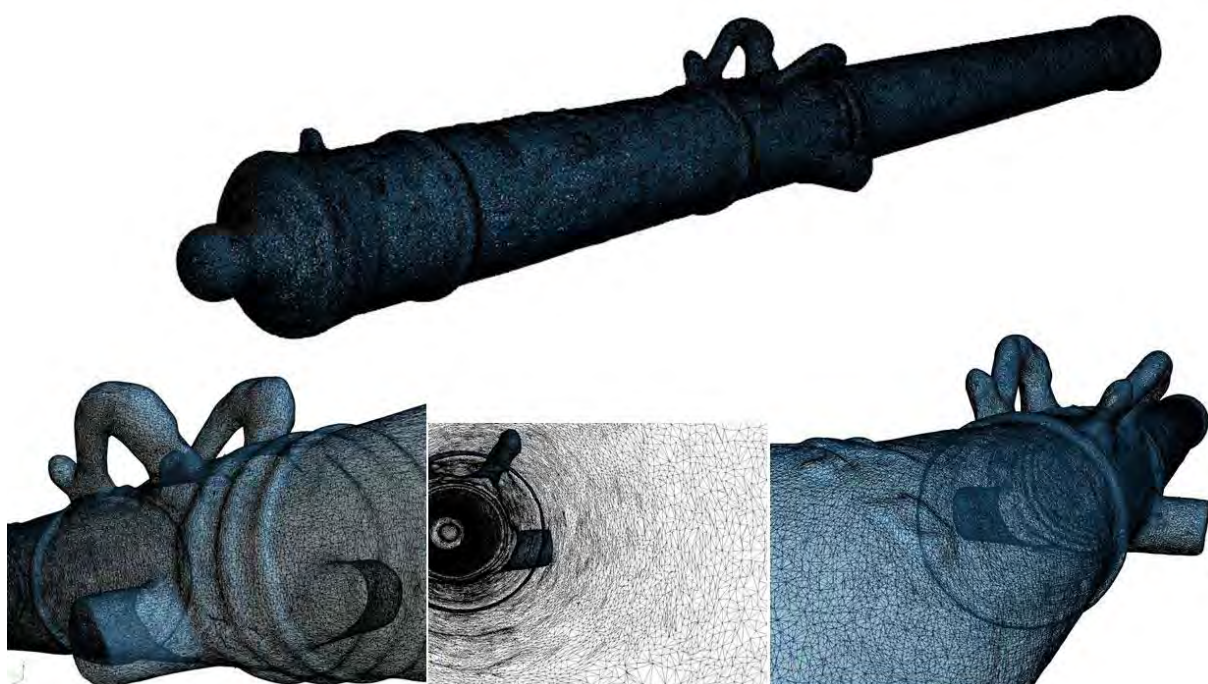


Cezary Źrodowski

Marcin Kłos

METODYKA PRACY RAMIENIEM 3D



Centralne Muzeum Morskie w Gdańsku

Gdańsk 2012

Współpraca:
Waldemar Ossowski – nadzór merytoryczny
Mateusz Citak – wykonanie pomiarów



Koło Naukowe CAD/CAE „Piksel” Politechniki Gdańskiej



Międzymuzealna Grupa ds. Digitalizacji

Fotografie: Wojciech Józwiak, Cezary Źródowski, Marcin Kłos
Redakcja: Anna Ciemińska
Projekt i redakcja techniczna: Paweł Makowski
Projekt strony tytułowej: Marcin Kłos

ISBN 978-83-932986-6-2

Publikacja powstała w ramach partnerstwa Centralnego Muzeum Morskiego w Gdańsku i Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej, finansowanego ze środków Wieloletniego Programu Rządowego Kultura+, priorytet Digitalizacja, jako element zadania „Centralne Muzeum Morskie – Cyfrowe Muzeum Morskie” realizowanego w latach 2011–2012.

Dofinansowano ze środków Programu Wieloletniego Kultura+

Publikacja dostępna w zasobach Pomorskiej Biblioteki Cyfrowej na stronie <http://pbc.gda.pl>

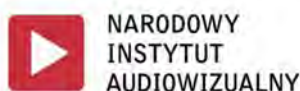
Utwór udostępniany na licencji Creative Commons 3.0 Polska w wersji:



CC BY-NC-ND 3.0

① Uznanie autorstwa – utwór należy oznaczyć w sposób określony przez Twórcę lub Licencjodawcę, Ⓞ Użycie niekomercyjne – nie wolno używać tego utworu do celów komercyjnych, Ⓜ Bez utworów zależnych – nie wolno zmieniać, przekształcać ani tworzyć nowych dzieł na podstawie tego utworu

Treść licencji: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/pl/legalcode>



CENTRALNE
MUZEUM
MORSKIE
W GDAŃSKU

Spis treści

1. Wprowadzenie.....	5
2. Zakres i metodyka badań.....	6
2.1. Analiza stanu wiedzy i techniki	7
2.2. Program badań	10
2.2.1. Materiały (etap I)	10
2.2.1.1. Parametry pomiarów definiowane przez urządzenie	11
2.2.1.2. Parametry pomiarów definiowane przez użytkownika	12
2.2.2. Wielkość obiektów (etap II).....	12
2.2.3. Pomiary terenowe	13
2.3. Ograniczenia dostępnego sprzętu i oprogramowania.	14
2.4. Porównanie metody kontaktowej i optycznej	14
3. Wyniki	15
3.1. Ustalenie wymagań.....	16
3.2. Dane referencyjne.....	18
3.3. Efekty różnych prędkości prowadzenia sondy	19
3.4. Wpływ kąta prowadzenia sondy względem skanowanej powierzchni	22
3.5. Efekt kierunku prowadzenia sondy w stosunku do faktury powierzchni.....	23
3.6. Określenie wpływu warunków ekspozycji	25
3.7. Określenie wpływu parametrów skanowania na pracochłonność	33
3.8. Skanowanie elementów wraku	35
3.9. Wielkość plików zawierających dane	38
3.10. Przetwarzanie danych	41
4. Wnioski.....	46
4.1. Optymalizacja wykorzystania zasobów pomiarowych.....	47
4.2. Propozycje usprawnień procesu pomiarowego.....	48
4.3. Porównanie metody kontaktowej i optycznej	50
5. Indeks pojęć i definicje.....	51
6. Bibliografia	52



1. Wprowadzenie

Opracowanie metodyki digitalizacji zbiorów Centralnego Muzeum Morskiego w Gdańsku, ze względu na szeroki zakres gromadzonych zbiorów dotyczących dziedzictwa nautologicznego, wymaga indywidualnego rozpatrzenia zasadności i metod digitalizacji dla poszczególnych ich rodzajów. W Muzeum gromadzone są zbiory z różnych dziedzin, obejmujących: archeologię, historię, technikę, marynistykę, sztukę, etnologię, a także naturalia, archiwalia, fotografię. Ze względu na zakres projektu opracowanie będzie w głównej mierze dotyczyło zabytków archeologicznych, traktując inne dziedziny marginalnie, często ograniczając się do określenia, czy dostępna infrastruktura i prezentowane metody znajdują zastosowanie w odniesieniu do nich.

W przypadku zabytków archeologicznych pochodzących z eksploracji polskich rzek i Morza Bałtyckiego, możemy wyróżnić kilka rodzajów pozyskiwanych zbiorów związanych z wrakami jednostek pływających, np.: elementy wyposażenia, uzbrojenie, ładunek, rzeczy osobiste załogi i elementy konstrukcyjne kadłuba wraz z takielunkiem, a także związane z obiektami hydrotechnicznymi, jak choćby elementy historycznych portów. Stosując podział według kryterium wymiarów, najmniejsze obiekty mają wielkość kilku do kilkunastu milimetrów, a największe kilku do kilkunastu metrów. Ponadto wykonane są w różnych epokach, różnymi technikami i z różnych materiałów, o odmiennych właściwościach fizycznych, powodujących zmiany wymiarów fizycznych po wydobyciu z wody. Wspomniane odkształcenia są szczególnie widoczne w przypadku drewnianych elementów konstrukcyjnych kadłubów, charakteryzujących się stosunkowo dużymi rozmiarami (powyżej 1 m) i nieskomplikowanym kształtem (proste i gięte klepki, różnego rodzaju krzywulce i belki, maszty itp.). Omawiane zabytki nie stanowią (z wyjątkami) pojedynczych dzieł o wysokiej wartości komercyjnej, podlegających fałszerstwom, w związku z tym przeznaczenie ich cyfrowych modeli jest odmienne niż zostało to przyjęte w innych muzeach – nie mają one na celu zachowania „elektronicznego odcisku palca” pozwalającego na identyfikację eksponatu i wykrycie kopii/fałszerstwa. Metodyka digitalizacji 3D dla tego typu obiektów nie wymaga śledzenia zmian mikropełnięć powierzchniowych materiału w funkcji czasu i związanego z tym bardzo dokładnego odwzorowania kształtu rzędu tysięcy punktów na milimetr kwadratowy, dlatego powinna być w mniejszym stopniu pochodną technik konserwatorskich opracowywanych dla zabytków sztuki, a w większym metod inżynierii odwrotnej stosowanych we współczesnym przemyśle.

Również biorąc pod uwagę skalę zadania stojącego przed muzealnikami, obejmującego dziesiątki tysięcy eksponatów, musimy zacząć postrzegać digitalizację zbiorów w kategoriach zadania produkcyjnego. W rzeczy samej pracownie digitalizacyjne stają się „fabrykami” modeli cyfrowych, gdzie typowe dla produkcji zagadnienia jakości, wydajności i kosztów nabierają pierwszorzędного znaczenia. Ze względu na liczbę eksponatów nie możemy zastosować wprost metod inżynierii odwrotnej. Digitalizacja obiektów na taką skalę w przemyśle obejmuje wyłącznie zadania związane z kontrolą jakości – mamy tam jednak do czynienia z ograniczonym zakresem digitalizacji (zwykle kontrola obejmuje wybrane, kluczowe ze względów funkcjonalnych punkty) oraz łatwą automatyzacją procesu, wynikającą z powtarzalności kształtu kontrolowanych elementów. Innym istotnym aspektem jest sposób dalszego przetwarzania danych – w muzealnictwie najważniejsze jest wierne odwzorowanie obiektu, natomiast w przemyśle dostarczenie danych do dalszego przetwarzania, umożliwiającego ocenę dokładności wykonania, przeprowadzenie symulacji, ominięcie zastrzeżeń patentowych itp. Podejścia te są więc diametralnie różne.

Należy zwrócić również uwagę na specyficzny profil badań prowadzonych w CMM, skoncentrowanych na rekonstrukcji wraków. To właśnie digitalizacja tego typu eksponatów jest podstawowym celem opracowywanej metodyki i to ich charakterystyka stoi za wyborem takiego a nie innego urządzenia pomiarowego. Zakupiony przez CMM sprzęt pomiarowy ma za zadanie przede wszystkim umożliwić efektywną digitalizację eksponatów wielkogabarytowych z uwzględnieniem tworzenia rzutów i przekrojów obiektów na potrzeby archeologicznej dokumentacji ewidencyjnej. Z takim właśnie założeniem, w znacznej mierze na bazie doświadczeń innych zespołów badawczych, wybrane zostało ramię pomiarowe Faro ScanArm USB.

Podsumowując, należy wyraźnie zaznaczyć, że charakter, liczba obiektów i przeznaczenie ich cyfrowych modeli decydują o unikatowości zadania stojącego przed pracownikami CMM oraz o konieczności wypracowania własnej metodyki cyfrowej archiwizacji zbiorów, odmiennej niż w przypadku typowych zadań – czy to muzealnych, czy też przemysłowych.

2. Zakres i metodyka badań

Celem projektu jest opracowanie optymalnej pod względem dokładności, szybkości i kosztów skanowania metodyki digitalizacji zbiorów CMM w postaci modeli trójwymiarowych, za pomocą wybranych narzędzi sprzętowych i programowych. Bardzo istotnym aspektem projektu jest ograniczony zakres badań, wynikający z przyjętych rozwiązań sprzętowych i programowych. Przeprowadzona w CMM szczegółowa analiza dostępnych i stosowanych rozwiązań doprowadziła do wyboru i zakupu urządzenia pomiarowego (Faro ScanArm USB) wraz z oprogramowaniem służącym do akwizycji i przetwarzania danych (Geomagic Studio, Geomagic Qualify). Dlatego alternatywne metody pomiarowe i przetwarzania danych zostały uwzględnione jedynie marginalnie, w zakresie pozwalającym na znaczące uzupełnienie lub weryfikację metodyki realizowanej za pomocą posiadanego przez CMM zestawu, przy minimalnych kosztach związanych z zakupem, dostosowaniem i szkoleniami. Trzy problemy jawią się jako kluczowe dla zdefiniowania zakresu prac:

- a) Analiza potrzeb CMM – należy jasno zdefiniować cel archiwizacji, i to zarówno bezpośredni, wynikający z programu „Centralne Muzeum Morskie – Cyfrowe Muzeum Morskie”, jak i potencjalne przyszłe potrzeby, które mogą wymagać wykorzystania cyfrowej dokumentacji. Bardzo istotne jest możliwe szerokie dopasowanie proponowanych rozwiązań do już istniejących procedur, jak również wskazanie tych elementów procesu archiwizacji, które wymagają dostosowania do nowych możliwości i ograniczeń, jakie pociągają za sobą technologie cyfrowe.
- b) Analiza ograniczeń rozwiązań. Czy przy pomocy posiadanego sprzętu i oprogramowania jesteśmy w stanie osiągnąć wszystkie cele stawiane przez muzealników? Dotyczy to zarówno parametrów technicznych (np. dostępne parametry dokładności, rozdzielczości, gęstości siatki punktów skanowanych), jak i przebiegu procesu akwizycji i przetwarzania danych. Należy pamiętać, że ograniczenia wybranego sprzętu w znacznym zakresie decydują również o możliwości realizacji potrzeb zdefiniowanych w punkcie a.
- c) Ocena przydatności typowych procedur przemysłowych i muzealnych w przypadku digitalizacji zabytków techniki. Szczególną rolę spełniają tutaj procedury pozyskiwania, przechowywania i przetwarzania danych. W połączeniu z analizą wymagań i ograniczeń, ocena powinna skutkować propozycją możliwie efektywnej procedury archiwizacji zbiorów CMM.

Dodatkowe ograniczenia narzucone zostały przez dostępne środki i ramy czasowe realizacji projektu, a także mnogość wariantów ustawień technicznych parametrów sprzętu. Powodują one, że przetestowanie wszystkich możliwych opcji jest niewykonalne w ramach projektu. Zadania zostały podzielone na dwa etapy, które obejmowały: znalezienie optymalnych parametrów skanowania dla wybranych materiałów (etap I) oraz procedury skanowania dla wybranych rozmiarów obiektów (etap II). Pomimo że to etap II obejmuje najważniejszą część badań, wykonujemy je jednak w drugiej kolejności, ze względu na dwa czynniki:

- a) z powodów organizacyjnych – dostęp do wielkogabarytowych eksponatów i odpowiednie warunki pomiarów zapewnia powstający budynek Ośrodka Kultury Morskiej (OKM), dlatego te badania mogą być wykonane dopiero po oddaniu do eksploatacji budynku OKM i znajdujących się w nim pracowni dokumentacji zabytków archeologicznych;
- b) z powodów metodycznych – celem projektu jest opracowanie optymalnej metodyki digitalizacji, porównywane więc będą różne podejścia do problemu. Dla zachowania jakości procedury należy je porównywać w możliwie zbliżonych warunkach, obejmujących również poziom umiejętności operatora urządzenia i oprogramowania. Porównanie dotyczy bowiem różnych procedur, a nie umiejętności operatora. Temu właśnie również celowi, czyli nabyciu biegłości w posługiwaniu się sprzętem i oprogramowaniem, służy etap I.

Dla zachowania spójnej metodyki, badanie wykonano w oparciu o wyniki uzyskiwane przez studentów odbywających praktykę w CMM. Studenci przed przystąpieniem do oceny metody zostali przeszkoleni w zakresie użytkowania ramienia oraz oprogramowania (czynnie brali udział w realizacji I etapu), a przed rozpoczęciem właściwych pomiarów wykonali digitalizację ok. 30 eksponatów pochodzących głównie z wraka Miedziowca. Digitalizacja była wykonywana kilkoma metodami, obejmowała procedurę opartą o pomiary kształtu sondą mechaniczną oraz zaproponowaną przez C. Żrodowskiego procedurę opartą na zastosowaniu sondy laserowej. Testowano również podejście mieszane, łączące obie procedury. Właściwe pomiary wykonano dopiero po osiągnięciu poziomu umiejętności zapewniających efektywność pracy na stałym, „nasyconym” poziomie.

Uzyskane wyniki porównano również z wynikami pracy ekspertów z Norwegian Maritime Museum, wykonujących digitalizację tego samego eksponatu metodą kontaktową, uznawaną za standard, opisaną w literaturze [9, 10] i szeroko stosowaną w muzeach w całej Europie. Przy porównaniu należy uwzględnić również ogromne różnice, zarówno w praktycznych umiejętnościach posługiwania się ramieniem pomiarowym, jak i wiedzy merytorycznej, które w przypadku muzealników z Norwegii pozwalają na szybkie i pewne podejmowanie decyzji i z pewnością podnoszą efektywność ich pracy.

Najważniejsze założenia, jakie przyjęto przed rozpoczęciem prac:

1. Analiza potrzeb CMM – przyjęto, że dla celów archiwizacji danych, zgodnie z zaleceniami Karty Londyńskiej [1] i Sewilskiej [2] oraz NIMOZ [3], należy umożliwić zapis geometrii modelu w formacie nieprzetworzonym (zapis punktów) z maksymalną dostępną dokładnością i rozdzielczością zapewniającą możliwość odtworzenia szczegółów bez konieczności powtórnej digitalizacji eksponatu. Dokładność pomiarów wykonywanych ramieniem Faro ScanArm wynosi ok. 0,16 mm. Należy zaznaczyć, że eksperci z Norwegian Maritime Museum wymagają od swojej dokumentacji dokładności na poziomie 0,4 mm w punktach pomiarowych, co przy uproszczonej geometrii pomiędzy punktami skutkuje błędem znacznie większym – szczegółowa analiza na przykładzie eksponatu nr CMM-BO-NW-484-9. Jednocześnie należy umożliwić wykorzystanie tak pozyskanych danych w tradycyjnej dokumentacji zabytków (rysunki zawierające widoki i przekroje eksponatów).
2. Ograniczenie rozwiązań. Digitalizacji dokonano wyłącznie za pomocą ramienia pomiarowego Faro ScanArm. Dla celów referencyjnych można przeprowadzić porównanie jej wyników z innymi metodami, jednak zasadniczym obszarem zainteresowania pozostanie wspomniane ramię 3D. Modele wykonane innymi technikami zostaną potraktowane jako dane referencyjne, pozwalające na ocenę dokładności uzyskiwanych wyników. Ze względu na ograniczenia czasowe i budżetowe nie zostanie przeprowadzone porównanie efektywności różnych technik archiwizacji.
3. Punktem odniesienia jest stosowana w muzealnictwie procedura digitalizacji mechanicznej [9, 10]. Projekt ma na celu m.in. zbadanie możliwości jej udoskonalenia. Interesującymi zagadnieniami w tym kontekście są:
 - a. czasochłonność i dokładność digitalizacji
 - b. wielkość pliku z danymi surowymi
 - c. możliwość dalszego przetwarzania danych (wpływ stopnia uproszczenia modelu na dokładności i wielkość danych)
 - d. czasochłonność i dokładność konwersji surowych danych pomiarowych do postaci bryłowej lub powierzchniowej, przydatnej w analizach związanych z rekonstrukcją.

W ramach projektu czasochłonność jest oceniana na podstawie czasu wykonywania poszczególnych operacji i jest określana osobno dla operatora i oprogramowania. Dokładność digitalizacji definiuje dokładność nominalna urządzenia pomiarowego. Dokładność konwersji danych określa dewiacja badanej powierzchni w stosunku do obiektu referencyjnego. Obiektem referencyjnym zwykle jest „surowa” chmura punktów w najwyższej rozdzielczości, przed dokonaniem jakiegokolwiek obróbki.

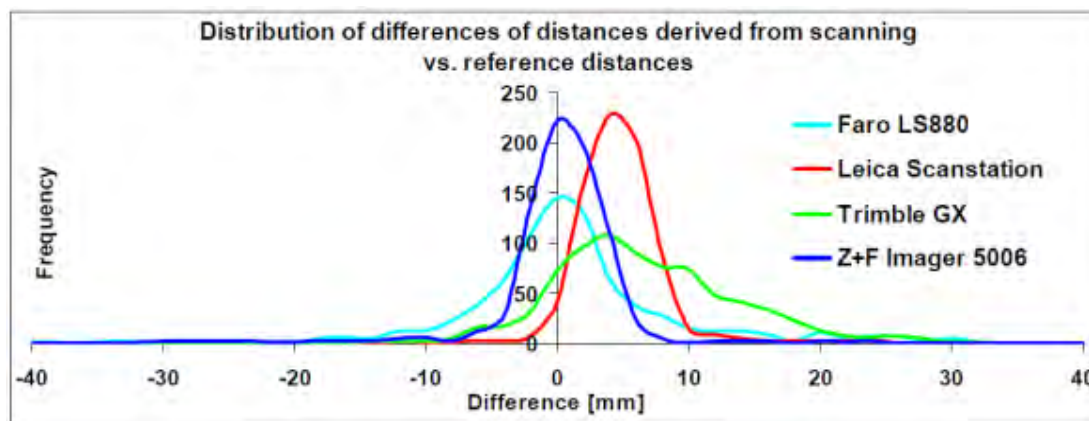
2.1. Analiza stanu wiedzy i techniki

W muzealnictwie stosuje się praktycznie wszystkie techniki digitalizacji zbiorów, obejmujące: fotogrametrię, skanowanie za pomocą lasera i światła strukturalnego oraz pomiary mechaniczne. Specyficzne zadanie, jakim jest skanowanie obiektów wielkogabarytowych, wymaga doboru odpowiedniej metody i sprzętu, porównania dokładności i szybkości różnych rozwiązań oraz ich zalet i wad. W przypadku dokumentacji obiektów takich jak wraki wypracowana została metoda wykorzystująca ramię pomiarowe. Metoda ta historycznie znajduje uzasadnienie – doskonały stosunek dokładności do wielkości obiektu, sprawdzona, stosowana od dziesięcioleci technologia, stosunkowo niskie koszty oraz dobrze funkcjonująca metodyka pomiarowa spowodowały, że takie podejście jest cały czas bardzo popularne w przypadku dokumentacji elementów drewnianych wraków (ten typ obiektów jest najbardziej charakterystyczny i interesujący z punktu widzenia przyszłych prac wykorzystujących ramię pomiarowe). Metodyka opracowana na przełomie XX i XXI w. jest po części wypadkową dostępnych w owym czasie technologii, popularności różnych programów oraz umiejętności w tym zakresie autorów pierwszych rozwiązań. Jednym z wzorców w tym zakresie jest projekt Newport Medieval Ship, realizowany przez Toby’ego Jonesa, który doprowadził do opracowania procedury pomiarów wykonywanych ramieniem produkcji firmy Faro, przetwarzanych za pomocą programu graficznego Rhino 3D. Zaowocowało to utworzeniem międzynarodowej grupy użytkowników FRAUG (Faro and Rhino Archeological User Group), skupiającej muzealników z wielu krajów i rozwijającej opracowaną metodykę – szczególnie intensywnie w zakresie standaryzacji sposobu opisu danych cyfrowych. Osiągnięcia tej grupy są punktem wyjścia dla prac w ramach bieżącego projektu, jednak z uwzględnieniem znacznego postępu technologicznego, jaki dokonał się w międzyczasie, szczególnie w zakresie metod optycznych i ich wykorzystania łącznie z ramieniem pomiarowym. Dlatego prace koncentrowały się na opracowaniu metody efektywnego wykorzystania sondy laserowej, instalowanej obok sondy mechanicznej na ramieniu pomiarowym.

Wytyczne dotyczące skanowania dla celów muzealnych zostały zebrane w szeregu opracowań, zarówno na poziomie organizacji międzynarodowych, jak i krajowych ośrodków koordynujących działania w tym zakresie. Do najważniejszych dokumentów należą: Karta Londyńska [1] i Karta Sewilska [2], a z opracowań krajowych zbior zale-

ceń Narodowego Instytutu Muzealnictwa i Ochrony Zbiorów (NIMOZ) [3]. Opracowania te zostały wykorzystane w sposób krytyczny w celu oceny, które z zaleceń można zastosować wprost w przypadku projektu, które należy zmodyfikować, które natomiast należy wykluczyć ze względu na ich niedopasowanie do potrzeb archiwizacji zabytków techniki i dostępnego sprzętu. Najważniejsze założenia dotyczące opracowań muzealnych obejmują:

- a) Zdefiniowanie przeznaczenia modeli cyfrowych, które można zakwalifikować do jednej z trzech zasadniczych grup:
 - dokumentacja ewidencyjna (cyfrowa ewidencja i zarządzanie zbiorami)
 - dokumentacja konserwatorska (dokumentacja cyfrowa przed i po zakończeniu konserwacji, opracowywanie różnorodnych wariantów konserwacji, cyfrowa rekonstrukcja uszkodzonych lub niekompletnych zabytków, badania zabytków)
 - wizualizacja (udostępnianie za pomocą Internetu w celach edukacyjnych, marketingowych, wystawienniczych – możliwość udostępnienia wizerunków zbiorów, dla których brakuje powierzchni wystawienniczych).Jednocześnie przyjmuje się, że dla instytucji muzealnych punktem wyjścia digitalizacji własnych kolekcji powinno być spełnienie wymogów dokumentacyjnych. Dopiero konsekwencją działań dokumentacyjnych jest realizacja celów prezentacyjnych i edukacyjnych.
- b) Zdefiniowanie standardów zapisu danych, opisu (metadane) i procedur ich weryfikacji. Ustalenie zakresu metadanych oraz procedur kontroli ich kompletności i jakości nie jest bezpośrednio związane z techniczną stroną skanowania i nie będzie bliżej rozpatrywane w ramach projektu. Istotne jest, aby kontroli jakości danych nie dokonywała osoba wykonująca digitalizację obiektu oraz aby zachować spójność opisu danych z innymi technikami archiwizacji, a przez to zapewnić spójność metodologiczną w zakresie przyszłych badań cyfrowych zabytków. Z punktu widzenia opracowywanej metodyki istotne jest wymaganie bardzo restrykcyjnego podejścia do przetwarzania danych pomiarowych. Współczesne techniki cyfrowe pozwalają na filtrowanie szumu, programowe podnoszenie rozdzielczości powyżej fizycznych parametrów sprzętu pomiarowego, wygładzanie i podobne operacje wykonywane w trakcie pomiarów oraz po ich zakończeniu. **Rzetelność badawcza wymaga, aby zawsze rejestrować surowe dane.** Mogą one zostać poddane przetwarzaniu na kolejnych etapach (np. w celu uzyskania lepszego efektu wizualnego lub kompresji danych), jednak zawsze należy wyraźnie odróżnić dane pomiarowe od przetwarzanych i zapewnić dostęp do danych pomiarowych, traktowanych jako źródłowe. Integralnym elementem zapewnienia dostępu do danych źródłowych jest wybór formatu zapisu danych, który powinien być ogólnie dostępny (najlepiej opublikowany) oraz bezstratny.
- c) Zdefiniowanie standardów jakości danych w rozumieniu zgodności obrazu cyfrowego z oryginałem. W przypadku archiwizacji trójwymiarowej powinno ono obejmować:
 - Weryfikację uzyskanej rozdzielczości przestrzennej (w praktyce w wybranych miejscach obiektu należy przeprowadzić pomiary gęstości punktów pomiarowych, wyrażonej w liczbie punktów na centymetr kwadratowy). Staje się to szczególnie istotne w przypadku powierzchni niejednorodnych oraz warunków powodujących znaczne zaszumienie pomiaru, a przez to utratę znacznej liczby punktów pomiarowych.
 - Weryfikację uzyskanej niepewności pomiaru (w praktyce w wybranych miejscach obiektu należy wykonać pomiary referencyjną metodą i porównać z pomiarami wykonanymi na obiekcie cyfrowym). Niezwykle istotna jest odpowiednia interpretacja pojęcia „niepewność pomiaru”, którą należy rozpatrywać na dwóch płaszczyznach: definicji dokładności użytej przez producenta i jej znaczenia dla oceny jakości pomiaru. W przypadku ramienia Faro ScanArm niepewność pomiaru jest definiowana jako połowa różnicy pomiędzy maksymalną a minimalną wartością błędu uzyskaną na podstawie analizy 100% punktów pomiarowych, obejmujących pomiar znanego wzorca w trakcie procedury certyfikacyjnej. Taka definicja obejmuje jedynie błąd przypadkowy, eliminując błąd systematyczny (w przypadku jednakowej wartości błędu maksymalnego i minimalnego, nawet dla stosunkowo wysokiej ich wartości, zdefiniowana w ten sposób niepewność pomiaru przyjmuje wartość 0). Doskonale ilustruje to Rys. 2.2.1, pokazujący przykładowy rozkład błędów dla różnych skanerów. W tym przypadku niepewność pomiaru dla modeli Leica Scanstation i Z+F Imager 5006 osiąga zbliżoną wartość, znacznie niższą niż dla modeli Faro LS880, pomimo że dla modelu Scanstation wartość średnia błędów jest zdecydowanie wyższa niż dla dwóch pozostałych.



