

Inwentaryzacja fotogrametryczna murów SHUNET EL ZEBIB w Egipcie*

1. Wstęp

Fotogrametryczna inwentaryzacja zabytków jest dziedziną rozwijaną od wielu lat w Zakładzie Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej, Wydziału Geodezji Górniczej AGH. W ostatnich latach prowadzono badania, oraz wykonano szereg opracowań stosując dla celów inwentaryzacji architektonicznej metody fotogrametrii analitycznej i cyfrowej. Nasze doświadczenia oraz osiągnięcia zaowocowały propozycją wykonania nowoczesnej, cyfrowej dokumentacji fotogrametrycznej monumentalnego zabytku egipskiego SHUNET EL ZEBIB z 27 w. p.n.e., który do dzisiejszych czasów przetrwał jedynie w postaci podwójnej linii murów opisanych na planie prostokąta. Produkt końcowy inwentaryzacji miały stanowić fotoplany cyfrowe wszystkich 16 elewacji murów obiektu, oraz wybrane przekroje poprzeczne. Inwentaryzacyjne prace terenowe w Egipcie powinny być przeprowadzone w dwóch etapach. Pierwszy etap, który został zakończony przed rozpoczęciem planowanych prac wykopaliskowych, miał dostarczyć danych fotogrametrycznych obrazujących stan obiektu przed ingerencją archeologów, czyli to wszystko, co znajduje się ponad powierzchnią terenu. Na podstawie tych materiałów w laboratoriach ZFiIT AGH opracowano cyfrowe fotoplany wszystkich elewacji. Po odsłonięciu przez archeologów, aż do fundamentów wszystkich zakrytych obecnie piaskiem części murów, nastąpi drugi etap prac fotogrametrycznych. W wyniku prac pomiarowych drugiego etapu, sporządzona dokumentacja w pierwszym etapie ma być uzupełniona w taki sposób, aby stanowiła z wykonanym opracowaniem spójną, jednorodną całość. Jedynie metody cyfrowe umożliwiają wykonanie takiej kompilacji w sposób niezauważalny dla użytkownika. Podział pracy na w/w dwa etapy był w pełni uzasadniony, ponieważ prace wykopaliskowe przy odsłanianiu dolnych części murów mogą stanowić zagrożenie dla stabilności murów i w przypadku obsunięcia lub zawalenia części muru, wykonana wcześniej dokumentacja jest nie do przecenienia. Obecnie zakończony został pierwszy etap opracowania.

W artykule przedstawiono problematykę terenowych prac inwentaryzacyjnych wykonanych w Egipcie.



Rys. 1. Shunet el Zebib – widok ogólny

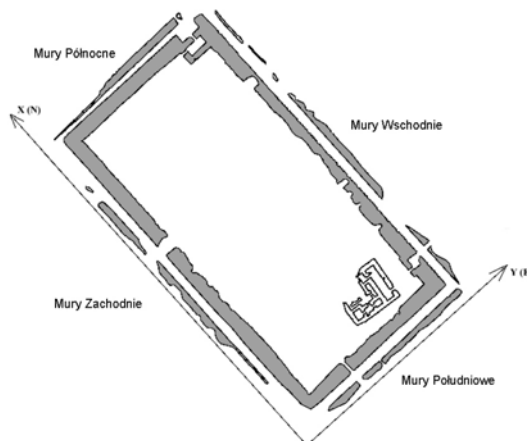
2. Opis obiektu

Będący przedmiotem inwentaryzacji Shunet el Zebib znajduje się na zachodnim obrzeżu Doliny Nilu, około 420 km na południe od Kairu i 125 km na północ od Luxoru, w pobliżu miasta El Baliana. Dolina Nilu, która 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

* artykuł opracowany w ramach badań statutowych nr. AGH 11.11.150.459

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.1).

Obiekt znany obecnie pod nazwą Shunet El-Zebib zbudowany został około roku 2700 p.n.e. i jest największym spośród dwóch najstarszych obiektów monumentalnych w Egipcie. Te masywne ruiny budowli są tylko w części odkopane, ale nawet ta widoczna część obiektu jest tylko fragmentarycznie zinwentaryzowana. Ruiny sięgające wysokości około 10 metrów nad aktualną powierzchnię terenu mają istotne znaczenie dla poznania wczesno-egipskiego sposobu budowy murów.



Rys.2 Rzut poziomy obiektu

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. Teren Shunet El-Zebib otoczony ceglаныmi murami był prawdopodobnie miejscem kultu zmarłego faraona. Informacje dotyczące obiektu są dosyć skąpe, bowiem dotychczas prowadzono jedynie wrywkowe prace wykopaliskowe.

Założenie zabytkowych murów Shunet el Zebib ma kształt prostokąta o wymiarach 138x78m w zewnętrznym obrysie. Przestrzeń użytkowa o wymiarach 117x155m 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 od 2 do 3,5 m.



Rys 3. Fragment murów zewnętrznych i wewnętrznych

Mury zostały zbudowane z ok. 9 mln niewypalanych cegieł mułowych. Cieńszy mur zewnętrzny na przeważającej długości zachował się jedynie w postaci szczątkowej. Mur wewnętrzny (grubszy) jest miejscami w bardzo dobrym stanie. Jego maksymalna wysokość ponad poziom terenu waha się w granicach 10 do 11 metrów. Szczątki murów zewnętrznych

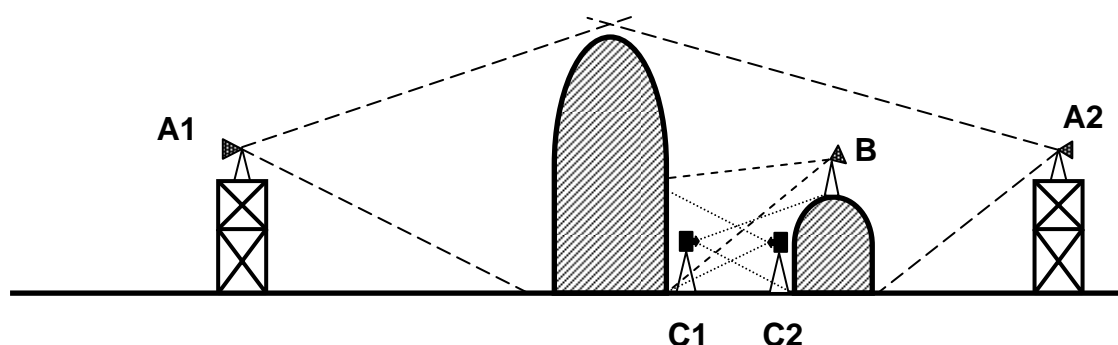
osiągają miejscami wysokość do 3 metrów, ale na ogół są znacznie niższe. Stan zachowania powierzchni muru dla poszczególnych jego stron jest bardzo zróżnicowany. Strona zewnętrzna niskiego muru zewnętrznego, najbardziej narażona na działanie wiatru, stanowi w większości powierzchnię tak nierówną, że trudno jest ją aproksymować jakąkolwiek płaszczyzną. Kontrastem do niej jest jego wewnętrzna strona, która tworzy prawie idealną, lekko nachyloną płaszczyznę (rys.3). Na zewnętrznej stronie muru wewnętrznego (wysokiego), u jego podnóża, znajdują się szczątkowe fragmenty pilastrów, jedynie w miejscach osłoniętych przez mur zewnętrzny są one dobrze zachowane. Poza tym mur ten jest zniszczony i zerodowany w różnym stopniu, zarówno od strony wewnętrznej jak i zewnętrznej. Niektóre części ścian stanowią w miarę gładką powierzchnię, niektóre są popękane i podziurawione „na wylot” przez działanie czynników zewnętrznych. Dodatkowo w wielu miejscach muru znajdują się głębokie nisze wydrążone przez mnichów koptyjskich we wczesnych wiekach naszej ery. Niewątpliwie wpływ na taki stan zachowania powierzchni murów ma materiał z którego je wykonano, czyli niewypalana cegła mułowa.

