

Fotogrametryczna inwentaryzacja zabytkowych murów budowli z czasów starożytnego Egiptu

Photogrammetric recording of historic walls built at times of ancient Egypt

Adam BOROŃ, Marta BOROWIEC, Józef JACHIMSKI, Andrzej Wróbel

The analytical and digital photogrammetry is an extremely powerful tool, very useful for recording historic monuments of architecture and archaeological sites. A versatility and universality of that tool can be fully appreciated only when a specially difficult works are being undertaken. The Shunet el Zebib it is one of the examples of very valuable, but difficult to record, monuments of ancient Egypt. Built at 2700 before Christ, is the largest of two oldest monuments of great scale in Egypt, and probably even in the world. Those massive ruins are only partially uncovered, but even the visible part of it was recorded incompletely in the past. The object has very great meaning, also from the point of view of building technique of those times.

The Shunet el Zebib, surrounded by the mad made walls was a place of cult connected with the burial ceremony of pharaoh Khasekhemwy of 2nd Dynasty, whose grave is located approximately 2 km from the investigated ruins. The ruins were not described well by historians, but it is known, that neighboring Abydos was a place of cult of Ozyrys from the predinastic period till Christian times (from 4000 b.C. till 641). The burial memorial of faraoh Khasekhemwy, the one who has built Shunet el Zebib, was discovered in Abydos.

The archaeological site Shunet el Zebib is located in the desert. Double walls form a rectangle of the outer size of 138 × 78 m. The thickness of outer walls is 2 to 3 m, inner walls 5m. The space between walls amounts 3 m. The thinner, outer walls in prevailing part are ruined, almost totally. Still existing parts of inner walls are 10 m high.

The photogrammetric recording team of the Technical University of Mining and Metallurgy (AGH) in Krakow had to face all difficulties of the desert located site. All equipment was brought from Poland, and was complete enough to perform all field and even simpler laboratory works in that difficult site conditions.

The final recording product covered 8 vertical crossections, and 16 photoplans of facades of that ancient walls.

To get such product, the walls had to be recorded on 400 photograms made with the use of the UMK 100/1318 or UMK 200/1318 camera, and on 360 photograms made with the Pentacon 6 × 6 cm camera. The UMK stereopares at the scale not smaller than 1:150 were approximately rectified perpendicular to each wall. To get better view to the inner wall, which was from outside partially hidden by the remains of outer wall, they had to build scaffolds and use special tripod for the camera stations.

The control points for each stereopare were marked with the paper targets gluon to the walls with an easy to remove glue (the one produced for gluing tappets). At the top of inner walls the control points were targeted with the short sticks (metal pipes), to make them visible from the inner and outer camera stations. The coordinates of the control points were surveyed in the field with the angular intersection method (accuracy ± 3 mm).

There were great difficulties with exposure. Too bright sunshine would give very high contrast of images. Therefore the photographs shadowed walls were taken against the sun direction, in carefully selected moments.

To get the photoplans of facades in a unified scale the method of differential rectification using TIN algorithm was adopted. The scanned photographs (1800 dpi) of stereopare were hand digitized (using VSD-AGH photogrammetric station) to get a net of triangles. The size of triangles depended on the degree of façade flatness. Images were TIN rectified using the IRAS C of Intergraph program. To get the photoplans of the best possible resolution only the central portion of each photograph was utilized. Pictures of ideally flat portions of walls were rectified using projective function. Also that way were rectified pictures taken from small distance with the 6 × 6 camera in places where

there was problem caused by opposite wall in a close distance. A unification of visual quality of compiled photoplans was received with the use of "blurred mask" in the Adobe Photoshop.

The final version of photoplans completed with some vector

lines, and crosssections, were recorded on 4 CD in a compressed JPEG format. Special *html* file, comprising a reduced scale photoplans linked to the originals, helps the selection of required portion of the documentation.

Wstęp

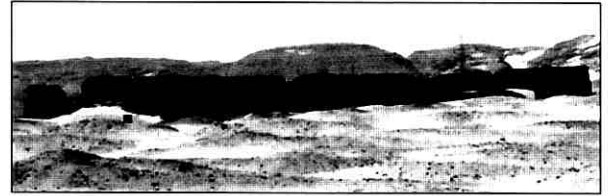
Fotogrametria analityczna, a szczególnie fotogrametria cyfrowa jest nowoczesnym narzędziem pomiarowym, którego pojawienie się całkowicie zrewolucjonizowało technologie opracowania map na podstawie zdjęć lotniczych i obrazów satelitarnych. Wszechstronność i uniwersalność fotogrametrii cyfrowej można jednak w pełni docenić dopiero wtedy, gdy podejmuje się specjalne prace pomiarowe. Do takich nietypowych, a jednak względnie często występujących zastosowań fotogrametrii należą bez wątpienia wszelkie prace związane z inwentaryzacją obiektów zabytkowych. Różnorodność problemów pomiarowych prowadzi do kreowania coraz to nowych wariantów technologicznych. Zastosowanie znajdują nie tylko zdjęcia wykonane kamerami terrofotogrametrycznymi, ale także zdjęcia pochodzące ze zwykłych aparatów fotograficznych (nazywanych kamerami niemetrycznymi), a również obrazy rejestrowane kamerami cyfrowymi w zakresie widzialnego promieniowania elektromagnetycznego, lub w zakresie promieniowania termalnego. Od kilku lat coraz częściej wykorzystuje się przy inwentaryzacji zabytków również skanery laserowe bliskiego zasięgu, które wprost określają trzy współrzędne terenowe każdego punktu rejestrowanego na obrazie.

