

**WERYFIKACJA HIPOTEZ WZAJEMNEJ PRZYNALEŻNOŚCI FRAGMENTÓW
RZEźB POPRZEZ DOPASOWYWANIE ICH POWIERZCHNI PRZEŁAMAŃ**

**VERIFICATION OF HYPOTHESES FOR RELATIVE CORRESPONDENCE
OF THE SCULPTURE PARTS BY MATCHING THEIR CONTACT SURFACES**

Aleksandra Bujakiewicz, Michał Kowalczyk, Piotr Podlasiak, Dorota Zawieska

Instytut Fotogrametrii i Kartografii, Politechnika Warszawska

SŁOWA KLUCZOWE: Archeologia, Model, Dopasowanie, Powierzchnia, Wizualizacja, Baza danych

STRESZCZENIE: W niniejszym artykule zostaną przedstawione badania, będące ostatnią częścią zrealizowanego projektu KBN nr 4T12E03326. Badania te obejmują propozycje dopasowywania przystających fragmentów wybranych rzeźb wspomagające hipotezy archeologów, które dotyczą ich przynależności do tych samych rzeźb. Niniejsza część jest kontynuacją prac badawczych opublikowanych i prezentowanych przez autorów w 2006 roku, dotyczących opracowania metody rekonstrukcji 3D modeli powierzchni przełamań rzeźb oraz jej praktycznej weryfikacji. Dla ustalenia okresu i miejsca pochodzenia rzeźb muzealnych, istotna jest analiza rzeźb możliwie kompletnych, pozwalająca we właściwy sposób zbadać ich cechy ikonograficzne i stylistyczne. Jeśli zatem w oparciu o dane archeologiczne i historyczne zostają przez archeologów wstępnie wytypowane przynależne sobie fragmenty, wówczas poprzez odtworzenie powierzchni przełamań przystających do siebie części można sprawdzić czy one do siebie pasują, a więc można dokonać końcowej weryfikacji czy są one fragmentami tych samych badanych rzeźb. Dotychczasowe proste sposoby stosowane przez archeologów polegają na wykonywaniu odlewów gipsowych badanych fragmentów rzeźb i próbie ich bezpośredniego - manualnego wzajemnego dopasowywania. Jest to sposób uciążliwy i praktycznie nie nadający się do badania dużej liczby eksponatów, rozproszonych w różnych kolekcjach świata. Współczesne metody cyfrowe stwarzają obecnie nowe możliwości dla fotogrametrycznego generowania 3D modeli powierzchni dowolnego kształtu i rozmiaru oraz wymaganej dokładności. Pozyskane przez autorów modele powierzchni przełamań rzeźb zostały wygenerowane zgodnie z wcześniej założoną dokładnością $0.3 \div 0.5$ mm. Postać cyfrowa 3D modeli powierzchni pozwala na ich wizualizację w takiej postaci jaka jest korzystna dla analiz topografii powierzchni, dalszych przetworzeń, w tym dopasowania do siebie dwóch powierzchni oraz dla ich archiwizacji w archeologicznej bazie danych. W celu dopasowywania przystających powierzchni przełamanych fragmentów rzeźb autorzy zaproponowali metodę bazującą na funkcji wykorzystującej cechy prymitywne, tj. cechy wynikające bezpośrednio z geometrycznego kształtu obiektów pokrywających powierzchnie. Funkcja celu zawiera warunek minimum sumy odległości pomiędzy dwiema powierzchniami oraz dodatkowo drugi składnik wynikający z faktu niepokrywania się zasięgów powierzchni. Metoda została zweryfikowana na podstawie dopasowania odpowiadających sobie powierzchni przełamania dwóch części testowego kamienia oraz kilku fragmentów rzeźb archeologicznych, o różnych zniszczeniach powierzchni przełamań. Opracowana została także koncepcja specjalistycznej bazy danych dla archiwizacji danych archeologicznych i geometrycznych rzeźb. Funkcje bazy pozwalają na wstępne wyszukiwanie określonych rzeźb lub ich części.

1. WPROWADZENIE

W niniejszym artykule zostaną przedstawione badania, będące ostatnią częścią zrealizowanego projektu KBN nr 4T12E03326. Przedmiotem tego projektu było zbadanie możliwości zastosowania metody fotogrametrycznej dla precyzyjnej rekonstrukcji powierzchni przełamanych przystających fragmentów rzeźb i w konsekwencji ich wzajemne dopasowywanie. W muzeach i światowych kolekcjach znajduje się wiele fragmentów różnych rzeźb dla których istnieją pewne hipotezy odnośnie ich pochodzenia. Połączenie kilku fragmentów w jedną całość może dostarczyć archeologom szereg istotnych informacji, które na podstawie porównania cech stylistycznych czy ikonograficznych pozwolą dokładniej ocenić datę pochodzenia badanej rzeźby. Jeśli dla wybranej rzeźby zostaną wstępnie wytypowane jej fragmenty, na podstawie ogólnych cech, takich na przykład jak, rodzaj rzeźby, materiał, miejsce archiwizacji, to na podstawie dopasowywania zrekonstruowanych 3D powierzchni przełamania, będzie można wiarygodnie potwierdzić, czy są one częściami tej samej rzeźby.