3. Koncepcja pomiaru fotogrametrycznego oraz metody realizacji

Dysponując mapami, zdjęciami i opisem obiektu opracowano w Polsce koncepcję pomiaru fotogrametrycznego i dobrano do niej sprzęt, oraz materiały niezbędne do jej realizacji. Przyjęto założenie, że poza wewnętrznymi ścianami murów zewnętrznych (niskich) i koroną murów wysokich, wykonane zdjęcia fotogrametryczne powinny zapewnić dwuobrazowe (stereoskopowe) opracowanie całego obiektu w tym zarówno wszystkie elewacje murów jak i wnętrza czterech bram). Jedynie dla wewnętrznych ścian niskich murów zewnętrznych, charakteryzujących się dużą płaskością i niewielką wysokością (do 3m) przyjęto jednobrazową metodę opracowania. przy której ilość wykonanych zdjęć jest dwukrotnie mniejsza niż w metodzie stereoskopowej (zdjęcia o pokryciu do 10%) i wymagane są jedynie płaskie współrzędne osnowy (X,Y), które pozyskać można przez pomiar liniowy. Zarejestrowanie korony murów wysokich wymagałoby wykonania zdjęć z wysokości większej niż korona tzn., co najmniej 11 m. Wysoki koszt i czasochłonność budowy tak wysokich rusztowań spowodowały, że zrezygnowano z tych rejestracji.

3.1. Zdjęcia pomiarowe

Jakość radiometryczna i rozdzielczość fotoplanów obiektu, stanowiących ostateczny efekt pracy, uzależniona jest głównie od jakości zdjęć pomiarowych wykonanych w terenie. Zdjęcia powinny być wykonane w jak największej skali, z możliwie najmniejszymi przesunięciami radialnymi, zapewniać założone pokrycie obiektu, poprawnie naświetlone, i wywołane. Im większy format zdjęć tym mniejsza ilość niezbędnych fotogramów.



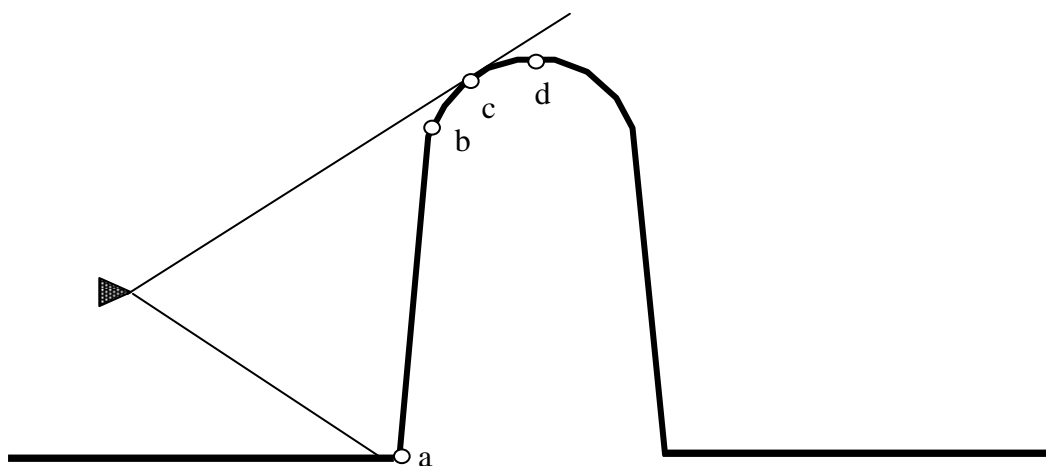
Rys.4 Zdjęcia pomiarowe obiektu:

- A1 – zdjęcia podstawowe z rusztowań wewnętrznych (UMK 200/1318),
- A2 – zdjęcia podstawowe z rusztowań zewnętrznych (UMK 200/1318),
- B – stereogramy pomocnicze z muru zewnętrznego, (UMK 100/1318),
- C1 – zdjęcia podstawowe Pentacon Six 6x6,
- C2 – zdjęcia uzupełniające Pentacon Six 6x6

Zdjęcia pomiarowe dla inwentaryzacji tego obiektu podzielić można na cztery kategorie. Zdjęciami podstawowymi będziemy nazywać zdjęcia pomiarowe z których wykonywane będą fotoplany wszystkich elewacji murów. Zdjęcia pomocnicze to zdjęcia pomiarowe (stereogramy) służące do zagęszczenia osnowy fotogrametrycznej dla zdjęć uzupełniających, natomiast zdjęciami uzupełniającymi będziemy nazywać zdjęcia dolnych fragmentów elewacji murów, które nie odfotografowały się na zdjęciach podstawowych (były zasłonięte przez mur zewnętrzny) i służą do uzupełnienia fotoplanu elewacji. Ostatnią grupę stanowią zdjęcia dodatkowe, które będą dokumentować dwu i jednoobrazowo wszystkie cztery bramy obiektu oraz przełomy muru do pokazania na przekrojach poprzecznych. Zdjęcia dodatkowe będą wykonane w taki sposób, aby umożliwić w przyszłości, jeśli zajdzie potrzeba, wykonanie fotoplanów, rzutów i przekrojów bram.

3.1.1. Podstawowe zdjęcia pomiarowe

Podstawowe zdjęcia pomiarowe zdecydowano wykonywać naziemną kamerą fotogrametryczną UMK 20/1318 (stereogramy) i średnioformatowym aparatem fotograficznym Pentacon Six 5/66 (zdjęcia pojedyncze). Kamera UMK 20/1318 posiada format zdjęć 13x18cm i ogniskową 20cm. Normalny kąt widzenia tej kamery zapewnia dobry wgląd w fotografowany, nieciągły obiekt, a duży format zdjęć uzyskanie korzystnej skali zobrazowania. Maksymalną skalę zdjęcia przy poziomej osi kamery i poziomym formacie zdjęcia można uzyskać jeśli zdjęcia wykonywane będą z wysokości równej połowie wysokości muru i odległość fotografowania wyniesie ok. 20m. W takim przypadku skala zdjęć będzie ok. 1:100, a 10 metrowej wysokości mur na zdjęciu wraz z sygnałami fotogrametrycznymi na koronie zmieści się z niewielkim zapasem w pionowym zakresie zdjęcia. Odległości pomiędzy kolejnymi zdjęciami należy tak dobrać, aby pokrycie zakresu zdjęć wynosiło ok. 55% (baza zdjęć wynosić wtedy będzie 7.2 m). Zapewni to, podobnie jak w zdjęciach lotniczych, możliwość pełnego pokrycia stereoskopowego obiektu, przy bardzo korzystnej charakterystyce dokładności (stosunek bazowy 1:2.5). Kolejne zdjęcia dla danej ściany należy wykonywać z tej samej wysokości, aby zapewnić jak najbardziej korzystne warunki montowania (mozaikowania) fragmentów przetworzonych ścian z sąsiednich zdjęć.



