

## PORÓWNANIE MODELI 3D OBIEKTU INŻYNIERSKIEGO Z WYKORZYSTANIEM ZDJĘĆ NAZIEMNYCH I SKANINGU LASEROWEGO\*

### COMPARISON OF 3D MODELS OF AN ENGINEERING OBJECT USING TERRESTRIAL PHOTOGRAMMETRY AND LASER SCANNING

Beata Hejmanowska<sup>1</sup>, Jakub Kolecki<sup>1</sup>, Piotr Kramarczyk<sup>2</sup>, Małgorzata Słota<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska  
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

<sup>2</sup>DESS, Częstochowa

**Słowa kluczowe: fotogrametria, naziemny skaning laserowy, modele 3D**  
Keywords: photogrammetry, terrestrial laser scanning, 3D models

### Wstęp

Naziemny skaning laserowy (TLS – *Terrestrial Laser Scanning*) jest obecnie technologią coraz częściej stosowaną do pozyskiwania geoinformacji, w szczególności geoinformacji 3D. Można powiedzieć, że pojawienie się technologii skaningu laserowego zrewolucjonizowało dotychczasowe podejście oparte na pomiarze tachimetrycznym lub fotogrametrycznym. Tradycyjnie wykonywano pomiar punktów obiektu i budowano model 3D. Obecnie technologia TLS dostarcza quasi model 3D w postaci chmury punktów. Pojawiają się jednak pewne problemy związane z usuwaniem niepożądanych obiektów oraz wypełnianiem „dziur”, obszarów niewidocznych dla wiązki laserowej. Ponadto chmura punktów nie jest modelem 3D, stanowi bardzo dokładne odwzorowanie obiektu, ale są to jedynie punkty pomiarowe, których naturalne fluktuacje położenia powodują, że nie definiują one wprost linii, płaszczyzn czy ciągłych powierzchni. Rozwiązaniem tych problemów może być manualne usunięcie zakłóceń, wypełnienie dziur oraz zbudowanie modelu 3D. Podejście to, choć czasochłonne jest obecnie najczęściej stosowane, co nie umniejsza korzyści z wykorzystania TLS. Pomińmo, że podejmowane są liczne prace nad automatyzacją tych procesów, algorytmy w przetwarzaniu danych TLS wydają się być trudniejsze niż wykorzystanie w automatyce przetwarzania danych z lotniczego skaningu laserowego (ALS – *Airborne Laser Scanning*).

---

\* Praca zrealizowana ze środków NCBiR w ramach projektu rozwojowo-badawczego nr OR00019212 pt. „Geoinformatyczny system zabezpieczenia działań operacyjnych związanych z ochroną portów od strony morza”.

Wydaje się, że pojawienie się technologii TLS nie zastąpi innych dostępnych technologii: pomiaru tachimetrycznego czy metody fotogrametrycznej. Należy raczej uznać te metody jako komplementarne. Ich praktyczne wykorzystanie jest zwykle poprzedzone analizą możliwości technologicznych danej metody, ale także aspektem ekonomicznym, pracochłonnością, szybkością wykonania opracowania, oczekiwaną dokładnością i efektem końcowym.

Jednym z ważniejszych pytań jest cel wykonania pomiaru 3D, czy wykonuje się go dla potrzeb głównie wizualizacji, czy w celach ogólnie mówiąc inżynierskich, inwentaryzacyjnych lub projektowych. Odpowiedź na to pytanie warunkuje dobór technologii. Czasem bowiem wykorzystanie uproszczonej metody, polegającej na rekonstrukcji obiektu w oparciu o pomiary długości i tekstuowanie ścian z wykorzystaniem zdjęć wykonanych zwykłym aparatem fotograficznym, jest technologią w zupełności wystarczającą.

Z literatury znane są porównania technologii fotogrametrycznej i skaningu laserowego (Becker i in., 2010; Grussenmeyer i in., 2009; Lee i in., 2009; Sahina i in., 2012; Skarlatos i in., 2012). Czasem porównanie obejmuje zwykłą analizę dokładności, a czasami wykorzystywany jest wzorzec o dokładności o rząd lepszej niż metody badane. Jako najdokładniejszą metodę można przyjąć pomiar tachimetryczny, w dalszej kolejności pomiar GPS RTK, a następnie metody fotogrametryczne, skaningu laserowego i jako najmniej dokładną „pomiar budowlany”.

