

**ODTWORZENIE PRZESTRZENNEGO KSZTAŁTU POWIERZCHNI
NIEWIELKIEGO OBIEKTU ARCHEOLOGICZNEGO
NA PODSTAWIE NIEMETRYCZNYCH ZDJĘĆ CYFROWYCH**

**RECONSTRUCTION OF THE SPATIAL SHAPE
OF A SMALL ARCHAEOLOGICAL OBJECT
BASED ON DIGITAL NON-METRIC PHOTOGRAPHS**

Małgorzata Kaczmarczyk, Michał Kowalczyk

Instytut Fotogrametrii i Kartografii, Politechnika Warszawska

SŁOWA KLUCZOWE: archeologia, inwentaryzacja, fotogrametria, model, amfora.

STRESZCZENIE: Archeologia korzysta często z zaawansowanych narzędzi pomiarowych do rekonstrukcji rozmieszczenia, kształtu i charakteru obiektów pozyskanych z wykopalisk. Fotogrametria bliskiego zasięgu prowadzi bardzo efektywnie do uzyskania szybkich i rzetelnych rezultatów w tej dziedzinie. Niniejszy referat prezentuje doświadczenia związane z odtworzeniem kształtu trójwymiarowego modelu starożytnej amfory, wykorzystując zdjęcia wykonane amatorskim aparatem cyfrowym. Zastosowane były różne podejścia przy wykorzystaniu zestawu stereogramów. W procesie korelacji obrazów użyta była naturalna tekstura obiektu i nie rzutowano na obiekt żadnych wzorów. Do wykonania trójwymiarowego modelu amfory posłużyły dwa fotogrametryczne pakiety; Orient/Orpheus i Z/I Imaging, do orientacji modelu i pomiarów. W eksperymentach występowały trzy różne konfiguracje osnowy pomiarowej. Pierwszy, oparty na obracającej się okrągłej tarczy, gdzie sygnalizowane punkty były umieszczone dookoła amfory, symetrycznie w pobliżu brzegów tarczy. Obiekt stał na płaszczyźnie tarczy. To podejście stworzyło znaczne problemy związane ze stabilnością wyrównania i zastosowaniem aplikacji przeznaczonych dla fotogrametrii lotniczej do pracy z zadaniem fotogrametrii bliskiego zasięgu. Drugie podejście zakładało umieszczenie amfory wewnątrz przestrzennej ramy referencyjnej z sygnalizacją punktów w postaci kół. Taka konfiguracja była bardzo obiecująca, ale występował wciąż problem z niezgodnym z lotniczym kierunkiem osi układu współrzędnych i znacznym kątem pomiędzy płaszczyznami sygnalizacji punktów i płaszczyzną łową w kamerze. Trzeci eksperyment, w którym trójwymiarowa rama także obejmowała obiekt, ale oś Z biegła równoległe do osi celowej kamery, dostarczył najlepsze wyniki. Trójwymiarowy model przestrzenny ostatecznie wygenerowany został przy tym ustawieniu. Jedyną trudną kwestią konieczną do rozwiązania było połączenie kilku modeli przestrzennych powierzchni, pozyskanych z każdego stereogramu, w jeden, mający jednolity układ współrzędnych. Jednym z głównych celów, wykonywanych badań, jest wprowadzenie automatyzacji procesu technologicznego pozyskania kształtu niewielkich obiektów, ponieważ konieczne jest zmierzenie znacznej liczby obiektów archeologicznych i bez postępu w tym zakresie nie byłoby to możliwe.

1. CELE ODTWORZENIA KSZTAŁTU OBIEKTU ARCHEOLOGICZNEGO

Podstawowym celem rekonstrukcji kształtu i w ogóle postaci obiektów pochodzących z wykopalisk archeologicznych jest zachowanie dziedzictwa kulturowego, a więc możliwości pokazania współczesnym zabytków przeszłości w stanie jak najmniej zniekształconym i odkrycia prawdy na temat czasów minionych. Istotne jest ograniczenie do minimum ingerencji w niepowtarzalny i często bardzo kruchy obiekt, którym może być np. starożytna ceramika albo rzeźba.