Stosowane dotąd przez archeologów metody tradycyjne, polegające na wykonywaniu gipsowych odlewów badanych części i próbie ich manualnego wzajemnego dopasowywania, nie nadają się do powszechnego użycia dla badania dużej liczby eksponatów rozproszonych w różnych kolekcjach świata. Współczesne metody pozyskiwania i przetwarzania obrazów i modelowania powierzchni stwarzają obecnie nowe możliwości. Cyfrowe technologie fotogrametrii bliskiego zasięgu pozwalają dokładnie rekonstruować i automatycznie mierzyć 3D modele powierzchni przełamanych fragmentów rzeźb, a metody numerycznego modelowania i dopasowywania odpowiadających sobie powierzchni umożliwiają szybkie, automatyczne i bezkontaktowe rozwiązanie tego zadania.

Proponowana przez autorów metoda, dotycząca precyzyjnej rekonstrukcji 3D powierzchni, utworzonych z przełamanych niewielkich rzeźb archeologicznych, została przedstawiona szczegółowo w roku 2006 na Sympozjum V Komisji ISPRS w Dreźnie oraz na Sympozjum PTFiT w Jabłonkach [Bujakiewicz, Kowalczyk, Podlasiak, Zawieska, 2006^{a,b}]. Względny ekonomiczny, dokładnościowy i zwykle trudny dostęp do badanych eksponatów w muzeach, determinowały główne założenia zastosowanego pomiaru fotogrametrycznego. Zaproponowana metoda pomiaru fotogrametrycznego bazowała na obrazach w bardzo dużej skali (1:20 ÷ 1:40), wykonanych semi-metrycznym aparatem cyfrowym typu lustrzanka (CANON EOS 20D) z wymiennymi obiektywami. Badane rzeźby muzealne umieszczano wewnątrz specjalnej przestrzennej konstrukcji szkieletowej z punktami osnowy. Pomiar wysokościowy powierzchni przełamanych rzeźb został wykonany w trybie automatycznym na fotogrametrycznej stacji cyfrowej Z/I Imaging. Liczba punktów, pozwalających odtworzyć model powierzchni z odpowiednią dokładnością (rzędu 0.3 ÷ 0.5 mm) i szczegółowością, osiągała kilku tysięcy.

W projekcie zostało odtworzonych 35 powierzchni przełamanych, w tym dwie odpowiadające sobie powierzchnie (tzw. testowe) były częściami kamienia granitowego, przełamane (pod szczególną kontrolą) dla celu projektu. Pozostałe 33 powierzchnie stanowiły powierzchnie przełamanych fragmentów rzeźb (torsów, głów, kamiennych płyt i naczyń), pochodzących z Muzeum Egipskiego w Kairze oraz Muzeum Narodowego w Warszawie (z których tylko połowa miała swoje odpowiedniki, a więc tylko one mogły stanowić podstawę do dalszych badań, dotyczących ich automatycznego dopasowywania).

Przed przystąpieniem do etapu dopasowywania powierzchni, należało przeprowadzić odpowiednią wizualizację rzutu perspektywicznego 3D modeli oraz ich wzajemną orientację w celu możliwości dokonania analizy topografii dwóch przylegających powierzchni przełamania. Po wnikliwych analizach topografii powierzchni przełamania różnego rodzaju fragmentów rzeźb, z czterech badanych wariantów wizualizacji, wybrano rzut perspektywiczny w postaci powierzchni cieniowanej.

2. ZAŁOŻENIA PROPONOWANEJ METODY DOPASOWYWANIA POWIERZCHNI

Dopasowywanie odpowiadających sobie dwóch powierzchni może być wykonywane automatycznie, dzięki wyekstrahowanym na nich wybranym cechom. Takie cechy mogą odnosić się do różnego rodzaju rzeczywistych danych charakteryzujących powierzchnie, tzw. prymitywnych lub mogą być zdefiniowane matematycznie z użyciem geometrii różniczkowej i rachunku całkowego przez tzw. cechy wysokiego poziomu. Kilka teoretycznych propozycji dla metod dopasowania dwóch powierzchni jest przedstawionych przez [Luong Ching Ke, 2005]. W celu dopasowania do siebie dwóch powierzchni, które zostały wcześniej zrekonstruowane, jedna z nich musi dokonać ruchu względem drugiej. Zostanie to osiągnięte, jeśli taki ruch zminimalizuje funkcję celu, opisującą różnicę pomiędzy tymi powierzchniami. Większość istniejących metod dopasowania powierzchni bazuje na mierze podobieństwa lub funkcji wykorzystujących cechy prymitywne, tj. cechy wynikające bezpośrednio z geometrycznego kształtu obiektów pokrywających powierzchnie [Habib et al., 2000; Schenk et al., 2000]. Wykorzystywane funkcje celu dopasowania powierzchni, nie wymagają realizacji procesu ekstrakcji cech szczegółów, wykorzystywane są bezpośrednio do tego współrzędne punktów powierzchni i ich topologie. Jednakże, w takich przypadkach różnica orientacji dwóch dopasowywanych powierzchni nie powinna być duża, a zatem należy dokonać wstępną przybliżoną transformację przed etapem właściwego dopasowania.

