

**FOTOGRAMETRYCZNY POMIAR POWIERZCHNI PRZEŁAMAŃ
RZEŹB ARCHEOLOGICZNYCH
W CELU ICH WZAJEMNEGO DOPASOWANIA**

**PHOTOGRAMMETRIC MEASUREMENT OF CONTACT SURFACES
OF ARCHAEOLOGICAL SCULPTURE ELEMENTS
FOR RELATIVE MATCHING**

**Aleksandra Bujakiewicz, Michał Kowalczyk, Piotr Podlasiak,
Dorota Zawieska, Elżbieta Andrzejewska**

Instytut Fotogrametrii i Kartografii, Politechnika Warszawska

SŁOWA KLUCZOWE: fotogrametria cyfrowa, archeologia, powierzchnia przełamania rzeźby, 3D wizualizacja

STRESZCZENIE: W artykule przedstawione zostały badania związane z fotogrametryczną rekonstrukcją 3D powierzchni przełamania niewielkich fragmentów rzeźb archeologicznych, na podstawie, których będzie można wiarygodnie sprawdzić, czy wytypowane wstępnie części rzeźb do siebie pasują. Takie przyporządkowanie/połączenie odpowiadających sobie części, pozwoliłoby na podstawie porównania cech ikonograficznych czy cech stylistycznych ocenić dokładniej datę pochodzenia badanej rzeźby. Ze względu na wysoką wymaganą dokładność 0.3-0.5 mm określenia numerycznych modeli tych powierzchni oraz konieczność ich wizualizacji, zaproponowano odpowiednie procedury, które zweryfikowano na podstawie pomiaru i wizualizacji dwóch przystających powierzchni przełamanej kamienia testowego oraz 33 modeli powierzchni przełamania różnych rzeźb egipskich z Muzeum w Kairze i Narodowego Muzeum w Warszawie. Zastosowana metoda pomiaru powierzchni przełamania rzeźb bazuje na obrazach wykonanych semi metrycznym aparatem cyfrowym typu lustrzanka, CANON EOS 20D, wyposażonym w trzy wymienne obiektywy, dla którego wiele wariantowa kalibracja została wykonana w etapie poprzedzającym pomiar. Obrazy powierzchni przełamania rzeźb pozyskano w skalach od 1:20 do 1:40, przy założonym stosunku bazowym około 1:4. Przed wykonaniem zdjęć obiekty umieszczano wewnątrz specjalnie skonstruowanej przestrzennej konstrukcji z punktami osnowy, dla których wyznaczono współrzędne z dokładnością 0.1 mm. Przed etapem rekonstrukcji i pomiaru powierzchni, obrazy poprawiono o wpływ błędów systematycznych, wyznaczonych w etapie kalibracji. Pomiar wysokościowy wszystkich powierzchni został wykonany w trybie automatycznym na fotogrametrycznej stacji cyfrowej Z/I Imaging. W celu możliwości analizy topografii pomierzonych powierzchni, przydatnej w dalszym etapie ich dopasowywania, opracowano program do wizualizacji powierzchni w czterech różnych formach. Metoda dopasowywania powierzchni oraz wstępne eksperymenty w tym zakresie są już ukończone i zostaną wkrótce opublikowane. Badania były wykonywane w ramach projektu badawczego KBN T12E 033 26.

1. WPROWADZENIE

W celu odtworzenia kontekstu historycznego eksponatów archeologicznych niewątpliwie duże znaczenie ma zebranie i analiza wszystkich informacji o podstawowym znaczeniu, które mogą dostarczyć jakichkolwiek wskazań, pozwalających dokładniej ocenić datowanie pochodzenia różnych rzeźb, takich jak posągi, sarkofagi, płyty, etc. Jeżeli na przykład, dla określonego posągu zostaną wstępnie zidentyfikowane, na podstawie ich ogólnych cech (tj. rodzaj rzeźby, typ części, materiał, etc.) dwie części do siebie pasujące (np. głowa i tors), to na podstawie kształtu obu powierzchni przełamania rzeźby, będzie można wiarygodniej sprawdzić, czy wytypowane wstępnie części, tj. głowa i tors należą do tego samego posągu. Takie przyporządkowanie (połączenie) odpowiadających sobie części, pozwoliłoby na podstawie porównania cech ikonograficznych (np. przyporządkowanie typu peruki do rodzaju stroju), czy cech stylistycznych (np. sposobu rzeźby oczu i torsu), ocenić dokładniej datę pochodzenia badanej rzeźby. Należy zwrócić uwagę na fakt, że eksponatami archeologicznymi są zarówno całe kompletne rzeźby jak i ich części, zatem ich liczba jest ogromna, a ponadto są one rozproszone w różnych kolekcjach muzealnych świata. Tworzone są różnego rodzaju archeologiczne bazy danych i systemy informacji (Bartolotta *et al.*, 2000; Hongo *et al.*, 2000; Kolbl *et al.*, 2000; Obdahe, Chikatsu, 2004; Tsioukas *et al.*, 2004), które zawierają podstawowe dane dotyczące przechowywanych eksponatów. Próby wzajemnego dopasowywania wytypowanych wstępnie części rzeźb były w przeszłości realizowane przez archeologów, poprzez wykonywanie gipsowych odlewów dla powierzchni przełamanej rzeźby, jednakże taki sposób nie jest wygodny ani dokładny.

