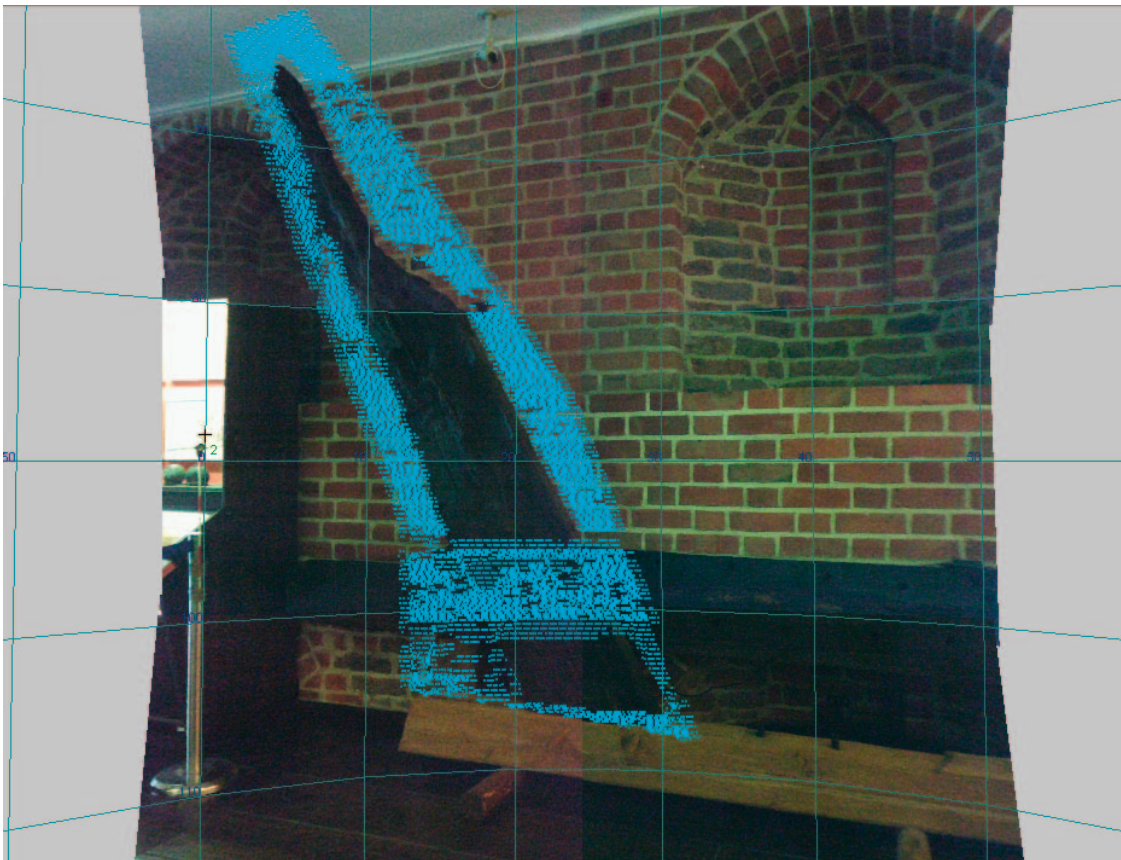


Cezary Źrodowski

**METODYKA PRACY TACHIMETREM
NA POTRZEBY POMIARU
I INWENTARYZACJI CYFROWEJ MUZEALIÓW**



Narodowe Muzeum Morskie w Gdańsku

Gdańsk 2014

Współpraca:
Marcin – nadzór merytoryczny
Mateusz Citak, Szymon Bierowiec – wykonanie pomiarów



Koło Naukowe CAD/CAE „Piksel” Politechniki Gdańskiej



Międzymuzealna Grupa ds. Digitalizacji




Redakcja: Anna Ciemińska
Projekt i redakcja techniczna: Paweł Makowski

ISBN 978-83-64150-07-4

Publikacja powstała w ramach partnerstwa Narodowego Muzeum Morskiego w Gdańsku i Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej, finansowanego ze środków Wieloletniego Programu Rządowego Kultura+, priorytet Digitalizacja.

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

 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>

Ministerstwo
Kultury
i Dziedzictwa
Narodowego.

Dofinansowano ze środków
Programu Wieloletniego Kultur

KULTURA+



NARODOWY
INSTYTUT
AUDIOWIZUALNY

 NARODOWE
MUZEUM
MORSKIE
w Gdańsku

POLITECHNIKA
GDAŃSKA
WYDZIAŁ
OCEANOTECHNIKI
I OKRĘTOWNICTWA

 Digitalizacja

Spis treści

1. Wprowadzenie.....	5
2. Zakres i metodyka badań.....	6
2.1. Analiza stanu wiedzy i techniki	7
2.2. Charakterystyka tachimetru Topcon IS-203.....	11
2.3. Program badań	13
2.3.1. Parametry konfiguracji tachimetru	13
2.3.2. Wpływ własności optycznych powierzchni eksponatów	13
2.3.3. Skanowanie	16
2.3.4. Fotogrametria i GPS	17
2.3.5. Oprogramowanie i wielkość danych.....	17
3. Wyniki	19
3.1. Parametry konfiguracji tachimetru	19
3.2. Wpływ własności optycznych powierzchni eksponatów	22
3.3. Wpływ oświetlenia	25
3.4. Pomiar punktow do składania skanów częściowych	26
3.5. Skanowanie za pomocą tachimetru	26
3.6. Śledzenie celu – tracking.....	34
3.7. Weryfikacja opracowanej metodyki	35
3.8. Fotogrametria i GPS	40
3.9. Oprogramowanie i wielkość danych	40
4. Wnioski.....	42
5. Bibliografia	43



1. Wprowadzenie

Opracowanie metodyki pracy tachimetrem na potrzeby pomiaru i inwentaryzacji cyfrowej muzealiów stanowi kontynuację prac, prowadzonych w latach 2011–2012, w zakresie przygotowania Narodowego Muzeum Morskiego w Gdańsku (NMM) do efektywnej digitalizacji zbiorów [39]. W trakcie realizacji projektu, poświęconego skanowaniu za pomocą ramienia pomiarowego Faro ScanArm, pojawiło się szereg problemów i wniosków dotyczących alternatywnych metod pozyskiwania modeli eksponatów, przełamujących ograniczenia i rozszerzających zakres stosowania ramienia. Obejmowały one zarówno metodykę pracy, jak i sprzęt oraz oprogramowanie. Ze względu na błyskawiczny postęp w tej dziedzinie i dostępność coraz doskonalszych rozwiązań technicznych podjęto próbę dostosowania ich do specyficznych wymagań związanych z digitalizacją muzealiów ze zbiorów NMM. Skoncentrowanie badań prowadzonych w NMM na rekonstrukcji wraków spowodowało podporządkowanie techniki i metody cyfrowej archiwizacji głównie temu zagadnieniu. Zakupiony przez Muzeum 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. Ograniczenia tego właśnie urządzenia stoją za wyborem kolejnych technik i urządzeń pomiarowych – w tym przypadku tachimetru skanującego Topcon IS-203.

Konieczność zastosowania tachimetru pojawiła się przede wszystkim w kontekście prac w terenie i dokumentacji stanowisk archeologicznych, ale również archiwizacji eksponatów wielkogabarytowych, znacznie (często wielokrotnie) przekraczających zakres pomiarowy ramienia. Ponieważ wykorzystanie tachimetrów na stanowiskach archeologicznych jest standardową procedurą, w niniejszym opracowaniu skoncentrowano się przede wszystkim na możliwościach mniej typowych zastosowań tego sprzętu, do jakich należy skanowanie dużych obiektów oraz pomiary pozwalające na łączenie mniejszych modeli uzyskanych za pomocą ramienia pomiarowego lub fotogrametrii. Są to zadania niestandardowe, wykonywane niezbyt często i dlatego mniejszą wagę przykładano do zagadnień związanych z efektywnością pracy (w sensie liczby roboczogodzin niezbędnych do wykonania modelu), a skupiono się raczej na zagadnieniach związanych z wykonalnością, dokładnością i rozdzielczością pomiaru.

2. Zakres i metodyka badań

Celem projektu jest rozszerzenie zakresu skanowania za pomocą ramienia pomiarowego, przede wszystkim w celu umożliwienia archiwizacji elementów wielkogabarytowych oraz trudno dostępnych. Istotnym aspektem projektu jest ograniczony zakres badań, wynikający z przyjętych rozwiązań sprzętowych i programowych. Projekt dotyczy możliwości nietypowego wykorzystania tachimetru skanującego Topcon IS-203, zakupionego przede wszystkim dla celów dokumentacji stanowisk archeologicznych. Jednak jego wysoka dokładność, możliwość skanowania i śledzenia celu, a także oprogramowanie integrujące wyniki pomiarów z analizą fotogrametryczną, pozwalają zbudować na jego podstawie elastyczny system pomiarowo-obrazujący, łączący dane z różnych źródeł. Taki właśnie sposób wykorzystania został przetestowany.

Najważniejsze problemy dla zdefiniowania zakresu prac obejmują:

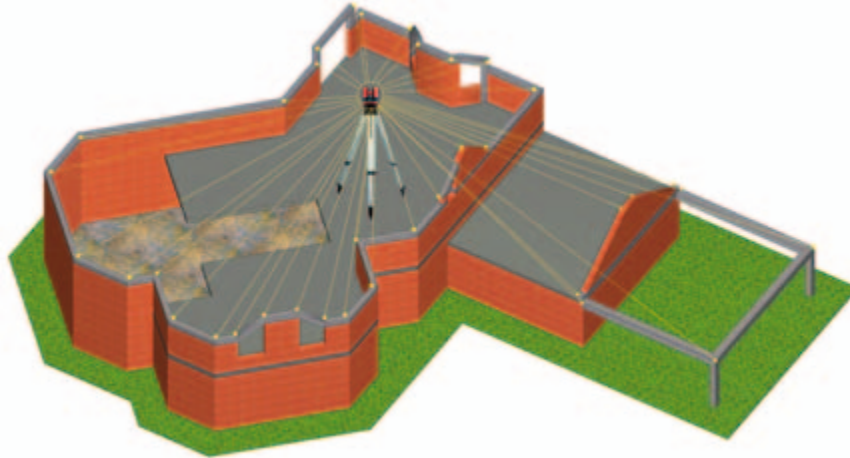
- a) Analizę potrzeb NMM. Obejmuje ona wnioski z przeprowadzonych prac w zakresie digitalizacji różnych eksponatów, ze szczególnym uwzględnieniem elementów wraku W-5, nazywanego Miedziowcem i próby jego rekonstrukcji na podstawie tak pozyskanych danych. Projekt ten stanowił doskonały poligon doświadczalny dla opracowanych wcześniej metod skanowania elementów wraku, a także postawił zespół realizujący przed szeregiem nowych wyzwań. Najważniejszym było skanowanie obiektów wielkogabarytowych, wykraczających swoimi rozmiarami znacznie poza zasięg ramienia pomiarowego, co generowało istotne problemy wykonawcze, wymagające opracowania specjalnej procedury pomiarowej. Należą do ich:
 - Fizyczne możliwości wykonania skanu, związanego z brakiem dostępu do niektórych części eksponatu, co spowodowane może być jego wielkością (np. wysokość wymagająca budowy specjalnej konstrukcji do podniesienia ramienia) lub położeniem (np. burta statku s.s. „Sołdek”, która wymagałaby prowadzenia skanowania z wody lub podczas dokowania, czyli raz na 5-10 lat). W przypadku niektórych eksponatów wykonalność ich

skanowania za pomocą ramienia pomiarowego pozostaje wyłącznie teoretyczna i musi być zapewniona przez wykorzystanie innych technik. Dotyczy to szczególnie obiektów znajdujących się poza pracowniami NMM, gdzie użycie ramienia nastęrcza istotnych problemów technicznych i naraża sprzęt na uszkodzenia.

- Konieczność wykonywania i łączenia skanów częściowych, co prowadzi do obniżenia dokładności archiwizacji w przypadku kompletnego modelu. Wynika to wprost z metodyki łączenia skanów, bazującej na wykorzystaniu charakterystycznych cech zarejestrowanej geometrii. O ile ten sposób doskonale sprawdza się w przypadku niewielkich obiektów, gdzie dla uzyskania kompletnego modelu łączy się kilka skanów, o tyle dla eksponatów wielkogabarytowych, których pokrycie wymagałoby wykonania kilkudziesięciu lub więcej sesji, takie podejście spowoduje kumulację błędów łączenia i w efekcie bardzo duże zniekształcenie kompletnego modelu.
 - Znaczące (wielokrotne) wydłużenie czasu i zwiększenie zasobów pamięci niezbędnych do archiwizacji eksponatu. Praca ramieniem zapewnia odpowiednią (submilimetrową) dokładność i rozdzielczość skanowania dla niewielkich eksponatów. Wymaga również znacznego nakładu pracy i wprawy w posługiwaniu się sprzętem. W przypadku obiektów o znacznych gabarytach prowadzi to do ogromnego wydłużenia czasu archiwizacji, wynikającego nie tylko z pola powierzchni skanowanej, ale również konieczności przenoszenia i kalibracji sprzętu pomiarowego. Dodatkowo prowadzi do wygenerowania bardzo dużej ilości danych, opisujących wiele szczegółów, zwykle nieistotnych w przypadku dużych obiektów, a w efekcie generujących ogromną pracochłonność etapu obróbki danych (postprocessingu). W kontekście konieczności zachowania racjonalnego poziomu ekonomicznej efektywności wykonywanych prac, opracowanie alternatywnych metod skanowania nabiera szczególnego znaczenia.
- b) Analizę ograniczeń dostępnych rozwiązań. Spośród wielu istniejących technik pomiarowych i obrazujących, niestety nie wszystkie są dostępne dla pracowników Muzeum. Wynika to po części z kosztów, po części z ogromnej dynamiki rozwoju tej dziedziny i nowości pojawiających się z miesiąca na miesiąc. Żadna instytucja nie jest w stanie zakupić wszelkich nowatorskich rozwiązań, nawet gdyby prowadziłyby one do znaczącego skrócenia czasu i obniżenia kosztów procesu digitalizacji. Dlatego należy jak najefektywniej wykorzystać posiadany sprzęt i umiejętności. W przypadku NMM mamy do dyspozycji tachimetr skanujący Topcon IS-203, uzupełniony odbiornikiem DGPS oraz oprogramowaniem fotogrametrycznym. W trakcie realizacji projektu podjęte zostały również próby przetestowania innych technik pomiarowych, jednak to właśnie tachimetr i możliwości jego wykorzystania w procesie digitalizacji stanowiły główny cel projektu. Projekt został zrealizowany w czterech głównych etapach, obejmujących:
1. Badanie wpływu własności optycznych skanowanych eksponatów na wyniki pomiarów i skanowania, mające na celu przede wszystkim ustalenie optymalnych parametrów pomiaru. Badano także zakłócenia wynikające z warunków oświetlenia, temperatury oraz pokrycia eksponatów warstwą wody.
 2. Badanie rzeczywistej dokładności i rozdzielczości pomiarów w trybie z i bez zwierciadła, z uwzględnieniem odstępstw od zalecanych warunków pracy urzędnika oraz wymagań rekonstrukcji obiektów archeologicznych.
 3. Testowanie przydatności różnych sposobów pracy z tachimetrem, obejmujących pomiar pojedynczych punktów, skanowanie, a także automatyczne śledzenie celu.
 4. Testowanie technik uzupełniających, obejmujących fotogrametrię i GPS.

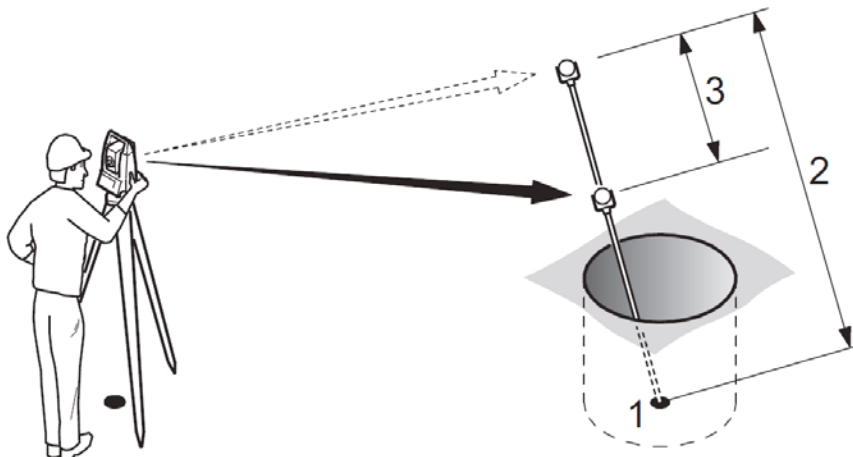
2.1. Analiza stanu wiedzy i techniki

Wykorzystanie tachimetrów w pomiarze i inwentaryzacji muzealiów stanowi standardową procedurę, jednak obejmuje ona nieco inny zakres prac niż wynikający ze specyfiki NMM – przede wszystkim dotyczy dokumentacji stanowisk archeologicznych. Generalnie tachimetr jest geodezyjnym urządzeniem pomiarowym i służy do prowadzenia pomiarów kątów (w poziomie i w pionie) oraz odległości. W tym sensie stanowi on połączenie teodolitu i dalmierza, jednak wykracza poza sumę ich funkcjonalności, ponieważ jest przeznaczony do szybkiego pomiaru położenia wielu punktów w terenie (Il. 1). Aspekt efektywności/wydajności pracy jest w tym przypadku znacznie ważniejszy niż dla teodolitów i dalmierzy, których konstrukcja i sposób użytkowania zostały podporządkowane przede wszystkim dokładności pomiaru. Dlatego we współczesnych modelach występuje duże nasycenie automatyzacją funkcji pomiarowych.



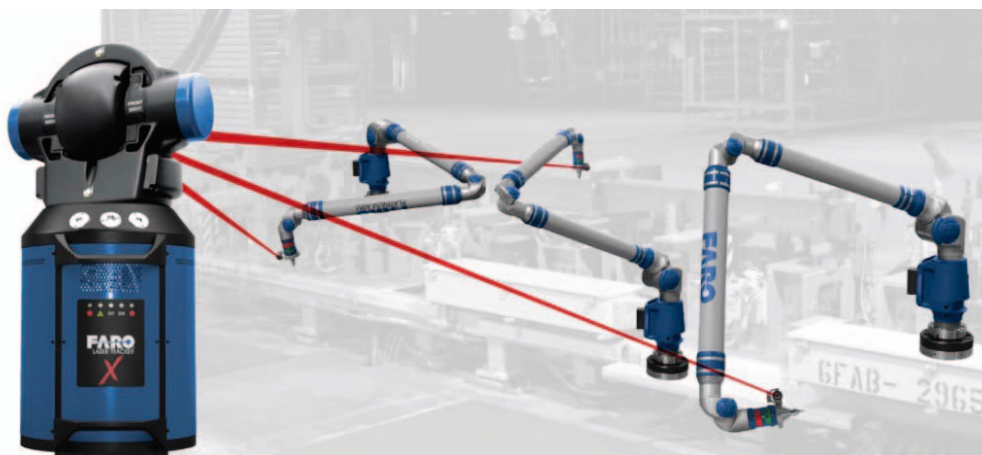
Il. 1. Idea zastosowania tachimetru [20]

Pod względem konstrukcyjnym tachimetry można podzielić na dwie grupy – optyczne i elektroniczne, nazywane również stacjami pomiarowymi, przy czym dominującą dzisiaj grupę stanowią rozwiązania elektroniczne, zwykle wyposażone w szereg dodatkowych funkcji. Obejmują one integrację z kompasem, pomiarami GPS/GNSS, rejestrację obrazu z wysoką rozdzielczością dla celów fotogrametrycznych i identyfikacji celów, zdalne sterowanie, bezprzewodowe połączenie z komputerem lub bezpośrednio Internetem. Jednak najważniejszą cechą tachimetrów elektronicznych jest automatyzacja pomiarów, pozwalająca na wyszukiwanie i śledzenie wybranych punktów przy minimalnym zaangażowaniu i ingerencji operatora. Tradycyjnie pomiar odległości realizowany za pomocą dalmierza fazowego wymagał wykorzystania zwierciadła pomiarowego lub pryzmatu, nazywanych reflektorami. Umieszczenie go na tyczce o znanej długości pozwala na łatwe wprowadzenie poprawki i wyznaczenie położenia punktu niewidocznego z pozycji urządzenia pomiarowego (np. na ziemi, zagłębieniu, za przeszkodą), leżącego poniżej reflektora. Oczywiście wymaga to dokładnego, pionowego ustawienia tyczki, w czym pomaga zintegrowana z reflektorem poziomica. W przypadku bardziej precyzyjnych pomiarów umieszczenie dwóch reflektorów na kalibrowanej tyczce pozwala nam na wyznaczenie pozycji niewidocznego punktu dla dowolnej orientacji tyczki (Il. 2).