Podstawowym założeniem zaproponowanej przez autorów metody dopasowania powierzchni było określenie funkcji celu, czyli miary dopasowania, jako średniej odległości punktów jednej powierzchni od aproksymowanej trójkątami drugiej powierzchni. Analiza teoretyczna problemu oraz realizacja kolejnych eksperymentów umożliwiła autorom sformułowanie kilku następujących głównych założeń:

- Powierzchnie określone były przez podanie współrzędnych w siatce regularnej (DTM typu GRID) w różnie zorientowanych układach współrzędnych, przy założeniu niezmienności skali.
- Powierzchnie były wzajemnie dopasowywane poprzez przesunięcie i obrót jednej z nich względem drugiej, bez zmiany skali, czyli transformacją opisaną sześcioma parametrami. Taka transformacja była możliwa ponieważ niezmiennosc skali trójwymiarowych modeli dwóch odpowiadających sobie powierzchni była zabezpieczona w trakcie ich fotogrametrycznej rekonstrukcji.
- W celu skompensowania różnych rozmiarów dopasowywanych powierzchni (ma to miejsce w przypadku różnych zniszczeń muzealnych rzeźb), do podstawowego założenia przy wyborze funkcji celu, należało dodać drugi składnik opisujący stopień braku wykorzystania odpowiadających sobie punktów, wynikający z faktu niepokrywania się zasięgów powierzchni.

- Wartości parametrów zostały wyznaczone poprzez minimalizację funkcji celu w funkcji parametrów, przy wykorzystaniu standardowych metod optymalizacji (bezgradientowych).

Zaproponowana metoda umożliwia uzyskanie zadawalających wyników, pod warunkiem prawidłowego dobrania współczynnika proporcjonalności pomiędzy obydwoma składnikami funkcji celu. Okazało się jednak, że wyznaczenie pojedynczej wartości funkcji celu jest bardzo czasochłonne, ponieważ wymaga sprawdzenia każdego punktu jednej powierzchni ze wszystkimi trójkątami drugiej powierzchni. W praktycznej realizacji wykorzystano fakt, iż wszystkie współczesne komputery klasy PC wyposażone są w specjalizowane procesory graficzne GPU (Graphics Processor Unit), które wykorzystują metodę tzw. Bufora Z. Jednym z zadań tworzenia grafiki jest wyznaczanie widoczności obiektów. Procesor GPU jest wyposażony w specjalizowane jednostki, które wykonują takie operacje jak transformacje układu współrzędnych (translacje i obroty) oraz interpolacje powierzchni trójkątów wielokrotnie szybciej niż jednostka centralna. Dostęp do tych funkcji jest możliwy między innymi za pomocą funkcji OpenGL. Tak więc określenie funkcji celu przy wykorzystaniu GPU polegało na:

- wyznaczeniu różnicy buforów Z dla odpowiadających siatek trójkątów obu powierzchni, z których była obliczana średnia przeskalowana odległość pomiędzy powierzchniami, oraz
- określaną była liczba pikseli dla drugiego składnika celu.

Do optymalizacji funkcji celu zastosowano bezgradientową metodę Hooke'a-Jeevesa.

Zgodnie z głównymi założeniami proponowanej metody dopasowania dwóch przystających powierzchni przełamania, opracowany moduł programowy realizuje proces transformacji w dwóch etapach; (1) transformacji wstępnej, na podstawie wyboru trzech odpowiadających (w przybliżeniu) punktów na zrekonstruowanych i wizualizowanych powierzchniach, pozycjonując ich położenie poprzez kropki w różnych kolorach, oraz (2) etap optymalizacji, w którym transformacja jest dokonywana na podstawie dużych zbiorów punktów, rozmieszczonych na wspólnych fragmentach obu powierzchni. W celu dokonania pierwszego etapu dopasowania, opracowana została graficzna metoda wskazywania trzech punktów wspólnych dla obu powierzchni. Wymagało to analizy topografii dwóch przylegających powierzchni przełamania rzeźby, na podstawie ich wizualizowanych rzutów perspektywicznych w postaci powierzchni cieniowanej.