Współczesne metody pozyskiwania i przetworzenia obrazów stwarzają nowe możliwości. Technologie fotogrametrii bliskiego zasięgu oraz metody numerycznego modelowania i dopasowywania odpowiadających sobie powierzchni pozwalają na szybkie, automatyczne i bezkontaktowe rozwiązanie tej problematyki bez konieczności przemieszczania badanych części rzeźb znajdujących się w różnych muzeach świata. Jednakże, aby fragmenty rzeźb zrekonstruować metodą fotogrametryczną, należy je wstępnie wyselekcjonować, a następnie zarejestrować ich obrazy celem dalszego przetworzenia.

Względy ekonomiczne, dokładnościowe i zwykle trudny dostęp do badanych eksponatów w muzeach, determinuje główne założenia zastosowanego pomiaru fotogrametrycznego. Uwarunkowania ekonomiczne wykluczają stosowanie systemu naziemnego skaningu laserowego (Alshawabkeh, 2005; Bohm, 2005), czy innych drogich optycznych cyfrowych systemów rejestrujących (Brown *et al.*, 1995). Jednocześnie wymagana wysoka dokładność odtworzenia 3D powierzchni styku (dla 'Z' rzędu około 0.3÷0.5 mm) określa zastosowanie dokładnych metod kalibracji kamery i odpowiednich metod przetworzenia obrazów cyfrowych oraz wizualizacji pomierzonych 3D powierzchni. Celem końcowym wytworzonych produktów fotogrametrycznych, którymi są numeryczne modele powierzchni przełamania rzeźb, jest możliwość potwierdzenia przynależności wstępnie wyselekcjonowanych fragmentów do tych samych rzeźb. Bez względu na zastosowaną metodę dopasowania fragmentów, istotny jest sposób wizualizacji pomierzonych fotogrametrycznie 3D powierzchni przełamania rzeźby. Odpowiednie

wzajemne ustawienie odpowiadających sobie powierzchni pozwala na wstępne wizualne sprawdzenie zgodności kształtu.

2. GŁÓWNE ZAŁOŻENIA METODY REKONSTRUKCJI I POMIARU 3D POWIERZCHNI PRZEŁAMANIA RZEŻB

Proponowana metoda dotyczy precyzyjnej rekonstrukcji 3D powierzchni, utworzonych z przełamania niewielkich rzeźb archeologicznych. Zakłada się, że średnice mierzonych nieregularnych powierzchni są w granicach od 10 do 40 centymetrów, a ich deniwelacje (różnice wysokości mierzonych punktów na powierzchniach), które zwykle są zależne od wymiarów badanych detali mogą się mieścić w granicach od kilku milimetrów do kilku (kilkunastu) centymetrów. Wymagana liczba punktów, pozwalających odtworzyć model powierzchni z odpowiednią dokładnością i szczegółowością, jest bardzo duża, często dochodząca do kilku tysięcy, a żądana dokładność pomiaru wysokości punktów powierzchni jest rzędu 0.3÷0.5 mm. Pomiar tak dużej liczby punktów musi być automatyczny. Należy zwrócić uwagę na fakt, że rzeźby archeologiczne są wykonane z różnego materiału, a zatem ich obrazy charakteryzują się zróżnicowaną kontrastowością. Aby uzyskać tak wysoką dokładność odtworzenia kształtu powierzchni, przy jednoczesnym założeniu ograniczonej dostępności do rzeźb w trakcie pozyskania obrazów oraz konieczności brania pod uwagę aspektów ekonomicznych pomiaru (metody), warunki i etapy pomiaru fotogrametrycznego muszą być szczegółowo zaprojektowane i wykonane z dużą starannością. Spełnienie wszystkich oczekiwań dotyczących skuteczności metody, determinuje szereg uwarunkowań stawianych proponowanej fotogrametrycznej metodzie pomiaru i wymaga bardzo dokładnej analizy wielu czynników związanych z pozyskaniem i przetwarzaniem obrazów.

W oparciu o bogate doświadczenia autorów, zdobyte wcześniej w różnych zastosowaniach fotogrametrii z bliska, a w odniesieniu do prezentowanego w tym artykule zagadnienia, uzyskane w ramach realizacji przez autorów grantu KBN (Bujakiewicz *et al.*, 2005-2006), dotyczącego numerycznego modelowania fragmentów rzeźb w celu rekonstrukcji oryginalnego kontekstu zabytku, zaproponowano założenia i warunki pomiaru prezentowane poniżej.