Rys. 2.2.1. Przykładowe charakterystyki błędu pomiarowego różnych typów skanerów [7]

Takie podejście jest słuszne pod warunkiem znajomości błędu systematycznego (o który można skorygować wszystkie wartości pomierzone) albo wykonywania pomiarów w ograniczonym zakresie przestrzeni pomiarowej skanera. I tutaj dotykamy drugiego aspektu problemu – jak interpretować wartość niepewności pomiarowej? Należy być świadomym, że wartość niepewności pomiarowej dotyczy wartości pomiaru, a więc odległości od bazowego układu współrzędnych urządzenia do punktu pomiarowego. W przypadku pomiaru kształtu wielkością mierzoną jest odległość pomiędzy punktami pomiarowymi, a nie odległość od bazy skanera. Dla stosunkowo niewielkich obiektów można przyjąć, że błąd systematyczny pomiaru nie skutkuje błędem w pomiarze samego obiektu, a jedynie błędem jego pozycji w przestrzeni pomiarowej. W takim przypadku, do poprawnego wyznaczenia parametrów kształtu nie jest nawet potrzebna znajomość wielkości błędu systematycznego. Sytuacja komplikuje się w przypadku pomiarów obiektów stosunkowo dużych, gdzie bez znajomości omawianego błędu może zaistnieć sytuacja, w której wartość niepewności pomiaru może przekraczać wartość podawaną przez producenta. Istotnym elementem zapewnienia jakości danych jest monitorowanie warunków pracy urządzenia skanującego oraz przestrzeganie procedur kalibracji, certyfikacji i okresowej kontroli. To zagadnienie jest zwykle doskonale opisane w instrukcji obsługi sprzętu i nie będzie tutaj szerzej omawiane.

- Weryfikację kompletności pozyskanych danych – w przypadku metod optycznych stosowanych w digitalizacji 3D bardzo łatwo o pominięcie obszarów przesłanianych przez fragmenty skanowanego obiektu lub aparatury pomiarowej, jak również powierzchni wewnętrznych (np. wewnątrz lufy działa). W takich przypadkach zwykle wymagana jest większa liczba pomiarów w różnych pozycjach eksponatu, a metody optyczne często wymagają uzupełnienia innymi technikami pomiarowymi.

W przypadku skanowania przemysłowego liczba dostępnych opracowań opisujących metodykę pomiarową jest znacznie większa, obejmuje dwa główne nurty – metrologię przemysłową oraz grafikę komputerową, które wspólnie kształtują współczesną inżynierię odwrotną. W przypadku zastosowań przemysłowych dominuje podejście charakterystyczne dla kontroli jakości, polegające na porównaniu wyników pomiarów z teoretycznym modelem obiektu pochodzącym z aplikacji CAD (*Computer Aided Design*) oraz wykorzystaniu zaawansowanych algorytmów realizujących analizę przestrzenną błędu. Zwykle pomiary takie są wysoce zautomatyzowane, a podlegające pomiarowi obiekty charakteryzują się bardzo wysoką powtarzalnością kształtu i wymiarów – co jest w zasadzie podstawą do automatyzacji procesu pomiarowego. Drugie dominujące podejście do problemu reprezentuje klasyczna inżynieria odwrotna, polegająca na odtworzeniu kształtu (i innych cech fizycznych obiektu) „z natury”, na podstawie pomiarów, bez teoretycznego modelu referencyjnego. I to właśnie podejście jest najbliższe archiwizacji zabytków. W obu przypadkach mamy do czynienia z ogromną różnorodnością wielkości, kształtu, materiałów oraz z procesem wykonywanym w znacznej mierze manualnie. Jednakże należy zwrócić uwagę na fakt, że inżynieria odwrotna w praktyce przemysłowej jest elementem procesu badawczego (czasami wręcz szpiegostwa przemysłowego). Istnieją wprawdzie firmy wyspecjalizowane w tym zakresie, ale w dalszym ciągu zajmują się one pojedynczymi projektami i nigdy nie obejmują swym zasięgiem tak szerokiego zakresu prac, jaki stoi przed muzealnikami. Główną różnicę między archiwizacją zabytków a praktyką przemysłową stanowi skala zadania wyrażona w ogromnej liczbie niepowtarzalnych obiektów, jakie należy poddać digitalizacji. Ten aspekt projektu sprawia, że trudno zastosować wprost metody inżynierii odwrotnej. Praktyki opracowane dla pojedynczych zadań nie przystają do wymagań masowej produkcji modeli cyfrowych. Właśnie w kategorii produkcji powinniśmy widzieć zadanie archiwizacji dziesiątków tysięcy do milionów zabytkowych obiektów znajdujących się w kolekcjach muzeów. Inną istotną różnicę pomiędzy podejściem przemysłowym a archiwizacyjnym jest zakres

przeprowadzanych pomiarów. Dla inżynierów zwykle istotne są wybrane cechy, decydujące o funkcji lub poprawnym działaniu elementu skanowanego, które mogą zostać określone za pomocą pomiarów w wybranych punktach. Dla celów archiwizacyjnych wymaga się zwykle kompletnego opisu całej powierzchni/objętości obiektu, co przekłada się wprost na pracochłonność, wielkość danych i koszty.

Specyficzny problem stanowią ograniczenia zewnętrzne w postaci narzuconych standardów w zakresie formatów zapisu danych. Dane są kluczowym elementem i sposób ich pozyskania, przechowywania oraz dalszego przetwarzania decyduje o kosztach całego projektu oraz o użyteczności pozyskanych modeli. W przypadku archiwizacji zbiorów muzealnych nie istnieje jednoznacznie zdefiniowany standard, przydatny dla wszystkich typów digitalizacji. Z jednej strony jego brak jest przeszkodą na drodze do efektywnego wykorzystania pozyskanych danych, z drugiej jednak strony pozwala na bardziej elastyczne podejście do planowania całego procesu digitalizacji. Ocena tego faktu zależy od typu projektu – w przypadku prac nastawionych na „produkcję danych” należy bezwzględnie utrzymywać dane w standardzie zbliżonym do najbardziej rozpowszechnionych (standard przemysłowy, międzynarodowy, nieoficjalny – „de facto” standard). W przypadku projektów o charakterze badawczym brak standardu może stać się zaletą, otwierając nowe możliwości.

Odrębny problem stanowią techniki pozyskiwania danych. Należy również zauważyć, że opracowania dotyczące archiwizacji zbiorów muzealnych ograniczają się do technik optycznego skanowania 3D. W zasadzie pomijają inne techniki pozyskiwania modeli trójwymiarowych, takie jak: rezonans magnetyczny, tomografia komputerowa czy manualne odtwarzanie za pomocą aplikacji CAD (*Computer Aided Design*) lub DCC (*Digital Content Creation*), mogące stanowić doskonałe źródło danych referencyjnych (o wyższej dokładności) dla celów kalibracji i kontroli jakości w trakcie trwania procesu archiwizacji. Ze względu na wcześniej dokonany wybór sprzętu pomiarowego ten problem nie będzie tutaj analizowany.

Podsumowując, możemy uznać, że podstawą metodyki digitalizacji zbiorów w CMM jest klasyczna inżynieria odwrotna, dodatkowo uwzględniająca:

- a) wymagania dotyczące wysokiej efektywności procesu archiwizacji wynikającej z bardzo dużej liczby obiektów muzealnych,
- b) specyficzne wymagania odnośnie zawartości i jakości modeli muzealnych,
- c) ograniczenia w zakresie stosowanego sprzętu i oprogramowania.

2.2. Program badań

Kompletny program badań objął szereg szczegółowych problemów, podzielonych na dwie główne grupy, dla których prace badawcze wykonywano w dwóch etapach. Najpierw skoncentrowano się na dopasowaniu procedury pomiarowej do własności optycznych eksponatu (etap I), następnie do jego wielkości (etap II). Część z badanych zagadnień została opisana w instrukcji użytkownika, jednak wymaga weryfikacji ze względu na nietypowy charakter badanych eksponatów oraz warunki pracy urządzenia pomiarowego.

2.2.1. Materiały (etap I)

Pierwszy etap projektu obejmuje opracowanie metodyki doboru nastaw urządzenia Faro ScanArm do różnych typów materiałów. Ze względu na mnogość materiałów, z jakich wykonane zostały eksponaty muzealne, należy zdefiniować ich podstawowe cechy, pozwalające na podział na główne grupy, o zbliżonych własnościach w sensie techniki pomiarowej. Ponieważ do dyspozycji mamy dwie techniki: mechaniczną i optyczną, skupimy się na cechach materiałów istotnych z punktu widzenia tych metod. Dla pomiarów mechanicznych istotne są przede wszystkim twardość i chropowatość (łącznie z własnościami kierunkowymi) materiału, odporność na uszkodzenie wywołane kontaktem z sondą mechaniczną oraz sztywność eksponatu (która zależy zarówno od materiału, jak i kształtu). W przypadku metody optycznej najważniejsze parametry to: kolor i połysk oraz, podobnie jak dla metody mechanicznej, chropowatość i jej kierunkowość.

Dodatkowo można rozpatrywać światłoczułość (szczególnie w zakresie długości wiązki laserowej) oraz przezroczystość jako element utrudniający lub wręcz uniemożliwiający wykonanie pomiarów tą techniką. Należy także uwzględnić niepożądane własności materiału jako potencjalnie użyteczne w zakresie projektowania i budowy stanowiska pomiarowego. Wykonanie stołu pomiarowego, uchwytów i podpórki dla eksponatów z materiałów trudno skanowalnych może w znaczący sposób podnieść efektywność procesu, dzięki minimalizacji niepożądanych pomiarów (szumów) i likwidacji konieczności usuwania ich na etapie późniejszego przetwarzania danych.

Pierwszy etap projektu obejmuje opracowanie metodyki doboru parametrów skanowania dla trzech wybranych materiałów, reprezentatywnych dla większości eksponatów:

- a) drewno – powierzchnia ciemna i chropowata (blok drewniany)

b) ceramika – powierzchnia jasna, matowa (naczynie ceramiczne)

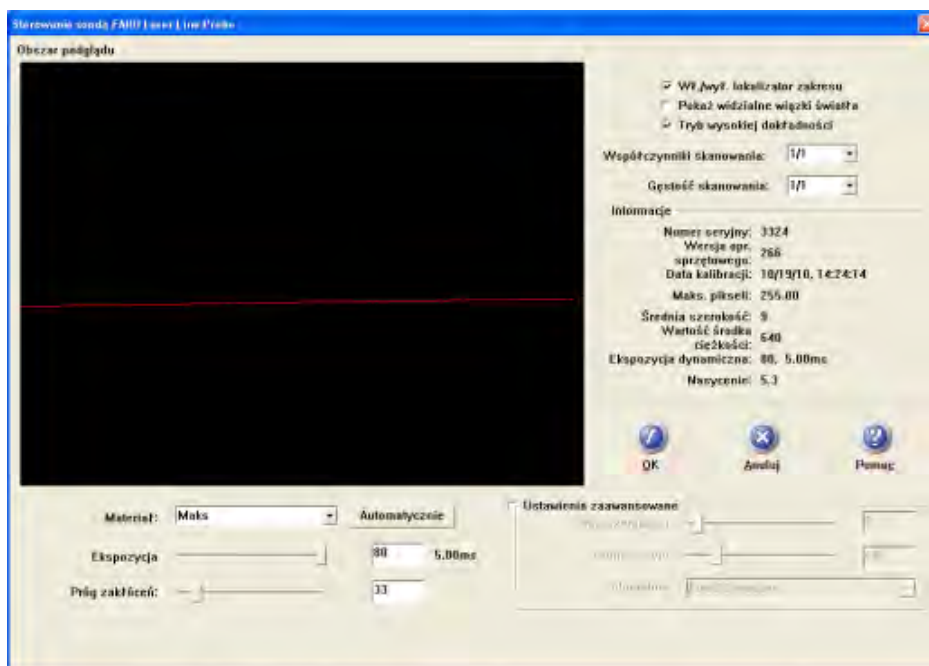
c) metal (mosiądz) – powierzchnia jasna, częściowo gładka, częściowo chropowata, błyszcząca (miska mosiężna).

W przypadku sondy laserowej Faro ScanArm bardzo ważny jest wpływ wilgoci. Światło w kolorze czerwonym, w jakim generowana jest wiązka lasera, jest bardzo silnie tłumione przez wodę. Dodatkowo warstewka wodna powierzchni eksponatu powoduje powstawanie odbić fałszujących wyniki pomiarów. Jeżeli na to nałoży się ciemny kolor (a taki właśnie, niemal czarny, występuje w przypadku większości elementów drewnianych), powoduje to powstanie najtrudniejszych możliwych warunków skanowania optycznego. Dlatego bezwzględnie należy wymagać odpowiedniego przygotowania eksponatu przed digitalizacją, obejmującego co najmniej osuszenie powierzchni, do stanu utraty połysku.

Należy również uwzględnić przeprowadzenie testów (w miarę możliwości) dla materiałów dodatkowych, nieujętych w programie badań. Chodzi przede wszystkim o materiały pomocnicze pozwalające na lepsze dostosowanie parametrów powierzchni eksponatów do dostępnych technik pomiarowych oraz budowę stanowiska pomiarowego, zapewniającego minimalizację liczby niepożądanych punktów pomiarowych.

2.2.1.1. Parametry pomiarów definiowane przez urządzenie

Faro ScanArm łączy w sobie dwa podejścia: pomiar za pomocą sondy mechanicznej oraz skanowanie optyczne z pomocą sondy laserowej. W przypadku pracy z sondą mechaniczną mamy do dyspozycji 2 parametry wpływające na pomiar: średnica sondy (wpływa na „wygładzenie” chropowatości powierzchni) oraz gęstość pomiarów (może być zdefiniowana interwałem czasowym lub odległością pomiędzy kolejnymi punktami pomiarowymi). Dla pomiarów bezdotykowych szereg istotnych parametrów definiowanych jest za pomocą programu konfiguracyjnego, natomiast inne możemy zaliczyć do grupy „wynikowych”, tzn. zależnych od sposobu pracy użytkownika.



Rys. 2.2.1.1.1. Okno interfejsu programu konfiguracyjnego sondy laserowej

Program konfiguracyjny (Rys. 2.2.1.1.1.) pozwala na ustawienie następujących parametrów:

- Ekspozycja – czas otwarcia migawki lasera, reguluje ilość światła lasera, a co za tym idzie, ilość światła odbitego od obiektu skanowanego. Przyjmuje wartości 1–80 (niskie dla jasnych, wysokie dla ciemnych obiektów). Jest jednym z podstawowych parametrów wpływających na jakość skanu.
- Próg zakłóceń – sonda laserowa mierzy natężenie lub moc wracającej wiązki światła laserowego dla każdego piksela linii laserowej padającej na powierzchnię, w skali od 0 do 255. Wszystkie dane, których natężenie jest mniejsze od wartości progowej, są traktowane jako niepożądany szum i odrzucane. W przypadku ciemnych kolorów lub powierzchni, które pochłaniają światło, lepiej ustawić niższą wartość.
- Materiały – zestawy parametrów ekspozycji i progu zakłóceń można zapisywać do pliku konfiguracyjnego. Ponieważ są one optymalizowane pod kątem konkretnego materiału, najwygodniejszym sposobem ich identyfikacji jest właśnie przypisanie im nazwy materiału, dla którego zostały dobrane.

- d) Próg szerokości – podobnie jak w przypadku progu zakłóceń, grupy punktów o liczności mniejszej niż zdefiniowana tym parametrem są traktowane jako szum. Dla powierzchni gładkich wartość może być wyższa, dla dużych chropowatości należy ją obniżyć.
- e) Próg szczytu – natężenie światła dla co najmniej jednego piksela w grupie o liczności zdefiniowanej przez „próg szerokości” powinno mieć wartość wyższą niż zdefiniowana tym parametrem – tylko wtedy grupa zostanie zakwalifikowana jako pomiar.
- f) Współczynnik skanowania – liczba linii skanowanych w ciągu sekundy. Wartość standardowa to 30 linii/s, program umożliwia jej obniżenie (1/2 do 1/16) w przypadku, gdy dla prostego kształtu korzystniejsze jest użycie mniejszej liczby punktów pomiarowych.
- g) Współczynnik gęstości skanowania – jw., jednak dotyczy liczby punktów w linii. Standardowa liczba to 640 pkt.
- h) Tryb wysokiej jakości (nazwa jest nieco myląca, bardziej odpowiednia byłaby „tryb wysokiej rozdzielczości”) – tryb pracy powodujący ok. 2-krotne zawężenie pola widzenia sondy, przez co zwiększa się gęstość uzyskiwanych punktów pomiarowych, kosztem szerokości skanowanego obszaru (liczba punktów pozostaje stała, tzn. 640 pkt/linię)
- i) Algorytmy – wybór algorytmów sterowania parametrami ekspozycji. Dla algorytmów automatycznych program dostosowuje ustawienia ekspozycji do chwilowych zmian parametrów światła odbitego, zależnych od własności powierzchni. Różnice pomiędzy algorytmami automatycznymi polegają na zakresie, w jakim następuje dostosowanie i wynikającym z nich spowolnieniu pracy urządzenia. Algorytm FixedExposure korzysta z ustawień zdefiniowanych przez ekspozycję i próg zakłóceń i zapewnia najszybszą pracę urządzenia (największą liczbę skanowanych punktów w jednostce czasu).

2.2.1.2. Parametry pomiarów definiowane przez użytkownika

Parametry skanowania zależne od sposobu pracy użytkownika:

- a) Szybkość prowadzenia sondy – decyduje o rozdzielczości skanu w kierunku prostopadłym do linii lasera. Przy rozdzielczości linii dochodzącej do 0,05 mm, i pełnej prędkości skanowania (30 linii/s), teoretycznie można uzyskać zbliżoną rozdzielczość w kierunku prowadzenia sondy przy prędkości na poziomie 1–1,5 mm/s. Jest to prędkość bardzo mała, w praktyce nieosiągalna przy ręcznym prowadzeniu głowicy (testy wykazały możliwość stabilnej pracy z prędkością ok. 10 mm/s), dlatego stosuje się wielokrotne skanowanie tej samej powierzchni. W praktyce, ze względu na ograniczenia rozdzielczości enkoderów kątowych w przegubach urządzenia, używa się rozdzielczości w kierunku prowadzenia sondy na poziomie 0,1 mm.
- b) Sposób prowadzenia (orientacja) sondy – instrukcja skanowania zaleca prowadzenie sondy możliwie prostopadłe do skanowanej powierzchni, jednak w wielu sytuacjach pomiarowych konieczne jest skanowanie powierzchni pod kątem. Procedura kalibracji dopuszcza odchylenia +/- 45. Jednak nie znamy wpływu tego parametru na dokładność.
- c) W przypadku skanowania materiałów o własnościach kierunkowych, należy zbadać wpływ kierunku prowadzenia wiązki w stosunku do kierunku włókien/chropowatości skanowanego materiału, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu na jakość odwzorowania powierzchni (należy wziąć pod uwagę różnice pomiędzy rozdzielczością wzdłuż wiązki i wzdłuż kierunku prowadzenia sondy).
- d) Sposób prowadzenia elementów ramienia – zgodnie z instrukcją (łokieć ramienia położony poziomo, enkodery w położeniu zbliżonym do środka zakresu pracy, unikanie blokowania stopni swobody ramienia i przeciążania przegubów).
- e) Warunki wykonywania pomiarów, obejmujące parametry oświetlenia, temperatury, wilgotności. Wprawdzie często nie zależą one od operatora urządzenia pomiarowego, jednak może on wpływać na nie, np. poprzez zmianę terminu pomiaru.

Wpływ poszczególnych parametrów zależnych od użytkownika na dokładność i szybkość pomiarów oraz uzyskaną rozdzielczość należy mierzyć w oparciu o porównanie wyników skanowania z modelem CAD płytki kalibracyjnej. Wpływ nastaw konfiguracyjnych skanera charakterystycznych dla materiału jest badany na wybranych eksponatach. W tym przypadku nie jest badana dokładność (brak modelu referencyjnego), a jedynie efektywność procesu skanowania (liczbę punktów pomiarowych uzyskanych w jednostce czasu).

2.2.2. Wielkość obiektów (etap II)

Ekspozaty w zbiorach CMM bardzo różnią się między sobą wielkością. Mamy tu obiekty zarówno kilkudziesięciometrowe (skrajnym przykładem jest kadłub s.s. „Sołdek”), jak i kilkucentymetrowe (np. monety). Te różnice skutkują odmiennymi problemami w zakresie digitalizacji. Dlatego problem wielkości skanowanych obiektów należy rozpatrywać w trzech aspektach:

- a) Wielkości przestrzeni pomiarowej i związanej z nią niepewności pomiaru. Ten aspekt zwykle decyduje o wyborze techniki pomiarowej i konkretnego modelu urządzenia pomiarowego.
- b) Przekroczenia zasięgu urządzenia pomiarowego i związanej z tym konieczności przemieszczania obiektu lub urządzenia. W przypadku przemieszczania urządzenia znane są procedury łączenia pomiarów wykonanych w różnych układach odniesienia (instrukcja obsługi Faro ScanArm). W przypadku konieczności przemieszczania obiektu, wykonane pomiary można łączyć na podstawie łatwo identyfikowalnych, charakterystycznych elementów pomierzonego kształtu lub specjalnych znaczników. Operacja ta wykonywana jest na etapie przetwarzania danych po przeprowadzeniu pomiarów.
- c) Przemieszczania obiektu i wynikającego z niego odkształcenia. Szczególnie w przypadku obiektów o wysokich wartościach proporcji wymiarów (długie i wąskie), operacja ich przemieszczania zawsze wiąże się ze zmianą kształtu. Nawet w przypadku obiektów niewykraczających poza zasięg skanera, zwykle występuje konieczność obrócenia eksponatu w celu zeskanowania go ze wszystkich stron. Rozwiązaniem tego problemu może być zapewnienie uchwytu usztywniającego w czasie skanowania lub takie podparcie eksponatu, aby wykorzystując możliwości Faro ScanArm dokonać skanowania wszystkich powierzchni przy jednokrotnym zamocowaniu.

Dla celów projektu podzielono eksponaty na trzy grupy wielkości:

- a) małe – pojedynczy skan, całość obiektu pomierzona z jednego zamocowania (istotny jest sposób zamocowania eksponatu);
- b) średnie – wykonujemy kilka skanów, jednak bez zmiany pozycji skanera. Możliwe przemieszczenie obiektu w celu skanowania niewidocznej strony;
- c) duże – konieczność przesunięcia obiektu i/lub skanera.

W tym etapie badana jest również wielkość plików i efektywność przetwarzania uzyskanych danych pomiarowych. Zgodnie z zaleceniami NIMOZ oraz Kart Londyńskiej i Sewilskiej należy zapewnić archiwizację danych pomiarowych, nieprzetworzonych w żaden sposób. Ma to na celu umożliwienie weryfikacji rzetelności wykonanych rekonstrukcji oraz sprawdzenie wyników uzyskiwanych nowymi metodami, na podstawie tych samych danych. Tutaj dotykamy istotnego problemu – dane pozyskiwane skanerem laserowym obejmują często wiele milionów punktów i w związku z tym zajmują znaczną przestrzeń dyskową. Dlatego bardzo ważnym zagadnieniem jest z jednej strony taki dobór parametrów skanowania, aby nie mnożyć niepotrzebnie danych, z drugiej zaś taki format zapisu, który w sposób bezstratny pozwoli zminimalizować wielkość plików zawierających wyniki skanowania.

Ten sam problem dotyczy również danych przetworzonych – celem jest znalezienie takiego stopnia uproszczenia modelu, który jest akceptowalny z punktu widzenia dokładności modelowania, a jednocześnie pozwala na minimalizację ilości danych. Jednak w tym przypadku interesuje nas również efektywność poszczególnych etapów procesu, obejmujących:

- a) filtrowanie danych punktowych (*point cloud*)
- b) budowę modelu powierzchniowego (*polygonmesh*)
- c) budowę modelu bryłowego (CAD).

Każdy z tych etapów wprowadza określone błędy w stosunku do rzeczywistości, ale jednocześnie pozwala na użycie geometrii zajmującej mniejszą przestrzeń dyskową i wymagającej mniejszych mocy obliczeniowych komputera. Celem tego zadania jest określenie, jak daleko można uprościć geometrię modelu, aby zachować założoną dokładność, przy jak najmniejszym pliku zawierającym dane. W tym przypadku wyniki przetwarzania danych porównuje się z surowymi danymi, traktowanymi jako referencje.

2.2.3. Pomiary terenowe

Specyficznym zagadnieniem jest możliwość wykonywania pomiarów w warunkach terenowych. W przypadku wraków, które stanowią potencjalnie największą grupę obiektów wymagających takiego podejścia, zadanie to łączy problemy związane z materiałem, skalą i warunkami wykonania pomiarów. Eksponaty w trakcie prac nad ich odsłonięciem charakteryzują się zwykle wysokim stopniem zanieczyszczenia i mokrą powierzchnią. Zanieczyszczenia utrudniają precyzyjny pomiar mechaniczny. Z kolei woda na powierzchni, szczególnie w połączeniu z ciemnym kolorem, jest niewskazana w trakcie skanowania optycznego. Problem skali eksponatów również pojawia się w szczególnie dotkliwy sposób, ponieważ w warunkach świeżego stanowiska (wykop, grząski teren) operowanie ramieniem pomiarowym z komputerem jest bardzo utrudnione i może prowadzić do nadmiernie szybkiego zużycia sprzętu. Stabilne, twarde podłoże, gwarantujące nieruchome ustawienie trójnożu (statywu), na którym pracuje ramię pomiarowe, stanowi warunek *sine qua non* poprawnie przeprowadzonego pomiaru. Te wszystkie czynniki powodują, że w ocenie opracowywanych metodykę pomiarów w takich warunkach, przy założonej dokładności, należy uznać za bardzo trudne do zrealizowania bądź niemożliwe i z góry wykluczyć. Zdecydowanie lepszym rozwiązaniem w tym przypadku wydaje się

skanowanie za pomocą urządzeń geodezyjnych, umożliwiających wykonanie pomiaru z oddalenia i bez wykorzystywania komputerów.

Natomiast można i należy uwzględnić wykorzystanie ramienia pomiarowego w kontrolowanych warunkach terenowych, np. w przypadku eksponatów wystawianych na zewnątrz. W tym przypadku wykonanie pomiarów poza pracownią pociąga za sobą przede wszystkim problemy z oświetleniem, zasilaniem sprzętu pomiarowego i komputerów oraz organizacją stanowiska pracy. I taki właśnie program badań terenowych jest realizowany w ramach projektu.

2.3. Ograniczenia dostępnego sprzętu i oprogramowania

Projekt został zrealizowany za pomocą wybranego wcześniej sprzętu i oprogramowania, co narzuca istotne ograniczenia. Dostępnym urządzeniem pomiarowym jest ramię pomiarowe FaroScanArmFusion USB o zasięgu 3,7 m i 6 stopniach swobody. Umożliwia ono wykonywanie pomiarów metodą kontaktową (w oparciu o sondę kulową) oraz bezkontaktową (skaner liniowy). Metoda kontaktowa zapewnia uzyskanie dokładności na poziomie 0,175 mm (dokładność objętościowa) przy częstotliwości próbkowania do 20 pomiarów na sekundę, natomiast sonda laserowa pozwala na uzyskanie do 19200 punktów pomiarowych na sekundę (30 linii/s po 640 punktów), z dokładnością 0,159 mm. Urządzenie stanowi interesujące połączenie stosunkowo wysokiej dokładności przy dużej objętości pomiarowej oraz elastyczności użytkowania (możliwe skanowanie powierzchni stosunkowo trudno dostępnych). Wady: trudne lub niemożliwe skanowanie obiektów bardzo dużych oraz bardzo małych, brak odczytu koloru i poziomu sygnału odbitego oraz brak możliwości automatyzacji procesu pomiarowego (urządzenie zostało zaprojektowane do obsługi manualnej).

Dostępne oprogramowanie stanowią 2 pakiety Geomagic Studio i Geomagic Qualify. Oba programy są pozycjonowane w segmencie zaawansowanych systemów 3D, służących do obróbki danych trójwymiarowych w postaci chmury punktów, siatki trójkątów lub geometrii parametrycznej. Dostępne aplikacje pozwalają również na wykorzystanie ich do akwizycji danych bezpośrednio ze skanera, i tak też zostały skonfigurowane na potrzeby pracowni pomiarowej CMM.

Wyniki projektu mogą również zostać wykorzystane do zaprojektowania optymalnej konfiguracji stanowiska pomiarowego. Dla jego prawidłowego działania niezbędne jest zbadanie wpływu na jakość i efektywność procesu skanowania takich czynników, jak: oświetlenie, wentylacja, wilgotność, wielkość, kolor i sztywność stanowiska pomiarowego oraz jego wyposażenie w dodatkowe oprzyrządowanie pomiarowe, takie jak: uchwyty, imadła, stoły obrotowe, kolorymetr, światłomierz, waga, wilgotnościomierz i termometr z rejestratorem. Część zaleceń pochodzi z literatury, natomiast część jest wynikiem przemyśleń i doświadczeń zebranych w trakcie realizacji projektu. W samym projekcie nie przewidziano działań ukierunkowanych na optymalizację stanowiska badawczego – wnioski pojawiają się w trakcie pracy z urządzeniem i eksponatami niejako „przy okazji”, wskutek bieżącej optymalizacji i naturalnej ewolucji procesu pomiarowego. Główne czynniki wpływające na te wnioski to ergonomia i efektywność pracy z ramieniem pomiarowym.

2.4. Porównanie metody kontaktowej i optycznej

Metoda kontaktowa, opracowana dla celów digitalizacji wraków [9,10], polega na rejestracji pojedynczych punktów, wybranych przez operatora, bezpośrednio w programie CAD (Rhino3D) oraz ich automatycznym łączeniu w linię, na podstawie których z kolei rekonstruowany jest kształt eksponatu. Metoda ta wymaga odpowiedniego przygotowania eksponatu, m.in. poprzez trwałe umieszczenie na nim punktów referencyjnych, co może prowadzić do jego uszkodzenia. Standardową procedurą w tym zakresie jest wkręcanie w eksponat niewielkich wkrętów. Metoda dość dobrze sprawdza się w przypadku kształtów posiadających wyraźne krawędzie i płaskie powierzchnie pomiędzy nimi. Dokumentacja kształtów obłych lub bardziej złożonych staje się dość pracochłonna. Istotnym składnikiem całej procedury jest kontrola pozycji eksponatu i skanera, co prowadzi do konieczności kalibracji urządzenia każdorazowo po poruszeniu któregokolwiek z elementów.