Z przeglądu literatury nasuwa się wniosek, że dokładności uzyskiwane z wykorzystaniem metod fotogrametrycznych i skaningu laserowego są podobne. Oczywiście dokładność zależy od odległości pomiędzy obiektem i urządzeniem pomiarowym. Nie znaleziono natomiast kompleksowego porównania pomiędzy tymi metodami a zdefiniowaną powyżej metodą uproszczoną. Dlatego też podjęto badania opisane w niniejszym artykule.

## Metodyka badawcza

Celem badań było testowanie różnych metod tworzenia fotorealistycznych modeli 3D dla typowych obiektów portowych (rys. 1). Do pomiarów wybrano blaszany barak o wymiarach ok.  $20 \times 20$  m i wysokości 4-6 m, na którym umieszczono 16 znaczków w postaci szachownicy (rys. 2).

Dookoła baraku pomierzono tachimetrem elektronicznym typu Total Station osnowę złożoną z 4 punktów. Równocześnie z pomiarem osnowy wykonano pomiar sygnalizowanych punktów kontrolnych oraz wybranych punktów naturalnych obiektu.

Zdjęcia obiektu wykonywano z ręki aparatem Nikon D5100 o matrycy CMOS  $23,6 \times 15,6$  mm, 16,2 mln pikseli. Ponadto za pomocą naziemnego skanera laserowego Faro Focus 3D zarejestrowano 6 skanów. Równocześnie przeprowadzono pomiary uproszczone dalmierzem laserowym: Leica DISTO D8. Osnowa geodezyjna została wyrównana i w oparciu o nią wyznaczono współrzędne punktów na obiekcie. Opracowanie fotogrametryczne obejmowało wszystkie etapy: kalibrację aparatu fotograficznego na polu testowym AGH, terrotriangulację, orientację wszystkich modeli (wzajemną i bezwzględną) oraz rysowanie 3D obiektu. Do tego celu wykorzystano własną stację cyfrową. Następnie obiekt 3D poddano tekstuowaniu w nakładce na Microstation–Descartes.

W metodzie TLS wpasowano skany w punkty kontrolne (szachownice), w miarę możliwości automatycznie. Model 3D uzyskano w tym przypadku również w wyniku manualnej wektoryzacji chmury punktów. Modelu ze skaningu laserowego nie tekstuowano, ponieważ testowano linię technologiczną Faro, która w posiadanej wersji nie dawała możliwości tek-

stuwania z wykorzystaniem zdjęć zarejestrowanych skanerem. Tekstowanie z wykorzystaniem zdjęć wykonanych aparatem jest możliwe, ale nie było to przedmiotem analiz.

W metodzie uproszczonej wykonano pomiar długości i wysokości ścian oraz innych elementów budynku, czyli drzwi i okien, wykorzystując dalmierz laserowy. Tekstowanie wykonano podobnie jak w metodzie fotogrametrycznej wykorzystując oprogramowanie Descartes. W przypadku tej metody, w jej linii technologicznej znajduje się wykorzystanie zdjęć naziemnych wykonanych aparatem fotograficznym. Podsumowując – otrzymano 3 niezależne modele 3D metodami: fotogrametryczną, TLS i uproszczoną. Dwa z nich były teksturowane jeden nie.

W następnej kolejności przeprowadzono porównanie modeli pod względem ich dokładności i czasochłonności tworzenia. Dokładność porównywano dla modelu fotogrametrycznego na punktach kontrolowanych niebiorących udziału w wyrównaniu. Wzajemne porównanie trzech modeli przeprowadzono wykorzystując na modelach 3D pomiary długości wybranych elementów obiektu.

## Wyniki

### Wyniki z metody fotogrametrycznej

W wyniku kalibracji aparatu fotograficznego uzyskano elementy orientacji wewnętrznej wraz z parametrami dystorsji. Zdjęcie pola testowego, schemat położenia kamer i rozkład dystorsji znajduje się na rysunku 3. Zdjęcia zostały skorygowane ze względu na dystorsję i wykorzystane do zbudowania modelu stereoskopowego. Wynik stereoskopowej wektoryzacji 3D włącznie z tekstowaniem znajduje się na rysunku 4. Wyniki analizy dokładności przeprowadzonej na 10 wybranych punktach naturalnych przedstawiono w tabeli 1. W czę-

**Tabela 1.** Analiza dokładności: A – wyrównania zdjęć (różnice współrzędnych na punktach kontrolowanych z pomiaru tachimetrycznego i z wyrównania), B – współrzędnych uzyskanych z fotogrametrycznego modelu 3D i pomiaru tachimetrycznego

