

**WIRTUALNA KOPIA RELIKTÓW ROMAŃSKICH  
Z KOŚCIOŁA ŚW. ANDRZEJA W KRAKOWIE**

**VIRTUAL COPY OF ROMANESQUE RELICTS  
OF ST. ANDREW'S CHURCH IN KRAKÓW**

**Adam Boroń, Aleksander Dziejic**

Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej,  
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

**SŁOWA KLUCZOWE:** cyfrowa inwentaryzacja fotogrametryczna, model szkieletowy, model powierzchniowy, fotoplan cyfrowy, tekstury naturalne, wizualizacja, VRML

**STRESZCZENIE:** Odsłonięte w 2003 roku w kościele św. Andrzeja w Krakowie relikty romańskiej absydioli wraz z przyległym do niej fragmentem nawy, pokryte w dużej części malowidłami stanowią jedno z największych odkryć ostatnich lat w Krakowie. Ujawniona dekoracja malarska jest unikatem ze względu na czas jej powstania (XII w.) i prawdopodobnie stanowi najstarszy zachowany zespół romańskich fresków w Polsce. W roku 2001 i 2003 zespół Zakładu Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej WGGiŚ AGH wykonał dwie fotogrametryczne dokumentacje cyfrowe w postaci fotoplanów obiektu. Fotoplany przedstawiały stan przed i po zakończeniu prac konserwatorskich. Ze względu na niedostępność obiektu związaną z jego lokalizacją na terenie klasztoru o ścisłej klauzurze, autorzy podjęli próbę wykonania wirtualnej kopii 3D reliktyw romańskich jedynie na podstawie istniejących fotoplanów oraz geodezyjnych i fotogrametrycznych materiałów źródłowych. W artykule opisano wszystkie etapy prowadzące do pozyskania wirtualnej kopii zabytku. Począwszy od dokumentacji fotogrametrycznej, przez model wektorowy 3D, do modelu powierzchniowego pokrytego naturalnymi teksturami. Dodatkowo wykonany został również model zrekonstruowanej absydioli na podstawie analizy geometrycznej jej pozostałości. Ostatecznie wizualizowany model absydioli zapisany został w języku VRML dla potrzeb udostępnienia go poprzez Internet.

## **1. WSTĘP**

Prace konserwatorskie pod kierownictwem prof. Władysława Zalewskiego z ASP w Krakowie, przeprowadzone w latach 2000-2003 doprowadziły do pełnego odsłonięcia zachowanych fragmentów romańskiej architektury. Fotogrametryczną dokumentację cyfrową w postaci fotoplanów obiektu wykonał zespół Zakładu Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej WGGiŚ AGH. Inwentaryzacja fotogrametryczna dotyczyła zarówno stanu przed jak i po zakończeniu prac konserwatorskich.

Pomieszczenie z tym niezwykle cennym znaleziskiem znajduje się na terenie Zakonu Sióstr Klarysek Św. Andrzeja Apostoła o ścisłej klauzurze. Z powodu klauzury obiekt nie jest obecnie dostępny. Zakaz wstępu w równej mierze obejmuje historyków sztuki i innych

specjalistów jak też szeroką publiczność. Wstępnie planowano wykonanie makiety absydioli w skali 1:1, odtworzenie na jej powierzchni malowideł a następnie jej udostępnienie. Brak funduszy spowodował zawieszenie tego projektu. Z tego powodu Autorzy podjęli próbę wykonania wirtualnej kopii 3D obiektu jedynie na podstawie istniejących fotoplanów oraz geodezyjnych i fotogrametrycznych materiałów źródłowych. Dla szerszego udostępnienia zabytkowych relikwów romańskich zakładano, że wykonana wizualizacja 3D obiektu zapisana zostanie w języku VRML dla potrzeb udostępnienia go poprzez Internet. Zastosowanie wysokorozdzielczych tekstur fotoplanów oraz bezpłatnych programów „*plug in*” do przeglądania modeli 3D umożliwi wszystkim zainteresowanym interaktywne poznanie tego niedostępnego obiektu ze szczegółowością nieosiągalną nawet w trakcie bezpośredniego zwiedzania.