3. PREZENTACJA I ANALIZA WYNIKÓW DOPASOWANIA POWIERZCHNI

W celu przejrzystej prezentacji wyników i możliwości ich właściwej analizy, dla każdego przykładu dopasowania dwóch przystających powierzchni, przedstawiono:

(1) Rzuty perspektywiczne w postaci powierzchni cieniowanej dla dwóch zrekonstruowanych przystających do siebie powierzchni, z trzema punktami sobie odpowiadającymi (kropki w różnych barwach), wybranymi na każdej z nich na podstawie analizy ich topografii. Punkty te są wykorzystane dla wstępnej transformacji.

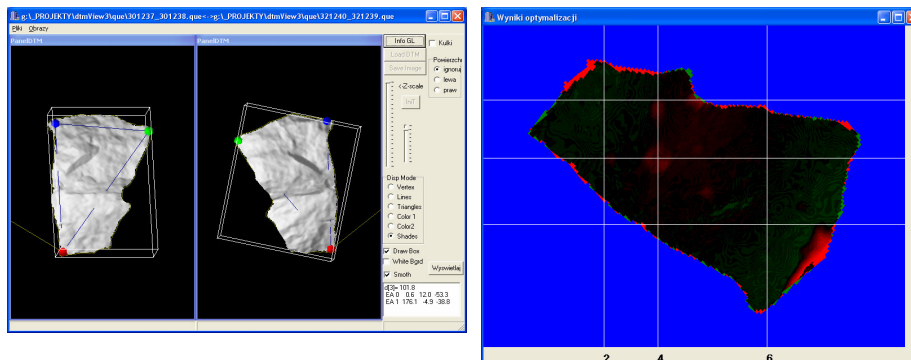
(2) Rozmieszczenie przestrzenne względnych odchyłań w dopasowaniu powierzchni po etapie ostatecznego wyrównania, zaznaczone barwami; czarny kolor oznacza najlepsze

dopasowanie, kolory zielony i czerwony – odchyłki rosnące odpowiednio w kierunku dodatnim i ujemnym.

(3) Względne odchylenia w dopasowaniu powierzchni prezentowane w formie przekrojów, które wybiera się dowolnie w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach.

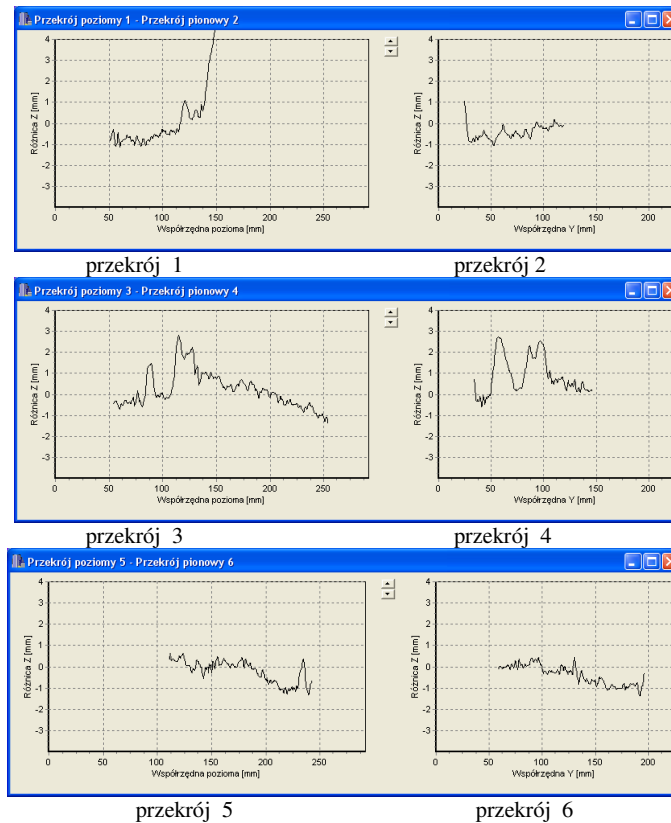
(4) Charakterystyki ostatecznego wyrównania; błąd dopasowania obu przystających powierzchni – RMS, liczba punktów interpolowanych, biorących udział w procesie optymalizacji.

Na rys.1a÷c przedstawione są wyniki dopasowania powierzchni przełamanej dla celu obiektu kamienia testowego, który jest symulacją rzeźby (a nie rzeczywistym obiektem archeologicznym). Oznacza to, że jego przystające powierzchnie przełamania nie są zniszczone erozją i sposobem rozbicia, jak jest to w przypadku rzeczywistych rzeźb. Zatem kształt obu przystających powierzchni jest bardzo podobny (krawędzie i topografia), a więc dopasowanie powinno być dobre i może świadczyć o dokładności proponowanej metody. Rys. 1a przedstawia dwie przystające powierzchnie kamienia w postaci powierzchni cieniowanej z trzema odpowiadającymi sobie punktami. Przystające powierzchnie są wzajemnie uzupełniające, tj. topografia powierzchni przełamania tych części wzajemnie się dopasowuje (jedna jest odbiciem zwierciadlanym drugiej z pseudoskopową topografią). Rys 1b pokazuje rozmieszczenie przestrzenne odchyłań w dopasowaniu powierzchni kamienia zaznaczone kolorami, natomiast rys. 1c przedstawia te odchylenia w postaci sześciu wybranych przekrojów wzdłuż i w poprzek powierzchni kamienia.



