

**FOTOPLAN ROZWINIĘCIA TRUDNODOSTĘPNYCH POLICHROMII  
BIZANTYŃSKICH W ABSYDZIE KATEDRY W SANDOMIERZU**

**DEVELOPMENT OF HARD TO REACH BYZANTINE POLYCHROMY  
LOCATED IN APSE OF CATHEDRAL CHURCH IN SANDOMIERZ**

**Adam Boroń, Marta Borowiec, Tomasz Pirowski**

Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska AGH w Krakowie

**SŁOWA KLUCZOWE:** inwentaryzacja fotogrametryczna, fotoplan cyfrowy polichromii, fotoplan rozwinięcia, osnowa geodezyjna i fotogrametryczna, aparat cyfrowy, stereogram cyfrowy

**STRESZCZENIE:** W artykule przedstawiono fotogrametryczną metodę opracowania fotoplanów rozwinięcia polichromii bizantyńskich usytuowanych na trzech ścianach absydy katedry sandomierskiej. Malowidła znajdujące się za ołtarzem są albo całkowicie niedostępne – przykryte ścianą ceglana, albo trudnodostępne – przysłonięte przez kolumny i duży gzyms zwieńczający ołtarz. Ekstremalnie trudne warunki pomiarowe spowodowały, że specjalnie dla tego obiektu opracowano metodę pomiaru fotogrametrycznego umożliwiającą wykonanie dokumentacji w postaci wysokorozdzielczych fotoplanów rozwinięcia polichromii. Wykorzystano aparat cyfrowy Sony A900, który z obiektywem o ogniskowej 20 mm zapewnił największy kąt widzenia. Stereogramy pomiarowe wykonano skalibrowanym aparatem cyfrowym Minolta Dynax 5D (f=20 mm) ze specjalnie skonstruowanej pionowej bazy. Właściwe oświetlenie zapewniła pierścieniowa lampa błyskowa Sigma EM 140 DG. Pomierzona niezależnie na czterech poziomach rusztowania osnowa fotogrametryczna przetransformowana została do wspólnego układu z wykorzystaniem pośrednich punktów sytuacyjnych widocznych przynajmniej z dwóch stanowisk instrumentu. Pomiar geodezyjne wykonano metodą biegunową z wykorzystaniem tachimetru bezlustrowego TCR 407 Leica. Fotoplany rozwinięcia trudnodostępnych fragmentów malowideł wykonano metodą dwuetapową. W pierwszym etapie na podstawie wykonanych stereogramów pomiarowych utworzono fotoplany bazowe charakteryzujące się poprawną geometrią, ale niską czytelnością spowodowaną bardzo niekorzystną orientacją osi zdjęć w stosunku do płaszczyzny ściany. W drugim etapie na fotoplany bazowe nałożono zdjęcia pomiarowe wykonane prostopadle do powierzchni malowideł. Opracowanie kameralne wysokorozdzielczych fotoplanów rozwinięcia wykonano z wykorzystaniem autografu cyfrowego VSD, oprogramowania PI-Calib, Microstation oraz ImageAnalyst. Korektę radiometryczną fotomosaik wykonano w programie Adobe Photoshop CS2. Fotoplan wynikowy o rozdzielczości obiektowej 1mm posiada szacowaną dokładność wewnętrzną na poziomie  $\pm 3$ mm.

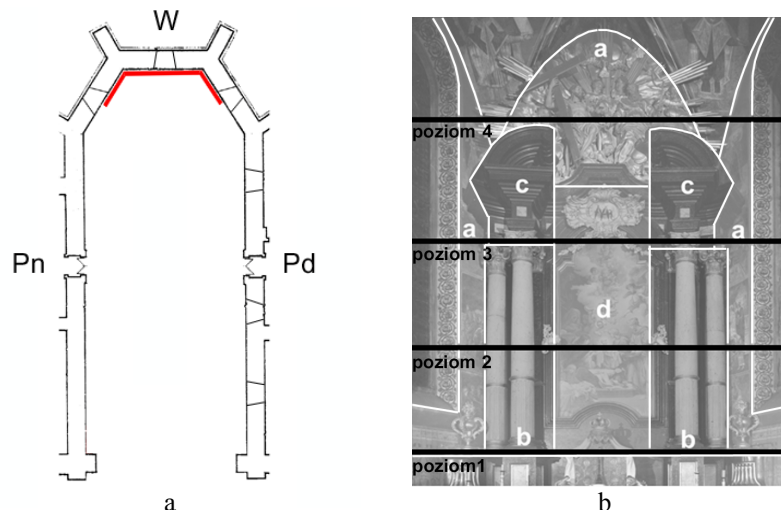
## **1. WPROWADZENIE**

W drugiej połowie 2008 roku podjęto prace konserwatorskie w części prezbiterialnej katedry sandomierskiej. W trakcie prac konserwatorskich, po usunięciu przemalowań, konserwatorzy odsłoniли oryginalne fragmenty malowideł bizantyńskich schowane za konstrukcją ołtarza. Zaisntniała konieczność wykonania dokumentacji tych polichromii.