## 2. CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU I MATERIAŁÓW ŹRÓDŁOWYCH

Odkryta w 1994 roku absydiola romańska z fragmentem nawy w kościele św. Andrzeja Apostoła w Krakowie znajdowała się w niewielkim pomieszczeniu o wymiarach 0.7 m (głębokość) × 1.6 m (szerokość) × 3.5 m (wysokość). Do pomieszczenia prowadziły jedne wąskie drzwi. Ściany boczne (północna i południowa) o szerokości 70cm połączone sklepieniem kolebkowym o promieniu 0.8 m to wycinek nawy bocznej romańskiego kościoła. W ścianie zachodniej, oddzielającej kościół od klasztoru, (na wprost wejścia) zamurowane były fragmenty romańskiej absydioli. Ściana wschodnia (z drzwiami wejściowymi) to ceglana XVIII w. ściana parawanowa – bez istotnej wartości zabytkowej.

W 2001 roku, przed rozpoczęciem prac odsłaniających, wykonano inwentaryzację fotogrametryczną istniejącego stanu obiektu. Powstały wysokorozdzielcze fotoplany wszystkich ścian i sklepienia. Analizując określoną wcześniej wielkość obiektu nietrudno zauważyć, że pomieszczenie posiadało bardzo niewielkie wymiary w rzucie poziomym odpowiadające wymiarom współczesnej szafy na ubrania. Połączenie niewielkiej powierzchni posadzki z dużą wysokością pomieszczenia stwarzało bardzo trudne warunki pomiaru geodezyjnego i fotogrametrycznego niezbędnego dla wykonania fotoplanów. Zastosowano szereg metod i sposobów geodezyjnych dla pozyskania osnowy fotogrametrycznej. Część sygnalizowanych specjalnymi znaczkami fotopunktów pomierzona została metodą biegunową, a część niedostępnych do pomiaru biegunowego punktów określono metodą pomiarów liniowych. Dla 65 fotopunktów pomierzonych metodą biegunową określono współrzędne X,Y,Z, a dla pozostałych 25 fotopunktów, metodą wyrównania sieci liniowej określono odpowiednio współrzędne X,Z lub Y,Z. Szacuje się, że błąd położenia punktów wyznaczonych nie przekraczał ±2 mm. Dla potrzeb przetwarzania dokonano transformacji fotopunktów X,Y,Z do układu każdej ze ścian. W przypadku sklepienia kolebkowego współrzędne przestrzenne przeliczono na rozwinięcie. Ze względu na bardzo krótkie odległości fotografowania (minimalna ok. 60 cm) zdjęcia wykonano aparatami fotograficznymi Pentacon Six (6×6 cm) i Praktica (24×36 mm) z obiektywami szerokokątnymi odpowiednio o ogniskowych: 50 mm i 20 mm. Dla uzyskania jak najlepszej wierności oddania barw malowideł obiektu stosowano światłoczułe materiały diapozytywowe FUJICHROM PREVIA 100F, a do oświetlenia używano lamp błyskowych. Do wykonania fotoplanów wykorzystano 56 z ponad 100 wykonanych zdjęć. Zdjęcia zeskanowano pikselem 14 μm, który w skali terenowej,

w zależności od skali zdjęcia mieścił się w przedziale 0.4÷0.7 mm. Dla wszystkich fotopłanów przyjęto wielkość piksela obiektowego równą 0.5 mm.

