

**PRZEGLĄD METOD TEKSTUROWANIA MODELI 3D OBIEKTÓW  
UZYSKANYCH NA DRODZE LASEROWEGO SKANOWANIA  
NAZIEMNEGO I TECHNIK FOTOGRAMETRYCZNYCH\***

**REVIEW OF METHODS OF TEXTURING 3D OBJECT MODELS  
OBTAINED THROUGH TERRESTRIAL LASER SCANNING AND  
PHOTOGRAMMETRIC TECHNIQUES**

**Regina Tokarczyk<sup>1</sup>, Piotr Kohut<sup>2</sup>, Sławomir Mikrut<sup>1</sup>, Jakub Kolecki<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska, Wydział Geodezji  
Górnictwej i Inżynierii Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica  
w Krakowie

<sup>2</sup> Katedra Robotyki i Mechatroniki, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademia  
Górnictwo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: model 3D, teksturowanie, skaning laserowy, obraz cyfrowy, kamera  
niemetryczna

STRESZCZENIE: Teksturowanie jest procesem pokrywania powierzchni wirtualnych modeli obrazem (lub polem) uzyskanym w sposób sztuczny lub za pomocą kamer cyfrowych. Pozwala na uzyskanie efektu fotorealizmu, co w wielu aplikacjach jest szczególnie pożądane. W pracy dokonano przeglądu metod teksturowania, omówiono zagadnienia towarzyszące teksturowaniu: analizę widoczności, detekcję przysłoneń. Szczególny nacisk położono na analizę metod automatycznych, jako najbardziej ekonomicznych. W procesie tym powszechnie wykorzystuje się równanie kolinearności w celu rzutowania trójkątów z przestrzennego poligonu *mesh* na zorientowane płaszczyzny zdjęć wykonując analizę widoczności. Właściwa tekstura przypisywana jest na podstawie analizy porównawczej dostępnych tekstur. Możliwe jest teksturowanie fragmentu modelu na podstawie jednego optymalnego zdjęcia lub też na podstawie „uśrednienia” wielu zdjęć. Prace badawcze prowadzono w dwóch aspektach: poszukiwania warunków optymalnego teksturowania oraz testowania programów do manualnego, półautomatycznego i automatycznego teksturowania. Badania prowadzone na polu testowym obejmowały eksperymenty z zastosowaniem dwóch metod teksturowania przy zmienności zarówno wielkości trójkątów teksturowanych jak i orientacji zdjęć wykonanych do pozyskania tekstur. Pozwoliły one na sformułowanie wniosków odnośnie optymalizacji warunków teksturowania. W ramach drugiej części prac badawczych przetestowano różne dostępne programy. Testy przeprowadzono na wyjątkowo trudnych obiektach, bo jako dane posłużyły modele 3D obiektów infrastruktury kolejowej i teren znajdujący się w pobliżu skrajni oraz podtorze, pozyskane z danych laserowego skaningu mobilnego i towarzyszących mu barwnych zdjęć cyfrowych. Eksperymenty dowiodły, że nie ma obecnie oprogramowania pozwalającego na automatyczne generowanie spójnej i poprawnej siatki na podstawie chmury punktów generowanej

---

\* Opracowanie wykonano w ramach badań statutowych AGH nr 11.11.150.949

przez skaner laserowy a następnie automatyczne nakładanie na tak uzyskaną siatkę obrazów z kamery lub aparatu fotograficznego.

## 1. WSTĘP

Teksturowanie jest techniką stosowaną w grafice komputerowej praktycznie od samego początku jej istnienia czyli pojawienia się pierwszych obrazów cyfrowych.

Celem teksturowania jest przedstawienie powierzchni obiektów przestrzennych za pomocą obrazów bitmapowych (tekstur) lub funkcji matematycznych (tekstur proceduralnych). Mapowanie tekstury określa w jaki sposób powiązać piksele (nazywane w tym kontekście teksełami) lub wartości funkcji z powierzchnią obiektu. Tekstury niosą informacje o barwie powierzchni, jak również innych parametrach generowanego obrazu, związanych np. z modelem oświetlenia: barwą światła odbitego, rozproszonego, stopniem przezroczystości, współczynnikiem załamania światła itp.

W pracach fotogrametrycznych teksturowanie wykorzystywane jest głównie do pokazania wirtualnego modelu inwentaryzowanych obiektów 3D mając na celu jak najwierniejsze odtworzenie ich wyglądu rzeczywistego. Chcemy pokazać nie tylko kształt obiektu, ale również jego wygląd, czasem nie tylko na zewnątrz, ale również wewnątrz.

Pierwsze wirtualne fotorealistyczne modele przedstawiały przeważnie wybrane pojedyncze obiekty takie jak budynki, rzeźby lub inne obiekty o niedużych gabarytach. Proces teksturowania odbywać się mógł zatem w sposób manualny. Jednak wraz z rozwojem i coraz większymi możliwościami sprzętu komputerowego proces modelowania i teksturowania mógł realizować coraz to większe zadania.

Równoległe z rozwojem sprzętu, pojawiały się nowe algorytmy mające usprawnić proces teksturowania, aż do pełnej automatyzacji włącznie. Wraz z rozwojem systemu Google Earth pojawiło się zapotrzebowanie na tworzenie wirtualnych modeli miast w przestrzeni 3D. Dzięki dynamicznemu rozwojowi kamer cyfrowych oraz towarzyszącego im oprogramowania, modelowanie 3D wraz z nakładaniem rzeczywistej tekstury na powstające „wirtualne obiekty” stało się realne w krótkim czasie i przy bardzo dobrej jakości danych. Miało to wpływ również na zmiany w technologii pozyskiwania danych. Modele stereoskopowe pozyskuje się z większym pokryciem, celem wyeliminowania martwych pól. Dziś standardem staje wykonanie zdjęć lotniczych w pokryciu 80 %, a nie jak wcześniej 60%. Zaletą jest oczywiście automatyzacja procesu pomiarowego, ale również lepszy materiał do teksturowania.

Celem prac prowadzonych przez zespół AGH i przedstawionych w tym opracowaniu było zbadanie skuteczności wybranych programów teksturujących w aspekcie ich automatyzacji, jakości wizualnej i dokładności geometrycznej tworzonych modeli. W przypadku obiektów fotogrametrycznych nie zawsze zadowolamy się ich samym wyglądem 3D. Interesuje nas również jakość geometryczna powstałego teksturowanego modelu. Autorzy poszukiwali zatem odpowiedzi na pytanie: na jakim etapie rozwoju są technologie automatycznego teksturowania zbadane dla wybranych obiektów 3D.