Niewielka przestrzeń pomiędzy kolumnami i gzymsem ołtarza a ścianami z malowidłem, często nie przekraczająca kilkudziesięciu centymetrów, stwarzała bardzo trudne warunki pomiaru i opracowania. W ramach badań statutowych w Katedrze Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska AGH w Krakowie opracowano technologię fotogrametrycznego opracowania wysokorozdzielczego, hybrydowego fotoplanu rozwinięcia absydy.

## 2. CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU ORAZ KONCEPCJA POMIARU

Prezbiterium katedry sandomierskiej pokryte polichromiami bizantyńskimi ograniczone jest pięcioma ścianami i sklepieniem krzyżowo-żebrowym. Ściany prezbiterium zamknięte są absydą, którą stanowią trzy krótkie ściany: wschodnia (środkowa) i dwie ściany północno-wschodnia i południowo-wschodnia, usytuowane wobec niej pod kątem ok. 45° (Rys. 1a). Malowidła bizantyńskie na ścianach prezbiterium katedry sandomierskiej, w tym również w absydzie, podzielone są na sceny figuralne dostosowane do architektury obiektu. W absydzie sceny figuralne ograniczone krawędziami okien znajdują się równocześnie na dwóch sąsiednich ścianach. Dla zapewnienia ciągłości powierzchni malarskiej narożniki ścian zawierających malowidło zostały wypełnione tynkiem, tworząc *quasi* walcową powierzchnię przejściową łączącą obie płaszczyzny.

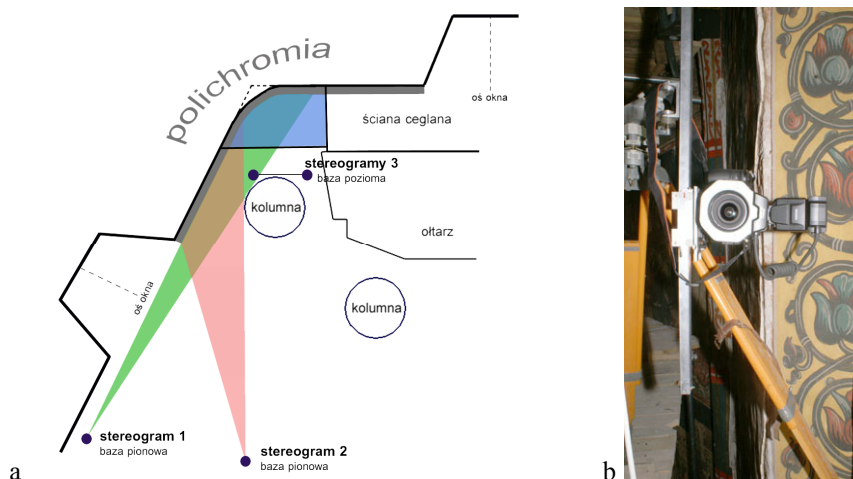


Rys. 1. Rzut prezbiterium z absydą (a), fragment ołtarza obrazujący sytuację pomiarową (b) (a – obszar dostępny, b – obszar trudnodostępny do pomiaru fotogrametrycznego i geodezyjnego, c – obszar trudnodostępny do pomiaru fotogrametrycznego i niedostępny do pomiaru geodezyjnego; czarne linie poziome obrazują podesty rusztowań)

Barokowy ołtarz, wybudowany w XVIII wieku, skutecznie zasłonił większość malowideł bizantyńskich absydy. Dobrze widoczne pozostały jedynie fragmenty scen na zewnątrz ołtarza (Rys. 1b, strefa a). Na ścianie wschodniej część polichromii jest całkowicie zasłonięta dobudowaną, konstrukcyjną ścianą ceglana, z którą zespolony jest ołtarz (Rys. 1b, strefa d). Wyjątek stanowią dwie sondy ukazujące niewielkie fragmenty scen przy obu krawędziach, zasłoniętego ścianą okna. Malowidła na wąskich pasach ściany wschod-

niej, po obu stronach muru ceglanego przechodzące na ściany sąsiednie zasłonięte są kolumnami ołtarza oraz jego gzymsem (Rys. 1b, strefa b i c). Najtrudniejsza do pomiaru strefa c (Rys. 1b) znajduje się na łączeniu obu ścian absydy na wysokości główce kolumn i gzymsu zwieńczającego ołtarz. Jest to obszar zamknięty i niedostępny do pomiaru geodezyjnego, a pomiar fotogrametryczny może być wykonany tylko z wykorzystaniem specjalnego wysięgnika (ramienia) umożliwiającego wsunięcie w tę zamkniętą przestrzeń aparatu i zdalne wykonanie serii niecelowanych zdjęć.