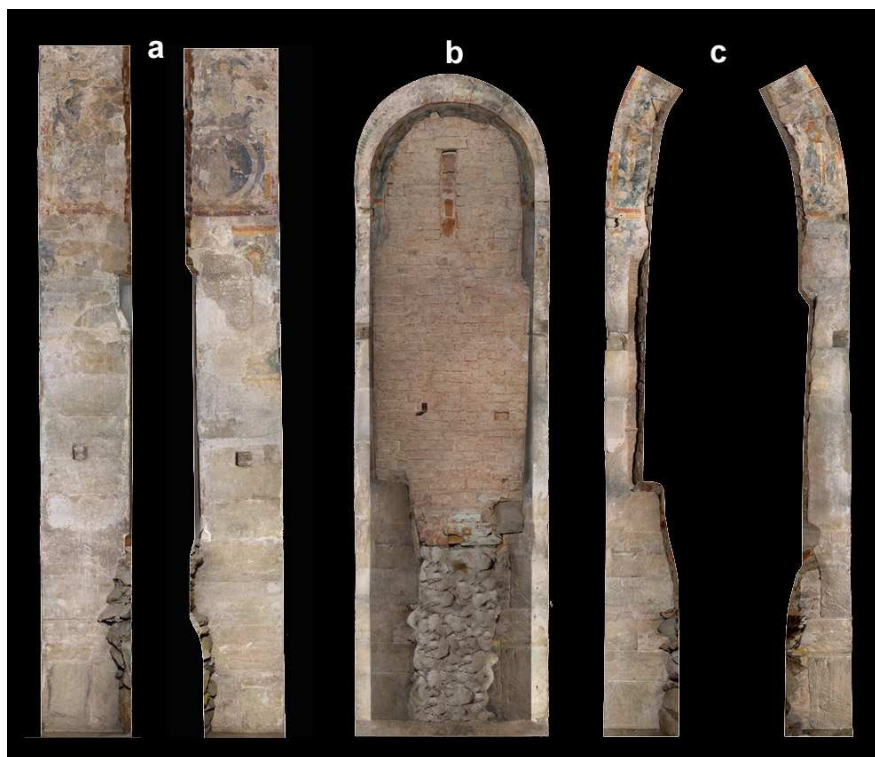
Pod koniec 2003 roku zakończono konserwatorskie prace odsłaniające w wyniku których pogłębiono pomieszczenie dochodząc do posadzki romańskiej oraz wydobyto ze ściany ceglanej ocalały fragment absydioli pokrytej romańskimi freskami. Dodatkowo odsłonięto i zabezpieczono wszystkie malowidła z powierzchni ścian i sklepienia kolebkowego nawy romańskiej oraz ściany tarczowej absydioli. Po tych pracach wysokość nawy zwiększyła się do 5.3 m, a absydiola została odsłonięta przez wykucie ze ściany wschodniej na głębokość jej zachowania (ok. 35 cm). W takim ostatecznym kształcie relikwów romańskie poddane zostały kolejnym pracom dokumentacyjnym. Zasygnalizowano i pomierzono dodatkowe fotopunkty dla nowo odkrytych części obiektu oraz dla tych rejonów gdzie fotopunkty uległy zniszczeniu w trakcie prowadzonych prac konserwatorskich. Dodatkowo dla pozyskania punktów dostosowania w miejscach niedostępnych do pomiaru bezpośredniego wykonano 7 stereogramów kamerą UMK 10/1318. Negatywy zeskanowano na skanerze Photoscan TD z rozdzielczością 14  $\mu$ m. Na podstawie pomiaru stereogramów określono współrzędne przestrzenne ok. 40 dodatkowych punktów kontrolnych. Ogółem określono współrzędne 180 fotopunktów w tym ok. 90 metodą biegunową (XYZ) ok. 40 z pomiaru stereogramów (XYZ) i ok. 50 z pomiarów liniowych. Wszystkie zdjęcia pomiarowe wykonano aparatem cyfrowym Kodak DCS760 z 6 mln. matrycą CCD.

