

Fotogrametryczna inwentaryzacja zabytkowych murów budowli z czasów starożytnego Egiptu *

Adam Boroń, Marta Borowiec, Józef Jachimski, Andrzej Wróbel

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. Wszelkoność 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 wątplenia wszelkie prace związane z inwentaryzacją obiektów zabytkowych. Różnorodność problemów pomiarowych prowadzi do kreowania coraz to nowych wariantów technologicznych. Zastosowanie znajdują zdjęcia wykonane nie tylko kamerami terrofotogrametrycznymi, ale także zdjęcia pochodzące ze zwykłych aparatów fotograficznych (nazywanych kamerami niemetrycznymi), a także 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 niezwykle różnorodność i uniwersalność dostępnych narzędzi pomiarowych pozwala na budowanie wariantowych technologii. Stosuje się w określonym przypadku taką metodę, która posiada lepsze parametry techniczne lub ekonomiczne.

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



Rys.1. Shunet el Zebib – widok ogólny

Obiekt znany obecnie pod nazwą Shunet El-Zebib (co po arabsku znaczy „skład rodzynków”) znajduje się w pobliżu Abydos (obecnie El Baliana), w Środkowym

* artykuł opracowany w ramach badań statutowych nr. AGH 11.11.150.459

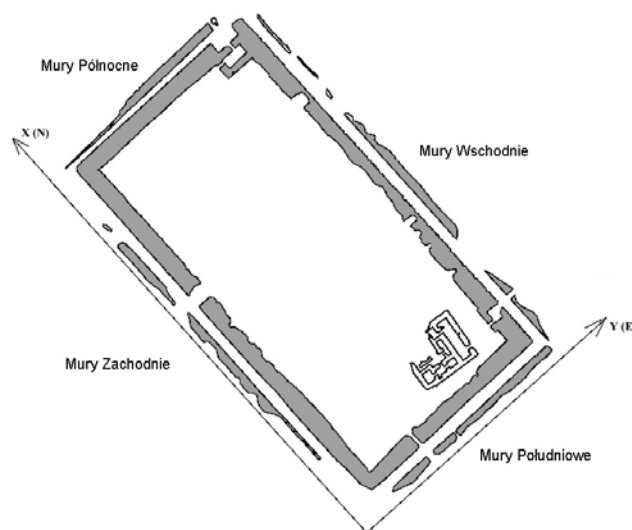
Egipcie, na obrzeżu pustyni (rys.1). Zbudowany został około roku 2700 p.n.e. i jest największym spośród dwóch najstarszych obiektów wielkoskalowych w Egipcie, a prawdopodobnie nawet na świecie. Te masywne ruiny budowli są tylko częściowo odkopane, ale nawet ta widoczna część obiektu jest tylko częściowo zinwentaryzowana. Ruiny wystające do około 10 metrów nad aktualną powierzchnię piasku mają istotne znaczenie dla poznania wczesno-egipskiego sposobu budowy murów.

Shunet El-Zebib był miejscem kultu związanym z ceremoniałem 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 wyrywkowe 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 łączyło 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 Luxoru. 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.



Rys.2. Rzut poziomy obiektu

Założenie zabytkowych murów Shunet el Zebib ma kształt prostokąta o wymiarach 138*78m w zewnętrznym obrysie. Przestrzeń użyteczna otoczona jest podwójnymi murami (rys. 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.

Grubszy mur wewnętrzny jest miejscami w bardzo dobrym stanie. Jego maksymalna wysokość waha się w granicach 10 do 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 umożliwił 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 inwentaryzacji, dostosowana do potrzeb obiektu, upoważniają do opublikowania tego artykułu.