Rys.5. Sposób rejestracji korony murów: a-b – przetwarzana część ściany, b-c - nieprzetwarzana, górna, obła część muru widoczna na zdjęciach, c - najwyższy punkt muru widoczny na fotoplane, c-d - górna część korony muru niewidoczna na zdjęciach, d - najwyższy punkt korony murów

Nieprzetworzony odcinek b-c korony murów (rys.5) będzie możliwy do połączenia z sąsiednim bez pionowego przesunięcia jedynie w przypadku wykonywania zdjęć z takiej samej wysokości i odległości [Borowiec M., 2002].

Pozostawienie na fotoplane elewacji wąskiego odcinka nieprzetworzonego muru (b-c) jest co prawda pewnym błędem, ale mniejszym niż obcięcie elewacji wzdłuż linii b, które może sugerować ostrą krawędź korony murów. W przyjętym rozwiązaniu należy wiedzieć, że linia „c” na fotoplane (obrazująca górę muru) nie odpowiada wysokości najwyższych punktów

korony „d”(Rys., 5). Aby ten defekt usunąć należy w terenie pomierzyć metodą geodezyjną linię najwyższych punktów korony „d” i uzupełnić tą linią fotoplan.

Opisany wyżej sposób wykonania zdjęć podstawowych w skali 1:100 dotyczy wszystkich ścian wewnętrznych (od dziedzińca) murów wysokich (zdjęcia A1, rys. 4). Z takich samych podwyższonych stanowisk, ale w innej skali należy wykonywać zdjęcia murów wysokich od strony zewnętrznej (zdjęcia A2, rys.4). Założeniem przy wykonywaniu tych zdjęć podstawowych jest aby, na jednym fotogramie odfotografowała się zarówno ściana zewnętrzna muru wysokiego jak również ściana zewnętrzna muru niskiego. W tej sytuacji, jeśli przyjmiemy, że zdjęcia będą wykonywane z odległości ok. 20m od ściany zewnętrznej muru niskiego, to odfotografuje się on w skali 1:100, natomiast ściana zewnętrzna muru wysokiego znajdująca się ok. 6m dalej odfotografuje się w skali ok. 1:130. Przy takim postępowaniu, zakładając, że pokrycie zdjęć „A2” wynosić będzie 55% dla muru niskiego to długości baz będą takie same jak dla zdjęć wykonanych z dziedzińca i wynosić będą 7.2m. Przy takiej bazie pokrycie obrazów ściany muru wysokiego będzie większe i wynosić będzie ok. 65%. Przy wykonywaniu tych zdjęć zwrócić należy uwagę na zapewnienie odpowiedniej głębi ostrości, tak aby zarówno ściana muru wysokiego jak i niskiego były odfotografowane ostro. Dla wszystkich zdjęć podstawowych „A1” i „A2” osnowa fotogrametryczna powinna być zasygnalizowana na osiach fotogramów jako punkty u podnoża muru i na jego koronie. W przypadku zdjęć „A1” będzie to po 4 fotopunkty na każdym stereogramie, natomiast dla zdjęć „A2”, gdzie dojdzie jeszcze po jednym fotopunkcie na niskim murze będzie ich po 6 dla każdego stereogramu.

Jak wcześniej już o tym wspomniano, dla wewnętrznej ściany muru zewnętrznego, której powierzchnia jest płaska, a odległość z której można fotografować nie jest większa niż 3m, zdecydowano się nie wykonywać zdjęć stereoskopowych, a jedynie pojedyncze fotogramy z minimalnym pokryciem pomiędzy zdjęciami rzędu 5–10% (zdjęcia C1 rys.4). Jako kamerę wybrano średnioformatowy aparat fotograficzny Pentacon Six o formacie zdjęć 6x6cm i z obiektywem szerokokątnym o ogniskowej 50 mm. Zdjęcia wykonane z odległości 3m odwzorują fragment muru o wymiarach 3x3m w skali 1:50. Dla każdego zdjęcia należy zasygnalizować na ścianie 4 fotopunkty w narożnikach kadru, tak aby sąsiednie zdjęcia posiadały po dwa punkty wspólne. Takie rozwiązanie umożliwi minimalizację ilości punktów osnowy jak również zapewni wspólny pas pokrycia pomiędzy zdjęciami.

3.1.1.2. Zdjęcia uzupełniające, pomocnicze i dodatkowe.

Zdjęcia uzupełniające „C2” dotyczą tych dolnych fragmentów ścian zewnętrznych wysokich murów, które nie odfotografowały się na zdjęciach podstawowych „A2” ze względu na przysłonięcie murem niskim (rys.4). Pasy dolnych fragmentów ściany nie odfotografowane na zdjęciach podstawowych mogą być różnej szerokości zależnej od wysokości niskich murów zewnętrznych i mogą wynosić od kilkudziesięciu centymetrów do kilku metrów. Uzupełniające zdjęcia należy wykonać, podobnie jak zdjęcia podstawowe w korytarzach między ścianami, z wykorzystaniem kamery Pentacon Six (podobne warunki geometryczne). W dolnych fragmentach ścian wewnętrznych znajdują się pilastry w różnym stanie zachowania. Na części ściany wschodniej pilastry są zachowane w bardzo dobrym stanie. Ponieważ pilastry wystają z płaszczyzny ściany, stąd należy zdjęcia uzupełniające wykonywać w taki sposób aby uniknąć martwych pól na zdjęciach. Sprowadzać się to będzie do wykonywania zdjęć pomiędzy wszystkimi pilastrami. Jedynie w taki sposób można uniknąć braków na odfotografowanym obrazie. Występowanie pilastrów powoduje, że nie można określić współrzędnych fotopunktów metodą pomiarów liniowych, ponieważ utrudniony lub wręcz niemożliwy jest pomiar odległości pomiędzy punktami znajdującymi się na różnych (nawet trzech) płaszczyznach ściany. Dlatego korzystnie jest wykonać dodatkowe pomocnicze zdjęcia, których rolą będzie zarejestrowanie stereoskopowe dolnych fragmentów nieodfotografowanych ścian murów wysokich dla celów pozyskania osnowy fotogrametrycznej dla zdjęć uzupełniających z Pentacona („B” rys.4). Ponieważ zdjęcia te wykonać można jedynie jako nachylone z muru niskiego lub poziome z przestrzeni pomiędzy murami, dlatego powinno się zadbać o to aby wykorzystać taką kamerę która umożliwi z małej odległości zarejestrowanie jak największego fragmentu ściany. Wybrano kamerę UMK ze stożkiem szerokokątnym 10/1318. Wykonany z niskiego muru stereogram zdjęć

nachylonych o bazie pionowej, przy poziomym formacie zdjęć (odległość do ściany ok.5m) zarejestrowany zostanie stereoskopowo pas ściany o długości ok. 8m. Wykonywanie stereogramów pomocniczych o bazie pionowej z wykorzystaniem specjalnego statywu z wyciągiem do zmiany wysokości kamery (bez zmiany położenia statywu) może w znaczny sposób przyspieszyć prace terenowe.

