

Janusz Cieślak*

OPRACOWANIE FOTOPLANU MAŁOWIDEŁ FASETY KLASZTORU CYSTERSÓW W LUBIAŻU NA PODSTAWIE KOLOROWYCH ZDJĘĆ NIEMETRYCZNYCH**

1. Wstęp

Powodem wykonywania opracowań inwentaryzacyjnych obiektów architektonicznych jest najczęściej: próba ocalenia przed zapomnieniem bezpowrotnie obracającego się w ruinę zabytku, konieczność odtworzenia istniejącego stanu przed przystąpieniem do konserwacji lub stworzenie bazy danych obiektu np. dla potrzeb turystycznych lub tworzenie modeli dla jeszcze innych potrzeb np. badań naukowych.

W niniejszej publikacji przedstawiono opracowanie ściennych malowideł klasztoru w Lubiążu na podstawie zdjęć kolorowych wykorzystywanych do przetwarzania (wykonanych aparatami niemetrycznymi) oraz metrycznych zdjęć czarno-białych wykorzystywanych do opracowania numerycznego modelu powierzchni. W wyniku przetworzenia, które ogólnie mówiąc polegało na takim przedstawieniu kolorowych obrazów aby powierzchnia walcowa, którą prezentują została pokazana jako jej rozwinięcie do postaci płaszczyzny, uzyskano obrazy w postaci 2D, służące, po odpowiednim przeskalowaniu i wydrukowaniu, jako dokumentacja istniejącego stanu. Są one produktem w pełni metrycznym, na którym można dokonywać pomiarów. Skala wydruku opracowania wyniosła 1:20.

Metoda, którą wykonano opisywane opracowanie została opracowana w Zakładzie Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej AGH w Krakowie. Po raz pierwszy zastosowano ją do opracowania fotoplanu rozwinięcia sklepienia sali biblioteki klasztoru w Lubiążu, które dokładnie jest opisane w pozycji [1]. W późniejszym okresie metodę tą wykorzystano również do inwentaryzacji malowideł Kaplicy Świętokrzyskiej na Wawelu [2] oraz sklepienia kościoła O.O. Pijarów w Krakowie [3]. Wszystkie wspomniane opracowania wykonano w Zakładzie Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej AGH w Krakowie. W zakładzie tym badania w kierunku przetwarzania obrazów powierzchni rozwijalnych prowadzono już w latach siedemdziesiątych. Uzyskano wówczas rozwinięty obraz powierzchni XVII wiecznego zabytkowego sklepienia z wykorzystaniem przetwornika różniczkowego i autografu analitycznego [5]. W pozycji [4] opisano, na przykładzie opracowania sklepienia klasztoru w Lubiążu, metodykę wytwarzania rozwinięć powierzchni z uwzględnieniem wpływu warunków geometrycznych wykonywanych zdjęć (kąąt widzenia obiektywu, kąąt pomiędzy osią obiektywu a wektorem normalnym do powierzchni fotografowanej) oraz postaci Numerycznego Modelu Powierzchni na dokładność gotowych przetworzonych obrazów.

* Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska.

** Artykuł opracowano na podstawie materiałów przygotowanych przez autora w magisterskiej pracy dyplomowej, wykonanej pod kierunkiem Prof. Dr hab. inż. Józefa Jachimskiego, w ramach programu badań statutowych (nr 11.150.47) Zakładu Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej AGH w 1998 r.

2. Opracowanie praktyczne

Celem niniejszego opracowania było wykonanie fotoplanu rozwinięcia malowideł fasety części północnej i wschodniej sali biblioteki Opactwa Cystersów w Lubiążu.

Etapy opracowania:

- **przygotowanie materiałów;**
- **pomiar punktów;**
- **opracowanie Cyfrowego Modelu Powierzchni CMP;**
- **przygotowania danych do opracowania na MGE;**
- **przetworzenie obrazów.**

2.1 Przygotowanie materiałów

Pierwszym etapem było zebranie wszystkich posiadanych materiałów oraz ich ocena. Gromadzenie materiałów polegało głównie na:

- dokładnej ocenie posiadanych materiałów dotyczących obrazów przeznaczonych do stworzenia stereogramów opracowywanej części: okazało się, że wszystkie potrzebne obrazy były wcześniej zeskanowane z rozdzielczością 2000 dpi (12.7 μ m.) zapisane w formacie TIFF jako pozytywy i nagrane na płytce CD, obrazy te wykonano jako czarno-białe kamerą UMK o formacie 13 \times 18 cm;
- dokładnej ocenie posiadanych materiałów dotyczących obrazów kolorowych: okazało się, że na nośniku CD zgromadzone są tylko obrazy części północnej fasety, zeskanowane z rozdzielczością 2000 dpi, wykonane aparatem wielkoformatowym Pentacon Six TI (format 6 \times 6 cm) jako kolorowe diapozytywy.