Obecnie coraz powszechniej stosowaną formą rejestracji pomiarowej obiektów archeologicznych jest trójwymiarowy model powierzchni wraz z zapisaniem tekstury odzwierciedlającej zróżnicowanie barwy, którą ta powierzchnia nadaje odbitemu światłu. Pilna potrzeba utrwalenia bardzo wielu fragmentów ceramiki i nie tylko (także rzeźb) wynika ze stałego ich niszczenia w magazynach muzealnych (Mara *et al.*, 2003). Jeżeli nie zostaną one szybko zarejestrowane, może nastąpić ich bezpowrotna utrata. Poza samą dokumentacją zabytków, modele wykorzystuje się również do rekonstrukcji konserwatorskich, seryjnego wytwarzania replik obiektów, a także do zasilania muzealnych baz danych (Tyszczyk, 2003).

2. METODY FOTOGRAMETRYCZNEGO OPRACOWANIA MODELU

W fotogrametrii istnieje wiele podejść do zagadnienia odtworzenia kształtu przestrzennego bryły. Dopuszczalne jest nawet stwierdzenie, że głównym celem fotogrametrii jest wyznaczanie wzajemnego położenia punktów w przestrzeni, a więc odtwarzania postaci większych obiektów składających się właśnie z pojedynczych punktów o znanych współrzędnych w trzech wymiarach.

Starając się poprawnie zarejestrować obiekt znajdujący się w bliskim zasięgu kamery można nim w znacznym stopniu manipulować. Ekspozycje archeologiczne charakteryzują się jednak unikalnością i wrażliwością na wszelkie czynniki zewnętrzne, mogące je uszkodzić. Należy więc zachować ostrożność i stosować jak najbezpieczniejszą technikę pomiarową. Niedopuszczalne jest umieszczanie na zabytkowym obiekcie znaków, służących do jednoznacznej identyfikacji punktów. Pozostaje zagospodarowanie jego najbliższego otoczenia.

Większość klasycznych metod fotogrametrycznych opiera się na pomiarze punktów, które pozwalają powiązać sieć wykonanych zdjęć w jedną całość (Kuzu *et al.*, 2003; Sormann *et al.*, 2005). Pewna grupa spośród tych punktów umożliwia związanie wyznaczanych współrzędnych z jakimś znanym układem zewnętrznym. Pojawia się potrzeba sygnalizowania punktów w pobliżu badanego obiektu.

Konieczna jest widoczność w polu widzenia kamery elementów pozwalających jednoznacznie określić skalę budowanego modelu na fotografowanej scenie, zawierającej obiekt. Niekiedy dostęp do eksponatu jest bardzo ograniczony i umieszczanie w jego otoczeniu jakichkolwiek elementów jest niemożliwe. Należy wtedy mieć przygotowane różne podejścia fotogrametryczne, dostosowane do panujących warunków w muzeum lub w obrębie archeologicznego stanowiska terenowego.

W fotogrametrii bliskiego zasięgu niezwykle pomocna jest możliwość manipulowania oświetleniem (Mara *et al.*, 2003; Skarlatos *et al.*, 2003), z reguły niedostępna dla fotogrametrii lotniczej. Można przykładowo, rzutować na gładką powierzchnię dowolny wzór, który daje dokładną identyfikację punktów w ten sposób sygnalizowanych. Przy braku takiego rzutowania odnalezienie na jednolitej powierzchni czegokolwiek, nadającego się do identyfikacji na zdjęciach pochodzących z różnych stanowisk aparatu, byłoby niemożliwe.

Do odtwarzania kształtu obiektów stosuje się zwykle klasyczne stereogramy zdjęć lub zdjęcia wykonane w sieci dookoła obiektu (zbieżne), zależnie od sposobu dalszego opracowania (Drap *et al.*, 2003).