Na podstawie zdjęć oraz osnowy fotogrametrycznej wykonano wysokorozdzielcze barwne fotoplany ściany północnej, południowej i wschodniej oraz rozwinięcia sklepienia i wnętrza absydioli. Ściana zachodnia (parawanowa) nie uległa zmianie, dlatego nie była przedmiotem inwentaryzacji powykonawczej. Rozdzielczość terenowa, podobnie jak dla stanu zastanego obiektu, wyniosła 0.5 mm. Na rysunku 1 pokazano fotoplany wykonane po odsłonięciu konserwatorskim. Wszystkie fotoplany, stereogramy pomiarowe oraz osnowa fotogrametryczna stanowiły materiał źródłowy i zarazem jedyne dostępne dla wykonania wirtualnej kopii absydioli.

### 3. WIZUALIZACJA ABSYDIOLI

Wizualizację wszystkich odkrytych fragmentów architektury romańskiej wykonano z wykorzystaniem programu AutoCad do budowy modelu krawędziowego i powierzchniowego oraz programu 3DS Max do wizualizacji i zapisu zwizualizowanego modelu w formacie VRML. Główne etapy wizualizacji to:

- budowa modelu krawędziowego,
- utworzenie modelu powierzchniowego,
- wizualizacja 3D,
- export do formatu VRML.



Rys. 1. Fotoplany obiektu po odstonięciu: (a) rozwinięcie ścian i sklepienia nawy, (b) ściana czołowa absydioli, (c) rozwinięcie ocalałych fragmentów konchy absydioli

### 3.1. Model krawędziowy

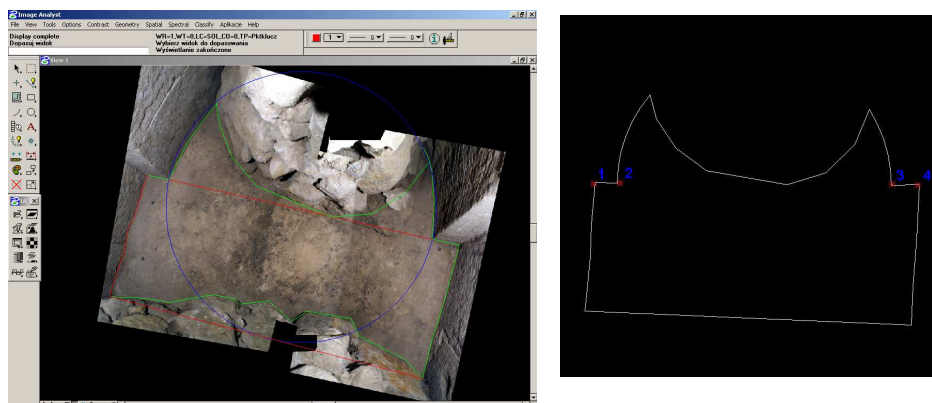
Z założenia model krawędziowy miał być modelem o jak największej dokładności, tak, aby na jego podstawie utworzyć klasyczną dokumentację architektoniczną 2D w postaci rzutów, przekrojów i widoków. Ze względu na występowanie wielu nieregularnych powierzchni (ubytki kamienia, przełomy, wycienienia ściany ceglanej, itp.) starano się również dać odpowiedź na pytanie na ile możliwe jest ich poprawne odtworzenie na modelu powierzchniowym i w dalszej kolejności wizualizowanie. Wiadomo bowiem, że im bardziej regularna jest powierzchnia tym łatwiej można przypisać tekstury modelowi. W konsekwencji przyjętych założeń wszystkie możliwe do pozyskania krawędzie uzyskano na podstawie pomiaru 7 stereogramów z kamery UMK 10/1318. Wektoryzacja wykonana została na stacji cyfrowej VSD. Na żadnym ze stereogramów, ze względów obiektywnych, nie zostały odfotografowane krawędzie posadzki romańskiej, krawędzie ściany tarczowej w dolnej części, dolne krawędzie ściany zachodniej oraz linie ograniczające widok walcowych powierzchni bocznych konchy absydioli.