Obrazy pozostałych części fasety wybrano z bardzo dużej ilości istniejących negatywów wykonanych aparatem małoobrazkowym formatu 36 \times 24 mm, część zdjęć małoobrazkowych wykonano przez Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej AGH aparatem Nikon 801S, a część przez konserwatorów zabytków ASP (niestety nie udało się ustalić jakim aparatem), wszystkie zdjęcia małoobrazkowe wykonano jako negatywy kolorowe. Wybrane obrazy poddano skanowaniu na skanerze PHOTOSCAN firmy Intergraph z rozdzielczością 1814 dpi (14 μ m). Aby zmniejszyć wielkość obrazów i poprawić parametry skanowania wybierano z klatek tylko obszary niezbędne dla przetwarzania (na obszarze malowidła istnieje w miarę małe zróżnicowanie tonalne co pozwala na optymalny zapis obrazu – bez obciążenia kolorów). Parametry skanowania, zakres przepuszczalności światła skanowanego negatywu (teoretycznie od 0 do 1), były ustawiane indywidualnie dla każdej klatki tak aby histogram każdej ze składowych RGB obrazu mieścił się w całości w maksymalnym zakresie 256 odcieni jasności. Jak wynika z empirycznych wartości współczynnika przepuszczalności (plasował się w zakresie 0.0001 do 0.055) negatywy były zbyt gęste co świadczy o niedoświetleniu podczas wykonywania zdjęć, było to przyczyną zagubienia wielu szczegółów w ciemnych miejscach obiektu. Okazało się również, że ze względu na nierównomierne oświetlenie sali biblioteki zdjęcia są znacznie zróżnicowane zarówno pod względem tonu jak i koloru, na niektórych zdjęciach widoczne były jasne poświaty powstałe w wyniku padania ostrego światła przez otwory okienne. Zmniejszyła to znacząco czytelność zdjęcia. Jakość zdjęć pod względem geometrycznym była dość dobra z wyjątkiem części południowej gdzie zdjęcia wykonano pod zbyt dużym kątem. Wszystkie zeskanowane obrazy przetworzono na pozytywy i dokonano wstępnych korekcji radiometrycznych (rozciągnięcie histogramu osobno dla każdej składowej RGB), operacji tych dokonano w programie

PHOTOSHOP. Następnie zapisano obrazy w standardowym formacie TIFF jako 8 bitowe RGB i zmagazynowano na nośniku CD.

2.2 Pomiar punktów

Nośnikiem informacji, służącym do pomiaru punktów były opisane w rozdziale 2.1 obrazy czarno-białe i kolorowe. Należy zaznaczyć, że pomiar punktów wykonywano oddzielnie na stereogramie i na obrazie kolorowym. Spośród wszystkich mierzonych punktów możemy wyróżnić dwie kategorie. Pierwszą kategorią są punkty do utworzenia Cyfrowego Modelu Powierzchni (CMP); ich współrzędne zapisane są w układzie przestrzennym X, Y, Z. Drugą kategorią są punkty do przetwarzania cyfrowego obrazów kolorowych. Punkty pierwszej kategorii uzyskano z pomiarów na czarno-białych stereogramach, drugiej przez pomiar odpowiadających sobie (tych samych) punktów na stereogramie i obrazie kolorowym. Podczas pomiaru punktów drugiej kategorii wystąpił problem identyfikacji tych samych miejsc na obrazach kolorowych i czarno-białych z dokładnością do kilku pikseli. W praktyce starano się wybierać do pomiaru krawędzie i rysy powstałe przez pęknięcia i odpadanie materiału pokrywającego ścianę lub jednoznaczne szczegóły elementów malowideł. Jednakże na skutek nie wystarczającej ilości takich miejsc często stawiano punkty w miejscach o zmieniającym się kontraście. Miało to niestety negatywny wpływ na dokładność pomiaru, gdyż odcienie szarości na zdjęciach czarno-białych nie zawsze odpowiadają zmianie barwy na zdjęciu kolorowym. Pomimo rozróżnienia punktów na dwie powyższe kategorie, w praktyce pomiar punktów zarówno do przetwarzania cyfrowego jak i do CMP wykonano za jednym razem i były to dokładnie te same punkty. Pomiaru dokonano na komputerze osobistym PC klasy PENTIUM 166 przy użyciu VSD (Video Stereo Digitizer), przez dwukrotne otwarcie tego programu raz ze stereogramem drugi raz z obrazem kolorowym, przejście pomiędzy otwartymi programami odbywało się przez naciśnięcie kombinacji klawiszy Alt-Tab. Podczas pomiaru szczególną uwagę zwracano na równomierność rozmieszczenia punktów oraz ich odpowiednie zagęszczenie. Gęstość rozmieszczenia wynosiła średnio ok. 3.9 pkt/m² dla części północnej (zob. rys. 1) i 5.7 pkt/m² dla części wschodniej. W wyniku pomiaru punktów otrzymano dwa zbiory danych:

- zbiór współrzędnych przestrzennych X, Y, Z w układzie terenowym, jako wynik pomiaru na stereogramie;
- zbiór współrzędnych obrazowych X_{obr} , Y_{obr} w pikselach, jako wynik pomiaru na obrazie kolorowym.