Fotogrametryczne prace terenowe

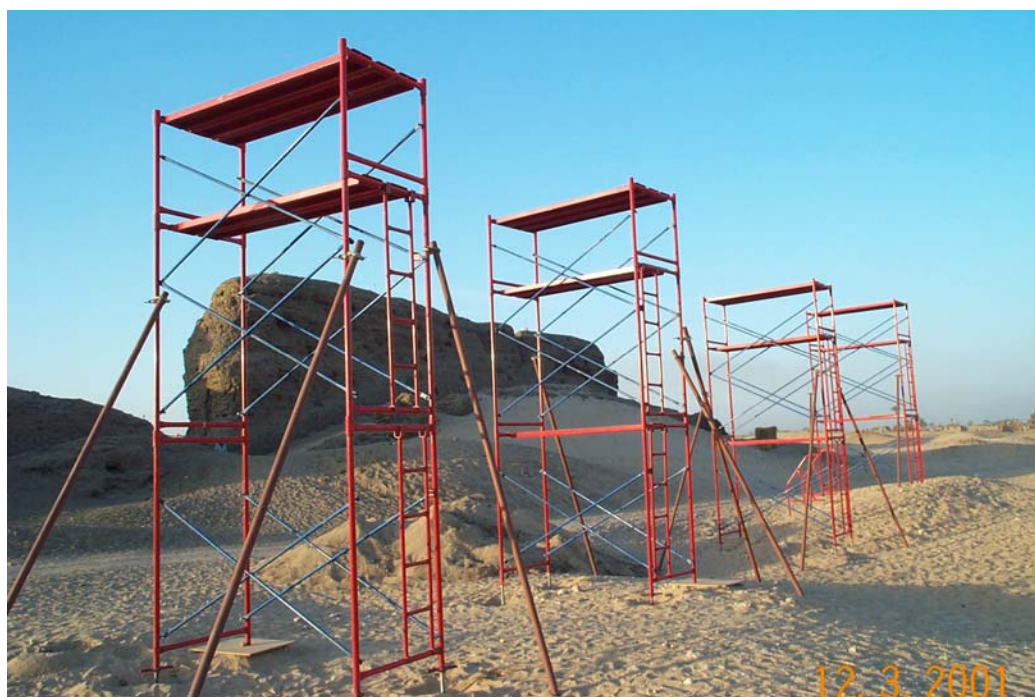
Inwentaryzacja geodezyjno - fotogrametryczna objęła pomiar 8 przekrojów pionowych zaprojektowanych w miejscach charakterystycznych, a także wykonanie fotoplanów elewacji murów od ich wewnętrznej i zewnętrznej strony. Podwójne mury otaczające prostokątny dziedziniec mają 16 elewacji, wobec czego należało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



Rys.3. Shunet el Zebib - widok od strony południowej

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

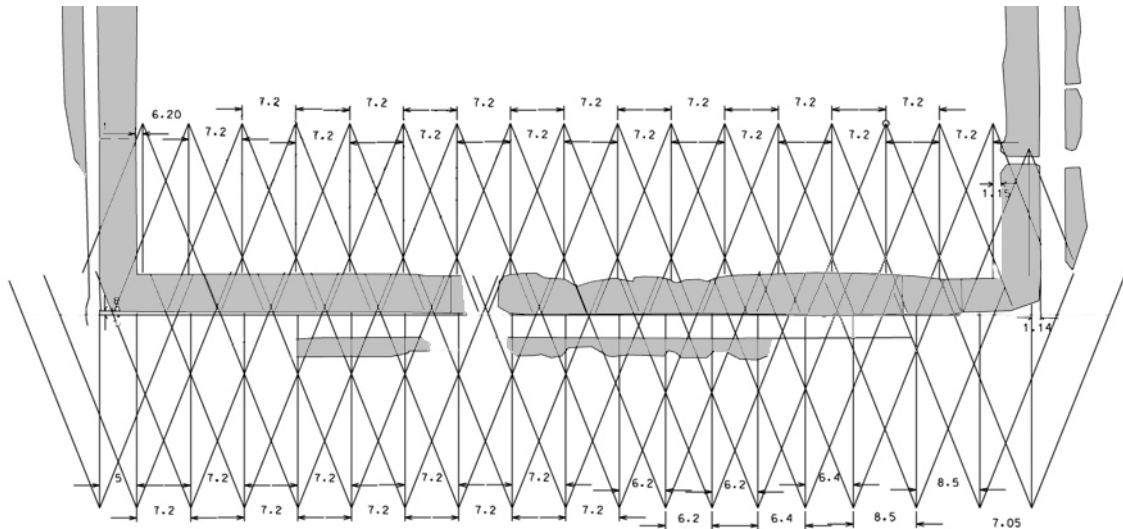
Zdjęcia fotogrametryczne budowli wykonane z zewnątrz obejmowały zatem elewację zewnętrzną muru zewnętrznego (cieńszego), oraz te części elewacji zewnętrznej muru wewnętrznego, które nie były przysłonięte murem zewnętrznym. Zdjęcia fotogrametryczne wykonywano w taki sposób, aby uzyskać najlepsze parametry techniczno-ekonomiczne. Oznacza to, że na każdym kadrze należy zarejestrować mur od przyziemia 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 (rys.4).