1. W odniesieniu do pozyskiwania obrazów należy zapewnić następujące warunki:
 - System rejestrujący powinien być niedrogi, pracujący w trybie zarówno manualnym jak i automatycznym. Umożliwiający wykonanie obrazów o dobrej jakości radiometrycznej i stabilnej w czasie jakości geometrycznej. Ze względów ekonomicznych proponuje się niemetryczną kamerę cyfrową wyższej jakości, którą można nabyć w umiarkowanej cenie, wraz z dodatkowymi obiektywami. Dla celu niniejszego projektu wytypowano i zakupiono kamerę CANON EOS 20D z obiektywami 20, 28 i 35 mm.
 - Obrazy muszą być wykonane w bardzo dużej skali, od 1:20 do 1:50, w zależności od rozmiarów badanej powierzchni przełamania, dobranymi odpowiednio obiektywami, dostosowanymi do głębi obiektu (wraz z otaczającą osnową) i odległości fotografowania możliwej do uzyskania ze względu na dostęp do obiektu. Liczba stanowisk powinna być ograniczona do minimum, ze względu na niewielką dostępną przestrzeń wokół obiektu, a geometria zdjęć powinna spełniać założone wysokie

wymagania dokładnościowe z jednoczesnym zapewnieniem warunków dla automatycznego pomiaru powierzchni.

- Jakość i kontrast obrazu zależy od tekstury obiektu. Jeśli tekstura jest niewyraźna, tak jak w przypadku niektórych typów materiałów (np. wapień), z których zbudowane są rzeźby archeologiczne, kontrast obrazu może być zwiększony poprzez optyczne rzutowanie na obiekt wybranego wzoru świetlnego. Jak wynika z prowadzonych badań (Bujakiewicz *et al.*, 2006b), w przypadku automatycznego *matchingu*, optycznie rzutowany wzór nie poprawia dokładności wyników rekonstrukcji 3D modelu powierzchni przełamania rzeźby a często nawet zakłóca automatyczny proces pomiaru.
2. Sposób określenia parametrów orientacji wewnętrznej kamery powinien zapewnić dokładne odtworzenie kształtu wiązki promieni rzutujących. Metoda samokalibracji wykonana w trakcie właściwego pomiaru i wykorzystująca sieć zdjęć mierzonego obiektu (Sawicki, 2001, 2003), uważana jest jako najbardziej odpowiednia dla odtworzenia orientacji wewnętrznej zdjęć niemetrycznych. Jednakże jest ona trudna do zrealizowania w przypadku pomiaru wykonanego w trudnych warunkach o ograniczonej przestrzeni wokół obiektu. W takim przypadku korzystniej jest wykonać kalibrację kamery przed wykonaniem właściwego pomiaru. W ramach niniejszego projektu, kalibrację stosowanej kamery CANON EOS 20D, wykonano dwoma różnymi podejściami, wykorzystującymi dwa różne rodzaje testów kalibracyjnych; trójwymiarowe pole punktowe (specjalnie w tym celu skonstruowane), oraz dwuwymiarowe pole typu szachownica, zawierające dwie rodziny linii do siebie prostopadłych (Bujakiewicz, *et al.*, 2006a). Uzyskane wyniki kalibracji były zbieżne (dla odległości obrazu c_K w granicach $0.006 \div 0.16 \% c_K$) i zabezpieczały wymaganą dokładność rekonstrukcji kształtu wiązek.
 3. Dokładność zrekonstruowanego 3D modelu zależy od precyzji wykonanej orientacji wewnętrznej i wzajemnej zdjęć, natomiast dokładność jego orientacji w stosunku do zewnętrznego układu referencyjnego jest określona rodzajem elementów kontrolnych (osnowy) na lub wokół obiektu. W zależności od potrzeb, w praktyce stosowane są różne rozwiązania. W przypadku pomiaru niewielkich obiektów korzystne jest ich umieszczenie wewnątrz konstrukcji zawierającej rozmieszczone przestrzennie punkty osnowy. Dla celu rekonstrukcji modeli powierzchni przełamania rzeźb, zaprojektowano i wykonano dwie referencyjne konstrukcje szkieletowe o różnych wymiarach w płaszczyźnie XY (60×50 cm i 30×40 cm), zawierające zamocowane bolce (w liczbie 25 i 18) o różnych długościach (odpowiednio w zakresach 10 cm i 5 cm). Na ich górnych powierzchniach znajdują się sygnały koliste, o powierzchniach matowych, które zostały zaprojektowane zgodnie z przewidywaną skalą zdjęć i trybem ich pomiaru na zdjęciach. Konstrukcja bolców i ich mocowanie do ramy umożliwia ich demontaż w czasie transportu oraz ponowne mocowanie w trakcie wykonywania zdjęć, z założoną i wymaganą dokładnością dla punktów osnowy rzędu $0.1 \div 0.3$ mm. Zdjęcie wykonanej konstrukcji wraz z punktami osnowy, układem współrzędnych oraz z umieszczoną wewnątrz testową rzeźbą jest pokazane na rysunku 1.
 4. Odtworzenie orientacji zdjęć oraz pomiar 3D modeli powierzchni można wykonać na każdej fotogrametrycznej stacji cyfrowej, która pozwala realizować z odpowiednią dokładnością te funkcje. Należy jednak zwrócić uwagę na rozmieszczenie punktów do