2.3 Opracowanie cyfrowego modelu powierzchni

Cały proces opracowania CMP przeprowadzono na komputerze PC klasy PENTIUM166MMX z wykorzystaniem programu SURFER. Program ten pozwala na tworzenie CMP tylko w postaci siatki regularnych czworoboków. Danymi wejściowymi do programu były pliki ze współrzędnymi uzyskane z VSD.

Opracowanie CMP przebiega wg etapów przedstawionych poniżej.

1. Wczytanie danych w postaci współrzędnych przestrzennych X, Y, Z.
2. Zmiana płaszczyzny rzutowania na płaszczyznę równoległą do płaszczyzny stycznej w środkowej części krzywizny biorąc pod uwagę przekrój poprzeczny CMP, na rys. 2 pokazano wygenerowane CMP po zmianie płaszczyzny rzutowania.
3. Wygenerowanie w module *Grid*→*Data* CMP wg zadanych parametrów, którymi są:
 - obszar w jakim będzie obliczany CMP (X_{min} , X_{max} , Y_{min} , Y_{max});
 - wielkość oczka siatki w kierunku X i Y;

- zastosowana metoda obliczeń (zob. rozdział 2.3.1);
- dodatkowe opcje dostępne dla każdej metody (np. rodzaj powierzchni, typ zmienności).

4. Obliczenie odchyłek punktów pomiarowych od CMP w module *Grid→Residuals*.

Zmiana płaszczyzny rzutowania opisana w podpunkcie 2 wykonana jest w celu zmniejszenia błędów skupiających się w miejscach dużej „stromości” CMP. Podczas generowania CMP w takich właśnie miejscach mogą powstać największe zniekształcenia gdyż nawet nieznaczna niedokładność położenia punktu powoduje duże zachwianie ciągłości powierzchni w kierunku osi Z. Zmianę płaszczyzny rzutowania uzyskuje się w wyniku transformacji współrzędnych w płaszczyźnie przekroju poprzecznego wg wzorów (1) i (2).

$$X = x * \cos\alpha - z * \sin\alpha \quad (1)$$

$$Z = x * \sin\alpha + z * \cos\alpha \quad (2)$$

Jest to transformacja izometryczna bez przesunięcia względem początku układu. Do jej wykonania potrzebne są dwa punkty dostosowania lub znajomość kąta obrotu α , w tym przypadku wynosił on ok. 45° .

gdzie: x, z – współrzędne w układzie pierwotnym. X, Z – współrzędne w układzie wtórnym.

2.3.1 Próby optymalnego dopasowania CMP

Na podstawie doświadczeń opisanych w pozycji [1] oraz szeregu własnych eksperymentów do generowania CMP wykorzystywano tylko dwie metody z pośród siedmiu dostępnych w programie SURFER. Program ten umożliwia wykorzystanie następujących metod:

- *inverse distance to a power*;
- *kriging*;
- *minimum curvature*;
- *polynomial regression*;
- *radial basis functions*;
- *shepard's method*;
- *triangulation with linear interpolation*.

Dla potrzeb opracowania wykorzystano dwie metody (*polynomial regression* oraz *kriging*).

Metoda *polynomial regression* polega na dopasowaniu powierzchni określonej wielomianem do punktów pomiarowych, przy czym istnieje możliwość definiowania stopnia wielomianu niezależnie w dwóch prostopadłych kierunkach na płaszczyźnie odniesienia. Na podstawie oceny wizualnej stwierdzono, że powierzchnię fasety stanowi prawie idealny walec, dlatego też podczas pierwszych prób dopasowania CMP zastosowano wielomian pierwszego stopnia w kierunku tworzących i drugiego stopnia w kierunku krzywizny. Jak się okazało po obliczeniu odchyłek założenie to było błędne gdyż były one zbyt duże i wyniosły maksymalnie ok. $V_{max} = \pm 7\text{cm}$ przy odchyleniu standardowym $SD = 3\text{cm}$. Podczas dalszych prób ustalono, że najmniejsze odchyłki $V_{max} = \pm 2.8\text{cm}$ ($SD = 1\text{cm}$) daje wielomian stopnia 5 w obu kierunkach; V_{max} jest nadal zbyt duże lecz taką wartość odnotowano tylko dla pojedynczych punktów, które mogłyby zostać odrzucone bez dużego uszczerbku dla przetwarzania; bardziej miarodajna w tym wypadku jest wartość SD, która mogłaby być zaakceptowana. Wariantu tego jednak nie zastosowano ponieważ założono na samym początku prostoliniowość w kierunku tworzącej. Zastosowano w zamian wariant taki, w którym został zachowany pierwszy stopień w kierunku tworzącej i piąty w kierunku