Rysunek 2a pokazuje przekrój poziomy przez ołtarz i dwie ściany absydy po stronie północnej. Najmniejsza odległość od powierzchni kolumny do malowidła wynosi 30 cm, a w przestrzeni zamkniętej gzymsem i ścianami absydy odległość do malowidła nie przekracza 40 cm. Biorąc pod uwagę, że zdjęcia dla potrzeb fotoplanów powinny być wykonywane w miarę prostopadle do malowidła i to, że przyłożony do ściany (kolumny) aparat zmniejsza odległość fotografowania, można zauważyć, że w wielu przypadkach zdjęcia źródłowe mogą być wykonywane jedynie jako zdjęcia niecelowane z odległości ok. 15÷25 cm od malowidła. Dla zdjęć, dla których maksymalna powierzchnia odfotografowanego malowidła jest bardzo niewielka, a sąsiednie zdjęcia wykonywane „na ślepo” mają nieznaną pokrycie, trudno poprawnie zasygnalizować fotopunkty, a jeszcze trudniej je pomierzyć. Po wielu analizach opracowano technologię, która w opisanych warunkach miała zapewnić zarówno dokładność geometryczną jak i poprawność radiometryczną opracowanych fotoplanów. Dwuobrazowa rejestracja powierzchni ścian z malowidłami pozwoliła na sprzęgnięcie informacji przestrzennej XYZ zarejestrowanych punktów z informacją radiometryczną, umożliwiając uzyskanie matryc fotoplanów ze zdjęć tworzących stereogramy. W drugim etapie, niezależnie wykonane pojedyncze fotogramy polichromii, po transformacji na matryce wzorcowe dostarczyły wysokorozdzielczych fotoplanów do końcowego montażu dokumentacji. Punktem wyjścia do zastosowanej technologii były metody opisane szczegółowo w publikacjach (Boroń, Wróbel, 1998), (Boroń *et al.*, 2006), (Boroń *et al.*, 2007).



Rys. 2. Przekrój poziomy przez narożnik absydy obrazujący geometrię zadania pomiarowego oraz projekt pomiaru fotogrametrycznego (a), baza mechaniczna do wykonywania stereogramów pionowych i poziomych (b)

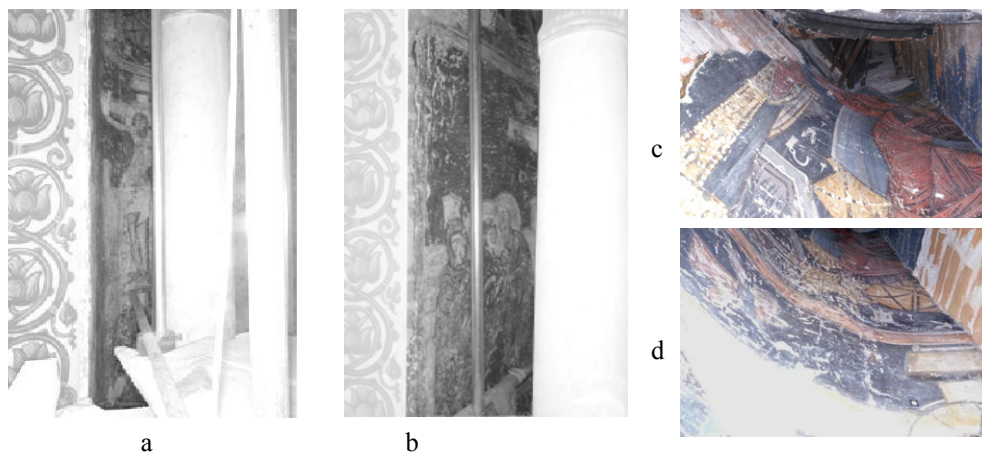
Koncepcja dwuobrazowej rejestracji malowideł absydy w miejscach trudnodostępnych pokazana jest na rysunku 2a. Stereogramy o osiach poziomych i bazie pionowej (typu 1 i 2) miały rejestrować przestrzeń zawartą pomiędzy kolumną a ścianami prezbiterium (obszar a i b, Rys. 1b). Natomiast dwa stereogramy *quasi* normalne o osiach pionowych i bazie poziomej służyć miały podwójnemu zarejestrowaniu przestrzeni zamkniętej gzymsem ołtarza i głowicami kolumn (obszar c, Rys. 1b). Jeden z tych stereogramów, wykonany z większej odległości (niższy), obejmujący częściowo malowidła zarejestrowane na stereogramach typu 1 i 2 miał dostarczyć naturalnych fotopunktów drugiemu, wykonanemu jak najbliżej niedostępnych fragmentów malowidła w strefie c (Rys. 1b), niedostępnej dla pomiaru geodezyjnego.