W metodzie optycznej sonda mechaniczna zastąpiona jest przez sondę laserową, pozwalającą na akwizycję do 19200 pkt/s, a przez to znacznie szybsze i dokładniejsze zobrazowanie kształtu eksponatu. Procedura pomiaru jest identyczna jak dla metody kontaktowej, jednak znacznie szybsza, mniej narażająca eksponat na poruszenie i niewymagająca tak częstej kalibracji dzięki programowi pozwalającemu na łączenie skanów wykonanych w różnych pozycjach eksponatu i skanera. W zasadzie kalibracja niezbędna jest wyłącznie w przypadku zmiany zamocowanej sondy (zaleca się również wykonanie kalibracji co kilkadziesiąt godzin pracy skanera w celu sprawdzenia stanu urządzenia). Najważniejsza różnica pojawia się w momencie analizy wyników – zamiast krawędzi otrzymujemy gęstą chmurę punktów rozłożoną na całej powierzchni eksponatu, pozwalającą na odwzorowanie dowolnie złożonych kształtów.

Istnieje również możliwość łączenia obu metod, np. poprzez skanowanie kontaktowe eksponatów o prostych kształtach i optyczne uzupełnienie nietypowych lub szczególnie interesujących detali. Zbadanie takiego podejścia jest również celem projektu.

Podsumowanie

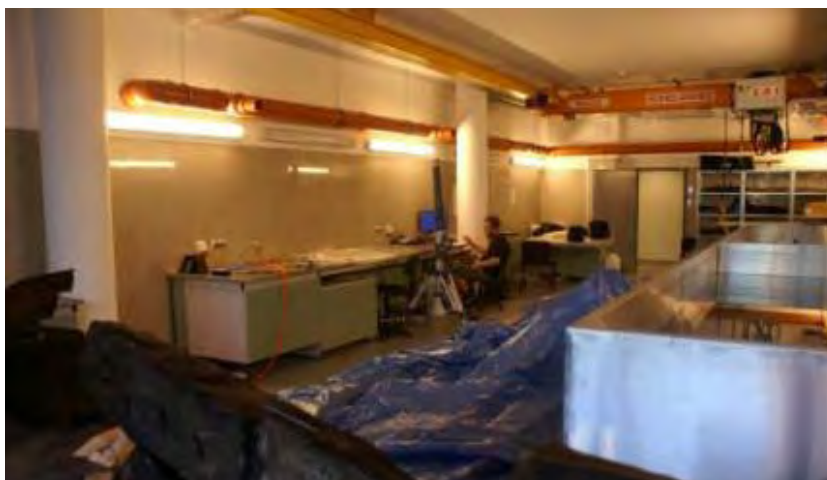
1. Specyfika pracy i zbiorów CMM wymaga opracowania własnej metodyki digitalizacji zabytków.
2. Zakres badań został ograniczony przez dokonany wcześniej wybór sprzętu i oprogramowania pomiarowego.
3. Prace w ramach projektu koncentrują się na rozszerzeniu istniejącej metodyki kontaktowej o nowe możliwości, jakie pojawiły się wraz z technikami optycznymi zaadoptowanymi do potrzeb ramienia pomiarowego.
4. Zakres projektu obejmuje opracowanie metodyki digitalizacji zbiorów CMM ze szczególnym uwzględnieniem drewnianych elementów konstrukcji kadłubów jednostek pływających wraz z ich późniejszą cyfrową rekonstrukcją.
5. Projekt ma na celu również zaproponowanie procedur digitalizacji, archiwizacji i przetwarzania danych cyfrowych, które będą użyteczne w przewidywalnej przyszłości, uwzględniając dynamiczny rozwój oprogramowania.

3. Wyniki

W oparciu o metodykę i zakres badań, przedstawione w punkcie 2, przeprowadzono szereg pomiarów za pomocą skanera laserowego Faro ScanArm oraz dokonano ich analizy w kontekście wymagań stawianych modelom cyfrowym. W I etapie projektu pomiary wykonano w kontrolowanych warunkach pomieszczeń biurowych Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej, po zapewnieniu odpowiedniej sztywności zamocowania urządzenia, a więc i wymaganych warunków pracy dla uzyskania parametrów specyfikowanych przez producenta (Rys. 3.1). Pomiary etapu II wykonane zostały w docelowych warunkach pomieszczeń pracowni dokumentacji zabytków archeologicznych Ośrodka Kultury Morskiej w Gdańsku (Rys. 3.2).



Rys. 3.1. Stanowisko pomiarowe na Politechnice Gdańskiej



Rys. 3.2 Stanowisko pomiarowe w Ośrodku Kultury Morskiej w Gdańsku

3.1. Ustalenie wymagań

W świetle publikacji [4] i [5] podstawowym celem skanowania jest dokumentacja zbiorów. Jednak wymagania stawiane zabytkom sztuki powinny zostać zrewidowane w przypadku zabytków techniki, szczególnie zabytków sztucznych. Skanowanie do celów konserwatorskich z zalecaną rozdzielczością rzędu kilku (1–10) tysięcy punktów na mm² wydaje się nieuzasadnione. Tak szczegółowe odwzorowanie eksponatów nie wydaje się celowe w przypadku stosunkowo prostych form zabytków techniki. Należy zauważyć, że dotąd dokumentacja była prowadzona często w oparciu o pomiary mechaniczne w niewielkiej liczbie punktów. Wykorzystanie skanera stanowi skok jakościowy w zakresie dokumentacji. Z drugiej strony trzeba wyraźnie zaznaczyć, że wartości zalecane dla zabytków sztuki są w praktyce niemożliwe do uzyskania za pomocą urządzenia Faro ScanArm. Przy maksymalnej rozdzielczości rzędu 0,05 mm maksymalna gęstość punktów pomiarowych nie przekroczy 200 pkt/mm². Biorąc pod uwagę inne ograniczenia (utrata części punktów, szybsze prowadzenie sondy) należy oczekiwać znacznie niższej rozdzielczości. W teście przeprowadzonym na płycie kalibracyjnej dołączonej do skanera uzyskano rozdzielczość rzędu 50 pkt/mm² przy jednokrotnym skanowaniu i ok. 150 pkt/mm² przy wielokrotnym skanowaniu. **Stąd wynika wniosek, że dostępne urządzenie nie nadaje się do archiwizacji dzieł sztuki i drobnych elementów z jakością zapewniającą wykorzystanie modeli 3D w celach konserwatorskich.** Dodatkowo brak możliwości rejestracji koloru i poziomu sygnału odbitego w zasadzie ogranicza wykorzystanie posiadanego urządzenia wyłącznie do zapisu geometrii. Inaczej sprawa się ma w przypadku zabytków techniki – tutaj w wybranych przypadkach możemy mówić o zastosowaniach konserwatorskich (np. odwzorowanie skorodowanej powierzchni elementów stalowych wystawianych w skansenie przy muzeum). Natomiast z całą pewnością parametry posiadanego urządzenia są wystarczające do opracowania modeli wizualizacyjnych i symulacyjnych na różnych poziomach szczegółowości.

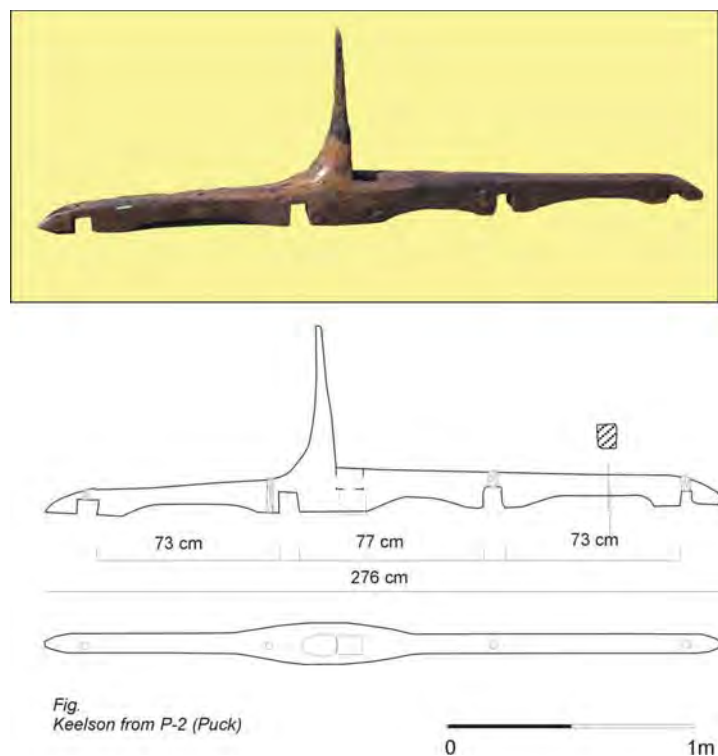
Wniosek: dane bazowe będą pozyskiwane przy wykorzystaniu pełnej rozdzielczości urządzenia pracującego w trybie „wysokiej dokładności”. Dla obiektów o stosunkowo dużych wymiarach (kilka metrów) i płaskich powierzchniach rozdzielczość skanowania może być obniżana w celu minimalizacji wielkości plików, jednak zawsze pozostaje to do oceny osoby wykonującej digitalizację. Preferowany sposób obniżenia rozdzielczości polega na obniżeniu współczynnika gęstości skanowania (liczba punktów w linii) i zwiększeniu prędkości skanowania (liczba linii). Przy obniżaniu rozdzielczości należy zawsze wyłączyć tryb wysokiej dokładności, co spowoduje zwiększenie szerokości skanowanego obszaru, a przez to skrócenie pomiaru. Nie zaleca się stosowania obniżenia liczby linii rejestrowanych w jednostce czasu, ze względu na zbędne wydłużenie czasu pomiaru przy porównywalnej dokładności w stosunku do pomiaru prowadzonego z większą prędkością.

Krytycznym parametrem jest dokładność pomiaru. Z jednej strony intuicyjnie staramy się zapewnić jak najwyższą dokładność, z drugiej jednak strony mamy świadomość ograniczeń metod pomiarowych, odkształcenia eksponatów i wymagań technologicznych. Punktem odniesienia może być dokładność uzyskiwana tradycyjnymi metodami (na poziomie 1 mm) lub np. dokładność wykonania elementów drewnianych stosowana przez współczesnych sztukników, która może być nawet na poziomie 5 mm. Trudno jest jednoznacznie określić wymaganą dokładność i w zasadzie należy podchodzić do problemu indywidualnie. Ten parametr jest zależny od wielkości obiektu, materiału, stopnia zniszczenia/odkształcenia itp., dlatego decyzja w tym zakresie zawsze pozostaje w gestii konserwatora. Dla celów oceny procedur pomiarowych, w ramach projektu przyjęto dopuszczalną wartość błędu na poziomie 0,5 mm. Odpowiada to w przybliżeniu dokładności uzyskiwanej metodą kontaktową, stosowaną powszechnie w muzeach Europy, dla której przyjmuje się dopuszczalny błąd kalibracji na poziomie 0,4 mm.

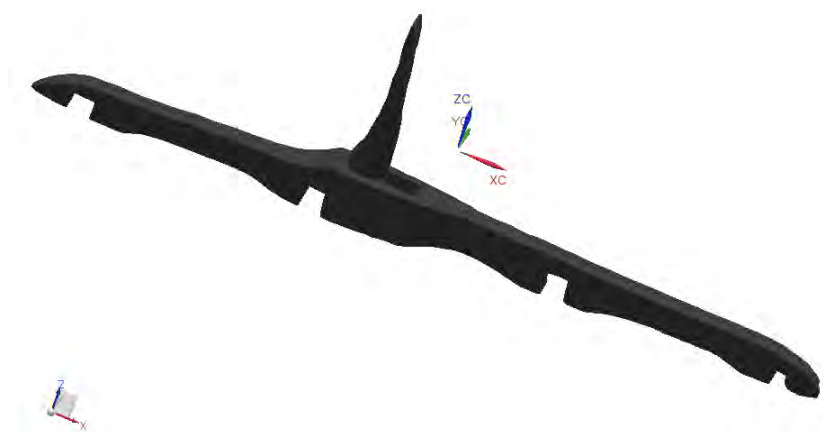
Istotne dla sposobu przeprowadzenia pomiarów są wymagania odnośnie zawartości modelu. Szczególną uwagę zwracamy na eksponaty stanowiące części wraków. Dla późniejszej rekonstrukcji najważniejsza jest rejestracja cech konstrukcyjno-technologicznych, szczególnie w zakresie pozwalającym na późniejszą rekonstrukcję całości wraku. Z tego punktu widzenia istotne są charakterystyczne krawędzie, zamki konstrukcyjne, a przede wszystkim rozmieszczenie i orientacja elementów łączących (gwoździe, kołki) lub otworów, jakie po nich pozostały. Te elementy pozwalają na wzajemne dopasowanie elementów odnajdowanych często w znacznej odległości od siebie. W przypadku zachowania elementów łączących ich rejestracja odbywa się w standardowy sposób, jednak często elementy te nie zachowują się, lub też zachowują w taki sposób, że trudno je zlokalizować. W przypadku otworów po elementach łączących możemy postępować na kilka sposobów:

- dla izolowanych i przelotowych otworów, wystarczy zeskanować ich krawędzie;
- dla otworów nieprzelotowych zaleca się wypełnienie ich wystającym kołkiem o zbliżonej średnicy (lub unie możliwienie mu przekoszenia w otworze w inny sposób) i standardowej długości – zeskanowanie kołka umożliwi określenie kierunku i głębokości otworu;
- w przypadku kompletnego połączenia możemy ograniczyć się do zeskanowania powierzchni, jeżeli powierzchnia przekroju kołka wystaje z elementu lub jej faktura powoduje, że jest wyraźnie widoczna na skanowanym modelu. W przeciwnym wypadku zaleca się użycie markerów na powierzchni kołka albo sondy mechanicznej do oznaczenia krawędzi lub osi otworu (dla łatwiejszej identyfikacji otworu, punkty uzyskane tą metodą zaleca się zapisać jako osobny skan lub na dedykowanej warstwie).

Kolejnym istotnym aspektem wykonywanej digitalizacji jest sposób dokumentowania eksponatów. W przypadku elementów wraku, tradycyjnie stosowaną formą jest klasyczny rysunek techniczny, obejmujący widok i przekroje eksponatu, wyraźnie obrazujące cechy konstrukcyjno-technologiczne (Rys. 3.1.1). Bezpośrednim efektem skanowania jest jednak model trójwymiarowy (Rys. 3.1.2), który wprawdzie jest nośnikiem większej ilości informacji, ale ciągle jeszcze w wielu przypadkach jest postrzegany jako element pomocniczy, służący wyłącznie wizualizacji, nie posiadający cech dokumentu.



Rys. 3.1.1. Przykład dokumentacji rysunkowej i fotograficznej (2D)



Rys. 3.1.2. Przykład dokumentacji cyfrowej 3D

Takie podejście zwykle wynika z wieloletnich przyzwyczajeń oraz przywiązania do dokumentacji w formie papierowej, niezależnej od dostępności nośników cyfrowych i oprogramowania wizualizacyjnego. Ten sam dylemat występuje jeszcze (choć coraz rzadziej) w przypadku dokumentacji płaskiej: rysunek czy zdjęcie? wydruk czy zapis cyfrowy? Tutaj wskutek dłuższej obecności technik obrazowania 2D na rynku, zapis cyfrowy budzi coraz mniej oporów, jednak trzeba również obiektywnie przyznać, że korzystanie z tej formy dokumentacji jest znacznie łatwiejsze i bardziej intuicyjne w przypadku zdjęć i rysunków niż w przypadku modeli 3D. Zakres dostępnych operacji i mnogość rozwiązań software'owych, dla których nie dopracowano się jeszcze uniwersalnych standardów w zakresie sposobu obsługi i interfejsu użytkownika, powodują trudności w opanowaniu tego narzędzia i jego efektywnego wykorzy-

stania. Dlatego należy uwzględnić możliwość wykorzystania skanowanej geometrii 3D do generowania dokumentacji w tradycyjnej formie rysunku. Wprawdzie współczesne oprogramowanie CAD i DCC (*Computer Aided Design i Digital Content Creation*) pozwala na błyskawiczne wykonanie takiego zadania w przypadku modeli sporządzonych w tych programach, jednak dla danych pozyskiwanych w procesie digitalizacji eksponatów, jakość dokumentacji i czasochłonność jej przygotowania są często uzależnione od sposobu przeprowadzenia pomiaru. Stąd szczególną uwagę zwrócono na ten aspekt procedury. Problem dotyczy przede wszystkim możliwości generowania linii opisujących sylwetkę rzutu (*silhouette*) oraz przekrojów (*crosssection*) na bazie surowych danych pomiarowych, czyli chmury punktów. Powszechnie dostępne narzędzia realizują te zadania na podstawie modeli powierzchniowych i bryłowych. Są one siłą rzeczy uproszczone i uzyskiwana w ten sposób dokumentacja może budzić poważne zastrzeżenia. Z drugiej strony uzyskanie pożądaných efektów za pomocą wyspecjalizowanego oprogramowania do obróbki chmur punktów wymaga pewnych umiejętności w zakresie jego obsługi, jak również odpowiedniej jakości danych. I to właśnie problem sposobu pozyskania danych pod kątem ich przydatności do generowania rysunków jest jednym z istotnych zagadnień badanych w ramach projektu.

Podsumowanie:

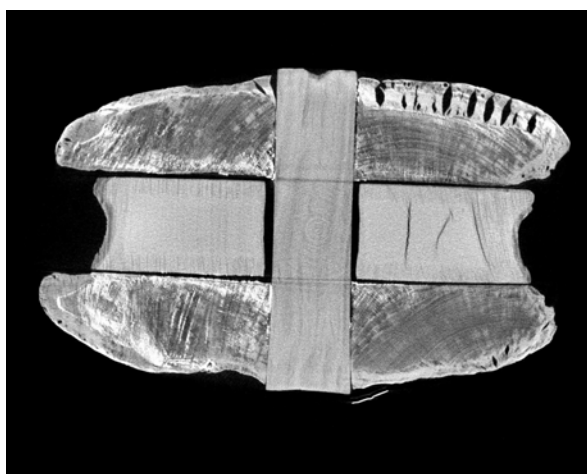
1. Skanowanie zabytków techniki odbywa się z rozdzielczością znacznie niższą niż w przypadku zabytków sztuki. W naszym przypadku limituje ją rozdzielczość urządzenia pomiarowego.
2. Digitalizacja odbywa się z najwyższą dostępną rozdzielczością i takie dane są archiwizowane. Przetwarzanie danych w celu uzyskania modeli badawczych, wizualizacyjnych itp. nie może modyfikować danych źródłowych.
3. Dokumentacja w postaci modeli 3D niesie znacznie większą ilość informacji niż klasyczne rysunki, dlatego należy dążyć do jak najszerszego zastąpienia rysunków modelami trójwymiarowymi.

3.2. Dane referencyjne

Do określenia wpływu różnych parametrów procesu skanowania na dokładność pomiaru niezbędna jest znajomość wymiarów referencyjnych mierzonych eksponatów. Za takie możemy uznać:

- a) wartości pomierzone metodą zapewniającą wartość błędu na poziomie co najmniej o rząd wielkości mniejszym od testowanego urządzenia,
- b) wartości teoretyczne (np. pochodzące z modelu CAD) obiektu wykonanego za pomocą precyzyjnej technologii, zapewniającej tolerancję wykonania również o rząd wielkości mniejszą niż niepewność pomiarowa ramienia Faro ScanArm.

Dla eksponatów testowych (blok drewniany i ceramika) wykonane zostały pomiary za pomocą rentgenowskiego wysokorozdzielczego skanera mikrotomograficznego w Laboratorium Mikrotomografii Zakładu Komputerowych Sytemów Biomedycznych Instytutu Informatyki Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach. Parametry skanowania: napięcie 200 kV, natężenie 160 μ A, rozmiar voxela: 103x103x103 μ m [20]. Rozdzielczość (rozmiar voxela) silnie zależy od wielkości skanowanego eksponatu. Zastosowane urządzenie pozwala na uzyskanie rozdzielczości nawet na poziomie 1 μ m (dla obiektów o wielkości 2 mm), a przy tym dostarcza znacznie większej ilości informacji, przede wszystkim na temat wewnętrznej struktury obiektu.



Rys. 3.2.1. Wynik skanowania eksponatu mikrotomografem komputerowym – przekrój



Rys. 3.2.2. Wynik skanowania eksponatu mikrotomografem komputerowym – model 3D

Ciekawy, potencjalnie użyteczny, efekt uboczny zastosowania tomografu wynika z bardzo wysokiego natężenia promieniowania rentgenowskiego, wielokrotnie wyższego niż w przypadku tomografów medycznych. Z jednej strony każe to zachować ostrożność przy skanowaniu delikatnych eksponatów, z drugiej jednak może zostać wykorzystane do usunięcia biologicznego skażenia próbek i skrócenia czasu konserwacji. Oczywiście największą zaletą tej techniki pozostaje możliwość skanowania wnętrza eksponatu – szczególnie w przypadku poszukiwania wad materiału, lub konstrukcji/zawartości eksponatu przed poddaniem go dalszej konserwacji (np. pojemnik z nieznaną zawartością). Na Rys. 3.2.1 wyraźnie widoczny jest rysunek struktury drewna, potencjalnie użyteczny dla nieniszczących badań dendrochronologicznych.

Dla potwierdzenia uzyskanych wyników wykorzystano również dwa testowe eksponaty, o znanych wymiarach:

- a) płytką kalibracyjną dołączoną do skanera – jako obiekt zmierzony dokładniejszymi metodami (Rys. 3.2.3)
- b) śruba napędowa pojazdu głębinowego – jako obiekt posiadający model cyfrowy, na bazie którego został wykonany z tolerancją 0,02 mm (Rys. 3.2.4).

Do oceny dokładności skanu wykorzystany został program Geomagic Qualify, pozwalający na szybką analizę położenia punktów pomiarowych względem modelu referencyjnego.



Rys. 3.2.3. Płytką kalibracyjną

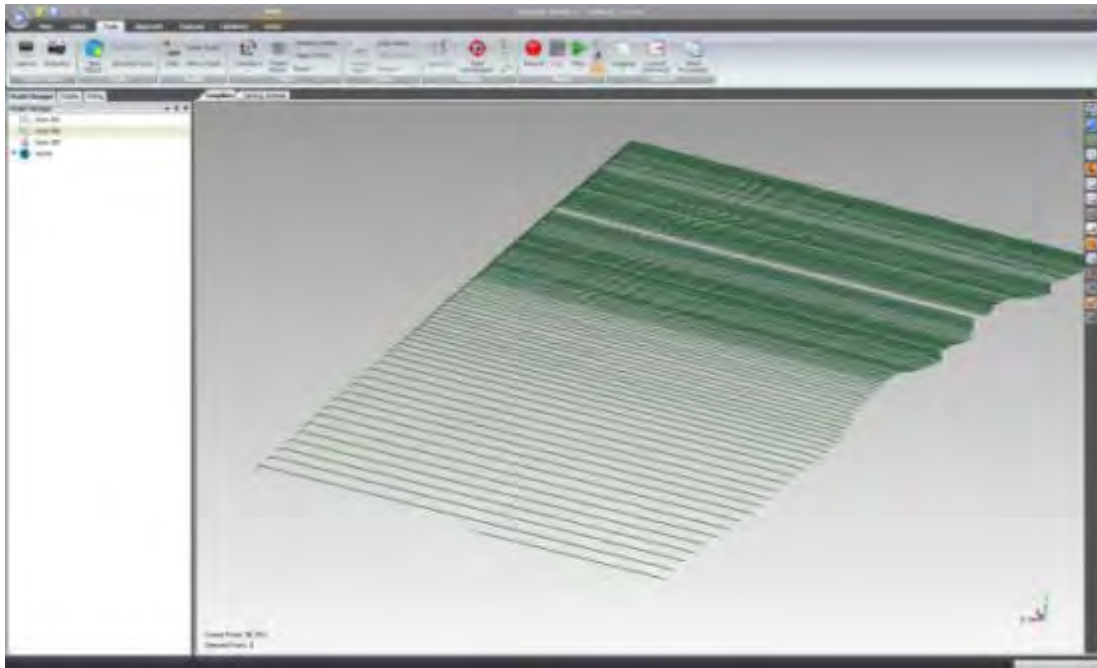


Rys. 3.2.4. Referencyjna śruba napędowa

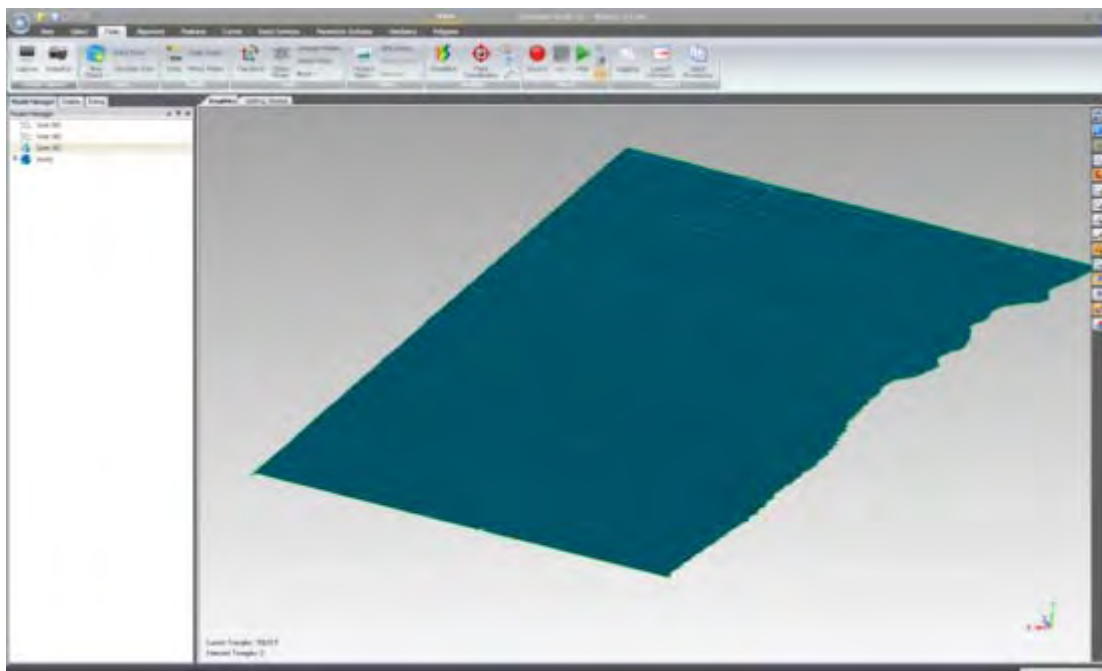
3.3. Efekty różnych prędkości prowadzenia sondy

Przeprowadzono 10 pomiarów płytki wzorcowej z różną prędkością prowadzenia sondy. Ponieważ jest to urządzenie obsługiwane manualnie, wartość prędkości jest orientacyjna i wynosi od ok. 3 mm/s do ok. 100 mm/s. Stabilne prowadzenie sondy przy prędkości mniejszej niż 3 mm/s jest bardzo trudne, natomiast skanowanie przy prędkościach powyżej 100 mm/s powoduje uzyskanie skanu o bardzo nierównomiernej gęstości w kierunku prowadzenia wiązki. Prędkość posiada oczywisty wpływ na gęstość punktów pomiarowych, a w zasadzie linii pomiarowych (nie wpływa na liczbę punktów w linii), jednak analiza przeprowadzona w programie Geomagic Qualify nie wykazuje znaczących różnic w wielkości i rozkładzie błędu w stosunku do modelu referencyjnego.

Należy natomiast zwrócić uwagę na cyfrowe artefakty pojawiające się w trakcie skanowania z małymi prędkościami. Na gładkich powierzchniach ukazuje się pozorna (wyłącznie wizualna) chropowatość, będąca efektem nierównomiernego prowadzenia sondy (prędkość i kierunek) – zjawisko to ilustrują Rys. 3.3.1 i 3.3.2. Widać zagęszczenie linii związane z wolniejszym prowadzeniem sondy oraz artefakt w postaci wzdłużnego wzoru, w jaki układają się punkty w środkowej części linii. Wzór ten nie jest spowodowany przesunięciem punktów w kierunku pionowym, a jedynie ich zmiennym zagęszczeniem na powierzchni (odległości punktów powierzchni mieszczą się w takich samych granicach na całym obszarze i w żaden sposób nie są skorelowane z pojawiającym się wzorem).