Rys.4. Rusztowania przygotowane pod stanowiska kamery

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



Rys.5. Projekt stanowisk kamery dla ściany zachodniej Shunet'u

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

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 50cm); dzięki temu sygnały te były dobrze widoczne i mogły być rejestrowane zarówno na zdjęciach wykonywanych ze środka jak i z zewnątrz 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 $\pm 3\text{mm}$. 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 ściany.

Zdjęcia uzupełniające murów wewnętrznych 6*6cm również wyposażono w punkty kontrolne, co najmniej po 4 na każdym kadrze. Na obrzeżu przysłoniętych fragmentów murów, które nie zostały zarejestrowane na fotogramach wielkoformatowych, zdjęcia formatu 6*6cm 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 100mm). 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*6cm.

Jakość fotoplanów uzależniona jest od jakości przetwarzanych zdjęć. Trwale bezchmurne niebo w Środkowym Egipcie nie ułatwiało prac fotograficznych. Dla uzyskania dobrych efektów, 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 dla 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*18cm. Kamerą Pentacon wykonano ogółem 248 ujęć, co z dubletami daje około 360 negatywów formatu 6*6cm.



Rys. 6. Fragment muru z pilastrami

Szczególne trudnienia napotkano przy fotografowaniu środkowej części zewnętrznej elewacji wschodniego 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 (rys.6). Ta ściana musiała być fotografowana z odległości około 3 metrów, bo taki jest odstęp między obydwoma ścianami. Zdjęcia wykonano kamerą 6*6cm, z wykorzystaniem obiektywu o ogniskowej 50mm, rozmieszczając stanowiska aparatu pod naprzeciwległą ścianą, na środku przestrzeni między pilastrami. Mała odległość fotografowania spowodowała, że odcinek ściany z pilastrami o długości 60m 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.

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*15mm), przyklejone do ściany. Położenie tych tarcz mierzone było bezpośrednim pomiarem odległości, tworzących płaską sieć liniową. Po jej wyrównaniu otrzymano współrzędne w

lokalnym układzie płaszczyzny 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*18cm rejestrowane były na błonie ciętej, zaś zdjęcia 6*6cm na błonie zwojowej. Wszystkie zdjęcia wywoływano pod koniec dnia pracy, natychmiast po naświetleniu, aby można było łatwiej powtórzyć zdjęcia poruszone (skutkiem 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 adnotacje.

Na obiekcie wykonano pomiary uzupełniające, niezbędne do pełnego przedstawienia 8 przekrojów pionowych prostopadłych do ścian obiektu. Większość informacji pokazanej na przekrojach pionowych pomierzono w oparciu o stereogramy wykonane kamerą UMK.

Na terenie obiektu trwają obecnie prace archeologiczne (rys.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 fotogrametryczne, wyniosła ± 3.1 mm w płaszczyźnie XY, oraz ± 1.2 mm w kierunku Z.



Rys.7. Wykopaliska wewnątrz obiektu

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. Dla ułatwienia realizacji ciągłości prac fotogrametrycznych, starano się zwiększyć trwałość sygnalizacji punktów kontrolnych znajdujących się w aktualnie odsłoniętym przyziemi murów. W tym celu wbijano gwoździak 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, nie wypalanej 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 niejednorodność 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.

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

W pierwszym etapie zdjęcia formatu 13*18cm, oraz zdjęcia formatu 6*6cm zostały zeskanowane z wykorzystaniem profesjonalnego fotogrametrycznego skanera Zeiss/Intergraph TD, który umożliwia uzyskanie geometrycznej dokładności skanowania rzędu ± 2 mikrometrów, przy minimalnym rozmiarze piksela równej 7 mikrometrów. Dla obrazów murów Shunet el Zebib wybrano optymalny rozmiar piksela skanowania równą 14 mikrometrów 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*18cm, oraz 248 zdjęć formatu 6*6cm. 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 skonstruowany 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 w oparciu o współrzędne 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 szczegółów elewacji bez żadnych dodatkowych wstępnych czynności pomiarowych.

Etap prac kameralnych polegający na pomiarze współrzędnych wierzchołków trójkątów dla potrzeb 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 jakość 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*18cm 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 fotopłanie elewacji miejsca łączenia zdjęć są niezauważalne.