Badania prowadzono w dwóch aspektach. Pierwszym było badanie wpływu najważniejszych czynników na jakość geometryczną teksturowania. Drugim, wykorzystanie przykładowych programów do teksturowania wybranych modeli i ocena ich skuteczności działania.

## 2. RODZAJE MODELI 3D I METODY ICH TWORZENIA

Wizualizację 3D wirtualnych obiektów umożliwiają metody grafiki komputerowej. Wejściem do tej wizualizacji jest model przestrzenny obiektu pozyskany różnymi technikami (w tym pomiarowymi). Luhmann (Luhmann et al, 2006) podaje prosty schemat graficznej wizualizacji 3D, gdzie wejściowy model 3D obiektu w różnej postaci podlega transformacji na płaszczyznę ekranu, eliminowane są z niego okluzje, dodawany jest model oświetlenia i ewentualnych odbić, po czym przez techniki śledzenia promieni (*ray tracing*) uzyskuje się widok modelu, który podlega nakładaniu tekstury.

Modele przestrzenne mogą bazować na danych będących wynikiem pomiarów bezpośrednich lub zdalnych, mogą powstawać jako graficzna realizacja funkcji matematycznej, mogą być utworzone w programie graficznym typu CAD.

Wśród różnych technik pomiarowych prym wiodą szeroko pojmowane metody fotogrametryczne (dwu- i wieloobrazowe, wykorzystujące światło strukturalne, metody z cieniem, itp.) oraz skaning laserowy. Służą one do tworzenia modeli punktowych, szkieletowych i powierzchniowych, rzadziej reprezentowanych przez sześciennie elementy podstawowe- voxele. Chmura punktów pozyskana ze skaningu laserowego służy do tworzenia głównie modeli punktowych i modeli powierzchniowych, składających się z trójkątów opartych na wierzchołkach będących punktami pomiarowymi. Model ten zwany modelem TIN może być uzyskiwany w sposób automatyczny, natomiast w sposób półautomatyczny można wpasować standardowe figury geometryczne w chmurę punktów, uzyskując model objętościowy. Natomiast tworzenie modelu szkieletowego nie poddaje się jeszcze zadawalającej automatyzacji.

## 3. RODZAJE I METODY TEKSTUROWANIA

W teksturowaniu pokrywa się obiekt teksturą sztuczną lub naturalną. Tekstura jest generowana różnymi drogami:

- przez wyznaczenie wartości barwy;
- przez nałożenie tekstury sztucznej np. z biblioteki tekstur;
- przez nałożenie tekstury naturalnej wziętej ze zdjęć obiektu.

Teksturowanie można podzielić na:

- jednowymiarowe (szczególnym przypadkiem jest pokolorowana chmura punktów),
- dwuwymiarowe – pokrywanie płaszczyzną tekstury płaszczyzn obiektu,
- trójwymiarowe – tekssel (piksel tekstury) przypisany jest do każdego punktu przestrzeni obiektu.

Najczęściej spotykanymi teksturami są tekstury graficzne, czyli obrazy dwuwymiarowe nakładane na powierzchnię modeli trójwymiarowych. W przypadku tekstur dwuwymiarowych teksturowanie wymaga znalezienia transformacji pomiędzy układem

współrzędnych powierzchni (najczęściej jest to układ kartezjański, sferyczny lub walcowy, w zależności od tego, na jakiego rodzaju powierzchnię nakładany jest obraz) oraz układem współrzędnych tekstury (jest to układ równoległy do układu współrzędnych obrazu). Najczęściej obiekt o dowolnym kształcie jest przekształcany w siatkę trójkątów. Następnie znajduje się transformacja pomiędzy odpowiadającymi sobie wierzchołkami trójkąta siatki 3D i trójkąta leżącego na obrazie. Nazywa się ten proces mapowaniem tekstury (*texture mapping*). Zatem najpierw wykonywane jest rozwinięcie bryły modelu do płaskiej siatki, nałożenie odpowiednio obrabionej tekstury na siatkę a następnie zawinięcie siatki ponownie na bryłę.

Innym, prostszym sposobem teksturowania obiektów 3D jest projekcja tekstury. Polega ona na rzutowaniu obrazu tekstury na powierzchnię obiektu analogicznie do rzutowania światła z projektora. Technika ta wykorzystywana była wcześniej do modelowania cieni wynikających z nierównomiernego oświetlenia, obecnie sposób ten stosowany jest w automatycznym teksturowaniu obrazami o znanych elementach orientacji kamery. Jednym z pierwszych zastosowań tej techniki było wykorzystanie funkcji „*spot light*” w 3DStudio Max (Hanke 1996, 1997).

Pierwsze realizacje fotorealistycznych, teksturowanych modeli wykonywane były manualnie, rastry zdjęć „przycinano” do form rozpinanych potem na elementarnych płaszczyznach modelu obiektu odpowiednią funkcją matematyczną. Żmudna praca pozwalała jednak na uzyskanie bardzo dobrych wyników.

Automatyzację procesu teksturowania umożliwia znajomość parametrów orientacji zdjęć. Wykorzystując równanie kolinearności, punkty jednostkowej powierzchni modelu (zwykle trójkąta) rzutowane są na zdjęcie w celu znalezienia obszaru służącego do pokrycia. Piksele dla wierzchołków figury znajduje się automatycznie z odpowiedniości perspektywicznej, a przyporządkowanie pikseli wewnątrz trójkąta określane jest z zastosowaniem transformacji pomiędzy współzrędnymi barycentrycznymi opisującymi położenie punktów leżących wewnątrz trójkąta z siatki 3D i współzrędnymi punktów znajdującymi się wewnątrz odpowiadającego mu trójkąta tekstury.

