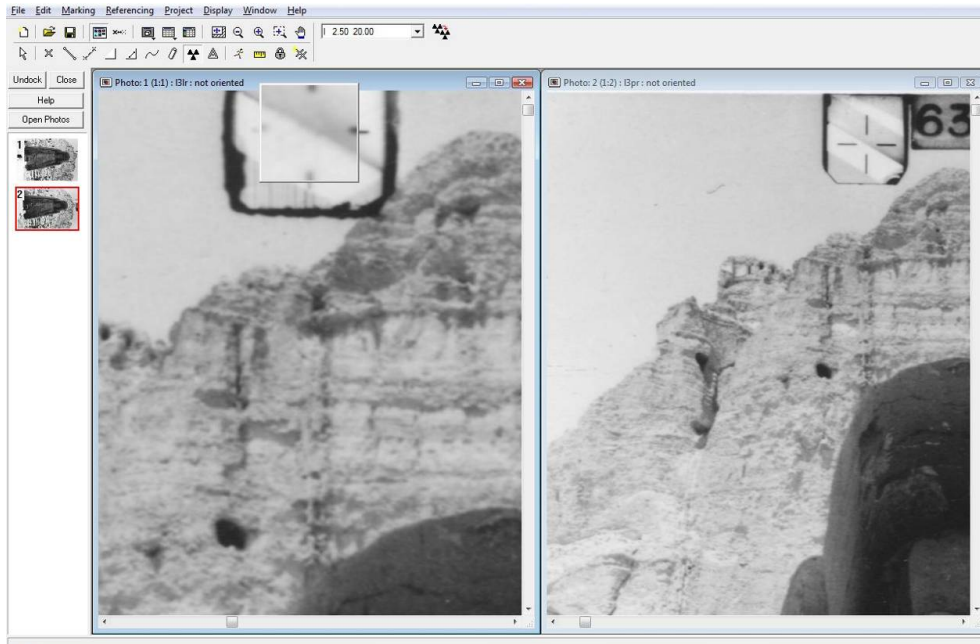
Zdjęcia zostały wykonane na płytach szklanych. Do modelowania, w prezentowanym eksperymencie, nie użyto jednak oryginałów zdjęć, które niestety zaginęły, ale ich papierowe odbitki stykowe. Zdjęcia (stereogram) zeskanowano z rozdzielczością 1200 dpi. Model został stworzony przy użyciu oprogramowania PhotoModeler Pro 4.0 (Markowski, 2010).

4.2. Orientacja zdjęć

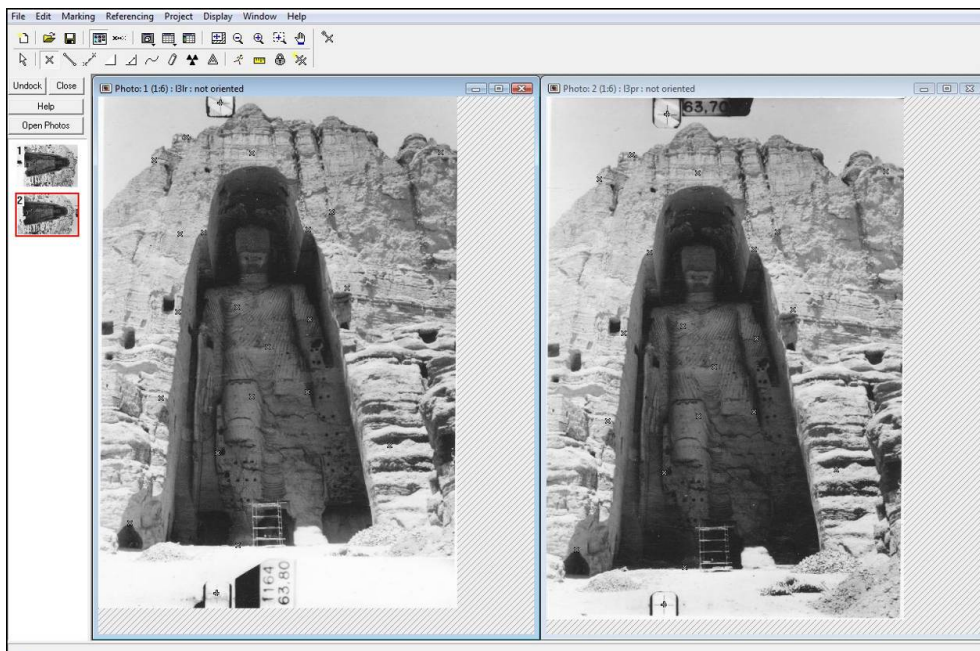
Pierwszym etapem wykonania modelu była orientacja wewnętrzna i zewnętrzna zdjęć. Sposób jej wykonania był ściśle uzależniony od specyfiki posiadanej dokumentacji fotogrametrycznej.