Rys. 1a Rzuty perspektywiczne w postaci powierzchni cieniowanej dla dwóch przystających powierzchni kamienia testowego, z trzema odpowiadającymi sobie barwnymi punktami.

Rys 1b Rozmieszczenie przestrzenne względnych odchyłań w dopasowaniu powierzchni kamienia testowego, zaznaczone barwami (czarny kolor– najlepsze dopasowanie). Parametry wyrównania: RMS= 1.1mm, liczba pkt. 116734 (białe linie – miejsca przekrojów)



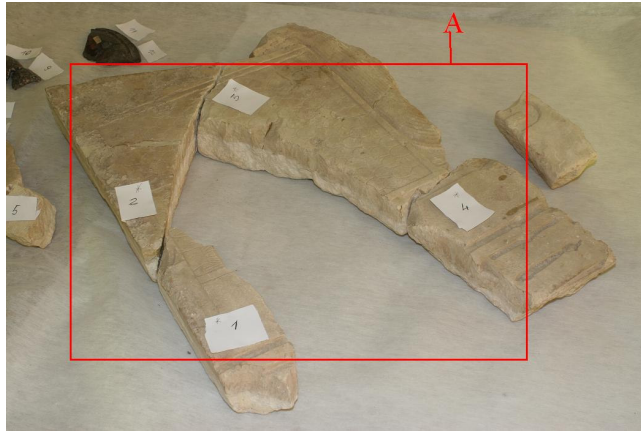
Rys. 1c. Odchylenia w formie sześciu wybranych przekrojów wzdłuż (nr nieparzyste) i w poprzek (nr parzyste) powierzchni przełamania kamienia

Jak wynika z rysunków 1 (b-c), dopasowane do siebie powierzchnie charakteryzują się jednorodną przestrzenną dokładnością dopasowania na prawie całym obszarze. Świadczy o tym czarna barwa pokrycia powierzchni, odpowiadająca najmniejszym szcztąkowym odchyłkom, w zakresie od -1 do $+1$ mm. Dalsza analiza odchyłek na powierzchni wskazuje, na małe dwa koliste obszary w środkowej jej części, w której wielkości odchyłek ze znakiem dodatnim się zwiększają (ciemno czerwony kolor). Odpowiadają one lokalnemu wylupaniu, w kształcie dziury o stromych ścianach, na jednej z dwóch przystających powierzchni, dla której automatyczny pomiar był zakłócony. Zakres maksymalnych wielkości odchyłeń między powierzchniami wzdłuż 6 przekrojów, mieszczą się średnio w granicach od $+2.5$ mm do -1.9 mm. Rozkład odchyłeń wzdłuż przekrojów wykazuje w większości charakter normalny. Tylko w przekrojach które przechodzą przez wspomniane nieregularności na powierzchni kamienia, można zaobserwować zakłócenia w rozkładzie normalnym odchyłek. Oszacowany średni kwadratowy błąd dopasowania powierzchni RMS wynosi ± 1 mm.

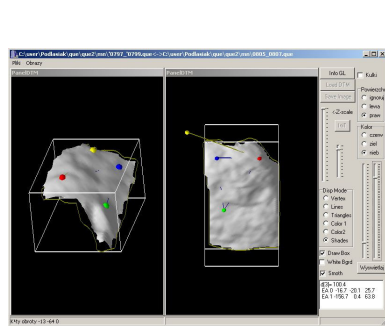
Na podstawie pozytywnych wyników testowania proponowanej metody dopasowania przystających powierzchni przełamania kamienia testowego, została dokonana jej weryfikacja w odniesieniu do rzeczywistych rzeźb archeologicznych. Z 33 powierzchni, zrekonstruowanych dla kilkunastu rzeźb różnego typu (statuetki, płyty kamienne, naczynia, itp.) z Egipskiego Muzeum w Kairze i Narodowego Muzeum w Warszawie, połowa badanych fragmentów rzeźb nie miała swoich przynależnych przystających fragmentów. Dla części rzeźb z Muzeum w Warszawie, zawierających płytkie naczynia (kamienna miseczka i kamienny talerz), przystające powierzchnie przełamania zostały zrekonstruowane, jednakże nastąpiły trudności z ich dopasowaniem ze względu na bardzo wąskie odtworzone powierzchnie z niewielką liczbą pomierzonych punktów. Dla nich należałoby wykonać zdjęcia w większej skali. W rezultacie, dla weryfikacji proponowanej metody dopasowania, wybrano sześć fragmentów rzeźb należących do dwóch płyt kamiennych z wypukłym reliefem z Muzeum Narodowego w Warszawie.