Zdjęcia służące do nakładania tekstury naturalnej w przypadku wykonywania wizualizacji z danych pochodzących ze skaningu laserowego mogą pochodzić z dwu źródeł: z kamery sprzężonej ze skanerem, o znanych elementach orientacji zdjęć względem pozyskanej chmury punktów, a także z kamery niezależnej od skanera, dla której elementy orientacji zewnętrznej (a nawet wewnętrznej) mogą nie być znane. Znajomość orientacji zdjęć umożliwia automatyzację teksturowania, ale bywa tak, iż jakość oraz usytuowanie w stosunku do pokrywanych powierzchni dla zdjęć z kamer wbudowanych w skaner nie są optymalne. Wykonanie zdjęć dedykowanych teksturowaniu pozwala na uzyskanie obrazów bardziej wyrównanych radiometrycznie, na dobór ich właściwej rozdzielczości geometrycznej i optymalizację położenia względem obiektu. Jeśli jednak nie pozyska się informacji o orientacji zdjęć, czeka żmudne teksturowanie manualne. Pewnym udogodnieniem wspomagającym automatyzację jest spotykane w niektórych programach do teksturowania wykorzystanie funkcji DLT do określenia nieznannej orientacji zdjęć (Zhu *et al*, 2011). W tym celu należy na modelu 3D i na obrazie służącym do teksturowania wskazać co najmniej 6 odpowiadających sobie punktów, rozmieszczonych przestrzennie

(nie w jednej płaszczyźnie). Analogicznie można wyznaczyć orientację skalibrowanych zdjęć za pomocą wcięcia wstecz opartego o równanie kolinearności.

Algorytmy procesu tekstuowania w oprogramowaniach zawierają ponadto niezbędne etapy, decydująco wpływające na efekt końcowy. Są to: analiza widoczności i detekcja przysłonięć, utworzenie optymalnej tekstury, korekcje radiometryczne, antyaliasing.

Do analizy widoczności wykorzystuje się takie algorytmy jak: *painter* (Goodrich 1992), *ray-tracking*, *Z-bufer* (Catmuller 1975, Grammatikopoulos *et al.*, 2007) oraz *surface-based* (Hanusch 2008).

W celu dobrania optymalnej tekstury przyjmuje się dwie zasadnicze metody: wybór najlepszej tekstury lub procedurę łączenia wszystkich tekstur. Pierwsza metoda polega na wyborze najlepszej tekstury dla każdego trójkąta modelu przestrzennego indywidualnie. Aby wybrać najlepszą teksturę dla każdego trójkąta należy określić parametry oceny jakości i rozdzielczości tekstury. Kombinacja dwu podstawowych parametrów: odległości i ekspozycji pozwala na dobór najlepszych tekstur (Frueh *et al.*, 2004). Druga metoda zakłada użycie wszystkich dostępnych tekstur poprzez procedurę uśredniającą. Zaletą tej metody jest równoczesna korekcja radiometryczna w wyniku uśrednienia różnic oświetlenia obiektów podczas rejestracji obrazów. Jednak wadą tej metody pozostaje utrata wielu wysokorozdzielczych informacji oraz błędy przypadkowe spowodowane błędami orientacji zdjęć (El-Hakim *et al.*, 2003).

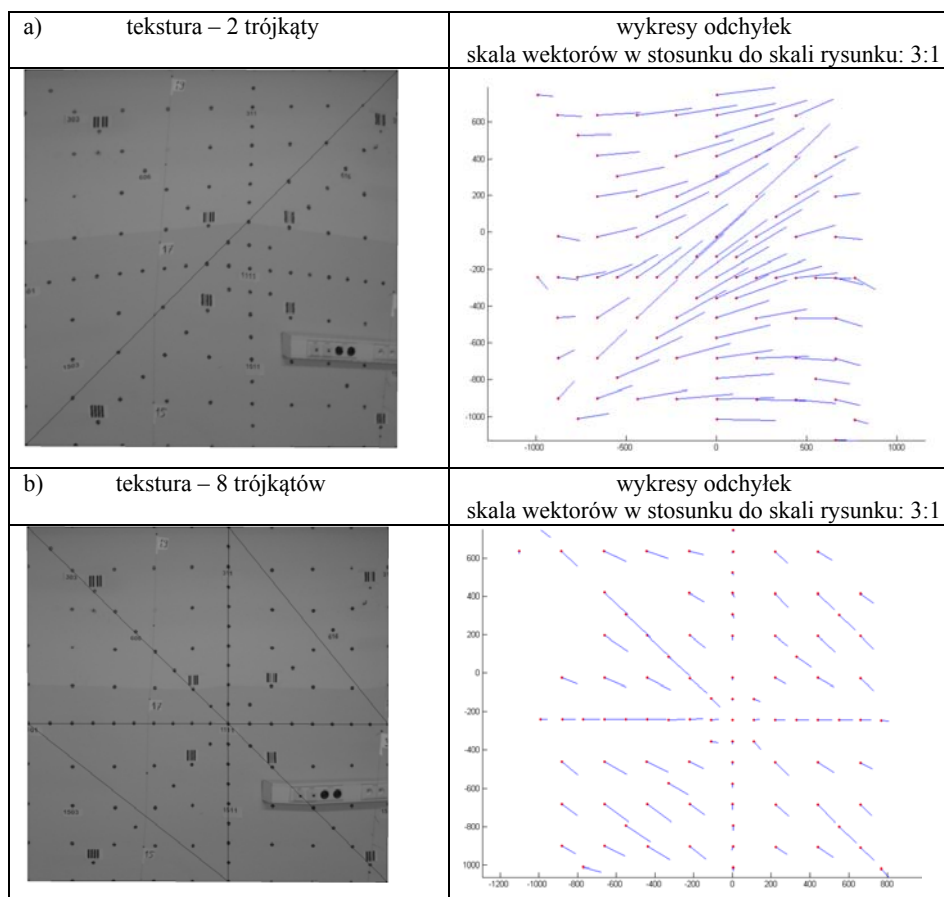
Antyaliasing jest procedurą zapobiegającą pojawianiu się na teksturze składowych o częstotliwości wyższej niż częstotliwość próbkowania. Powszechnie stosowaną techniką zapobiegającą pojawianiu się zjawiska aliasingu jest mip-mapping – metoda polegająca na przygotowaniu zestawu tekstur o odpowiednio zmniejszających się rozdzielczościach. Metodę tę zaproponował Williams w roku 1983 (Williams 1983). Podczas mapowania tekstury na obiekty o różnej skali niezbędny jest wybór wzoru o właściwej rozdzielczości.