Ponieważ użyte fotografie zostały wykonane przy pomocy kamery metrycznej, wystarczające dla potrzeb projektu było wprowadzenie nominalnych wartości elementów orientacji wewnętrznej dla kamery C120. Następnie w programie PhotoModeler pomierzono położenie znaczków tłowych na zeskanowanych zdjęciach, w celu zdefiniowania ich układu współrzędnych (Rys. 2).

Z uwagi na to, że nie została pomierzona osnowa dla sfotografowanego posągu Wielkiego Buddy, skorzystano z istniejącej w oprogramowaniu możliwości wykonania modelowania bez użycia osnowy. Wykonano orientację wzajemną poprzez pomiar monokularny odpowiadających sobie punktów charakterystycznych obiektu na obu zdjęciach (Rys. 3). Były nimi w większości niewielkie otwory znajdujące się na pomniku i otaczających go skałach. Następnie model został przeskalowany poprzez podanie wysokości posągu Wielkiego Buddy (53 m).



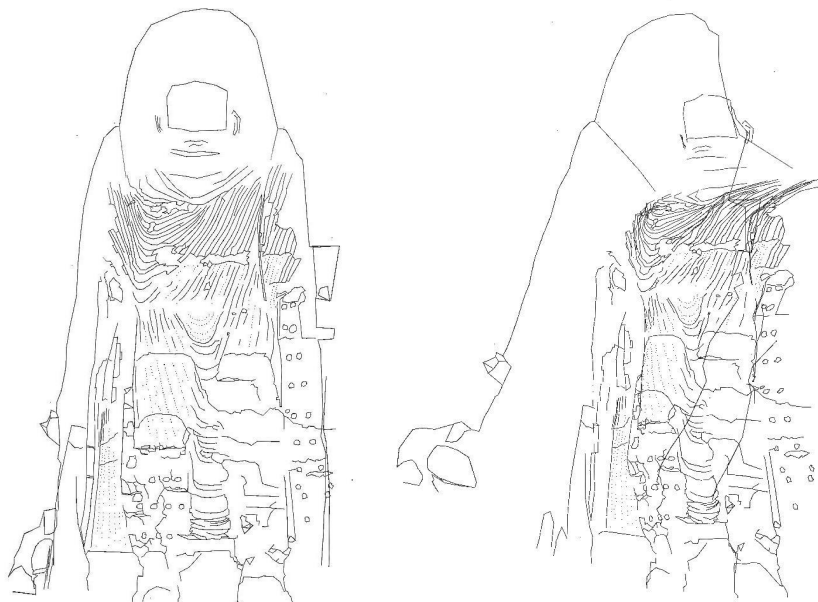
Rys. 2. Pomiar znaczków tło



Rys. 3. Pomiar punktów charakterystycznych

4.3. Budowa modelu

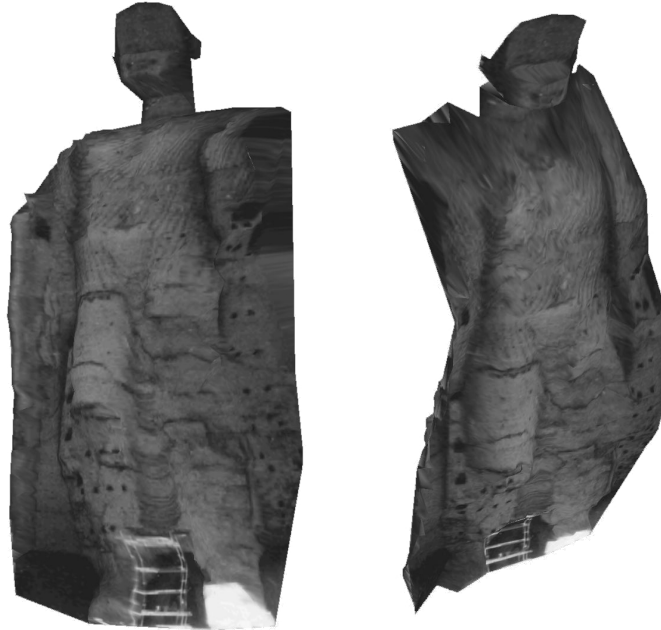
Pierwszym etapem rekonstrukcji fotogrametrycznej posągu Wielkiego Buddy było stworzenie modelu szkieletowego – NFR (*Numeric Frame of Reference*) (Rys. 4). Zdecydowano się na użycie punktów i linii prostych, ponieważ dokumentacja zdjęciowa nie spełniała wymagań, jakie są potrzebne do zastosowania krzywych typu NURBS (*Non-Uniform Rational Bezier Spline*). Budując model, pomierzono linie i punkty charakterystyczne, jak przede wszystkim dobrze widoczne elementy obrysu, linie załamania, faktura szaty Wielkiego Buddy oraz różnego rodzaju pęknięcia i otwory, znajdujące się na pomniku. Po wygenerowaniu modelu szkieletowego, ustalono jego skalę, podając wysokość rzeczywistą posągu.