Mury Shunet el Zebib przecięte są czterema bramami. Dwie z nich: zachodnia i południowa mają prostą, dwupłaszczyznową budowę, natomiast dwie pozostałe: północna i wschodnia są bardziej skomplikowane. Dodatkowo na ścianie wschodniej i zachodniej istnieją dwie duże wyrwy w murach tworzące cztery powierzchnie przełomu murów, które powinny zostać zarejestrowane. Wszystkie w/w. obiekty powinny zostać zarejestrowane na zdjęciach dodatkowych, w miarę możliwości stereoskopowo. Ponieważ odległości fotografowania w bramach są nieduże, stąd powinna zostać wykorzystana kamera UMK10/1318, oraz kamera Pentacon Six 5/66. Osnowa dla zdjęć dodatkowych będzie zakładana indywidualnie dla każdego stereogramu, lub zdjęcia, ponieważ zależy od warunków terenowych.

3.2. Sprzęt i materiały fotograficzne

Warunki silnego nasłonecznienia panujące w Egipcie wymagały doboru odpowiedniego materiału fotograficznego. W kamerach fotogrametrycznych UMK wykorzystuje się klisze szklane TO1 o czułości 3 DIN. Klisze te, ze względu na dużą kontrastowość nie nadawały się do fotografowania obiektu o dużych różnicach w oświetleniu. Wymagany był materiał negatywowo o małej kontrastowości i ziarnistości. Po wykonaniu szeregu prób z różnymi materiałami zdecydowano się na błonę panchromatyczną, drobnoziarnistą o czułości 100 EI, KODAK T-MAX 100 Professional Film. Zastosowano ten materiał zarówno dla kamery UMK (błony cięte 13x18cm) jak i dla aparatu Pentacon Six – błony zwojowe o szerokości 60mm. Jednakowy materiał negatywowo dawał gwarancje poprawnych wyników przy montowaniu obrazów z różnych kamer. Również w wyniku prób wybrano jeden z firmowych wywoływaczy Kodaka: XTOL, który w dwukrotnym rozcieńczeniu działa bardzo wyrównująco, zmniejszając kontrast negatywu. Dla zapewnienia płaskości błon ciętych umieszczano je w kasetach bezpośrednio na szklanych płytach. Dla potrzeb ciemni polowej wykonano z żywic epoksydowych specjalny zestaw pojemników do jednoczesnego wywoływania 12 błon ciętych.

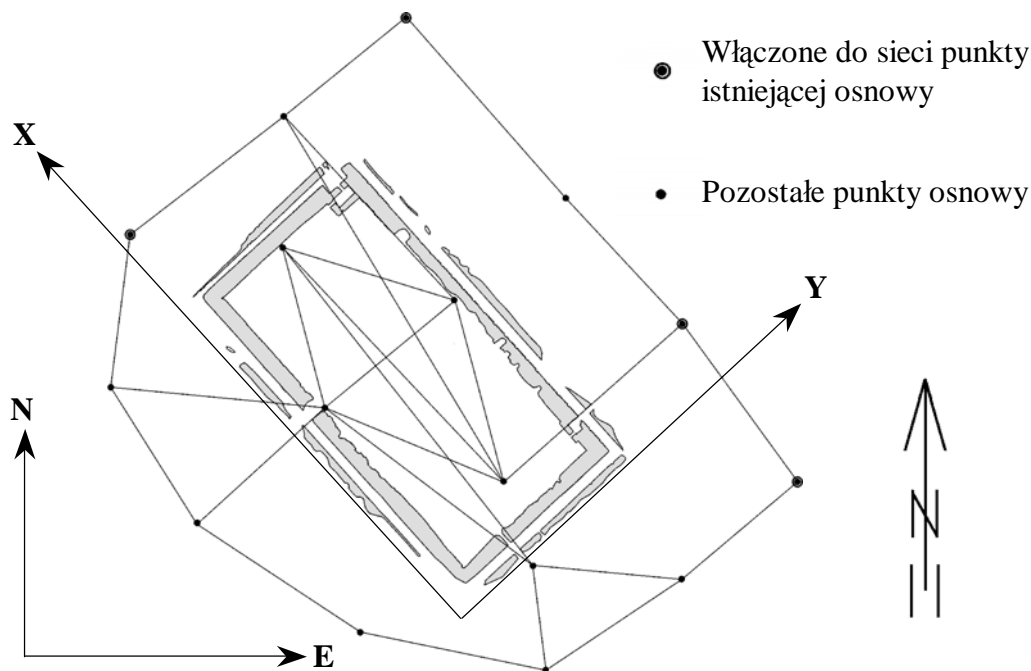
Zgodnie z koncepcją pomiaru fotogrametrycznego wykorzystano 2 kamery fotogrametryczne UMK o stożkach 100 i 200 mm, oraz 2 aparaty Pentacon Six z obiektywami 50 i 80 mm. Dodatkowo dla dokumentowania prac oraz wykonywania fotoszkieł zabrano aparaty cyfrowe KODAK DC 260 oraz KODAK DC 5000. Dla ułatwienia wykonywania zdjęć kamerą UMK z różnych wysokości, w tym stereogramów pionowych, na wyposażeniu znajdował się ciężki metalowy statyw, ze specjalnym wyciągiem, umożliwiający wykonywanie zdjęć ze zmiennej wysokości (max. 3m ponad poziom terenu). Dodatkowo niezbędne wyposażenie stanowił precyzyjny punktowy światłomierz oraz pneumatyczny wężyk spustowy o długości 5m. Do wykonania cyfrowych „odbitek stykowych” zdjęć pomiarowych wykorzystano drukarkę CANON 3000 z głowicą skanującą, która umożliwiała zamianę negatywów na postać cyfrową, a później ich wydruk. Jako komputer polowy wykorzystano notebook Toshiba. Do pomiaru osnowy fotogrametrycznej służył tachimetr elektroniczny TC 600 Leica.

4. Prace terenowe

4.1. Prace geodezyjne

Prace geodezyjne zrealizowane w trakcie prac polowych w Shunet el Zebib obejmowały:

- założenie, pomiar i obliczenie osnowy geodezyjnej,
- pomiar i obliczenie osnowy fotogrametrycznej,
- wyniesienie w teren projektu stanowisk kamer i osnowy fotogrametrycznej,
- pomiar i obliczenie współrzędnych środków rzutów dla zdjęć podstawowych,
- geodezyjne pomiary uzupełniające



Rys. 6. Osnowa geodezyjna oraz układu obiektu

Pomiar osnowy fotogrametrycznej poprzedziło założenie osnowy geodezyjnej, która składała się z szesnastu punktów rozmieszczonych wewnątrz i na zewnątrz obiektu (rys.3). Cztery spośród nich to trwale zastabilizowane punkty osnowy archeologów amerykańskich, a 12 punktów wybrano i zastabilizowano metalowymi rurkami. Tachimetrem elektronicznym TC-600 firmy Leica pomierzono wszystkie dostępne do pomiaru kąty poziome i pionowe, oraz odległości pomiędzy punktami osnowy. Współrzędne punktów obliczono z wyrównania osnowy jako sieci kątowno-liniowej. Średni błąd położenia punktu po wyrównaniu wyniósł $m_p = \pm 3,1$ mm. Z wyrównania wysokościowego sieci niwelacji trygonometrycznej uzyskano wysokości punktów wyznaczonych z błędem $m_h = \pm 1,2$ mm.