#### **4. WPLYW WYBRANYCH CZYNNIKÓW NA DOKŁADNOŚĆ TEKSTUOWANIA**

Tekstura nałożona na wirtualny model obiektu spełnia nie tylko rolę informacyjną, pozwalając na wyróżnienie i identyfikację poszczególnych obiektów ale również powinna dla modeli metrycznych zapewnić odpowiednią dokładność odtworzenia przestrzeni. W przypadku tekstuowania automatycznego muszą być znane elementy orientacji zdjęć przeznaczonych do tekstuowania względem układu współrzędnych punktów utworzonego modelu. Dla tekstuowania modeli utworzonych na podstawie danych pochodzących ze skaningu laserowego wymagane jest zatem wzajemne pozycjonowanie układu urządzeń wchodzących w skład systemu pomiarowego, a więc skanera (skanerów) i kamery (kamer). Błędy wzajemnego położenia będą bowiem wpływały na dokładność zrzutowania elementu tekstuowanego w przestrzeni 3D (trójkąta, czworoboku, wieloboku) na zdjęcie w celu znalezienia obszaru przeznaczonego do tekstuowania. W dalszym etapie procesu wpływa to również na znajdowanie odpowiedniego piksela na zdjęciu, posiadającego swój perspektywiczny (lub według wybranego wielomianu) odpowiednik na ortoobrazie.

W przypadku tekstuowania obiektów cienkich i wysmukłych największy wpływ będzie miał błąd określenia kąta kierunkowego osi kamery w płaszczyźnie poziomej, dla

obiektów wąskich i horyzontalnych – błąd kąta kierunkowego w płaszczyźnie pionowej. Błąd ten będzie małał w przypadku zmniejszania się odległości kamera – teksturowany obiekt .



Rys.1. Wyniki teksturowania a) zdjęcie ukośne, 2 trójkąty, b) zdjęcie ukośne, 8 trójkątów

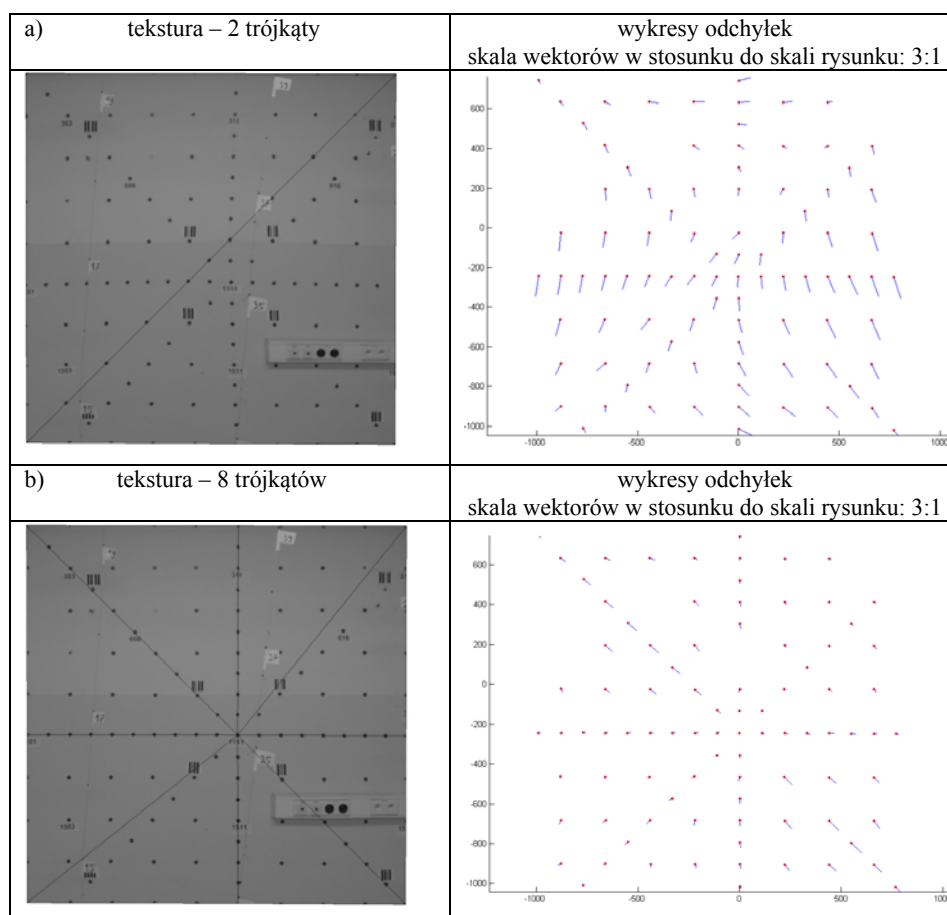
Podobny charakter będą miały i inne czynniki, istotne na przykład dla systemów mobilnych, związane z układem kamera – skaner, takie jak na przykład synchronizacja czasowa tych urządzeń. Desynchronizacja czasowa o wielkości  $\Delta t$  spowoduje bowiem zmianę położenia środka rzutów kamery teksturowanej w stosunku do początku wiązki skanującej o wielkość  $\Delta t \cdot v$ , gdzie  $v$  jest prędkością platformy pomiarowej

Na dokładność teksturowania automatycznego mają również wpływ błędy kalibracji kamery, ponieważ zasada projekcji wymaga odtworzenia wiązki rzutującej ze zdjęcia. Kamery towarzyszące skanerom mają zwykle szeroki kąt widzenia, a zatem znaczącą dystorsję obiektywu, który to błąd powinien być wyeliminowany z obrazu tekstury.

Zarówno teksturowanie manualne jak i automatyczne wykorzystuje do rozpinania tekstur na trójkątach czy innych figurach funkcje transformacji afinicznej czy biliniowej. Wprowadzają one deformacje geometrii obrazów, powodując obniżenie dokładności geometrycznej tworzonych modeli a także wizualne dysonanse. Błędy są proporcjonalne do wielkości pokrywanych płaszczyzn oraz zależą od kąta między normalną do płaszczyzny tekstury a normalną do płaszczyzny pokrywanej.

W ramach Zadania 3-go projektu „Opracowanie innowacyjne metodyki i informatycznego systemu zarządzania dla kodyfikacji linii kolejowej” przeprowadzono badania nad wpływem wybranych czynników na dokładność teksturowania.