### 3. POMIAR GEODEZYJNY I FOTOGRAMETRYCZNY POLICHROMII

Pomiar geodezyjny i fotogrametryczny wykonywany był w warunkach obiektu gęsto pokrytego rusztowaniami. Interesujące nas malowidła w absydzie dostępne były z czterech poziomów rusztowania (Rys. 1b). Założona na ścianach absydy osnowa fotogrametryczna, w postaci naklejonych sygnałów, wykorzystana była do orientacji stereogramów pomiarowych oraz przetwarzania zdjęć. Ze względu na ilość poziomów pomiarowych, podesty oraz pionowe rury rusztowania, pomiar wykonano tachimetrem bezlustrowym Leica TCR407, metodą stanowisk „swobodnych” (*free stations*). Najczęściej na jednym poziomie rusztowania wszystkie pomiary osnowy fotogrametrycznej wykonywano z jednego stanowiska. Niezależne układy współrzędnych tachimetru na różnych poziomach rusztowania łączono z wykorzystaniem płaskiej transformacji izometrycznej.

Fotogrametryczne prace terenowe obejmowały wykonanie stereogramów pomiarowych, w celu późniejszego wykonania matrycy fotoplanów i rysunków krawędzi ścian absydy oraz źródłowych fotogramów cyfrowych polichromii dla wykonania docelowych fotoplanów. Zgodnie z koncepcją pomiaru, stereogramy o bazie pionowej i osiach poziomych, rejestrujące malowidła za kolumnami wykonane zostały ze specjalnej bazy pionowej zapewniającej równoległość osi kamer (Rys. 2b). Przykładowe fotogramy tych stereogramów pokazane są na rysunkach 3a i 3b. Stereogramy o osiach pionowych, rejestrujące malowidła w przestrzeni zamkniętej za gzymsem, ze względu na brak miejsca za kolumnami ołtarza, wykonywane były „z ręki”, jako zdjęcia nie celowane. Przykładowe fotogramy tych stereogramów pokazane są na rysunkach 3c i 3d. Stereogramy pomiarowe wykonano z wykorzystaniem skalibrowanych aparatów Minolta Dynax 5D (6 MP) oraz NikonD80 (10 MP).

Do wykonania zdjęć polichromii w miejscach trudnodostępnych, tam gdzie odległość od obiektu nie przekraczała kilkudziesięciu centymetrów, wykorzystano pełnoformatowy (24×36 mm) aparat cyfrowy Sony A900 (25 MP) z obiektywem o ogniskowej 20 mm. Takie skonfigurowanie sprzętu spowodowało uzyskanie maksymalnego kąta widzenia obiektywu, a tym samym odfotografowanie na jednej klatce fragmentu malowidła o największej powierzchni. Poprawne, bezcieniowe oświetlenie kadru zapewniła lampa pierścieniowa Sigma EM 140-DG zamontowana wokół obiektywu aparatu Sony A900 (Rys. 2b). Specjalna baza mechaniczna z przesuwym wózkiem na aparat, montowana do statywu Zeissa realizowała równoległość osi stereogramów pomiarowych zarówno o bazie poziomej jak i pionowej (Rys. 2b).



Rys. 3. Przykładowe fotografie ze stereogramów:  
typ 1 (a), typ 2 (b), typ 3 – niższy (c), typ 3 – wyższy (d)

#### 4. OPRACOWANIE HYBRYDOWEGO FOTOPLANU POLICHROMII

Nieciągłość polichromii na ścianach absydy spowodowana ubytkami i niedostępnością do pomiaru zdecydowała o hybrydowym charakterze dokumentacji. Przedstawienie zarówno elementów architektonicznych jak i poszczególnych fotoplanów polichromii na jednym rysunku umożliwiło zachowanie poprawnego wzajemnego położenia tych elementów.

Szczegóły sytuacyjne (krawędzie ścian absydy, okna, murowane ściany konstrukcyjne ołtarza) zwektoryzowane zostały na autografie cyfrowym VSD na podstawie specjalnie wykonanych stereogramów cyfrowych. Dla połączenia rysunków wszystkich ścian w jeden rysunek rozwinięcia przeliczono współrzędne fotopunktów XYZ na współrzędne płaskie XZ w jednym, wspólnym układzie rozwinięcia.

Na podstawie wyznaczonych parametrów kalibracji aparatów cyfrowych wszystkie zdjęcia zostały poddane procesowi powtórnego próbkowania (*resampling*) w celu usunięcia wpływu błędów dystorsji obiektywów. Wykorzystano pole testowe i program PI-Calib do kalibracji firmy Topcon.