Dla pomiaru osnowy fotogrametrycznej zlokalizowanej w korytarzach pomiędzy murami, przyjęto trzydzieści sześć dodatkowych stanowisk, których położenie wyznaczono z osnowy geodezyjnej za pomocą konstrukcji liniowo-kątowych.

Położenie fotopunktów wyznaczono za pomocą wcięć przestrzennych i pomiarów biegunowych wykonanych z ww. 50 punktów osnowy geodezyjnej. W ten sposób określono współrzędne 410 fotopunktów, przy czym wiele z nich określonych było kilkakrotnie, często z różnych stanowisk. Średni błąd położenia fotopunktów wyznaczony na podstawie wielokrotnych pomiarów wynosił $m_p = \pm 5$ mm.

Dla wewnętrznych ścian szczytkowych murów zewnętrznych (niskich), osnowa fotogrametryczna, założona dla jednoobrazowej metody opracowania, wymagała znajomości jedynie współrzędnych płaskich w układzie ściany. Dlatego wystarczyło określić je na drodze pomiarów liniowych. Odległości pomiędzy sygnałami pomierzono ruletką z dokładnością do 1mm. Większa ponad niezbędną ilość pomiarów odległości umożliwiła określenie współrzędnych metodą wyrównania sieci liniowej. Dla czterech ścian pomierzono i wyrównano siedem niezależnych bloków sieci liniowych zawierających ogółem 206 fotopunktów. Współrzędne płaskie wyznaczone były w lokalnych, przypadkowych układach w każdym bloku. Przeciętny błąd średni wyznaczenia punktu tą metodą nie przekraczał $m_p = \pm 2$ mm. Do wyrównania sieci liniowej wykorzystano moduł programu VSD-AGH. Dla wyrażenia obliczonych współrzędnych płaskich w jednolitym układzie obiektu pomierzono niezbędną ilość punktów dostosowania, a następnie wykonano transformacje izometryczne z układu ściany do przyjętego układu obiektu (jednej z jego płaszczyzn X,Z lub Y,Z).

Współrzędne punktów osnowy fotogrametrycznej zlokalizowanych w głównych płaszczyznach elewacji pozwoliły na określenie przebiegu osi poszczególnych murów. W konsekwencji umożliwiło to zdefiniowanie lokalnego układu obiektu (X,Y), który optymalnie realizował równoległość do osi odpowiednich murów. Początek układu przyjęto w narożniku

obiektu (rys. 6) w taki sposób aby operować tylko na dodatnich współrzędnych. Taka definicja układu ułatwia określenie z wartości współrzędnych płaskich (odpowiadających odległościom od narożnika obiektu) lokalizację punktu na obiekcie. Współrzędne punktów osnowy geodezyjnej wyznaczono zarówno w układzie archeologów (N,E,H) jak również w układzie lokalnym. Poziom odniesienia układu lokalnego przejęto z układu archeologów (H=Z). Wszystkie pomierzone fotopunkty określone zostały w układzie lokalnym (X,Y,Z).

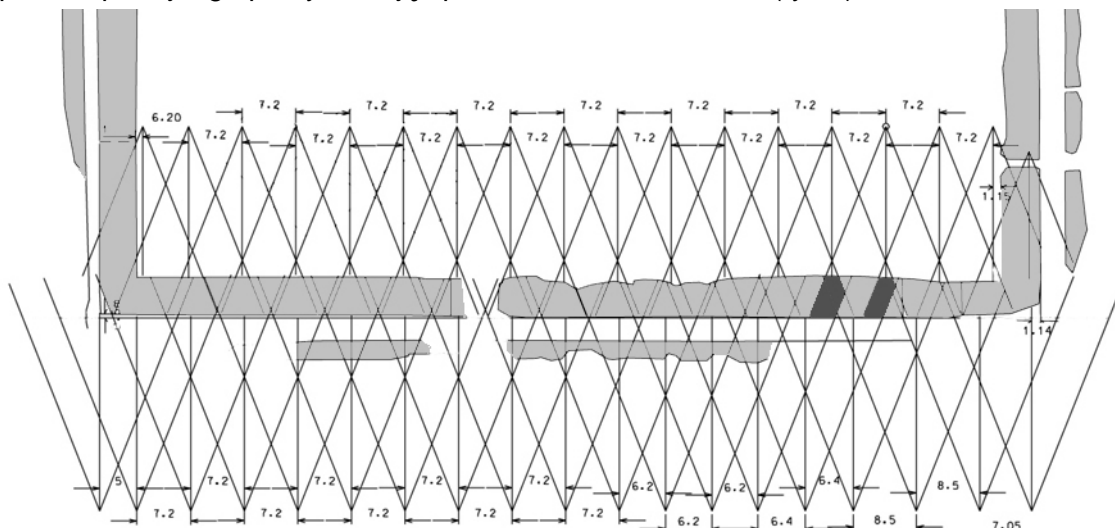
Osobnym zadaniem geodezyjnym było wyniesienie w teren stanowisk kamer i miejsc sygnalizacji osnowy fotogrametrycznej zgodnie z wykonanym wcześniej projektem. Stanowiska stabilizowano palikami i określano wysokość terenu dla wyliczenia ilości poziomów rusztowania, które miało nad nim stać. Jednocześnie wyznaczano na ścianie i koronie muru miejsca do sygnalizacji punktów osnowy fotogrametrycznej. W trakcie wykonywania zdjęć mierzono biegunowo położenie kamery (środek rzutów). Na podstawie tych współrzędnych kontrolowano następnie zgodność położenia środka rzutów z projektem.

Uzupełniające pomiary geodezyjne dotyczyły pomiarów tachymetrycznych punktów obiektu niemożliwych do określenia na podstawie wykonanych zdjęć. Dużą grupę pomierzonych punktów (ok. 450) stanowiły najwyższe punkty korony murów, drugą, mniej liczną, punkty uzupełniające do 8 przekrojów poprzecznych (ok. 220 pikiet).

4.2. Prace fotogrametryczne

4.2.1. Projekt wykonania zdjęć

Zgodnie z koncepcją wykonania zdjęć oraz przeprowadzonym wywiadem terenowym zaprojektowano zdjęcia podstawowe dla kamery UMK 200/1318 z podwyższonych stanowisk. Przyjęto zasadę, że wszystkie stanowiska będą w tej samej odległości od fotografowanej ściany. Ze względu na niejednakowe długości ścian tego samego muru (ściana wewnętrzna od dziedzińca jest krótsza o podwójną grubość muru od ściany zewnętrznej) stanowiska kamer nie wypadają naprzeciw siebie, nawet, jeżeli długości baz były identyczne (rys. 7). Tam gdzie było to możliwe długości baz po obydwu stronach muru były takie same. Odstępstwo od tej reguły związane było z głębokimi niszami, które występowały na ścianach wysokich murów: ścianie zewnętrznej zachodniej i ścianie wewnętrznej wschodniej. Aby poprawnie przetworzyć obraz takiej niszy należy ją sfotografować centralnie, aby zapewnić widoczność całego jej wnętrza bez martwych pól. Przedstawiony na rys. 6 projekt stanowisk dla ściany zachodniej uwzględnia położenie czterech olbrzymich nisz na ścianie zewnętrznej (niewidocznych na rysunku). Przyjmując te cztery stanowiska jako niezmiennie zaprojektowano pozostałe zgodnie z zasadą minimalnego pokrycia podłużnego zdjęć 55% i takiej samej odległości od ściany. Konsekwencją przyjętego rozwiązania, w którym osie kamer z dwóch stron muru są różnie względem siebie poprzysuwane jest konieczność dokładnego wyznaczenia położenia dwustronnych sygnałów na koronie murów, tak aby jednocześnie odfotografowane były w pasach potrójnego pokrycia zdjęć po dwóch stronach muru (rys.7).