Il. 2. Idea pomiarów ze zwierciadłem [23]

Współczesne technologie pozwalają na dokonywanie pomiarów metodą bezlustrową, co umożliwia znaczne przyspieszenie prac i pomiar punktów niedostępnych. Jednak z drugiej strony powoduje to również obniżenie zasięgu i dokładności pomiaru, przez co obie metody znajdują ciągle zastosowanie i są wykorzystywane równolegle, zależnie od potrzeb i występujących ograniczeń. Należy przy tym zaznaczyć, że obie metody rozwinęły się w bardziej wyrafinowane techniki pomiarowe: metoda bezlustrowa umożliwia pomiar dowolnego punktu, co w efekcie prowadzi do skanowania laserowego, natomiast wykorzystanie lustra (lub markera pomiarowego) pozwala na efektywne śledzenie celu, a w efekcie na monitoring geodezyjny i budowlany, a także na sterowanie autonomicznymi maszynami. W przypadku opisywanego projektu szczególnie istotna jest możliwość śledzenia położenia urządzeń pomiarowych i skanujących pracujących w niewielkiej przestrzeni pomiarowej, a wykorzystywanych do dokumentacji obiektów wielkogabarytowych (np. śledzenie położenia przenośnego skanera lub ramienia pomiarowego) (Il. 3).



Il. 3. Idea integracji pomiarów wielko- i małogabarytowych [25]

Należy zauważyć, że funkcjonalność ta okazała się na tyle atrakcyjna, że wyewoluowała z niej osobna linia wyspecjalizowanych urządzeń pomiarowych, nazywanych „trackerami”. Charakteryzują się one bardzo wysoką dynamiką śledzonego ruchu oraz często uproszczonym sposobem oznaczania celu. W skrajnych przypadkach funkcję śledzonego celu może pełnić metalowa kulka. W przypadku gładkich powierzchni technika ta jest wykorzystywana w sposób, który pozwala ją zakwalifikować jako specyficzny rodzaj skanowania. Operator ręcznie toczy śledzoną kulkę po powierzchni mierzonego obiektu, a tracker wyznacza kolejne pozycje jej środka (Il. 4), na podstawie których budowane są krzywe lub powierzchnie. Kształt powierzchni mierzonej (pozycje kontaktu śledzonego markera) wyznaczany jest na etapie postprocessingu, poprzez wykonanie operacji odsunięcia (offsetu) o wartość promienia markera, w kierunku normalnym (prostopadłym do powierzchni).



Il. 4. Idea skanowania za pomocą trackera [25]

Nie wszystkie opisane powyżej techniki są możliwe do zastosowania przy użyciu posiadanego sprzętu, jednak – ze względu na zbliżoną funkcjonalność – zostały przytoczone jako przykłady inspirujące do poszukiwania rozwiązań wychodzących poza typowy zakres.

Tachimetr, jak każde urządzenie pomiarowe, charakteryzuje się zestawem parametrów, które określają jego przydatność do wybranego zadania. Ze względu na fundamentalne różnice w sposobie interpretacji wyników uzyskanych w różnych trybach pracy tachimetru (tachimetr, skaner, tracker) należy zwrócić uwagę na najważniejsze z nich. Z punktu widzenia przydatności w realizowanym projekcie, podstawowymi parametrami charakteryzującymi możliwości pomiarowe współczesnych tachimetrów są:

- a) Dystans pomiaru – generalnie tachimetry służą do pomiarów geodezyjnych i budowlanych, dlatego zakres odległości do punktów zwykle wynosi kilkaset metrów, jednak jest on zależny od konkretnego typu urządzenia oraz trybu pracy (lustrowy/bezlustrowy). W skrajnych przypadkach może sięgać nawet 4000 m. W trybie bezlustrowym, a więc charakterystycznym dla funkcji skanowania, zasięg pomiaru zmniejsza się wyraźnie (kilkukrotnie) i w wysokim stopniu zależy od własności optycznych powierzchni skanowanego obiektu. Niemniej jednak, w praktyce wszystkie dostępne rozwiązania pozwalają na efektywną pracę w zasięgu do ok. 100 m, a więc najbardziej interesującym z punktu widzenia realizacji skanowania muzealiów wielkogabarytowych – zarówno w trybie skanowania tachimetrem, jak i łączenia skanów wykonanych urządzeniami o mniejszym zasięgu. Łączenie skanów małowgabarytowych może odbywać się w oparciu o pomiary tachimetryczne wykonane za pomocą zwierciadła lub pryzmatu. Ze względu na specyfikę realizowanego projektu, bardziej interesujące jest dolne ograniczenie, które zwykle wynosi kilka metrów (dla niektórych modeli nawet ok. 1 m). Może ono stanowić realne utrudnienie w przypadku konieczności wykonania pomiarów w ciasnych pomieszczeniach, jednak w większości sytuacji pomiarowych nie powinno sprawiać problemów.
- b) Dokładność pomiaru. Tachimetr służy do wyznaczania pozycji punktów w przestrzeni na podstawie pomiarów kątów oraz odległości. Z zasady działania wynika wprost zależność dokładności pozycji mierzonego punktu od jego odległości od tachimetru. Przy stałej dokładności pomiaru kąta, błąd rośnie liniowo z odległością. Nieco inaczej wygląda problem dokładności dalmierza, który najczęściej działa na podstawie pomiaru różnicy fazy i jest mniej czuły na zmiany odległości. Jednak producenci zwykle nie rozdzielają tych dwóch parametrów i podają wynikową dokładność pomiaru, która zazwyczaj jest na poziomie pojedynczych milimetrów dla niewielkich odległości (<100 m) i dochodzi do kilkudziesięciu mm przy pomiarze bezlustrowym dla krańcowego zasięgu. Niezwykle istotna jest odpowiednia interpretacja pojęcia „błąd pomiaru”, którą należy rozpatrywać na dwóch płaszczyznach: definicji dokładności użytej przez producenta i jej znaczenia dla oceny jakości pomiaru. Zazwyczaj błąd pomiaru definiowany jest 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. Podejście to jest słuszne pod warunkiem znajomości błędu systematycznego, o którego wartość można skorygować wszystkie wartości pomierzone, co najczęściej jest możliwe przy wykonywaniu pomiarów w bardzo ograniczonym zakresie przestrzeni pomiarowej urządzenia. W efekcie często (nieprawidłowo) pojęcie błędu pomiaru jest zastępowane pojęciem powtarzalności pomiaru. I tutaj dotykamy drugiego aspektu problemu – jak interpretować wartość błędu? 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 tachimetru. Stąd wniosek, że dla stosunkowo niewielkich obiektów można przyjąć, iż 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 oraz w sytuacji, gdy pomiar ma na celu wyznaczenie punktów referencyjnych do łączenia skanów. Wówczas bez znajomości omawianego błędu systematycznego 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. Osobnym problemem jest wpływ kształtu i jakości powierzchni obiektu mierzonego na dokładność pomiaru. Należy pamiętać, że wiązka lasera posiada pewną szerokość i pomiar nie odbywa się w punkcie, ale jest uśrednieniem wartości dla pewnej powierzchni. Wynikające stąd ograniczenia są również przedmiotem badań przedstawionych w dalszej części.

- c) Rozdzielczość. Pojęcie to posiada zupełnie różne znaczenie w przypadku omawiania trybu tachimetrycznego i skanującego. W przypadku klasycznego pomiaru pod pojęciem rozdzielczości rozumiemy minimalną dyskretną wartość, z jaką podaje się wynik pomiaru. Jest ona najczęściej zależna od rozdzielczości napędu tachimetru oraz sposobu przetwarzania danych. Zazwyczaj jest znacznie (o rząd wielkości) mniejsza (precyzyjniejsza) niż podawana przez producenta dokładność, ale nie wpływa bezpośrednio na dokładność i nie należy mylić obu pojęć. Wyświetlany wynik 100.234 (czyli z rozdzielczością 0.001) przy dokładności pomiaru 0.1 oznacza wartość w przedziale 100.134 do 100.334, z największym prawdopodobieństwem wystąpienia wartości bliskiej 100.234. W trybie skanowania pod pojęciem rozdzielczości rozumiemy liczbę punktów skanowanych przypadających na jednostkę długości lub powierzchni. Dla współczesnych tachimetrów rozdzielczość pomiarów podawana jest w dziesiątych milimetra, dla operacji skanowania formalnie rozdzielczość może być również bardzo wysoka, ponieważ wynika z rozdzielczości pomiarowej kątowej, jednak z uwagi na niską prędkość skanowania (rzędu 20 pkt/s), w praktyce ustala się jej wartość stosunkowo niską (na poziomie 1 pkt/cm i niżej).
- d) Prędkość pomiaru. Dla pomiarów tachimetrycznych oznacza czas wykonania pojedynczego pomiaru. Dla podniesienia dokładności, urządzenie dokonuje wielokrotnego pomiaru pozycji tego samego punktu, a jako wynik końcowy podaje wartość uśrednioną. W zależności od przyjętej metody i producenta, stosowane są różne algorytmy i różne wielkości zbiorów wartości do uśredniania. Wpływa to wprost na czas wykonania pomiarów, który we współczesnych tachimetrach waha się zwykle od 0.5 do 5 s, dla pojedynczego punktu. Zwykle użytkownik może regulować te wartości, a przynajmniej wybierać tryb pracy (zgrubny/dokładny). Na rzeczywistą szybkość pomiaru znaczny wpływ mają również umiejętności i sprawność operatora. W przypadku procesu skanowania, prędkość pomiaru określa liczbę punktów pomierzonych w czasie sekundy. W tym zakresie widać ogromną dysproporcję pomiędzy możliwościami skanerów (osiągających nawet 1.2 mln pkt/s) a tachimetrów, które prowadzą akwizycje danych znacznie wolniej (zwykle ok. 20-30 pkt/s).
- e) Szybkość śledzonego celu. Parametr zależny od dynamiki urządzenia i oprogramowania. W przypadku pomiarów kątowych, zazwyczaj producent wymaga, aby cel poruszał się z prędkością kątową poniżej 10-20°/s. Dla pomiarów odległości większość producentów nie podaje danych, jednak praktyka wykazuje, że śledzenie celów poruszających się w kierunku radialnym z prędkością większą niż 4 m/s jest trudno wykonalne.
- f) Kolor wiązki. W przeciwieństwie do skanerów, gdzie można spotkać lasery o wiązkach pracujących w różnych zakresach (od podczerwieni do koloru niebieskiego), w przypadku tachimetrów dominują lasery czerwone i podczerwone. Jest to spowodowane sposobem pomiaru odległości, bazującym na pomiarze różnicy fazy modulacji wiązki lasera, a ta technika jest najlepiej opanowana właśnie dla większych długości fali. Powoduje to określone problemy, związane z wysokim współczynnikiem tłumienia w wodzie. Utrudnia to prowadzenie pomiaru obiektów mokrych, gdyż nawet cienka warstewka wody jest w stanie znacząco zafałszować wyniki.
- g) Parametry użytkowe, takie jak: masa, wymiary, czas pracy na bateriach, wielkość pamięci wewnętrznej, możliwość wymiany baterii i pamięci w trakcie pracy, szybkość transmisji danych do PC, parametry wyświetlacza itp., które decydują o komforcie i efektywności pracy, nie mając jednak bezpośredniego wpływu na dokładność pomiarów.

Integralną częścią urządzenia pomiarowego jest oprogramowanie sterujące. Ma ono za zadanie umożliwić użytkownikowi dostęp do konfiguracji i sterowania sprzętem, a także coraz częściej zdjąć z niego obowiązek wykonywania skomplikowanych czynności związanych z kalibracją, przetwarzaniem czy łączeniem wyników uzyskanych z różnych pozycji. Oprogramowanie sterujące może być zainstalowane na osobnym komputerze PC, jednak coraz częściej znajduje się ono w pamięci komputera zintegrowanego z urządzeniem. Jest ono projektowane w sposób zapewniający ergonomiczną pracę i szybką naukę obsługi. Typowym przykładem jest wykorzystanie systemu operacyjnego Windows CE, który pozwala na ujednoczenie interfejsu użytkownika z aplikacjami uruchamianymi na komputerze PC.

Obserwując rynek urządzeń pomiarowych, możemy zauważyć dwa zbieżne trendy – z jednej strony skanery są wyposażane w coraz doskonalsze funkcje pomiarowe, z drugiej strony tachimetry w funkcje skanujące. Oba typy urządzeń uzupełniane są przez GPS i często wspólne formaty zapisu danych i oprogramowanie do ich obróbki. Prawdopodobnie w niedalekiej przyszłości doprowadzi to do ujednoczenia platformy pomiarowej, jednak na razie ze względu na wyraźną różnicę w cenie obu typów urządzeń, funkcjonują one na rynku równolegle.

System odczytowy absolutny	H: dwustronny V: dwustronny
Minimalny odczyt	1"/5"; 2 cc /10 cc
Dokładność	3"/10 cc
Zasięg i szybkość śledzenia	
Maksymalna szybkość śledzenia	15°/sekundę
Automatyczny zakres wyszukiwania celu	+/-5°
Zasięg śledzenia dla 1 pryzmatu	8 do 1000 m
Zasięg śledzenia dla pryzmatu 360° (A7)	10 do 600 m
Serwomotory	
Maksymalna prędkość	85°/sekundę
Minimalna rozdzielczość/dokładność	około 1"
Ilość prędkości	7
Kompensator	
Typ	dwuosiowy
Rodzaj	cieczowy
Zakres	+/- 6'

Pionownik optyczny	
Pole widzenia	4°
Zakres ogniskowania	od 0.5 m do nieskończoności
Powiększenie	3 x
Lible	
Pudełkowa	10' / 2 mm
Rurkowa	30" / 2 mm
Warunki pracy	
Temperatura	Od - 20°C do +50°C
Wilgotność i zapylenie	Wodo- i pyłoszczelny IP54
Wyświetlacz	
Wyświetlacz	Kolorowy, dotykowy 3.5", 240x320 pikseli
Ilość	jednostronny
Klawiatura	25 podświetlanych klawiszy
Aparat fotograficzny	
Sensor	1,3 Mpix (1280 x 1024) SXGA wbudowana w układ optyczny o 30-krotnym powiększeniu.
Pole widzenia	Szerokokątny 33°, normalny 1°
Auto Focus	Od 5 m do 1000 m
Inne	
System operacyjny	Windows CE.NET 4.2
Pamięć wewnętrzna	1 GB
Wymiary	338 x 220 x 1859 (wys. x szer. x gł.)
Masa	7.2 kg (z baterią)
Czas pracy baterii: ciągły pomiar kątów	-
Czas pracy baterii: ciągły pomiar odległości	3 x 3.5 godziny
Czas pracy baterii: średni czas pracy	-
Czas ładowania baterii	5 godzin

2.3. Program badań

Kompletny program badań objął szereg szczegółowych problemów związanych z konfiguracją tachimetru oraz sposobem pracy. Zostały one podzielone na dwie grupy, realizowane w dwóch etapach. Pierwsza obejmuje prace związane z przygotowaniem sprzętu oraz dopasowaniem procedury pomiarowej do własności optycznych i wielkości eksponatu. Większość z badanych zagadnień została opisana w instrukcji użytkownika, jednak wymagają one weryfikacji przy uwzględnieniu warunków pracy, na jakie napotykamy w przypadku dokumentacji typowych dla pracy NMM eksponatów. Zagadnienia ujęte w ramach grupy pierwszej podzielone zostały na 3 odrębne problemy:

- a) Wpływ konfiguracji tachimetru i parametrów skanowania na uzyskane wyniki.
- b) Wpływ własności optycznych powierzchni (kolor, chropowatość), kąta padania wiązki i odległości skanowania na uzyskane wyniki, dla wybranych typów eksponatów:
 - Elementy drewniane znajdujące się w NMM (ekspozycja na Ołowiance, elementy suche, zakonserwowane, mierzone w pomieszczeniach, elementy w trakcie prac konserwatorskich – mokre oraz wystawione na działanie warunków atmosferycznych, np. kadłuby łodzi rybackich eksponowane w Helu).
 - Elementy metalowe, wewnętrzne i zewnętrzne (kadłub i wnętrze s.s. „Sołdek”).
 - Budynki – powierzchnie ceramiczne o różnym kolorze i chropowatości (np. Żuraw, Spichlerze).
- c) Wpływ oświetlenia (naturalnego i sztucznego).

Grupa druga zawiera opisy prób łączenia kilku technik pomiarowych, w celu poprawienia procesu dokumentacji lub wręcz jego umożliwienia w przypadku, gdy standardowe procedury nie zapewniają uzyskania pożądanego wyniku. Szczegółowy zakres obejmuje badania następujących zagadnień:

- d) Dokładność złożenia skanów, na podstawie punktów referencyjnych pomierzanych tachimetrem oraz skanów tachimetrycznych.
- e) Skanowanie obiektów wielkogabarytowych techniką śledzenia celu.
- f) Wykorzystanie tachimetru do śledzenia pozycji skanera ręcznego oraz ramienia pomiarowego.
- g) Wykorzystanie technik uzupełniających, obsługiwanych przez oprogramowanie tachimetru: fotogrametria i GPS.

Integralną częścią procesu jest obsługa oprogramowania sterującego tachimetrem, jak również służącego do obróbki danych. Dlatego przedmiotem oceny jest również ergonomia załączonego software'u oraz formaty i wielkość plików z pozyskanymi danymi.

2.3.1. Parametry konfiguracji tachimetru

Zagadnienie to obejmuje badanie wpływu wyboru konfiguracji tachimetru na uzyskane wyniki. Większość danych na ten temat można znaleźć w instrukcji obsługi urządzenia, jednak niektóre z nich są określone w sposób bardzo przybliżony (np. „dla powierzchni jasnych”) i wymagają bliższego rozpoznania w warunkach typowych dla prac prowadzonych w NMM. Kluczowym problemem jest wykonalność i czas realizacji wybranych zadań, w typowych warunkach pracy, dla wszystkich trybów pracy dostępnych z poziomu programu sterującego (dokładny, zgrubny, śledzący):

- a) pomiary punktowe w oparciu o reflektor,
- b) pomiary w oparciu o marker odblaskowy,
- c) pomiary w oparciu o punkty charakterystyczne obiektu (bezlustrowy),
- d) wpływ parametrów konfiguracyjnych: wysokość, ciśnienie, temperatura, poziomowanie urządzenia.