Spośród wyżej wymienionych czynników wybrano najważniejsze: wielkość trójkątów, na które zostały podzielone powierzchnie teksturowane oraz kąt zawarty między normalną do powierzchni teksturowanej a osią kamery dostarczającej tekstury.



Rys. 2. Wyniki teksturowania a) zdjęcie na wprost 2 trójkąty,  
b) zdjęcie na wprost, 8 trójkątów

Badania przeprowadzono na polu testowym AGH, zdjęcia pola wykonano aparatem fotograficznym Nikon D80, z matrycą CCD o rozdzielczości  $3872 \times 2592$  ( $\approx 10^6$ ) pikseli z obiektywem szerokokątnym Nikon Nikkor 20 mm f/2.8D, ogniskowanym na 2 m. Do teksturowania wykorzystano program MicroStation v8i, teksturowano model zdjęciami przetworzonymi w celu pozbawienia dystorsji, w teksturowaniu wykorzystano dostępną w programie transformację afiniczną.

Alternatywnie wykorzystano program PhotoModeler Scanner, gdzie proces teksturowania odbywa się automatycznie, wykorzystując projekcję tekstury.

Na rysunku 1a i b (Rys.1) przedstawiono wpływ wielkości trójkątów teksturujących na geometryczną poprawność odtworzenia powierzchni dla zdjęcia wykonanego przy położeniu osi kamery pod kątem około  $60^\circ$  do płaszczyzny pola testowego, natomiast rysunek 2 (Rys.2) przedstawia podobną zależność dla zdjęcia o osi prawie prostopadłej.

Porównanie współrzędnych punktów pola odczytanych na modelu pokrytym teksturą ze współrzędnymi nominalnymi wykazało, że dla zdjęć ukośnych zmniejszenie czterokrotne powierzchni trójkątów skutkowało około czterokrotnym zmniejszeniem błędu średniego położenia kontrolowanych punktów tekstury. Dla zdjęć wykonanych prawie równoległe do płaszczyzny obiektu teksturowanego poprawienie dokładności było tylko 1,6-krotne.

Dla modelu teksturowanego automatycznie metodą projekcji z użyciem PhotoModelera, ani wielkość trójkątów ani kąt, pod jakim było wykonane zdjęcie nie miały większego wpływu na efekt jakości geometrycznej teksturowania.

## **5. PRZEGLĄD I TESTOWANIE WYBRANYCH PROGRAMÓW DO TEKSTUROWANIA MODELI 3D**

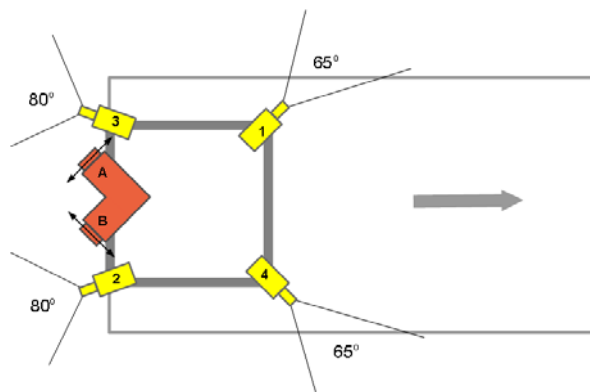
Najczęściej spotyka się w praktyce systemy umożliwiające wspomaganą automatycznie rekonstrukcję modeli 3D na podstawie danych pozyskanych z laserowych skanerów lotniczych. Automatyzacja procesu tworzenia modeli z danych ze skaningu naziemnego jest znacznie trudniejsza. Naziemne systemy skanujące służą najczęściej do rekonstrukcji trójwymiarowej niewielkich scen, takich jak artefakty czy budynki ze stanowisk archeologicznych, zabytki lub ich fragmenty itp. Rekonstruowane obiekty charakteryzują dużą głębią przestrzenną.

W ramach badań wykonano modelowanie obiektów infrastruktury kolejowej pomierzonych za pomocą mobilnego systemu skanującego Riegl VMX-250, wyposażonego w dwa skanery Riegl VQ – 250 oraz pozyskującego zdjęcia barwne z czterech kamer o rozdzielczości 5 megapikseli, ogniskowej 5 mm i kącie widzenia  $80^\circ \times 65^\circ$ . Kamery te w systemie pozyskują dane do kolorowania chmury punktów. Układ skanerów oraz towarzyszących im kamer przedstawia rysunek 2 (Rys.2).

W systemie tym kamery 2 i 3 fotografowały przeciwnie do kierunku jazdy, a kamery 1 i 4 w kierunku jazdy. Kamery 1 i 4 fotografowały kadrem pionowym, pole widzenia w horyzoncie wynosiło  $65^\circ$ , kamery 2 i 3 miały kadr poziomy z horyzontalnym polem widzenia  $80^\circ$ . Dzięki takiemu układowi kamer obiekty infrastruktury były fotografowane zawsze z dwóch perspektyw: przez kamery 1 i 3 albo 2 i 4, a ponadto obiekt mógł być



odwzorowany na kilku zdjęciach z jednej kamery. Dysponowanie wieloma zdjęciami obiektu, z różnej perspektywy i w różnych skalach jest bardzo korzystne z punktu widzenia teksturowania, gdyż pozwala na wybór tekstury z tego zdjęcia, na którym jest oddana optymalnie pod względem geometrycznym i radiometrycznym.



Rys. 3. Schemat układu kamer (1-4) oraz skanerów (A-B) podczas skanowania mobilnego systemem Riegl VMX-250

Przystępując do teksturowania dysponowano materiałem wyjściowym w postaci:

- modelu punktowego w postaci chmury punktów po odfiltrowaniu błędnych odbić,
- modelu punktowego w postaci chmury punktów sklasyfikowanej wg wysokości nad terenem,
- fragmentów chmury punktów reprezentujących przytorowe obiekty infrastruktury,
- siatki trójkątów reprezentującej powierzchnię podtorza wraz z przyległym terenem,
- wektorowej reprezentacji obiektów infrastruktury (tzw. reprezentacja powierzchniowa typu CAD).

Taki materiał pozwolił na wykonanie modeli teksturowanych nie tylko przy pomocy kilku narzędzi informatycznych ale na wnioskowanie co do zastosowaniu różnych strategii postępowania.

Jako obszar testowy dla eksperymentów w zakresie teksturowania wybrano obszar stacji w Słomnikach, o stosunkowo bogatym i reprezentatywnym nasyceniu obiektów infrastruktury kolejowej.