Ta niezwykła różnorodność i uniwersalność dostępnych narzędzi pomiarowych pozwala na budowanie wariantowych technologii. Stosuje się w określonym przypadku taką metodę, która wykazuje lepsze parametry techniczne lub ekonomiczne.

Zespół nasz miał niezwykle atrakcyjną okazję za projektowania technologii pomiarowej dla sporządzenia fotoplanów zabytkowych ścian liczącego sobie ponad cztery tysiące lat obiektu zbudowanego z cegiel mułowych.

Obiekt znany obecnie pod nazwą Shunet el Zebib (co po arabsku znaczy „skład rodzynków”) znajduje się w pobliżu Abydos (obecnie el Baliana), w Środkowym Egipcie, na obrzeżu pustyni (ryc. 1). Zbudowany został około roku 2700 p.n.e. i jest największym spośród najstarszych obiektów wielkoskalowych w Egipcie, a prawdopodobnie nawet na świecie. Te masywne ruiny budowli są tylko częściowo odkopane, ale nawet ta widoczna część obiektu jest tylko częściowo zinwentaryzowana. Ruiny wystające do około 10 m nad aktualną powierzchnię piasku mają istotne znaczenie dla poznania wczesnoegipskiego sposobu budowy murów.

Shunet el Zebib był miejscem kultu związanym z ce-



Ryc.1. Shunet el-Zebib – widok ogólny.

Fig. 1. Shunet el-Zebib – general view.

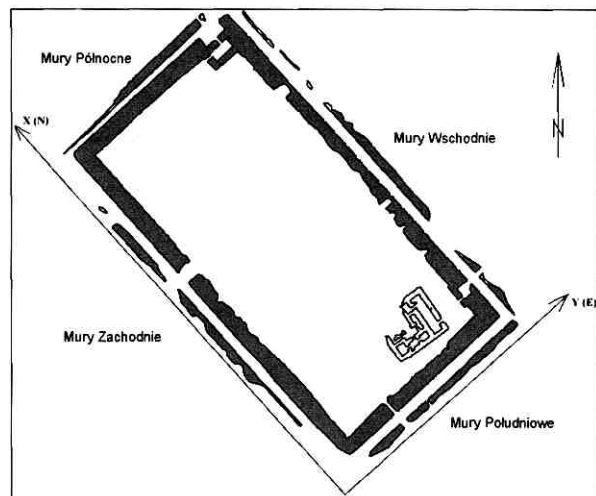
remonialem pogrzebowym rodziny faraona Khasekhemwy z Drugiej Dynastii, którego podziemny grób znajduje się w odległości około dwóch kilometrów od badanych zabytkowych ruin. Teren Shunet el Zebib otoczony wysokimi murami był prawdopodobnie miejscem kultu zmarłego faraona. Informacje dotyczące obiektu są dosyć skąpe, bowiem dotychczas prowadzono jedynie wrywkowe prace wykopaliskowe.

Wiadomo jednak, że Abydos było centrum kultu Ozyrysa od okresu predynastycznego do czasów chrześcijańskich (4000 p.n.e. do 641 n.e.). Ozyrys był jednym z najpotężniejszych bóstw starożytnego Egiptu, a łączono go ze śmiercią, zmartwychwstaniem oraz płodnością. W Abydos znajdują się szczątki królów okresu predynastycznego i okresu wczesnodynastycznego (3100–2686 p.n.e.) na terenie cmentarzyska znanego pod nazwą Um el Qa'ab. Grobowiec V odnaleziony na tym cmentarzysku wybudowany został przez Khasekhemwę — tego samego faraona Drugiej Dynastii, który wybudował Shunet el Zebib.

Teren wykopalisk archeologicznych w Abydos zdominowany jest przez wielkie kamienne świątynie Setiego I i Ramzesa II z okresu Nowego Królestwa. Znaczne obszary na tym terenie oczekują jeszcze na prace wykopaliskowe, pomimo że szereg wypraw archeologicznych sponsorowanych przez różne ośrodki stale tam pracuje.

Będący przedmiotem inwentaryzacji obiekt Shunet el Zebib znajduje się na zachodnim obrzeżu Doliny Nilu, około 420 km na południe od Kairu i 125 km na północ od Luksoru. Dolina Nilu w tym rejonie ma przebieg z północnego wschodu na południowy zachód, obramowana jest wysokimi klifami zbudowanymi na przemian z twardego i miękkiego eoceńskiego wapienia. Klify są pocięte głębokimi jarami wyschniętych potoków i rzek (wadi). Shunet el Zebib znajduje się w odległości około 2 km od zachodniego klifu żyznej doliny, która ma w tym rejonie około 19 kilometrów szerokości.

Założenie zabytkowych murów Shunet el Zebib ma kształt prostokąta o wymiarach 138×78 m w zewnętrznym obrysie. Przestrzeń użyteczna otoczona jest podwójnymi murami (ryc. 2). Grubość ścian zewnętrznych wynosi 2 do 3 metrów w przyziemiu, zaś grubość ścian wewnętrznych 5 metrów. Odstęp między murami wynosi 3 metry. Cieńszy mur zewnętrzny na przeważającej długości zachował się jedynie w postaci szczątkowej.



Ryc. 2. Rzut poziomy obiektu.