Rys. 2. Stereogram z kamery UMK 10/1318 - widok na sklepienie nawy i absydioli

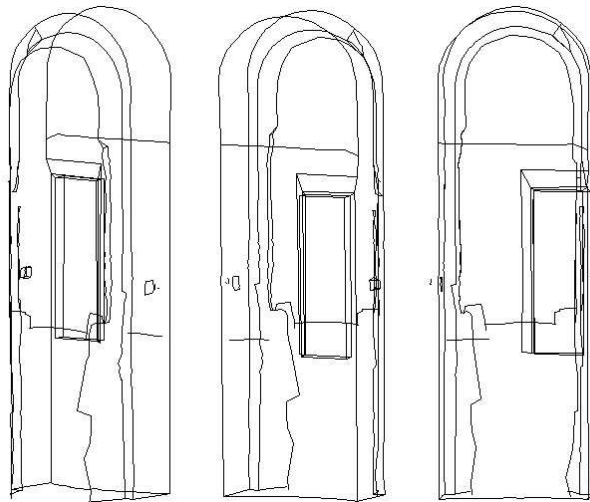
Brakujące krawędzie określono na podstawie konstrukcji geometrycznych bazujących na znajomości płaszczyzn rzutowania fotopłanów, którymi w zależności od fragmentu obiektu były płaszczyzny, powierzchnie walcowe, powierzchnia sferyczna a także płaszczyzna rozwinięcia oraz wpasowaniu wektorów z fotopłanu w punkty pomiarzone na stereogramach. Dokładność określenia tych danych była uzależniona przede wszystkim od dokładności konstrukcji geometrycznych, a w mniejszym stopniu od dokładności samych fotopłanów.

W pracy (Dziedzic, 2004) podano wiele konstrukcji i metod dla pozyskania przestrzennych współrzędnych krawędzi obiektu. Jako przykład na rysunku 3 pokazano zwektoryzowane na fotopłanie posadzki jej krawędzie, które przetransformowano następnie do układu obiektu z wykorzystaniem 4 punktów dostosowania jako punktów przecięcia ekstrapolowanych krawędzi ściany tarczowej z płaszczyzną posadzki.



Rys. 3. Zwektoryzowana na fotopłanie posadzka romańska wraz z punktami do transformacji

W programie AutoCAD, na etapie edycji, wszystkie wektory obiektu, pozyskane różnymi drogami, zostały połączone w jeden model krawędziowy. Poprawiono błędy dublowanych linii oraz niewielkich braków linii, tworząc ostatecznie model krawędziowy składający się z odcinków i ich łańcuchów (linia, polilinia, polilinia 3D).



Rys. 4. Model krawędziowy: (a) widok N-E, (b) widok S-E, (c) widok S

### 3.2. Model powierzchniowy

Model powierzchniowy stworzono w wyniku szeregu operacji na utworzonym uprzednio modelu krawędziowym. Złożony proces modelowania powierzchniowego rozpoczęto od umownego podziału bryły obiektu na fragmenty możliwe do opisanego za pomocą jednej siatki. Wynikowy model obiektu powstał jako połączenie kilkunastu powierzchni określających geometrię poszczególnych elementów absydioli. Postępowanie takie niosło za sobą korzyści w procesie nakładania rastrów w programie 3DS Max, gdzie możliwe jest nałożenie jednego materiału (fotoplanu) na jednoznacznie zdefiniowany fragment siatki. Chcąc zatem podzielić obiekt na powierzchnie jak najbardziej zbliżone do płaszczyzny, powierzchni walcowej i sferycznej oraz mając na uwadze podział narzucony przez fotoplany, wyróżniono 14 fragmentów obiektu zgrupowanych w czterech podstawowych częściach:

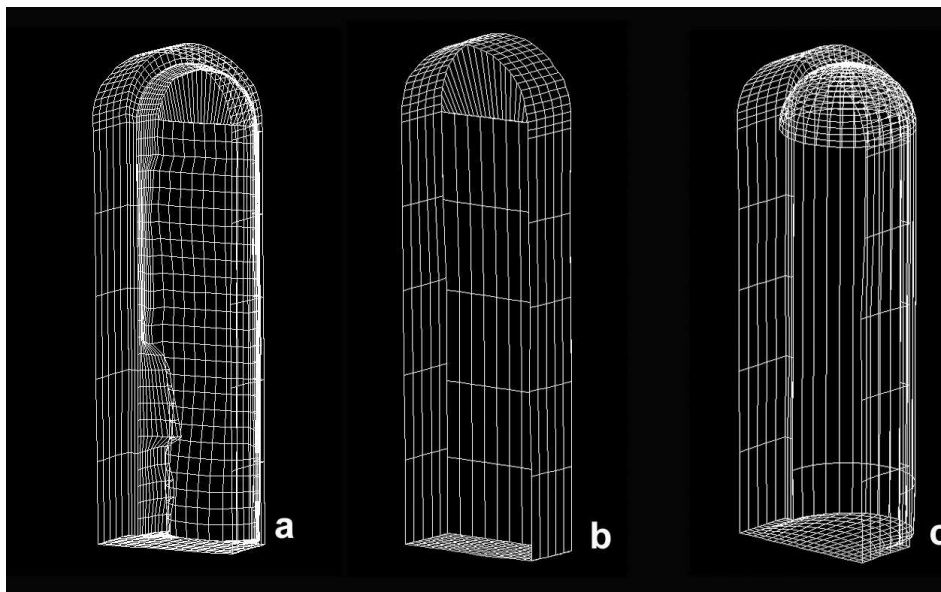
1. Górna część obiektu (5 elementów) zawierająca powierzchnie walcowe, sferyczne i płaszczyzny, obejmująca: sklepienie kolebkowe nawy, sklepienie sferyczne absydioli, górny fragment ściany wschodniej, zachodniej i ściany tarczowej.
2. Środkowa płaszczyznowa część obiektu (6 elementów) zawierająca ścianę zachodnią, wschodnią, północną i południową oraz ścianę tarczową (osobno część północną i południową).
3. Środkowa walcowa część obiektu (2 elementy) zawierająca północny i południowy fragment powierzchni konchy absydioli.
4. Dolna część obiektu (1 element) - płaszczyzna posadzki romańskiej.

Każda powierzchnia reprezentująca dany fragment obiektu była opracowywana oddzielnie. Przed wygenerowaniem siatek definiujących powierzchnię należało dokonać wyboru odpowiedniej gęstości siatki. Gęstością siatki sterują zmienne systemowe AutoCAD-a Surftab1 i Surftab2. Ich wartości należy wybierać metodą prób i błędów w ten sposób, by dla danych wartości zmiennej siatka miała geometrię zbliżoną do rzeczywistej

powierzchni. Dodatkowo należy także, już na etapie ustalania gęstości siatek, zwrócić uwagę na to aby przyległe siatki posiadały taką samą gęstość. Warunek ten wynika z tego, że w procesie scalania przylegających siatek łatwo łączy się ze sobą jedynie węzły leżące blisko siebie. Proces tworzenia siatki w AutoCAD ogranicza się do wyboru rodzaju powierzchni oraz do wskazania, zależnie od wybranego rodzaju, czterech lub dwóch krawędzi. Powierzchnia zostaje wygenerowana w sposób automatyczny, a rezultat przedstawiony na ekranie monitora. Tą metodą stworzono powierzchnie wszystkich ścian i sklepień za wyjątkiem ściany wschodniej, która ze względu na swą skomplikowaną geometrię opracowana została w bardziej złożony sposób (Dziedzic, 2004)

Proces łączenia siatek jest niezbędnym etapem tworzenia modeli powierzchniowych z modeli cząstkowych. Nawet, jeśli wspólne krawędzie obu graniczących powierzchni podzielone są na taką samą ilość węzłów to nie znaczy, że muszą one się ze sobą pokrywać. Wynika to z innych wyników interpolacji węzłów dla obu nieregularnych powierzchni. Najczęściej różnice położenia węzłów siatki na wspólnej krawędzi nie są duże. Problem różnego położenia węzłów występuje wyraźniej wówczas, gdy łączone są siatki obiektów stworzone w oparciu o inne elementy wyznaczające, np. sfera i walec, wtedy różnice odległości między węzłami obu siatek mogą być znacznie większe. Łączenia siatek nie należy traktować jako łączenie sensu stricto a jedynie przesunięcie węzłów do wspólnego położenia (powierzchnie dalej pozostają niezależnymi obiektami).