Analiza wyników odbywa się poprzez porównanie z wynikami referencyjnymi, uzyskanymi metodą dokładniejszą lub na podstawie pomiarów obiektu wzorcowego o znanych wymiarach.

2.3.2. Wpływ własności optycznych powierzchni eksponatów

Własności optyczne powierzchni mierzonego obiektu mają znaczenie wyłącznie w przypadku metody bezlustrowej. Dotyczy to zarówno trybu pomiarów punktowych, jak i skanowania. Bierzemy pod uwagę następujące cechy:

- a) Kolor – pochłanianie przez powierzchnię obiektu energii wiązki lasera może skutecznie utrudnić, a nawet uniemożliwić wykonanie pomiaru. Badamy wpływ koloru (szczególnie interesujące są pokrycia ciemne oraz czerwone – bliskie kolorowi wiązki lasera).
- b) Połysk i pokrycie warstwą wody – w przypadku wykorzystania skanerów 3D połysk powierzchni stanowi poważny problem, w praktyce często uniemożliwiający wykonanie pomiaru. Ponieważ w przypadku tachimetru proces pomiarowy wygląda nieco inaczej, zdecydowano się przetestować możliwość wykonania pomiarów na błyszczącej (szlifowanej) powierzchni metalowej. Skrajnym przykładem utrudnienia pomiarów przez zjawisko połysku

jest obecność warstwy wody na powierzchni, która wykazuje się wysokim tłumieniem oraz zakłóca pomiar fazy, a więc i odległości.

- c) Chropowatość i kształt obiektu mają również istotne znaczenie dla pomiarów optycznych. Powierzchnia o znacznej chropowatości rozprasza wiązkę lasera, a także utrudnia określenie wartości pomiaru punktowego. Należy pamiętać o tym, że pomiaru dokonuje się przez uśrednienie wartości z obszaru oświetlonego przez laser, a w związku z tym, duża chropowatość, przechodząca w falowanie powierzchni, może powodować zafałszowanie pomiaru. Skrajnym przykładem jest problem pomiaru krawędzi, które w wyniku uśredniania pomiarów w jej bezpośrednim sąsiedztwie zwykle zostają rejestrowane jako zaokrąglone.

Pomiarów dokonujemy z kierunku zbliżonego do prostopadłego (wpływ kąta pomiaru badany jest w osobnym procesie). Oceny wyników dokonujemy przez porównanie z modelem referencyjnym, uzyskanym na drodze skanowania ramieniem pomiarowym. Oczywiście ma to sens jedynie w przypadku porównania kształtu wybranego fragmentu eksponatu – ramię nie jest w stanie dostarczyć kompletnych danych dla obiektu wielkogabarytowego. Ocenie podlegają:

- kształt (dewiacje w stosunku do kształtu referencyjnego),
- czas pomiaru (s),
- kompletność pomiaru (ilość traconych punktów w %).

Wyniki są rejestrowane zgodnie ze schematem, który ilustruje Tabela 1.

	Materiał 1		Materiał 2		Materiał 3		...
	Suchy	Mokry	Suchy	Mokry	Suchy	Mokry	
Tryb punktowy							
odległość 1							
kąt 1							
kąt 2							
kąt 3							
odległość 2							
kąt 1							
kąt 2							
kąt 3							
odległość 3							
kąt 1							
kąt 2							
kąt 3							
Tryb skanowania							
odległość 1							
...							

Tabela 1. Schemat rejestracji wyników pomiarów

Systematyczne pomiary dla celów porównawczych wykonywane są dla:

- 2 trybów (lustrowy/bezlustrowy),
 - 5 typów materiałów,
 - 2 stanów powierzchni (suchy i mokry),
 - 4 kątów padania wiązki (90, 75, 60, 45),
 - 12 odległości (od 2 do 50 m),
- co w sumie skutkuje 480 przypadkami testowymi.

Dla przypadków, w których nie udało się uzyskać pomiaru, przetestowano przydatność stosowania różnych form dodatkowego pokrycia, mającego polepszyć własności optyczne powierzchni. Pokrycie takie musi być tanie, obojętne dla środowiska, łatwo usuwalne z eksponatu. W przypadku skanowania wykorzystywany jest często tlenek tytanu, jednak dla obiektów wielkogabarytowych jest to rozwiązanie zbyt kosztowne. Testy wykonano dla kilku rodzajów mąki, talku, a także pokrycia obiektu parą wodną i szronem.

Wpływ oświetlenia

Zgodnie ze specyfikacją urządzenia, zewnętrzne warunki oświetleniowe nie powinny mieć wpływu na wyniki pomiarów. Dlatego wykonane zostaną jedynie podstawowe pomiary, w trybie punktowym, skanującym i śledzącym oraz automatycznego wyszukiwania reflektora, dla następujących warunków:

- a) brak oświetlenia (pomiar w zaciemnionym pomieszczeniu),
- b) ograniczone oświetlenie (pomiar wykonywany w nocy, w plenerze),
- c) oświetlenie dzienne (południe, późne popołudnie),
- d) oświetlenie sztuczne żarowe,
- e) oświetlenie sztuczne jarzeniowe.

W przypadku wystąpienia wyników niezgodnych ze specyfikacją urządzenia, przewiduje się możliwość przeprowadzenia bardziej szczegółowego programu testów, wykraczającego poza przewidywane 24 kombinacje.

Wszystkie pomiary dotyczą typowych eksponatów, czyli elementów drewnianych oraz tablic testowych charakteryzujących się powierzchnią o ciemnym kolorze. Ocenie podlega wykonalność, czas wykonania oraz dokładność pomiaru porównana z pomiarem referencyjnym. Pomiary w plenerze i w pomieszczeniu wykonano z jednej pozycji i dla tego samego eksponatu, przy zmiennych warunkach oświetleniowych, z odległości ok. 25 m (wyznaczonej na podstawie analizy literatury [7], [25]) i przy kierunku obserwacji zbliżonym do prostopadłego.

	Brak oświetlenia	Oświetlenie ograniczone	Oświetlenie naturalne (południe)	Oświetlenie naturalne (popołudnie)	Oświetlenie żarowe	Oświetlenie jarzeniowe
Tryb punktowy						
Tryb skanowania						
Tryb śledzący						
Tryb wyszukiwania reflektora						

Tabela 2. Schemat rejestracji wyników pomiarów

Pomiary punktowe do składania skanów częściowych

Zadanie to obejmuje porównanie jakości złożenia w oparciu o punkty referencyjne z tachimetru, ramienia pomiarowego i analizy obrazu skanera przenośnego. Próbą usprawnienia tego podejścia jest śledzenia pozycji i orientacji ramienia pomiarowego, w celu wykorzystania wyników pomiaru do łączenia skanów. Takie rozwiązanie może być przydatne w sytuacji, gdy skanowany obiekt posiada bardzo duże gabaryty, wymaga skanowania ramieniem lub skanerem ręcznym, a jednocześnie nie zawiera elementów charakterystycznych przydatnych do łączenia skanów i sprawia trudności w montażu zewnętrznych punktów referencyjnych.

Zakłada się, że taka procedura przy bardzo dużych gabarytach i wielokrotnym składaniu skanów może okazać się korzystna, ze względu na brak kumulowania się błędów. W przypadku tachimetru można uzyskać dokładność na poziomie 2 mm na całym obiekcie, dzięki pomiarowi z pojedynczej pozycji. Program testów obejmuje rekonstrukcję stępki i wybranych klepek poszycia wraku W-5. Porównaniu podlega geometria zbudowana za pomocą samego skanera lub ramienia pomiarowego, z geometrią powstałą w wyniku łączenia skanów na bazie punktów referencyjnych uzyskanych z tachimetru. Dla uproszczenia przyjęto taki dobór punktów referencyjnych, aby co najmniej 3 z nich znalazły się w polu pracy skanera lub ramienia w trakcie odczytu skanu częściowego. Należy również zwrócić uwagę na konieczność wykonania obu typów pomiarów bez przemieszczania eksponatów. Przy założonych znacznych gabarytach skanowanego obiektu każde jego przesunięcie lub obrócenie może spowodować deformację, co w efekcie doprowadzi do niemożliwości połączenia skanów częściowych w spójną całość. Punkty referencyjne mogą być obierane na kilka sposobów:

- a) Punkty charakterystyczne geometrii eksponatu – narożniki, otwory, końcówki pęknięć itp. Niestety, nie wszystkie obiekty posiadają wystarczającą liczbę takich punktów. W przypadku obłych kształtów, zastosowanie tej metody może okazać się kłopotliwe lub wręcz niemożliwe.
- b) Sztucznie wprowadzone punkty referencyjne, np. przez wkręcenie cienkich wkrętów w wybranych miejscach. Praktyka taka jest często stosowana w przypadku konieczności kalibracji ramienia pomiarowego przy metodzie kontaktowej, jednak dla cenniejszych eksponatów jest niedopuszczalna.
- c) Sztuczne punkty referencyjne, niezwiązane z obiektem – np. siatka markerów na stałe naniesionych na stół pomiarowy lub wmurowanych w podłogę i ściany pracowni pomiarowej. W tym przypadku można zarejestrować

pozycje punktów referencyjnych technikami o znacznie wyższej dokładności niż sprzęt skanujący, a przez to podnieść precyzję łączenia skanów.

- d) Łączenie powyższych metod – w przypadku konieczności przemieszczenia eksponatu (np. obrotu, w celu wyeksponowania jego niewidocznej części) optymalne wydaje się łączenie powyżej opisanych sposobów, przy czym ich wybór zależy od konkretnego eksponatu i preferencji operatora.

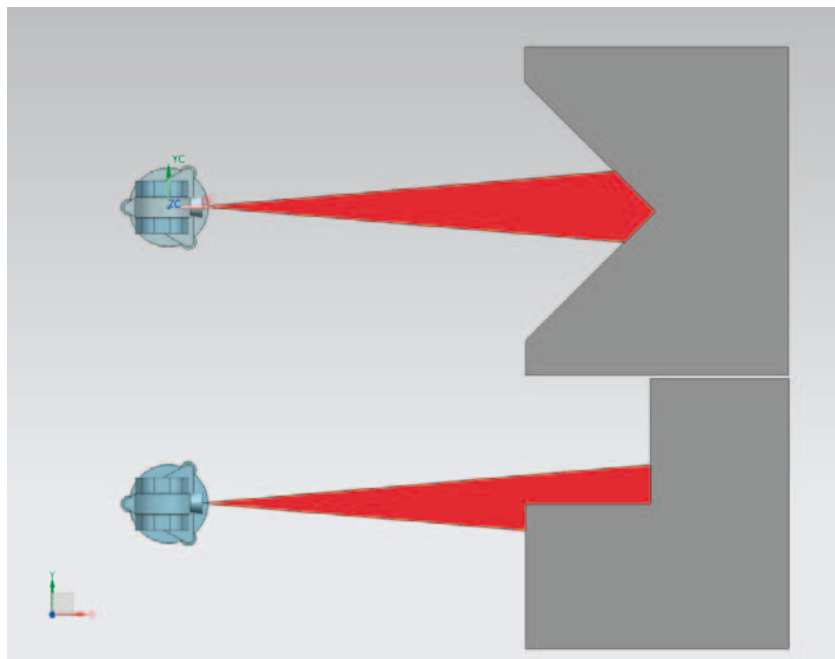
Rozwinięciem tej koncepcji jest wykorzystanie tachimetrycznego skanu o niskiej gęstości, opisane dalej. Należy jednak zdawać sobie sprawę z niższej dokładności i ograniczeń stosowania, wynikających z własności optycznych eksponatów.

2.3.3. Skanowanie

Skanowanie stanowi dodatkową funkcję tachimetru i może być realizowane na dwa sposoby:

- a) Klasyczne skanowanie w trybie bezlustrowym.
- b) Skanowanie kształtu powierzchni poprzez śledzenie reflektora. Funkcja charakterystyczna dla trackerów, jednak możliwa również do wykorzystania w przypadku tachimetrów – szczególnie w sytuacji, gdy mierzony obiekt charakteryzuje się prostym i gładkim kształtem.

W przypadku skanowania w trybie bezlustrowym, należy brać pod uwagę dwa podstawowe ograniczenia wynikające z konstrukcji i zasady działania: niska prędkość rejestracji punktów (ok. 20 pkt/s) oraz stosunkowo duża rozbieżność wiązki, co skutkuje uśrednianiem wyniku z większej powierzchni, a przez to niską rozdzielczością dla obiektów o dużym nasyceniu drobnymi detalami (Il. 6).



Il. 6. Przykładowe sytuacje prowadzące do obniżenia dokładności i rozdzielczości (opr. własne)

W związku z powyższym skanowanie tachimetrem należy traktować jako technikę podstawową wyłącznie w przypadku obiektów gładkich, gdzie niewielka gęstość punktów nie ma wpływu na dokładność, a przede wszystkim na szczegółowość odwzorowania powierzchni. W pozostałych przypadkach technika ta jest traktowana jako uzupełniająca, wykorzystywana głównie od rejestracji i łączenia niewielkich, dokładnych skanów w modele obiektów wielkogabarytowych. Zastosowanie tej techniki może być również użyteczne w przypadku konieczności skanowania elementów trudno dostępnych, jednak z ograniczeniem odległości skanowania do ok. 150 m. Zaletą skanu tachimetrycznego jest również regularna siatka punktów, pozwalająca na wygenerowanie gładkiej powierzchni o wysokiej jakości. W ramach testowania możliwości Tachimetru IS-203 przeprowadzone zostały badania obejmujące:

- a) Wpływ odległości, kąta skanowania i koloru obiektu (opisane w pkt. 2.3.2).
- b) Wpływ gęstości siatki na poziom szczegółowości, czas skanowania i wielkość plików z danymi. Celem jest znalezienie granicznej rozdzielczości, powyżej której nie uzyskuje się już przyrostu informacji na temat detali. Program obejmuje skanowanie z odległości 10, 25, 50 m i skokiem od 100 mm, zmniejszonym dwukrotnie w dół, aż

do zaobserwowania braku szczegółów. Za dolną wartość graniczną przyjmuje się rozdzielczość odpowiadającą $\frac{1}{4}$ średnicy plamki, przy danej odległości, lub minimalny skok urządzenia.

- c) Dokładność odwzorowania kształtu obiektu, przy stosunkowo niskiej dokładności pomiaru pojedynczych punktów. Jak podaje producent, w trybie skanowania dokładność ta wynosi 12 mm dla pojedynczego punktu, przy standardowej dewiacji na poziomie 5 mm. Celem tego etapu jest zbadanie, czy błąd ten można uznać za systematyczny i pominąć go (skompensować) w przypadku analizy kształtu skanowanego obiektu.

Badania obejmują skanowanie drewnianego elementu wraka (a i b), metalowej burty statku-muzeum s.s. „Sołdek” (a i b) oraz płaskiej płyty o wymiarach ok. 400x400 mm, wykonanej z dokładnością 0.05 mm (c).

Zupełnie inne możliwości daje funkcja śledzenia celu. Dokładność w tym przypadku może sięgać nawet 2 mm, przy założeniu zatrzymywania celu w punktach pomiarowych na kilkusekundowe okresy. Technika ta wymaga manualnego prowadzenia reflektora oraz wykonania korekty położenia mierzonych punktów o stałe przesunięcie bazy reflektora w stosunku do mierzonego punktu. Zastosowanie tej techniki ogranicza się do obiektów łatwo dostępnych. Może okazać się korzystne w przypadku konieczności wykonania pomiarów ze znacznej odległości (do 4 km) oraz niekorzystnych własności optycznych skanowanej powierzchni. W ramach projektu wykonano skanowanie burty łodzi DEB-5, znajdującej się w oddziale NMM w Helu.

2.3.4. Fotogrametria i GPS

Ponieważ integralną część wyposażenia związanego z tachimetrem IS-203 stanowi oprogramowanie Image Master, przedmiotem testów były również dodatkowe możliwości pomiarowe, wynikające z funkcjonalności programu. Obejmują one pomiary GPS oraz fotogrametryczne. Obie metody charakteryzują się znacznie niższą dokładnością niż pomiary tachimetryczne, jednak w przypadku obiektów o bardzo dużych gabarytach (stanowisk archeologicznych) mogą stanowić istotne uzupełnienie dla procesu pomiarowego. Najważniejsze zalety pomiarów GPS:

- a) szybkie uruchomienie systemu pomiarowego,
- b) bezpośrednie umieszczenie pomiarów na mapie, bez konieczności prowadzenia skomplikowanych obliczeń.

Jednak ze względu na niską dokładność (30 mm w najkorzystniejszych warunkach), zastosowanie GPS jako techniki uzupełniającej skanowanie jest ograniczone. Najbardziej obiecujące zastosowanie obejmuje wstępne wyznaczenie pozycji tachimetru i ramienia pomiarowego na stanowisku archeologicznym, pozwalające na ograniczenie zakresu przemieszczania chmury punktów w trakcie procesu łączenia skanów. W efekcie pozwala to na szybsze skompletowanie modelu złożonego z kilku chmur punktów, na podstawie analizy krzywizny.

W przypadku fotogrametrii najbardziej istotnymi cechami są:

- a) bardzo szybka rejestracja danych,
- b) wykorzystanie standardowego i łatwego w obsłudze sprzętu w postaci aparatu fotograficznego,
- c) przeniesienie prac do warunków biurowych, a więc podwyższenie komfortu i obniżenie kosztów pracy,
- d) automatyczna rejestracja tekstury, pozwalająca na szybkie przygotowanie modelu do celów wizualizacyjnych,
- e) do wad należy zaliczyć brak możliwości podglądu danych i podjęcia działań korekcyjnych na miejscu pomiaru, a także konieczność restrykcyjnego przestrzegania procedury pomiarowej związanej z koniecznością uzyskania par fotografii wygenerowanych przy tych samych warunkach, z punktów i w zakresie odpowiadającym wymaganiom stereometrii.

Badanie przydatności obejmowało następujące aspekty:

- a) wpływ przesunięcia stereopary na uzyskaną dokładność,
- b) wpływ rozdzielczości zdjęć (badania wykonano za pomocą aparatów cyfrowych o rozdzielczości 6 i 24 Mpiksel),
- c) czas opracowania wyników.

2.3.5. Oprogramowanie i wielkość danych

Oprogramowanie dołączone do urządzenia jest niezwykle istotnym elementem całego systemu pomiarowego, gdyż stanowi interfejs użytkownika i decyduje o komforcie i efektywności procesu pomiarowego. W przypadku tachimetru, towarzyszące oprogramowanie jest bardzo rozbudowane i obejmuje 3 grupy narzędzi:

- a) Aplikacje zainstalowane na komputerze sterującym, wbudowanym w urządzenie. Komputer pracuje pod kontrolą systemu operacyjnego Windows CE i zawiera 2 programy pozwalające na pracę tachimetrem. Aplikacja Standard Measurement pozwala na bardzo szybkie i intuicyjne wykonywanie podstawowych pomiarów. Top-surv zawiera bardziej zaawansowane funkcje, z obsługą trybu skanowania włącznie.