wykonywania orientacji wzajemnej. Ze względu na dużą skalę zdjęć (krótkie odległości fotografowania; 70÷150 cm) stosunek wielkości deniwelacji powierzchni łącznie z punktami osnowy (różnice 'Z') do odległości fotografowania może być znaczny. Należy więc wybierać punkty obejmujące całą głębię obiektu mierzonego. Ze względu na wymaganą wysoką dokładność odtworzenia kształtu 3D powierzchni, liczba punktów pomiarowych jest bardzo duża i dlatego pomiar automatyczny jest konieczny. Stosowany pakiet fotogrametrycznej stacji cyfrowej powinien zatem zawierać moduł do automatycznego pomiaru NMT. Badane powierzchnie przełamań rzeźb zostały opracowane w Laboratorium Fotogrametrii Cyfrowej Instytutu Fotogrametrii i Kartografii PW, przy wykorzystaniu stacji cyfrowej Z/I Imaging (Intergraph), a w szczególności, modułów ISPM, ISDM, ISDC i ISSD do założenia projektów i rekonstrukcji 3D modeli oraz pomiaru krawędzi i punktów/linii charakterystycznych oraz ISAE do automatycznego pomiaru numerycznych modeli powierzchni. Analiza wyników automatycznego pomiaru powierzchni, sygnalizowanych różnego rodzaju punktami rzutowanymi optycznie na etapie wykonania zdjęć i ich porównanie z odtworzoną powierzchnią bez takiej sygnalizacji, wykazała, że sygnalizacja nie poprawiła dokładności i efektywności automatycznego pomiaru, nawet w przypadku rzeźb zbudowanych z materiału o słabej teksturze (takiego jak wapień). W przypadku rzeźb tworzonych z materiału o bogatej teksturze (granit), optyczna sygnalizacja zakłócała proces automatycznego *matchingu* (Bujakiewicz, *et al.*, 2005, 2006).



Rys. 1. Konstrukcja szkieletowa z osnową, wraz z umieszczoną wewnątrz rzeźbą

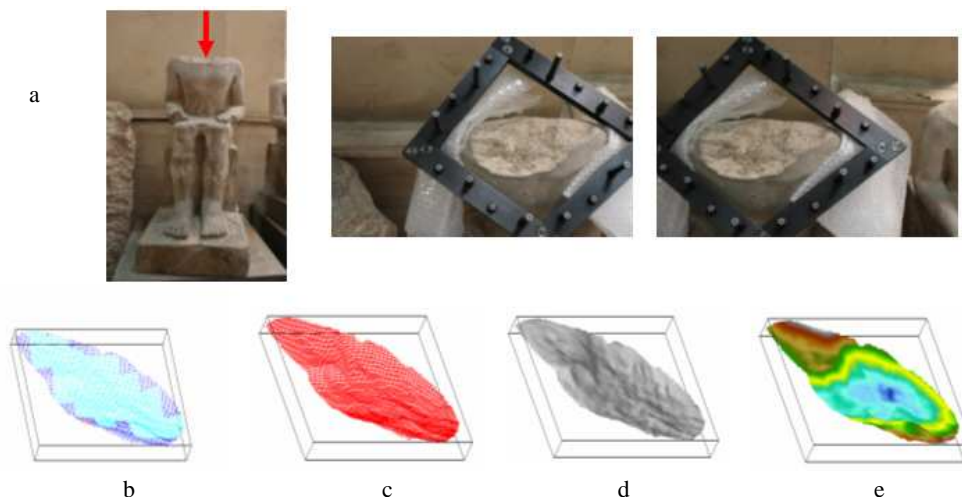
5. Wybór odpowiednich form wizualizacji dla pomierzonych powierzchni przełamań rzeźb (np. rzeźby na rysunku 2a) jest bardzo istotny w przypadku dalszego dopasowania odpowiadających sobie fragmentów rzeźb. W szczególności sposoby wizualizacji powinny zapewnić:

- ocenę efektywności automatycznego skaningu powierzchni,
- możliwość analizy kształtu powierzchni, pozwalającej na wstępne – wizualne
- przyporządkowanie odpowiadających sobie powierzchni przełamań rzeźby, oraz wyboru
- na nich trzech punktów dla przeprowadzenia wstępnej transformacji, przed dokonaniem zasadniczego etapu ich dopasowania.
- łatwość tworzenia warstw geometrycznych danych w bazie danych.

W ramach niniejszego projektu zostało opracowane oprogramowanie, pozwalające w oparciu o pomierzone na stacji krawędzie i numeryczny model powierzchni, przedstawić modele przełamań powierzchni rzeźb jako:

- rzut perspektywiczny powierzchni opisanej punktami, które reprezentują trzema kolorami efektywność automatycznego *matchingu* (bardzo dobra – kolor zielony, dobra – ciemno niebieski, słaba – czerwony) - rysunek 2b,
- rzut perspektywiczny powierzchni reprezentowanej punktami, będącymi wierzchołkami siatki kwadratów, opisujących tę powierzchnię - rysunek 2c,
- rzut perspektywiczny w postaci powierzchni cieniowanej (*shading surface*) - rysunek 2d,
- rzut perspektywiczny powierzchni opisanej liniami kodującymi wysokości 'Z' (*height colour coding lines*) - rysunek 2e.