Sesję pomiarową można realizować nawet z pojedynczego stanowiska kamery, gdy oświetlenie ma określoną postać i orientację w przestrzeni. Kształt przestrzenny eksponatu zostanie wtedy również odtworzony. W takim przypadku konieczna jest znajomość położenia zarówno stanowiska aparatu jak i źródła światła względem fotografowanego obiektu (Mara *et al.*, 2003). Tabela 1 przedstawia w uproszczeniu przypadki, kiedy należy zastosować oświetlenie do odtworzenia kształtu badanego przedmiotu.

Tabela 1. Możliwość pomiaru kształtu trójwymiarowego obiektów w różnych przypadkach wykorzystania stanowisk kamery i oświetlenia

Powierzchnia obiektu	jednolita		pokryta niejednolitą teksturą	
	jedno	dwa lub więcej	jedno	dwa lub więcej
Stanowiska kamery \ Dodatkowe oświetlenie:				
brak	-	-	-	+
występuje nieznana orientacja	-	+	-	+
występuje znana orientacja	+	+	+	+

Jeżeli wykorzystywane jest pojedyncze stanowisko kamery względem obiektu, to za pomocą odpowiednio umieszczonego źródła oświetlenia, rzutowane są na obiekt płaszczyzny światła dające profile lub też wzorce zawierające np. siatkę punktów. Promienie rzutujące światło na obiekt powinny być nierównoległe względem promieni tworzących obraz na płaszczyźnie tłowej kamery. Przecięcie tych elementów tworzy model badanej powierzchni eksponatu.

3. PRÓBA OKREŚLENIA KSZTAŁTU OBIEKTU ZA POMOCĄ DOSTĘPNYCH NARZĘDZI

Celem wykonanych eksperymentów było określenie przydatności dostępnych aplikacji do wyznaczenia kształtu niewielkiego obiektu archeologicznego, którym była replika starożytnej greckiej amfory z okresu klasycznego (ok. 500 lat p.n.e.), wysokości ok. 20 cm. Brane były pod uwagę programy Orient/Orpheus pochodzący z Politechniki Wiedeńskiej oraz zestaw Image Station firmy Intergraph. Rekonstrukcja kształtu

powierzchni obiektu odbywała się na podstawie pomiaru pojedynczych stereogramów obrazów.

Do wykonania zdjęć posłużył aparat cyfrowy Canon EOS 20D (obiektyw $f = 28$ mm, analizator obrazu CMOS: 22.5×15.0 mm, 3504×2336 pikseli), nieprzeznaczony do celów pomiarowych. Kalibracja aparatu została wcześniej wykonana i następnie dane z kalibracji wykorzystano w eksperymentach. Zdjęcia, zaraz po wykonaniu, były korygowane przez przepróbkowanie, znając wykalibrowane parametry błędów systematycznych (dystorsja i afinizm). Odległość aparatu od obiektu, w trakcie sesji, wynosiła około 70 cm.

Konfiguracja stanowiska pomiarowego była przygotowana na różne sposoby, różniące się zarówno postacią osnowy, jak i jej ustawieniem względem stanowisk kamery oraz obiektu:

Pierwszy z nich, stosowany często w tego typu zadaniach, polegał na postawieniu amfory na obrotowej tarczy (Pavelka *et al.*, 2003), (Yılmaz *et al.*, 2004). Tarcza ta miała naniesioną sygnalizację punktów referencyjnych na obwodzie (rys. 1). Stanowisko kamery było w takiej konfiguracji stałe, a amfora razem z tarczą była obracana do wykonania poszczególnych zdjęć, co zmieniało orientację kamery względem układu osnowy i obiektu.



Rys. 1. Ustawienie obiektu na obrotowej platformie z układem punktów referencyjnych; oś Z układu współrzędnych skierowana była prostopadle do tarczy

Drugi i trzeci sposób (rys. 2a, rys. 2b) zakładał umieszczenie wazy wewnątrz ramy z bolcami o różnych wysokościach, realizującymi trójwymiarową osnowę. Stanowiska kamery dla każdego stereogramu musiały tu być osobno określone.