- b) Aplikacje obsługujące urządzenie zainstalowane na komputerze klasy PC. Topsurv w wersji PC i Image Master pozwalają na zdalne operowanie tachimetrem i analizę wyników.
- c) Oprogramowanie zewnętrzne, służące do obróbki danych zebranych przez tachimetr w trybie postprocessingu (Geomagic, Rhino, Autocad, inne programy z grupy CAD).

Cechą charakterystyczną pomiarów i skanów tachimetrycznych jest niewielki rozmiar plików zawierających wyniki. W porównaniu z plikami pochodzącymi ze skanerów i zawierającymi nawet miliardy punktów, dane z tachimetrów mają kompaktowe rozmiary, co bezpośrednio wpływa na możliwość ich przetwarzania. Przede wszystkim nie wymagają stosowania wyspecjalizowanego oprogramowania do obróbki dużych chmur punktów, a mogą być obrabiane z użyciem narzędzi CAD. Powoduje to przede wszystkim znaczne obniżenie kosztów pomiarów – aplikacje z grupy CAD są wielokrotnie tańsze od wyspecjalizowanego oprogramowania dla inżynierii odwrotnej (reverse engineering), mają niższe wymagania sprzętowe oraz zwykle są doskonale znane operatorom.

Osobnym problemem jest format zapisywanych danych. Oprogramowanie sterujące wykorzystuje własny format firmy Topcon, który bez problemu może być wykorzystany w innych programach tego samego producenta (Topsurv, Image Master), jednak jest to format zamknięty i zastrzeżony, a obróbka danych w zewnętrznym oprogramowaniu wymaga ich wcześniejszej konwersji. Programy firmy Topcon zapewniają możliwość konwersji bezpośrednio na komputerze sterującym tachimetrem lub za pomocą programów zainstalowanych na PC. Ten ostatni tryb jest zdecydowanie szybszy, wymaga jednak skopiowania danych. Można tego dokonać za pomocą łącza bezprzewodowego (Wi-Fi, Bluetooth), łącza przewodowego USB lub poprzez przeniesienia na wymiennej karcie pamięci SD. Prędkość transmisji wynosi ok. 20 kbps w przypadku łącz bezprzewodowych oraz 500 kbps dla łącza USB. Szybkość odczytu z karty pamięci jest zależna od komputera i zainstalowanego w nim czytnika. We wszystkich przypadkach, ze względu na niewielkie rozmiary plików, operacja kopiowania przebiega szybko i nie stanowi utrudnienia w pracy. Zestawienie dostępnych formatów obejmuje tabela 3.

Formaty plików	Rozmiar pliku (kB)	Czas otwierania na IS (s)	Czas otwierania na PC (s)	Czas transmisji za pomocą Wi-Fi (s)	Czas transmisji za pomocą Bluetooth (s)	Czas transmisji za pomocą USB (s)
Topcon *.fsc						
Topcon *.fsn						
Topcon *.imj						
Topcon *.pi3						
Topcon *.pi4						
Topcon *.piv						
*.isv						
*.foe						
*.fos						
*.hei						
*.cl3						
*.clr						
*.ptx						
*.pts						
*.csv						
*.txt						
*.gcp						
*.apa,						
*.dxf						
*.tin						
*.wrl						
*.obj						

Tabela 3. Schemat rejestracji wyników pomiarów

Rozszerzenie	Typ	Punkty	Siatki	Kolor	Jasność	Normalna	Skalar	Opis
*.asc, *.txt, *.neu, *.xyz,	ascii	+	-	+	+	+	+	Neutralne formaty dla chmur punktów
*.bin	binarny	+	-	+	-	+	+	Format programu Cloud Compare
*.ply	ascii/ binarny	+	+	+	+	+	+	Uniwersalny format Stanford
*.obj	ascii	-	+	-	-	+	-	Format programu Wavefront
*.soi	ascii	+	-	-	+	-	-	Format programu Soisic
*.jt	binarny	+	+	+	+	-	-	Format programu Teamcenter
*.hsf	binarny	+	+	+	+	-	-	Format neutralny HOOPS

Tabela 4. Charakterystyka formatów zapisu danych

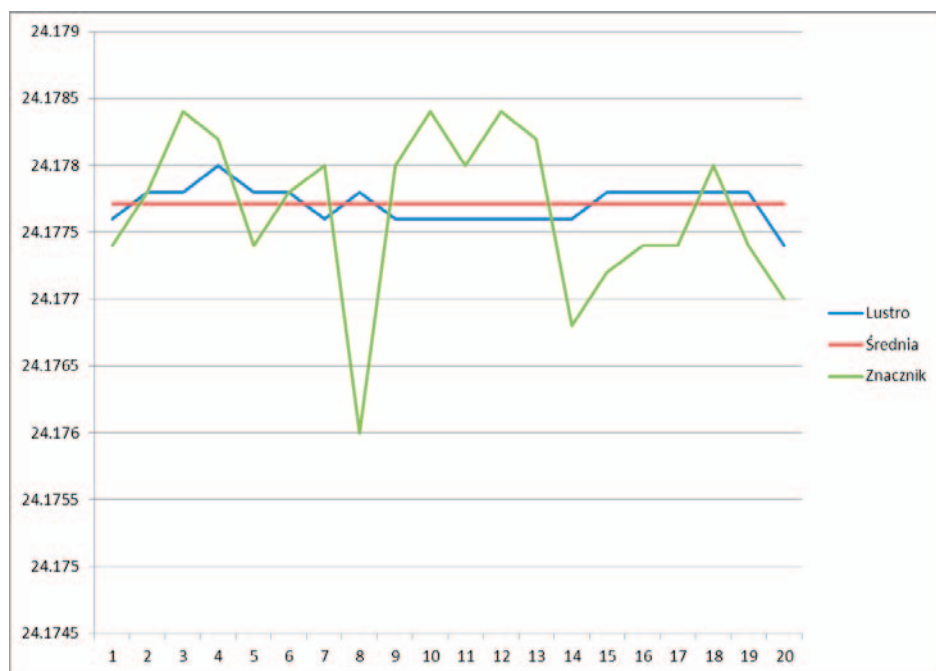
Ten etap prac obejmuje porównanie wielkości plików w formatach zawierających ten sam zestaw danych, czasu wczytywania, transmisji i konwersji na IS oraz PC. Istotne jest również porównanie zakresu rejestrowanych danych, co ma bezpośredni wpływ na sposób archiwizacji wyników pomiarów (Tabela 4).

3. Wyniki

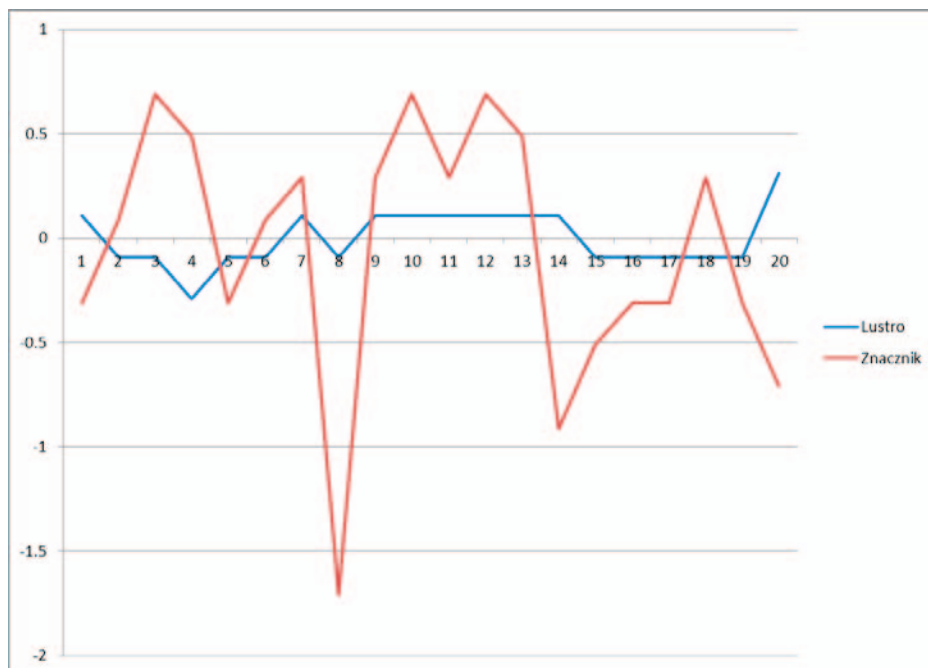
W oparciu o metodykę i zakres badań, przedstawione w rozdziale 2, przeprowadzono szereg pomiarów i testów przydatności tachimetru Topcon IS-203 do wspomagania archiwizacji 3D eksponatów NMM. Należy zaznaczyć, że w kilku przypadkach uzyskano zaskakujące rezultaty, prowadzące do zmiany programu badań.

3.1. Parametry konfiguracji tachimetru

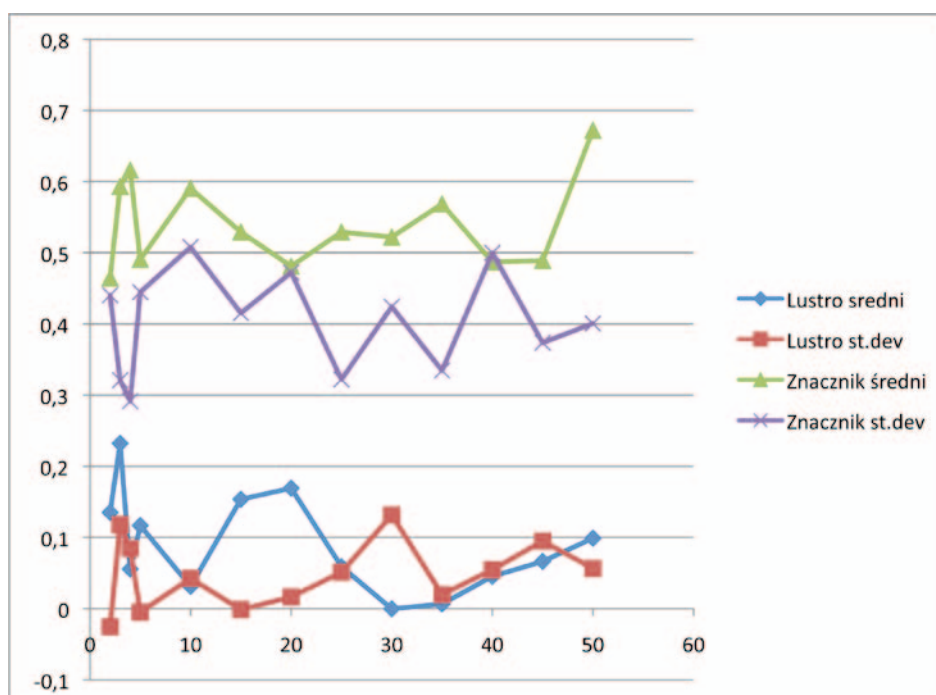
Ponieważ nie mamy możliwości zweryfikowania dokładności pomiaru, pierwszy etap obejmuje badanie powtarzalności pomiarów w trybie ze zwierciadłem i trybie bezlustrowym (zakładamy, że wartość średnia jest wartością referencyjną). Pomiar polega na przeprowadzeniu wielokrotnego pomiaru odległości do nieruchomego reflektora. Uzyskano wyniki, potwierdzające wyniki podawane przez M. Buśko [7]. Ilustracja 7 przedstawia przebieg pomiarów dla odległości ok. 24 m, ilustracja 8 – wartości odchyłki w stosunku do referencyjnej wartości średniej. Identyczną procedurę powtórzono dla odległości od 2 do 50 m. Wartości odchyłki od wartości średniej w zależności od odległości pomiaru przedstawia ilustracja 9.



Il. 7. Wyniki pomiarów powtarzalności dla 24 m (opr. własne)

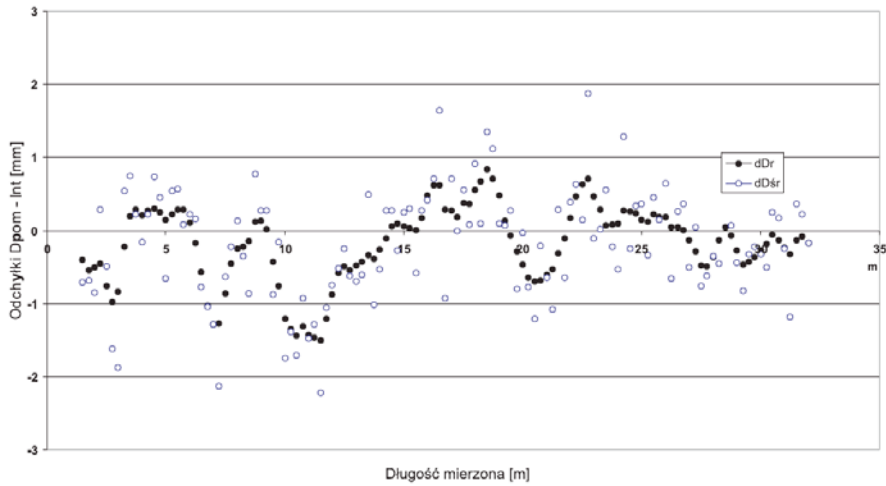


Il. 8. Wartości odchyłki dla pomiarów powtarzalności przy odległości 24 m (opr. własne)

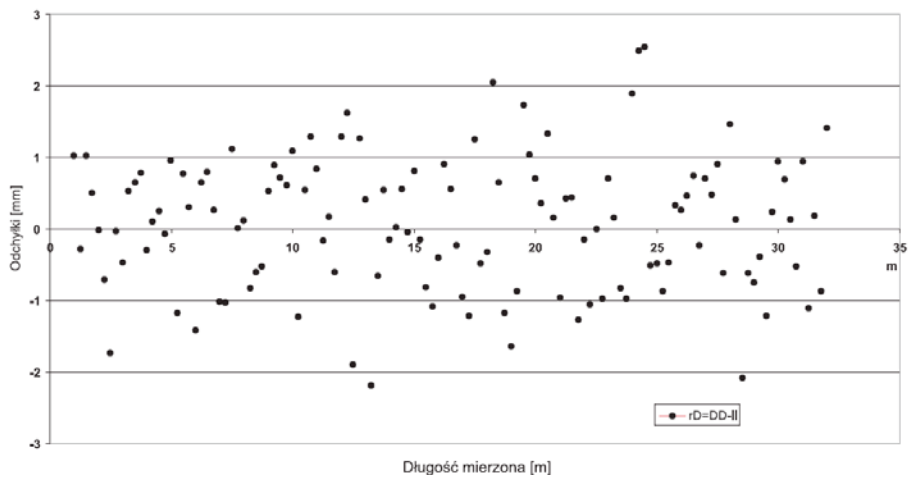


Il. 9. Wartości odchyłki dla pomiarów powtarzalności w funkcji odległości (opr. własne)

Uzyskane wyniki potwierdziły dane podawane przez producenta oraz wyniki uzyskane przez M. Buśko [7], dla pomiarów odległości do reflektora (Il.10) i markera odbłaskowego (Il. 11).

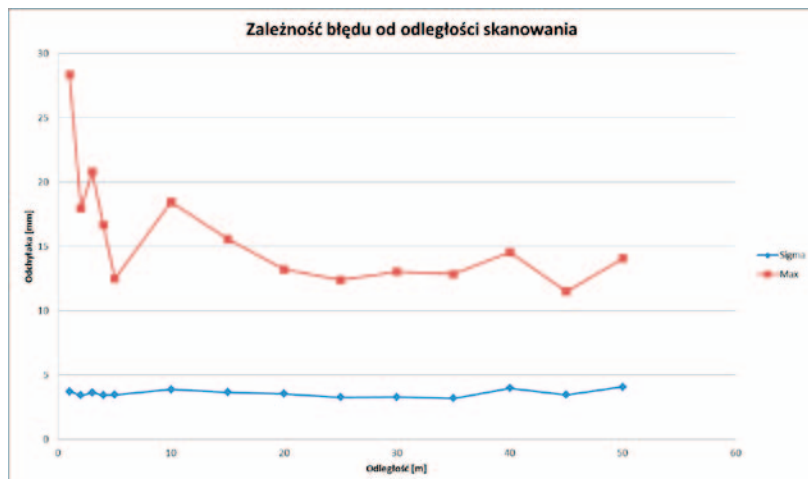


Il. 10. Błąd pomiaru w trybie punktowym z reflektorem [7]

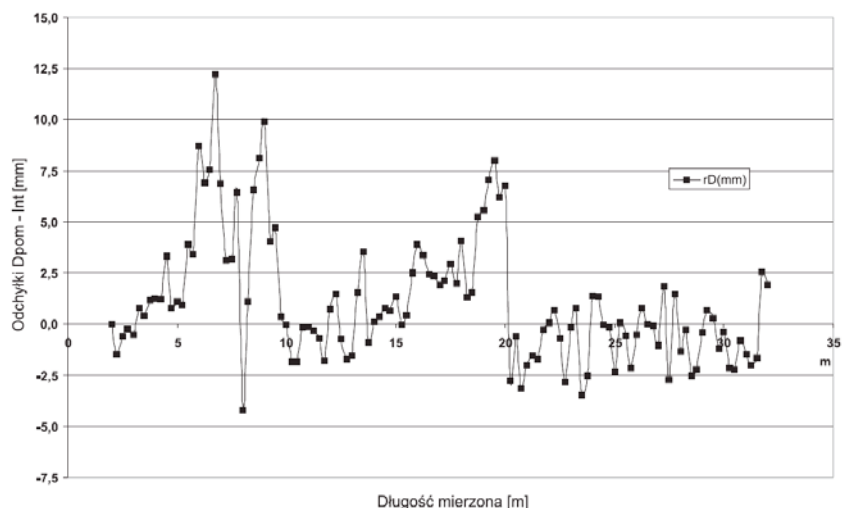


Il. 11 Błąd pomiaru w trybie punktowym z markerem odbłaskowym [7]

Z kolei w trybie bezlustrowym maksymalne odchyłki sięgały nawet 28 mm (średnie ok. 4 mm), przy czym niespodziewanie największe wartości wystąpiły dla niewielkich odległości pomiaru. Powyżej 20 m wartości odchyłki nie przekraczały 13 mm (Il. 12). Jest to wynik bardzo istotny dla planowania procedury pomiarowej, ponieważ na jego podstawie ustalono, że pomiary zachowania kształtu zostaną przeprowadzone dla odległości ok. 25 m. Uzyskane wyniki potwierdzają charakter zmian uzyskany przez M. Buśko [7] – Il. 13.



Il. 12. Błąd pomiaru w trybie punktowym bez reflektora w zależności od odległości (opr. własne)



Il. 13. Błąd pomiaru w trybie punktowym bez reflektora [7]

Wpływ pozostałych parametrów konfiguracyjnych, takich jak wysokość i ciśnienie, pokrywał się z charakterystykami podawanymi przez producenta. Badania zostały powtórzone dla odchylenia tachimetru od pozycji pionowej. W granicach dopuszczalnej wartości nie stwierdzono różnic w wartościach pomiaru. Powyżej dopuszczalnej wartości urządzenie uniemożliwia wykonanie pomiarów (przy włączonej opcji Tilt).