krzywizny, odchyłki wyniosły wówczas $V_{max} = \pm 3.7\text{cm}$ ($SD = 1.7\text{cm}$); wynik ten był w dalszym ciągu niezadowalający. Kiedy jednak podzielono cały obszar na 4 oddzielne części i odrzucono punkty końcowe, gdzie powierzchnia ulegała wygięciu, odchyłki uplasowały się w granicach ok. $V_{max} = \pm 1.6\text{cm}$ ($SD_{max} = 9\text{mm}$), co zostało już ostatecznie zaakceptowane. CMP liczone niezależnie dla każdej z 4 części a w konsekwencji wszystkie następne obliczenia odnoszono do indywidualnych CMP. Obliczenia wszystkich CMP zostały wykonane z pewnymi zakładkami aby sprawdzić dopasowania w miejscach łączenia. Metoda dopasowania powierzchni wielomianem została zastosowana tylko dla części północnej, gdyż mimo uzyskania akceptowalnych odchyłek podczas liczenia CMP, w dalszej części obróbki (po przetworzeniu) wystąpiły problemy z łączeniem obrazów. Udało się je jednak pokonać odrzucając pojedyncze punkty. Część północna obejmuje fragment długości 8.89m i szerokości 2.26m, na który składa się 96 punktów.

Drugą metodą wykorzystywaną do dopasowania powierzchni był *Kriging*, który „zakłada statystyczny charakter zbioru wartości wysokości punktów odniesienia. Liczona jest autokorelacja pomiędzy danymi punktami i dokonywana interpolacja liniowa metodą najmniejszych kwadratów. W rezultacie metoda daje wartość wyrównaną pozbawioną wpływu błędu systematycznego”[1]. *Kriging* stosowany był z następującymi parametrami:

- model zmienności (*Variogram model*) – kwadratowy[1];
- typ powierzchni (*drift type*) – kwadratowy[1];

Metodę tą wykorzystano do wygenerowania całości CMP fasety dla części wschodniej. Obejmuje on fragment długości 25.17m i szerokości 2.45m, na którym pomierzono 443 punkty (odrzucając zakładki 419). Do przetwarzania został on podzielony na 6 części różnej długości odpowiadających zakresom obrazów kolorowych. Dla każdej części wygenerowano oddzielny CMP stosując duże zakładki. Wszystkie późniejsze obliczenia odnoszono do indywidualnych CMP. Maksymalne odchyłki wyniosły $V_{max} = \pm 1.1\text{cm}$ ($SD_{max} = 3\text{mm}$), należy zauważyć, że SD_{max} zmalało aż 3 razy w porównaniu z poprzednią metodą co świadczy o znacznie lepszym dopasowaniu powierzchni.

Rys. 3 przedstawia plany warstwiczne wygenerowane w oparciu o CMP. Jest tam bardzo dobrze zilustrowana różnica pomiędzy dwoma opisanymi powyżej metodami, zastosowanymi w tym opracowaniu. Na rysunku (b) warstwice tworzą linie proste wzajemnie do siebie równoległe (co jest zgodne z początkowym założeniem prostoliniowości w kierunku tworzącej) natomiast na rysunku (a) warstwice wykazują tendencję do lekkiego zakrzywiania się. CMP na rysunku (b) (wygenerowany metodą *polynomial regression*) jest gorzej dopasowany do lokalnych zniekształceń niż CMP pokazany na rysunku (a). Należy podkreślić istotne różnice w CMP obliczonym metodą *kriging* i *polynomial regression*.

1. Metoda *polynomial regression* (dla pierwszego st. wielomianu w kierunku tworzącej):
 - zachowuje prostoliniowość CMP w kierunku tworzącej (współrzędna rozwinięta powierzchni w tym kierunku jest równa odległości na modelu lecz jest krótsza od odległości na rzeczywistej powierzchni);
 - daje słabe lokalne dopasowanie (współrzędna rozwinięta powierzchni w kierunku krzywizny, liczona z modelu jest krótsza od rzeczywistej).
2. Metoda *kriging*:
 - daje dobre lokalne dopasowanie (współrzędna rozwinięta powierzchni w kierunku krzywizny, liczona z modelu jest bliższa rzeczywistej niż w metodzie *polynomial regression*)
 - nie zachowuje prostoliniowości CMP w kierunku tworzącej a więc nie spełnia podstawowego założenia pozwalającego na wykonanie rozwinięcia; jeżeli pomimo to wykonuje się w praktyce rozwinięcia z takich modeli, to robi się to przy założeniu że błędy wynikające z tego tytułu są zanedbywalnie małe; nie wykonywano jak dotąd żadnych analiz pozwalających na określenie błędów wynikających z nie zachowania prostoliniowości CMP w kierunku tworzącej.