W każdej z konfiguracji zestawu pomiarowego założono brak dodatkowego oświetlenia obiektu. Takie postępowanie przyjęto ze względu na niejednorodność pokrycia powierzchni eksponatu oraz potrzebę przetestowania działania algorytmu korelującego obrazy na rzeczywistej teksturze.



a

b

Rys. 2. Usytuowanie amfory względem ramy z osnową zróżnicowaną w trzech wymiarach: oś Z równoległa do wysokości amfory (a) i prostopadła do wysokości amfory (b)

Z wszystkimi trzema podejściami związane są pewne potencjalne źródła błędów. Położenie obiektu na ruchomych elementach niesie ryzyko jego przemieszczenia w trakcie obracania, co może stać się głównym źródłem błędów (rys. 1). Umieszczenie obiektu w ramie powoduje niejednorodność błędów odtworzenia powierzchni, ponieważ zachowanie podobnych stanowisk dla każdego modelu jest zadaniem niełatwym (rys. 2a, 2b). Jeżeli eksponat jest umieszczony tak, że część wymagająca opracowania jest zasłonięta (rys. 2b), to należy dla niektórych modeli przemieścić go względem ramy (w ostatnim omawianym przypadku). Niesie to za sobą konieczność dodatkowej transformacji modeli wykonanych w innym położeniu układu referencyjnego (ramy).

4. WSTĘPNE WYNIKI EKSPERYMENTÓW

W eksperymentach były stosowane wszystkie trzy przedstawione wcześniej podejścia. Każde z nich wymagało pokonania szeregu trudności.

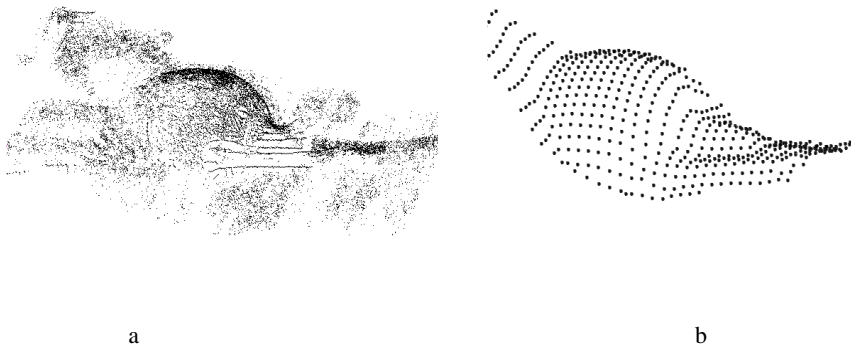
Wykorzystanie tarczy obrotowej pociągnęło za sobą konieczność przygotowania osobnej aplikacji do budowy modelu fotogrametrycznego, ponieważ osnowa zajmowała niewielką część kadru zdjęcia (problemy z programem Orient/Orpheus), a oś Z była pod znacznym kątem w stosunku do osi celowej kamery (inaczej niż w fotogrametrii lotniczej). Rysunek 3 przedstawia model zbudowany na podstawie punktów charakterystycznych na powierzchni amfory, bez dodatkowej filtracji. Widoczna jest znaczna liczba punktów o zafałszowanym położeniu, spowodowanym miejscową jednorodnością tekstury obiektu.

Zastosowanie ramy z przestrzenną osnową poprawiło wyznaczalność zadania w oparciu o wykorzystywane komercyjne programy. Korelacja obrazów przebiegała zgodnie z regułami fotogrametrii lotniczej (program ImageStation Automatic Elevation Collection), więc punkty początkowe były wybierane w przybliżeniu równoległe do płaszczyzny XY (stała wartość Z). Skutkiem tego było utrudnione generowanie modelu dla ramy ustawionej poziomo. Należało zmienić, w tym przypadku, położenie osi układu współrzędnych referencyjnych.