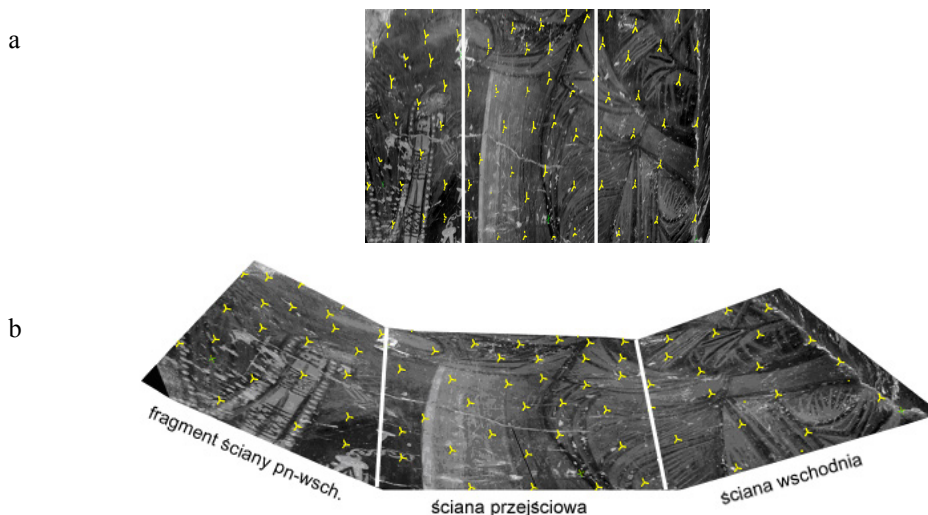
Fragmety malowideł na ścianach absydy, do których dostęp był stosunkowo łatwy, zostały opracowane zgodnie z ogólnie znanymi zasadami. Pomierzono zasygnalizowane fotopunkty, obliczono ich współrzędne w układzie rozwinięcia, a fotografie pomiarowe przetworzono metodą transformacji rzutowej (Boroń, Jachimski, 1998).

Opracowanie fotogrametryczne fragmentów polichromii zasłoniętych przez elementy ołtarza wymagało zastosowania bardziej złożonych metod. Ze względu na niewielkie odległości fotografowania w tych strefach uzyskano bardzo dużą ilość zdjęć pomiarowych, dla których niemożliwe było pomierzenie wystarczającej ilości punktów dostosowania. Dlatego punkty do przetwarzania musiały być pozyskane metodą kameralną na podstawie wykonanych wcześniej stereogramów pomiarowych typu 1, 2 i 3. O ile stereogramy typu 1 i 2 posiadały pomierzoną osnowę fotogrametryczną, o tyle stereogramy o osiach pionowych (typ 3), obejmujące tylko malowidła z zamkniętej gzymsem przestrzeni (tzw.

stereogramy wyższe), nie posiadały żadnych fotopunktów. Problem ten rozwiązano w taki sposób, że na podstawie stereogramów pionowych, wykonanych z niższej wysokości (stereogramy niższe), zawierających w swojej dolnej części pomierzoną osnowę fotogrametryczną, po zorientowaniu pozyskano kameralnie fotopunkty dla stereogramów „wyższych” (było to możliwe dzięki dość dużym pokryciom pomiędzy tymi stereogramami). Pomierzono w tym celu po 8 fotopunktów na każdym „niższym” modelu i na ich podstawie uzyskano błędy orientacji bezwzględnej „wyższych stereogramów” nie większe niż  $\pm 3$  mm. Wyniki te należy uznać za całkowicie zadowalające dla opisywanego zadania.

Drugi problem stanowiła niepłaskość ścian, która spowodowała, że przy szerokim kącie widzenia obiektywu i niewielkich odległościach od ściany przesunięcia radialne były tak duże, że uniemożliwiły połączenie fragmentów przetworzonych metodą rzutową. Zdecydowano więc o przetwarzaniu obrazów źródłowych metodą elementów skończonych. Zorientowane stereogramy posłużyły do pomiaru siatki punktów na malowidle, których współrzędne X, Y, Z zostały przetransformowane na wspólną dla całej absydy płaszczyznę rozwinięcia XZ. Na taki wzorzec przetworzono jedno ze zdjęć stereogramu (Rys. 4). W wyniku przetwarzania uzyskano fragment matrycy rozwinięcia.

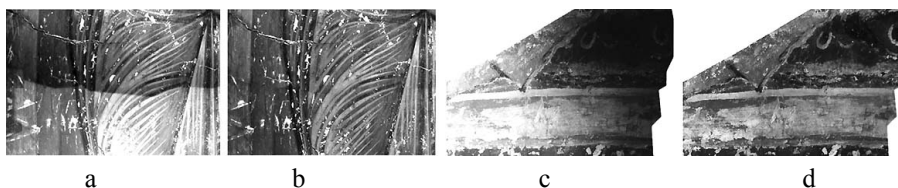
W powyższy sposób rozwinięto wszystkie fragmenty ścian pokryte polichromią, a następnie wykonano mozaikowanie we wspólną wzorcową matrycę rozwinięcia, na którą, w kolejnym etapie, przetwarzano właściwe fotogramy. Przetwarzanie wykonywano w oparciu o homologiczne szczegóły sytuacyjne na matrycy i na zdjęciu. Należało uwzględnić treść danego fotogramu, czy jest to tylko jedna ściana, czy dwie ściany łącznie ze stykiem (białe linie na matrycy). Fotogramy na stykach przetwarzano metodą elementów skończonych lub wielomianową 2-go stopnia, fotogramy pojedynczych ścian metodą rzutową. Przetworzone „cegiełki” (około 180 dla całej absydy) połączono w jedną mozaikę rozwinięcia. Przetwarzanie wykonano z wykorzystaniem programu Image Analyst firmy Intergraph.