Nr	Opis	Różnice współrzędnych pomiędzy pomiarem tachimetrycznym oraz					
		A – po terratriangulacji			B – odczytane z modelu stereoskopowego		
		dx [m]	dy [m]	dz [m]	dx [m]	dy [m]	dz [m]
107	murek – róg	0,002	-0,005	0,005	-0,002	-0,009	0,009
110	narożnik dachu	-0,003	-0,003	0,000	-0,007	0,001	-0,002
209	kalenica – róg	0,003	-0,003	0,001	-0,010	-0,001	0,015
210	kalenica – róg	0,005	0,000	0,003	-0,024	0,003	-0,001
212	rynna–góra–róg	0,014	0,005	0,005	0,008	0,004	0,000
213	narożnik dachu	-0,002	-0,003	0,003	-0,006	-0,001	0,001
214	narożnik dachu *	–	–	–	0,024	-0,120	-0,021
405	kalenica – róg	-0,004	-0,006	-0,008	-0,007	-0,006	-0,010
406	rynna–góra–róg	-0,002	-0,001	-0,001	0,004	0,000	-0,006
407	kalenica – róg	-0,010	-0,007	0,006	0,005	-0,012	0,017
<b>Średnia</b>		<b>0,000</b>	<b>-0,003</b>	<b>0,002</b>	<b>-0,002</b>	<b>-0,014</b>	<b>0,000</b>
<b>2 odch. st.</b>		<b>0,014</b>	<b>0,007</b>	<b>0,009</b>	<b>0,026</b>	<b>0,075</b>	<b>0,023</b>

\* tylko na jednym zdjęciu

ści A tabeli 1 znajdują się różnice pomiędzy współrzędnymi uzyskanymi w wyniku pomiaru tachimetrycznego i współrzędnymi po wyrównaniu terratriangulacji. Średnia wartość odchyłki wynosi odpowiednio wzdłuż osi  $x$ ,  $y$  i  $z$ : 0,000 m, -0,003 m, 0,002 m. Wartości podwójnego odchylenia standardowego wyniosły odpowiednio wzdłuż osi  $x$ ,  $y$  i  $z$ : 0,014 m, 0,007 m, 0,009 m. W części B tabeli 1 znajdują się różnice pomiędzy współrzędnymi uzyskanymi w wyniku pomiaru tachimetrycznego i współrzędnymi odczytanymi z modelu stereoskopowego. Średnia wartość odchyłki wynosi odpowiednio wzdłuż osi  $x$ ,  $y$  i  $z$ : -0,002 m, 0,014 m, 0,000 m. Wartości podwójnego odchylenia standardowego wyniosły odpowiednio wzdłuż osi  $x$ ,  $y$  i  $z$ : 0,026 m, 0,075 m, 0,023 m.

### Wyniki skaningu laserowego

**Tabela 2.** Dokładność orientacji bezwzględnej skanów – dokładność wpasowania w sygnalizowane punkty kontrolne

Nr skanu	Dokładność wpasowania na punkty kontrolne [m]
3	0,0059
5	0,0024
7	0,0096
9	0,0036
11	0,0059
13	0,0070
<b>Średnia</b>	<b>0,0057</b>

Schemat położenia stanowisk wraz z chmurami punktów zamieszczono na rysunku 5. Na rysunku tym znajdują się również wartości błędów wzajemnej orientacji skanów. Wartości liczbowe oznaczają średnią odległość pomiędzy punktami kontrolnymi na sąsiednich skanach. Zostały one wyznaczone bez informacji referencyjnych (położenia punktów kontrolnych uzyskanego w wyniku pomiaru tachimetrycznego). Wyniki dokładności orientacji bezwzględnej skanów z wykorzystaniem współrzędnych punktów kontrolnych znajdują się w tabeli 2. W tym przypadku dokładność jest określana za pomocą odległości pomiędzy położeniem punktu kontrolnego na danym skanie a położeniem tego punktu z pomiaru tachimetrycznego. W tabeli znajdują się wartości średnie dla każdego skanu. Średnia dokładność orientacji zewnętrznej skanów wynosiła 5,7 mm.

### Wynik pomiaru uproszczonego

W wyniku pomiaru uproszczonego wygenerowano szkieletowy model 3D obiektu, który po wykonaniu teksturowania przedstawiono na rysunku 6.