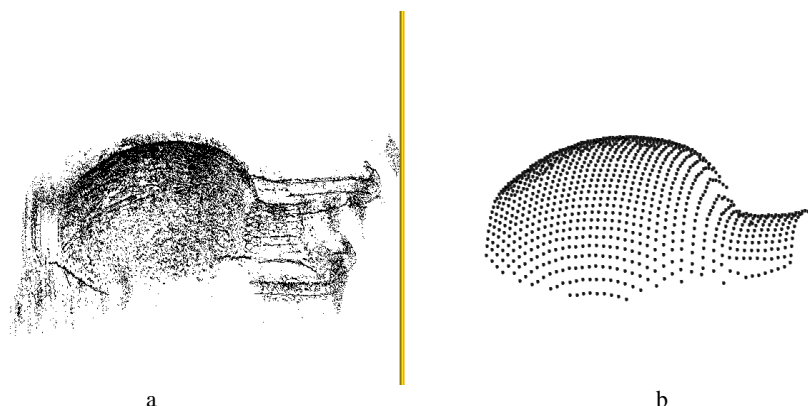
Rys. 3. Szkic modelu wytworzonego z zastosowaniem obrotowej tarczy

Po wstępnym wygenerowaniu chmury punktów (rys. 4a) nastąpiło odfiltrowanie punktów odstających od reszty i stworzenie regularnej siatki (rys. 4b).



Rys. 4. Szkic modelu wykonanego przy poziomym usytuowaniu ramy referencyjnej:
obraz (a) przedstawia model pierwotny, (b) regularny model wygenerowany wtórnie

Rama ustawiona pionowo umożliwiła, bez dodatkowych zabiegów, wygenerowanie poprawnego modelu amfory. Jednak do rekonstrukcji całości należy przetransformować każdy, tak wygenerowany, fragment do wspólnego układu odniesienia. Parametry transformacji mogą być wyznaczone, opierając się niestety tylko na punktach powierzchni eksponatu, dlatego dokładność wpasowania jest niejednolita, zależna od dokładności identyfikacji punktów na obiekcie i ich wzajemnego rozmieszczenia.



Rys. 5. Szkic modelu wykonanego przy pionowym usytuowaniu ramy referencyjnej:
obraz (a) przedstawia model pierwotny, obraz (b) regularny model
wygenerowany wtórnie

Zestawienie błędów wpasowania modelu w osnowę, dla dwóch ostatnich przypadków (tabela 2), świadczy pośrednio o wysokiej dokładności uzyskanych wyników i poprawności konfiguracji zastawu pomiarowego.

Tabela 2. Średnie błędy wpasowania układu modelowego stereogramu w osnowę;
wiersze pokazują poszczególne badane stereogramy w eksperymencie

RMS [mm] / Rama ustawiona:	dX	dY	dZ
poziomo	0.185	0.336	0.258
	0.140	0.232	0.119
	0.419	0.221	0.603
pionowo	0.155	0.100	0.173
	0.126	0.135	0.223
	0.183	0.106	0.156

Zwiększenie błędów wpasowania, dla ramy usytuowanej poziomo, związane jest z utrudnioną identyfikacją sygnalizacji punktów osnowy (znaczne nachylenie płaszczyzn ich emblematów w stosunku do płaszczyzny łowej kamery).

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone eksperymenty wykazują możliwość rekonstrukcji kształtu niewielkiego obiektu archeologicznego, z zastosowaniem amatorskiego aparatu cyfrowego. Niekoniecznie jest stosowanie specjalnego oświetlenia, o ile powierzchnia eksponatu nie wykazuje jednolitości pod względem tonacji (ma zróżnicowaną barwę i jasność).

Ważnym etapem prowadzonych prac z oprogramowaniem, nieprzystosowanym w pełni do potrzeb fotogrametrii bliskiego zasięgu, jest adaptacja konfiguracji stanowisk kamery i definiowania osi układu współrzędnych osnowy. Dla wprowadzenia znaczących usprawnień w badanym procesie technologicznym, a w szczególności zwiększenia

automatyzacji pozyskania informacji o niewielkich zabytkowych obiektach, konieczne jest zastosowanie bardziej wyspecjalizowanych, w tym kierunku, aplikacji.