Przetestowano dwie podstawowe strategie teksturowania, różniące się rodzajem modelu reprezentującego kształt obiektów:

- opartą na danych źródłowych (po odfiltrowaniu artefaktów) – chmura punktów,
- opartą na danych przetworzonych – model wektorowy.

Chmura punktów występowała w dwu wariantach:

- podstawowym – zbiór wszystkich punktów chmury na wybranym obszarze testowym
- wyspowym – zbiór fragmentów chmury punktów reprezentujących przytorowe obiekty infrastruktury.

Modelu wektorowy zawierał następujące komponenty:

- siatkę trójkątów reprezentującą podtorze,
- wektorowy model powierzchniowy typowych obiektów przytorowych, o kształcie słupowym lub tablicowym oraz wybranych obiektów kubaturowych,
- wektorowy model powierzchniowy peronu.

Poddając analizie problemy teksturowania należy odnieść się do trzech głównych czynników: rodzaju wykorzystanego modelu, generowania siatki trójkątów, właściwego teksturowania. W tabeli 1 zestawiono wykorzystane narzędzia programowe z przyporządkowaniem ich funkcji w procesie opracowania modelu teksturowanego. Natomiast w tabeli 2 dokonano porównania wybranych cech testowanych programów.

Tabela 1. Zestawienie programów wykorzystanych do trójkątowania i teksturowania

	<b>Model punktowy</b>	<b>Model wektorowy</b>
Teselacja	GOM Inspect Meshlab GeoMagic Studio	MicroStation 8 V8i Select Series 2 oraz RiSCAN PRO
Teksturowanie	Geomagic Studio Blender Cinema4D Maya Software	RiSCAN PRO Photo Modeler Scanner 3D Reshaper Cyclone ImageMaster

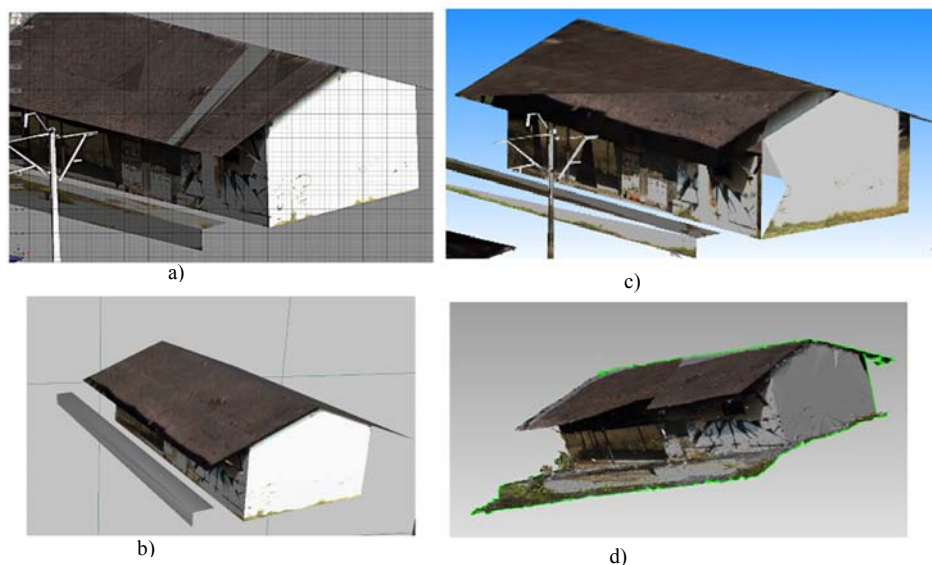
Z punktu widzenia metody odwzorowywania fragmentów zdjęć na płaszczyzny trójkątów testowane programy teksturujące można podzielić na następujące grupy funkcjonalne w zależności od metody rekonstrukcji projekcji przestrzennej:

- (A) programy w których zdjęciom można przypisać znaną orientację zewnętrzną oraz wewnętrzną wraz z dystorsją (podejście ścisłe, stosowane w fotogrametrii): RiSCAN PRO, PhotoModeler Scanner, 3D Reshaper,
- (B) programy, w których orientacja zewnętrzna zdjęć musi być odtworzona na podstawie punktów dostosowania (nie można jej zaimportować) a po jej określeniu dalsza droga postępowania ma charakter ścisłego rozwiązania fotogrametrycznego: ImageMaster,
- (C) programy, w których na podstawie punktów dostosowania wyznaczana jest funkcja wiążąca zdjęcie z modelem, w której nie występują jawnie elementy orientacji zewnętrznej i wewnętrznej zdjęć: Cyclone, Geomagic Studio, Blender,
- (D) programy, w których nie występuje projekcja perspektywiczna zdjęcia na model, a jedynie nakładanie tekstur na płaskie rozwinięcie siatki: Cinema4D, Maya Software.

Z punktu widzenia przydatności do teksturowania złożonych modeli zdecydowanie najlepszym rozwiązaniem są metody A i B, w których odtwarzana jest geometria zdjęcia zgodnie z matematycznym opisem rzutowania środkowego. Jednak konieczność posiłkowania się punktami dostosowania eliminuje metodę B, podobnie jak metodę C, z zastosowań masowych. Jedynie programy typu A można zaliczyć do w pełni automatycznych.

Spośród testowanych narzędzi do analiz porównawczych jakości teksturowania wybrano: RiSCAN PRO, Photo Modeler Scanner, 3D Reshaper, ImageMaster, Geomagic Studio. Pozostałe zostały wyeliminowane z powodu jednoznacznie stwierdzonej nieprzydatności dla potrzeb teksturowania zdjęciami fotograficznymi.

Na rysunku 3 porównano przykładowe wyniki teksturowania osiągnięte w rozważanych programach.



Rys. 4. Porównanie jakości wizualnej teksturowania – magazyn  
a) RiSCAN PRO , b) ImageMaster, c) 3D Reshaper d) Geomagic Studio

Jako najlepsze spośród grupy A należy wskazać programy RiSCAN PRO i 3D Reshaper. W przypadku pozostałych programów przyczyny niekompletności są następujące:

- program ImageMaster – model powstaje przy ogromnym nakładzie pracy manualnej (rekonstrukcja orientacji zdjęć na podstawie fotopunktów),
- program PhotoModeler – w stosunku do programów RiSCAN PRO i 3D Reshaper, z którymi tworzy wspólną grupę funkcjonalną (A), program generuje modele o zdecydowanie niższej jakości,
- program Geomagic Studio – program wyróżniał się najwyższym stopniem automatyzacji, ale wyniki dla siatki zbudowanej z pełnej chmury punktów były generalnie niezadowalające, często nie udawało się po zamodelowaniu osadzić teksturę, wyniki uzyskane ze strategii opartej na tworzeniu siatki trójkątów tylko z fragmentów chmury były lepsze, lecz nie wszystkie obiekty udało się zrekonstruować.