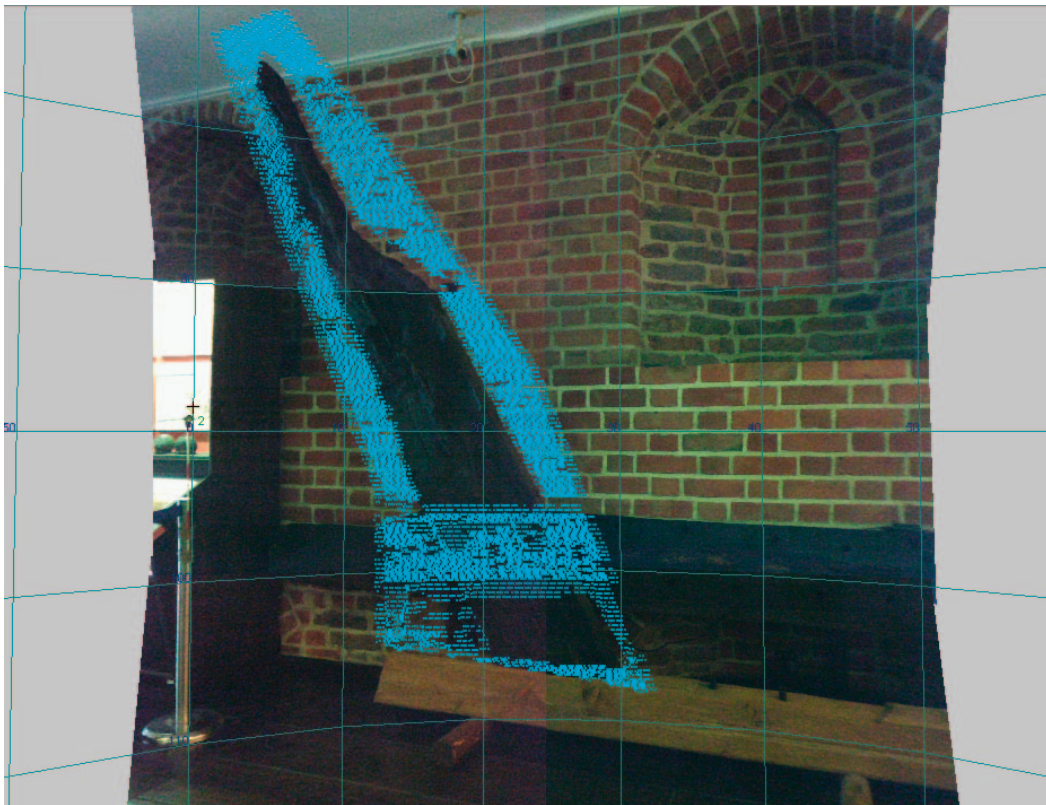
3.2. Wpływ własności optycznych powierzchni eksponatów

Do badania wpływu własności optycznych na uzyskiwane wyniki wytypowano szereg eksponatów. Obiekty drewniane reprezentowane były przez tylnicę wraku W-5, natomiast metalowe przez burtę statku s.s. „Sołdek”, stojącego przy nabrzeżu NMM (Il. 14).

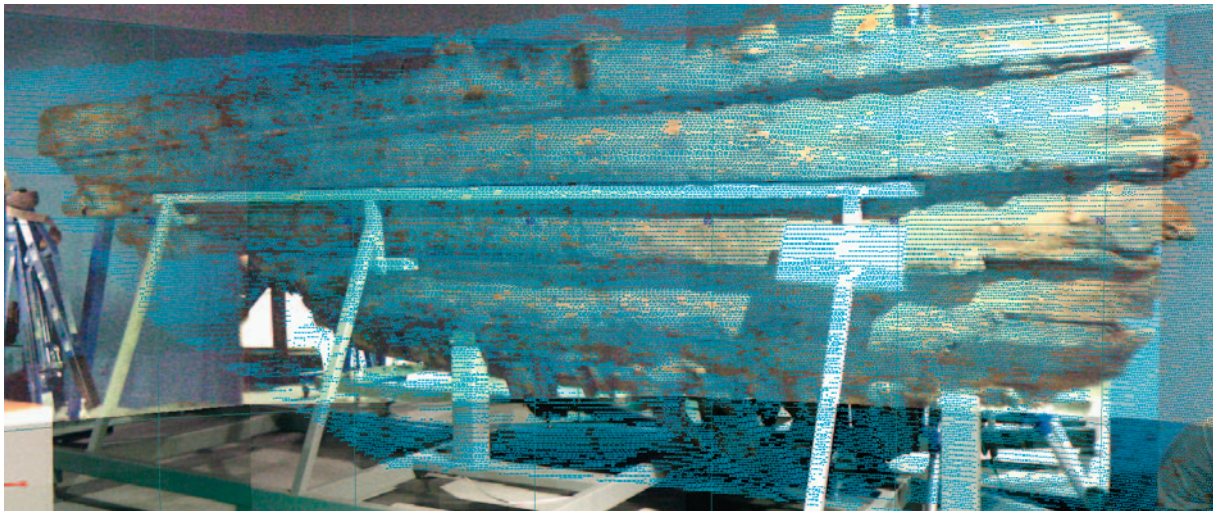


Il. 14. Eksponaty wybrane do badania własności optycznych powierzchni (opr. własne)

Już w trakcie pierwszych pomiarów okazało się, że powierzchnie te nie są rejestrowane przez tachimetr ani w trybie pomiaru punktowego, ani tym bardziej w trybie skanowania. Doskonale ilustruje to Il. 15, przedstawiająca zrzut z ekranu programu Image Master, gdzie wyraźnie widać zarejestrowane punkty wokół skanowanego obiektu. Z drugiej strony uzyskano obiecujące wyniki w przypadku skanowania burty wraku W-5 (Il. 16). Różnice koloru i chropowatości pomiędzy obydwoma eksponatami wydają się niewielkie (niestety, bez odpowiedniego sprzętu pomiarowego nie było możliwości określenia ilościowej różnicy), co świadczy o tym, że tachimetr pracował na granicy swoich możliwości. Podobnych problemów przysporzyła pomalowana na czarno część burty statku-muzeum s.s. „Sołdek”, która okazała się niemal całkowicie pominięta na końcowym skanie (Il. 17).



Il. 15. Wynik skanowania tylnicy wraku W-5 (opr. własne)

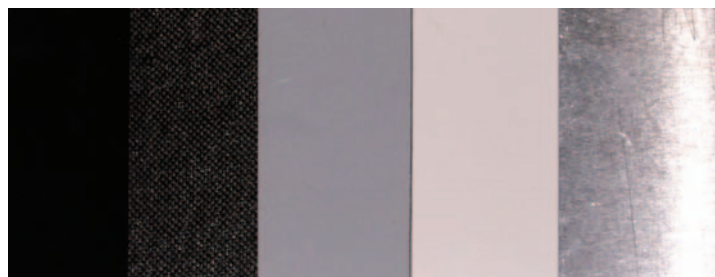


Il. 16. Wynik skanowania burty wraku W-5 (opr. własne)



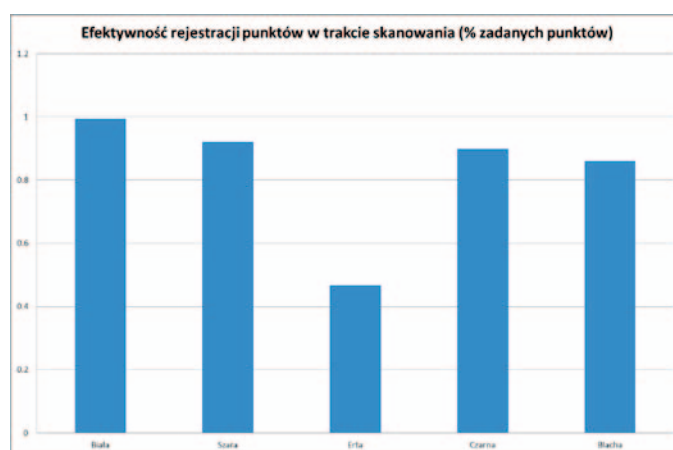
Il. 17. Wynik skanowania burty s.s „Sołdek” (opr. własne)

Należy przyjąć, że dla stosunkowo ciemnych eksponatów, obejmujących drewniane części wraków oraz czarną (i połyskliwą) farbę stanowiącą pokrycie burt statku s.s. „Sołdek”, potrzebne będzie zastosowanie dodatkowych technik, podnoszących refleksyjność powierzchni. W efekcie została podjęta decyzja o modyfikacji procedury testowej. Do dalszych pomiarów wykorzystano płyty wykonane z kompozytu i metalu, o wymiarach ok. 400x400 mm, które zostały pokryte farbą białą, czarną i szarą (Il. 18) i na których bez obaw można było zastosować różne pokrycia testowe.



Il. 18. Wzorcowe płyty wykorzystane do pomiarów

Wstępne wyniki pomiarów pokazują, że jedynie czarna gładka płyta (oznaczona jako Erta, od nazwy materiału, z jakiego została wykonana – Ertalite) wymaga zastosowania pokrycia. Kolory jaśniejsze, jak również – co było niespodzianką – błyszcząca powierzchnia blachy stalowej nie powodowały znaczącej utraty danych. Il. 19 prezentuje uzyskane wyniki (liczbę zarejestrowanych punktów w stosunku do liczby pomiarów).

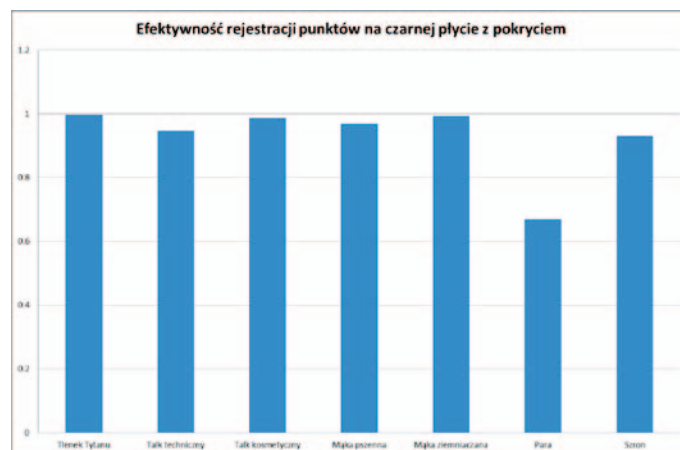


Il. 19. Wzorcowe płyty wykorzystane do pomiarów

Jako pokrycia testowe wykorzystano następujące substancje:

- a) tlenek tytanu (spray),
- b) talk techniczny szary,
- c) talk kosmetyczny biały,
- d) mąka pszenna,
- e) mąka ziemniaczana,
- f) para wodna,
- g) szron.

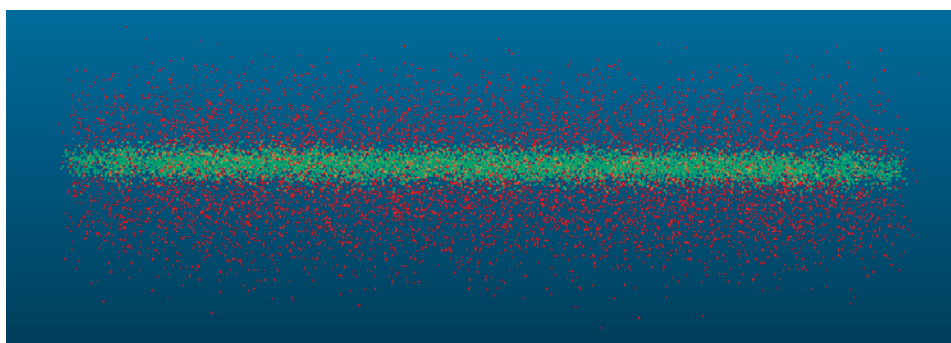
Najlepsze efekty uzyskane zostały w przypadku tlenku tytanu, jednak jest to również najbardziej kosztowne rozwiązanie i w przypadku większych powierzchni praktycznie wykluczone. Spośród pozostałych substancji optymalnym wyborem wydaje się mąka ziemniaczana, która przy niskiej cenie i dobrych efektach optycznych charakteryzuje się również najmniejszą przyczepnością, przez co jest łatwa do spłukania. Substancje zostały naniesione na płyty testowe w dwóch krokach: zwilżenie powierzchni wodą z dodatkiem detergentu i nawiew substancji sypkiej na wilgotną powierzchnię z pomocą wentylatora. Taka technika zapewnia równomierne pokrycie i stosunkowo niskie zużycie substancji. Płyty testowe wykonane w technologii zapewniającej uzyskanie tolerancji płaskości na poziomie 0.05 mm, dlatego zostały wykorzystane również do oceny dokładności pomiaru bezlustrowego. Pokrycie płyt wzorcowych nie powoduje zmian dokładności pomiaru w stosunku do szarej płyty referencyjnej.



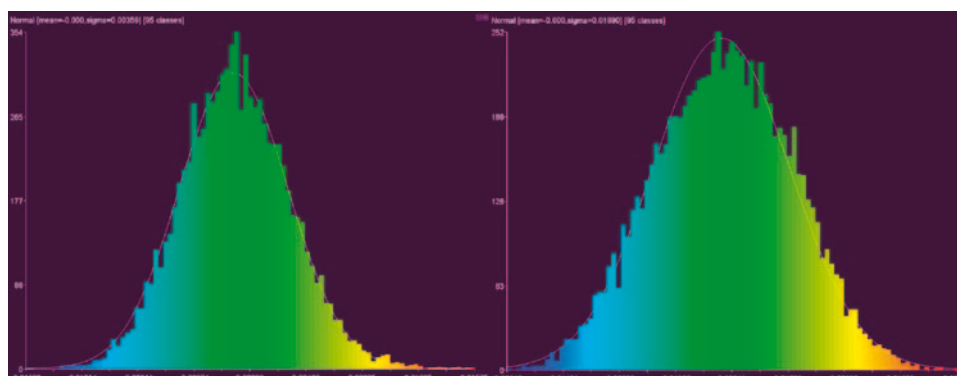
Il. 20. Wzorcowe płyty wykorzystane do pomiarów

3.3. Wpływ oświetlenia

Zgodnie ze specyfikacją techniczną urządzenia nie zaobserwowano wpływu oświetlenia naturalnego i sztucznego na wyniki pomiarów, poza jednym wyjątkiem. Powierzchnia ciemna (płyta kompozytowa czarna) wystawiona przez dłuższy czas na działanie słońca, po nagrzaniu się do temperatury ok. 85°C powoduje znaczący wzrost odchyłki w trybie skanowania. Stąd wynika kolejny oczywisty wniosek dla planowania pomiarów, dotyczący pory dnia i pogody. Il. 21 przedstawia widok boczny chmur punktów dla obu stanów (zimny/gorący), a Il. 22 prezentuje rozkład odchyłek od wartości średniej.



Il. 21. Porównanie chmur punktów dla pomiarów płyty chłodnej i gorącej



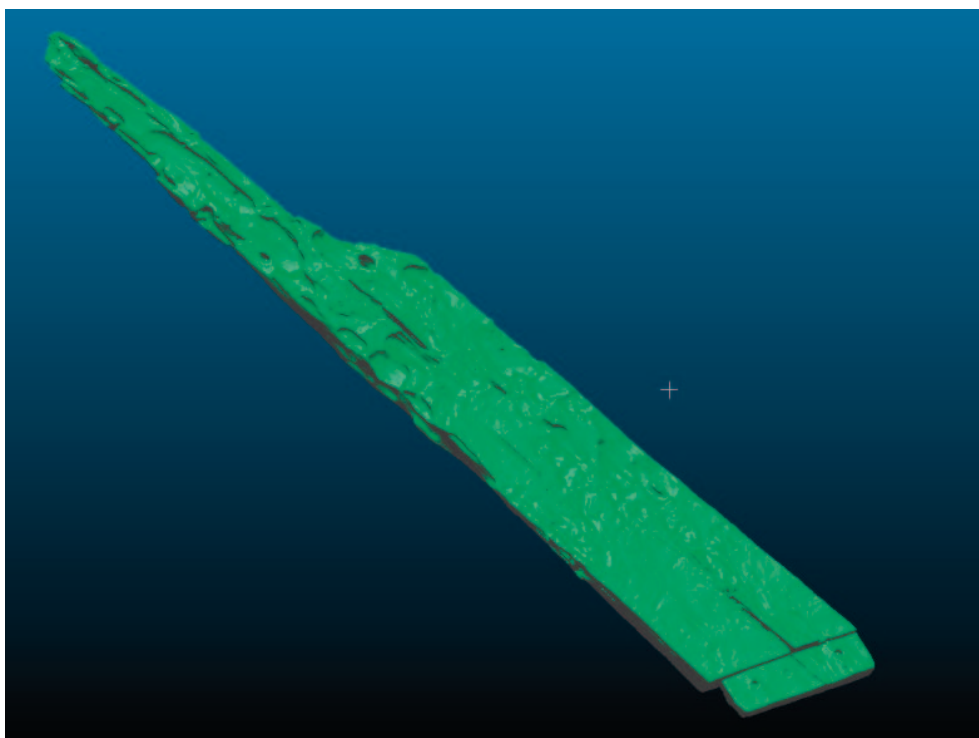
Il. 22. Porównanie dystrybucji odchyłek dla pomiarów płyty chłodnej i gorącej

O ile dla samego pomiaru warunki oświetleniowe nie wykazują istotnego wpływu, o tyle okazują się one krytyczne dla działania układów automatyki tachimetru. Oznacza to, że monitorowanie wcześniej wybranych punktów i obszarów nawet w całkowitej ciemności przebiega bez zakłóceń, jednak ustalenie nowych celów w warunkach słabego oświetlenia staje się niemożliwe. Lokalne doświetlenie celu silnym światłem sztucznym pozwala na kontynuowanie pomiarów. Podobnie nie zaobserwowano negatywnego wpływu oświetlenia żarowego i jarzeniowego na uzyskiwane wyniki.

3.4. Pomiary punktowe do składania skanów częściowych

Przedstawiona wcześniej metodyka przewiduje różne sposoby wyboru punktów referencyjnych na obiektach wielkogabarytowych, jednak ze względu na ograniczenia infrastruktury pomiarowej oraz sprzeciw konserwatora dotyczący nanoszenia sztucznych punktów referencyjnych, w praktyce przetestowano jedynie możliwość wykorzystania charakterystycznych punktów geometrii eksponatu. Doskonałym obiektem do takich badań okazała się, wspomniana wcześniej, tylnica wraku W-5. Jest to element o długość 3,5 m, przechowywany i eksponowany w budynku Narodowego Muzeum Morskiego w Gdańsku na Ołowiance (Il. 14, 15). Eksponat został zeskanowany całkowicie za pomocą skanera Artec w ramach testu tego urządzenia. Jest to skaner ręczny, charakteryzujący się bardzo wysoką rozdzielczością i dokładnością, jednak okupioną znacznymi ograniczeniami w zakresie wielkości skanowanego elementu. W jednej sesji, ze względu na ograniczenia czasu działania, można zeskanować do 0,3 m² powierzchni. Powoduje to konieczność łączenia skanów. W przypadku tylnicy, która jest obiektem o bardzo dużej liczbie cech charakterystycznych, można było zastosować łączenie skanów na podstawie pomiaru tachimetrycznego wybranych punktów, jaki i analizy krzywizny zeskanowanej geometrii. Oba sposoby wykazały się zbliżoną dokładnością, jednak wykorzystanie tachimetru pozwala znacząco skrócić czas skanowania. Wynika to z faktu, że do połączenia skanów na bazie analizy kształtu, kolejne sesje muszą zawierać stosunkowo duży obszar wspólny. W efekcie prowadzi to do powtarzania operacji skanowania dla obszarów granicznych, a więc i do wydłużenia całego procesu. Wynik końcowy tak przeprowadzonego skanowania przedstawia Il. 23.