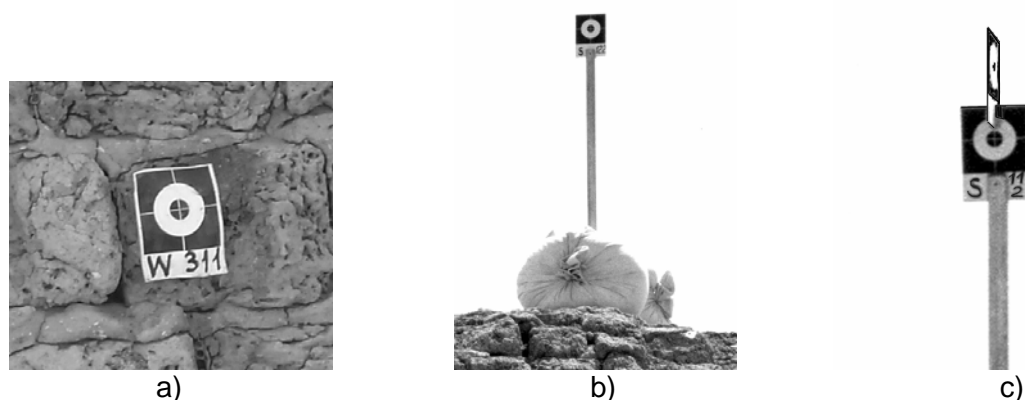


Rys.7 Projekt rozmieszczenia stanowisk dla ściany zachodniej uwzględniający nisze w murze

Na rysunku widać przykładowe, ciemne, czworoboki na koronie muru pokazujące powierzchnię, na której musi być postawiony sygnał aby spełnić sformułowany wyżej postulat. Projekt obejmował również wyznaczenie rzędnej wysokościowej dla środków rzutów zdjęć dla danej ściany tak, aby odpowiadały połowie wysokości muru. Na podstawie zaniwelowanej linii stanowisk, oraz przyjętej rzędnej obiektywów kamer określono dla każdego stanowiska wysokość kamery nad poziom rusztowania.

4.2.2. Sygnalizacja osnowy fotogrametrycznej

Przed wykonaniem zdjęć, na murach, w wyznaczonych z projektu miejscach, zasygnalizowano punkty kontrolne. Problem sygnalizacji dotyczył sposobu przymocowania znaczków do powierzchni zwietrzałych cegieł mułowych. Wykorzystano przezroczysty i wodorozpuszczalny klej Metylan Specjal, który rozpuszczony do rzadkiej konsystencji wsiąkając w zwietrzałą ścianę zespałał ją stanowiąc podkład do przyklejenia papierowego sygnału. W dolnych partiach murów, przed przyklejeniem sygnałów, wbijano w ścianę cienki gwoździć (4 cm), a następnie dopiero naklejano sygnał centrycznie w stosunku do łebka gwoździ. Postępowanie takie spowodowane było koniecznością zapewnienia przetrwania sygnalizacji do drugiego etapu pomiarów fotogrametrycznych, po całkowitym odkopaniu murów, który nastąpi najwcześniej w 2002 roku. Częste odrywanie papierowych sygnałów przez miejscową ludność wymusiło taki sposób zabezpieczenia osnowy.



Rys. 8. Rodzaje sygnałów używanych jako fotopunkty:

- a) papierowy sygnał naklejany na mur, b) dwustronny sygnał na koronie muru,
- c) czterostronny (krzyżowy) sygnał na koronie muru

Zaprojektowane w Polsce sygnały (rys.8) poza funkcją jednoznacznego określenia punktu pomiarowego miały również spełniać funkcję informacyjną, umożliwiającą w szybki sposób identyfikację zdjęcia w przestrzeni obiektu oraz miały przeciwdziałać omyłkom podczas pomiaru geodezyjnego. Na specjalnym polu sygnału wpisywane były informacje mówiące o położeniu punktu na murze, numerze zdjęcia, oraz oznaczenie muru. Stosowanie takich samych naklejanych sygnałów na górze ścian murów było praktycznie niemożliwe, ponieważ nie dało się ich nakleić z korony murów (względny bezpieczeństwa), a częste przystawianie 12 metrowej drabiny do murów powodować mogło ich uszkodzenie. Dlatego zaproponowano i zrealizowano specjalne sygnały, których założenie na koronie murów wymagało jednokrotnego wejścia na mur. Sygnały te naklejone centrycznie z dwóch stron blachy przymocowane zostały na stałe do metalowej rurki o długości ok.70 cm, tą z kolei nałożono na wbity częściowo w koronę muru gruby gwóździć (dla uniemożliwienia przesunięcia się sygnału). Po opisaniu pisakiem numeru i oznaczenia ściany, spionowaniu libelą pudełkową rurki z sygnałem i obłożeniu jej workami z piaskiem dla zastabilizowania pionowego ustawienia uzyskano dwustronny fotopunkt, który wykorzystany był dla zdjęć dwóch elewacji muru. Centryczne przyklejenie sygnału po dwóch stronach, oraz niewielka grubość blachy pozwalały na przyjęcie takich samych współrzędnych sygnału po jednej i drugiej stronie. W narożach muru umieszczono sygnały tej samej konstrukcji, lecz z dwiema

prostopadłymi względem siebie tarczami (rys.8). Centra tych czterech sygnałów znajdowały się na jednej prostej pionowej, różniły się jedynie wysokością. Różnica ta wynosiła dla wszystkich sygnałów 75 mm. Przy takiej konstrukcji jeden sygnał wykorzystywany był dla czterech stereogramów, a pomiar współrzędnych jednego z czterech centrów sygnału wystarczał dla określenia współrzędnych trzech pozostałych. Ponieważ korona muru wschodniego (wysokiego) była niedostępna ze względu na bardzo zły stan jego zachowania, dlatego jedynie tam górne punkty elewacji były, podobnie jak dolne, przyklejane. Do tego celu wykorzystano długą 6 metrową tyczkę składaną, do której przymocowano pędzel z klejem i sygnałem papierowym. Po wielu próbach udało się przykleić w ten sposób 12 punktów na elewacjach wschodnich.. Tą samą metodą przyklejane były wysokie sygnały we wszystkich bramach i przełomach murów. Znaczkę te były słabo widoczne i miały najczęściej nieczytelne opisy ze względu na mało precyzyjny i brudny sposób ich przyklejania (klej brudził się od pyłu cegieł). Odszukiwanie ich na zdjęciach i w terenie było często utrudnione.