Na rysunku 2 pokazano jedną z dwóch płyt kamiennych (kod 149 046) przełamaną w trzech miejscach, z których przykładowo dla jednego przedstawiono wyniki dopasowania przystających powierzchni (A1/A2 i A2/A1) na rysunkach 3 (a - c).

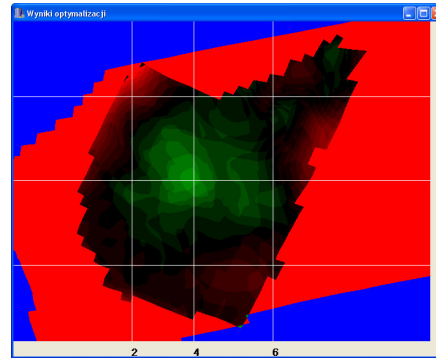
Analizując na rys. 3a parę przystających powierzchni, można zauważyć, że wzajemnie usytuowane dwie powierzchnie różnią się kształtem krawędzi, jednakże można zidentyfikować podobieństwo elementów topograficznych na odpowiadających sobie obszarach powierzchni, co ułatwia wybór przybliżonego położenia trzech punktów dla wstępnej transformacji.



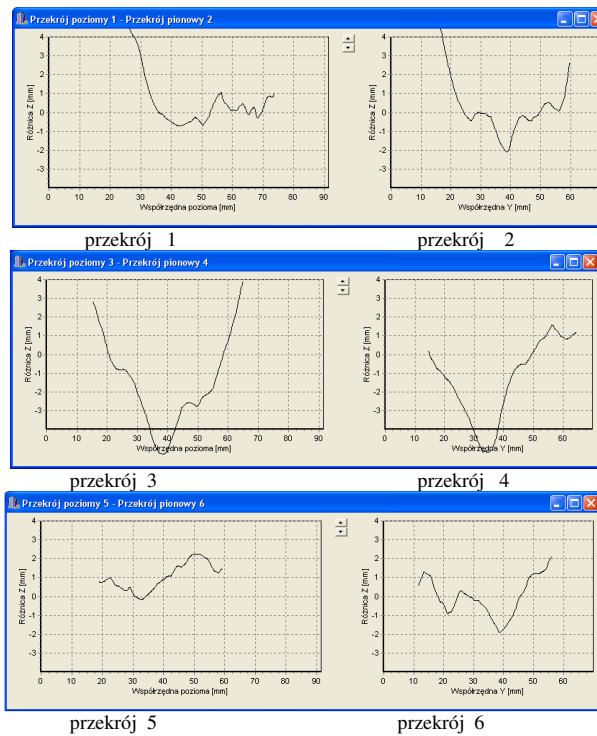
Rys 2. Rzeźba typu płyta kamienna (kod 149 046) przełamana w trzech miejscach, z których dla jednego (A1/A2) przedstawiono wyniki.



Rys. 3a Powierzchnie cieniowane dla dwóch przystających powierzchni przełamania A1/A2 i A2/A1 z trzema punktami odpowiadającymi sobie.



Rys 3 b Rozmieszczenie przestrzenne względnych odchyleń w dopasowaniu powierzchni przełamania A1/A2 - A2/A1 rzeźby typu płyta kamienna. Parametry wyrównania: RMS=1.9 mm, l. pkt. inter.132130. (białe linie – miejsca przekrojów)

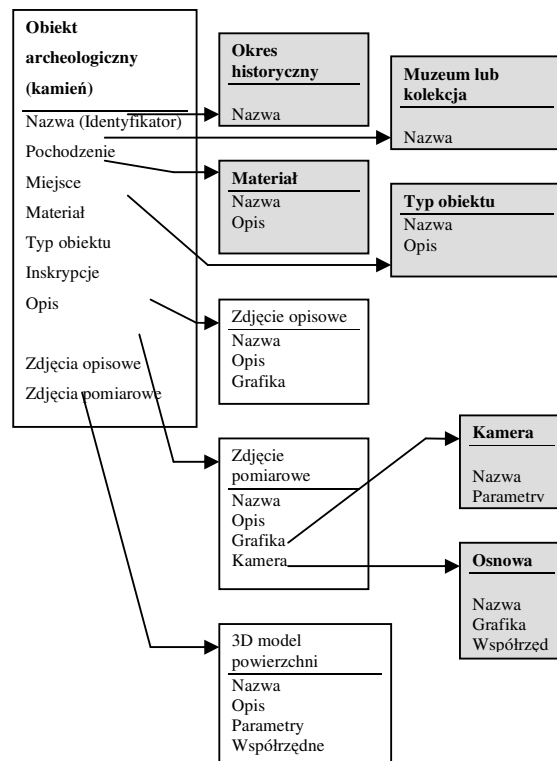


Rys. 3 c Odchylenia w sześciu wybranych przekrojach wzdłuż i w poprzek powierzchni.