Podjęte próby śledzenia pozycji ramienia pomiarowego lub skanera ręcznego wykazały niewielką przydatność takiej metody. Dla zapewnienia odpowiedniej dokładności łączonego pomiaru, należy za pomocą tachimetru zarejestrować pozycję i orientację śledzonego urządzenia. To wymaga śledzenia trzech punktów pomiarowych, a więc trzech reflektorów zamontowanych na ramieniu lub skanerze ręcznym, co w praktyce czyni taki zestaw bardzo nieporęcznym. Być może realizacja takiej koncepcji za pomocą nowocześniejszego zestawu, zawierającego tracker, może okazać się racjonalna, jednak wykorzystanie w tym celu tachimetru, wymagającego stosunkowo ciężkich reflektorów, wydaje się bardzo trudne do zaakceptowania przez użytkowników.



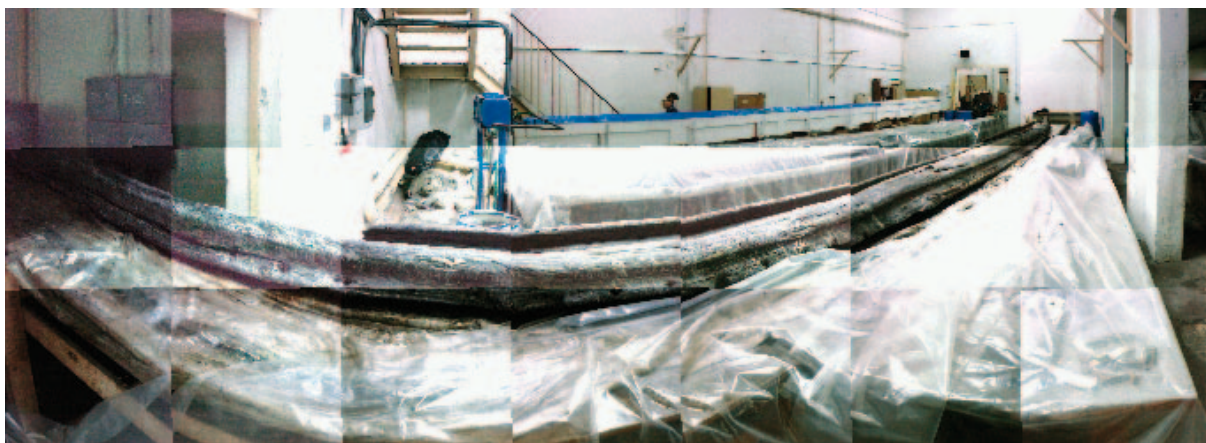
Il. 23. Kompletny skan tylnicy wraku W-5

3.5. Skanowanie za pomocą tachimetru

Tryb skanowania tachimetru jest szczególnie interesujący z punktu widzenia wspomaganie pracy skanera ręcznego i ramienia pomiarowego. Generuje on dane, które pod względem metodycznym są spójne z danymi ze skanerów. Prowadzi to przede wszystkim do ujednoczenia metodyki obróbki zarejestrowanych pomiarów, ale również do przyspieszenia prac w terenie. Tryb skanowania bezlustrwego został w pierwszej kolejności przetestowany (niestety bez powodzenia) na tylnicy raku W-5 (Il. 15) i burcie statku-muzeum s.s. „Sołdek” (Il. 17). Niepowo-

dzenie to implikuje znaczne ograniczenia co do stosowania tej metody. Na szczęście jednak, dla obiektów o nieco jaśniejszym kolorze, skanowanie tachimetrem staje się wykonalne, czego dowodzi przykład burty warku W-5 (Il. 16). Technikę tę można zastosować w dwojaki sposób: rejestracja modelu 3D o niskiej rozdzielczości chmury punktów dla celów łączenia dokładniejszych skanów z innych urządzeń oraz wykonanie kompletnego skanu o wysokiej rozdzielczości.

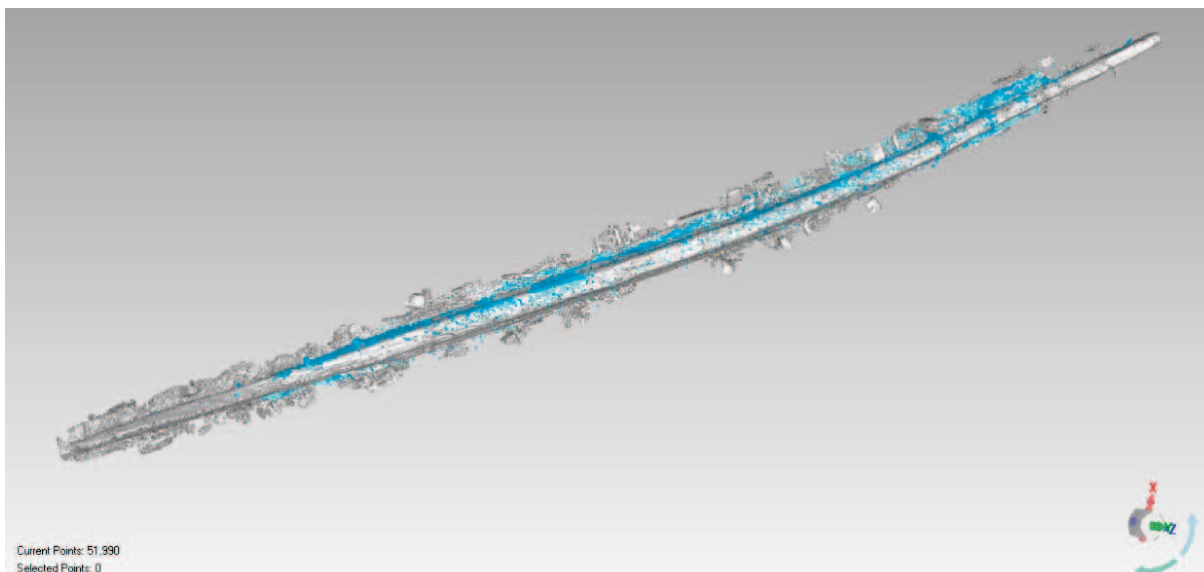
Pierwszy sposób wykorzystania skanowania tachimetrem został zastosowany w przypadku stępki wraku W-5. Jest to element o długości ok. 16 m, przechowywany w pracowni konserwatorskiej w Tczewie (Il. 24). Element jest wyjątkowo niewygodny do digitalizacji, ze względu na wielkość, proporcje (duża długość przy niewielkich wymiarach poprzecznych) oraz znaczną masę, która w połączeniu z utrudnionym dostępem i pokryciem środkami konserwującymi praktycznie uniemożliwia jakąkolwiek manipulację obiektem.



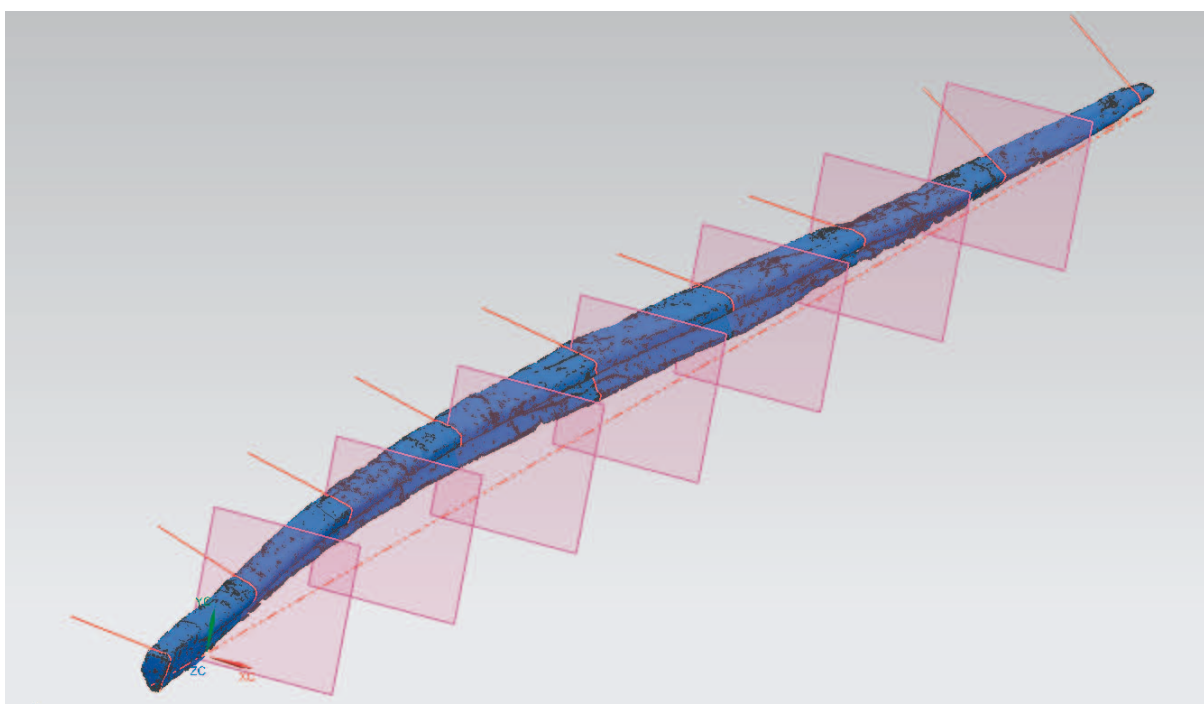
Il. 24. Stępka wraku W-5 (panorama z połączonych ujęć kamery tachimetru)

W przypadku stępki wypróbowane zostały również inne dostępne metody, w tym fotogrametria. Niestety, żadna z nich nie zapewnia możliwości uzyskania kompletnego modelu o satysfakcjonującej jakości. W efekcie opracowano metodę łączącą dwie techniki pomiarowe:

1. Skanowanie przenośnym skanerem laserowym firmy Artec. Ogromną zaletą tego urządzenia jest brak ograniczeń w zakresie wielkości skanowanych elementów, z zachowaniem wysokiej rozdzielczości i poziomu detalizacji skanu. Do wad należy zaliczyć problematyczne łączenie skanów w przypadku geometrii pozbawionej charakterystycznych cech oraz kumulowanie się błędów w przypadku łączenia skanów na znacznej długości.
2. Skanowanie tachimetrem. W celu wyeliminowania wad skanera przenośnego wykorzystano zgrubny skan wykonany wcześniej, za pomocą tachimetru Topcon IS-203. Pomiar ten nie wystarczał do odtworzenia szczegółów geometrii stępki, ale doskonale uchwycił ugięcie, skręcenie oraz zmiany szerokości na całej długości elementu, co tracił algorytm łączący częściowe skany ręczne. Wynika to z faktu, że wykorzystano skan pojedynczy, wykonany z pozycji umożliwiającej obserwację całej stępki. Skan ten został wykorzystany do manualnej korekty rejestracji skanów wykonanych urządzeniem firmy Artec (Il. 25). Połączenie obu skanów pozwoliło uchwycić deformację stępki, która została znacząco wygięta oraz skręcona (Il. 26, 27, 28).



Il. 25. Stępka wraku W-5, porównanie skanu Artec (szary) i Topcon (niebieski)



Il. 26. Kompletny skan stępki wraku W-5

Model cyfrowy pozwala na precyzyjne określenie wartości deformacji stępki. Ugięcie stępki zostało pomierzone w stosunku do osi stępki wyprostowanej w rzucie na płaszczyznę równoległą do wodnicy. Na podstawie skanu określono wartość strzałki ugięcia na ok. 460 mm, a jej położenie na ok. 5800 mm od końca rufowego stępki (Il. 27). Długość modelu stępki po wyprostowaniu wynosi 16,266 m, w porównaniu z 16,226 m pomiędzy punktami skrajnymi modelu w stanie ugiętym. W trakcie skanowania stępki wykonano również bezpośredni pomiar za pomocą tachimetru Topcon, który wykazał 16,224 m pomiędzy skrajnymi punktami.



Il. 27. Pomiar ugięcia stępki wraku W-5

Z kolei skrócenie stępki określono dla szeregu przekrojów prostopadłych do osi wyprostowanego modelu. Dla każdego z przekrojów poprowadzona została prosta, wyznaczona metodą najmniejszych kwadratów w oparciu o segment przekroju leżący na spodniej stronie stępki. Pomiedzy skrajnymi przekrojami zmierzono wartość ok. 30 stopni (Il. 28). Należy pamiętać, że wartość ta jest obarczona błędem budowy modelu cyfrowego, w tym przypadku głównie błędem wynikającym ze skumulowanego błędu łączenia skanów uzyskanych za pomocą ręcznego skanera Artec. Wspomniany wcześniej skan referencyjny, wykonany za pomocą tachimetru, bardzo dobrze obrazuje wartość ugięcia stępki, jednak jest nieprzydatny do kalibracji skrócenia.



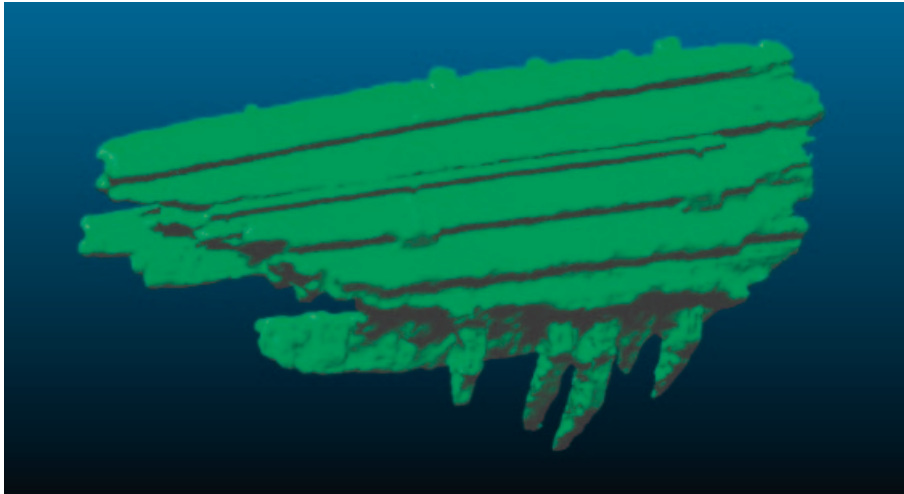
Il. 28. Pomiary skrócenia stępki wraku W-5

Szczególnie interesujące wydaje się zastosowanie funkcji skanowania do uzyskania kompletnego modelu 3D mierzonego obiektu. Tachimetry są urządzeniami wielokrotnie tańszymi do skanerów 3D i siłą rzeczy ustępują im w zakresie skanowania. Dwa podstawowe problemy to niska prędkość skanowania (do 20 pkt/s), co skutkuje długotrwałym procesem lub niską szczegółowością modelu, oraz znaczne wymiary plamki lasera, co z kolei prowadzi do zafałszowania (uśredniania) wyników i znowu obniżenia szczegółowości. Ekspozatem, na którym przetestowano możliwości wykorzystania tachimetru jako namiastki skanera geodezyjnego, jest fragment burty W-5/377/75 (Il. 29) – część prawej burty jednostki, złożona z połączonych 4 klepek poszycia, 10 wręgów, 3 potnic, przechowywana w budynku Narodowego Muzeum Morskiego na Ołowiance, w specjalnym stelażu.

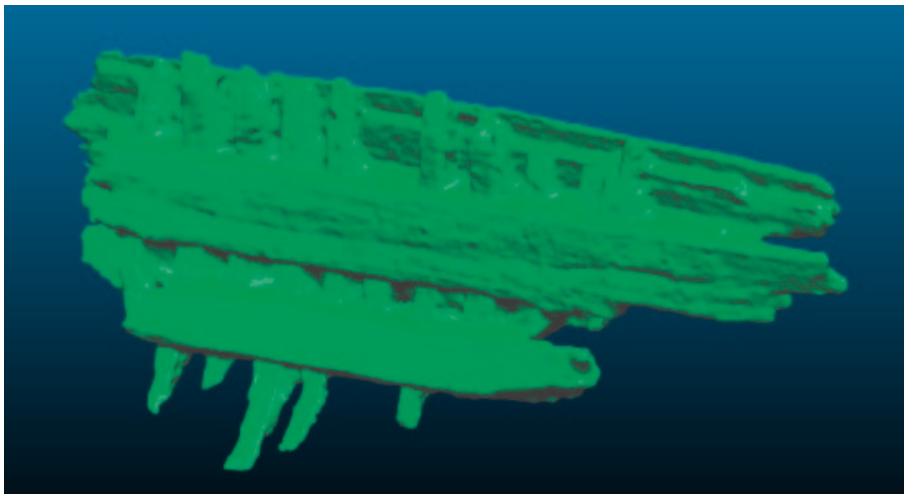


Il. 29. Burta W-5/377/75

Ze względu na gabaryty, dostęp końcówką ramienia skanującego do górnej części eksponatu był utrudniony. Problemy generował również skomplikowany kształt. Całość złożona jest z wielu połączonych ze sobą, nawzajem przesłaniających się elementów, a przez to zawiera dużo pustych przestrzeni, niedostępnych dla metod optycznych. Zastosowano skanowanie tachimetrem skanującym Topcon IS-203. Ponieważ urządzenie to generuje chmury punktów o stosunkowo niewielkiej gęstości, dodatkowo tracąc znaczną część pomiarów ze względu na ciemny kolor obiektu skanowanego, zastosowano zwiększoną liczbę pozycji skanowania (4 pozycje dla zewnętrznej strony burty i 3 dla wewnętrznej). Wielokrotne skanowanie tych samych obszarów z różnych pozycji pozwala na zagęszczenie chmury punktów i uzyskanie wyników o nieco wyższej jakości. Skany są precyzyjnie łączone na podstawie charakterystycznych punktów konstrukcji pomieszczenia i stelaża, na którym umieszczono eksponat. Uzyskano model uproszczony, prezentujący cały eksponat jako pojedynczą bryłę (Il. 30, 31).



Il. 30. Model burty W-5/377/75



Il. 31. Model burty W-5/377/75

Przedstawiony sposób wydaje się przydatny w przypadku skanowania w celach wizualizacyjnych, jednak trudno ocenić jego jakość w sposób obiektywny. Dlatego dla oceny ilościowej skanów uzyskanych tą drogą, opracowano i przeprowadzono procedurę opartą o pomiary płyt wzorcowych. W tym celu wykorzystano te same płyty wzorcowe wykonane z kompozytu i blachy stalowej, których użyto do badania wpływu własności optycznych skanowanego eksponatu (rozdz. 3.2). Pomiarów dokonano dla odległości odpowiadającej najwyższej powtarzalności tachimetru – 25 m, różnych kątów obserwacji (90°, 75°, 60°, 45°, 30°) oraz dla powierzchni suchej i mokrej. W przypadku powierzchni mokrej zasymulowano również opady deszczu, w celu sprawdzenia dopuszczalności wykonywania pomiarów w trudnych warunkach atmosferycznych.