Rys. 4. Fragment matrycy rozwinięcia górnej części malowidła, przetworzony metodą elementów skończonych na punkty pomierzone na VSD (a), białymi liniami zaznaczono styki pomiędzy ścianami i fragmenty obrazu źródłowego (b)

## 5. KOREKCJA RADIOMETRYCZNA

Ostatnim z etapów opracowania fotoplanów było wyrównanie kolorystyczne i tonalne poszczególnych elementów mozaiki. Z uwagi na trudny dostęp do obiektu niemożliwe było zapewnienie podobnych warunków oświetleniowych w trakcie rejestracji zdjęć. Spowodowało to w efekcie ich tak duże zróżnicowanie, że jedyną skuteczną metodą korekcji okazało się żmudne, manualne dopasowywanie kolorystyczne poszczególnych elementów mozaiki. Wady kolorystyczne i tonalne utrudniających mozaikowanie scen za ołtarzem można podzielić na dwa rodzaje: manifestujące się różnicami pomiędzy poszczególnymi zdjęciami (Rys. 5a) oraz wprowadzające nierównomierność naświetlania w obrębie pojedynczych zdjęć (Rys. 5c).



Rys. 5. Wady tonalne zdjęć – różnice pomiędzy zdjęciami tworzącymi mozaikę (a), po korekcji (b), nierównomierne naświetlenie zdjęcia przed korekcją (c), po korekcji (d)

W pierwszym przypadku główną przyczyną był wadliwie działający automatyczny pomiar ekspozycji dla bardzo bliskich odległości fotografowania oraz przekraczanie zakresu dostępnych w aparacie parametrów ekspozycji i odległości. Dotyczyło to tylko tych zdjęć, których rejestracja wykonywana była w sytuacjach ekstremalnych, np. gdy wykluczone było odejście aparatem na większą odległość niż kilkanaście centymetrów, a dostęp do niego był tak utrudniony, że niemożliwe były żadne korekty manualne ustawień. Powodowało to nieprawidłowy dobór siły błysku, a przez to powstawały znaczne różnice w jasności i kontraście niektórych obrazów (Rys. 5a).

Z kolei przyczyną nierównomiernego naświetlania w obrębie pojedynczych zdjęć były różne odległości pomiędzy aparatem (lampą błyskową) a fotografowanymi fragmentami ściany. W większości przypadków nie udało się zachować prostopadłości pomiędzy osią obiektywu a ścianą, bądź występowała jej krzywizna. Mały dystans pomiędzy aparatem a obiektem, przy ukośnej rejestracji malowideł, powodował relatywnie duże zmiany odległości pomiędzy źródłem światła a obiektem (często nawet dwukrotne w obrębie zakresu kadru), a to przekładało się w podobnej skali na różne naświetlenie skrajnych fragmentów zdjęć (Rys. 5c). W tym przypadku nie było możliwości skutecznej redukcji ich wad poprzez wybieranie środkowych fragmentów kadru, jak wykonuje się to przy pracach na zdjęciach lotniczych (Ziobro, Ewiak, 1999).

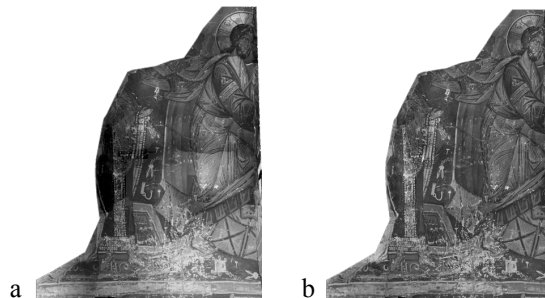
Praktyka pokazała, że każdy z elementów mozaiki wymagał odrębnych, subiektywnych decyzji operatora, co do zastosowania odpowiednich technik korekcji. Do prac kameralnych wykorzystano program Adobe Photoshop CS2. Jego zaletą była możliwość pracy na warstwach, na których umieszczono każdy z elementów mozaiki osobno (Kelby, 2006). Taki zabieg pozwolił na iteracyjne korekcje kolorystyczne bez konieczności łączenia poszczególnych obrazów mozaiki w jedną całość (scalanie nastąpiło dopiero na końcowym etapie opracowania). Dodatkowo, dzięki założonym maskom na warstwach, łatwo było dokonać zmian przebiegu granic mozaikowania.