Fig. 2. Horizontal section of monument.

Grubszy mur wewnętrzny jest miejscami w bardzo dobrym stanie. Jego maksymalna wysokość waha się w granicach 10–11 metrów. Szczątki murów zewnętrznych osiągają miejscami wysokość do 4 metrów, ale na ogół są znacznie niższe.

Zespół prowadzący fotogrametryczne prace terenowe na tym niezamieszkałym terenie musiał być całkowicie samowystarczalny, wyposażony w sprzęt i chemikalia umożliwiające wywołanie zdjęć w prowizorycznej ciemni fotograficznej natychmiast po ich naświetleniu. Uniwersalny sprzęt komputerowy umożliwiał skanowanie i sporządzanie roboczych wydruków zdjęć, a także obliczenie osnowy pomiarowej i przybliżone sprawdzenie jej na drodze pomiarów stereofotogrametrycznych z wykorzystaniem stacji cyfrowej VSD-AGH. Inwentaryzowane fotogrametrycznie elewacje murów zbudowanych z cegieł mułowych, zniszczone przez tysiące lat trwania na obrzeżu pustyni, były bardzo niewdzięcznym, szaro-mdłym obiektem fotografowania. Doskonała jakość wizualna i geometryczna wytworzonych fotoplanów elewacji murów Shunet el Zebib możliwa była do uzyskania dzięki fachowości wykonawców, ale również, w znacznym zakresie, dzięki temu, że w pełni mogli korzystać w doskonale wyposażonych laboratoriach Zakładu Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej AGH, z możliwości jakie stwarzają metody fotogrametrii cyfrowej. Uważamy, że zarówno ranga obiektu, jak i nowoczesna technologia inwentary-

zacji, dostosowana do potrzeb obiektu, upoważniają do opublikowania tego artykułu.

Fotogrametryczne prace terenowe

Inwentaryzacja geodezyjno-fotogrametryczna objęła pomiar 8 przekrojów pionowych zaprojektowanych w miejscach charakterystycznych, a także wykonanie fotoplanów elewacji murów od ich wewnętrznej i zewnętrznej strony. Podwójne mury otaczające prostokątny dziedziniec mają 16 elewacji, wobec czego należało je przedstawić na 16 oddzielnych fotoplanach. Na fotoplanach widoczny jest układ cegieł glinianych, z których mur zbudowano, a miejscami także szczątki tynku.

Pozostałości cieńszego (zewnętrznego) muru inwentaryzowanej budowli na ogół są bardzo niskie, wobec czego tylko w niewielkim stopniu przysłaniają zewnętrzną elewację wewnętrznego (grubszego) muru (ryc. 3).

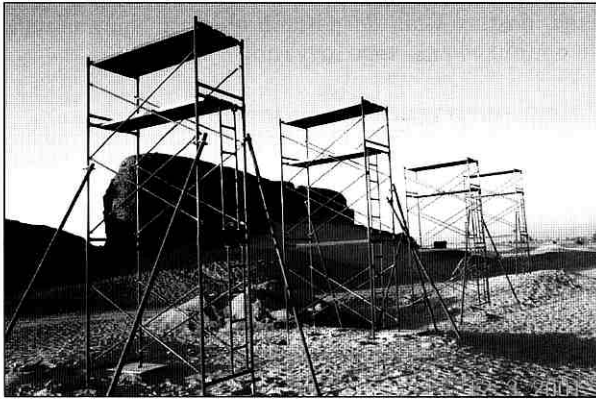


Ryc. 3. Shunet el Zebib — widok od strony południowej.

Fig. 3. Shunet el Zebib – view from the south.

Zdjęcia fotogrametryczne budowli wykonane z zewnątrz obejmowały zatem elewację zewnętrzną muru zewnętrznego (cieńszego) oraz te części elewacji wewnętrznej muru wewnętrznego, które nie były przysłonięte murem zewnętrznym. Zdjęcia fotogrametryczne wykonywano w taki sposób, aby uzyskać najlepsze parametry techniczno-ekonomiczne. Oznacza to, że na każdym kadrze należy zarejestrować mur od przyziemnia do korony, w maksymalnej do uzyskania skali, czyli tak, aby obiekt wypełniał całą powierzchnię każdego kadru. Starając się zachować równocześnie przybliżoną równoległość płaszczyzny tłowej do elewacji muru, należało wykonywać zdjęcia ze stanowisk podniesionych do średniej wysokości fotografowanego fragmentu murów. W zależności od ukształtowania terenu wysokość przenośnego rusztowania wahała się od 2 do 6 metrów (ryc. 4).

Wewnętrzne i zewnętrzne elewacje muru wewnętrznego pokryto zdjęciami stereoskopowymi o pokryciu około 55%, wykonanymi kamerą UMK 200/1318 (ryc. 5). Podwyższone stanowiska realizowano z wykorzystaniem przenośnych rusztowań budowlanych, a także z wykorzystaniem specjalnego statywu z wyściągami pionowymi, umożliwiającym płynne regulowanie wysokości od głowicy statywu do trzech metrów nad poziom podłogi platformy (lub nad poziom tere-

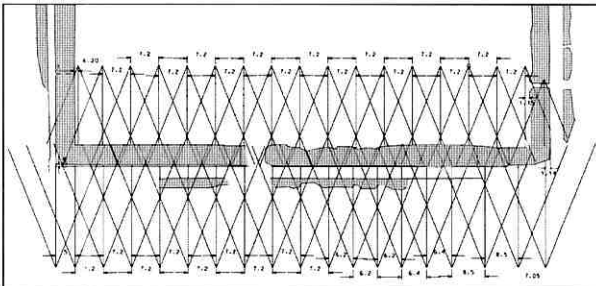


Ryc. 4. Rusztowania przygotowane pod stanowiska kamery.