Z proponowanych przez autorów form wizualizacji, wybrano postać powierzchni cieniowanej (rys. 2d) jako najbardziej odpowiadającą dla dalszych analiz, związanych z wzajemnym dopasowywaniem odpowiadających sobie powierzchni.



Rys. 2. Różne postacie rzutu perspektywicznego powierzchni przełamania rzeźby:
(a) powierzchnia przełamania rzeźby i jej stereogram, (b) rzut perspektywiczny powierzchni opisanej punktami, które reprezentują trzema kolorami efektywność automatycznego *matchingu* (bardzo dobra – kolor zielony, dobra – ciemno niebieski, słaba – czerwony), (c) rzut perspektywiczny powierzchni opisanej siatką, (d) rzut perspektywiczny w postaci powierzchni cieniowanej, (e) rzut perspektywiczny powierzchni opisanej liniami kodującymi wysokości 'Z'

3. PREZENTACJA I ANALIZA WYNIKÓW

Wstępne badania proponowanej metody określania 3D powierzchni przełamania rzeźb przeprowadzone zostały na podstawie pomiaru kamienia testowego. Dla celu niniejszego projektu, kamień został rozbity na dwie części. Oznaczało to, że kształty przystających powierzchni wraz z ich krawędziami na pewno sobie wzajemnie odpowiadały. W przypadku przystających fragmentów rzeczywistych rzeźb archeologicznych, ze względu na przypadkowy charakter przełamania (zniszczenia) rzeźb oraz różnych warunków ich późniejszej archiwizacji, przystające powierzchnie mogą zawierać pewne ubytki, szczególnie na ich brzegach. Zatem ich krawędzie nie zawsze muszą mieć taki sam kształt. Jednakże można się spodziewać, że numeryczne modele powierzchni sąsiednich fragmentów zachowują pierwotne kształty. Poza granitowym kamieniem testowym, do pomiaru wybrano kilkanaście fragmentów rzeźb egipskich (typu statuetki, płyty z reliefem wypukłym, płytkie naczynia), z okresu dynastii V lub późniejszej oraz z okresu ptolemejsko-rzymskiego, wykonanych z różnych materiałów (wapień, gnejs anortozytowy, granit, piaskowiec, szkło). Ogólna liczba dostępnych do pomiaru powierzchni przełamania rzeźb wynosiła 29 (a liczba zrekonstruowanych i pomierzonych 3D modeli powierzchni - 33), w tym:

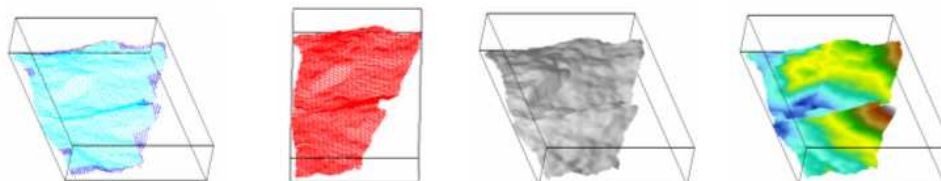
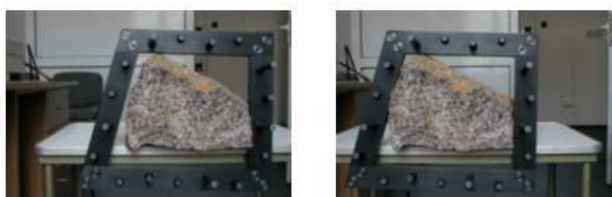
- 6 powierzchni dotyczyło sześciu fragmentów rzeźb (wapień, gnejs), typu statuetki (w większości torsy), z Muzeum Egipskiego w Kairze (The Egyptian Museum), które ze względów obiektywnych (tylko takie udostępniono) nie były częściami tych samych rzeźb. W celu zbadania wpływu sztucznie (optycznie) rzutowanej tekstury na automatycznie mierzone 3D powierzchnie, na trzy z nich rzutowano różne sygnały (kropki o dwóch wymiarach, siatkę, kolorowe kropki) w trakcie pozyskiwania obrazów. Ogółem zrekonstruowano i pomierzono zatem 11 modeli powierzchni.
- 22 powierzchnie dotyczyły 16 fragmentów dziewięciu rzeźb, typu płyty z reliefem wypukłym (wapień), płytkie naczynia (granit, szkło), posążki (granit, wapień, piaskowiec) z Muzeum Narodowego w Warszawie, z których 16 były powierzchniami wzajemnie przystającymi. Ze względu na brak poprawy skuteczności automatycznego pomiaru powierzchni rzeźb z Muzeum Egipskiego (nawet o słabej naturalnej teksturze jak np. wapień), której spodziewano się poprzez optycznie rzutowaną teksturę na powierzchnie w trakcie pozyskania obrazów, zdjęcia powierzchni rzeźb z Muzeum Narodowego w Warszawie wykonywano bez dodatkowej sztucznej sygnalizacji. Dla tej grupy rzeźb, zrekonstruowano i pomierzono zatem 22 powierzchnie.

Ogółem analiza została wykonana w oparciu o wyniki pomiaru 35-ciu modeli powierzchni (2 modele dla testowego kamienia oraz 33 modeli dla rzeźb archeologicznych) (Bujakiewicz, *et al.*, 2005-2006, 2006b).