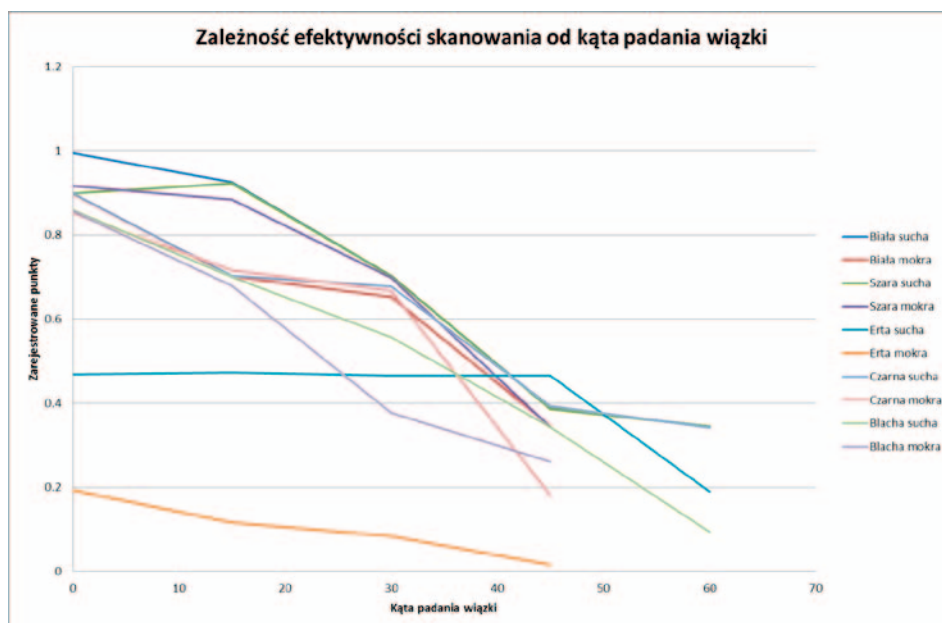
Badania wykonano w warunkach plenerowych, przy zamocowaniu statywu tachimetru w betonowym podłożu pod zadaszeniem (Il. 32). Pomiar polegał na skanowaniu wybranego fragmentu powierzchni płyty o wymiarach ok. 200x200 mm, przy założonej rozdzielczości 100x100 punktów. Ocenie podlegały:

- a) odchyłka maksymalna i odchylenie standardowe od wartości średniej,
- b) efektywność skanowania – liczba zarejestrowanych punktów, w stosunku do założonych 10 tys. punktów.

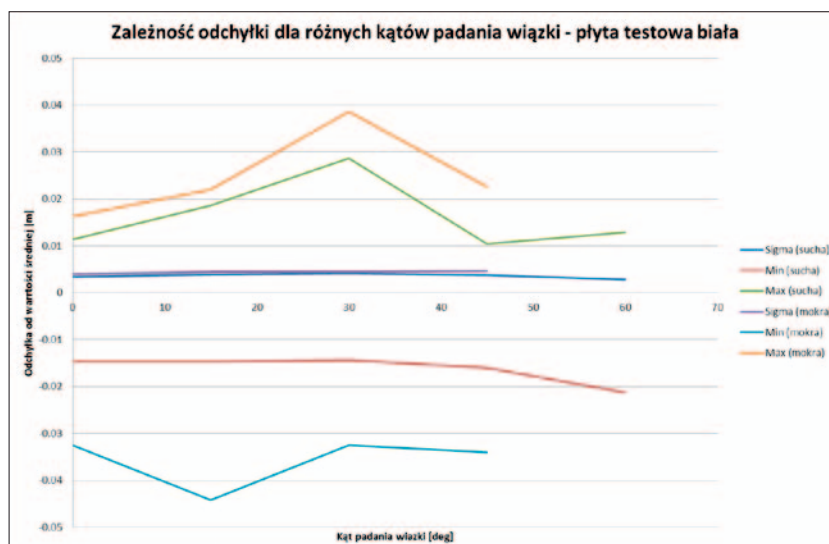


II. 32. Stanowisko do skanowania płyt wzorcowych

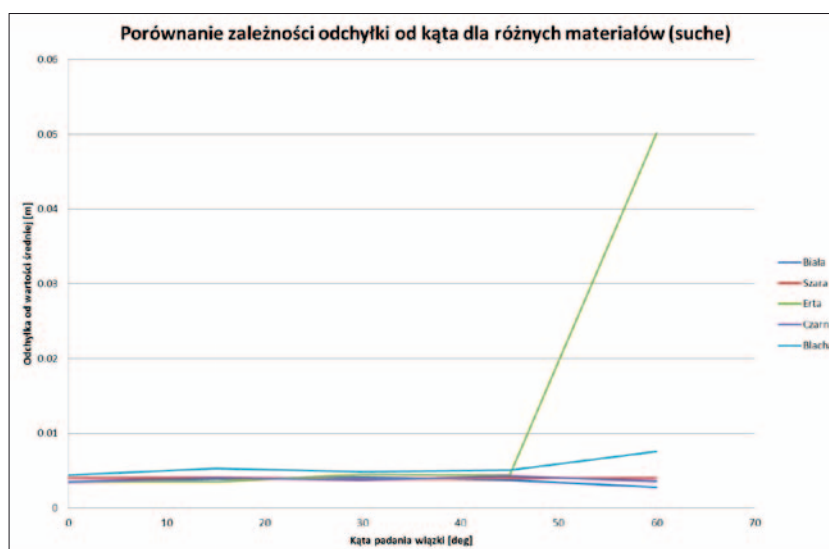
Wyniki analizy pomiarów prezentują ilustracje 33-36. Wykres 33 pokazuje zależność liczby zarejestrowanych punktów od koloru płyty i kąta obserwacji. Jak wyraźnie widać, w przypadku powierzchni czarnej tracona jest większość punktów pomiarowych, szczególnie dla powierzchni zwilżonej. Pozostałe płyty wykazują stosunkowo wysoką efektywność skanowania (powyżej 80%) dla prostopadłego kierunku obserwacji, która maleje wraz z obrotem płyty. Dla wszystkich rodzajów powierzchni kąt obserwacji poniżej 45 stopni skutkuje ponad 50% utratą punktów skanu. Wykres 34 ilustruje zmiany odchyłki (maksymalnej i średniej) dla płyty białej, w zależności od kąta obserwacji – widać większy wpływ mokrej powierzchni niż obrotu. Wykresy 35 i 36 prezentują porównanie odchyłki dla różnych płyt, w funkcji kąta obserwacji. Tutaj znowu widać większy wpływ wody na badanej powierzchni niż kąta obserwacji płyty. Wszystkie wyniki wskazują, że należy unikać prowadzenia pomiarów, dla skośnej orientacji powierzchni mierzonej w stosunku do wiązki lasera, gdy kąt obserwacji spada poniżej 45 stopni. Jest to istotny wniosek dla planowania procesu skanowania. Bardzo silny jest również wpływ wilgoci, szczególnie w przypadku ciemnych powierzchni.



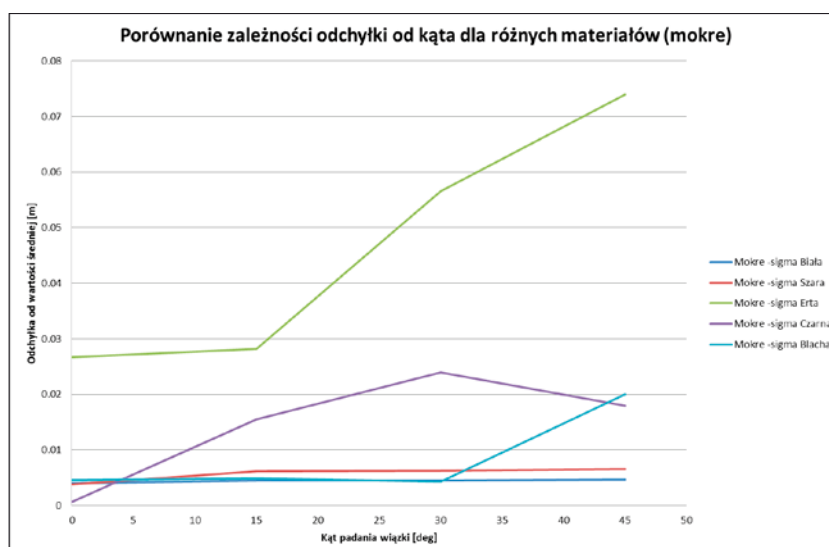
II. 33. Efektywność rejestracji danych



Il. 34. Odchyłki dla płyty białej przy orientacji prostopadłej do wiązki lasera

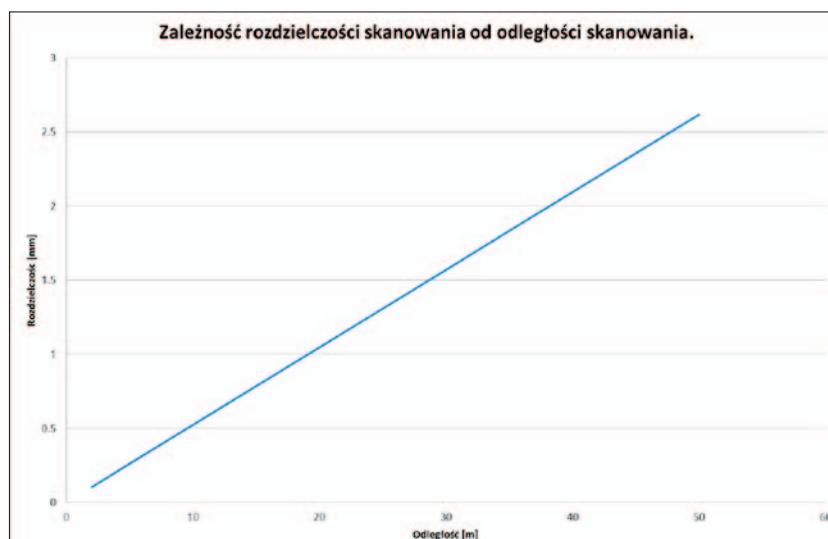


Il. 35. Odchyłki dla różnych orientacji płyt wzorcowych, przy odległości 25 m



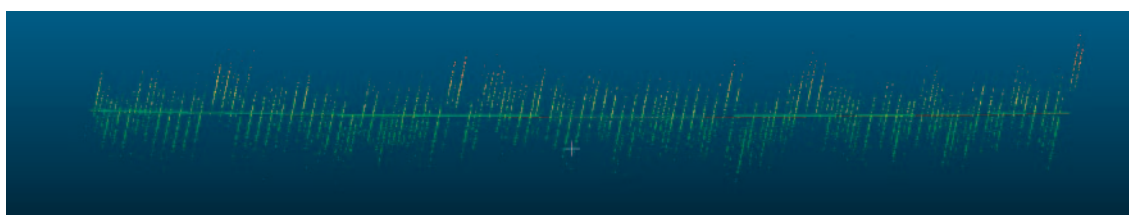
Il. 36. Odchyłki dla różnych orientacji płyt wzorcowych, przy odległości 25 m

Na szczególną uwagę zasługuje problem rozdzielczości skanu, tzn. minimalnej odległości między sąsiednimi punktami. Jest to wielkość zależna od cech konstrukcyjnych tachimetru i odległości skanowania. Przy minimalnym kroku mechanizmu sterowania tachimetru równym 0.003° , zależność maksymalnej rozdzielczości od odległości prezentuje wykres 37. Jak widać, przy odległościach zapewniających maksymalną powtarzalność pomiaru (20-30 m), rozdzielczość przyjmuje wartości powyżej 1 mm. Stawia to pod znakiem zapytania możliwość uzyskania szczegółowych skanów.

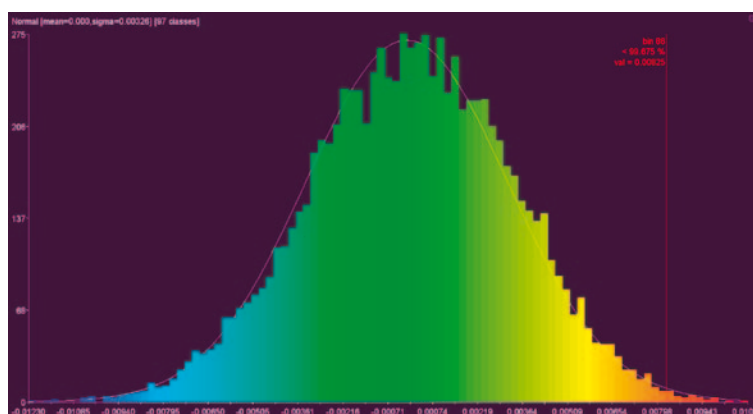


Il. 37. Osiągalna rozdzielczość w zależności od odległości skanowania

Dodatkowo zaobserwowano charakterystyczny rozkład odchyłek pomiarów w stosunku do skanowanej powierzchni wzorcowej. Jak widać na widoku bocznym (Il. 38), odchyłki są relatywnie niewielkie w zakresie pojedynczego szeregu punktów skanowanych, jednak mogą przyjmować znaczne wartości pomiędzy sąsiednimi szeregami. Rozkład odchyłki zarejestrowanego pomiaru, zbliżony do rozkładu normalnego, przedstawia Il. 39. Może to świadczyć o niekorzystnej charakterystyce urządzenia, wynikającej z przyjętych przez producenta rozwiązań konstrukcyjnych, ale przede wszystkim o ograniczonej przydatności w zakresie dokładnego odwzorowywania kształtu, zawierającego drobne detale. Widoczne oscylacje mogą wielokrotnie przewyższać wielkość szczegółów, jakie chcemy zarejestrować. Dlatego należy zrezygnować z prób wykorzystania urządzenia do rejestracji szczegółowych skanów.



Il. 38. Widok skanu płyty wzorcowej z boku



Il. 39. Rozkład odchyłek punktów skanu płyty wzorcowej

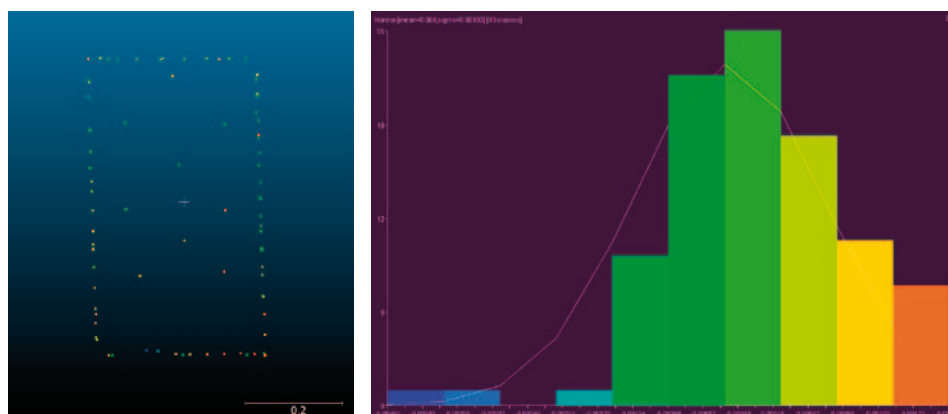
3.6. Śledzenie celu – tracking

Pewną odmianą skanowania, przydatną dla celów referencyjnych, jest śledzenie pozycji reflektora, pryzmatu lub kalibrowanego innego celu, charakteryzującego się doskonałymi własnościami optycznymi i wynikającą stąd wysoką dokładnością pomiaru. Metoda ta nadaje się przede wszystkim do obiektów bardzo dużych, posiadających stosunkowo prosty (gładki) kształt. Doskonale sprawdza się niezależnie od koloru i refleksyjności powierzchni, wadą jest niska prędkość rejestracji punktów pomiarowych (do 2 pkt/s).

Dla celów testowych przeprowadzono pomiar płaskości płyty referencyjnej (Il. 40). Pomiar polegał na rejestracji pozycji śledzonego pryzmatu, przesuwanego po gładkiej płycie, zamocowanej w sposób uniemożliwiający jej poruszenie. W ten sposób uzyskano szereg punktów leżących na płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny płyty, rozmieszczonych wzdłuż jej krawędzi (liniowe, wykonane z dokładnością do 0.2 mm) oraz w wybranych miejscach na środku płyty (Il. 41). Sprawdzone w ten sposób dokładność w kierunku promieniowym (pomiar odległości) oraz w kierunkach obwodowych (pomiar kąta pionowego i poziomego).



Il. 40. Stanowisko do badania funkcji śledzenia celu



Il. 41. Uzyskane wyniki i odchyłki skanowania dla trybu śledzenia pryzmatu

Metoda wykazuje dokładność zgodną z deklaracjami producenta (6 mm w kierunku radialnym, <1 mm w kierunkach obwodowych tachimetru), jednak jest dość czasochłonna i męcząca przy ręcznym prowadzeniu reflektora oraz dostarcza niewielkiej ilości danych. Dlatego należy ją raczej traktować jako rozwiązanie uzupełniające, pozwalające na wyznaczenie punktów referencyjnych.

W trakcie testów zaobserwowano również problemy w przypadku zbyt dynamicznej pracy operatora, co w efekcie wymusza bardzo niską prędkość przemieszczania celu. Jest to szczególnie istotne w przypadku niewielkich odległości pomiaru, kiedy nawet niewielkie przemieszczenie generuje znaczną zmianę kąta pomiaru, a w efekcie zgubienie przez urządzenie celu i wejście w tryb jego poszukiwania. Procedura automatycznego odnajdowania celu działa doskonale, pod warunkiem braku w sąsiedztwie błyszczących obiektów, które mogą zostać rozpoznane jako poszukiwany pryzmat lub reflektor. W takiej sytuacji operator musi uruchomić operację manualnie.

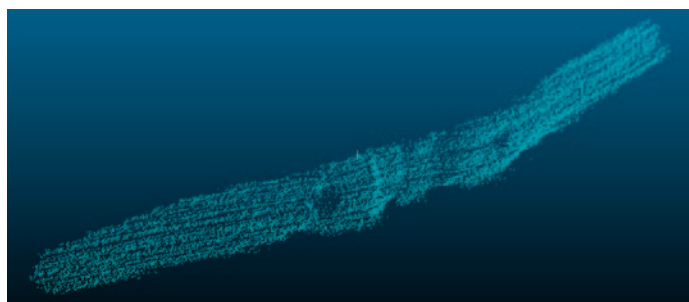
3.7. Weryfikacja opracowanej metodyki

Opisane powyżej pomiary zostały powtórzone dla rzeczywistych obiektów muzealnych, w celu zweryfikowania opracowanych procedur w praktyce. Program testów obejmuje skanowanie typowego elementu konstrukcji drewnianego kadłuba oraz skanowanie i pomiary wybranych łodzi rybackich ze zbiorów placówki NMM znajdującej się w Helu.

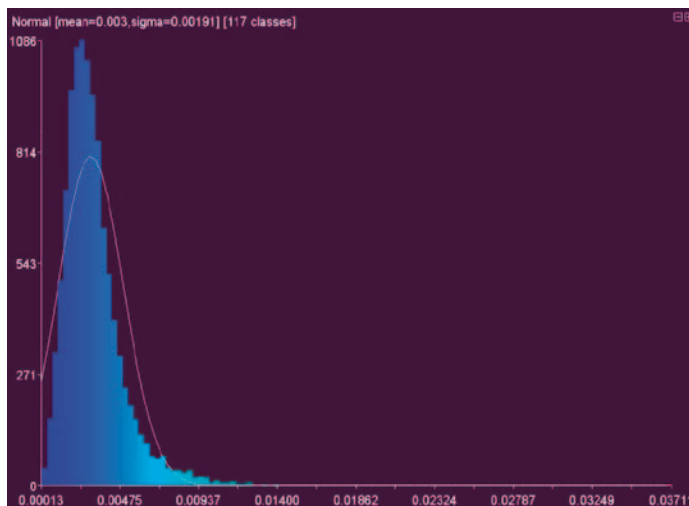
Przykładowy dennik został zeskanowany za pomocą ramienia pomiarowego Faro ScanArm, w celu pozyskania danych referencyjnych do oceny pomiarów tachimetrycznych. Wykorzystane ramię pomiarowe charakteryzuje się dokładnością na poziomie 0.1 mm oraz rozdzielczością do 0.02 mm, co w zupełności wystarcza, aby potraktować tak pozyskany model jako referencyjny dla badania tachimetru. Obiekt został następnie zeskanowany za pomocą tachimetru, przy zachowaniu suchej powierzchni oraz w warunkach symulowanych opadów atmosferycznych (Il. 42). Uzyskane wyniki potwierdzają średnią wartość odchyłki w stosunku do referencji na poziomie 2 mm (Il. 44), co stanowi wynik zbliżony do pomiarów testowych. Jednocześnie wyraźnie widać brak możliwości wiernego odwzorowania drobnych detali (Il. 43).