Fig. 4. Scaffolds prepared for the camera stations.

nu). Przeważająca większość tak wykonanych fotogramów charakteryzuje się skalą nie mniejszą niż 1:150.

Fotografowane ściany są miejscami znacznie uszkodzone. W miejscach, gdzie natrafiano na wyrwy w murze, wprowadzano korektę do planu rozmieszczenia środków projekcji zdjęć wielkoformatowych, tak, aby wgłębienie w murze rejestrowane było w centralnej części fotogramu. Dzięki temu uzyskiwano lepszy wgląd w głąb wyrwy, a także mniejsze przesunięcia radialne na obrazie.



Ryc. 5. Projekt stanowisk kamery dla ściany zachodniej Shunetu.

Fig. 5. Design of camera stations for recording of western walls.

Części elewacji niewidoczne na fotogramach formatu 13 × 18 cm rejestrowano na zdjęciach uzupełniających wykonywanych aparatem fotograficznym Pentacon (format 6 × 6 cm, ogniskowa 50 mm).

Na obiekcie założono osnowę pomiarową, której współrzędne obliczono w układzie równoległym do ścian budowli. Punkty kontrolne sygnalizowano tarczami umieszczanymi na powierzchni ścian lub na osi korony muru. Tarcze papierowe przyklejano do ściany klejem do tapet, który nie pozostawia na obiekcie trwałych śladów. Sygnały na koronie muru przymocowywano do specjalnie ustawianych tam krótkich rurek (o wysokości około 50 cm); dzięki temu sygnały te były dobrze widoczne i mogły być rejestrowane na zdjęciach zarówno wykonywanych ze środka jak i z ze-

wnątrz obiektu. Punkty kontrolne rozmieszczono parami u korony i w przyziemiu muru w taki sposób, aby jedna para sygnałów rejestrowana była w centralnej części każdego fotogramu dużego formatu. Stereoskopowe pokrycie fotogramów gwarantowało zatem po 4 punkty kontrolne na każdym stereogramie. Współrzędne fotopunktów określono metodą przestrzennych wcięć liniowo-kątowych, uzyskując dokładność wyznaczenia położenia około ± 3 mm. Pomiar wykonano tachimetrem elektronicznym TC 600, najczęściej w tym samym dniu, w którym wykonywano zdjęcia. Ogółem zmierzono 413 punktów kontrolnych, w tym: 43 punkty zastabilizowane na koronie wewnętrznego muru oraz 370 punktów zasygnalizowanych tarczami papierowymi przyklejonymi do ścian.

Zdjęcia uzupełniające murów wewnętrznych 6 × 6 cm również wyposażono w punkty kontrolne, co najmniej po 4 na każdym kadrze. Na obrzeżu przysłonionych fragmentów murów, które nie zostały zarejestrowane na fotogramach wielkoformatowych, zdjęcia formatu 6 × 6 cm nachodziły nieco na już zarejestrowany fragment muru. Dzięki temu w tych partiach można było zrezygnować z pomiaru terenowego dodatkowych punktów kontrolnych. Zastępowano je naturalnymi szczegółami muru, których współrzędne określić można było ze zdjęć wielkoformatowych (tę koncepcję wysunął inż. arch. Robin Letellier, właściciel firmy Heritage 3D z Ottawy, będącej bezpośrednim zleceniodawcą prac inwentaryzacyjnych). W niektórych przypadkach, specjalnie w tym celu, wykonywano między ścianami z bardzo bliskiej odległości, dodatkowe, nachylone stereogramy szerokokątną kamerą UMK (o ogniskowej 100 mm). Zbyt wiele martwych pól na tych zdjęciach powodowało, że nie nadawały się one do wytwarzania fotoplanów, ale dobrze można było na ich podstawie określać współrzędne punktów kontrolnych dla zdjęć formatu 6 × 6 cm.

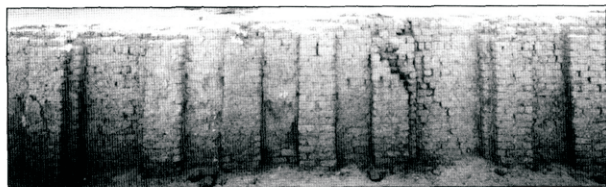
Jakość fotoplanów uzależniona jest od jakości przetwarzanych zdjęć. Trwale bezchmurne niebo w Środkowym Egipcie nie ułatwiało prac fotograficznych. Aby uzyskać dobre efekty, trzeba było wykonywać zdjęcia zacienionych elewacji „pod słońce”, chroniąc równocześnie obiektyw przed bezpośrednim działaniem promieni słonecznych.

Ogółem wykonano 113 ujęć kamerą UMK 200/1318, w tym: 55 ujęć zewnętrznych elewacji, oraz 58 ujęć elewacji wewnętrznych. Ponadto wykonano tą kamerą 14 zdjęć w celu inwentaryzacji bram wejściowych i przerw w ciągłości murów.