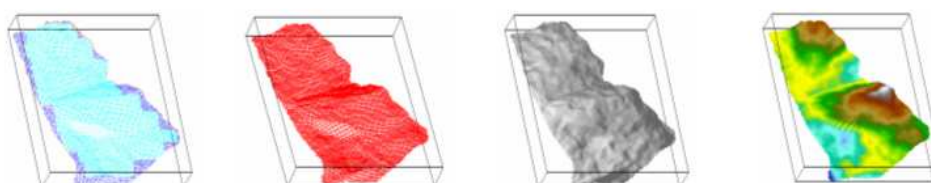
Wszystkie fragmenty rzeźb umieszczano wewnątrz konstrukcji z osnową (rys. 1) i fotografowano kamerą CANON EOS 20D z obiektywami 20, 28 lub 35 mm, zgodnie z założeniami podanymi w rozdziale 2 pkt. (1). Rekonstrukcję 3D modeli powierzchni i ich automatyczny pomiar wykonano zgodnie z założeniami w rozdziale 2, pkt. 2÷4. Orientacja wewnętrzna zdjęć została wykonana w oparciu o parametry, uzyskane w procesie kalibracji wykonanej a priori, dla każdego obiektywu (20, 28 i 35 mm) oraz dla każdej stosowanej w pomiarze rzeźb odległości fotografowania (Bujakiewicz, *et al.*, 2006a). Średnia dokładność orientacji wewnętrznej dla wszystkich zdjęć charakteryzuje się

odchyleniem standardowym $\bar{\sigma} = 0.8 \mu\text{m}$. Dokładność orientacji wzajemnej, oszacowana w oparciu o pomiary wykonane zarówno na powierzchni rzeźby jak i wokół niej, charakteryzuje się odchyleniem standardowym $\bar{\sigma} = 1.9 \mu\text{m}$ i maksymalną szczątkową paralaksą poprzeczną $dp_y = 5.7 \mu\text{m}$. Wpasowanie zrekonstruowanego fotogrametrycznego modelu w układ referencyjny (rama, większa lub mniejsza, z rozmieszczonymi przestrzennie punktami osnowy), zostało wykonane ze średnią dla wszystkich modeli dokładnością, szacowaną na podstawie średnich oraz maksymalnych odchyłek na punktach osnowy, jako: $\text{RMS}_X = 0.17 \text{ mm}$, $\text{RMS}_Y = 0.14 \text{ mm}$, $\text{RMS}_Z = 0.15 \text{ mm}$, oraz $\text{RES}_{\text{max}X} = 0.32 \text{ mm}$, $\text{RES}_{\text{max}Y} = 0.30 \text{ mm}$, $\text{RES}_{\text{max}Z} = 0.31 \text{ mm}$

Część lewa
przełamanego
kamienia



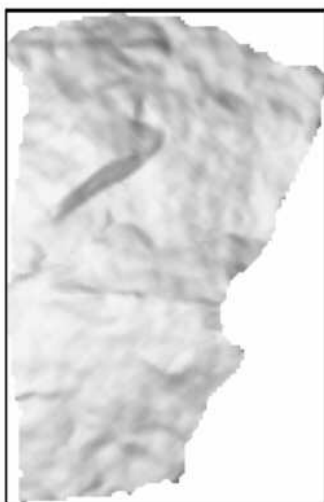
Część prawa
przełamanego
kamienia



Rys. 3. Stereogramy oraz 4 formy wizualizowanych powierzchni dla dwóch połówek testowego kamienia

W oparciu o manualny pomiar krawędzi powierzchni rzeźb (linie grzbietowe były trudne do identyfikacji) i automatyczny pomiar powierzchni, uzyskano dla wszystkich przypadków numeryczne modele powierzchni, które następnie wizualizowano, zgodnie z założeniami w rozdz. 2 pkt. 5. Wybrane przykłady powierzchni przełamań zostały zaprezentowane poniżej. Na rysunku 3, przedstawiono wszystkie formy wizualizacji dla

dwóch połówek testowego kamienia, wraz ze sterogramami, które zastosowano do pomiaru.



powierzchnia lewej części

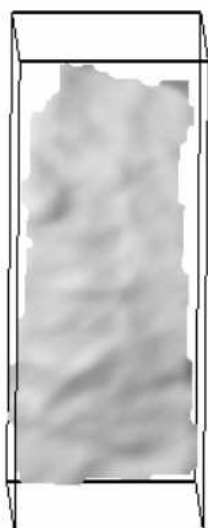


powierzchnia prawej części

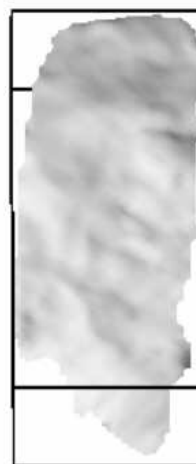
Rys. 4. Powierzchnie i obrazy dwóch przystających części (lewej i prawej) kamienia

W celu dopasowywania przystających powierzchni fragmentów rzeźb wybrano wizualizację w postaci powierzchni cieniowanej, jako najkorzystniej prezentującą kształt. Po wzajemnym zorientowaniu dwóch odpowiadających sobie powierzchni można zauważyć, że ich kształty wzajemnie się dopasowują. Powierzchnie dopasowanych części kamienia, po obrocie prawej części kamienia (rys. 3) o 180° , zostały przedstawione na rysunku 4.