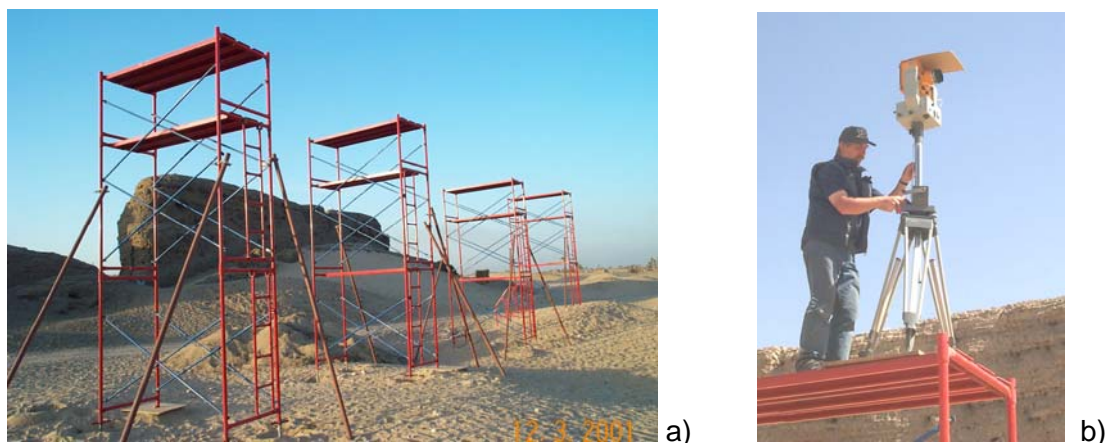
Osobną grupę stanowiły papierowe sygnały dla zdjęć wykonywanych aparatem Pentacon Six, oraz kamerą UMK 100/1318. Ze względu na niewielkie odległości fotografowania (duża skala zdjęć) sygnały te miały o wiele mniejsze wymiary (2x2cm) w stosunku do sygnałów dla zdjęć podstawowych (5x5cm). Poza różnicami w wymiarach wszystkie inne zasady sygnalizacji były identyczne (stabilizacja gwoździkami, zapisana informacja itp.)

4.2.3. Wykonanie zdjęć podstawowych, uzupełniających, pomocniczych i dodatkowych

Zdjęcia podstawowe kamerą UMK 20/1318 wykonane zostały z podwyższonych stanowisk (większość, ze specjalnych segmentowych rusztowań). Po wykonaniu próbnych zdjęć zdecydowano fotografować ściany tylko wtedy, gdy znajdują się we własnym cieniu tzn. fotografować je pod słońce. Jedynie takie postępowanie zapewniło jednorodność tonalną obrazu ściany i brak dużych kontrastów pomiędzy światłami i cieniami negatywu. Przy wykonywaniu zdjęć należało dbać o to, aby promienie słoneczne nie wpadły do obiektywu. W tym celu stosowano różnego rodzaju osłony przeciwsłoneczne. Ze względu na dużą prącochłonność i czasochłonność budowy rusztowań jak również często bardzo krótki okres dostępności ściany do fotografowania (zacienienie), przyjęto zasadę wykonywania dubletów zdjęć na każdym podwyższonym stanowisku. Szansa na to, że jedno z wykonanych dwóch zdjęć będzie poprawnie wykonane jest bardzo duża i w praktyce okazało się, że nie było potrzeby ponownego budowania rusztowań. Dla odfotografowania na zdjęciach pomiarowych dodatkowych informacji zapisywano je pisakiem na kartonie i umieszczano pod rejestrowaną ścianą. Informacje te dotyczyły głównie stałej kamery oraz numeru stanowiska. Zasada ta obowiązywała dla wszystkich, wykonanych kamerami UMK, zdjęć obiektu. Wykonywanie zdjęć z rusztowania (rys. 9) przebiegało wg następującego schematu: po ustawieniu statywu na rusztowaniu, zamontowaniu kamery i zgrubnym spoziomowaniu (dokładne było niemożliwe ze względu na niestabilność rusztowania) celowano na odpowiedni punkt orientacyjny (dolny fotopunkt na ścianie). Po ustawieniu pryzmatu na bolcu osi kamery realizowano, metodą biegunową, pomiar położenia kamery. Następnie po określeniu wielkości odcinka podniesienia kamery, za pomocą korbki statywu wysuwano dźwigar z kamerą na żadaną wysokość. Po ustawieniu kartonu informacyjnego u podnóża ściany, oraz sprawdzeniu z dołu czy obiektyw jest poprawnie osłonięty przed słońcem wyzwalało migawkę z użyciem pneumatycznego wężyka spustowego. Ze względu na niestabilność stanowisk starano się nie przekraczać 0.01s czasu otwarcia migawki. Ogółem kamerą UMK 20/1318 wykonano zdjęcia podstawowe ze 113 stanowisk (55 ujęć z zewnątrz murów i 58 ujęć elewacji wewnętrznych).

Drugą grupę zdjęć podstawowych stanowiły zdjęcia z aparatu Pentacon Six z obiektywem szerokokątnym, wykonane w korytarzu pomiędzy murami dla ścian wewnętrznych murów zewnętrznych. Przed wykonaniem zdjęć, korzystając z matówki aparatu zasygnalizowano osnowę w taki sposób, aby fotopunkty znajdowały się w narożach zdjęcia. Kolejne zdjęcia były wykonywane z minimalnym pokryciem (tak aby dwa te same fotopunkty odfotografowały się na sąsiednich zdjęciach). Wszystkie zdjęcia wykonywano w taki sposób, aby zapewnić w przybliżeniu równoległość płaszczyzny zdjęcia do płaszczyzny

ściany. Podczas wykonywania zdjęć prowadzony był specjalny dziennik wykonania zdjęć, w którym notowane były informacje o numerze filmu kolejności klatek i ich treści. Ze względu na bardzo podobną treść zdjęć, oraz dużo powtórzeń nieudanych ujęć, był to jedyny sposób zapanowania nad materiałem zdjęciowym. Ogółem wykonano 101 ujęć dla wszystkich czterech ścian.



Rys. 9 Wykonywanie zdjęć podstawowych kamerą UMK 20/1318
a. rusztowania przygotowane do wykonania zdjęć murów południowych
b. wykonywanie zdjęcia