Tabela 2. Tabela przedstawiająca porównanie wybranych cech testowanych programów

Oprogramowanie / Własności	RiSCAN Pro	Photomodeler	3D Reshaper	ImageMaster	Geomagic	Blender	Maya	Cyclone
Licencja płatna	tak	tak	tak	tak	tak	nie	tak	tak
Możliwość wykorzystania elementów orientacji zewnętrznej zdjęć	tak	tak	tak	nie	nie	nie	nie	nie
Postać elementów orientacji zewnętrznej zdjęć	tak	tak	tak	---	---	---	---	---
Możliwość automatyzacji wczytania elementów orientacji zewnętrznej zdjęć	nie	nie	nie	---	---	---	---	---
Uwzględnienie dystorsji	tak	tak	tak	tak	tak	tak	tak	Tak
Znajomość modelu dystorsji	tak	tak	tak	tak	bd	bd	bd	bd
Opcja analizy widoczności	tak	tak	nie	nie	nie	nie	nie	nie
Opcja analizy kąta normalnej zdjęcia do normalnej trójkąta	tak	tak	nie	nie	nie	nie	nie	nie
Ingerowanie w jakość radiometryczną zdjęć	nie	tak	nie	nie	tak	tak	tak	nie
Możliwość zachowania/usunięcia trójkątów niepoteksturowanych	tak	nie	nie	nie	nie	tak	tak	nie
Teksturowanie ręczne/automatyczne	automat	automat	automat	ręczne	ręczne	ręczne	ręczne	ręczne
Stopień automatyzacji	niski	niski	niski	brak	średni	brak	brak	brak
Możliwość eksportu modelu	tak	tak	tak	tak	tak	tak	tak	nie
Formaty eksportu	VRML, OBJECT	OBJECT, 3DS, VRML, 3dm	OBJECT, MSH	VRML, TIN	wrp, 3ds, dxf, oogl, iv, ply, prc, stl, wrl, obj	OBJ, VRML	MEL, OBJ, VRML2, DXF	nie

Wizualnie najlepsze efekty osiągnięto przy pomocy programu ImageMaster. Jednakże trudno go rekomendować do zastosowań masowych, gdyż wybór zdjęć do teksturowania jak także ich orientacja jest manualna i bardzo pracochłonna. Programami, które potrafią wykorzystać pomierzone w czasie skanowania mobilnego elementy orientacji zdjęć są: RiSCAN PRO i 3D Reshaper (a także PhotoModeler, lecz daje gorsze wyniki pod względem graficznym). Co prawda elementów orientacji zdjęć nie udało się w tych programach wprost zaimportować lecz musiały być manualnie wprowadzone do formularzy interaktywnych, to problem jest do rozwiązania przy pomocy dedykowanej aplikacji informatycznej. Program 3D Reshaper generuje pozornie ładniejsze pod względem wizualnym tekstury niż RiSCAN PRO. Jednakże bliższa analiza jakości tekstur pokazuje wiele przekłamań. Warto przypomnieć, że w obu programach zastosowano ten sam model wektorowy i te same zdjęcia. Program 3D Reshaper nie posiada funkcji wyboru optymalnych zdjęć do teksturowania, co powoduje że w praktyce wybiera zdjęcia mocno

skręcone w stosunku do tekstuowanej powierzchni. W konsekwencji silniej ujawniają się niedokładności elementów orientacji zewnętrznej, tekstury są przesunięte lub rozmazane (Rys.3).

Na osobną ocenę zasługują wyniki osiągnięte w programie Geomagic Studio. W tym wypadku nie korzystano z uprzednio opracowanego, pracochłonnego modelu wektorowego, lecz tekstutowano siatkę trójkątów rozpiętą na chmurze punktów. O ile rozpinanie siatki na całym zbiorze liczącym ok. 9 mln nie dało dobrych wyników, często obiekty zanikały (np. słupy trakcyjne), to teselacja na fragmentach chmury skończyła się lepszym poziomem tekstutowania. Jest on jednak znacznie gorszy niż w przypadku użycia modelu wektorowego (liczne braki ciągłości elementów słupowych).

Większość badanych aplikacji informatycznych służących tekstutowaniu tworzy wynik, który jest eksploatowany albo tylko w ich własnym środowisku, a jeśli możliwe jest wyjście na zewnątrz to najczęściej poprzez typowy format wizualizacyjny jakim jest VRML. Format ten służy tylko wizualizacji, nie można w nim prowadzić żadnych pomiarów (poza opcją wstawienia do modelu znaczników służących jako punkty specjalne).

## 6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Celem badań było wykonanie eksperymentów dotyczących automatycznego tekstutowania wybranych obiektów infrastruktury skrajni kolejowej. Prace te prowadzono w oparciu o oprogramowanie wyselekcjonowane uprzednio na podstawie literatury.

Do testowania wybrano wyjątkowo trudne obiekty, tj. modele 3D infrastruktury kolejowej, teren znajdujący się w pobliżu skrajni oraz podtorze, pozyskane z danych laserowego skaningu mobilnego i towarzyszących mu barwnych zdjęć cyfrowych.

Badania prowadzono z zastosowaniem dwóch metod tekstutowania przy zmienności zarówno wielkości trójkątów tekstutowanych jak i orientacji zdjęć wykonanych do pozyskania tekstur.

Podjęte próby tekstutowania automatycznego lub półautomatycznego obiektów naziemnych towarzyszących skrajni kolejowej wykazały, że proces taki jest możliwy dla prostych przypadków, jednak w sytuacjach bardziej skomplikowanych (przystanki obiektów) na dzisiaj algorytmy zawodzą.