Jak wynika z analizy rysunku 3b, dopasowane do siebie powierzchnie przełamań fragmentów rzeźby, charakteryzują się przestrzenną dokładnością dopasowania już nie tak jednorodną dla całego obszaru, jak było to w przypadku kamienia testowego. Świadczy o tym większe zróżnicowanie w barwach pokrywających powierzchnie dopasowania. Można zauważyć, że jakkolwiek kolorem czarnym lub ciemno szarym, odpowiadającym najmniejszym szczałkowym odchyłkom, są pokryte znaczne obszary powierzchni, to jednak występuje także więcej obszarów pokrytych kolorem zielonym i czerwonym, odpowiadającym zwiększonym odchyleniom ze znakiem ujemnym i dodatnim. Ponadto ze względu na niejednoznaczność interpretacji krawędzi, okalających przystające powierzchnie przełamań, dokładności znacznie spadają na brzegach powierzchni. Analiza wykresów na rysunku 3c wskazuje, że zakres maksymalnych wielkości odchyień między powierzchniami wzdłuż 6 przekrojów mieści się w granicach -5 mm do $+5$ mm, a oszacowany średni kwadratowy błąd wynosi ± 1.9 mm. Dla pozostałych dwóch przełamań tej rzeźby (A2/A3 – A3/A2 oraz A3/A4 – A4/A3), wielkości RMS wynoszą odpowiednio ± 2.5 mm i ± 2.4 mm.

4. KONCEPCJA SPECJALISTYCZNEJ BAZY DANYCH O RZEŻBACH

Celem opracowania tego rodzaju bazy danych jest usystematyzowanie informacji archeologicznych i geometrycznych, dotyczących rzeźb archeologicznych znajdujących się w licznych światowych zbiorach i skojarzenie ze sobą przynależnych do siebie fragmentów. Identyfikacja fragmentów rzeźb odbywa się na podstawie znajomości pewnej grupy cech, którymi się charakteryzują. Spośród nich najważniejsze to: materiał z którego wykonana jest rzeźba, typ fragmentu rzeźby - wizualnie jednoznacznie rozpoznany, pochodzenie czyli okres na który datowany jest obiekt. Uzupełnieniem wymienionych cech jest jeszcze opis obiektu oraz podanie odczytanych inskrypcji (o ile występują na obiekcie). Dodatkowo określa się nazwę muzeum lub zbioru w którym aktualnie przechowywana jest rzeźba. Schemat struktury bazy danych dla rzeźb pokazany jest na rysunku 4. Cześć opisową uzupełnia zestaw zdjęć danego obiektu, pokazujący jego wygląd z różnych stron. Wstępna selekcja odbywa się na podstawie niektórych wymienionych cech obiektu. Po wybraniu grupy teoretycznie pasujących elementów większej całości, następuje porównanie zmierzonych wcześniej modeli powierzchni styku, należących do oddzielnych obiektów bazy danych. Dla dokonania tego, z każdym obiektem (fragmentem rzeźby) jest skojarzony osobny zbiór zawierający modele powierzchni przełamania rzeźby. Do powstałego w ramach projektu zbioru informacji zostało obecnie włączonych 6 rzeźb znajdujących się w Egipskim muzeum w Kairze i 9 z Muzeum Narodowego w Warszawie. Każdy fragment rzeźby jest odpowiednio oznaczony i posiada wyznaczone, za pomocą automatycznego pomiaru fotogrametrycznego, numeryczne modele powierzchni przełamania. Zaprojektowane funkcje bazy pozwalają na wstępne wyszukiwanie, według przyjętego kryterium, określonych rzeźb lub ich części, znajdujących się w różnych muzeach, a także archiwizację wszystkich wygenerowanych 3D powierzchni przełamań, które są odpowiednio parami umieszczane w bazie. Opracowana wstępnie koncepcja bazy wymaga dalszych modyfikacji w celu udoskonalenia jej działania.



Rys. 4. Schemat struktury bazy danych dla rzeźb archeologicznych

5. PODSUMOWANIE

W trakcie dopasowywania przystających powierzchni rzeczywistych rzeźb archeologicznych stwierdzono, że kształt krawędzi przystających powierzchni jest często różny, czego powodem może być zniszczenie rzeźby na jego brzegach, lub brak możliwości ich dokładnej identyfikacji w trakcie pomiaru fotogrametrycznego. Zauważono jednak, że wektoryzowane krawędzie rzeźb nie wspomagają procesu dopasowania, a topografia przystających powierzchni przełamań jest w zasadzie zachowana w takim stopniu, że jest możliwe przeprowadzenie procesu numerycznego dopasowania. Różne lokalne zniszczenia przystających powierzchni, mogą obniżyć dokładność ich dopasowywania, ale pozwalają ocenić ich przynależność do siebie. W celu dopasowania odpowiadających sobie powierzchni przełamań fragmentów rzeźby, zrekonstruowanych fotogrametrycznie, należy dokonać ich wizualizacji w odpowiedniej postaci. Należy jednak zwrócić szczególną uwagę, aby dopasowywane powierzchnie zawierały wystarczająco duże zbiory pomierzonych automatycznie punktów na powierzchniach, gdyż w przeciwnym