Inną grupą zdjęć wykonanych aparatem Pentacon Six były zdjęcia uzupełniające wykonywane w celu uzupełnienia treści dolnych partii ścian wysokich przystłniętych na zdjęciach podstawowych niskim murem zewnętrznym. Tutaj nie sygnalizowano osnowy fotogrametrycznej, a jedynie wykonywano zdjęcia i to tylko dla tych partii ścian, które tego wymagały (nie wszędzie mur zewnętrzny przystłniał ścianę). Dla fragmentu wschodniej ściany zewnętrznej muru wysokiego, gdzie jej wysokość była taka sama jak muru zewnętrznego zdjęcia uzupełniające stanowiły jednocześnie zdjęcia podstawowe. Ponieważ na tym fragmencie ściany występowały bardzo dobrze zachowane pilastry, dlatego dla uniknięcia martwych pól, zdjęcia wykonywano bardzo gęsto, tzn. jedno zdjęcie pomiędzy każdymi dwoma kolejnymi pilastrami. Nie na wszystkich tych zdjęciach zmieściła się cała wysokość muru, stąd wykonano dodatkowe zdjęcia nachylone z korony muru zewnętrznego. Dla całego, sześćdziesięciometrowego, odcinka ściany z pilastrami wykonano 57 zdjęć pomiarowych. Ogółem dla wszystkich ścian wykonano 128 zdjęć uzupełniających. Zdjęcia pomocnicze, zrealizowane dla zapewnienia osnowy geodezyjnej zdjęciom uzupełniającym, wykonano szerokokątną kamerą UMK 100/1318 w postaci stereogramów pionowych (B, rys. 4). Dla tych obszarów gdzie wykonano zdjęcia uzupełniające podnóża ścian w formacie 6x6cm, wykonywano nachylone stereogramy z korony niskiego muru. Wykorzystanie statywu z możliwością podniesienia kamery, na specjalnym dźwigarze, o ok.1m powodowało, że po wykonaniu pierwszego zdjęcia, ustawienie kamery do wykonania następnego sprowadzało się jedynie do zmiany kasety i podniesienia kamery o zadaną długość bazy pionowej. Jedynie w przypadku wspomnianego wyżej fragmentu ściany wschodniej z pilastrami, zdjęcia pomocnicze wykonane zostały z korytarza pomiędzy ścianami jako stereogramy pionowe o osiach poziomych. Ogółem wykonano 35 stereogramów pionowych, w tym 22 nachylone i 13 o osiach poziomych.

Ostatnią grupą zdjęć były zdjęcia dodatkowe, których zadaniem było zarejestrowanie wewnątrz czterech bram oraz przełomów w murach ściany zachodniej i wschodniej. Różnicowane warunki wykonywania zdjęć spowodowały, że zdjęcia wykonywane były z wykorzystaniem wszystkich dostępnych kamer. Ogółem wykonano 7 stereogramów kamerami UMK, oraz 19 zdjęć kamerą Pentacon Six.

Wszystkie wykonane negatywy wywoływane były na miejscu w pomieszczeniu adaptowanym na potrzeby ciemni fotograficznej. Po analizie uzyskanych wyników zdecydowano, które ujęcia powinny zostać powtórzone. Materiał zabrany do kraju był pod

względem fotograficznym i fotogrametrycznym (kompletność osnowy) w pełni zweryfikowany i poprawny.

5. Podsumowanie

Przedstawiona powyżej technologia fotogrametrycznej inwentaryzacji obiektu Shunet el Zebib w Egipcie, będącego jednym z największych na świecie zabytków z tego okresu, wymagała dopracowania jej w najdrobniejszych szczegółach. Skromne ramy tego przeglądowego artykułu uniemożliwiają szczegółowe odniesienie się do wielu rozwiązanych problemów technologicznych. Dzięki właściwie dobranemu materiałowi negatywowemu KODAK T-MAX 100, oraz poprawnemu naświetleniu uzyskano bardzo dobrej jakości negatywy, pomimo bardzo trudnego do fotografowania obiektu (szara, mało kontrastowa, obła i zwietrzała cegła mułowa). Po odpowiednim dostosowaniu kaset, po raz pierwszy na tak dużą skalę, wykorzystano błony cięte w kamerach fotogrametrycznych UMK. Rozwiązano problem trwałej, nieniszczącej sygnalizacji fotopunktów wraz z systemem identyfikacji fotogramów. Wykorzystanie kamer o różnych formatach zdjęć i różnych kątach widzenia obiektów umożliwiło elastyczne dostosowanie się do warunków obiektu. Zdjęcia wykonano na podstawie opracowanego projektu uwzględniającego lokalne zróżnicowanie obiektu oraz warunki opracowania kameralnego. Wszystkie prace laboratoryjne, obliczenia geodezyjne oraz prace kontrolne wykonywane były na miejscu, dla zapewnienia kompletności i bezbłędności materiałów przywiezionych do kraju.

Literatura

[1] M.Borowiec, A. Boroń, J.Jachimski, A. Wróbel, : Cyfrowa dokumentacja fotogrametryczna murów SHUNET el ZEBIB. Geodezja, tom 8.zeszyt 2, Kraków 2002

Adam Boroń, Marta Borowiec, Józef Jachimski, Andrzej Wróbel

Inwentaryzacja fotogrametryczna SHUNET EL ZEBIB w Egipcie

Streszczenie

W artykule przedstawiona została koncepcja i realizacja inwentaryzacyjnych prac fotogrametrycznych jednego z najstarszych i największych architektonicznych obiektów zabytkowych Egiptu – SHUNET el ZEBIB, datowanego na 27 w p.n.e., a zlokalizowanego w środkowym Egipcie, w okolicach starożytnego ABYDOS. Pierwszy etap dwuetapowej inwentaryzacji zrealizowany został w 2001 roku przez zespół pracowników Zakładu Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej, Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH. W treści artykułu scharakteryzowano obiekt, opisano wszystkie etapy prac terenowych i projektowych, oraz omówiono główne problemy technologiczne, które rozwiązano przed wyjazdem oraz w trakcie prac terenowych.

Photogrammetric documentation of Shunet el Zebib monument in Egypt

Abstract

This paper presents conception and production of photogrammetric documentation of Shunet el Zebib – one of the oldest and biggest monuments in Egypt. This monument was built in 27 century B.C. in central Egypt, close to ancient place Abydos. The first stage of two-stages documentation was executed in year 2001 by staff of Photogrammetry and Remote Sensing Informatics Department, Faculty of Mining Geodesy and Environmental Engineering of AGH. The paper includes description of monument and all technological issues which were applied during field works in Egypt.

dr hab. inż. Jerzy Bernasik, prof.n. AGH

Recenzja pracy p.t.:

Inwentaryzacja fotogrametryczna murów SHUNET EL ZEBIB w Egipcie

Autorzy: Adam Boroń, Marta Borowiec, Józef Jachimski, Andrzej Wróbel

Fotogrametryczna inwentaryzacja zabytków jest dziedziną rozwijaną od wielu lat w Zakładzie Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej, Wydziału Geodezji Górniczej AGH. Doświadczenia oraz osiągnięcia Zakładu zaowocowały propozycją wykonania nowoczesnej, cyfrowej dokumentacji fotogrametrycznej monumentalnego zabytku egipskiego SHUNET EL ZEBIB z 27 w. p.n.e., który do dzisiejszych czasów przetrwał w postaci podwójnej linii murów wykonanych z cegieł mułowych. Fotogrametryczna inwentaryzacja cyfrowa tego obiektu zaprojektowana została dwuetapowo. Pierwszy etap, który został już zakończony, obejmował inwentaryzację obiektu w stanie istniejącym od lat, natomiast drugi etap polegać będzie na uzupełnieniu dokumentacji o te fragmenty obiektu, które zostaną odsłonięte po zakończeniu prac wykopaliskowych.

W recenzowanym artykule zaprezentowana została problematyka prac terenowych prowadzonych w Egipcie. Przedstawiono wielowątkową koncepcję pomiarów fotogrametrycznych tego skomplikowanego, monumentalnego obiektu (mury o wysokości ponad 10m) wraz z opisem realizacji wszystkich etapów prac terenowych. Scharakteryzowano używany sprzęt fotogrametryczny i geodezyjny oraz materiały fotograficzne. Podano uzyskane dokładności określenia współrzędnych punktów osnowy geodezyjnej i fotogrametrycznej.

Praca nadaje się do opublikowania w półroczniku „Geodezja” Akademii Górniczo-Hutniczej.