Inną ważną rzeczą oprócz zastosowania właściwej metody interpolacji było określenie odpowiedniej wielkości oczka siatki CMP aby na etapie obliczania współrzędnych rozwiniętych nie wystąpiły zbyt duże rozbieżności pomiędzy tymi współrzędnymi a rzeczywistą długością łuku. Przyjęto następujące wymiary oczka siatki: 2cm w kierunku krzywizny i 10cm w kierunku tworzących powierzchni.

Odchyłki pomiarowe pomiędzy mierzonym punktem a powierzchnią CMP, o których mowa w podpunkcie 4 rozdziału 2.3, i które zostały przedstawione powyżej jako V_{max} , w SURFER-rze są liczone prostopadłe do płaszczyzny rzutowania, dlatego ich największe wartości przypadają w miejscach największej „stromości” CMP. Rzeczywista odchyłka jest równa odległości pomiędzy punktem pomiarowym a powierzchnią liczona w kierunku prostej powstałej przez ortogonalny rzut punktu pomiarowego na powierzchnię. Aby przeliczyć odchyłki obliczone w programie na rzeczywiste należy je skorygować z wykorzystaniem wzoru (3).

$$V_{rz} = V_{surf} * \cos\alpha \quad (3)$$

α - kąt pomiędzy płaszczyzną styczną do powierzchni w punkcie ortogonalnego rzutu punktu pomiarowego na tą płaszczyznę a płaszczyzną rzutowania mierzony w płaszczyźnie przekroju poprzecznego powierzchni - ilustracja na rys. 4.

2.4 Przygotowanie danych do opracowania na Modular GIS Environment (MGE)

2.4.1 Kontrola pomiaru punktów

Po wykonaniu pomiaru na modelu stereo i obrazie kolorowym przeprowadzono kontrolę jednoznacznej identyfikacji tych samych punktów. Zadanie to wykonano transformując wszystkie punkty z układu terenowego do układu zdjęcia z wykorzystaniem transformacji DLT. Jako punktów dostosowania użyto wszystkich punktów, które są zapisane w obu układach (terenowym i obrazowym). Po wyliczeniu współczynników transformacji obliczono współrzędne obrazowe punktów terenowych i porównano je ze współrzędnymi pomierzonymi na obrazie; wyliczony został także błąd średni m_0 , który był miarą jakości wykonanych pomiarów, na podstawie [1] przyjęto maksymalną wartość błędu średniego $m_{0max} = 4.5$ piksela. Jako kryterium oceny jakości punktu przyjęto trzykrotną wartość maksymalnego błędu średniego (punkty o błędzie większym odrzucano). W praktyce wartość błędu średniego dla poszczególnych obrazów obejmowała zakres od 0.898 pikseli do 4.12 pikseli. Do transformacji DLT wykorzystano program DLTWM1 napisany przez dr W. Mierzwę, który oblicza wszystkie powyżej opisane elementy.

2.4.2 Wyznaczenie współrzędnych w rozwinięciu

Wyznaczenie współrzędnych rozwiniętych przebiegało wg etapów przedstawionych poniżej.

1. Wyznaczenie współrzędnych początku i końca rozwinięcia na powierzchni płaszczyzny rzutowania. Operację tą wykonano przy użyciu programu BLN napisanego przez dr W. Mierzwę. Należało wprowadzić wartość linii zerowej X_0 , od której na prawo i lewo będą wyznaczone wartości współrzędnych rozwiniętych oraz współrzędne Y_{TIN} , X_{TIN} każdego punktu mierzonego, dla którego wyznaczone są współrzędne rozwinięte. Indeks TIN oznacza, że mamy do czynienia z punktami przeznaczonymi do przetwarzania cyfrowego obrazu, chociaż jak wiadomo z rozdziału 2.2 tych samych punktów użyto również do

stworzenia CMP. Nomenklatura jest tutaj kwestią umowną, stosowanie oznaczeń ma służyć dokładnemu zaznaczeniu kierunku rozumowania. Położenie linii zerowej zostało ustalone w najwyższym punkcie powierzchni (środek krzywizny) i współrzędną tej linii przyjęto odpowiednio $X_0 = 8.00$ m, $X_0 = 7.20$ m. dla części północnej i wschodniej.