Rys. 4. Model szkieletowy NFR

Drugi etap, to uzupełnienie modelu NFR o dodatkowe elementy w celu stworzenia rzeczywistego modelu przestrzennego – VRM (*Visually Realistic Model*). Należało przede wszystkim wypełnić odpowiednie przestrzenie powierzchniami. Dla większej części modelu użyto metody automatycznej. Polegała ona na rozpięciu pomiędzy punktami modelu (w tym punktami załamania elementów liniowych) siatki trójkątów płaskich. Dla głowy posągu oraz miejsc, w których stwierdzono błędność wygenerowanej siatki trójkątów, płaszczyzny utworzono w sposób manualny. Następnie pokryto wszystkie powierzchnie teksturami. Oprogramowanie pozwala na automatyczne dobranie obrazów, stanowiących fragmenty zdjęć użytych do stworzenia modelu. Włączona została również funkcja wygładzania krawędzi. W omawianym typie modelu, w przeciwieństwie do poprzedniego,

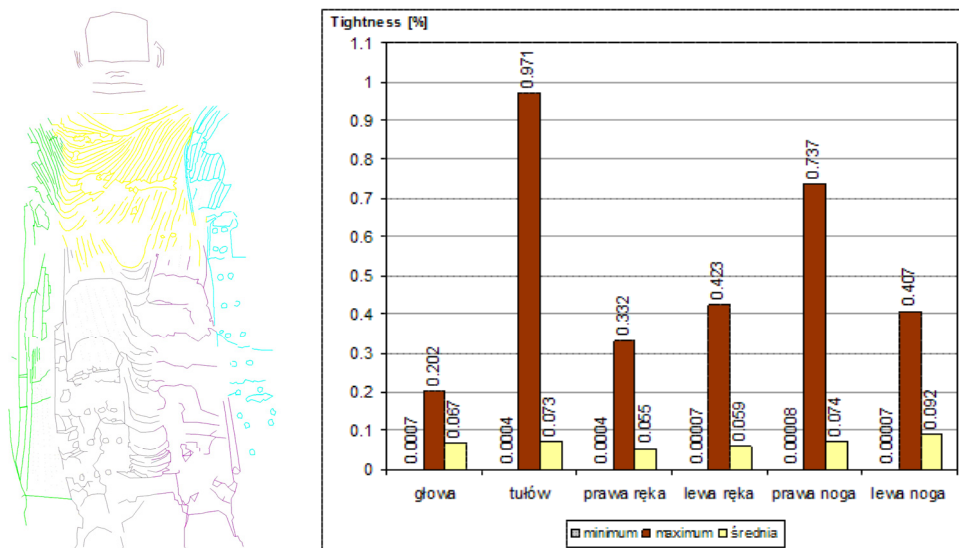
pominięto obrys niszy, w której znajdował się pomnik, ponieważ, z powodu niedoświetlenia jej głębszych fragmentów, nie było możliwe odtworzenie jej prawidłowego kształtu. Wygenerowany model przestrzenny posągu Wielkiego Buddy przedstawiony jest na rysunku 5.