Rys. 3.3.1. Chmura punktów wygenerowana dla zmiennej prędkości prowadzenia sondy

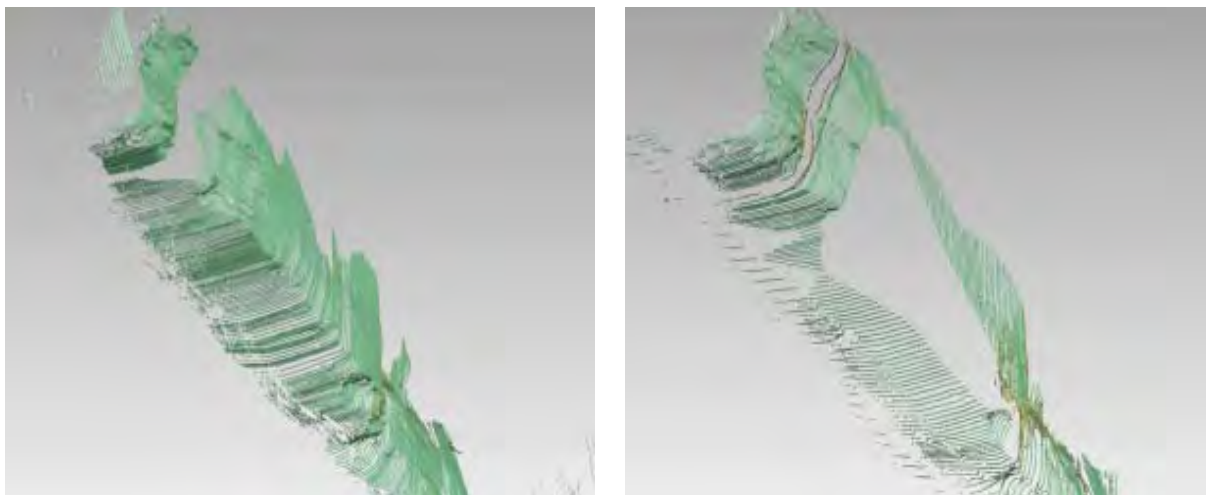


Rys. 3.3.2. Powierzchnia wygenerowana z chmury przedstawionej na Rys. 3.3.1

Wprawdzie efekt ten nie ma wpływu na dokładność pomiaru (odległość między punktem a powierzchnią referencyjną), jednak jest niekorzystny wizualnie – głównie ze względu na sposób działania algorytmu budowy modelu powierzchniowego na podstawie skanu. Nieregularna siatka punktów powoduje generowanie powierzchni chropowatej, pomimo braku takich nierówności w rzeczywistości. Usunięcie tego artefaktu wymaga dodatkowej obróbki. Efekt ten zanika w przypadku skanowania powierzchni chropowatych – wielkość nierówności generowanych przez algorytm zwykle jest znacznie mniejsza niż rzeczywistych. Dlatego szczególnie dla gładkich powierzchni należy prowadzić sondę z większą prędkością.

Dla obiektów o większych gabarytach (obiekt testowy CMM/BO/NW/484) przeprowadzono szereg pomiarów testowych, z prędkościami do ok. 1500 mm/s, prowadząc wiązkę prostopadle i skośnie (ok. 45 stopni) w stosunku do kierunku przemieszczania sondy. Najistotniejszym czynnikiem dla przebiegu późniejszego procesu automatycz-

nej budowy modelu powierzchniowego okazało się równomierne prowadzenie sondy, najlepiej z wiązką zorientowaną prostopadłe do kierunku przemieszczania. Uzyskane wyniki wyraźnie wskazują na utratę znacznej liczby punktów pomiarowych przy większych prędkościach skanowania. Prędkość na poziomie 150–200 mm/s okazała się dla testowego eksponatu graniczna, jej przekroczenie powodowało konieczność powtórzenia pomiaru, co w sumie prowadziło do wydłużenia procedury. Rys. 3.3.3 ilustruje wyniki uzyskane dla prędkości ok. 100 mm/s i ok. 250 mm/s. Nie zaobserwowano wpływu prędkości prowadzenia sondy na dokładność skanowania, w zakresie prędkości do 200 mm/s.



Rys. 3.3.3. Wyniki skanowania z prędkościami 100 i 250 mm/s

Prowadzenie sondy ze zbyt dużą prędkością skutkuje również nadmiernym rozrzedzeniem linii pomiarowych. Rys. 3.3.4 prezentuje uchwyconą wielokrotnie wiązkę skanera przy znacznej prędkości. Skutkiem jest niewielka rozdzielczość chmury punktów w kierunku prowadzenia sondy (w tym przypadku 20–30 mm, przy rozdzielczości w kierunku prostopadłym na poziomie 0,05 mm). Prowadzi to do problemów przy odtwarzaniu powierzchni modelu.



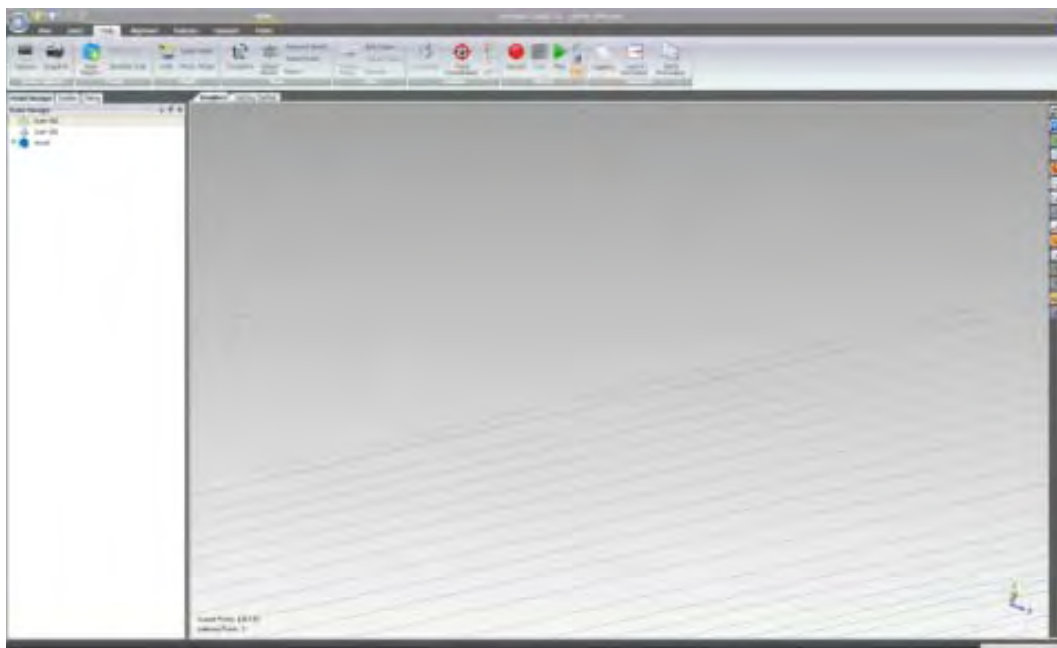
Rys. 3.3.4. Skanowanie z prędkością ok. 400 mm/s

Podsumowanie:

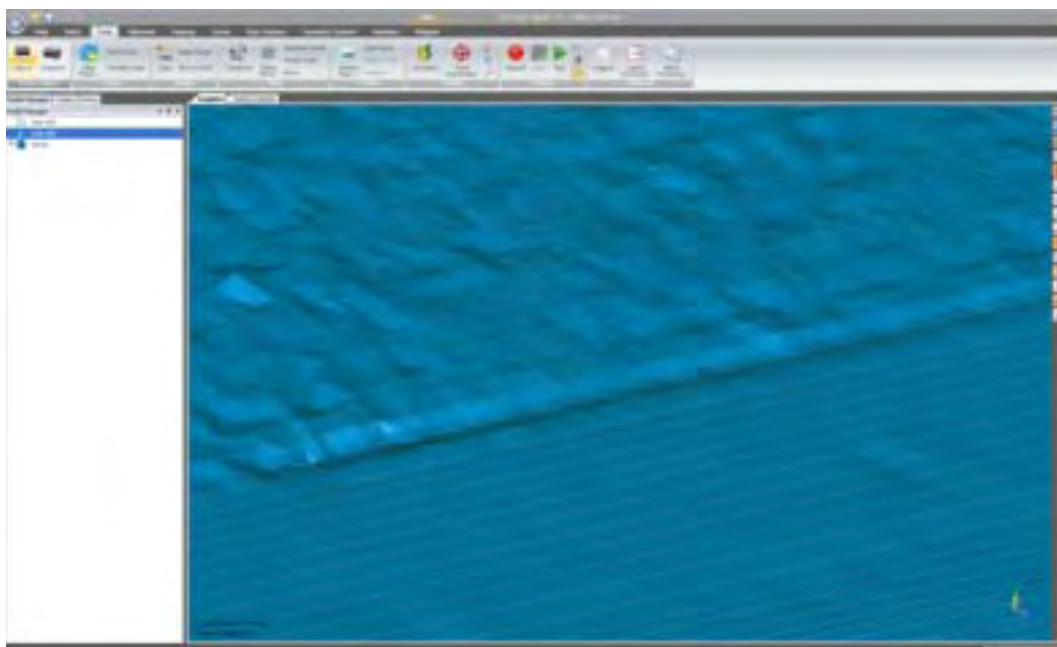
1. Zalecane jest utrzymywanie prędkości skanowania w zakresie 50–100 mm/s.
2. Należy dążyć do utrzymania stałej prędkości przesuwu skanera nad skanowaną powierzchnią (równomierne prowadzenie sondy).
3. Przy niższych prędkościach należy zwrócić szczególną uwagę na prostoliniowe prowadzenie sondy.

3.4. Wpływ kąta prowadzenia sondy względem skanowanej powierzchni

W zakresie zalecanym przez producenta (wiązka prostopadła do powierzchni $\pm 45^\circ$) nie stwierdzono istotnych różnic w zakresie wartości i rozkładu błędów w stosunku do modelu referencyjnego. Należy jednak zauważyć możliwość utraty znacznej liczby punktów pomiarowych dla niektórych materiałów, co w efekcie prowadzi do powstania artefaktu w postaci zwiększonej chropowatości modelu powierzchniowego zbudowanego na bazie tak użytych danych (Rys. 3.4.1 i 3.4.2). Przyczyny są identyczne jak opisane w pkt. 3.3 – nieregularność siatki punktów.



Rys. 3.4.1. Efekt skanowania prostopadłego i skośnego w chmurze punktów



Rys. 3.4.2. Efekt skanowania prostopadłego i skośnego na modelu powierzchniowym

Podobny efekt wywołuje również wielokrotne skanowanie tego samego obszaru. Jakkolwiek taka technika może podnieść uzyskaną rozdzielczość, drobne różnice w orientacji wiązki lasera oraz efekt histerezy na enkoderach ramienia powodują powstawanie nieregularnej siatki, ze wszystkimi tego konsekwencjami na kolejnych etapach digitalizacji.

Podsumowując, należy dążyć do uzyskania równomiernego, jednokrotnego przebiegu nad skanowanym obszarem. Jest to możliwe albo przez zastąpienie ręcznej obsługi sondy manipulatorem, albo dzięki wyższym prędkościom pro-

wadzenia sondy. Nie do uniknięcia jest częściowe nakładanie się zakresu kolejnych przebiegów, jednak w przypadku powierzchni gładkich, o niewielkich krzywiznach, należy raczej dążyć do pozostawienia luki pomiędzy skanowanymi obszarami niż do ich nałożenia (o ile nie jest to niedopuszczalne z innych względów). Z tego samego powodu dla eksponatów o nierównomiernych proporcjach należy wybierać kierunek skanowania wzdłuż większego wymiaru – ułatwia to prowadzenie sondy ze stałą prędkością, minimalizuje liczbę i pole powierzchni stref nakładających się pomiarów, co w efekcie upraszcza obróbkę danych i zmniejsza pracochłonność.

Podsumowanie:

1. Należy dążyć do równomiernego (prostoliniowego, ze stałą prędkością) i jednokrotnego przebiegu nad skanowanym obszarem.
2. Dla powierzchni gładkich, o niewielkich krzywiznach, zalecane jest (o ile nie wykluczają tego inne względy) pozostawienie luki między przebiegami (unikać należy nakładania się skanów).
3. Dla obiektów o nierównomiernych proporcjach zalecany jest wybór skanowania wzdłuż większego wymiaru.

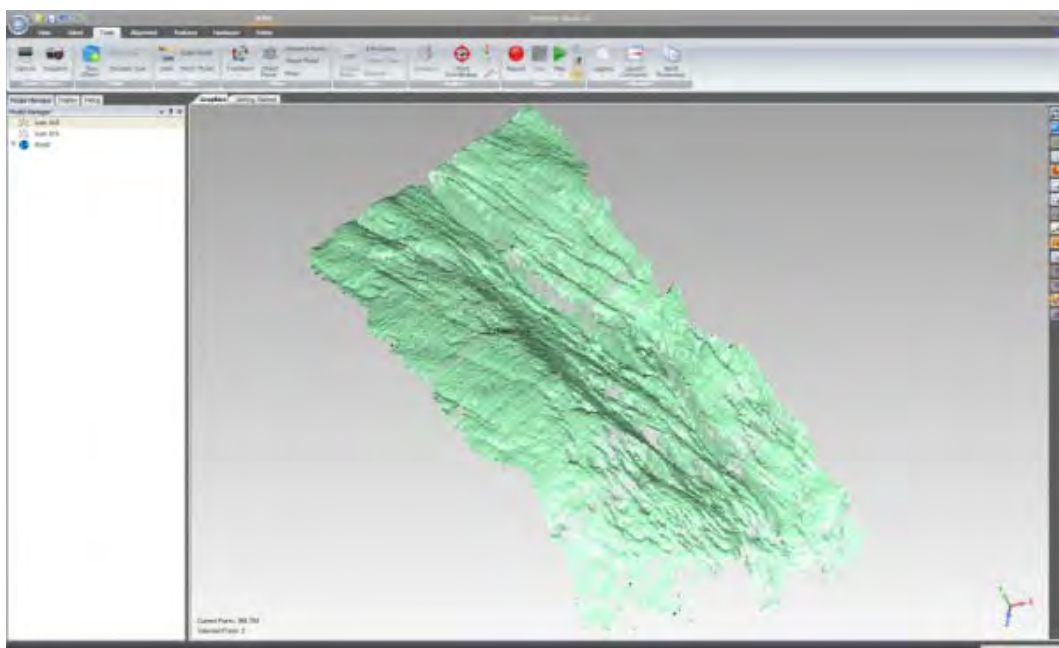
3.5. Efekt kierunku prowadzenia sondy w stosunku do faktury powierzchni

W przypadku eksponatów posiadających fakturę powierzchni, może zależeć nam na jej udokumentowaniu i pokazaniu na modelu 3D. Jeżeli faktura jest wyraźnie kierunkowa (np. powierzchnia drewna z widoczną strukturą materiału – Rys. 3.5.1), sposób prowadzenia sondy skanera zależy od przeznaczenia modelu:

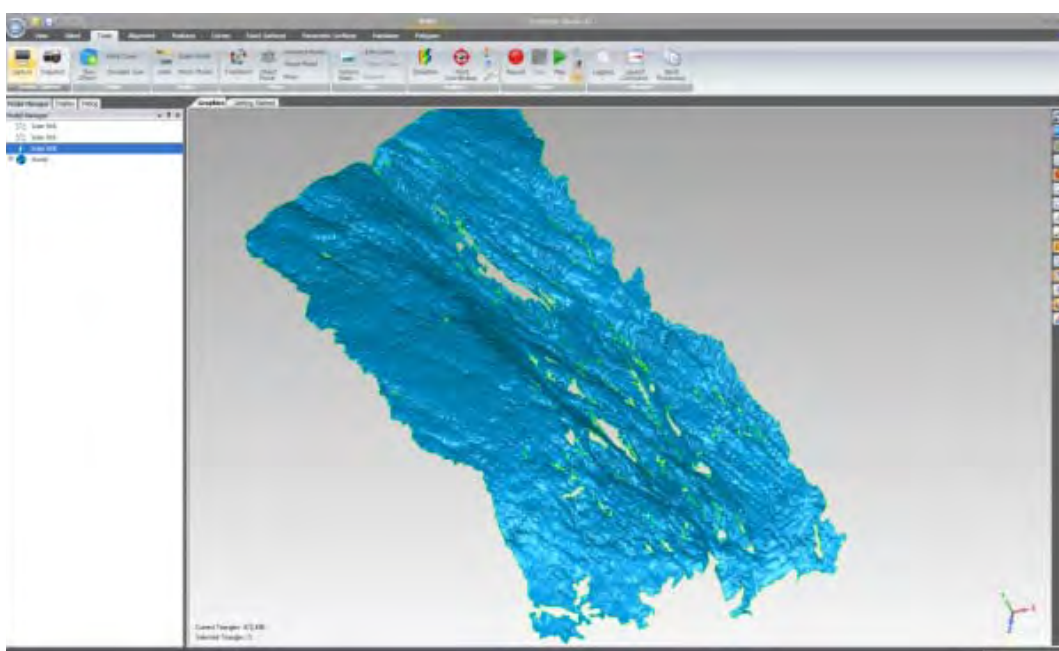
- a) W przypadku, gdy nacisk jest położony na dokumentację faktury, należy prowadzić sondę skanera wzdłuż włókien, utrzymując wiązkę lasera ustawioną poprzecznie. Wynika to z wyższej rozdzielczości w kierunku zdefiniowanym przez linię pomiarową lasera. Jednak w tej sytuacji może pojawić się artefakt w postaci nieistniejącej faktury, poprzecznej do rzeczywistej (Rys. 3.5.2a i 3.5.2b).
- b) Jeżeli dokumentacja faktury powierzchni nie jest istotna, dla celów wizualizacyjnych wygodniej jest prowadzić sondę poprzecznie do włókien, dzięki czemu wirtualna faktura, powstająca w wyniku nierównomiernej prędkości prowadzenia sondy, nakłada się na rzeczywistą, wzmacniając efekt wizualny. Uwaga: skanowanie w tym kierunku może skutkować zwiększoną pracochłonnością, ze względu na większe prawdopodobieństwa utraty punktów pomiarowych (utrata całych linii). Efekty uzyskane tą metodą ilustrują Rys. 3.5.3a i 3.5.3b.



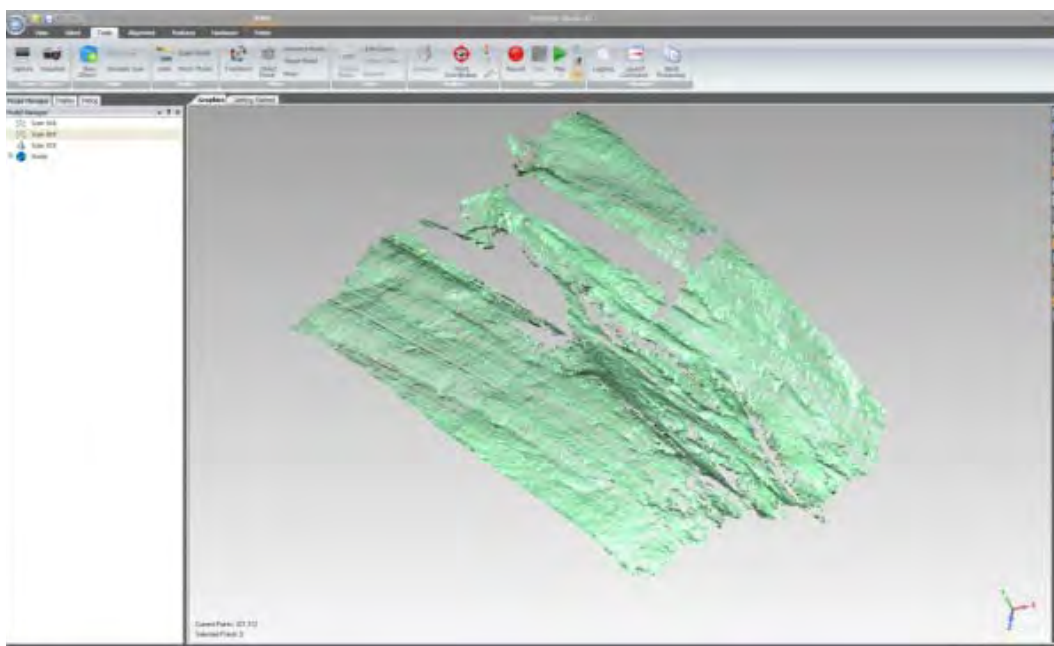
Rys. 3.5.1. Przykład eksponatu wymagającego dokumentacji stanu powierzchni (faktury, chropowatości, uszkodzeń) o charakterze kierunkowym



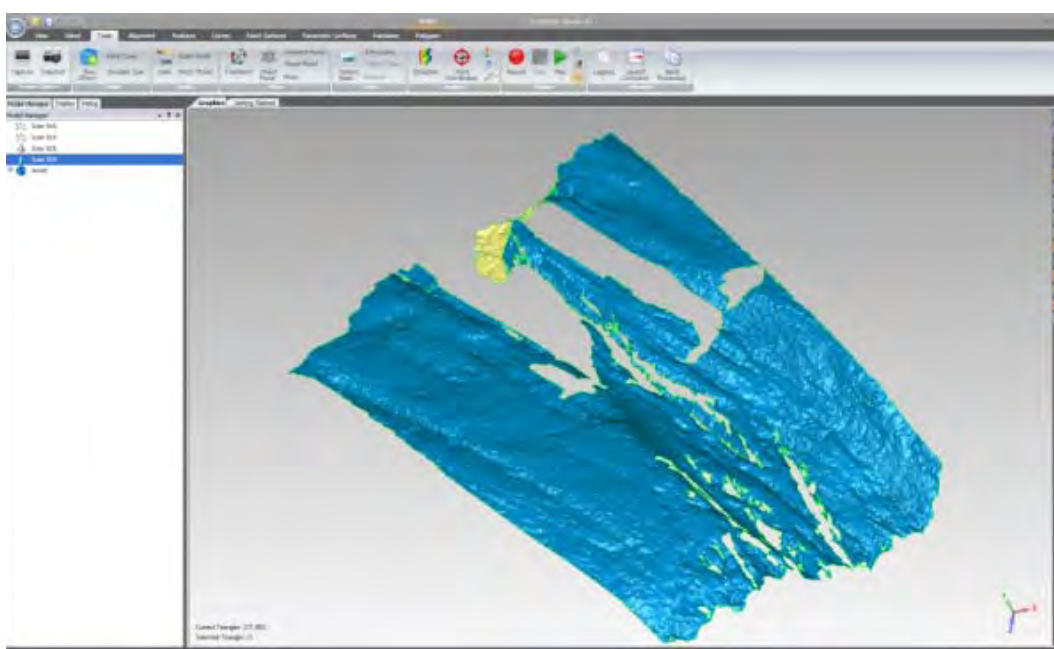
Rys. 3.5.2a. Efekt skanowania równoległego do włókien (chmura punktów)



Rys. 3.5.2b. Efekt skanowania równoległego do włókien (powierzchnia)



Rys. 3.5.3a. Efekt skanowania prostopadłego do włókien (chmura punktów)



Rys. 3.5.3b. Efekt skanowania prostopadłego do włókien (powierzchnia)

3.6. Określenie wpływu warunków ekspozycji

Warunki ekspozycji obejmują czas otwarcia migawki lasera (co przekłada się na ilość padającego na eksponat światła) oraz próg poziomu szumów sygnału odczytanego przez sondę. Wprawdzie ten ostatni parametr należałoby zakwalifikować do parametrów obróbki danych, jednak ze względu na jego działanie wyłącznie dyskryminujące (tzn. usuwa punkty uznane za błędne, ale nie zmienia wartości rejestrowanych) możemy uznać, że nie zniekształca on danych bazowych, a więc możemy analizować jego wpływ na proces pozyskiwania danych.

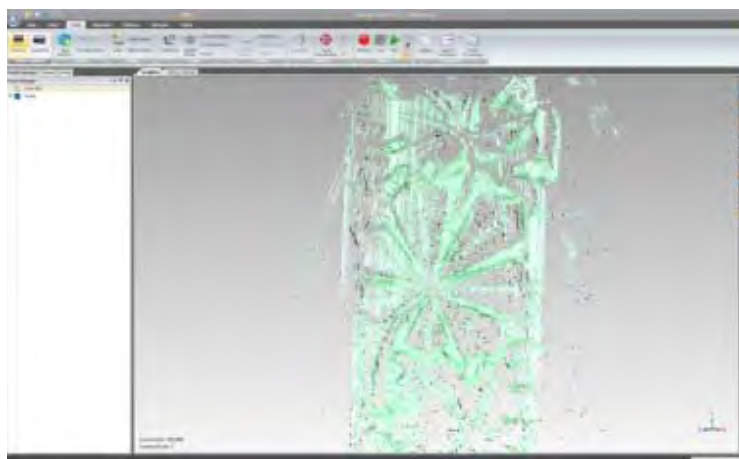
Oba parametry są ze sobą związane i ich wartości mogą być zmieniane automatycznie w trakcie pomiaru, w sposób dostosowany do chwilowych zmian parametrów optycznych skanowanej powierzchni. Jednak taki tryb pracy pociąga za sobą pewne niedogodności:

- a) spowolnienie pracy skanera (zależne od częstości aplikowanych automatycznie zmian – szczególnie uciążliwe w przypadku materiału niejednorodnego, o dużym kontraście pomiędzy sąsiadującymi ze sobą obszarami;
- b) możliwość wysterowania bardzo wysokiej wartości progu szumów, co w efekcie zatrzymuje proces skanowania (szczególnie widoczne w przypadku obiektów błyszczących i polerowanych – np. nowa moneta).

Dlatego zaleca się stosowanie manualne ustawienie stałych parametrów ekspozycji (Ustawienia zaawansowane -> Algorytmy -> FixedExposure; Rys. 2.2.1.1.1). Rozwiązanie to, jakkolwiek szybsze i bardziej niezależne od własności materiałów, również nie jest pozbawione wad. Najważniejszą jest trudne skanowanie materiałów o wysokim kontraście pomiędzy sąsiadującymi obszarami.

Oba parametry ekspozycji mogą być razem zapisywane w ustawieniach konfiguracyjnych skanera, w zestawie charakterystycznym dla wybranego typu materiału. Wartości te mogą być definiowane niezależnie (np. na podstawie doświadczenia operatora) lub w sposób automatyczny. Realizuje się to za pomocą przycisku „Automatycznie” w oknie dialogowym panelu sterującego sondą (Rys. 2.2.1.1.1), po uprzednim nakierowaniu wiązki na skanowany materiał. Główne zasady doboru parametrów:

- a) Dla materiałów jasnych i gładkich wystarczy niski poziom sygnału, czyli krótki czas ekspozycji, dla materiałów ciemnych i chropowatych niezbędny jest dłuższy czas ekspozycji. Należy zaznaczyć, że metody optyczne nie znajdują zastosowania w pomiarach szeregu materiałów: powierzchnie lustrzane, czarne gładkie (polerowane, błyszczące), przezrzyste i półprzezrzyste, powierzchnie o kolorze zbliżonym do koloru wiązki lasera. Dla takich materiałów możemy użyć metody kontaktowej (o ile nie ma innych przeciwwskazań – np. miękka powierzchnia woskowej figury). Z kolei właściwość tę możemy wykorzystać do zaprojektowania stanowiska pomiarowego w taki sposób, aby minimalizować liczbę punktów pomiarowych (skanujemy wyłącznie eksponat, nie stanowisko). Przykłady takich materiałów prezentuje Rys. 3.6.1 – półprzezroczysty wosk (wyniki skanowania – powierzchnie niebarwione nie zostały zarejestrowane) oraz Rys. 3.6.2, prezentujący możliwość wykorzystania szklanego statywu do pomiarów.