Niezależne usunięcie wad w obrębie pojedynczych zdjęć tworzących mozaikę było pierwszym etapem prowadzącym do wyrównania radiometrycznego całej sceny (Rys. 5d). Wykorzystano w tym celu prace na warstwach, w następującej sekwencji czynności:

- utworzenie nowej warstwy będącej duplikacją obrazu,
- nałożenie maski na nowej warstwie,
- użycie gradientu liniowego o kierunku i zwrocie zgodnym z występującym niedoświetleniem/prześwietleniem zdjęcia,
- zastosowanie korekcji na jednej z wybranych warstw (standardowe operacje pracy na histogramie, modyfikacje jasności i kontrastu),
- w przypadku wystąpienia różnic kolorystycznych związanych z pierwotnym niedoświetleniem/prześwietleniem zdjęcia zastosowanie funkcji balansu kolorów, a przy braku rezultatów stosowanie zaawansowanych operacji, jak praca na wybranych kolorach takimi funkcjami jak „selektywny kolor” (*selective color*), barwa/nasycenie (*hue/saturation*), krzywe przejścia (*curves*).

W kolejnym kroku, metodą kolejnych przybliżeń, redukowane były różnice w jasności i kontraście pomiędzy fragmentami mozaiki (Rys. 5b). Do tego celu wykorzystywano podstawowe funkcje pakietu CS2, takie jak analizę histogramu obrazu, jasność/kontrast, balans kolorów. W niektórych przypadkach takie operacje były niewystarczające, gdyż poszczególne łączone fragmenty na stykach charakteryzowały się inną kolorystyką i Nasyceniem. W takich sytuacjach dokonywano prób, często wielokrotnych, zmiany pierwotnych kolorów z wykorzystaniem funkcji „selektywnego koloru” oraz „barwy/nasycenia”, w tym korygując tylko wybrane barwy (dostępny jest w wymienionych funkcjach wybór barw podstawowych i dopełniających). Wymaga to od operatora dużego doświadczenia, gdyż zabieg ten wpływa na wzmocnienie bądź redukcję wybranych kolorów na obrazie. Nieumiejętnie zastosowany doprowadzić może do utraty cech kluczowych dla opracowania, tj. wiarygodnej i kolorystycznie poprawnej dokumentacji malowideł. Ostatnim etapem korekcji było ustalenie ostatecznego przebiegu granic mozaikowania, połączenie warstw, praca nad balansem i nasyceniem kolorów, oraz ustalenie ogólnej jasności i kontrastu całej sceny (Rys. 6).



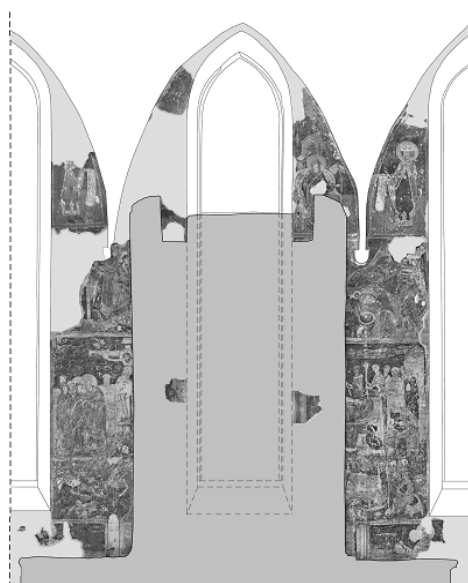
Rys. 6. Fotomozaika jednej ze scen za ołtarzem: przed korekcją radiometryczną (a), po korekcji (b)

## 6. PODSUMOWANIE

Ostateczny wynik prac to cyfrowy fotopłan, o rozdzielczości 1mm, obejmujący fotopłany częściowe wszystkich dostępnych relikwów malowideł ze ścian absydy na tle rysunku