Ostatnim etapem w długim procesie tworzenia modelu powierzchniowego jest proces edycyjny związany z przyszłą wizualizacją. Należy określić, w jaki sposób chcemy go oglądać, tak aby uzyskać maksimum informacji. W przypadku naszego zamkniętego obiektu o głębokości poniżej 1m oglądanie go od środka ze swej natury byłoby ograniczone. Dlatego zdecydowano o przecięciu obiektu na dwie części umożliwiające wgląd z zewnątrz (z większej odległości). Jedną z tych części stanowiąca podstawowy model, zawiera wszystkie relikty romańskie. Odjęta z niej ściana parawanowa (zachodnia) z wejściem wraz z przylegającą do niej nawą romańską stanowią drugi wariant modelu obiektu. Dodatkowo wykonano jeszcze model powierzchniowy zrekonstruowanej absydioli pozyskując dane o promieniu powierzchni walcowej i sferycznej tworzących niegdysiejszą powierzchnię absydioli z analizy geometrycznej jej pozostałości, wykorzystując do tego fotoplany (rys. 3) i modele stereoskopowe.



Rys 5. Modele powierzchniowe: (a) podstawowy, (b) ściany wejściowej z nawą, (c) zrekonstruowanej absydioli z nawą

### 3.3. Wizualizacja modeli powierzchniowych w programie 3DS Max

Wizualizację w programie 3DS Max wykonuje się w następujących, głównych etapach:

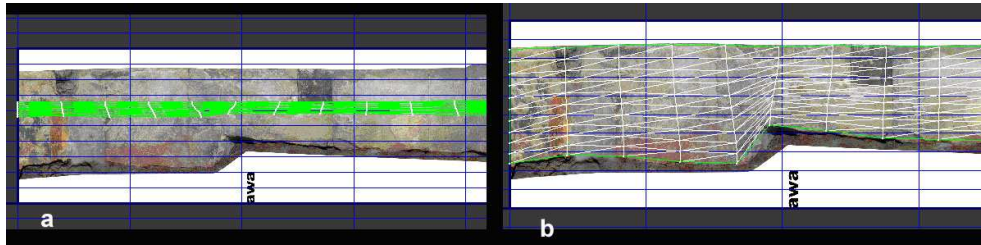
- import modelu krawędziowego z AutoCAD (plik dwg/dxf),
- ostateczna edycja siatek modelu,
- przygotowanie tekstur na podstawie istniejących fotoplanów,
- udrapowanie tekstur na siatkach (mapowanie),
- *rendering* wybranych scen,
- eksport modelu do formatu VRML97.

W procesie edycji siatki modelu wykonano:

- ujednolicenie normalnych wszystkich obiektów, tak by widoczną stroną była strona wewnętrzna wszystkich powierzchni,
- podział siatki sklepienia nawy i siatki sklepienia absydioli na dwie części o równej ilości płaszczyzn elementarnych dla ułatwienia procesu nakładania tekstur (niemożliwe do wykonania w AutoCAD),
- wygładzenie siatki modelu dla zniwelowania niepotrzebnych krawędzi powierzchni wynikających z niezamierzonej nieciągłości modelu.

W kolejnym etapie przygotowano tekstury do nałożenia na przygotowane siatki. Zostały one spreparowane w programie Photoshop z wyrównanych tonalnie fotoplanów, które przycięto w taki sposób, aby uzyskać reprezentację rastrową dla każdej siatki.