przypadku zadanie jest niewykonalne. Aby to uzyskać w przypadku rzeźb o wąskich powierzchniach przełamań należy znacznie zwiększać skalę obrazów. Osiągnięte w projekcie dokładności dopasowania badanych powierzchni, wynosiły w granicach od 1 mm (dla kamienia testowego) do 2.5 mm dla rzeczywistych rzeźb. Badania powinny być dalej kontynuowane w celu objęcia nimi szerokiego zakresu typów i rozmiarów rzeźb.

Zaprojektowana specjalistyczna baza danych powinna mieć taką strukturę aby pozwalała na wprowadzenie poza danymi archeologicznymi dane geometryczne, a także wizualizowane powierzchnie przełamań rzeźb. Odpowiednio zaprojektowane funkcje bazy powinny umożliwić weryfikację hipotez stawianych przez archeologów, odnośnie przynależności określonych fragmentów do tej same rzeźby. Opracowana w projekcie baza danych spełnia takie założenia, ma jednak charakter eksperymentalny i z uwagi na złożoność problemów ma charakter dynamiczny i powinna być rozwijana w dalszych projektach badawczych.

6. LITERATURA

Bujakiewicz, Kowalczyk, Podlasiak, Zawieska, 2006a.: 3D Reconstruction and Modelling of the Contact Surfaces for the Archeological Small Museum Pieces. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVI Part 5. pp. 56-61

Bujakiewicz, Kowalczyk, Podlasiak, Zawieska, Andrzejewska, 2006b.: Fotogrametryczny pomiar powierzchni przełamań rzeźb archeologicznych w celu ich wzajemnego dopasowania. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*. Vol. 16. pp. 97-110.

Habib A., Kelly D., Asmamaw A., 2000.: New approach to solving matching problems in photogrammetry. *IAPRS*, Vol. 33, part B2, pp. 257-264.

Luong Chinh Ke, 2005.: Podstawy teoretyczne metod dopasowania powierzchni z wykorzystaniem cech wysokiego poziomu. *Prace Naukowe PW Geodezja*, z.40. pp 3-60.

Schenk T., Krupnik A., Postolov J., 2000.: Comparative study of surface matching algorithms. *IASPRS*, Vol. 33, part B4, pp. 518-524.

VERIFICATION OF HYPOTHESES FOR RELATIVE CORRESPONDENCE OF THE SCULPTURE PARTS BY MATCHING THEIR CONTACT SURFACES

KEY WORDS: Archaeology, Model, Matching, Surface, Visualisation, Database

SUMMARY: The present paper presents results of the research which is a final part of the KBN 4T 12E03326 project. The aim of this research was to propose a reliable method for matching of 3D contact surfaces for parts of archeological broken sculptures. To establish more accurate origin of the sculpture, analysis of the iconographical and stylistic characteristics of the whole object is valuable. Therefore, if the parts of sculptures are initially chosen base on the archeological data, a match between their corresponding contact surfaces can support the archaeologists' hypotheses on their origin. Simple manual methods, applied by the archaeologists for checking whether two adjoining

parts of sculpture fit to each other, use the plaster casts for covering the contact surfaces of those parts. Such approach, however, is not suitable for checking a huge number of items. Modern digital methods have been applied by authors for the reconstruction of 3D models of contact surfaces with accuracy of $0.3 \div 0.5$ mm. Digital form of 3D models of those surfaces allows for their visualisation which is required for topography analysis and their matching and also for storage data in the archaeological database. Details of photogrammetric method and results obtained by authors for reconstruction and automatic measurement of 3D models of 3D contact surfaces for parts of archeological sculptures were presented by authors in 2006.

The proposed method for matching of 3D contact surfaces of each two adjoining parts is based on a function which applies the primitive features directly related to the geometric shape of surface' features. The objective function consists of a least square condition for distances between two surfaces and, in addition, the second condition resulted from not covering of the entire areas of two surfaces. The proposed method has been verified by matching two contact surfaces of two parts of granite stone (broken under control for the purpose of this project), and with a few fragments of the archaeological sculptures, which have had various destruction of the contact surfaces. In addition, a concept of database for archiving archaeological and geometrical data for sculptures was also proposed. The functions of this database allow to find, in the initial stage, the most likely parts of the particular sculpture on base of the characteristics suggested by the archaeologists

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