Na rysunku 5 przedstawiono przystające powierzchnie dwóch fragmentów, rzeźby (płyty wapiennej) z Muzeum Narodowego w Warszawie oraz ich obrazy.



powierzchnia A-2/A-3



powierzchnia A-3/A-2

Rys. 5. Powierzchnie i obrazy dwóch przystających fragmentów A-2 i A-3
płyty wapiennej z reliefem (kod 149046)

W ramach tego samego projektu prowadzone są obecnie dalsze badania, dotyczące opracowania metody analitycznego dopasowania dwóch przystających powierzchni, w oparciu o podobieństwo ich geometrycznego kształtu. W tym celu, wykorzystując wizualizowane powierzchnie, przedstawione przykładowo na rysunkach 4 i 5, wybiera się punkty wspólne w oparciu, o które wykonywana jest wstępna transformacja. Wyniki tej transformacji są pierwszym wskaźnikiem pokazującym czy badane powierzchnie są do siebie przystające. Dalsze bardziej skomplikowane operacje matematyczne pozwolą na dokładniejsze ich dopasowanie oraz na ocenę dokładności tego dopasowania. Jednocześnie trwają prace badawcze w ramach tego samego projektu w celu stworzenia bazy danych dla fragmentów małych rzeźb archeologicznych.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Wykonana przez autorów praca badawcza, udowodniła możliwość zastosowania metody fotogrametrycznej, bazującej na obrazach cyfrowych pozyskanych niemetrycznym aparatem cyfrowym, dla uzyskania wysokiej dokładności pomiaru 3D powierzchni przełamania niewielkich rzeźb archeologicznych, rzędu $0.3\div 0.5$ mm, lub wyższej. Taka wysoka dokładność jest konieczna ze względu na drobne formy topograficzne powierzchni przełamania, które w dalszym etapie mają być wzajemnie spasowane w celu stwierdzenia czy wytypowane wstępnie fragmenty rzeźb stanowią części do siebie przystające i należą do tej samej rzeźby. Takie przyporządkowanie/połączenie odpowiadających sobie części jest istotne dla badań archeologicznych, gdyż pozwoliłoby na podstawie porównania cech ikonograficznych czy cech stylistycznych ocenić dokładniej datę pochodzenia badanej rzeźby. Dla uzyskania wymaganych dokładności pomiaru numerycznego modelu powierzchni należy jednak ściśle przestrzegać założeń metody ustalonych *a priori*, z których najważniejsze to:

- odpowiedni wybór kamery i procedur jej kalibracji,
- geometria pozyskiwanych zdjęć oraz rodzaj stosowanych danych kontrolnych zabezpieczających wymaganą dokładność, pomimo bardzo ograniczonego dostępu do badanego eksponatu w muzeum,
- dobór fotogrametrycznej stacji cyfrowej umożliwiającej stereoskopowy pomiar powierzchni zarówno w trybie manualnym jak i automatycznym,
- odpowiednia forma wizualizacji 3D powierzchni przełamania, pozwalająca na wybór odpowiadających sobie fragmentów rzeźb oraz pomiar tych samych wybranych punktów (lub innych elementów) na obu 3D powierzchniach.

W eksperymencie wygenerowano z wymaganą wysoką dokładnością podaną powyżej, numeryczne 3D modele dla 35 powierzchni przełamania rzeźb, z których część miała swoje przystające powierzchnie. Uzyskane dane są obecnie wykorzystywane w dalszej części tego samego projektu dla dopasowywania odpowiadających sobie powierzchni i oceny dokładności tego dopasowania, oraz tworzenia bazy danych dla fragmentów małych rzeźb archeologicznych.

Wszystkie powyższe badania zostały zrealizowane w latach 2004-2006 w ramach projektu badawczego KBN T12E 033 26 nt. "Numeryczne modelowanie fragmentów rzeźb w celu rekonstrukcji oryginalnego kontekstu zabytku", kierowanego przez A. Bujakiewicz.

5. LITERATURA

- Alshawabkeh Y., 2005. Using Terrestrial Laser Scanning for the 3D Reconstruction of Petra – Jordan. *Photogrammetric Week '05, Wichmann*, s. 39-48.
- Bartolotta M., Di Naro S., Brutto M., Villa B., 2000. Information Systems for Preservation of Cultural Heritage. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIII, Part B5, Amsterdam, the Netherlands.
- Bohm J., 2005. Terrestrial Laser Scanning – A Supplementary Approach for 3D Documentation and Animation. *Photogrammetric Week '05, Wichmann*. s. 263-272.
- Brown J., Dold A., 1995. V – Stars – a system for digital industrial photogrammetry. *Optical 3-D Measurement Techniques III*, Wichman Verlag, Heilderberg.