Generalnie można postawić wniosek, że na jakość utworzonych modeli ma decydujący wpływ raczej sposób modelowania, który powinien być dostosowany do cech obiektów (np. dla takich obiektów jak słupy, tablice informacyjne zdecydowanie lepsze wyniki dawało tekstutowanie modelu szkieletowego utworzonego manualnie niż modelu powierzchniowego składającego się z trójkątów).

Eksperymenty dowiodły, że nie ma obecnie oprogramowania pozwalającego na automatyczne generowanie spójnej i poprawnej siatki na podstawie chmury punktów generowanej przez skaner laserowy a następnie automatyczne nakładanie na tak uzyskaną siatkę obrazów z kamery lub aparatu fotograficznego.

Niemniej jednak automatyczne tekstuowanie ma swoje sukcesy w fotogrametrii lotniczej, gdzie mamy do czynienia z lepszymi danymi z punktu widzenia tekstuowania. W perspektywie kilku lat, powstaną skuteczniejsze algorytmy tekstuowania również dla rozwiązań naziemnych. Stąd, z racji faktu, że jest to stosunkowo nowe zagadnienie, ale jego rozwiązanie jest bardzo potrzebne nie tylko fotogrametrii, należy się spodziewać poprawy algorytmów i ich skutecznego działania w perspektywie kilku - kilkunasto letniej.

Jednym z „motorów napędowych” takiego działania jest konieczność budowy wirtualnych miast 3D, które zastąpią aktualne systemy informacji przestrzennej bazujące na ortofotomapie czy prostych (bryłowych lub szkieletowych) modelach miast.

W pracy dokonano również podsumowania tabelarycznego testowanego oprogramowania wskazując na jego wady i zalety (zestawienie w tabeli 2).

## 7. LITERATURA

- El-Hakim, S., Gonzo, L., Picard, M., Girardi, S., Simoni, A., 2003: Visualisation of Frescoed Surface: Buonconsiglio Castle – Aquila Tower. “Cycle of Months”. *ISPRS Archives “Visualization and Animation of Reality-based 3D Models”* 24-28 February 2003 Tarasp-Vulpera, Engadin, Switzerland, Editor(s): Gruen, A., Murai, Sh., Niederoest, J., Remondino, F.
- Frueh, C., Sammon, R., Zakhor, A., 2004: Automated Texture Mapping of 3D City Models with Oblique Aerial Imagery. *Proceedings of the 2nd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission (3DPVT'04)*.
- Goodrich, M., 1992: A polygonal approach to hidden-line and hidden-surface elimination. *CVGIP: Graph. Models Image Process. CVGIP: Graphical Model and Image Processing*, Volume 54, Number 1, January 1992.
- Grammatikopoulos L., Kalisperakis, I., Karras, G., Petsa, E., 2007: Automatic Multi-view texturing mapping of 3D surface projections. *ISPRS Archives, “Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures”* 12-13 July 2007, ETH Zurich, Switzerland. Editor(s): Fabio Remondino, Sabry El-Hakim.
- Hanke K., Abdel Bary Ebrahim M., A General Approach for Object Oriented 3-D Mapping in Digital Close Range Restitution. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXI, Part B5, Comm. V, pp: 215-219, 1996.
- Hanke K., Abdel Bary Ebrahim M., Monument Presentation using Digital Architectural Photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXI, Part 5C1B, Goeteborg, pp: 147-153, 1997.
- Hanusch, T., 2008: A new texture mapping algorithm for photorealistic reconstruction of 3D object. *Proceedings of the XXI-th ISPRS Congress*, Beijing, China, July 3-11, 2008, pp 699-705.
- Luhmann T., Robson S., Kyle S., Harley I., *Close Range Photogrammetry*, Wiley Whittles Publishing, 2006.
- Williams L., 1983. Pyramidal Parametrics. *Computer Graphics*, Vol. 17, No 3, July 1983. Dostępne na stronie: <http://staff.cs.psu.ac.th/iew/cs344-481/p1-williams.pdf>
- Zhu L., Hyypä J., Kukko A., Kaartinen H., Chen R., Photorealistic Building Reconstruction from Mobile Laser Scanning Data. *Remote Sensing* 2011, 3(7), 1406-1426.

## REVIEW OF METHODS OF TEXTURING 3D OBJECT MODELS OBTAINED THROUGH TERRESTRIAL LASER SCANNING AND PHOTOGRAMMETRIC TECHNIQUES

KEY WORDS: 3D model, texturing, laser scanning, digital image, non-metric camera

### Summary

Texturing is a process, in which surfaces of virtual models are covered with images (or fields) obtained either artificially, or by means of digital cameras. The process makes it possible to yield the effect of photorealism, which is especially desirable in numerous applications. The paper provides a review of methods of texturing, and discusses texturing-related issues: analysis of visibility, detection of blind spots. Special attention has been paid to the analysis of automatic methods as the most economic ones. The process itself generally makes use of collinearity equation in order to project triangles from a spatial polygon mesh onto oriented surfaces of images, performing visibility analysis. The relevant texture is assigned based on a comparative analysis of available textures. It is possible to texture a fragment of the model based on a single, optimal image or based on the "averaging" of many images. Research works were conducted in two aspects: searching for conditions of an optimal texturing, and testing programs for manual, semi-automatic and automatic texturing. Research carried out in a test field included experiments with the use of two methods of texturing, at variability of both texturized triangle sizes, and orientation of images made to provide textures. Following the research, it was possible to draw conclusions concerning the optimisation of texturing conditions. In the second part of research, different available programs were tested. The tests were conducted on exceptionally difficult objects, since the test data included 3D models of railway infrastructure objects and area close to the clearance envelope, as well as of the trackbed, obtained from mobile laser scanning data and associated digital colour images. The experiments have proved that presently there is no software available, which would enable an automatic generation of a coherent and correct mesh on the basis of point cloud generated by a laser scanner, and subsequently mapping images from a movie camera or a photo camera on the so-obtained mesh.

Dane autorów:

Dr hab. inż. Regina Tokarczyk  
e-mail: tokarcz@agh.edu.pl  
telefon: 12 617 22 88

Dr inż. Piotr Kohut  
e-mail: pko@agh.edu.pl  
telefon: 12 617 33 96

Dr inż. Sławomir Mikrut  
e-mail: smikrut@agh.edu.pl  
telefon: 12 617 22 72

Mgr inż. Jakub Kolecki  
e-mail: kolecki@agh.edu.pl  
telefon: 12 617 39 93