## Porównanie dokładności metody fotogrametrycznej, skaningu naziemnego i metody uproszczonej

Analizę dokładności testowanych metod pomiarowych przeprowadzono porównując wybrane odległości na modelu 3D. Pomierzono na trzech utworzonych modelach długości ścian, bram oraz szerokość okna. Obliczono wszystkie kombinacje różnic długości: z metody fotogrametrycznej i skaningu laserowego (foto-tls), z metody fotogrametrycznej i uproszczonej (foto-disto) oraz ze skaningu laserowego i metody uproszczonej (tls-disto). Średnia różnica odległości i podwójne odchylenie standardowe różnic wynosi odpowiednio (tab. 3):

- 0,092 m i 0,158 m (foto-tls)
- 0,034 m i 0,077 m (foto-disto)
- 0,073 m i 0,146 m (tls-disto)

**Tabela 3.** Porównanie odległości poziomych obiektu 3D

Lp.	Opis	foto-tls	foto-disto	tls-disto
	miar szerokości	dd [m]		
1	Ściana 1	0,043	0,028	0,016
2	Ściana 2	0,024	0,020	0,044
3	Ściana 3	0,076	0,026	0,050
4	Ściana 4	0,046	0,077	0,031
5	Brama 1	0,170	0,008	0,178
6	Brama 2	0,016	0,010	0,026
7	Brama 3	0,236	0,015	0,221
8	Brama 4	0,168	0,118	0,051
9	Okno	0,046	0,002	0,044
<b>Średnia</b>		<b>0,092</b>	<b>0,034</b>	<b>0,073</b>
<b>2 odch. stand.</b>		<b>0,158</b>	<b>0,077</b>	<b>0,146</b>

Przeprowadzono również pomiary wysokości wybranych elementów obiektu: naroży, ścian, bram i okna. Przeprowadzono analizę otrzymanych różnic podobnie jak dla długości poziomych.

Średnia różnica wysokości i podwójne odchylenie standardowe różnic wynosi odpowiednio (tab. 4):

- 0,116 m i 0,215 m (foto-tls)
- 0,076 m i 0,166 m (foto-disto)
- 0,069 m i 0,188 m (tls-disto)

**Tabela 4.** Porównanie wysokości obiektu 3D

Opis		foto-tls	foto-disto	tls-disto
miar wysokości		Dd [m]		
10,000	Naroże 1	0,163	0,039	0,201
11,000	Naroże 2	0,108	0,056	0,052
12,000	Naroże 3	0,207	0,250	0,043
13,000	Naroże 4	0,219	0,251	0,032
14,000	Ściana 2-1	0,050	0,047	0,004
15,000	Ściana 2-2	0,133	0,119	0,014
16,000	Ściana 4-1	0,010	0,004	0,014
17,000	Ściana 4-2	0,085	0,079	0,006
18,000	Brama 1	0,241	0,010	0,231
19,000	Brama 2	0,294	0,271	0,023
20,000	Brama 3	0,203	0,024	0,227
21,000	Brama 4	0,013	0,100	0,087
22,000	Okno	0,016	0,032	22,000
<b>Średnia</b>		<b>0,116</b>	<b>0,076</b>	<b>0,069</b>
<b>2 odch. stand.</b>		<b>0,215</b>	<b>0,166</b>	<b>0,188</b>

## Próba automatyzacji metod opracowania modeli 3D

W ramach prac badawczych przeprowadzono próbę wykorzystania dostępnych w Internecie aplikacji do automatycznego tworzenia modeli 3D na podstawie zdjęć fotograficznych. Wynik końcowy działania aplikacji Catch 3D znajduje się na rysunku 7.

Przeprowadzono również próbę automatycznego wykrywania krawędzi z wykorzystaniem chmury punktów. Przykładowo próbowano automatycznie wygenerować płaszczyznę bramy, włącznie ze znalezieniem jej krawędzi. Efekt działania automatu wraz ze wzorcem narysowanym ręcznie znajduje się na rysunku 8. Analizując wynik działania automatu można zaobserwować zakłócenia w przebiegu krawędzi w obrębie zawiasów oraz narożników.

## Podsumowanie i wnioski

W ramach prac badawczych porównano trzy metody, które mogą być wykorzystane do tworzenia modeli 3D: 1) metodę fotogrametryczną, 2) skaningu laserowego oraz 3) pomiar uproszczony. Prace terenowe trwały jeden dzień. Pracochłonność i czasochłonność prac terenowych była w przybliżeniu jednakowa. Przy czym w przypadku metod 1 i 2, do czasu wykonania pomiarów daną metodą należy doliczyć czas pomiaru osnowy i punktów kontrolnych. Metoda uproszczona była najszybsza i nie wymagała pomiaru osnowy.