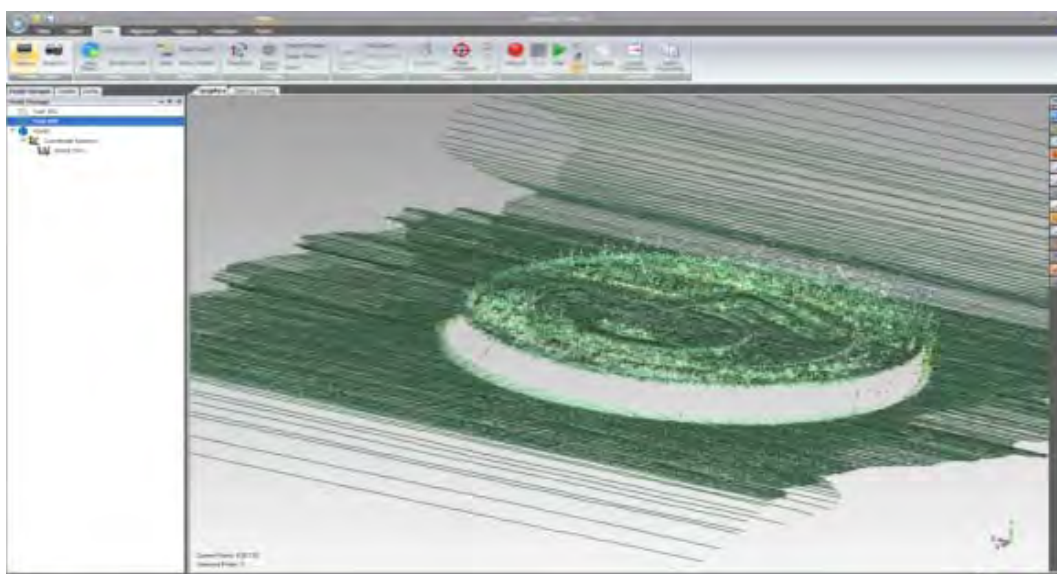


Rys. 3.6.1. Przykład problemów ze skanowaniem materiału półprzezroczystego (wosk)

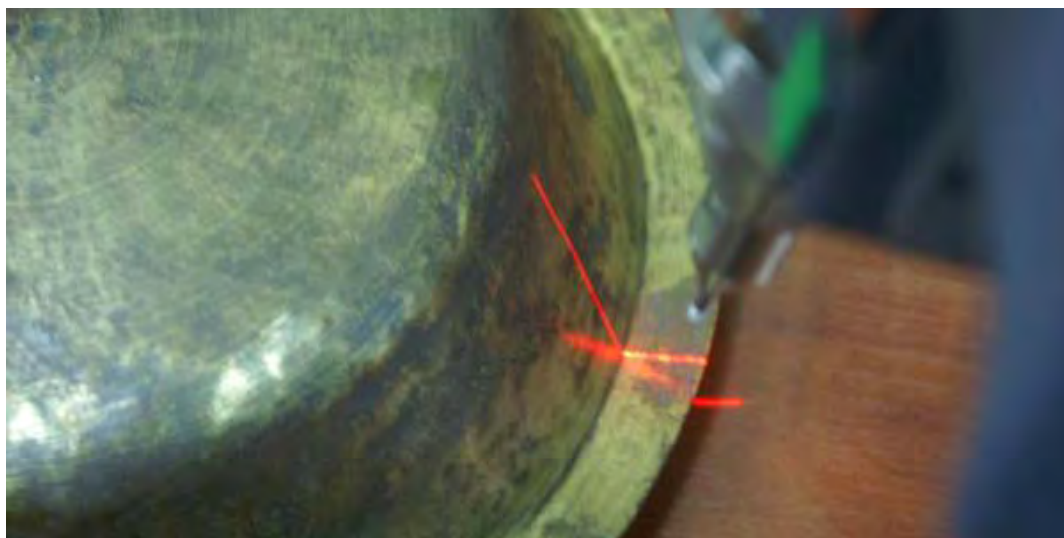


Rys. 3.6.2. Przykład szklanego statywu, niewidocznego dla skanera optycznego

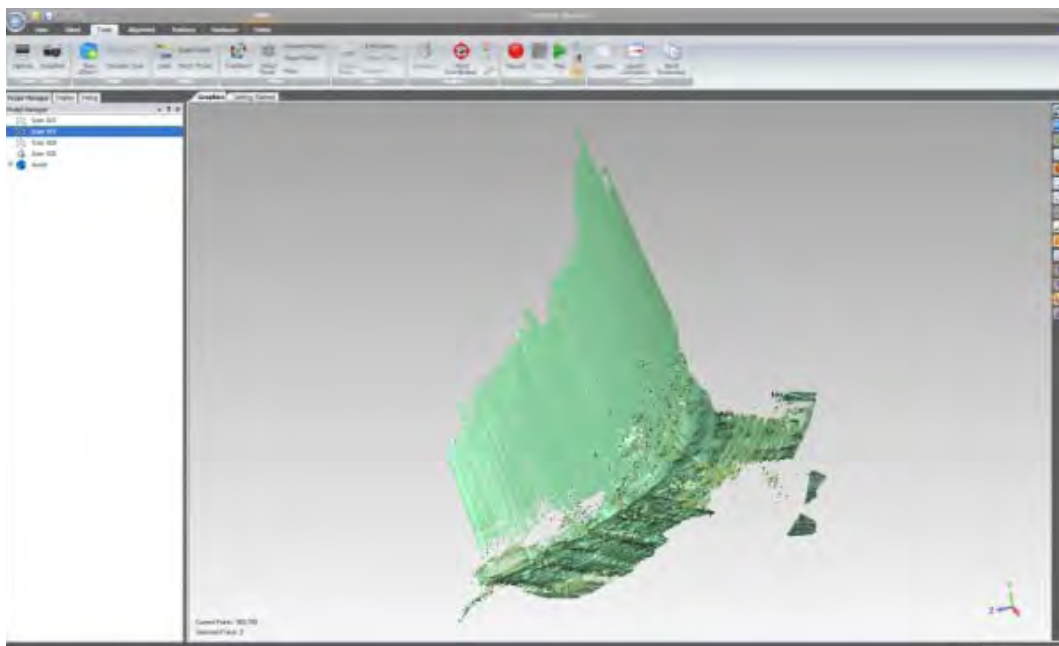
- b) W przypadku warunków generujących fałszywe odczyty należy podnieść wartość progów szumu (tzn. wartość poziomu sygnału odbitego, dla której program kwalifikuje go jako sygnał pomiaru). Warunki te mogą być związane z otoczeniem (np. zapylenie, zewnętrzne źródła światła o tej samej długości fali) lub materiałem, z jakiego wykonano eksponat. Zwykle takie problemy pojawiają się w przypadku pracy z materiałami gładkimi i błyszczącymi. Doskonałym przykładem jest skan nowej monety o nominale 5 zł, wykonanej z dwóch różnych materiałów (o różnych kolorach, chociaż w obu przypadkach o wysokim połysku) – Rys. 3.6.3. Wyraźnie widać szereg punktów pomiarowych oddalonych od głównej grupy o kilka milimetrów. Punktów tych jest na tyle dużo, że algorytmy automatycznego filtrowania pomiarów nie usuwają ich bez udziału operatora, co znacząco podnosi pracochłonność opracowania modelu. W takiej sytuacji filtr oparty o pomiar poziomu sygnału może być skutecznym narzędziem usuwania błędnych pomiarów. Inny przykład ilustruje ten sam problem z powierzchniami o mniejszym połysku, które jednak w połączeniu ze specyficznym kształtem (formy wklęsłe) generują bardzo duże błędy pomiarowe. Błędy te powstają w wyniku odczytania wielokrotnego odbicia światła lasera przez sondę – Rys. 3.6.4 ilustruje sposób powstawania takiego sygnału, a Rys. 3.6.5 i 3.6.6 efekty takiego odczytu. Z kolei Rys. 3.6.7 i 3.6.8 ilustrują efekty zastosowania wysokiego progu szumu dla tego samego przypadku (brak fałszywych, przy utracie znacznej części prawidłowych punktów pomiarowych).



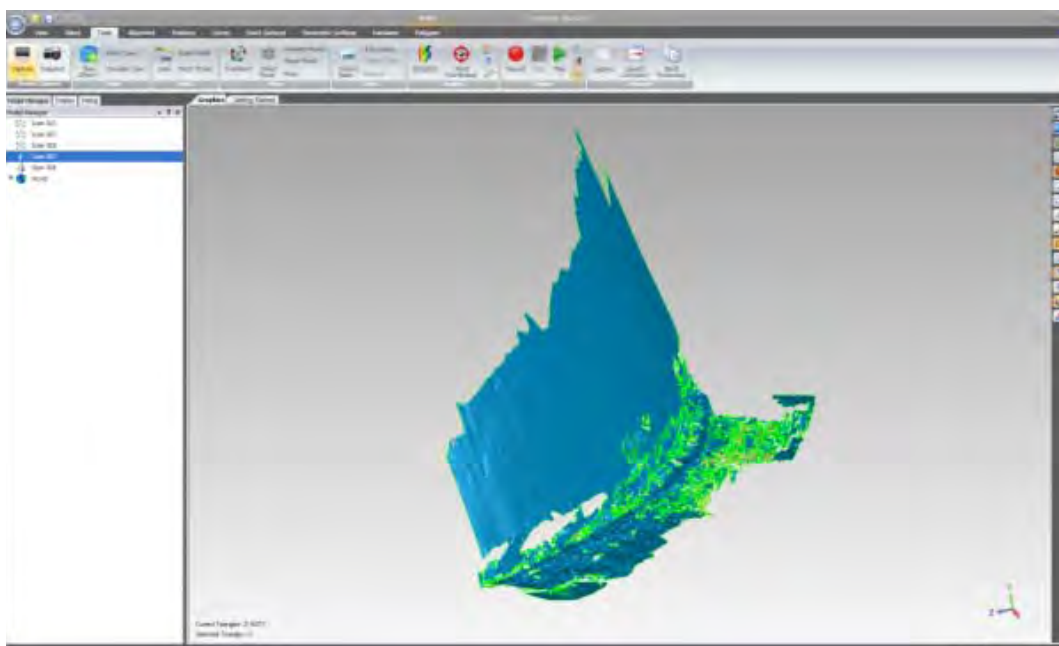
Rys. 3.6.3. Przykład wysokiego udziału szumu w wynikach pomiaru, spowodowanego przez powierzchnię o wysokim połysku



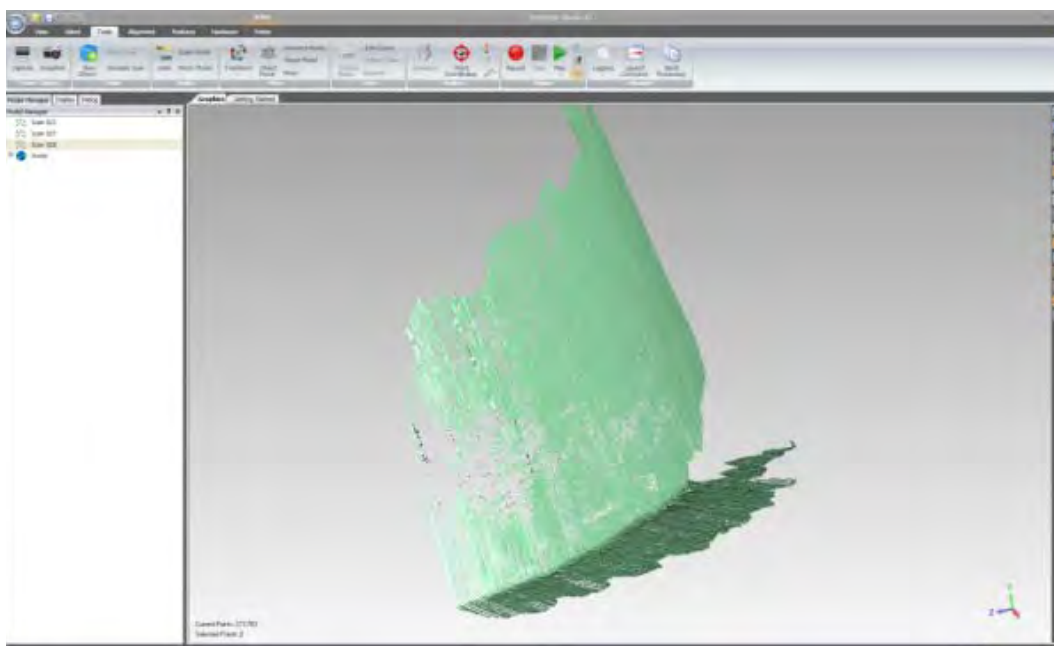
Rys. 3.6.4. Przykład generowania fałszywego sygnału optycznego na wklęsłych detalach błyszczących powierzchni



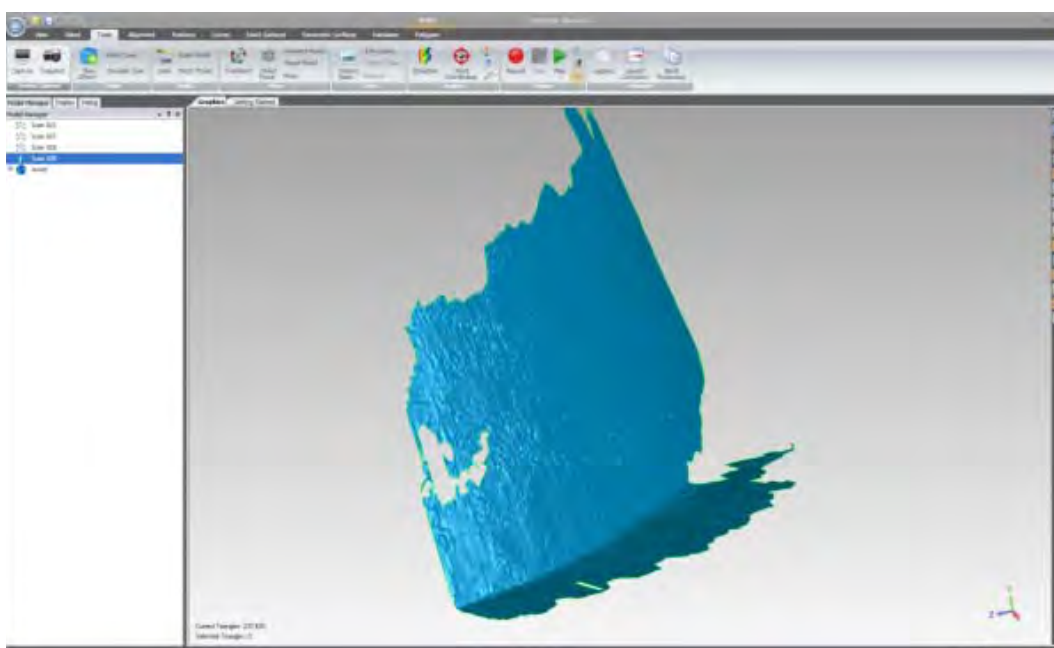
Rys. 3.6.5. Efekty odczytu sygnału odbitego (chmura punktów)



Rys. 3.6.6. Efekty odczytu sygnału odbitego (powierzchnia)



Rys. 3.6.7. Efekty filtrowania sygnału odbitego (chmura punktów)



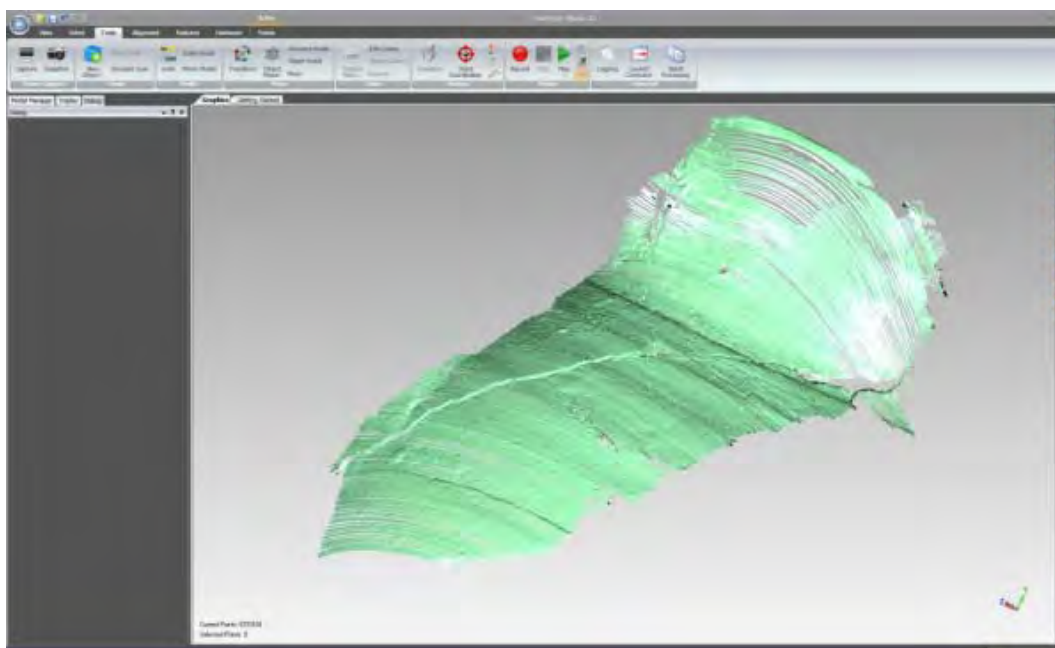
Rys. 3.6.8. Efekty filtrowania sygnału odbitego (powierzchnia)

W wyniku przeprowadzonych testów można zalecić następujące ustawienia parametrów ekspozycji:

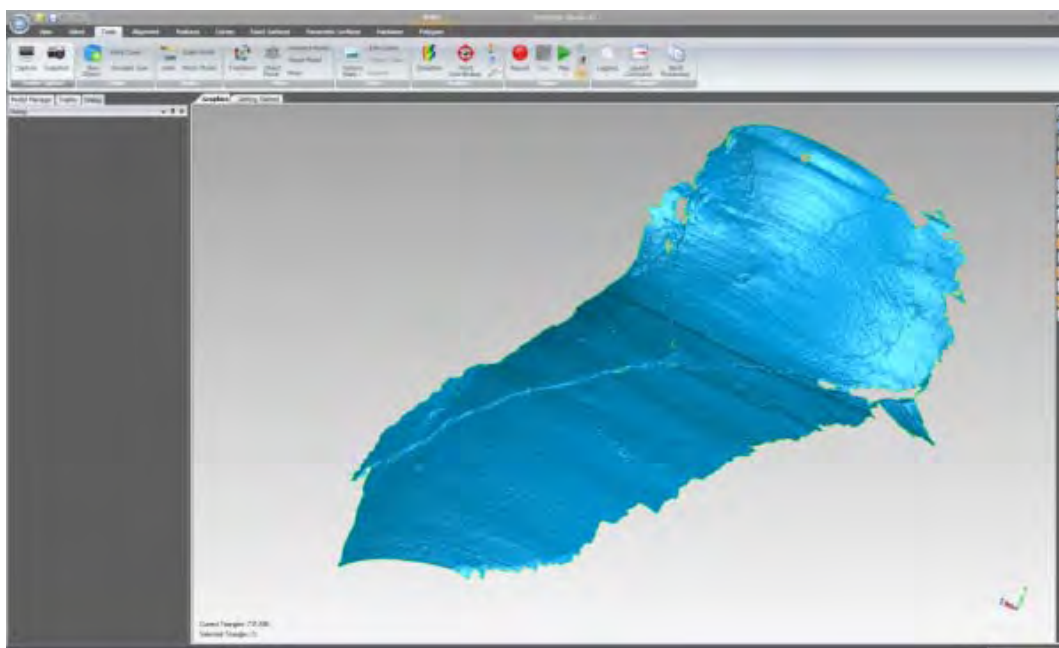
- a) W przypadku eksponatu wykonanego z ceramiki (Rys. 3.6.9 – należy zwrócić uwagę na przykład wykorzystania materiału półprzezroczystego jako statywu niewidocznego dla skanera). Materiał jest jasny, matowy, bez wyraźnej faktury. Dla tego eksponatu automatyczne ustawienia ekspozycji i progu wynoszą odpowiednio: 9/80 i 9/255. Należy przy tym zaznaczyć, że dla tego materiału uzyskiwano identyczne wyniki dla ustawień w bardzo szerokim zakresie (ekspozycja: od 5/80 do 80/80, przy bardzo niskiej wartości progu szumu: 9/255). Skaner doskonale wychwytuje pęknięcia na powierzchni eksponatu (Rys. 3.6.10 i 3.6.11) oraz odwzorowuje jego krawędzie (Rys. 3.6.12 i 3.6.13), co otwiera możliwości wykorzystania modeli części rozbitego naczynia do jego cyfrowej rekonstrukcji – algorytmy realizujące funkcje automatycznego dopasowania kształtów już istnieją. Oczywiście, ze względu na różnorodność materiałów ceramicznych i ich cech optycznych, eksponat ten nie jest reprezentatywny dla całej grupy.



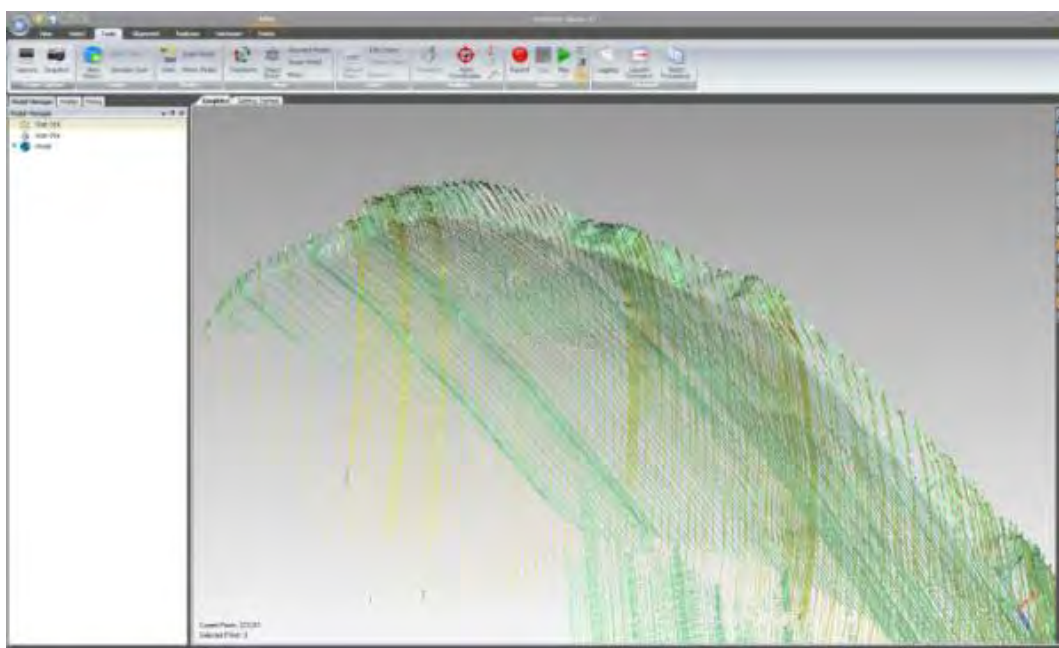
Rys. 3.6.9. Testowy eksponat wykonany z ceramiki



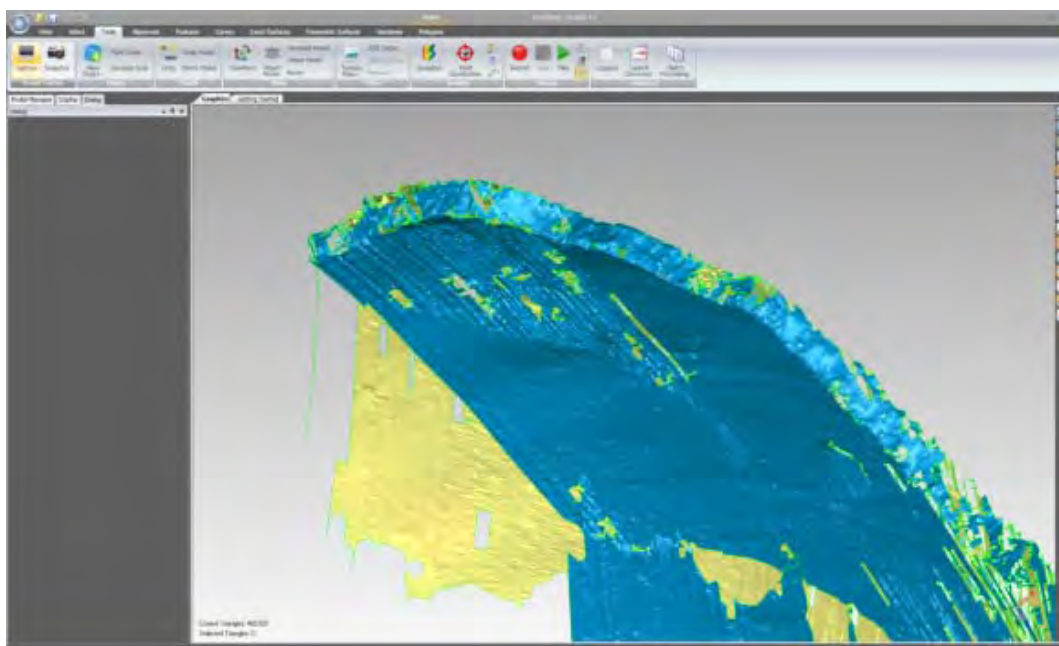
Rys. 3.6.10. Testowy eksponat wykonany z ceramiki (chmura punktów)



Rys. 3.6.11. Testowy eksponat wykonany z ceramiki (powierzchnia)



Rys. 3.6.12. Testowy eksponat wykonany z ceramiki – skan krawędzi (chmura punktów)



Rys. 3.6.13. Testowy eksponat wykonany z ceramiki – skan krawędzi (powierzchnia)

- b) W przypadku eksponatu wykonanego z drewna, jakim jest blok linowy (Rys. 3.6.14), mamy do czynienia z materiałem matowym, ciemnym, posiadającym wyraźną fakturę. Co więcej, eksponat ten można uznać za reprezentatywny dla tej grupy.



Rys.3.6.14. Testowy eksponat wykonany z drewna

Materiał ten wymaga wysokich wartości parametru ekspozycji przy niskich wartościach progu szumów. Wartości ekspozycji ustawiane automatycznie wahały się między 60/80 a 70/80, przy wartości progu szumów ok. 10/255. Poprawne wyniki uzyskiwane były dla ekspozycji powyżej wartości 50/80.

- c) Ostatni eksponat testowy to metalowe naczynie (Rys. 3.6.15) o kolorze jasnym i powierzchni z drobną, ale wyraźną fakturą, o średnim połysku, z wyraźnymi plamami matowego nalotu. Wartość ekspozycji ustawiona automatycznie wynosi 9/80 przy wartości progu szumów 40/255. Takie nastawy powodowały pojawianie się błędów związanych z wielokrotnym odbiciem wiązki, które zniknęły po podniesieniu wartości progu do 120/255. Wiązało się to z jednoczesną utratą punktów pomiarowych w obszarach matowych. Eksponat ten jako jedyny

sprawił problemy z uzyskaniem kompletnego skanu. Najlepsze wyniki (choć wciąż niezadowalające) uzyskano przy wartości ekspozycji 40/80 i wartości progu szumu 180/255. Rozwiązaniem dla tego typu obiektów wydaje się użycie środka matowiącego powierzchnię. Po pokryciu naczynia talkiem uzyskano kompletny skan przy parametrach skanowania jak dla ceramiki. Producent zaleca wykorzystanie w tym celu łatwo usuwalnego sprayu zawierającego np. tlenek tytanu. Decyzję o tymczasowym pokryciu środkiem matowiącym powierzchnię można podjąć wyłącznie po konsultacji z konserwatorem.



Rys. 3.6.15. Testowy eksponat wykonany z metalu

Nie stwierdzono wpływu oświetlenia naturalnego i jarzeniowego na uzyskane wyniki. Pomiary prowadzono w ziemi, dlatego należy sprawdzić jeszcze ewentualny wpływ silnego światła słonecznego w sezonie letnim, co może być szczególnie istotne w przypadku prowadzenia pomiarów terenowych. Należy również przewidzieć wykonanie testów wpływu oświetlenia sztucznego wybranego do pracowni pomiarowej, zwłaszcza jeśli będzie to oświetlenie energooszczędne, charakteryzujące się dyskretną emisją światła.

Podsumowując:

- a) Należy dążyć do pozyskania jak najwyższej jakości danych bazowych bez użycia algorytmów modyfikujących wartości pomiarów.
- b) Zaleca się wykorzystanie automatycznego ustawiania warunków ekspozycji dla każdego eksponatu.
- c) Nie zaleca się wykorzystywania algorytmów automatycznej regulacji ekspozycji, ze względu na spowolnioną pracę skanera.
- d) W przypadku powierzchni silnie kontrastowych zaleca się matowienie powierzchni, jeżeli to niemożliwe – skanowanie przy wysokich wartościach ekspozycji i progu szumów, a w skrajnych przypadkach można wykonać kilka skanów przy różnych parametrach, usunąć zaszumienie i połączyć przetworzone skany w jeden, z uwzględnieniem warunku a.

3.7. Określenie wpływu parametrów skanowania na pracochołoność

Ocena czasochłonności procesu skanowania jest w znacznej mierze subiektywna. Część czynników wpływających na efektywność skanowania jest dobrze określona i łatwo mierzalna (używanie najwyższych rozdzielczości i stałych parametrów skanowania). Jednak efekt końcowy jest w bardzo dużej mierze zależny od czynników subiektywnych. Urządzenie pomiarowe zostało zaprojektowane do obsługi manualnej, stąd właśnie sprawność oraz doświadczenie operatora są czynnikami o kluczowym znaczeniu dla pracochołoności procesu. Najważniejsze czynniki zidentyfikowane w trakcie realizacji projektu obejmują:

- a) planowanie pomiarów
 - skanowanie powinno przebiegać wzdłuż dłuższego boku eksponatu (minimalizacja redundancji pomiarów, łatwość uzyskania stabilnej prędkości prowadzenia sondy, większe obszary skanowane pojedynczym przebiegiem skanera)
 - w miarę możliwości cały pomiar należy wykonać przy pojedynczym zamocowaniu eksponatu i skanera (ominięcie procedury łączenia skanów)
 - możliwie ergonomiczna pozycja (praca z Faro ScanArm jest zadaniem wyczerpującym fizycznie, wobec czego znaczenie ma również kondycja fizyczna operatora)
 - w przypadku konieczności łączenia kilku skanów należy zadbać o punkty referencyjne, pozwalające na ich szybkie i dokładne łączenie (np. stała siatka punktów referencyjnych w pracowni pomiarowej)
 - wybór obszarów do pomiarów metodą kontaktową i bezkontaktową;

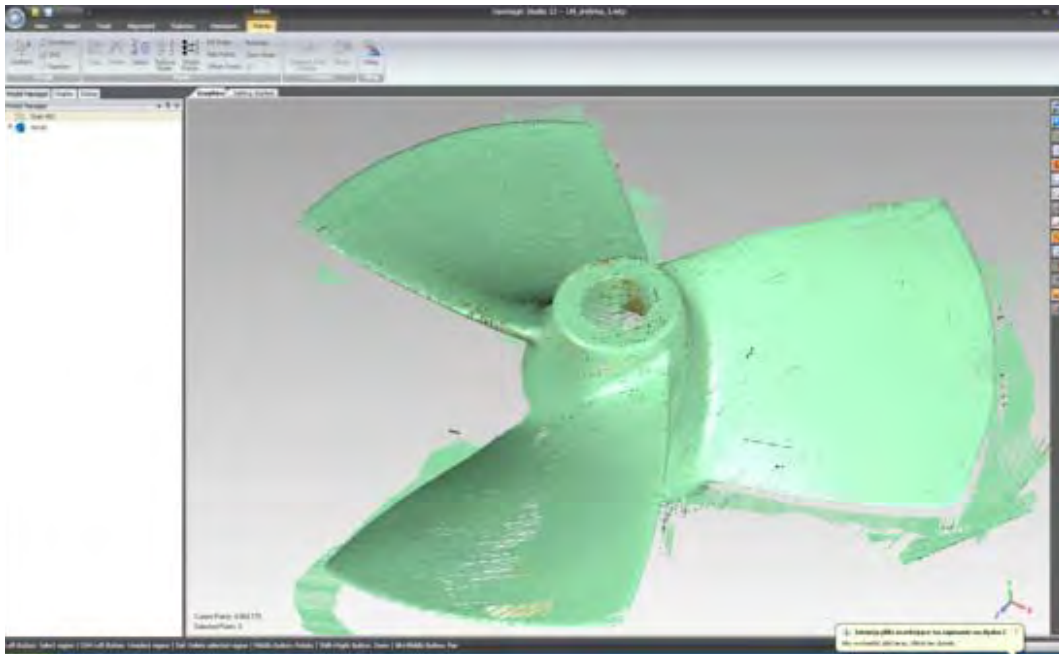
b) technikę pracy

- łokieć ramienia powinien być położony poziomo,
- sondę należy trzymać wyłącznie za uchwyt (w żadnym wypadku nie wolno trzymać skanera),
- pewne zamocowanie eksponatu (brak konieczności powtarzania pomiaru po dotknięciu eksponatu);

c) infrastrukturę

- komputer rejestrujący i przetwarzający dane o odpowiedniej mocy obliczeniowej i prędkości zapisu danych na dysk,
- elementy wspomagające wykonanie pomiarów (wózki do prowadzenia sondy, ciężki, stabilny wózek do szybkiego przemieszczania skanera),
- odpowiednio rozmieszczone gniazda zasilania i USB, pozwalające na umieszczenie skanera w dowolnym punkcie pracowni, bez konieczności rozciągania okablowania,
- rozdzielenie pozyskiwania i przetwarzania danych, co pozwoli na ich równoległą realizację,
- odpowiednie uchwyty do eksponatów pozwalające na wykonanie pomiaru z jednego zamocowania (imadło igłowe, imadło pionowe),
- stanowisko niewprowadzające szumów (stół pomiarowy czarny polerowany lub przezroczysty, podobnie osprzęt pomiarowy).