2. Obliczenie na podstawie CMP i wyników z programu BLN współrzędnych początków i końców cięciw łuku, którego długość chcemy wyznaczyć, Odcinki cięciw powstają z przecięcia się płaszczyzny przekroju z siatką CMP (zob. rys. 5); od wielkości oczek siatki w kierunku płaszczyzny przekroju zależy z jaką dokładnością będzie wyznaczona długość łuku (współrzędna rozwinięta).
3. Następnym etapem jest wyznaczenie długości łuków licząc od linii zerowej do każdego mierzonego punktu z osobna. Operację tą wykonano w programie DLUK6 napisanego przez dr W. Mierzwę. „Program oblicza długość łuku elipsy lub innej krzywej opisanej w sposób uproszczony zbiorem leżących na niej punktów. Długość łuku liczona jest jako suma długości cięciw leżących pomiędzy danymi sąsiednimi punktami siatki CMP. Pierwszy punkt łuku, od którego oblicza się jego długość znajduje się w punkcie o podanej współrzędnej X_0 . Końcowy punkt łuku znajduje się w miejscu powstałym po ortogonalnym zrzutowaniu danego punktu na ostatni odcinek siatki”[1].
W wyniku otrzymano współrzędne: X_{ROZ} – współrzędna w kierunku krzywizny i Y_{TIN} – współrzędna w kierunku tworzącej brana bezpośrednio z pomiaru.

2.5 Przetwarzanie obrazów w I/RAS C (MGE)

2.5.1 Przetworzenie

Program I/RAS C w opisywanym zadaniu został wykorzystany do przetworzenia obrazów kolorowych do postaci rozwiniętego fotopłanu oraz do łączenia i korekcji radiometrycznych.

Danymi wejściowymi do programu I/RAS C były obrazy cyfrowe oraz współrzędne punktów TIN w dwóch układach. Pierwszy układ jest układem obrazowym, pierwotnym obrazu przed przetworzeniem (współrzędne w pikselach brane bezpośrednio z pomiaru na VSD), drugi układ jest układem współrzędnych rozwiniętych, wtórnym (współrzędne wyrażone w [m] * 100000). Przetwarzanie ma charakter nieparametryczny i jest wykonywane z układu pierwotnego na wtórny dzięki zadanej transformacji. Program umożliwia wykorzystanie następujących opcji: *projective*, *affine*, *helmert*, *2nd order*, *3rd order*, *5th order*, *finite element*. Dostępny jest także wybór metody resamplingu (opcje- *Nearest*, *Bilinear*, *Cubic*). Resampling wszystkich przetwarzanych obrazów został wykonany metodą biliniową.

Część północna fasety przetwarzana była przy pomocy transformacji drugiego stopnia (*2nd order*). Część ta w całości znajdowała się na jednym obrazie, jednakże ze względu na wcześniejszy podział tego fragmentu na 4 mniejsze części dla potrzeb opracowania CMP (rozdział 2.3.1) przetwarzanie również odbywało się osobno dla każdej z czterech części obrazu. Maksymalne odchyłki (dla zastosowanej transformacji) na punktach dostosowania wynosiły w skali obiektu ok. 9mm przy odchyleniu standardowym $SD_{SR} = 4$ mm. Część wschodnią przetworzono używając transformacji metodą elementów skończonych (*Finite Element*), polega ona na stworzeniu, z punktów pomierzonych, siatki nieregularnych trójkątów i przetworzeniu obrazu odbywającym się oddzielnie wewnątrz każdego trójkąta na podstawie trzech jego narożników (transformacja afiniczna); trzy punkty dostosowania stanowią minimalną ilość do wykonania transformacji afinicznej, w takim wypadku niestety

nie można oszacować błędu jej wykonania. Na część wschodnią składało się sześć oddzielnych obrazów, w obrębie których stworzono oddzielne CMP.

2.5.2 Łączenie obrazów (mozaikowanie)

Łączenie wykonywano w miejscach pokrycia się punktów TIN dwóch sąsiednich obrazów. Polegało ono na takim wskazaniu linii łączenia aby szczegóły malowideł po obu jej stronach stanowiły ciągłość i nie urywały się. Łączenie wykonano w module *Mosaic Images...* z menu *Tools* gdzie należało m. in. zdefiniować szerokości pasa, w którym zostaną przetworzone obrazy wzdłuż linii łączenia (przyjmowano ok. 8-15 pikseli).

Podczas łączenia obrazów części północnej wystąpiły duże nieciągłości dlatego konieczne było kilkakrotne ponowne wykonanie przetwarzania po odrzuceniu niektórych punktów aż do momentu uzyskania zadowalającego efektu łączenia.