Metodę fotogrametryczną uznano *a priori* za najdokładniejszą i porównano ją z pomiarem tachimetrycznym na punktach naturalnych obiektu, które włączono do terratriangulacji jako punkty kontrolowane. Dokładność z wyrównania na tych punktach była na poziomie 10 mm. W wyniku porównania położenia naturalnych punktów kontrolnych wyznaczonego w oparciu o pomiar tachimetryczny i z modelu stereoskopowego uzyskano średnią odchyłkę na poziomie 1 mm dla współrzędnych x i z, a na osi y -41 mm. Natomiast podwójne odchylenie standardowe odchyłkę wyniosło średnio 40 mm.

W przypadku skaningu laserowego dokładność wpasowania na sygnalizowane punkty kontrolne (szachownice), wyrażona jako średnia odległość pomiędzy referencyjnym położeniem punktu a położeniem punktu na wpasowanej chmurze punktów, wynosiła ok. 6 mm. Dla skaningu laserowego, jak i dla metody uproszczonej nie przeprowadzono analizy dokładności na naturalnych punktach kontrolnych.

W przypadku porównania wyników pomiarów na punktach niesygnalizowanych, w tym na modelach 3D, pojawia problem identyfikacji punktu oraz interpretacji krawędzi. Nawet zdefiniowanie narożnika obiektu, nie mówiąc już o definicji rogu kalenicy, nie jest jednoznaczne i znacząco wpływa na określenie dokładności pomiaru. Jednocześnie model 3D jest przybliżeniem obiektu, który często chce się wykorzystać do pomiaru wybranych elementów. Dlatego zdecydowano się na porównanie długości charakterystycznych odcinków na modelu. Zmierzone na wszystkich trzech modelach długości i wysokości wybranych elementów. Średnio ze wszystkich metod dokładność pomiaru odległości poziomych wyniosła ok. 15 cm, a dokładność pomiaru wysokości ok. 20 cm. Ponadto należy zauważyć, że metoda uproszczona nie odbiega dokładnością od metody fotogrametrycznej i skaningu laserowego. Wynika to niewątpliwie z charakteru obiektu i problemów w identyfikacji punktów i krawędzi na tego rodzaju obiekcie.

Jednocześnie testowane metody automatyczne – zarówno do wykrywania płaszczyzn i krawędzi, jak i do budowy modelu 3D – nie dostarczyły zadawalających wyników, nawet dla takiego prostego obiektu jak blaszany barak.

### Literatura

- Becker R., Benning W., Effkemann C., 2010: 3D-Monoplotting Combined evaluation of laser scanner data and photogrammetric images.  
<http://www.RIEGLusa.com/applications/plant/pdf/plant-gasstation.pdf>
- Grussenmeyer P., Landes T., Voegtle T., Ringle R., 2009: Comparison methods of terrestrial laser scanning, photogrammetry and tacheometry data for recording of cultural heritage buildings. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.
- Lee I.S., J. Lee O., Ge L., 2009: Comparison of terrestrial laser scanner with digital aerial photogrammetry for extracting ridges in the rice paddies. *Survey Review* 41, 313: 253-267 (July 2009).
- Sahina C., Alkisb A., Erguna B., Kulurc S., Batukb F., Kilicd A., 2012: Producing 3D city model with the combined photogrammetric and laser scanner data in the example of Taksim Cumhuriyet square. *Optics and Lasers in Engineering* vol. 50, issue 12: 1844-1853.
- Skarlatos D., Kiparissi S., 2012: Comparison of laser scanning, photogrammetry and SFM-MVS pipeline applied in structures and artificial surfaces. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* vol. I-3, XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia.

### Abstract

*In the paper, a comparison of results of three methods for 3D modeling is presented. A metal barrack was chosen as a test object in the project: "Geoinformation system for port protection, project no: OR00019212".*

*Photogrammetric method (camera Nikon D5100), terrestrial laser scanning (Focus 3D) and simple distance measurements (Leica DISTO) were used in the tests. Accuracy achieved by means of photogrammetry and laser scanning was evaluated based on the comparison of distances measured in 3D models. The problem of edge identification appears in the tested object and it significantly influences the accuracy.*

dr hab. inż. Beata Hejmanowska  
galia@agh.edu.pl  
<http://home.agh.edu.pl/~galia/>  
tel. +48 12 617 22 72