Ze względu na stosunkowo krótki okres realizacji projektu trudno ocenić, na ile umiejętności wykonawców mogą stanowić referencję dla późniejszych wyników w zakresie efektywności skanowania. W czasie samego projektu zaobserwowano wzrost poziomu umiejętności, pozwalający na prawie dwukrotne skrócenie czasu skanowania tych samych elementów. Ostatecznie czas potrzebny do wykonania digitalizacji jest zawsze zależny od konkretnego eksponatu, jego wielkości, kształtu i własności optycznych. Wszystkie skany wykonane w trakcie projektu zostały ograniczone czasowo, tzn. maksymalny dopuszczalny czas pomiarów ustalono na 3 minuty – stąd ilustracje przedstawiające jedynie fragmenty modeli. W celu oszacowania pracochłonności wykonano jeden kompletny pomiar (śruba pojazdu głębinowego – Rys. 3.7.1), co trwało ok. 30 minut na początku projektu i ok. 17 minut tuż przed jego końcem. Na tym etapie można jedynie szacować, że docelowo pełny skan tej wielkości obiektu wraz z obróbką danych i wygenerowaniem modelu powierzchniowego do celów wizualizacyjnych zajmie ok. 2 roboczogodzin.



Rys. 3.7.1. Testowy eksponat wykonany z metalu

Podsumowanie:

1. Czasochłonność pomiarów jest w znacznej mierze efektem umiejętności operatora i może bardzo różnić się w zależności od doświadczenia i umiejętności osoby obsługującej ramię pomiarowe.
2. Drugim istotnym czynnikiem jest odpowiednie przygotowanie infrastruktury pomiarowej, ze szczególnym uwzględnieniem ergonomicznej pozycji pracy operatora.

3.8. Skanowanie elementów wraku

W oparciu o metodykę i zakres badań, przedstawione w punkcie 2, przeprowadzono szereg pomiarów za pomocą skanera Faro ScanArm z sondą laserową oraz dokonano ich analizy w kontekście wymagań stawianych modelom cyfrowym. Przed przystąpieniem do właściwych pomiarów wykonano dokumentację ponad 30 obiektów, w celu zbudowania i utrwalenia umiejętności posługiwania się ramieniem pomiarowym i oprogramowaniem. Zestawienie pomiarów przedstawia tabela 3.8.1, wyniki zostały załączone w postaci plików natywnych programu Geomagic (*.wpr) – łącznie 3,6 GB danych. Obejmują one elementy kadłuba wraku Miedziowca i prezentują jakość pozwalającą na dalsze przetwarzanie w celu cyfrowej rekonstrukcji jednostki.

W trakcie realizacji pomiarów wstępnych dopracowano szereg punktów procedury pomiarowej, dopasowując je do nieznanych wcześniej warunków prowadzenia pomiarów oraz specyfiki pracy z eksponatami. Studenci wykonujący pomiary popełnili też szereg błędów, które dały znać o sobie dopiero na późniejszych etapach. Najważniejsze wnioski wynikające z realizacji tego etapu:

1. Operator ramienia pomiarowego musi posiadać niezbędną wiedzę merytoryczną, w celu wychwycenia istotnych szczegółów i akceptacji dopuszczalnych uproszczeń.
2. Należy, przynajmniej w początkowej fazie, łączyć skanowanie z późniejszą obróbką danych. Okazuje się, że największe doświadczenie w zakresie poprawnego skanowania uzyskuje się w trakcie późniejszej obróbki danych. Dotyczy to zarówno techniki skanowania, jak i wyboru szczegółów do dokładnego zobrazowania.
3. Przynajmniej wstępna obróbka powinna być wykonana bezpośrednio po skanowaniu, przez osobę wykonującą digitalizację, w warunkach dostępności eksponatu – w razie wątpliwości można wykonać dodatkowy skan i połączyć go z resztą. Należy pamiętać, że niektóre z eksponatów mogą ważyć kilkaset kilogramów i ponowne przygotowanie ich do digitalizacji może być bardzo czasochłonne. Należy upewnić się o kompletności skanu przed zdjęciem eksponatu ze stanowiska pomiarowego.
4. Łączenie skanów – możliwe jest wykonanie automatyczne tej operacji, zaleca się jednak stosowanie punktów referencyjnych, np. w postaci przynajmniej 3 wkrętów. Pozwala to na skrócenie procedury rejestracji skanów z 15–20 minut (automatycznie na podstawie samych pomiarów) do kilkunastu sekund (poprzez manualne wskazanie punktów referencyjnych). W przypadku łączenia automatycznego, należy pamiętać, aby na łączonych skanach znalazły się te same fragmenty eksponatu, najlepiej detale o charakterystycznym kształcie (nie-wielkim promieniu krzywizny).
5. Ociążenie ramienia – praca ramieniem pomiarowym wymaga pewnego wysiłku fizycznego, co w ciągu kilku godzin pracy może powodować znaczne zmęczenie operatora. Z tego powodu zaleca się podwieszenie ramienia na sprężynie lub przeciwwadze, kompensującej znaczną część ciężaru sondy pomiarowej.
6. Pracownia dokumentacji zabytków archeologicznych Ośrodka Kultury Morskiej w Gdańsku jest pomieszczeniem, gdzie planowane jest wykonywanie digitalizacji zabytków, a jednocześnie przewiduje się tam wstępną ich konserwację. Obecność wianien oraz operowanie dużymi i mokrymi eksponatami powoduje pojawienie się niebezpieczeństwa w postaci mokrej podłogi, zamoczonych stołów, wody ociekającej z przenoszonych suwnicą eksponatów. Z tego powodu należy szczególną uwagę zwrócić na bezpieczeństwo obsługi (możliwość poślizgu) oraz sprzętu (zamoczenie).

Jednym z celów tego etapu było również zbadanie przydatności ramienia pomiarowego w warunkach terenowych. Już wcześniej zakres został ograniczony do ekspozycji zewnętrznych w kontrolowanych warunkach terenowych, z wykluczeniem stanowisk archeologicznych, na których nie przeprowadzono odpowiedniego przygotowania stanowiska do pracy ramieniem (stabilne podłoże do ustawienia statywu ramienia, odpowiednie źródło zasilania etc.). W tym kontekście najważniejsze problemy związane z użyciem ramienia poza pracownią obejmują:

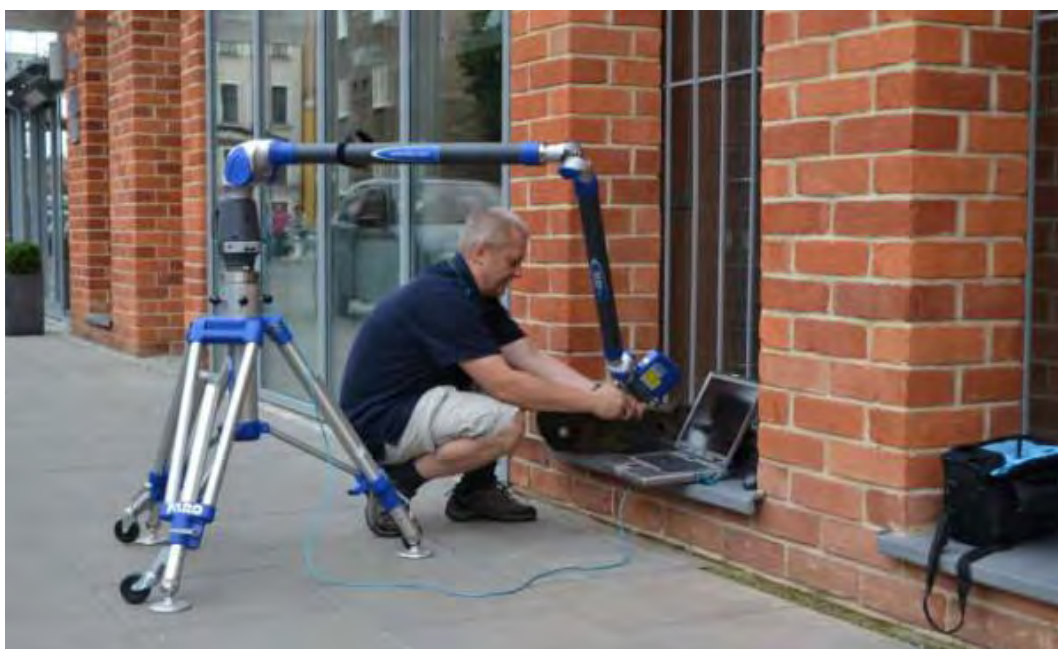
1. Zasilanie – ramię i komputer pomiarowy mogą być zasilane z wewnętrznych baterii, jednak czas pracy w tym trybie jest ograniczony. W przypadku ramienia stwierdzono możliwość pracy przez ok. 20 min z sondą laserową oraz ok. 60 min z sondą mechaniczną. Niski stan naładowania akumulatora objawia się automatycznym wyłączeniem trybu optycznego i przejściem ramienia w tryb pomiaru kontaktowego. Dla zapewnienia dłuższej pracy zaleca się stosowanie generatora lub UPS 230 V. Rozwiązaniem mogą być dodatkowe baterie, wprawdzie wymiana bez zasilania zewnętrznego wiąże się ze wznowieniem działania urządzenia, jednak zajmuje to zaledwie ok. 30 s. Większym problemem może być konieczność osiągnięcia ustalonej temperatury przy pierwszym załączeniu (wymagany czas nagrzewania to 15 min).
2. Oświetlenie – przy pomiarach optycznych istotnym czynnikiem wpływającym na wyniki mogą być zakłócenia, jakie wprowadza sztuczne lub naturalne oświetlenie o wysokim natężeniu. W przypadku pomiarów sondą laserową interesuje nas szczególnie możliwość wykonania pomiarów w warunkach bezpośredniego oświetlenia światłem słonecznym. Pierwsze próby wykonane w zimie, w słoneczny dzień, na eksponacie oświetlonym bez-

pośrednio przez światło słoneczne, a następnie przez sztuczne światło jarzeniowe, nie wykazały jakiegokolwiek wpływu zewnętrznego oświetlenia na jakość pomiarów. Dla potwierdzenia obserwacji test powtórzono w lecie, w warunkach terenowych, ok. południa, z identycznym rezultatem. Ponieważ jednak warunki atmosferyczne uniemożliwiały wykonanie badania w warunkach pełnej ekspozycji na światło słoneczne (niewielkie, stałe zachmurzenie), możliwe jest zaistnienie sytuacji, w której miejsce pomiaru należy zasłonić.

3. Organizacja stanowiska – ramię pomiarowe, w przeciwieństwie do wielu skanerów geodezyjnych, nie jest samodzielnym urządzeniem i do pracy wymaga komputera. Monitorowanie wyników pomiarów odbywa się na bieżąco na jego ekranie, na który operator powinien mieć zapewnioną stałą widoczność. Wbrew pozorom rozwiązanie tego problemu nie jest trywialne, nawet w warunkach laboratoryjnych – zasięg ramienia wynosi 3,6 m i już sam ten fakt może utrudniać obserwację ekranu (stanowisko w czasie testów prezentują Rys. 3.8.1 i 3.8.2). W warunkach terenowych nabiera to szczególnego znaczenia, ze względu na obniżoną czytelność ekranów LCD w pełnym słońcu. Dlatego zaleca się zapewnienie wózka z ekranem osłaniającym monitor i ułatwiającym szybko przemieszczanie zestawu.



Rys. 3.8.1. Testy ramienia w warunkach terenowych



Rys. 3.8.2. Testy ramienia w warunkach terenowych

Podsumowując:

1. Należy zapewnić realizację całości procesu digitalizacji przez tego samego operatora (skanowanie, przetwarzanie, archiwizacja).
2. Poziom wiedzy merytorycznej i narzędziowej jest krytyczny dla efektywności procesu digitalizacji.
3. Zaleca się wprowadzenie rozwiązań podnoszących komfort pracy operatora.
4. Do pracy w warunkach terenowych należy przygotować mobilny zestaw dla komputera i zasilacza.

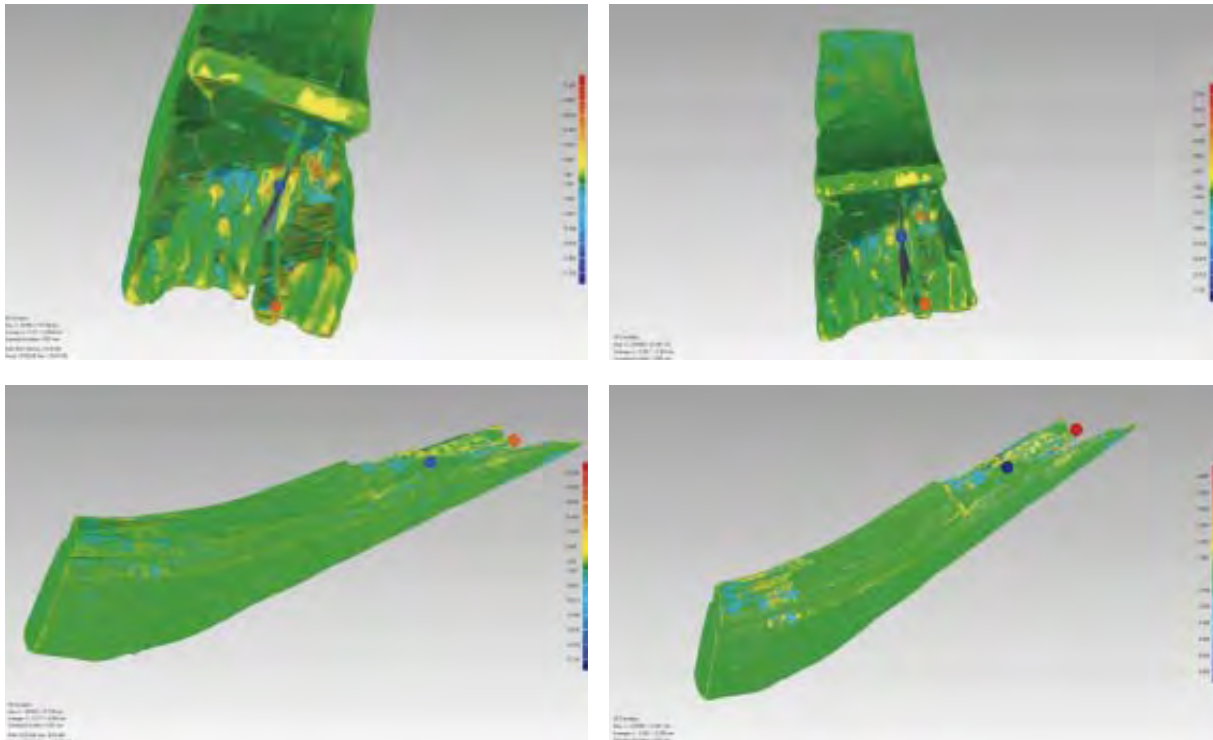
Lp.	Nazwa obiektu	Data [dd. mm.yyyy]	Czas wykonywania skanu [hh:mm:ss.____]	Typ skanu	Ilość punktów	Rozmiar pliku [kB]
1	CMM/BO/NW/429	12.06.2012	00:13:02.85; 00:14:37.71	skan mechaniczny, interwał 10 mm	1415; 1677	108
2		12.06.2012	00:07:23.88; 00:06:05.67	skan laserowy	1667010; 1976309	78561
3	CMM/BO/NW/407	12.06.2012	00:06:50.10; 00:05:58.43	skan laserowy	2240838; 1847467	87049
4		12.06.2012	00:12:54.33; 00:11:32.92	skan mechaniczny, interwał 10 mm	1410; 1231	104
5	CMM/BO/NW/439	12.06.2012	--:--:--	skan mechaniczny, interwał 10 mm	1072	54500
6		13.06.2012	--:--:--	skan laserowy	2590931	
7		13.06.2012	00:15:27.79; 00:11:44.35	skan laserowy	2450996; 1654193	88676
8		13.06.2012	00:24:09.58	skan mechaniczny, interwał 10mm	944	
9	CMM/BO/NW/510	13.06.2012	00:14:16.61; 00:02:31.56; 00:09:39.85; 00:05:23.45	skan laserowy/ skan mechaniczny, interwał 10 mm	3050505; 235;831; 1645497	100978
10	CMM/BO/NW/431	13.06.2012	00:08:09.78; --:--:--	skan laserowy/ skan mechaniczny, interwał 10 mm	2438300; 494	66713
11	CMM/BO/NW/549	13.06.2012/ 14.06.2012	--:--:--	skan laserowy/ skan mechaniczny, interwał 10 mm	1492973; 228; 1937701	73781
12	CMM/BO/NW/546	14.06.2012	--:--:--	skan laserowy/ skan mechaniczny, interwał 10 mm	3328748; 628	71728
13		14.06.2012	--:--:--	skan laserowy/ skan mechaniczny, interwał 10 mm	2754102; 536	59317
14	W-5/460/17	14.06.2012	--:--:--	skan laserowy/ skan mechaniczny, interwał 10 mm	5044863; 1149	108764
15	CMM/BO/NW/545	14.06.2012	--:--:--	skan mechaniczny, interwał 10mm	848; 503	82
16	CMM/BO/NW/437	15.06.2012	00:09:05.95; 00:04:43.46	skan laserowy/ skan mechaniczny, interwał 10 mm	5264177; 293	114184
17		15.06.2012	00:11:06.84; 00:01:48.83	skan laserowy/ skan mechaniczny, interwał 10 mm	3061362; 122	66083
18		15.06.2012	00:05:01.07; 00:03:45.60	skan laserowy/ skan mechaniczny, interwał 10 mm	3495250; 325	75173
19		15.06.2012	00:10:28.27;	skan laserowy	3023722	65035

20	CMM/BO/NW/527	15.06.2012	00:09:20.94;	skan laserowy	2892031	173512
21	CMM/BO/NW/508	18.06.2012	00:04:42.99; 00:09:42.14; 00:03:21.71; --:--:--:--;	skan mechaniczny, interwał 10 mm/ skan laserowy	377; 2992465; 397; 3808274	146716
22	CMM/BO/NW/547	18.06.2012	00:08:45.62; 00:05:25.06; 00:07:25.98; --:--:--:--;	skan laserowy/ skan mechaniczny, interwał 10 mm	2017532; 456; 2731200; 156	116454
23	CMM/BO/NW/409	18.06.2012	00:24:48.78; --:--:--:--;	skan laserowy/ skan mechaniczny, interwał 10 mm	4778287; 357	180951
24	CMM/--/--/---	18.06.2012	--:--:--:--	Skan laserowy	3620831	77864
25	CMM/BO/NW/516	19.06.2012	ok. 00:45:00.00	skan laserowy/ skan mechaniczny, interwał 10 mm	13361579	230445
26	CMM/BO/NW/416	20.06.2012	--:--:--:--	skan laserowy/ skan mechaniczny, interwał 10 mm	6129661	132404
27	CMM/BO/1007	20.06.2012	--:--:--:--	skan laserowy	688924	14970
28			--:--:--:--	skan laserowy/ skan mechaniczny, interwał 10 mm	4993323	81631
29	CMM/BO/NW/428	20.06.2012	--:--:--:--	skan laserowy/ skan mechaniczny, interwał 10 mm	1177055	99825
30	CMM/BO/NW/435	20.06.2012	--:--:--:--	skan laserowy/ skan mechaniczny, interwał 10 mm	2467090	49156
31	CMM/BO/NW/421	21.06.2012	--:--:--:--	skan laserowy/ skan mechaniczny, interwał 10 mm		96281
32	CMM/BO/NW/420	21.06.2012	00:10:08.48; 00:08:39.65	skan laserowy	1801276; 2139941	76305
33	CMM/BO/NW/419	21.06.2012	00:09:19.17;	skan laserowy/ skan mechaniczny, interwał 10 mm	884477; 766314	30491
34	CMM/BO/NW/415	21.06.2012	00:09:30.23; --:--:--:--	skan laserowy/ skan mechaniczny, interwał 10 mm	1641961; 1533788	53415
35	CMM/BO/NW/432	21.06.2012	--:--:--:--	skan laserowy	2464780	68588

Tabela 3.8.1. Zestawienie pomiarów

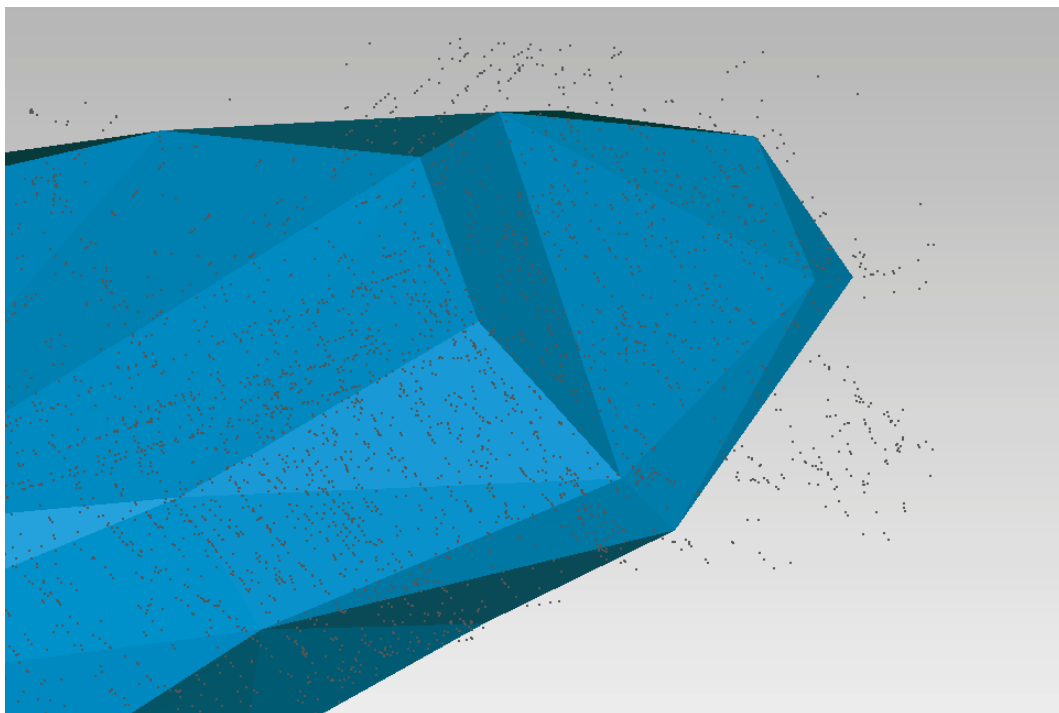
3.9. Wielkość plików zawierających dane

W celu oszacowania wielkości plików z danymi w różnych formatach i stopniach uproszczenia wykonano kompletny skan dużego elementu poddano go obróbce. Elementem testowym jest dziobnica wraku nieznanej jednostki, wyrzucona przez morze na brzeg. Plik z nieprzetworzonymi danymi zawiera ok. 22 mln punktów i jest traktowany jako referencja dla kolejnych stopni uproszczenia. Program umożliwia automatyczne generowanie powierzchni (*polygonmesh*) na podstawie chmury punktów. W skrajnym przypadku siatka może obejmować wszystkie punkty, jednak trudno tutaj mówić o uproszczeniu. Wykonano szereg modeli powierzchniowych w formacie STL, o liczbie trójkątów od 166000 (dokładny, z lewej) do 13000 (uproszczony, z prawej) – Rys. 3.9.1. Kolor zielony oznacza błąd w zakresie +/- 1 mm w stosunku do danych referencyjnych, żółty +1 do 2 mm, jasny niebieski -1 do 2 mm.



Rys. 3.9.1 Modele powierzchniowe o różnym stopniu uproszczenia

Dla modeli tych zmierzono parametry dewiacji w stosunku do referencyjnej chmury punktów. Wyniki z nich jednoznacznie niewielki wpływ nawet stosunkowo dużych uproszczeń geometrii modelu na średnią dokładność odwzorowania chmury punktów. Widzimy niewielkie obszary o bardzo dużym błędzie (maks. ponad 27 mm), które znajdują się w strefie przełomu eksponatu. Geometria tam charakteryzuje się bardzo dużymi zmianami i algorytm generujący powierzchnię, nawet bardzo szczegółowo, dokonuje wyraźnych przybliżeń (Rys. 3.9.2). Natomiast na obszarach o niewielkich krzywiznach nawet bardzo duże uproszczenia nie powodują znaczących błędów. Nawet 100-krotne zmniejszenie wielkości pliku skutkuje średnim błędem poniżej 0,4 mm.

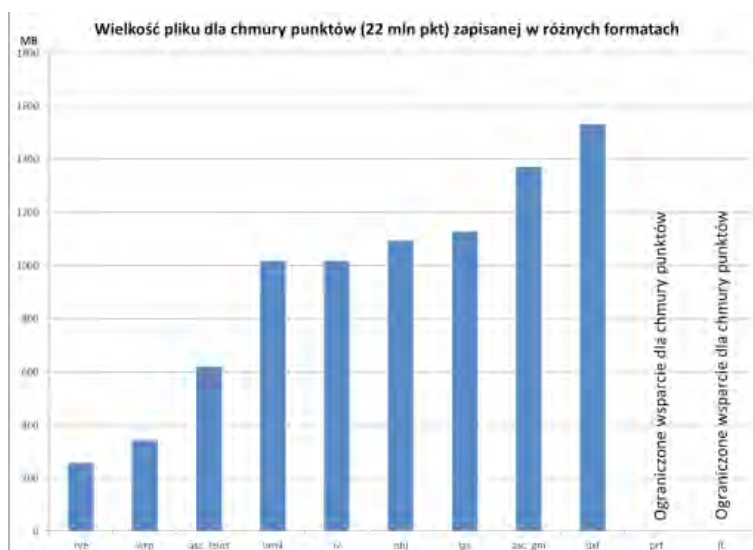


Rys. 3.9.2. Chmura punktów i powstała na niej powierzchnia

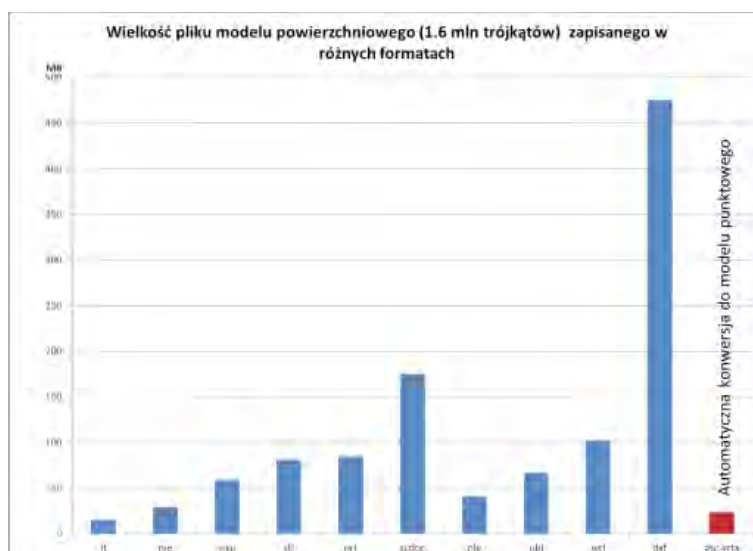
STL – liczba trójkątów	Maksymalny błąd (+) [mm]	Maksymalny błąd (-) [mm]	Średni błąd [mm]	Średni błąd (+) [mm]	Średni błąd (-) [mm]	Dewiacja standardowa [mm]	Rozmiar pliku [kB]
13000	20.6	-27.3	0.042	0.377	-0.4	0.65	238
35000	20.6	-27.2	0.018	0.301	-0.337	0.609	593
67000	20.6	-27.1	0.011	0.28	-0.32	0.599	1183
83000	20.82	-27.3	0.032	0.313	-0.346	0.62	1464
150000	20.5	-27.26	0.006	0.266	-0.308	0.594	2671
335000	20.48	-27.24	0.004	0.261	-0.303	0.591	5892
830000	20.49	-27.25	0.003	0.258	-0.299	0.59	14625
1600000	20.49	-27.25	0.002	0.258	-0.299	0.59	29184

Tabela 3.9.1. Wyniki pomiarów błędów uproszczeń modeli powierzchniowych

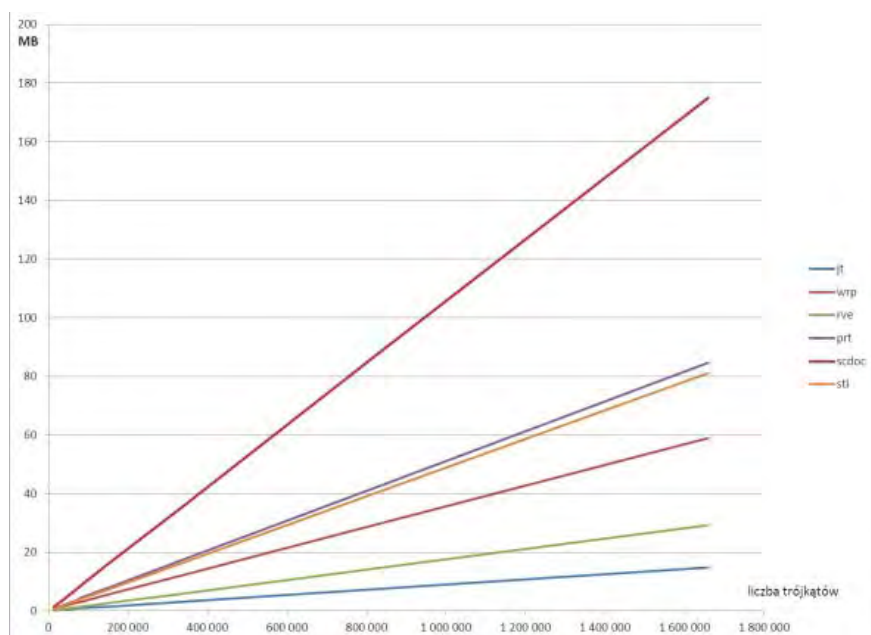
Kolejnym problemem jest wybór odpowiedniego formatu zapisu. W tym celu dokonano konwersji istniejących uproszczonych modeli do szeregu powszechnie stosowanych formatów. Wyniki prezentują Rys. 3.9.3 i 3.9.4. Dodatkowo należało zbadać, czy wielkość plików dla wybranych formatów rośnie proporcjonalnie do liczby punktów/trójkątów (Rys. 3.9.5) i oszacować pojemność właściwą formatów (liczba trójkątów na 1 kB) – tabela 3.9.2.