W celu wyposażenia zdjęć uzupełniających w punkty kontrolne wykonano dodatkowo kamerą UMK100/1318 44 zdjęcia nachylone, oraz 26 zdjęć o poziomych osiach kamery. Ponieważ każde zdjęcie dublowano, więc ogółem wykonano na obiekcie około 400 negatywów formatu 13 × 18 cm. Kamerą Pentacon wykonano ogółem 248 ujęć, co z dubletami daje około 360 negatywów formatu 6 × 6 cm.

Szczególne utrudnienia napotkano przy fotografowaniu środkowej części zewnętrznej elewacji wschod-

niego muru wewnętrznego. Obie ściany, wewnętrzna i zewnętrzna, mają w tym rejonie podobną wysokość około 3 metrów. Inwentaryzowana elewacja jest więc przysłonięta przez ścianę zewnętrzną, a to uniemożliwia fotografowanie kamerą UMK 200/1318 z podwyższonych stanowisk rozmieszczonych z dala od obiektu. W dodatku inwentaryzowana część ściany ma elewację trójplaszczynową, ponieważ urozmaicona jest regularnie i gęsto rozmieszczonymi pilastrami (ryc. 6). Ta ściana musiała być fotografowana z odległości około 3 metrów, bo taki jest odstęp między obydwoma ścianami. Zdjęcia wykonano kamerą 6 × 6 cm, z wykorzystaniem obiektywu o ogniskowej 50 mm, rozmieszczając stanowiska aparatu pod naprzeciwiełą ścianą, na środku przestrzeni między pilastrami. Mała odległość fotografowania spowodowała, że odcinek ściany z pilastrami o długości 60 m trzeba było zarejestrować na 57 zdjęciach. Dodatkowo wykonano z tej bliskiej odległości, kamerą UMK 100/1318, 14 stereogramów o pionowej bazie, które przeznaczone były do wyznaczenia punktów kontrolnych dla zdjęć formatu 6 × 6 cm.



Ryc. 6. Fragment muru z pilastrami.

Fig. 6. Portion of wall equipped with pilasters.

Wewnętrzne, płaskie elewacje muru zewnętrznego rejestrowane były tylko na zdjęciach formatu 6 × 6 cm, bez pokrycia stereoskopowego. Każde zdjęcie wyposażono w 4 punkty kontrolne (tarcze o rozmiarach 15 × 15 mm), przyklejone do ściany. Położenie tych tarcz mierzone było bezpośrednim pomiarem odległości, tworzących płaską sieć liniową. Po jej wyrównaniu otrzymano współrzędne w lokalnym układzie płaszczynny danej ściany, które następnie przetransformowano do trójwymiarowego układu obiektu. Ogółem pomierzono 206 takich punktów.

Wszystkie zdjęcia rejestrowano na emulsji typu T-MAX 100 Kodaka. Zdjęcia formatu 13 × 18 cm rejestrowane były na błonie ciętej, zaś zdjęcia 6 × 6 cm na błonie zwójowej. Wszystkie zdjęcia wywoływano pod koniec dnia pracy, natychmiast po naświetleniu, aby można było łatwiej powtórzyć zdjęcia poruszone (w skutek silnych podmuchów wiatru stanowiska podwyższone doznawały drgań), lub zdjęcia zaświetlone promieniami słonecznymi, które przypadkiem wpadały wprost do obiektywu. Równocześnie skanowano negatywy z wykorzystaniem niskorozdzielczego skanera, a z cyfrowych obrazów wykonywano wydruki, na których zaznaczano położenie punktów kontrolnych, oraz wprowadzano inne niezbędne robocze anotacje.

Na obiekcie wykonano pomiary uzupełniające, niezbędne do pełnego przedstawienia 8 przekrojów pionowych prostokątnych do ścian obiektu. Większość informacji pokazanej na przekrojach pionowych pomierzono posługując się stereogramami wykonanymi kamerą UMK.

Na terenie obiektu trwają obecnie prace archeologiczne (ryc. 7), które dokumentowane są w dowiązaniu do założonej przez archeologów osnowy geodezyjnej. Założona przez nas podstawowa sieć kątowno-liniowa osnowy fotogrametrycznej dowiązana została do istniejącej osnowy geodezyjnej przez włączenie czterech punktów. Uzyskana dokładność podstawowej sieci kątowno-liniowej, na której oparto prace fotografe-



Ryc. 7. Wykopaliska wewnątrz obiektu.

Fig. 7. Excavations inside of the object.

tryczne, wyniosła $\pm 3,1$ mm w płaszczyźnie XY, oraz $\pm 1,2$ mm w kierunku Z.

W wyniku prac archeologicznych odsłaniane są przysypane piaskiem dolne części murów. Te części podstawy murów, które zostaną w przyszłości odsłonięte, będą wymagały inwentaryzacji za rok lub za dwa lata, po zakończeniu prac archeologicznych. Aby ułatwić realizację ciągłości prac fotogrametrycznych, starano się zwiększyć trwałość sygnalizacji punktów kontrolnych znajdujących się w aktualnie odsłoniętym przyziemiu murów. W tym celu wbijano gwoździł w środku przyklejonej do muru tarczy papierowej. Niestety aktywność miejscowej ludności nie gwarantuje trwałości papierowym tarczom sygnalizacyjnym, które, wobec braku opadów, mogłyby przez długi czas pozostać przyklejone do ścian.