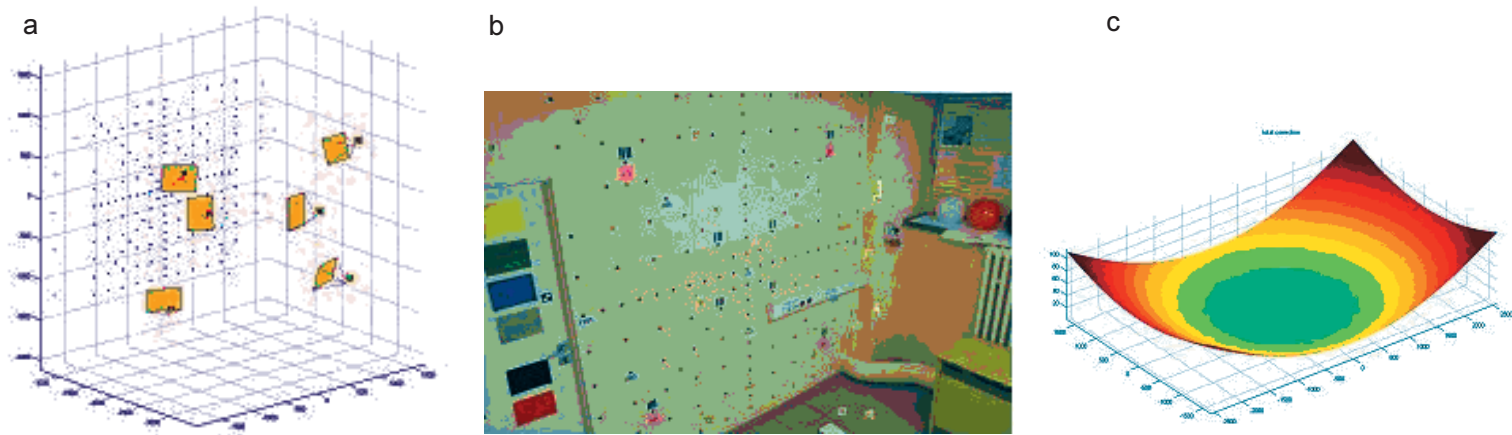
dr inż. Jakub Kolecki  
kolecki@agh.edu.pl  
<http://home.agh.edu.pl/~kolecki/>  
tel. +48 12 617 39 93

mgr inż. Piotr Kramarczyk  
pieciak1@poczta.onet.pl

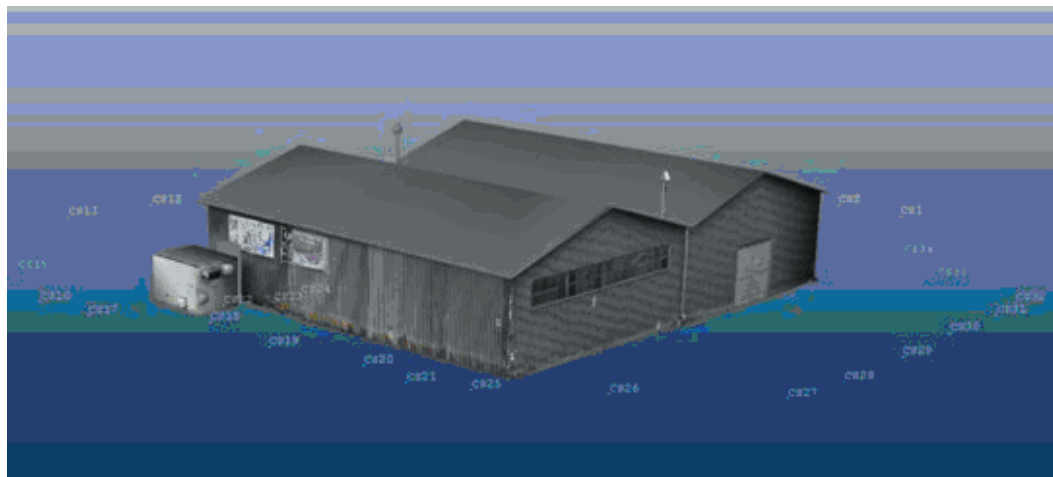
mgr inż. Małgorzata Słota  
mslota@agh.edu.pl  
tel. +48 12 617 39 93