Niewidoczne fragmenty elewacji Shunet el Zebib (przysłonięte przez inne fragmenty ściany) na zdjęciach wielkoformatowych wykonanych z rusztowań (stanowisk podwyższonych), zarejestrowano, jak o tym wspomniano poprzednio, na zdjęciach uzupełniających formatu 6*6cm, 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 100mm. Po trzykrotnym przetworzeniu mozaikowano odpowiednie fragmenty przetworzonych obrazów.

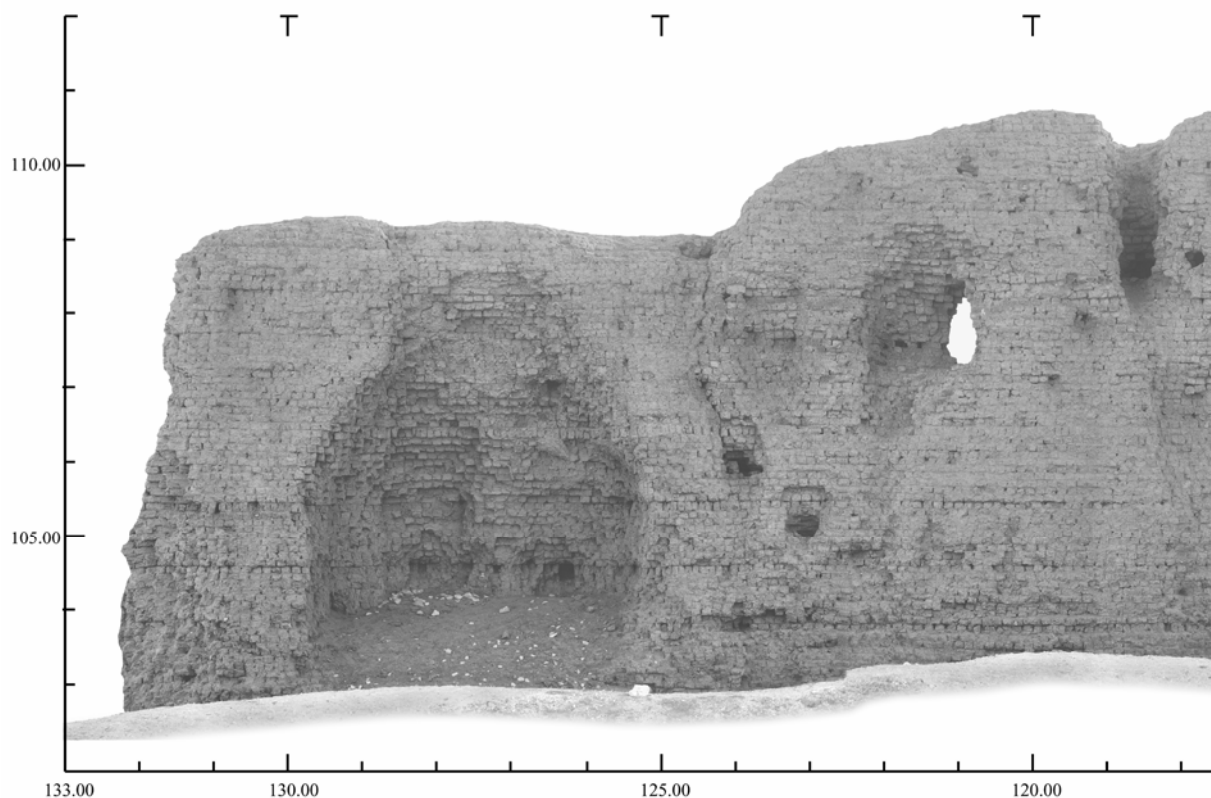
Pozostałe zdjęcia formatu 6*6 obejmujące płaskie powierzchnie muru przetworzono transformacją rzutową całego obrazu w oparciu o współrzędne płaskie czterech punktów dostosowania. Współrzędne punktów dostosowania używanych do ich przetwarzania wyznaczono pomiarem bezpośrednim w terenie, lub wyznaczano 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, więc 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*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.



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

Każdy z fotoplanów uzupełniono ramką z zaznaczoną siatką kwadratów, która pozwala na odczytywanie z fotoplanu współrzędnych w lokalnym układzie Shunet el Zebib (rys.8). Wprowadzono na fotoplanach też 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 podglądowymi 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 mikro-detali. Dzięki zastosowaniu poprawnie dobranego 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 terrofotogrametryczne 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 ośnowę fotogrametryczną.