Koncepcja kameralnego opracowania dokumentacji fotogrametrycznej

Historyczne mury Shunet el Zebib, zbudowane z mułowej, niewypalanej cegły, uległy znacznej dewastacji w czasie czterech tysięcy lat, które upłynęły od ich powstania. W płaskich niegdyś licach murów powstały liczne wgłębienia i wyrwy, powodujące niejednorość skali zdjęć, która utrudnia prezentację elewacji w formie fotoplanów.

W celu ujednoczenia skali fotograficznych obrazów elewacji zastosowano metodę różniczkowego przetwarzania obrazów TIN, polegającą na tym, że powierzchnię lica ściany dzieli się na trójkąty, tak, aby każdy trójkąt w przestrzeni swoją płaszczyzną dobrze aproksymował mały fragment ściany. W miejscach mało zniszczonych, a więc płaskich, można stosować trójkąty większych wymiarów. Natomiast silnie zdewastowane fragmenty murów trzeba aproksymować bardzo małymi trójkątami, dobrze przylegającymi do nierównej, obłej powierzchni. Specjalną uwagę należy poświęcić miejscom łączenia w jedną całość fragmentów fotoplanów pozyskanych przez przetwarzanie sąsiednich zdjęć. W celu uzyskania ciągłości rektyfikacji na całej długości elewacji, która zarejestrowana jest na wielu zdjęciach, należy w strefach łączenia obrazów stosować poligony wiążące, będące bokami trójkątów skrajnych na obu sąsiednich zdjęciach.

Przejsie od zdjęć fotogrametrycznych do fotoplanu elewacji ściany wykonane zostało w kilku etapach.

W pierwszym etapie zdjęcia formatu 13×18 cm, oraz zdjęcia formatu 6×6 cm zostały zeskanowane z wykorzystaniem profesjonalnego fotogrametrycznego skanera Zeiss/Intergraph TD, który umożliwia uzyskanie geometrycznej dokładności skanowania rzędu $\pm 2 \mu\text{m}$, przy minimalnym rozmiarze piksela równym $7 \mu\text{m}$. Dla obrazów murów Shunet el Zebib wybrano optymalny rozmiar piksela skanowania równy $14 \mu\text{m}$, co odpowiada rozdzielczości obrazów cyfrowych rzędu 1800 dpi. Obrazy cyfrowe powstałe w wyniku skanowania zapisano w postaci półtonalnej skali szarości w formacie TIFF, unikając tym samym wszelkich strat szczegółów, które mogłyby być spowodowane ewentualnym zastosowaniem kompresji obrazów. Ogółem zamieniono na postać cyfrową 109 zdjęć formatu 13×18 cm oraz 248 zdjęć formatu 6×6 cm. Biorąc pod uwagę fakt, że każdy obraz cyfrowy będący reprezentacją zdjęcia większego formatu ma objętość około 100 MB, a każdy obraz małego formatu zajmuje około 12 MB pamięci, ogółem obrazy te zajmują 14 GB pamięci (zostały zapisane na 24 płytkach CD).

W następnym etapie dokonano na fotogrametrycznej stacji cyfrowej orientacji par zdjęć posiadających pokrycie wzajemne. Do stereoskopowego opracowania zdjęć wybrano stację VSD (Video Stereo Digitizer) skonstruowaną w Zakładzie Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej AGH w Krakowie). Stacja VSD budowana była ze szczególnym uwzględnieniem potrzeb fotogrametrycznej inwentaryzacji zabytków, a zatem wybór tego urządzenia do opracowania zdjęć Shunet el Zebib nie był przypadkowy. W wyniku orientacji stereogramów cyfrowych opierając się na współrzędnych punktów kontrolnych wyznaczono elementy orientacji bezwzględnej wszystkich zdjęć stanowiących pary. Uzyskano bezwzględny błąd wpasowania rzędu $m_x = m_y = m_z = \pm 5$ mm. Elementy orientacji wyznaczono ogółem dla 105 stereogramów. Tak przygotowane (preorientowane) stereogramy umożliwiają określanie przestrzennych współrzędnych szczegó-

łów elewacji bez żadnych dodatkowych wstępnych czynności pomiarowych.

Etap prac kameralnych polegający na pomiarze współrzędnych wierzchołków trójkątów na potrzeby różniczkowego przetwarzania obrazów metodą TIN był niezwykle pracochłonny. Oglądając modele stereoskopowe w systemie obserwacyjnym VSD wybierano wierzchołki trójkątów w takich miejscach elewacji, aby jak najdokładniej przylegały one do powierzchni ściany. W rejonie nierówności i zagłębień w murze trzeba było stosować bardzo małe trójkąty. Ogółem pomierzono około 100 000 punktów dla metody TIN (od 700 do 1200 punktów na stereogram, w zależności od stopnia zniszczenia muru w danym miejscu).

Różniczkowe przetwarzanie treści cyfrowych obrazów ścian wykonano metodą skończonych elementów TIN z wykorzystaniem programu IRAS C Intergraph. Metoda TIN dobrze zdała egzamin. Obrazy przetworzone tą metodą są bardzo wyraźne, dobrze czytelne i dokładnie reprezentują wygląd obiektu nawet w miejscach bardzo zniszczonych. Jedynie w rejonie dużych wyrw fragmenty elewacji musiały być wyłączone z opracowania. Doskonałą jakością opracowania uzyskano między innymi dzięki temu, że obraz do przetwarzania pobierano jedynie z centralnej części każdego zdjęcia (części skrajne stanowiły tylko stereo komponent dla przestrzennych pomiarów wierzchołków trójkątów).