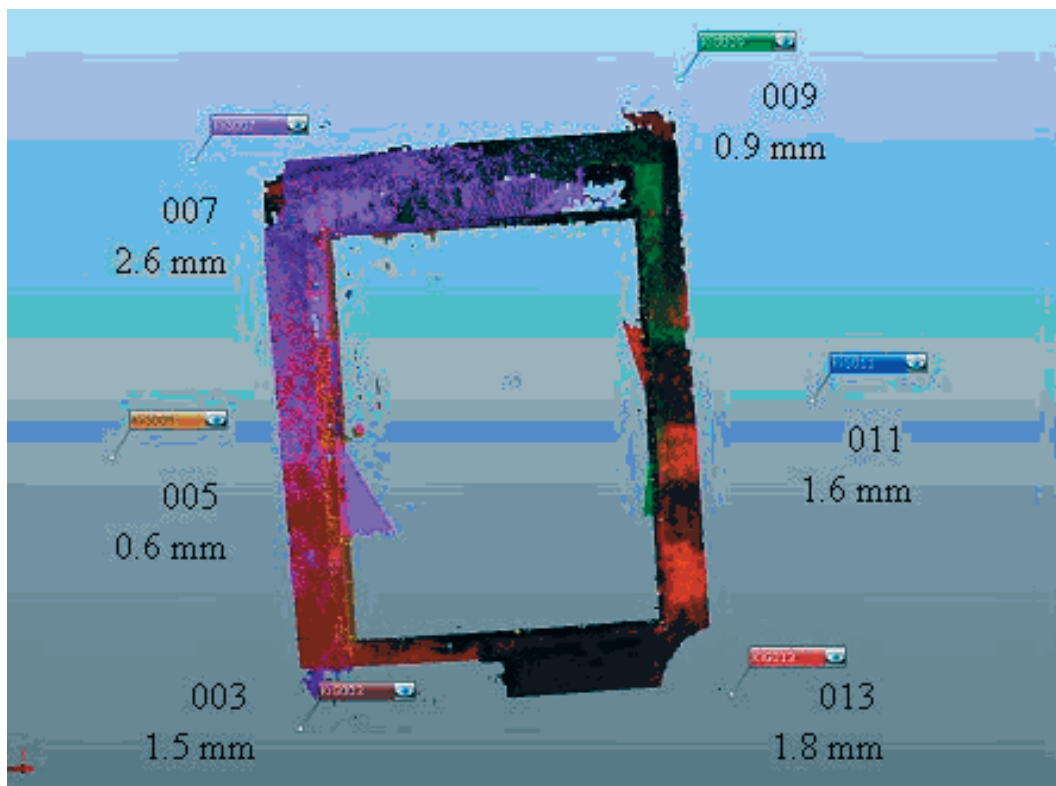




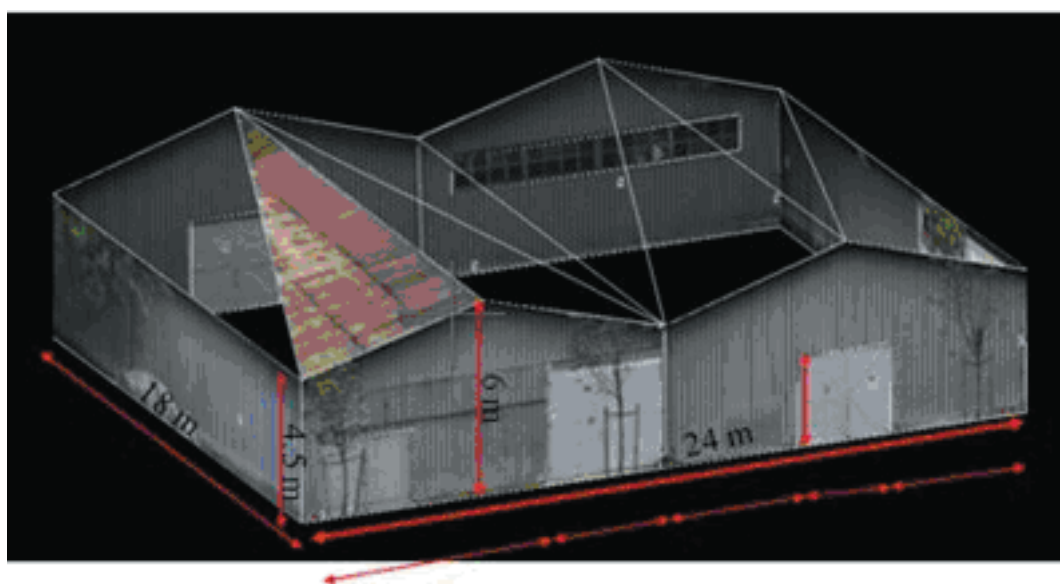
Rys. 3. a – schemat rozmieszczenia zdjęć do kalibracji aparatu , b – widok pola testowego, c – rozkład dystorsji