Rys. 3.9.3. Wielkość pliku zawierającego chmurę punktów w zależności od formatu zapisu



Rys. 3.9.4. Wielkość pliku z modelem powierzchniowym w zależności od formatu zapisu



Rys. 3.9.5. Wielkość pliku z modelem testowym, w zależności od liczby trójkątów

Jak widać, dla przechowywania modeli powierzchniowych doskonały jest format JT, natomiast format RVE (natywny format programu Leios – alternatywy dla Geomagic) doskonale sprawdza się w przypadku trójkątów i punktów (format JT wprawdzie obsługuje chmury punktów, jednak konwersja do tego formatu dostępna jest jedynie poprzez systemy CAD, które słabo obsługują ten typ danych). Stosowanie danych w formatach skompresowanych jest celowe wyłącznie w przypadku kopii bezpieczeństwa.

Format	trójkąty/kB
jt	93.1
rve	25.8
wrp	56.7
stl	18.5
prt	9.5
sdoc	20.5
ply	40.9
obj	24.9
wrl	16.2
dxf	3.5

Tabela 3.9.2. Pojemność formatów

Podsumowanie:

1. Do przechowywania danych źródłowych zaleca się skompresowany format RVE
2. Do przechowywania danych przetworzonych zaleca się format JT, dla którego producent upublicznił specyfikację oraz zapewnia bezpłatną przeglądarkę.
3. Do celów wizualizacyjnych zaleca się format JT i HSF (w trybie on-line) oraz 3D_PDF dla pracy w trybie off-line.

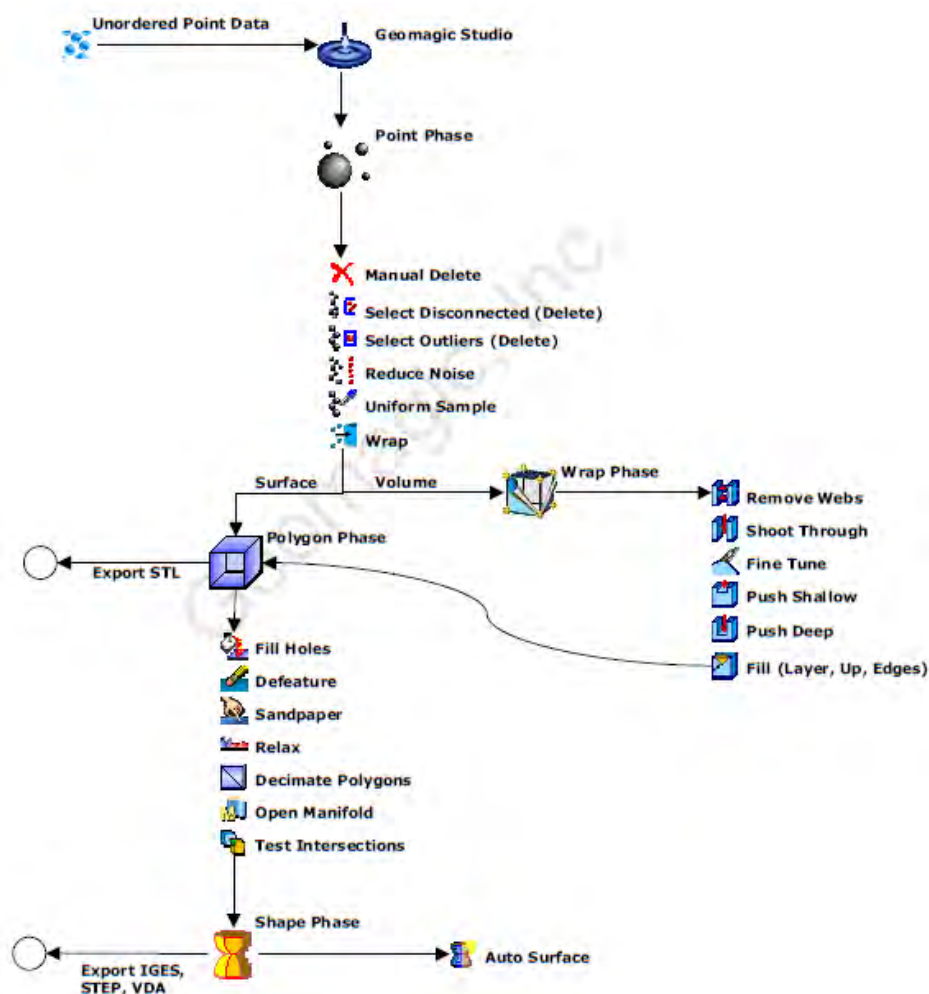
3.10. Przetwarzanie danych

Cały proces przetwarzania danych od postaci pierwotnej (surowe dane opisujące punkty) do końcowej (model bryłowy) jest w znacznej mierze zautomatyzowany i ujęty w dobrze opracowaną procedurę wykorzystania programu Geomagic (Rys. 3.10.1). Jednak ze względu na sporą liczbę błędów pojawiających się w trakcie takich operacjach, niektóre z nich wymagają nadzoru użytkownika. Do tej grupy należą filtrowanie danych punktowych i budowa modelu bryłowego. Filtrowanie punktów obejmuje przede wszystkim usunięcie wyraźnego szumu – grup i pojedynczych punktów, wyraźnie nienależących do skanowanego obiektu (np. podpórki, wyposażenie, szum pomiarów). Program

zapewnia odpowiednie narzędzia, jednak często ich ingerencja jest zbyt głęboka i prowadzi do nadmiernej deformacji modelu. W niektórych przypadkach uważne sterowanie parametrami algorytmów filtrujących jest zupełnie wystarczające, w innych operator musi dokonać selekcji manualnie. Jest to uzależnione od złożoności geometrii i warunków wykonania pomiarów. Niestety, nie ma tutaj prostej recepty, podjęcie decyzji wymaga pewnej praktyki i chwili namysłu.

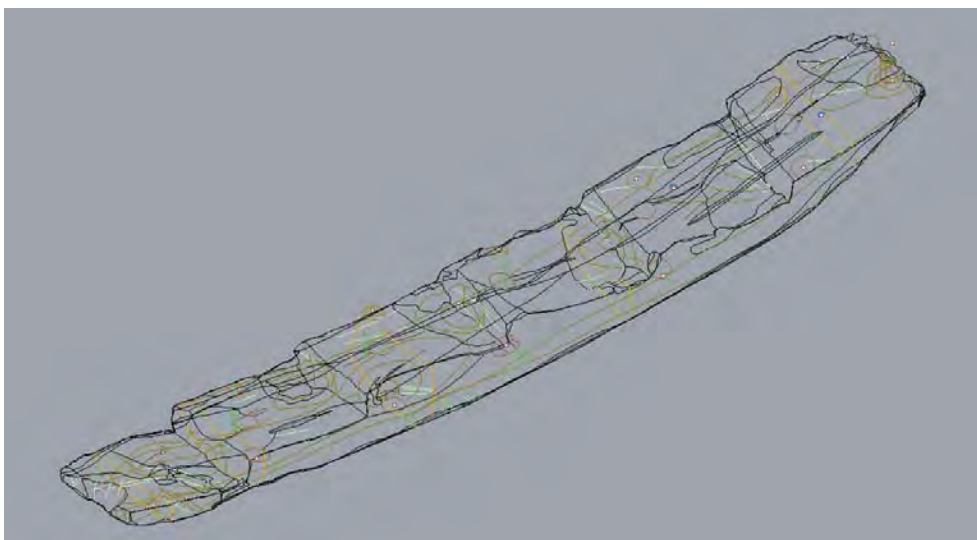
Kolejnym etapem przetwarzania danych punktowych jest ich łączenie (rejestracja). Jeżeli posiadamy kilka skanów tego samego obiektu, wykonanych w różnych pozycjach obiektu lub ramienia pomiarowego, program Geomagic umożliwia nam ich złożenie w spójną całość, pod warunkiem istnienia odpowiednio dużej liczby punktów (obszarów, trójkątów) wspólnych dla przynajmniej dwóch skanów. Ta funkcjonalność programu pozwala ominąć czasochłonną procedurę kalibracji urządzenia po każdorazowym przemieszczeniu ramienia lub eksponatu, jednak może za sobą ciągnąć błędy w odwzorowaniu kształtu. Badanie jakości procedury rejestracji skanów wykonano w aspekcie błędu łączonego modelu w stosunku do modelu referencyjnego, pozyskanego z jednego zamocowania oraz w kontekście czasu potrzebnego do wykonania tej operacji. W tym celu wykonano test dla eksponatu CMM/BO/NW/484. Badaniom podlegał wpływ pola powierzchni nakładających się chmur punktów na czas i jakość rejestracji. Nie zaobserwowano wpływu wielkości nakładających się obszarów, aż do wartości minimalnej, dla której program nie był w stanie wykonać rejestracji. Natomiast bardzo silny wpływ na czas i jakość ma charakter geometrii w nakładających się obszarach – należy w trakcie skanowania zadbać o to, by na łączonych skanach znalazły się elementy charakterystyczne, o dużej krzywiznie (narożniki, małe otwory, pęknięcia itp.). Na 10 prób rejestracji powiodło się 6 (w czasie od 12 do 15 min), a w 4 przypadkach program zgłosił niemożność wykonania dokładnej rejestracji. Błędy powstałe w wyniku łączenia skanów we wszystkich przypadkach kształtowały się w okolicach 0,3 mm, a więc były pomijalne.

Ostatnia grupa operacji filtrowania chmur punktów obejmuje wygładzanie i wypełnianie braków. Te operacje należy prowadzić manualnie i z dużym wyczuciem, ponieważ prowadzą do znaczących zmian w geometrii. Zaleca się ich stosowanie wyłącznie w celach poprawy efektu estetycznego podczas wizualizacji oraz przygotowania modelu bryłowego, z natury bardzo uproszczonego.

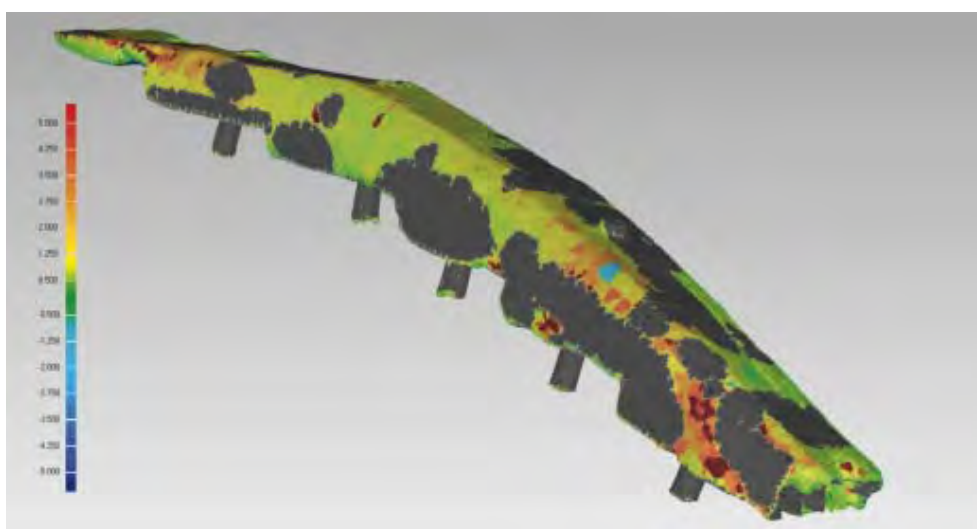


Rys. 3.10.1. Schemat przetwarzania wyników skanowania 3D w programie Geomagic [22]

Budowa modelu powierzchniowego odbywa się całkowicie automatycznie. W przypadku chmury punktów niskiej jakości powstała siatka wymaga półautomatycznej lub manualnej korekty, jednak w większości przypadków prawidłowo przetworzona chmura punktów pozwala na automatyczne wygenerowanie powierzchni. Procedurę testowano na tym samym modelu dziobnicy wraku. Obszary o niewielkich krzywiznach i wyraźnie zaznaczone krawędzie zostały wygenerowane poprawnie, bez konieczności ingerencji operatora. Jednak w obszarze przełomu eksponatu, gdzie geometria jest niezwykle złożona (drzazgi i szczeliny), model wymagał dodatkowych operacji. Program pozwala na usunięcie fragmentów powierzchni, wypełnienie braków oraz wygładzenie wybranych fragmentów. Takie operacje zostały wykonane dla problematycznych partii modelu – w wyniku pojawiły się błędy sięgające 30 mm w stosunku do referencyjnej chmury punktów, jednak uznano, że bardziej dokładne odwzorowanie strefy przełomu nie jest konieczne. Stopień szczegółowości modelu powierzchniowego zależy od jego przeznaczenia – dla celów wizualizacyjnych można zachować nawet przebieg słoju drewna, natomiast dla celów rekonstrukcji modelu bryłowego należy dokonać znacznych uproszczeń. Ważne, że dla celów fizycznej rekonstrukcji (stereolitografia) można wykorzystać model w postaci powierzchniowej. Jak wykazały badania opisane w pkt. 3.3, zastosowane uproszczenia nie mają wielkiego wpływu na średnią dokładność odwzorowania modelu, natomiast jak najbardziej mają znaczenie dla celów wizualizacyjnych. Model uzyskany tą metodą jest dokładniejszy niż wykonany metodą kontaktową. Wynika to z faktu, że w metodzie kontaktowej odtwarzamy głównie krawędzie (Rys. 3.10.2), natomiast powierzchnie między nimi są już tworem sztucznym. Rys. 3.10.3 ilustruje mapę błędów pomiędzy modelem wykonanym metodą kontaktową a referencyjną chmurą punktów. Wyraźnie widać wysoką zgodność na krawędziach przy dużych błędach pomiędzy nimi.



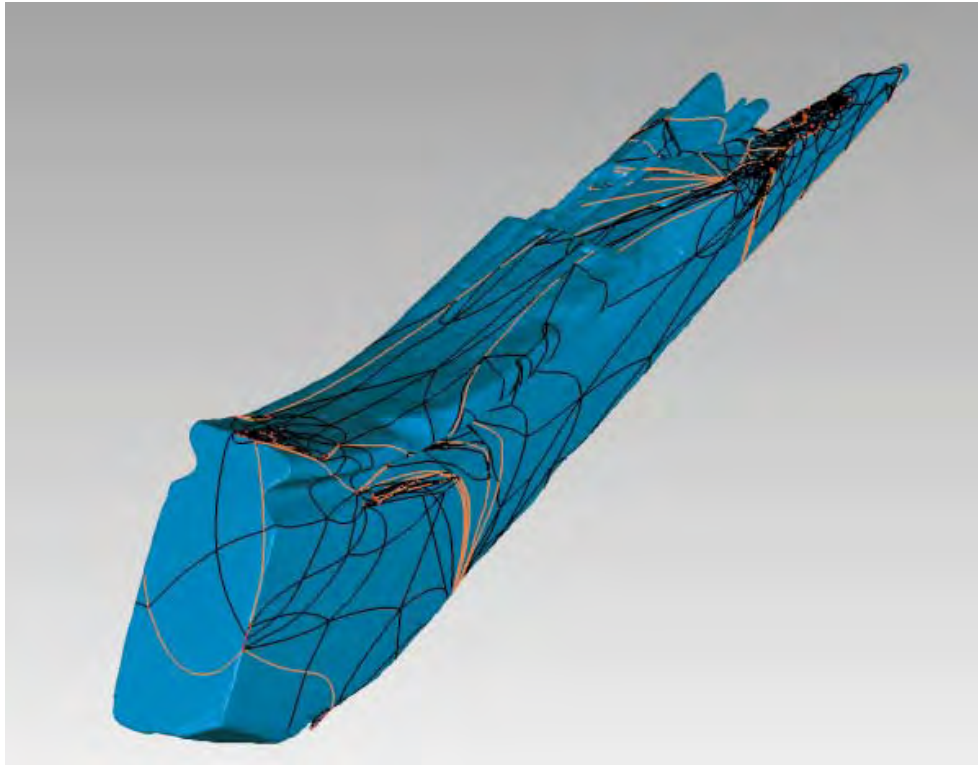
Rys. 3.10.2. Model uzyskany metodą kontaktową



Rys.3.10.3. Mapa błędów na powierzchni modelu uzyskanego metodą kontaktową

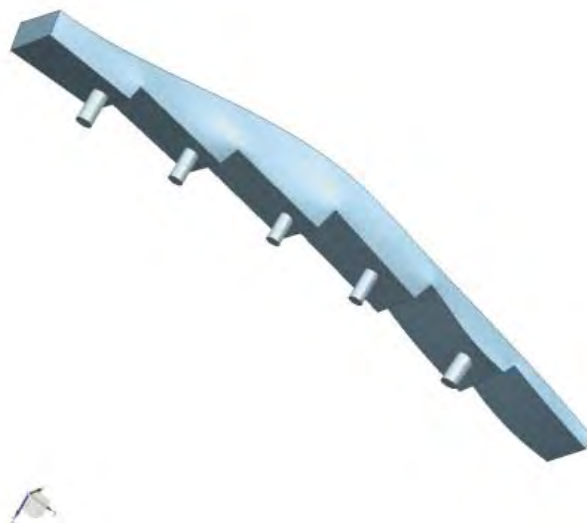
Ze względu na znaczną liczbę punktów źródłowych operacja tworzenia powierzchni trwała od 15 do 20 minut.

Ostatnim etapem rekonstrukcji może być (choć nie zawsze musi) budowa modelu bryłowego, odtwarzającego eksponat z dużymi uproszczeniami, służącego zwykle do rekonstrukcji stanu pierwotnego oraz rekonstrukcji fizycznej. Program Geomagic oferuje narzędzia do automatycznej realizacji tego zadania, jednak uzyskiwane efekty są niezadowalające, szczególnie w przypadku eksponatów z drobnymi detalami (Rys. 3.10.4).



Rys. 3.10.4. Powierzchnia NURBS uzyskana automatycznie w programie Geomagic

Program wprawdzie umożliwia uzyskanie powierzchni o akceptowalnych właściwościach, jednak wymaga to znacznej ingerencji w dane źródłowe (uporządkowanie chmury punktów) oraz dużego doświadczenia i wyczucia. Procedura ta mimo wszystko nie gwarantuje uzyskania pożądanego efektu za pierwszym razem, wymaga oczekiwania na wyniki obliczeń i utrudnia oszacowanie pracochłonności przetworzenia modelu. Dlatego zaleca się wykonanie tego etapu manualnie, w środowisku CAD. W rzeczy samej operacja ta do złudzenia przypomina postępowanie w metodzie kontaktowej, z tą jednak różnicą, że operator pracuje na danych cyfrowych, w wygodniejszej pozycji i warunkach, nie blokując drogiego skanera. Model części testowej CMM/BO/NW/484 (Rys. 3.10.5) został wykonany w ciągu 1 godziny.



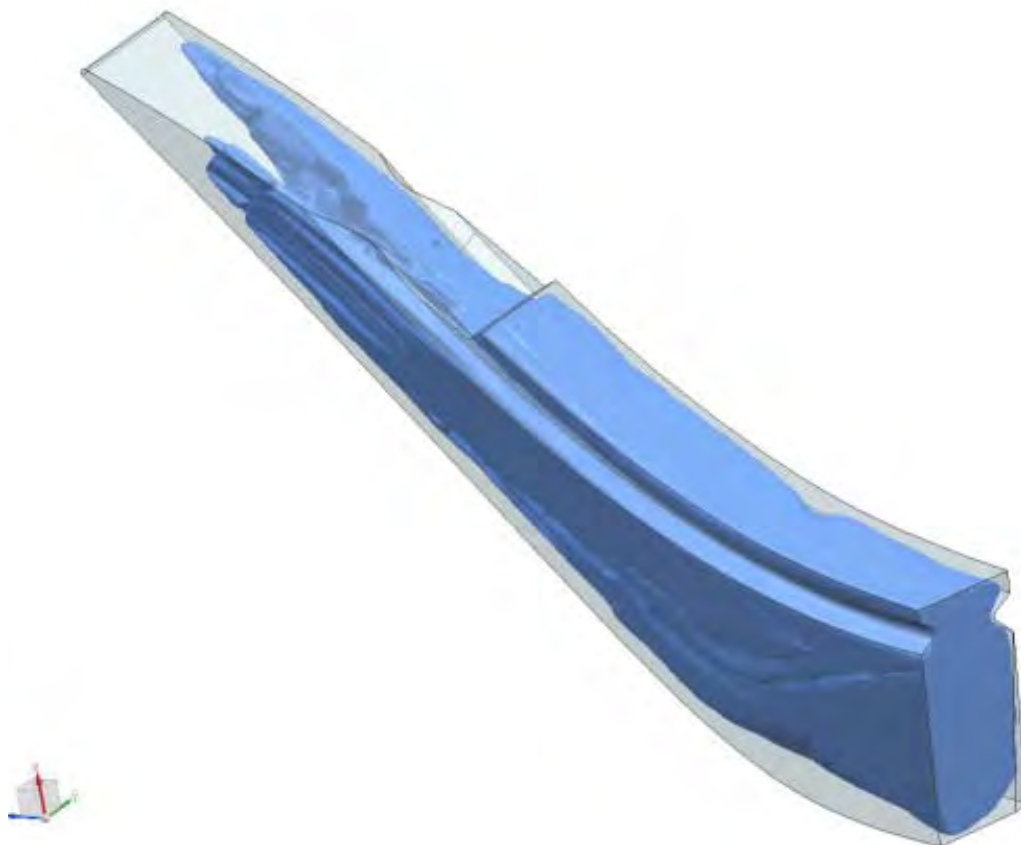
Rys. 3.10.5. Model bryłowy zbudowany w systemie Siemens NX

Dla porównania pracochłonności metody kontaktowej i optycznej, tabela 3.10.1 prezentuje wyniki uzyskane dla tego samego eksponatu CMM/BO/NW/484.

	Metoda kontaktowa	Metoda optyczna		
		Operator	Oprogramowanie	Razem
Skanowanie		0,25 h	0	0,25 h
Rejestracja i filtrowanie punktów		0,1 h	0,25 h	0,35 h
Generowanie modelu powierzchniowego		0,15 h	0,25 h	0,4 h
Generowanie modelu bryłowego		1 h	0	1 h
Razem	3 h (oszacowanie ekspertów)	1,5 h	0,5 h	ok. 2 h

Tabela 3.10.1. Porównanie pracochłonności obu metod

W przypadku fizycznej rekonstrukcji pomniejszonego modelu za pomocą stereolitografii, można zrezygnować z budowy uproszczonego modelu bryłowego. Technologia ta umożliwia budowę fizycznego modelu na bazie modelu powierzchniowego, co skutkuje znacznym skróceniem całej procedury – model bryłowy tworzony jest w zasadzie głównie na potrzeby rekonstrukcji fizycznej, a jego wykonanie stanowi najbardziej pracochłonną część całego procesu. Dlatego rezygnacja z tego etapu może znacząco zmniejszyć pracochłonność i koszt całego procesu. Przykład możliwości połączenia obu podejść prezentuje Rys. 3.10.6 – przezroczysta warstwa ukazuje model zrekonstruowany (uproszczony), wewnętrzny niebieski rdzeń to model zeskanowanego eksponatu. Rys. 3.10.7 przedstawia wydruk 3D tego samego modelu w wielomateriałowej technologii Polyjet firmy ObjetGeometries wykonany w firmie Bibus Menos w Gdańsku.



Rys. 3.10.6. Propozycja rekonstrukcji eksponatu na bazie skanu i modelu CAD



Rys. 3.10.7. Wydruk 3D rekonstrukcji eksponatu na bazie skanu i modelu CAD

Podsumowanie:

1. Możliwość efektywnej automatyzacji przetwarzania danych pomiarowych zależy od jakości skanu, a dokładnie od regularności chmury punktów.
2. Przetwarzanie danych nie może modyfikować danych źródłowych.
3. Wykonanie wydruku 3D modelu elementów konstrukcji wraku nie wymaga tworzenia geometrii uproszczonej, co pozwala znacznie skrócić proces rekonstrukcji.

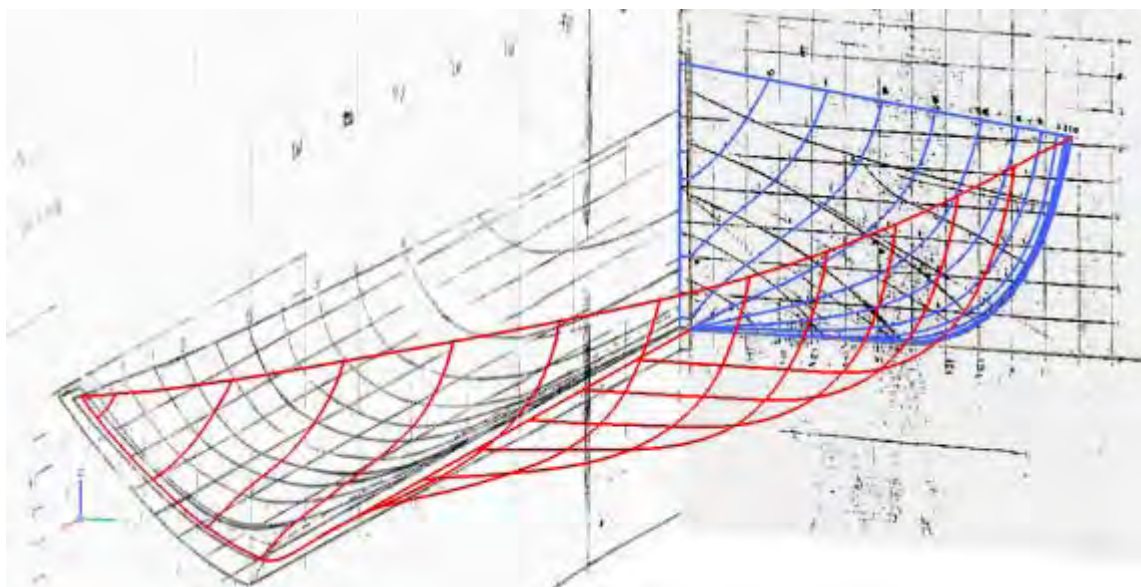
4. Wnioski

Opracowana metoda, bazująca na laserowej sondzie ramienia pomiarowego Faro ScanArm, wydaje się na tym etapie znacznie bardziej efektywna niż stosowana dotąd metoda kontaktowa. Wstępna analiza wykazuje możliwość wykonania modelu o 30% szybciej, jednak przy odpowiedniej organizacji pracy (podział pracy i wykonywanie jej równolegle) można oczekiwać znacznie większego skrócenia czasu i efektywniejszego wykorzystania drogiego sprzętu pomiarowego. Dodatkowo należy wziąć pod uwagę stosunkowo krótki okres pracy autorów testu z urządzeniem i oprogramowaniem. W dłuższej perspektywie czasowej należy również oczekiwać pozytywnych skutków wyższej biegłości operatorów. Opracowana metodyka wykazuje znacznie wyższą efektywność pracy, zarówno w sensie ilościowym (szybsza i dostarczająca więcej danych), jak i w sensie jakościowym (brak śrub do kalibracji, a więc i uszkodzenia eksponatu, metoda bezdotykowa – brak konieczności wielokrotnych kalibracji, wygodniejsza – uproszczanie geometrii przy komputerze, zgodna z zaleceniami – surowe dane zawierają znacznie więcej informacji i nie są przetwarzane). Wady – niezbędna duża przestrzeń na dysku oraz dobry sprzęt komputerowy do obróbki takich danych i szkolenia w zakresie obsługi programu Geomagic. Łączymy dokładność i ludzką decyzję co do zagęszczenia pomiarów z wysoką wydajnością. Drogi sprzęt pracuje szybko i efektywnie, ale większość pracy przenosimy z fazy pomiarów na fazę przetwarzania danych (*postprocessing*).