Rys. 5. Rzeczywisty model przestrzenny VRM posągu Wielkiego Buddy

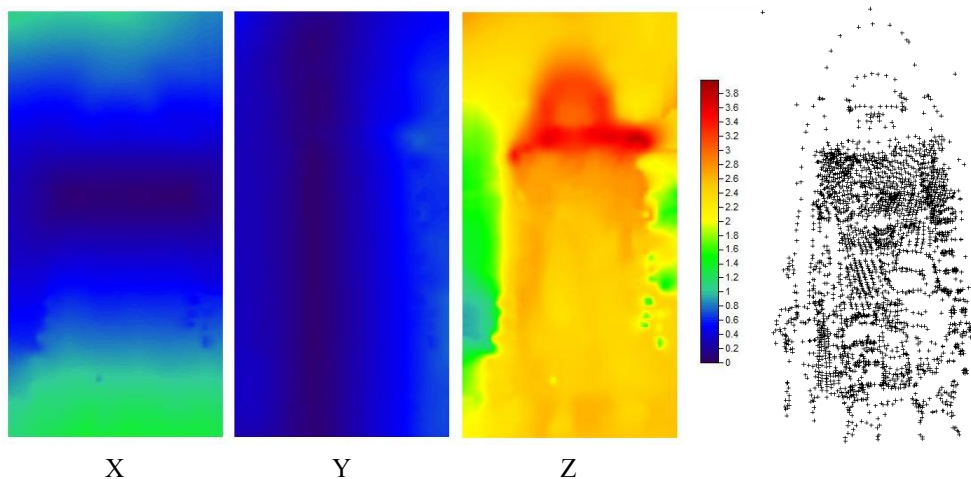
4.4. Analiza uzyskanych wyników

Ze względu na niedokładność wyznaczenia skali modelu oraz przewidywane możliwości jego wykorzystania, za główny element określający jakość geometryczną, uznano wewnętrzną spójność pomiarów, a nie bezwzględną dokładność poszczególnych punktów. Najlepiej prezentuje ją w programie PhotoModeler parametr określony, jako *Tightness*. Wartość ta jest wyznaczana w procentach, jako iloraz odległości, między uśrednionym położeniem danego punktu, a promieniem rzutującym, na którym powinien się on znajdować, przez przybliżony rozmiar całego obiektu. Jeśli wartość parametru jest mniejsza, tym lepiej wykonany jest pomiar. Dla stworzonego modelu przyjmuje ona wartości od 0.00007% do 0.971%, a średnia wynosi 0.07%. Na rysunku 6 przedstawiono podział obiektu na sześć elementów, w celu odrębnego przeanalizowania każdego z nich, oraz wyniki tej analizy, w postaci wartości minimalnych, maksymalnych i średnich parametru *Tightness*.



Rys. 6. Podział modelu oraz wykres prezentujący analizę wewnętrznej spójności poszczególnych jego elementów

Analizując dokładności położenia punktów, można zauważyć, że współrzędne w kierunku prostopadłym do płaszczyzny zdjęć, zostały wyznaczone w sposób znacznie mniej dokładny niż pozostałe współrzędne (Rys. 7). Skala barwna na rysunku 7 podana jest w metrach.



Rys. 7. Rozkład błędów poszczególnych współrzędnych

Oszacowane wartości błędów wyznaczenia współrzędnych X, Y, Z modelu wynoszą odpowiednio: 0.45–1.41 m; 0.04–0.78 m; 0.99–4.04 m. Głównym źródłem niedokładności był bardzo niekorzystny stosunek bazy stereogramu. Niska jakość geometryczna spowo-

dowana była głównie dużymi rozmiarami obiektu. Zdjęcia posiadały również słabą jakość radiometryczną. Problematiczna była zarówno ich ostrość, jak i oświetlenie poszczególnych obszarów. Nie bez znaczenia były również takie czynniki, jak deformacje ponad trzydziestoletniego papierowego podłoża fotograficznego

5. PODSUMOWANIE

W wyniku wykonanego projektu, stworzono model szkieletowy NFR (*Numeric Frame of Reference*) oraz rzeczywisty model przestrzenny VRM (*Visually Realistic Model*) posagu Wielkiego Buddy. Oceniono przy tym jakość posiadanych zdjęć archiwalnych oraz możliwości pakietu PhotoModeler do modelowani 3D na ich podstawie.

Analizując wewnętrzną spójność pomiarów, na podstawie parametru *Tightness*, dla poszczególnych części posagu, należy podkreślić, że jest on wysoki i wynosi średnio 0.07%. Świadczy to o prawidłowej identyfikacji punktów homologicznych na zdjęciach, czyli zrekonstruowany model wykonany jest prawidłowo.