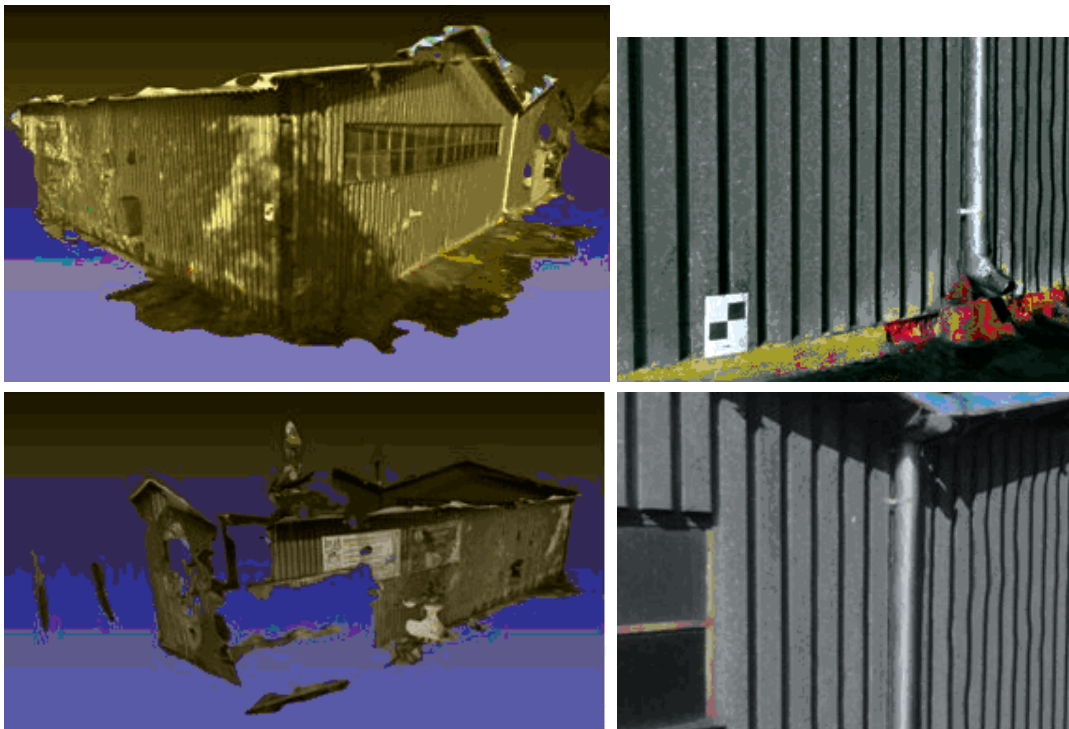
Rys. 4. Widok obiektu testowego z lokalizacją stanowisk aparatu



Rys. 5. Zarejestrowane chmury punktów, położenia stanowisk, numery skanów i dokładności orientacji wzajemnej



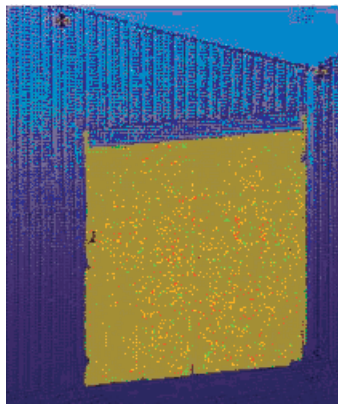
Rys. 6. Model 3D uzyskany metodą uproszczoną



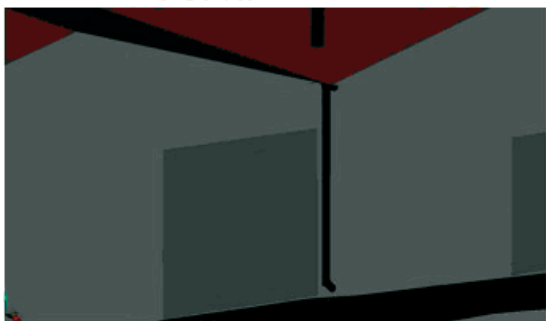
Rys. 7. Próba automatycznego tworzenia modelu 3D, aplikacja Catch 3D



a



b



c

Rys. 8. Próba automatycznego wyznaczenia płaszczyzny i krawędzi bramy: a – zdjęcie, b – wynik działania automatu, c – brama zwektoryzowana manualnie