Kompilacja poszczególnych fragmentów różniczkowo przetworzonych obrazów formatu 13×18 cm w obrazy pokrywające większe fragmenty elewacji wykonana została również z wykorzystaniem programu IRAS C. W miejscach łączenia fragmentów obrazów zastosowano specjalną opcję tego programu (*mosaic images*), która posiada funkcję uśredniającą jasność i kontrast dwu scalanych obrazów w wąskim pasie łączenia. Dzięki temu zabiegowi na fotoplane elewacji miejsca łączenia zdjęć są niezauważalne.

Fragmenty elewacji Shunet el Zebib przysłonięte przez inne fragmenty ściany i niewidoczne na zdjęciach wielkoformatowych wykonanych z rusztowań (stanowisk podwyższonych), zarejestrowano, jak o tym wspomniano poprzednio, na zdjęciach uzupełniających formatu 6×6 cm, które wykonywano z bliskiej odległości.

Fragmenty murów zawierające pilastry, przetwarzano metodą transformacji rzutowej na trzy płaszczyzny równoległe do siebie: dwie płaszczyzny pilastrów i płaszczyznę ściany. Współrzędne płaskie punktów dostosowania określono w rzucie ortogonalnym tych punktów na płaszczyznę równoległą do lica elewacji. Wyznaczono je z pomiaru pomocniczych stereogramów wykonanych kamerą UMK z szerokokątnym obiektywem o ogniskowej 100 mm. Po trzykrotnym przetworzeniu mozaikowano odpowiednie fragmenty przetworzonych obrazów.

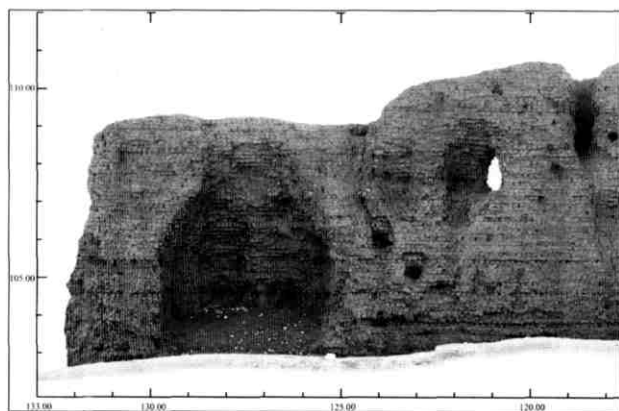
Pozostałe zdjęcia formatu 6×6 obejmujące płaskie powierzchnie muru przetworzono transformacją rzutową całego obrazu w oparciu o współrzędne płaskie czterech punktów dostosowania. Współrzędne

punktów dostosowania używanych do ich przetwarzania wyznaczono pomiarem bezpośrednim w terenie, lub wyznaczano ze stereogramów zdjęć pomocniczych wykonanych kamerą UMK 100/1318.

Przetwarzanie pojedynczych obrazów metodą płaskiej transformacji rzutowej wykonano z wykorzystaniem programu IRAS C.

Ponieważ większość zdjęć przysłoniętych części murów wykonano w niedogodnych warunkach oświetleniowych, miały one niejednorodną gęstość optyczną. Aby usunąć ten nieprzyjemny efekt wizualny zastosowano specjalną korekcję radiometryczną obrazów małoformatowych z wykorzystaniem indywidualnie dla każdego obrazu przygotowanej „nieostrej maski”. Zarówno maski jak i radiometryczną korekcję obrazów wykonano z wykorzystaniem programu Adobe Photoshop. Przetworzone i skorygowane radiometrycznie obrazy skompilowano z wcześniej wykonanymi fragmentami fotoplanów elewacji, wykorzystując do tego funkcję „mosaic” programu IRAS C. W wyniku zastosowanych korekt skompilowany fotoplan wygląda tak, jakby był wytworzony z jednego zdjęcia.

Wszystkie zdjęcia przetworzono w taki sposób, aby na wynikowym fotoplanie każdy piksel reprezentował na obiekcie fragment elewacji o wymiarach $2,5 \times 2,5$ mm. Tak wytworzone fotoplany charakteryzuje rozdzielczość porównywalna z rozdzielczością oryginalnych obrazów cyfrowych. Fotoplany zwymiarowano w taki sposób, że wydruk będzie mieć skalę 1:50.



Ryc. 8. Fragment fotoplanu ściany zachodniej uzupełniony podziałką z układem współrzędnych lokalnych.

Fig. 8. Portion of the photoplan of southern wall completed with the grid in a local coordinate system.

Każdy z fotoplanów uzupełniono ramką z zaznaczoną siatką kwadratów, która pozwala na odczytywanie z fotoplanu współrzędnych w lokalnym układzie Shunet el Zebib (ryc. 8). Wprowadzono też na fotoplanach odpowiednie opisy, ułatwiające identyfikację. Wszystkie elementy graficzne dodane do fotoplanów zapisane są w specjalnych wektorowych plikach przypisanych odpowiednio do każdego fotoplanu. W tych plikach wektorowych powtórzono identyczną ramkę, jak ta

którą obrysowano fotoplan. Ponadto zarejestrowano tam linie obrazujące linie wierzchołkowe murów w miejscach, w których nie jest ona identyczna z górnym obrysem fotoplanu elewacji. Ostateczną wersję fotoplanów zapisano w skompresowanych plikach. Do kompresji użyto standardowego formatu JPEG Adobe Photoshop. Pliki rastrowe w formacie JPEG i pliki wektorowe w formacie DXF nagrano na 4 krążkach CD. Każdy z tych krążków zawiera też plik w formacie *html*, ze spisem fotoplanów na nim nagranych wraz z ich przeglądowymi pomniejszeniami.