Prowadzone nadal eksperymenty powinny doprowadzić do powstania procedur działających w pełni automatycznie, ograniczając przy tym koszty tworzonego zestawu pomiarowego.

6. LITERATURA

Drap P., Sgrenzaroli M., Canciani M., Cannata G., Seinturier J., 2003. Laser scanning and close range photogrammetry: towards a single measuring tool dedicated to architecture and archeology. *Archives of CIPA XIXth International Symposium*, Antalya.

Kuzu Y., Sinram O., 2003. Volumetric reconstruction of cultural heritage artifacts. *Archives of CIPA XIXth International Symposium*, Antalya.

Mara H., Kampel M., 2003, „Automated extraction of profiles from 3d-models of archeological fragments”, *Archives of CIPA XIXth International Symposium*, Antalya

Pavelka K., Dolansky T., 2003. Using a non-expensive 3d scanning instruments for cultural heritage documentation. *Archives of CIPA XIXth International Symposium*, Antalya.

Skarlatos D., Theodoridou S., Hennings D., Ville S., 2003. Replication of marble exhibits using photogrammetry and laser scanning (or how to forge exhibits). *Archives of CIPA XIXth International Symposium*, Antalya.

Sormann M., Zach C., Zebedin L., Karner K., 2005. High quality 3D reconstruction of complex cultural objects. *Archives of CIPA XXth International Symposium*, Torino.

Tyszczyk S., 2003. Archeologia, wirtualne muzeum.
www.republika.pl/archeotyszczyk/muzealnictwo.htm

Yılmaz U., Özün O., Otlu B., Mulayim A., Atalay V., 2004. Inexpensive and robust 3D model acquisition system for three-dimensional modelling of small artifacts. *Archives of ISPRS*, B5, Istanbul.

RECONSTRUCTION OF THE SPATIAL SHAPE OF A SMALL ARCHAEOLOGICAL OBJECT BASED ON DIGITAL NON-METRIC PHOTOGRAPHS

KEY WORDS: archaeology, reconstruction, photogrammetry, model, amphor

Summary

Archaeology takes often advantage of the advanced measurement tools for registering the position, the shape and the character of the objects descended from the excavations.

Close range photogrammetry methods can obtain the fastest and reliable results in this domain. This paper presents the experiences related to the reconstruction of the 3D surface model of the ancient amphor, based on photographs taken with the amateur digital camera.

Different approaches have been applied with the use of a set of stereopairs. For the image correlation process, the natural texture of the object has been used. The optical projection of the

pattern was not utilized. For 3D reconstruction of the amphor model, two photogrammetric packages were used; Orient/Orpheus and Z/I Imaging, for the model orientation and measurement.

Three configurations of reference system in object space were employed. The first was based on a rotating flat circular shield, where signalized points were placed around the amphor symmetrically near the shield's edge. The object stood on the shield's plane. This approach produced a lot of difficulties connected with the stability of computation process and forcing aerial photogrammetry applications to work with a close range task.

The second approach assumed placement the amphor inside a reference three-dimensional frame with circular signalized points. This was very promising but there were still problems with non-aerial directions of reference coordinate system axes, and the large angle between the points' signals and the fiducial plane in the camera. The third attitude, where the 3D frame was also placed around the object, but the Z axes led perpendicularly to the camera aim, was the most successful. All in all, the final 3D model was created based on this alignment. The only thing which was hard to arrange was connecting some surfaces taken from each stereopair into one set in one coordinate system.

One of the main aims in this study was to initiate the automation of the technological process in obtaining 3D shapes of objects. There are many archaeological objects of such type and to measure and analyze them without improvement in this domain would be very difficult.

Mgr inż. Małgorzata Kaczmarczyk
e-mail: kaczmarczyk.mmm@wp.pl

Dr inż. Michał Kowalczyk
e-mail: mikowalczyk@wp.pl
tel. +22 2347694