architektonicznego rozwiniętych ścian (Rys. 7). Dla wykonania fotoplanu, którego łączna powierzchnia malowideł trudnodostępnych (strefa b i c) wynosi zaledwie 8.1 m<sup>2</sup> przy całkowitej powierzchni malowideł z absydy 32.0 m<sup>2</sup>, wykonano łącznie 18 stereogramów cyfrowych, pomierzono geodezyjnie ok. 50 fotopunktów i punktów wiążących oraz wykonano ok. 400 zdjęć pomiarowych malowideł, z których ok. połowę wykorzystano do tworzenia fotoplanów. Zaprezentowana w artykule technologia fotogrametryczna, z wykorzystaniem specjalnie adaptowanego sprzętu, oraz podwójnej rejestracji powierzchni malowideł (dwoobrazowa i jednoobrazowa) była zdaniem autorów jedyną możliwą do zastosowania. Dokładność określenia współrzędnych punktów osnowy fotogrametrycznej, decydująca o dokładności bezwzględnej fotoplanu, zarówno z pomiarów geodezyjnych jak i stereofotogrametrycznych, wyniosła ok. ±1.5mm. Dokładność wewnętrzna fotoplanów malowideł na powierzchniach łatwodostępnych (strefa a) szacowana jest na poziomie ±2 mm (nieвелиki wzrost błędów spowodowany jedynie niepłaskością ścian). Natomiast dokładność wewnętrzna fotoplanów malowideł trudnodostępnych jest mniejsza ze względu na błędy matryc spowodowane niekorzystnym kątem rejestracji zdjęć z których powstały i niepłaskością powierzchni ścian oraz przybliżonym modelem rozwinięcia powierzchni przejściowej. Wpływ tych czynników zdaniem autorów obniża dokładność fotoplanu do poziomu ±3 mm.



Rys. 7. Finalna dokumentacja hybrydowa polichromii z absydy

## 7. LITERATURA

Boroń A., Jachimski J., 1998. Inwentaryzacja Kaplicy Świętokrzyskiej na Wawelu z wykorzystaniem metod fotogrametrii cyfrowej. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 8, s. 16–1; 16.13.

Boroń A., Wróbel A., 1998. Opracowanie fotoplanu malowidła ze sklepienia Kościoła O.O. Pijarów w Krakowie z wykorzystaniem metod fotogrametrii cyfrowej. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 8, s. 17–1; 17–9.

- Boroń A., Kocierz R., Wróbel A., 2006. Metoda wytwarzania barwnych fotoplanów rozwinięć malowideł z powierzchni kolebkowych z wykorzystaniem kamery fotogrametrycznej i aparatu cyfrowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* Vol. 16, s. 87–96.
- Boroń A., Rząca A., Wróbel A., 2007. Metody fotogrametrii cyfrowej i skanowania laserowego w inwentaryzacji zabytków. *Roczniki Geomatyki*, Tom 5, Zeszyt 8, s.129–140.
- Kelby S., 2006. Photoshop. Księga kanałów obrazu. *Helion*, W-wa, s. 36–84, s. 146–179.
- Ziobro J., Ewiak I., 1999. Mozaikowanie ortofotografii. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 9, s.51–56.

Praca wykonana w ramach badań statutowych AGH 11.11.150.949/10

### **DEVELOPMENT OF HARD TO REACH BYZANTINE POLYCHROMY LOCATED IN APSE OF CATHEDRAL CHURCH IN SANDOMIERZ**

**KEY WORDS:** photogrammetric documentation, digital photoplans of polychromy, development's photoplans, surveying network, photogrammetric control points, digital cameras, digital stereograms

**SUMMARY:** The paper presents a photogrammetric method for creation of developments of a Byzantine polychromy located on three apse walls of the cathedral church in Sandomierz. A big part of the polychromy is presently located behind a baroque altar, which was built in 18th century. The paintings behind the altar are either fully hidden by a brick wall, connected with altar, or hard to reach because of pillars and the cornice of the altar. Additional difficulties for photogrammetric measurements are caused by metal scaffolding elements situated close to the wall. To prepare the development of polychromy in a digital photoplan form of high resolution, and overcome the difficulties, a particular method of photogrammetric measurement was adopted. A digital camera Sony A900 (format 24x36mm) with objective of focal length 20mm assured maximum angle of view. Pictures of stereograms were taken with a calibrated digital camera Minolta Dynax 5D/f=20mm, from specially constructed vertical basis. Proper lighting was insured by a collar flash lamp Sigma EM 140 DG. Photogrammetric control points were measured from four levels of the scaffolding, and then transformed to one coordinate system, based on ground tie points (details of object), measured at least from two observation points. For surveying, the reflectorless total station TCR 407 Leica was used. Photoplans of development of the hard to reach fragments of the polychromy were made with a two stage method. In first stage, the development matrix was generated, based on stereo-measurements and photograms used in the stereograms. This matrix had proper geometry, but the quality of image was not good enough, because of wrong angle of the exposure axis relative to the wall surface. In second stage, photograms with the axis normal to the wall, were resampled into the basic matrix. Digital stereoplotter VSD, softwares: PI-calib, ImageAnalyst and MicroStation V8 were used for processing of high-resolution developments. For radiometric correction of the product, the program Photoshop CS2 was used.

dr inż. Adam Boroń  
e-mail: aboron@agh.edu.pl  
telefon: 12 617 38 26  
fax: 12 617 39 93

dr inż. Tomasz Pirowski  
e-mail: pirowski@agh.edu.pl  
telefon: 12 617 22 88  
fax: 12 617 39 93

mgr inż. Marta Borowiec  
e-mail: martabor@agh.edu.pl  
telefon: 12 617 22 88  
fax: 12 617 39 93