W przypadku części wschodniej przetwarzanej metodą elementów skończonych bardzo ważne było równomierne i gęste rozmieszczenie punktów TIN; początkowo w trakcie łączenia powstawały bardzo duże nieciągłości, dlatego konieczny był pomiar punktów dodatkowych w celu zwiększenia zakładek; przy odpowiedniej ilości punktów efekty łączenia były bardzo dobre pomimo oddzielnych CMP dla każdego zdjęcia.

2.5.3 Wykonanie korekcji radiometrycznych

Ta operacja wykonywana była kilkakrotnie w czasie przetwarzania: pierwszy raz bezpośrednio po skanowaniu (rozdział 2.1), drugi raz przed przetworzeniem, trzeci raz przed łączeniem, czwarty raz przed wydrukiem. Do wykonania korekcji użyto programów PHOTOSHOP i I/RAS C. Korekcji wymagały głównie obrazy części wschodniej (faseta części północnej znajdowała się na jednym obrazie), ponieważ pomiędzy tymi obrazami wystąpiły dość znaczne różnice w jasności i w barwach. Korekcje przed przetworzeniem wykonano w PHOTOSHOP-ie, który daje bardzo łatwą możliwość zmiany jasności i kontrastu (*Brightness/Contrast*) oraz manipulacji zmian barwy (*Color balance*) dzięki opcji *Adjust* z menu *Image*. Po przetworzeniu (przed łączeniem) obrazy poddano następnej korekcji wyrównując jak najdokładniej różnice pomiędzy obrazami. Dokładność jej wykonania ma decydujący wpływ na jakość efektów opracowania. Na obrazach słabo dopasowanych powstają prawie nie możliwe do usunięcia kontrasty powierzchniowe lub krawędzie kontrastu rozciągające się wzdłuż linii łączenia. Korekcje te przeprowadzono w programie I/RAS C; program ten w menu *Contrast* posiada podobne opcje jak PHOTOSHOP (*Contrast/Brightness, Linear Clip, Equalize Full*) oraz dodatkowo dwie inne bardzo wygodne opcje *Match Mean and Std. Dev.* oraz *Match Cumulative Frequency*, które pozwalają na bezpośrednie dopasowanie jednego obrazu do drugiego przez wskazanie obrazu dopasowywanego i tego, do którego chcemy dopasować. Po łączeniu (przed wydrukiem) wykonuje się korekcję całej mozaiki tak aby jak najdokładniej oddać rzeczywistą barwę malowidła. Zadanie to jest bardzo trudne i praktycznie nie osiągalne, dodatkowym utrudnieniem jest w tym wypadku różnica pomiędzy obrazem na ekranie monitora komputerowego a wydrukiem.

2.5.4 Wydruk opracowania

W celu wydrukowania obrazów należało wykonać ich kalibrację. Kalibrację wykonano przez porównanie długości odcinka na obrazie i w terenie. Zrobiono to w programie PHOTOSHOP sposobem przedstawionym poniżej.

- Wybór odcinka z możliwością jednoznacznej identyfikacji jego początku i końca z dokładnością do kilku pikseli (wybierano odcinek pomiędzy punktami wykorzystywanymi do przetwarzania).
- Wycięcie obrazu, o zakresie pokrywającym się, z dokładnością do kilku pikseli, z wybranym odcinkiem (przynajmniej w jednym z dwóch możliwych kierunków – w wierszu lub kolumnie). Odczytanie ilości pikseli wyciętego obrazu w kierunku jego pokrycia z końcami odcinka.
- Wyliczenie terenowej wartości długości odcinka (jego składowej ΔX lub ΔY w zależności od tego jaki kierunek został obrany w punkcie poprzednim) na podstawie współrzędnych rozwiniętych.
- Obliczenie (na podstawie proporcji) wielkości piksela w terenie.
- Obliczenie (na podstawie proporcji) wielkości piksela w skali wydruku (1:20).
- Przeskalowanie obrazu drukowanego przez przemnożenie ilości jego pikseli przez wartość piksela w skali wydruku, uzyskano w ten sposób rozmiar obrazu w skali wydruku. Wykonanie resamplingu obrazu pierwotnego na obraz drukowany metodą biliniową; operację tą wykonano w PHOTOSHOP-ie w module *Image Size*.

Wyznaczenie wielkości piksela w terenie wykonano dwukrotnie na podstawie dwóch niezależnych odcinków, za każdym razem uzyskano wielkość 2.5 mm dla obrazu ściany wschodniej (1814 dpi) oraz 2.1 mm dla obrazów ściany północnej (2000 dpi). Wielkość piksela w skali wydruku wyniosła odpowiednio dla ściany wschodniej i północnej 0.125 mm i 0.105 mm. Drukowanie wykonano na drukarce atramentowej Hp Paint Jet XL 300 z rozdzielczością 300 dpi. Do niniejszej publikacji, ze względu na trudności techniczne, nie dołączono gotowych fotoplanów, zamieszczono je w pracy dyplomowej pt. „Opracowanie fotoplanu malowideł fasety sali biblioteki Opactwa Cystersów w Lubiążu na podstawie kolorowych zdjęć” znajdującej się w archiwum Zakładu Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej.