Uwzględniając jednak uzyskane błędy wyznaczenia współrzędnych punktów modelu, które wahają się od kilkunastu centymetrów do kilku metrów, w zależności od położenia punktu, posiadaną dokumentację fotogrametryczną obiektu można by było ocenić dość negatywnie. Należy jednak wziąć pod uwagę również fakt, że zachowanych jest bardzo niewiele archiwalnych zdjęć pomnika. Uwzględniając rzeczywiste rozmiary posagu Wielkiego Buddy, opracowane dane można uznać za wystarczająco dokładne do odbudowy zniszczonego obiektu zabytkowego.

Użycie pakietu PhotoModeler stworzyło pewne możliwości, ale wprowadziło również istotne utrudnienia. W wielu miejscach, podczas pomiaru na zdjęciach występowały trudności w identyfikacji punktów homologicznych. W związku z tym, zabrakło możliwości obserwacji stereoskopowych, która znacznie ułatwiłaby pomiary, zwiększając tym samym ich przewidywaną dokładność. Ważnym okazał się fakt, że do stworzenia modelu nie była wymagana osnowa fotogrametryczna, ani elementy orientacji zewnętrznej, co odróżnia omawiane oprogramowanie od wielu fotogrametrycznych stacji cyfrowych.

6. LITERATURA

Bujakiewicz A., Kowalczyk M., Podlasiak P., Zawieska D., 2004. "Modelling and Visualization of Three Dimensional Objects using Close Range Imagery". *Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XX Congress of ISPRS*, Istanbul, Vol. XXXV, Part B5, WG V/4, s. 442–446.

Gruen, A., Remondino, F., Zhang, L., 2003. "Automated modeling of the Great Buddha statue in Bamyan, Afghanistan". *ISPRS Archives*, Vol. XXXIV, Part 3/W8, Munich, s. 11–16.

Gruen, A., Remondino, F., Zhang, L., 2004. "3D Computer Reconstruction of the Buddhas of Bamyan". Zürich, Switzerland.

<http://www.photogrammetry.ethz.ch/research/bamiyan/buddha/index.html>

Konikowski, W., Książ, B., 1976. „Sporządzanie metodami fotogrametrycznymi inwentaryzacji architektonicznej wybranych zabytków kultury sakralnej Azji”. *Praca magisterska*. Politechnika Warszawska. Wydział Geodezji i Kartografii. Instytut Geodezji Gospodarczej.

Markowski T., 2010. „Weryfikacja działania pakietu PhotoModeler dla generowania rzeczywistego modelu przestrzennego (VRM) wybranego obiektu bliskiego zasięgu”.

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

Zawieska D., 2008., „Rekonstrukcja 3D obiektów bliskiego zasięgu na podstawie zdjęć archiwalnych”. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 18. 717–726.

PHOTOGRAMMETRIC RECONSTRUCTION OF MODEL OF THE GREAT BUDDHA STATUE BASED ON ARCHIVAL PHOTOS

KEY WORDS: reconstruction of a model, archival photos, Great Buddha Statue, 3D model

SUMMARY: The Great Buddha statue of Bamyán in Afghanistan was 53 meters high and therefore was considered to be the largest ancient depiction of a standing person. On the basis of the sculpture's structure, stylistics and historical information, the date of the Great Buddha was estimated to be between the 3rd and 7th century AD. Unfortunately, in spite of its enormous historical value, it was totally destroyed at the beginning of 2001. However, because of its great artistic value, in the past some approaches to its reconstruction have been made, but they were repeatedly interrupted by military actions. Fortunately, now it seems that preparations for reconstruction of this sculpture will begin soon. The lack of sufficient data on the shape of the statue was another problem. From literature review it appears that no accurate documentation survived. Because of that any information on the appearance and structure of the statue dating from before the destruction is very valuable and could play an important role in the statue's physical reconstruction. The topic of this article is a presentation of the Great Buddha statue's 3D model reconstruction based on archival copies of metric photographs, which were taken by the stereometric camera Wild C120 during the Student Asiatic Expedition organized by the Faculty of Geodesy and Cartography of the Warsaw University of Technology in 1974. The 3D model of the sculpture was made with the use of the PhotoModeler Pro 4.0 software, which was designed for making 3D models of close-range objects based on monocular observations. On the basis of this project an opinion on possibilities of the use of the mentioned software in this type of tasks has been formulated. Radiometric and geometric quality of the photographic documentation, as well as its usefulness for reconstruction of the Great Buddha statue, have also been verified.

dr inż. Dorota Zawieska
e-mail: d.zawieska@gik.pw.edu.pl
telefon: 222347694

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