Wybór Faro ScanArm z sondą laserową jest optymalny ze względu na prędkość, koszt, dopasowanie metodologiczne do istniejących procedur, konieczność udziału człowieka w procesie skanowania (brak pełnej automatyzacji uchroni nas przed błędami, ale jednocześnie umożliwi ograniczenie zakresu pomiaru do rzeczywiście istotnego – optymalizacja rozmiarów danych źródłowych). Stosowanie skanerów geodezyjnych lub światła strukturalnego zapewnia większą automatyzację i rozdzielczość detalu, ale czy zawsze potrzebne? W efekcie skutkuje to ogromną ilością danych i ich utrudnionym przetwarzaniem. Z drugiej strony, w przypadku drobnych obiektów, takich jak numizmaty, przydatność Faro ScanArm jest ograniczona – w zamian zaleca się stosowanie innych technik pomiarowych (światło strukturalne, fotogrametria).

Odrębnym problemem jest wygenerowanie dokumentacji w pożądanej formie. Dostępne oprogramowanie umożliwia uzyskanie takiego efektu pod warunkiem uzyskania chmury punktów o odpowiedniej gęstości. Co więcej, skanowanie powinno odbywać się skośnie w stosunku do kierunku przekroju, inaczej nie możemy uzyskać linii pomiędzy kolejnymi liniami skanu. W przypadku zbyt rzadkiej chmury, tradycyjna dokumentacja rysunkowa jest możliwa do uzyskania dopiero na podstawie modelu powierzchniowego, a więc na podstawie geometrii już uproszczonej. Z drugiej strony w większości przypadków uproszczenia te są znacznie mniejsze od wprowadzanych wskutek manualnej obróbki danych i wybiórczej rejestracji kształtu uzyskiwanej metodą kontaktową.

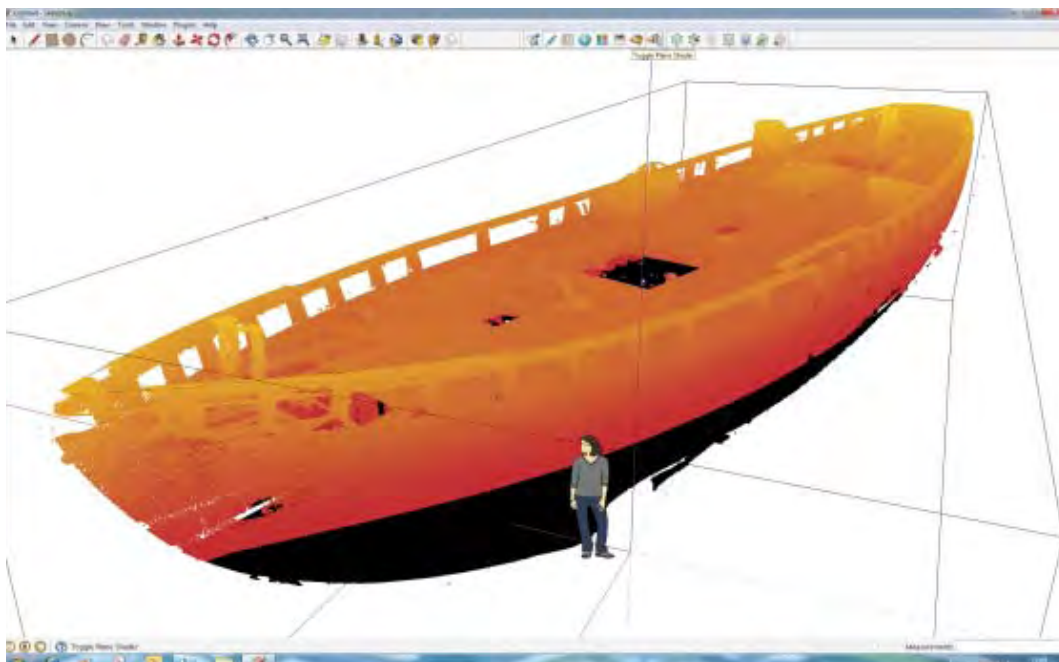
Generalnie należy zastanowić się nad racjonalnością kontynuacji dokumentowania eksponatów w tradycyjny sposób. Model 3D jest nośnikiem znacznie większej ilości informacji niż rysunek, pozwala na uzyskanie głębszej wiedzy o obiekcie poprzez wykonanie szeregu symulacji i pomiarów, a jego degeneracja do postaci rysunku jest w gruncie rzeczy krokiem wstecz. Istniejące oprogramowanie do analizy kształtu umożliwia przeszukiwanie baz danych w oparciu o kryteria geometryczne, co w efekcie już w najbliższej przyszłości umożliwi automatyzację żmudnych czynności związanych z dopasowaniem modeli różnych eksponatów [18], [19]. Model 3D w przemyśle jest już pełnoprawnym dokumentem i nie ma powodu, dla którego nie może być tak samo traktowany w muzealnictwie. Paradoksalnie, najszybciej zdobywa uznanie najbardziej prymitywna forma modelu 3D, jaką stanowi reprezentacja krawędziowa. Przywiązanie do tradycyjnego rysunku, operującego liniami i punktami, jest chyba największą barierą w efektywnym wykorzystaniu nowoczesnych technologii pomiarowych.



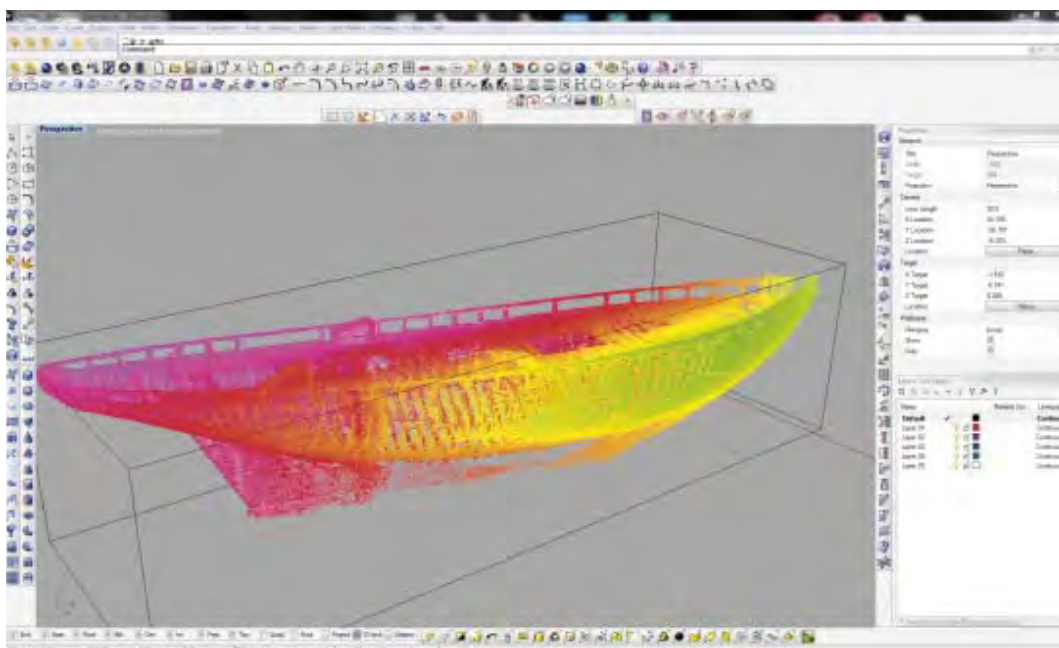
Rys. 4.1. Model 3D w postaci krawędziowej

4.1. Optymalizacja wykorzystania zasobów pomiarowych

Oprócz bezpośredniego efektu, jakim jest opracowana procedura skanowania, projekt dostarczył szeregu doświadczeń i danych do wniosków odnośnie usprawnienia procesu w przyszłości. Niektóre funkcje można znacząco poprawić, wychodząc nieznacznie poza ograniczenia zarówno sprzętowe (inne typy skanerów do obiektów wielkogabarytowych i dzieł sztuki), jak i programowe. System Geomagic jest kosztowny i stosunkowo mało intuicyjny. Jest to narzędzie profesjonalne, wymagające sprzętu o dużej mocy obliczeniowej. Korzystanie z niego do akwizycji chmury punktów, szczególnie w przypadku pomiarów terenowych, jest nieefektywne ekonomicznie. Głównie zadanie tego programu to tworzenie geometrii na silnej stacji roboczej i blokowanie go w celu wykonania tak trywialnych zadań, jak akwizycja punktów, nie wydaje się optymalnym rozwiązaniem. Zaleca się zakup najprostszej aplikacji zapewniającej współpracę ze skanerem, realizującej jedynie rejestrację punktów. Przykładem takiego podejścia może być program SketchUp, w najprostszej formie bezpłatny, z modulem Pointools, pozwalającym na przetwarzanie chmury punktów (Rys. 4.1.1) lub program Rhino3D z tym samym modulem (Rys. 4.1.2).



Rys. 4.1.1. Przykład obsługi chmury punktów z poziomu programu SketchUp



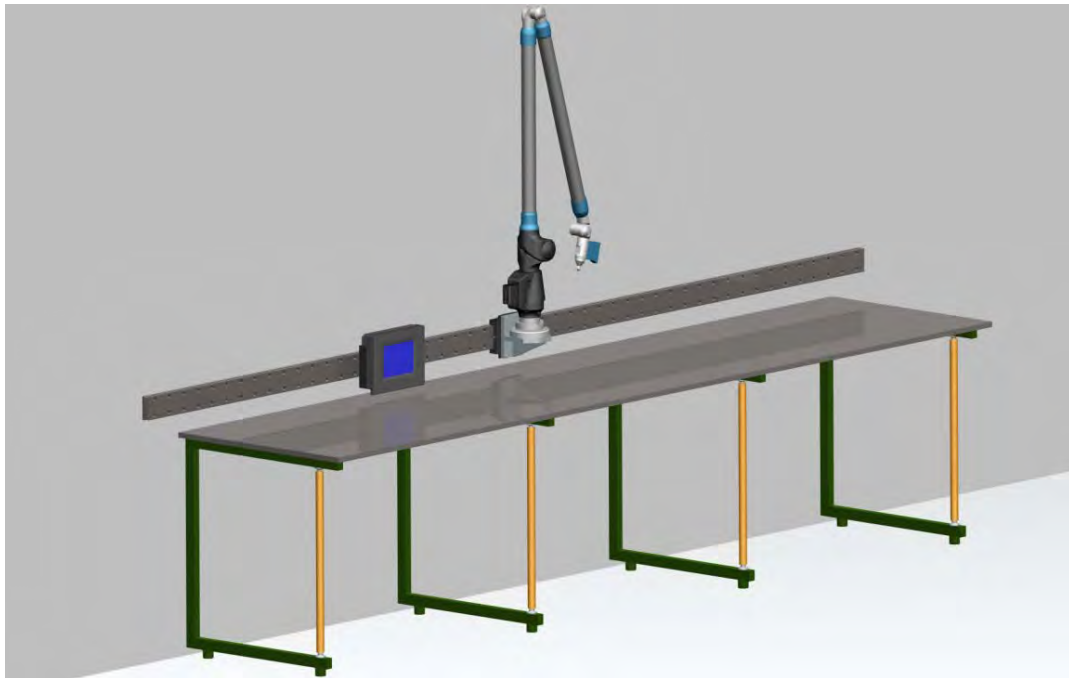
Rys. 4.1.2. Przykład obsługi chmury punktów z poziomu programu Rhino 3D

4.2. Propozycje usprawnień procesu pomiarowego

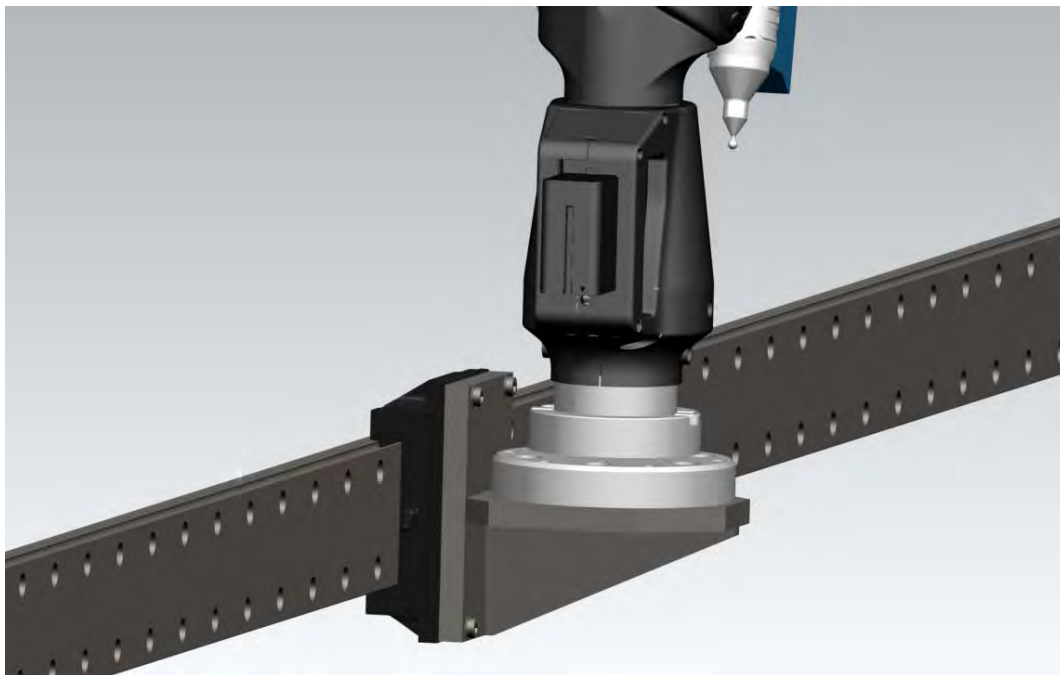
Inne wnioski z przeprowadzonych pomiarów obejmują szereg sugestii dotyczących wyposażenia pracowni, ułatwiającego wykonywanie typowych zadań. Najważniejsze proponowane ulepszenia obejmują:

- Kompensacja ciężaru sondy – ramię pomiarowe jest dość ciężkie, a praca nim potrafi być fizycznie wyczerpująca. Podwieszenie końcówki ramienia na elemencie sprężystym (sprężyna, taśma elastomerowa) lub linie z przeciwcieżarem podniesie komfort pracy operatora.
- Użycie w podobnej funkcji wózka do montażu końcówki, służącego do jej powolnego i równomiernego prowadzenia po płaskim stole pomiarowym lub powierzchni eksponatu. Oprzyrządowanie takie będzie szczególnie przydatne w przypadku skanowania elementów względnie płaskich, dla których zachodzi konieczność zagęszczenia punktów pomiarowych (np. przez bardzo wolne prowadzenie sondy).

- c) Zamocowanie płyty montażowej ramienia do stołu pomiarowego i wykorzystywanie jej w standardowych przypadkach zamiast statywu (ten w zasadzie powinien być używany wyłącznie w sytuacji pomiaru dużych elementów wymagających przemieszczenia skanera lub w warunkach terenowych). Stanowisko pomiarowe należy zaprojektować w taki sposób, aby jak najwięcej pomiarów wykonywanych było w strefie największej dokładności skanera (ok. 0,5–0,7 zasięgu ramienia). Rozwinięciem tej koncepcji może być zamocowanie sztywnej szyny na ścianie przy stole pomiarowym, umożliwiającej szybkie przesuwanie ramienia i blokowanie go w wybranej pozycji. Takie rozwiązanie zmniejsza narażenie urządzenia na kontakt z wodą oraz odsuwa od operatora przewody zasilające i USB, przez co podnosi komfort i bezpieczeństwo pracy. Jeżeli razem z ramieniem zapewnimy mobilność monitora komputera, podniesie to komfort pracy operatora. Propozycję takiego rozwiązania prezentują Rys. 4.2.1 i 4.2.2.



Rys. 4.2.1. Propozycja konfiguracji stanowiska pomiarowego



Rys. 4.2.2. Szczegóły naściennego montażu skanera

- d) Pokrycie podłogi i ścian pracowni trwałymi punktami kalibracyjnymi, pozwalającymi na uproszczone, dokładne łączenie skanów wykonanych w różnych pozycjach skanera, bez konieczności przeprowadzania czasochłonnej kalibracji.
- e) Wykorzystanie materiałów trudno skanowalnych (czarne, błyszczące, przezroczyste) do pokrycia stołu i uchwytów pomiarowych w celu zmniejszenia zaszumienia pomiarów.
- f) Ze względu na stosunkowo długotrwałe przetwarzanie danych pomiarowych, zaleca się zastosowanie osobnego komputera do obsługi skanera oraz dwóch lub trzech stacji roboczych do przetwarzania danych. W ten sposób możemy realizować zadania równolegle i zapewnić efektywne wykorzystanie czasu operatora urządzenia i oprogramowania.
- g) Nie należy rozdzielać funkcji operatora skanera i operatora oprogramowania przetwarzającego dane pomiarowe. To właśnie doświadczenia zebrane w trakcie obróbki danych mają największy wpływ na wzrost efektywności procesu skanowania. Z drugiej strony, należy zadbać, aby ta sama osoba nie wykonywała skanu i odtwarzania geometrii tego samego eksponatu. Dzięki takiemu podejściu mamy do czynienia z weryfikacją jakości pomiaru oraz wymuszeniem przestrzegania procedur pomiarowych.
- h) Należy wzmocnić konstrukcję stołu pomiarowego w przypadku dokumentacji bardzo ciężkich eksponatów. Wzmocnienie to może być wykonane w formie demontowalnych wsporników wolnej krawędzi stołu (Rys. 4.2.1).

4.3. Porównanie metody kontaktowej i optycznej

W największym uproszczeniu różnicę między obiema metodami definiuje typ sondy, w jaki wyposażone jest ramię pomiarowe. Ze względu na dostępne oprogramowanie oraz wypracowane dotąd metody pracy, metoda kontaktowa jest domyślnie związana z użytkowaniem programu Rhino3D, natomiast metoda optyczna z programem Geomagic. Oczywiście nie jest to jedyne możliwe rozwiązanie, jednak dotychczasowa praktyka wskazuje na słuszność takiego podejścia.

Podstawową zaletą metody kontaktowej jest możliwość wykorzystania istniejącej, pełnej metodyki pomiaru i przetwarzania danych oraz powszechność stosowanych narzędzi. Zarówno ramię skanujące Faro, jak i program skojarzony z tą metodą, są bardzo często używane w różnych dziedzinach i nie ma problemu ze znalezieniem wykwalifikowanej obsługi. W przypadku metody optycznej można wykorzystać wiele z gotowych elementów metody kontaktowej, jednak ze względu na inny przebieg procesu pomiarowego wymaga ona opracowania własnych procedur. Drugą istotną zaletą metody kontaktowej jest niewielkie zapotrzebowanie na przestrzeń dyskową oraz moc obliczeniową komputera.

Z kolei za wykorzystaniem metody optycznej przemawiają inne wymagania, przede wszystkim efektywność pracy oraz spełnienie wymagań dotyczących archiwizacji nieprzetworzonych danych. Procedury zalecane przez Kartę Londyńską i Sewilską oraz NIMOZ wyraźnie zalecają zapis danych surowych o jak najwyższej rozdzielczości, które dopiero na późniejszych etapach powinny być przetwarzane w celu uzyskania dokumentacji o pożądanym stopniu uproszczenia. W przypadku skanowania kontaktowego, sam pomiar jest również rodzajem przetwarzania danych, ponieważ to operator decyduje o tym, co będzie zarejestrowane, a ze względu na specyfikę pracy manualnej będzie to rejestracja o dużym stopniu uproszczenia.

Taki sposób pracy wymaga znacznej wiedzy merytorycznej, wysokiego skupienia podczas pomiarów w celu uniknięcia poruszenia eksponatu oraz długotrwałej pracy z ramieniem pomiarowym, co samo w sobie pociąga znaczny wysiłek fizyczny. Skanowanie optyczne zabezpiecza operatora przed poruszeniem eksponatu, pozwala na znacznie szybszą rejestrację danych (do 19200 pkt/s w porównaniu z maksymalnie 30 pkt/s w metodzie kontaktowej), a więc powoduje również mniejsze zmęczenie. Prowadzi to do wyższego komfortu pracy operatora skanera oraz, w przypadku odpowiedniego podziału pracy (rozdzielenie skanowania od przetwarzania i udostępnienie kilku komputerów jednemu operatorowi), do efektywnego wykorzystania kosztownego sprzętu pomiarowego i skrócenia czasu budowy modelu. Duża liczba szybko uzyskiwanych punktów pomiarowych umożliwia również efektywne skanowanie obiektów o kształtach, na których trudno wyróżnić krawędzie, a więc metoda mechaniczna znajduje ograniczone zastosowanie. Metoda optyczna pozwala także na wykonanie pracy przez osoby słabiej wykwalifikowane, a to dzięki temu, że te same czynności, które w metodzie kontaktowej wykonuje się za pomocą sondy i eksponatu, w przypadku metody optycznej można wykonać za pomocą oprogramowania i zeskanowanej chmury punktów. Wysoko wykwalifikowany archeolog może pracować efektywniej w warunkach biurowych, dokonując rekonstrukcji w oparciu o zeskanowane punkty. To z kolei prowadzi do obniżenia kosztów dokumentacji eksponatów. Bardzo ważnym czynnikiem jest możliwość uniknięcia wielokrotnej kalibracji urządzenia pomiarowego – każdy skan optyczny może być wykonany w innej pozycji eksponatu, a oprogramowanie pozwala na ich dokładne łączenie (rejestrację) w oparciu o charakterystyczne cechy geometryczne.

Jak widać, obie metody charakteryzują się szeregiem wad i zalet, w tabeli 4.2.1 zestawiono ich porównanie.

Lp.	Wymaganie/cecha	Metoda kontaktowa	Metoda optyczna
1.	Ustalony istniejący standard, zautomatyzowana znaczna część pracy związana z budową modelu bryłowego, metodyka, warstwy, schemat postępowania	Tak	Częściowo
2.	Powszechność użytkowania, duża liczba użytkowników	Tak	Nie
3.	Oprogramowanie narzędziowe do obsługi skanerów	Tak	Tak
4.	Wymagania dotyczące archiwizacji danych nieprzetworzonych	Częściowo	Tak
5.	Zabezpieczenie przed poruszeniem eksponatu	Nie	Tak
6.	Potrzeba częstej kalibracji urządzenia	Tak	Nie
7.	Potrzebna przestrzeń dyskowa	Niewielka	Znaczna
8.	Potrzebna moc obliczeniowa stacji roboczej	Niewielka	Znaczna
9.	Ergonomia skanowania	Niska	Wysoka
10.	Efektywność pracy operatora	Niska	Wysoka
11.	Efektywność wykorzystania skanera	Niska	Wysoka
12.	Dokładność digitalizacji kształtów obłych	Niska	Wysoka
13.	Przewidywalność pracochłonności	Niska	Wysoka

Tabela 4.2.1. Porównanie metody kontaktowej i optycznej

Podsumowując: w stosunku do obecnie stosowanych w muzeach europejskich procedur dokumentacji 3D wraków, proponujemy istotne udoskonalenia:

- techniki pomiarowej, polegającej na wprowadzeniu dodatkowego etapu skanowania sondą laserową (szybki, bezdotkowy, bezkalibracyjny, bogatszy, tańszy i umożliwiający wielokrotny i równoległy *postprocessing*);
- *postprocessing* – automatyzacja odtworzenia kształtu z punktów (a nie manualna na podstawie linii, jak to jest wykonywane obecnie);
- docelowo widzimy możliwość przeniesienia całego procesu rekonstrukcji na platformę cyfrową i rezygnacji z modeli fizycznych dla celów badawczych.

5. Indeks pojęć i definicje

Terminologia użyta w ramach niniejszego opracowania obejmuje szereg pojęć, które są stosowane szeroko i w różnych dziedzinach mogą nieco różnić się znaczeniem. Aby uniknąć niejednoznaczności i wynikających z nich nieporozumień, posługujemy się nimi zgodnie z podanymi poniżej definicjami.

1. Faro ScanArm – ramię pomiarowe wykorzystywane w CMM jako zasadnicze narzędzie do skanowania powierzchni obiektów (pozyskiwania danych).
2. Operator – osoba obsługująca Faro ScanArm.
3. Geomagic Studio, Qualify – oprogramowanie graficzne do przechwytywania i przetwarzania danych uzyskanych za pomocą narzędzi Faro ScanArm.
4. Akwizycja danych – w niniejszym opracowaniu przechwytywanie i zapis danych cyfrowych powstających w czasie pomiaru urządzeniem takim jak Faro ScanArm.
5. Metoda optyczna – metoda skanowania wykorzystująca sondę laserową.
6. Metoda mechaniczna – metoda skanowania polegająca na mechanicznym kontakcie końcówki skanującej z powierzchnią skanowaną, z tego względu nazywana również wymiennie metodą kontaktową.
7. Metodyka digitalizacji ramieniem 3D – zalecany sposób realizacji digitalizacji 3D przy użyciu ramienia Faro ScanArm USB, opracowany w ramach realizacji projektu „Centralne Muzeum Morskie – Cyfrowe Muzeum Morskie”.
8. Dane referencyjne – dane kontrolne, odzwierciedlające powierzchnię obiektu w stopniu najbliższym rzeczywistości, pozwalają sprawdzić dokładność danych pozyskanych metodami mniej dokładnymi.

9. Dane źródłowe – „surowa”, tzn. niepoddana obróbce chmura punktów, będąca bezpośrednim wynikiem procesu skanowania.
10. Czasochłonność – czas wymagany dla realizacji zadanej operacji, liczony osobno dla operatora i oprogramowania.
11. Dokładność digitalizacji – na potrzeby opracowania przyjęto, że definiuje ją dokładność nominalna urządzenia pomiarowego.
12. Dokładność konwersji danych – błąd danych po konwersji w stosunku do danych źródłowych, zwykle operujemy błędem maksymalnym lub średnim.

6. Bibliografia

1. Denard H., *The London Charter for the Computer-based Visualisation of Cultural Heritage*, King's College, London 2009.
2. *The Seville Charter. International Charter of Virtual Archaeology*.
3. *Zalecenia NIMOZ dotyczące planowania i realizacji projektów digitalizacyjnych w muzealnictwie*, Warszawa 2011.
4. Sitnik R., *Opis planowania procesu digitalizacji 3D, procedur postępowania podczas digitalizacji oraz tworzenia dokumentacji cyfrowej. Zalecenia NIMOZ*, Warszawa 2011.
5. Bunsch E., *Planowanie rozdzielczości przestrzennej w procesie digitalizacji 3D w zależności od zakresu wykorzystania powstającej dokumentacji. Zalecenia NIMOZ*, Warszawa 2011.
6. *Faro ScanArm – instrukcja obsługi*, 2009.
7. Mechelke K., Kersten T.P., Lindstaedt M., *Comparative investigations into the accuracy behaviour of the new generation of terrestrial laser scanning systems*, HafenCity University Hamburg, Department Geomatics, Optical 3-D Measurement Techniques VIII, Gruen/Kahmen, Zurich 2007.
8. Boehler W., Bordas Vicent M., Marbs A., *Investigating of scanner accuracy*, XIX CIPA Symposium, Antalya, Turkey, 2003.
9. Falck T., Steen K., *Digital documentation of archaeological boat timbers using the FARO-arm and Rhino software*, Norwegian Maritime Museum, Workshop at the Polish Maritime Museum, 2012.
10. Jones T., *The Newport Medieval ship. Timber recording manual. Digital recording of ship timbers using a FARO arm and Rhinoceros 3D software*, 2007.
11. <https://www.facebook.com/pages/Faro-Rhino-Archaeological-User-Group-FRAUG/156359647780449>
12. Crumlin Pedersen O., McGrail S., *Some Principles of Reconstruction of Ancient Boat Structures*, „The International Journal of Nautical Archaeology”, 2006.
13. Zapłata R., *Digitalizacja dziedzictwa archeologicznego*, Wiedza i Edukacja, Lublin 2011.
14. Urbańczyk P., *Przegląd możliwości automatyzacji graficznej analizy archeologicznej dokumentacji terenowej*, „Archeologia Polski”, 1987, t. 32, s. 377–394.
15. Margounakis D., *Virtual Reconstructions in Archaeology*, [w:] *The e-learning Dimension of Computer Applications in Archaeology*, red. D. Politis, Klidarithmos Publications, Athens 2006, s. 146–156.
16. M. Forte, *Cyber-Archaeology*, Archaeopress, Oxford 2010, dostępny w Internecie: http://ucmerced.academia.edu/MaurizioForte/Papers/367641/Introduction_to_Cyber-Archaeology
17. <http://maritimearchaeologyprogramdenmark.wordpress.com/>
18. Papaioannou G., Theoharis T., *Fast Fragment Assemblage Using Boundary Line and Surface Matching*, Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Madison, Wisconsin, 2003.
19. Winkelbach S., Wahl F.M., *Pairwise Matching of 3D Fragments Using Cluster Trees*, „International Journal of Computer Vision”, Vol. 78, 2008.
20. Binkowski M., *Skanowanie eksponatów muzealnych CMM*, Laboratorium Mikrotomografii, Zakład Komputerowych Systemów Biomedycznych, Instytut Informatyki, Uniwersytet Śląski, Katowice. Kontakt: marcin.binkowski@us.edu.pl.
21. Błazejowski B., Binkowski M., Bitner M.A., Gieszc P., *X-ray microtomography (XMT) of fossil brachiopod shell interiors for taxonomy*, „Acta Palaeontologica Polonica”, 56 (2), 2011.
22. *Instrukcja użytkownika programu Geomagic Studio i Geomagic Qualify*.
23. Barber D., Mills J. et al., *3D Laser Scanning for Heritage*, English Heritage Publishing, 2007.
24. Barber D., Mills J. et al., *3D Laser Scanning for Heritage (second edition)*, English Heritage Publishing, 2011.
25. McKenna G., De Loof C., *Report on existing standards applied by European museums*, eContentplus, Athena, ECP-2005-CULT-038099, 2009.
26. Hocker F., *Three-dimensional documentation of ship timbers using the FaroArm*, 2003.