3 Wnioski i uwagi

1. Rozdzielczość obrazów cyfrowych przeznaczonych dla tego opracowania wynosiła 1814 dpi dla części wschodniej i 2000 dpi dla części północnej a maksymalna rozdzielczość wykorzystywanej drukarki wynosi 300 dpi, pociąga to za sobą znaczne zubożenie informacji źródłowej (rozdzielczość obrazów przeznaczonych do wydruku zredukowano do 300 dpi).
2. Ze względu na różnicę w odwzorowaniu barw na monitorze komputera i wydruku, bardzo trudno określić właściwy kolor obrazu, dodatkowe trudności stwarza brak wzorca porównawczego. W opisywanym opracowaniu starano się dobrać barwy tak, aby odpowiadały barwom na wydruku fotoplanu sklepienia wykonanym wcześniej.
3. Jest potrzebny stosunkowo długi czas do dobrego opanowania umiejętności obsługi nowego oprogramowania i zrozumienia istoty i znaczenia poszczególnych etapów technologii. Osoba początkująca nie mogąc śledzić procesu obliczeniowego, nie do końca zdaje sobie sprawę ze znaczenia wykonywanych operacji, dlatego może ona mieć trudności w diagnozowaniu wyników poszczególnych etapów przetwarzania.
4. Współczesne komercyjne pakiety programowe do obróbki obrazów cyfrowych posiadają ciągle niewystarczającą ilość specjalistycznych narzędzi, dlatego bardzo trudno w zadowalający sposób dopasować wzajemnie pod względem kolorystycznym łączone obrazy.
5. Zdjęcia były wykonane przy świetle dziennym nierównomiernie oświetlającym malowidła. Światło dzienne (szczególnie w słoneczne dni) padające przez otwory okienne stwarza bardzo niekorzystne warunki oświetleniowe (cienie, kontrasty, odbicia).

Drugi problem wiąże się z kształtem fasety (w przybliżeniu $\frac{1}{4}$ wycinka walca) oraz jej usytuowaniem; czynniki te są powodem zmiany kąta padania światła na obszarze jej wygięcia w zakresie 90° stwarza to widoczne zróżnicowanie jasności w obrębie pojedynczego obrazu (górną część ciemną – duży kąt padania światła, dolną część jasną – mały kąt padania światła); sposobem na wyeliminowanie tych zakłóceń jest wykonanie zdjęć przy odpowiednio skierowanym sztucznym oświetleniu.

12. Odpowiedź na pytanie którą z metod generowania CMP testowanych w tym opracowaniu stosować nie jest jednoznaczna, *polynomial regression* spełnia warunek teoretyczny rozwinięcia, *kriging* jest wygodny w zastosowaniu praktycznym (można obliczać CMP dla dużych obszarów nie obniżając lokalnego dopasowania). Metody zastosowane w opracowaniu, z pośród wszystkich dostępnych w SURFER-rze, są najbardziej optymalne dla powierzchni rozwijalnych (np. takiej jak opracowana fasetka) nie należy jednak uważać, że są one tak samo dobre dla powierzchni o innych kształtach (np. nieregularna powierzchnia terenu).

Literatura

- [1] Diana Lusina, Artur Misterek – Opracowanie Barwnego Cyfrowego Fotoplanu Rozwinięcia Sklepienia Kolebkowego na Przykładzie Opactwa Cystersów w Lubiążu. Praca dyplomowa. Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej AGH. Kraków 1997.
- [2] A. Boroń, J. Jachimski – Inwentaryzacja Kaplicy Świętokrzyskiej na Wawelu z Wykorzystaniem Metod Fotogrametrii Cyfrowej. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji Vol. 8, 1998, str. 16-1 : 16-13.
- [3] A. Boroń, A. Wróbel – Opracowanie Fotoplanu Malowidła ze Sklepienia Kościoła O.O. Pijarów w Krakowie z Wykorzystaniem Metod Fotogrametrii Cyfrowej. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji Vol. 8, 1998, str. 17-1 : 17-9.
- [4] J. Jachimski, W. Mierzwa – Metodyka Sporządzania Cyfrowego Fotoplanu Rozwinięcia Sklepienia na Przykładzie Malowideł Biblioteki Opactwa Cystersów w Lubiążu. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji Vol. 8, 1998, str. 18-1 : 18-9.
- [5] J. Jachimski – Nonkonventional Application of Differential Rectifier and Analytical Plotter in The Recording of Historic Monuments. ISPRS Congress, Helsinki 1976.