Podsumowanie

Obiekt Shunet el Zebib zlokalizowany w środkowym Egipcie, zbudowany z cegły glinianej (mułowej), zniszczony burzami piaskowymi i działalnością ludzi w czasie trwania przez cztery tysiące lat na obrzeżu Sahary, nie ma wyraźnych szczegółów. Na pierwszy rzut oka robi wrażenie mdłej, szarej bryły pozbawionej rozróżnialnych mikrodetali. Dzięki zastosowaniu poprawnie dobranej jakości materiału negatywowego Kodak T-Max-100, a także dzięki różnym korektom radiometrycznym opracowano dokumentację obiektu w formie fotoplanów o dobrym kontraście i doskonałej czytelności szczegółów. Korektę geometrii obrazów wykonano metodą skończonych elementów TIN, która pozwoliła zróżnicować gęstość sieci punktów numerycznego modelu powierzchni ścian w zależności od wielkości lokalnych nierówności, zagłębień i wyrw w murze. W wydzielonych partiach elewacji, gdzie z uwagi na ograniczony wgląd trzeba było stosować zdjęcia uzupełniające z bliskiej odległości, o małym zasięgu, stosowano z dobrym skutkiem przetwarzanie całego obrazu metodą rzutową. Całe opracowanie wykonano z wykorzystaniem trzech programów komputerowych: cyfrowej stacji stereoskopowej VSD-AGH, programu IRAS C Intergraph, oraz Adobe Photoshop. Doskonałej jakości geometrycznej i radiometrycznej nie udało by się osiągnąć, gdyby zdjęcia fotogrametryczne nie zostały zeskanowane z wykorzystaniem profesjonalnego skanera fotogrametrycznego Photoscan TD. Opisane wyżej prace inwentaryzacyjne potwierdziły ponownie znany skądinąd wniosek, że do profesjonalnej fotogrametrycznej inwentaryzacji dużych obiektów zabytkowych należy wykorzystywać terro-fotogrametryczne kamery wielkoformatowe (np. UMK Zeiss Jena), a fotogrametryczne zdjęcia uzupełniające można wykonywać aparatami fotograficznymi średniego (lub małego) formatu.

Metody fotogrametrii cyfrowej pozwalają na wprowadzanie daleko idących korekt geometrycznych i radiometrycznych w ramach prac kameralnych. Takich korekt nie udawało się dokonywać nawet w najbardziej finezyjnych technologiach analogowych. Warunkiem koniecznym uzyskania produktu końcowego wysokiej klasy, szczególnie fotoplanów, są jednak nadal dobrze zaplanowane i wykonane zdjęcia, uzbrojone w dobrze zaprojektowaną i pomierzoną osnowę fotogrametryczną.



Dr inż. Adam Boroń jest absolwentem Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Przez cały okres pracy zawodowej związany jest z Zakładem Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej tegoż Wydziału. Obecnie zatrudniony jest na stanowisku adiunkta. Poza dydaktyką zajmuje się aplikacjami fotogrametrii w różnych dziedzinach nauki, gospodarki i przemysłu.

Adres: Al. Mickiewicza 30, paw. C4, 30-059 Kraków, tel.: 0-12 617 23 02; e-mail: aboron@uci.agh.edu.pl



Mgr inż. Marta Borowiec jest absolwentką Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Przez cały okres pracy zawodowej związana jest z Zakładem Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej tegoż Wydziału. Zajmuje się zastosowaniem fotogrametrii i teledetekcji w różnych dziedzinach nauki i gospodarki (architektura, konserwacja zabytków, budownictwo i inżynieria).

Adres: Al. Mickiewicza 30, paw. C4, 30-059 Kraków, tel.: 0-12 617 38 26; e-mail: martabor@uci.agh.edu.pl



Prof. dr hab. inż. Józef Jachimski, kierownik Zakładu Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej AGH jest absolwentem Wydziału Geodezji Górniczej AGH w Krakowie. Jest wiceprzewodniczącym Komitetu Geodezji PAN, wiceprzewodniczącym Komisji Geoinformatyki PAU, wiceprzewodniczącym Zarządu Polskiego Towarzystwa Fotogrametrii i Teledetekcji oraz redaktorem Prac Komisji Geodezji i Inżynierii Środowiska PAN w Krakowie. Jest też przedstawicielem PTFiT w International Committee for Architectural Photogrammetry. Adres: Al. Mickiewicza 30, paw. C4, 30-059 Kraków, tel. 0-12 617 38 26; e-mail: jjachim@uci.agh.edu.pl



Dr. inż. Andrzej Wróbel jest absolwentem Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Przez cały okres pracy zawodowej związany jest z Zakładem Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej tegoż Wydziału. Zajmuje się zastosowaniem fotogrametrii i teledetekcji w różnych dziedzinach nauki i gospodarki (architektura, konserwacja zabytków, budownictwo i inżynieria, przemysł). Adres: Al. Mickiewicza 30, paw. C4, 30-059 Kraków, tel.: 0-12 617 23 02; e-mail: awrobel@uci.agh.edu.pl