Rys. 6. Drapowanie siatki na fotoplane powierzchni walcowej konchy absydioli:  
(a) siatka zrzutowana automatycznie, (b) siatka rozpięta na przygotowanej teksturze

Przygotowane tekstury w dalszej kolejności zostały przypisane odpowiednim siatkom. Rozciąganie (drapowanie) siatki na teksturze wykonuje się z pomocą zmiany skali, przesunięcia i skręcenia, a trudność tego procesu zależy od rodzaju powierzchni. Wyniki przeprowadzonych działań można zobaczyć po wykonaniu renderingu wybranych scen wizualizowanego modelu (wizualizacja statyczna). Na rysunku 6 pokazano siatkę zrzutowaną na fotoplan oraz prawidłowo rozciągniętą na przygotowanej teksturze.



Rys. 7. Wybrane widoki z utworzonych modeli 3D (od lewej: absydiola w stanie aktualnym, ściana wejściowa z nawą, absydiola z odtworzoną powierzchnią konchy)



Rys. 8. Widok z modelu 3D na sklepienie absydioli i nawy

Ostatnim etapem było wyeksportowanie utworzonego modelu do formatu VRML. Wyrenderowane, statyczne widoki z utworzonych wizualizowanych modeli 3D pokazane są na rys. 7 i 8. Model VRML tego obiektu będzie niebawem dostępny w Internecie na stronie Zakładu Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej WGGiŚ AGH wraz z programem typu "plug in" do przeglądarki internetowej, który umożliwi interaktywne poznawanie reliktyw romańskich odkrytych w kościele św. Andrzeja w Krakowie.

#### 4. LITERATURA

Dzedzic A., 2004. Komputerowa wizualizacja 3D reliktyw romańskich z kościoła św. Andrzeja w Krakowie. Praca magisterska Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej WGGiŚ AGH w Krakowie.

## VIRTUAL COPY OF ROMANESQUE RELICTS OF ST. ANDREW'S CHURCH IN KRAKÓW

KEY WORDS: architectural documentation, digital photoplan, wireframe model, surface model, natural textures, visualization, VRML

### Summary

One of the biggest archaeological discoveries in Kraków in recent years were relicts of Romanesque architecture – an apse with an adjoining fragment of a nave, which were found in St. Andrew church in 2003. These relicts are mostly covered by unique XII century's frescos – probably the oldest Romanesque wall paintings in Poland. Photogrammetry and Remote Sensing Information Department team made two digital documentations of the object in the form of photoplans, from the years 2001 and 2003 (before and after conservation works).

Because of the inaccessible location of the object to visitors (enclosure at a convent) the authors made the virtual 3D copy of the object based only on existing photoplans and source surveying materials. In this paper, the authors describe all stages of this elaboration. The wire frame model was created based on vectors, which were prepared using the VSD photogrammetric station, while elaboration of stereopairs was made with a UMK 10/1318 camera. The edges, which were invisible on stereopairs, were reconstructed based on existing photoplans with the application of the special geometrical constructions.

Three versions of the wire frame model were prepared: the nave with the remains of an apse, the nave with an entrance wall and the nave with the geometrical reconstruction of an apse. Based on wire-frame models, all surfaces of the object were defined. Both wire-frame and surface models were prepared with the use of AutoCad. The irregular surface models of Romanesque relicts were covered by natural textures of high resolution photoplans. This rendering process was made using 3Dsmax software.

The visualized model of the apse was converted into VRML to make it available in the Internet. The result of the described work shows the possibility of creating detailed, irregular 3D models of objects, which meet accuracy standards of photogrammetric documentation, based only on source survey data collected for photogrammetric documentation (in the form of photoplans) purposes.

Dr inż. Adam Boroń  
e-mail: aboron@agh.edu.pl  
tel. +12 6173826

Mgr inż. Aleksander Dziejczak  
e-mail: aleksander.dziejczak@capnor.pl