Bujakiewicz A., Kowalczyk M., Podlasiak P., Zawieska D., 2004. Modelling and Visualization of Three Dimensional Objects Using Close Range Imagery. *International Archives for Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXV. B5. s. 442-446.

Bujakiewicz A., Kowalczyk M., Podlasiak P., Zawieska D., Rzepka S., Andrzejewska E., 2005-2006. Część pierwsza i druga raportu z wykonania zadań w roku 2004 i 2005, dotyczących projektu badawczego KBN T12E 033 26 nt. Numeryczne modelowanie fragmentów rzeźb w celu rekonstrukcji oryginalnego kontekstu zabytku. Instytut Fotogrametrii i Kartografii PW, s. 1-91 oraz 1-155.

Bujakiewicz A., Kowalczyk M., Podlasiak P., Zawieska D., 2006a. Calibration of Very Close Range Digital Cameras. *Geodezja i Kartografia*, Kwartalnik PAN, Vol. 55, No. 2, s. 95-108.

Bujakiewicz A., Kowalczyk M., Podlasiak P., Zawieska D., 2006b. 3D Reconstruction and Modelling of the Contact Surfaces for the Archeological Small Museum Pieces. Po podwójnej recenzji zatwierdzone do wydania w *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.

Hongo K. *et al.*, 2000. Development of Image Based Information System for Restoration of Cultural Heritage. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIII, Part B5. s. 372-378.

Kolbl O., Cherradi F., Hostettler H., 2000. Conception of an Integrated 3D GIS for Primary Data Acquisition and data Management; Applied to an Inventory of Historic Monuments. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIII, Part B5. s. 446-452.

Obdahr T., Chikatsu H., 2004. Development of image based integrated measurement system and performance evaluation for close range application. *The International Archives for Photogrammetry, Remote Sensing*. Vol. XXXV. B5. s. 684-689.

Sawicki P., 2001. Rozwiązanie terratriangulacji łącznie z samokalibracją połową aparatu cyfrowego Kodak DC 4800. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 11b, s. 3/25-3/32.

Sawicki P., 2003. Kalibracja równoczesna aparatu cyfrowego Kodak DC4800 w procesie fotogrametrycznego pomiaru punktów w bliskim zasięgu. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 13b, s. 457-466.

Tsioukas V., Patias P., Jacobs P.F., 2004. A Novel system for 3D reconstruction of small archeological objects. *International Archives for Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXV. B5. s. 815-819.

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w ramach projektu badawczego KBN T12E 033 26.

PHOTOGRAMMETRIC MEASUREMENT OF CONTACT SURFACES OF ARCHAEOLOGICAL SCULPTURE ELEMENTS FOR RELATIVE MATCHING

KEY WORDS: digital photogrammetry, archaeology, contact surface of broken sculpture, 3D visualization

Summary

This paper describes research into photogrammetric reconstruction of 3D models of contact surfaces for pieces of the broken archaeological sculptures. The aim of this research work was to propose a reliable, accurate non-contact method for checking whether the initially chosen parts of the sculpture fit to each other. Such correspondence of the archaeological fragments would allow identifying a more accurate date of the sculpture, on the basis of a comparison of the iconographical and stylistic characteristics. The required high accuracy (0.3÷0.5 mm) of the contact surfaces measurement and necessity of their 3D visualization, have demanded that suitable photogrammetric procedures be proposed. To verify the proposed method, the authors reconstructed and visualized the models of two congruent 3D surfaces of two parts of the broken test stone and thirty-five numerical models of contact surfaces for various types of archaeological pieces from the Egyptian Museum in Cairo and the National Museum in Warsaw.

The applied method for measurement of the contact surfaces is based on digital images taken by the semi-metric digital camera CANON EOS 20D, equipped with three interchangeable lenses, for which a multi variant calibration process was executed before object measurement. The images of the contact surfaces of the sculptures pieces were taken at scales from 1:20 to 1:40, with a base/distance ratio of about 1:4. Before the images were acquired, the objects were placed within a special metal construction with control points especially constructed for the purpose of this project, for which the points spatial coordinates were determined with an accuracy of 0.1 mm.

The 3D model reconstruction and measurement was preceded with image correction for systematic errors, which were determined in the calibration process. The elevation measurement of all surfaces was executed in automatic mode, applying the photogrammetric workstation Z/I Imaging. To analyse the measured surfaces' topography (to be used in the process of their relative fitting) a special computer programme was elaborated for surface visualization in four different forms. The method proposed for 3D surface matching (fitting) and its practical verification has been already completed and will be published separately. The research work has been a part of the project KBN T12E 033 26, supported by the Polish State Committee for Scientific Research.

Prof. dr hab. inż. Aleksandra Bujakiewicz
e-mail: abujak7@wp.pl
tel. +22 2345765

Dr inż. Michał Kowalczyk
e-mail: mikowalczyk@wp.pl
tel. +22 2345764

Dr inż. Piotr Podlasiak
e-mail: ppodlasiak@wp.pl
tel. +22 2345764

Dr inż. Dorota Zawieska
e-mail: dorotaz8@wp.pl
tel. +22 2347587

Inż. Elżbieta Andrzejewska
tel. +22 2347694