Il. 42. Stanowisko pomiaru eksponatu testowego, w warunkach symulowanych opadów atmosferycznych



Il. 43. Chmura punktów pozyskana za pomocą tachimetru



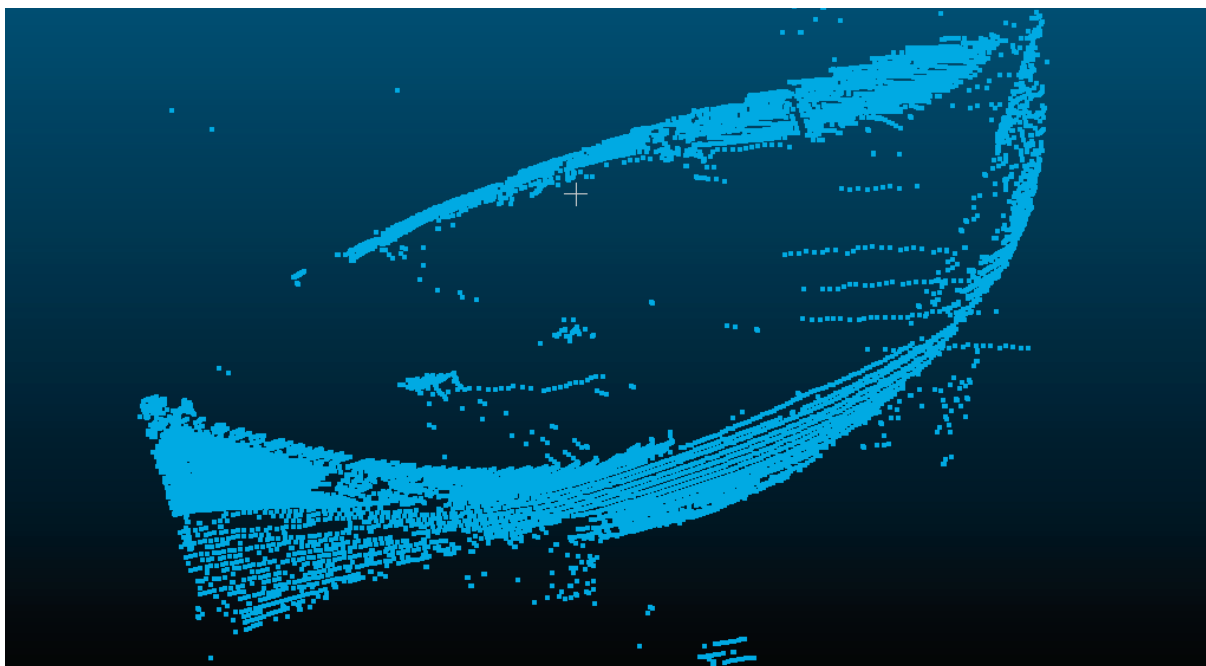
Il. 44. Rozkład odchyłek pomiarów tachimetrycznych w stosunku do pomiarów referencyjnych

W przypadku kadłubów łodzi rybackich procedura weryfikacji opracowanej metodyki pomiarów obejmowała kontrolę efektywności skanowania oraz porównanie skanów i pomiarów punktowych wykonanych za pomocą tachimetru z modelami referencyjnymi. Modele referencyjne zostały opracowane na podstawie danych pozyskanych za pomocą skanera laserowego Faro Focus 3D 120, przez firmę „Architekci Gzowski & Gzowski”, w ramach projektu „Wykonanie cyfrowej inwentaryzacji zespołu zabytkowych łodzi ludowych ze zbiorów Narodowego Muzeum Morskiego w Gdańsku w ramach realizacji projektu *Centralne Muzeum Morskie – Cyfrowe Muzeum Morskie* (etap 2)” [15]. Do celów weryfikacji wykorzystano 4 jednostki: CHA-11, DĘB-5, HEL-7 oraz KAR-4.

Weryfikację efektywności skanowania na powierzchniach o różnych własnościach optycznych najlepiej obrazuje przykład łodzi DĘB-5 (Il. 45). Burta łodzi powyżej linii wodnej została pomalowana na kolor żółty, poniżej jest ciemna i błyszcząca. Efekt utraty znacznej liczby punktów pomiarowych jest doskonale widoczny na Il. 46, prezentującej surowe wyniki skanowania kadłuba.



Il. 45. Łódź rybacka DĘB-5 ze zbiorów placówki NMM w Helu



Il. 46. Wynik skanowania łodzi DĘB-5 z widoczną utratą punktów pomiarowych poniżej wodnicy

Podobny efekt utraty bardzo dużej liczby punktów skanowanych widoczny jest na przykładzie łodzi CHA-11 i KAR-4. Wynika to wprost ze słabych własności optycznych powierzchni obu jednostek.



Il. 47. Wynik skanowania tachimetrem łodzi CHA-11 i KAR-4

Na tych samych obiektach dokonano również weryfikacji efektów pomiarów skanerem laserowym, poprzez wykonanie dokładnych pomiarów charakterystycznych punktów kadłubów, z wykorzystaniem przyrządów pomiarowych tachimetru, które są wyposażone w elementy dystansowe o znanej długości. Pomiar położenia środka przyrządu oraz kąta orientacji tyczki pomiarowej pozwala na wyznaczenie wskazanego punktu z dokładnością poniżej 2 mm (Il. 48). Wyniki pomiarów długości i szerokości jednostek prezentuje tabela 5.



Il. 48. Sposób przeprowadzenia pomiarów punktowych

Kadłub	L			B		
	Tach.	Skaner	Różnica	Tach.	Skaner	Różnica
CHA-11	4.5114	4.49	0.0214	1.6838	1.66	0.0238
DĘB-5	8.4902	8.46	0.0302	2.7716	2.74	0.0316
HEL-27	8.3662	8.375	0.0088	3.3586	3.38	0.0214
KAR-4	5.3722	5.36	0.0122	2.0828	2.07	0.0128
Średnia:	-	-	0.01815	-	-	0.0224

Tabela 5. Porównanie wyników pomiarów punktowych i skanowania

Różnice pomiędzy wymiarami głównymi uzyskanymi obiema metodami są nieco większe od oczekiwanych. Wynika to z odmiennej metodyki pomiarów – wartości dla pomiarów wykonanych za pomocą skanera, zostały przyjęte na podstawie przetworzonych danych. Autorzy zaokrąglili je do 1 cm oraz w niektórych przypadkach inaczej zdefiniowali mierzoną wielkość, np. dla kutra HEL-27 za długość całkowitą przyjęto długość „po pokładzie”, w pomiarach tachimetrycznych przyjęto długość łącznie z wystającymi elementami nadburcia. Dlatego też dokonano korekty na podstawie pomiaru na modelu 3D, w efekcie wartość odchyłki znacząco zmniejszyła się (z 21 do 8.8 mm).

Innym sposobem weryfikacji obu skanów jest bezpośrednie porównanie chmury punktów ze skanera i tachimetru. Ponieważ obie chmury zostały pomierzone w innych warunkach, bez wspólnej bazy referencyjnej, ich nałożenie do celów porównania wykonane zostało za pomocą programu Geomagic Studio. Dlatego w tym przypadku można mówić jedynie o różnicach w odwzorowaniu kształtu, a nie w samym pomiarze – te zostały skompensowane w trakcie rejestracji (dopasowania) obu zestawów danych. Wyniki zostały zaprezentowane na przykładzie kutra HEL-27 (Il. 49).

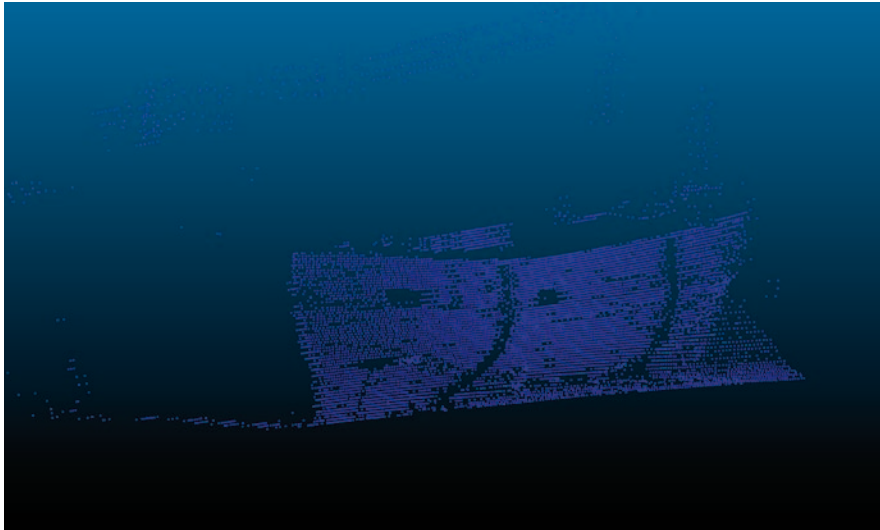


Il. 49. Kuter Hel-27

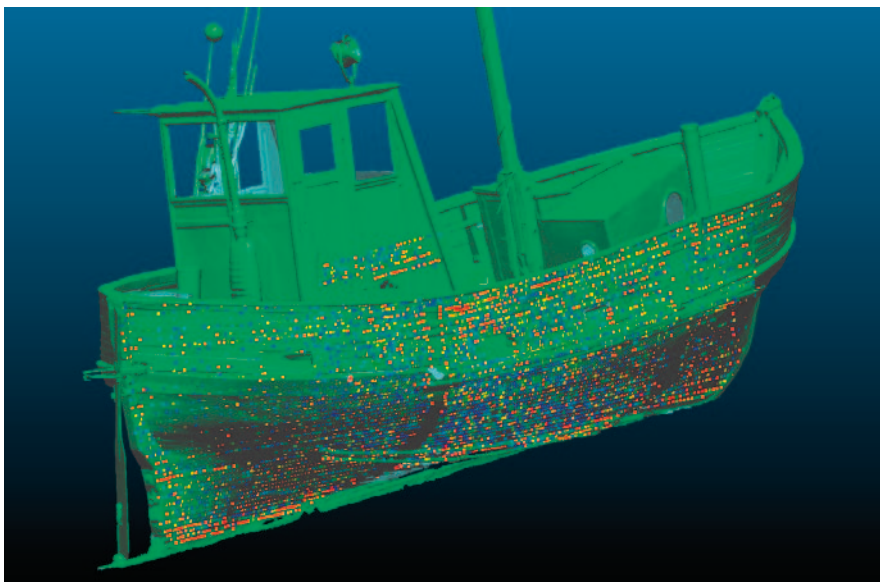
Il. 50 prezentuje skan wysokiej rozdzielczości, uzyskany za pomocą skanera Faro Focus 3D, natomiast Il. 51 skan niskiej rozdzielczości, uzyskany za pomocą Tachimetru Topcon IS-203. Skan wykazuje znaczne ubytki w zakresie części podwodnej, w tym całkowitą utratę płetwy sterowej jednostki oraz ciemnych elementów stelażu wspierającego kuter. Widać również znaczną utratę danych w części dziobowej, wynikającą z ostrego kąta padania wiązki na powierzchnię kadłuba. Oczywiście pełny skan kadłuba zwykle składa się z kilku połączonych skanów częściowych, jednak dla celów weryfikacji metodyki nie prowadzono pełnych prac rekonstrukcyjnych i ograniczono się do jednego skanu wykonanego z pozycji tachimetru znajdującej się na wysokości rufy jednostki. Ilustracja 52 prezentuje mapę odchyłek na tle skanu wysokiej rozdzielczości, a Il. 53 rozkład odległości (odchyłki) pomiędzy obiema chmurami (chmura wysokiej rozdzielczości, uzyskana za pomocą skanera Faro Focus 3D, została potraktowana jako wzorcowa).



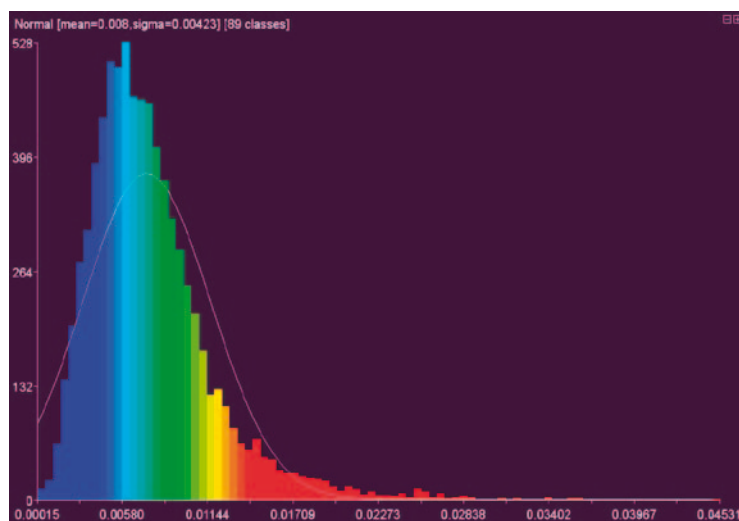
Il. 50. Skan kutra HEL-27 (Faro Focus 3D) [15]



Il. 51. Skan kutra HEL-27 (Topcon IS-203, opr. własne)



Il. 52. Mapa odchyłek pomiędzy skanami dla kutra HEL-27 (Topcon IS-203/Faro Focus 3D, opr. własne)



Il. 53. Rozkład odchyłek między obiema chmurami punktów

3.8. Fotogrametria i GPS

Błąd pomiarów GPS wykonywanych w oparciu o naziemne stacje referencyjne mieścił się w deklarowanych 30 mm (pomiędzy 12 a 26 mm), przy czym należy zaznaczyć, że pomiar dotyczył nie tyle pozycji (brak możliwości weryfikacji wyniku), a przesunięcia, które możemy mierzyć z dokładnością 2 mm. Potencjalne zastosowanie tej techniki obejmuje pozycjonowanie tachimetru w przypadku dokumentacji dużych i bardzo dużych stanowisk, gdzie mamy do czynienia z odległościami rzędu setek metrów.



Il. 54. Para zdjęć do pomiaru fotogrametrycznego

W przypadku fotogrametrii wyniki testów wykazały jej ograniczoną przydatność do wspomaganie archiwizacji muzealiów w NMM. O ile metoda ta daje doskonałe wyniki w przypadku zabytków architektury (a jeszcze lepiej współczesnych budynków), o tyle dla obiektów pozbawionych wyraźnych krawędzi, o obłych kształtach i trudnych do wyróżnienia punktach, ilość manualnej pracy w praktyce wyklucza stosowanie dla celów pomiarowych i archiwizacyjnych. Ilustracja 54 przedstawia parę fotografii wykonaną zgodnie z zasadami wymaganymi przez program Image Master. Test polegał na próbie odtworzenia modeli dwóch obiektów: białej płyty umieszczonej na statywie oraz drewnianego dennika. O ile opracowanie modelu płyty było proste i szybkie (program sam rozpoznaje charakterystyczne proste krawędzie) i zajęło ok. 4 minut, o tyle próba odtworzenia kształtu dennika zakończyła się niepowodzeniem. Program nie sygnalizował błędnych danych, jednak obliczenia trwały bardzo długo, w efekcie zrezygnowano po 6 godzinach oczekiwania. Metoda ta może być przydatna do budowy uproszczonych modeli 3D, dla celów wizualizacyjnych i publikacyjno-wystawienniczych w Internecie.

3.9. Oprogramowanie i wielkość danych

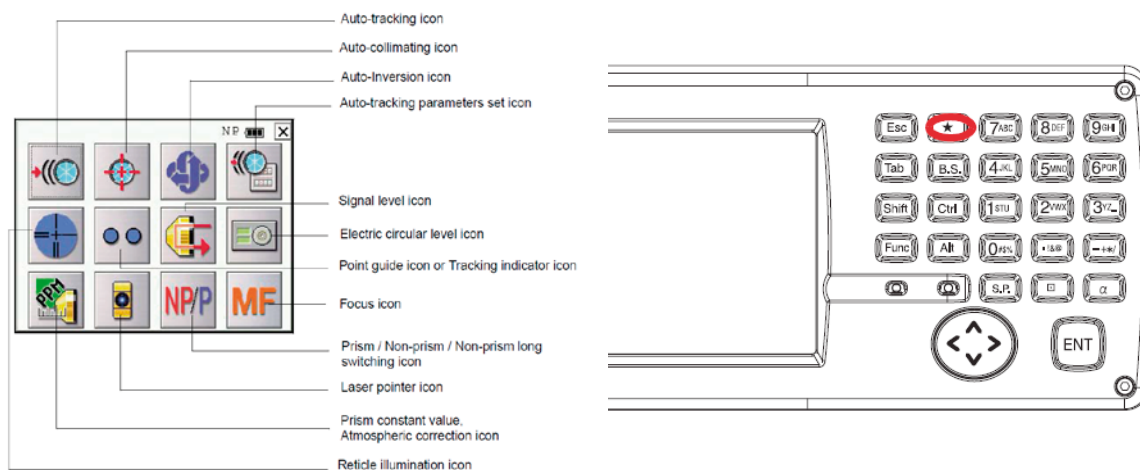
Oprogramowanie pomiarowe firmy Topcon charakteryzuje się mnogością obsługiwanych formatów. Praktycznie każdy typ urządzenia (skaner, tachimetr, teodolit) zapisuje dane w innym formacie, zoptymalizowanym pod kątem zawartości. Dzięki takiemu podejściu pliki są bardzo małe (największe pliki skanów nie przekroczyły 15 MB) i w zasadzie problem wielkości danych (w kontekście czasu ładowania i pojemności pamięci zainstalowanej w urządzeniu) nie wydaje się istotny. Jedynie komputer wbudowany w urządzenie wymaga nieco więcej czasu w przypadku przetwarzania plików – konwersja pliku wielkości 15 MB zajmowała ok. 10 minut (dlatego zaleca się dokonywać konwersji formatów za pomocą oprogramowania zainstalowanego na komputerach PC).

Na szczególną uwagę zasługuje używane oprogramowanie, w skład którego wchodzi aplikacje zainstalowane na komputerze tachimetru oraz na standardowym komputerze PC. Wybór odpowiedniego programu oraz jego konfiguracja jest krytyczna dla jakości i efektywności prowadzonych pomiarów. Aplikacje sterujące tachimetrem pracują pod kontrolą systemu operacyjnego Windows CE i obejmują Standard Measurement i Topsurv.

Standard Measurement – bardzo łatwa w obsłudze, intuicyjna aplikacja, pozwalająca na wykonywanie większości prostych pomiarów (odległości, kąty, współrzędne – niewymagające skomplikowanych obliczeń) oraz konfiguracji ustawień tachimetru. Doskonała do wykonywania pojedynczych pomiarów oraz szkolenia początkujących użytkowników. Zaletą nie do przecenienia jest możliwość wywołania menu konfiguracji sprzętu w dowolnym momencie (również w czasie działania innego programu) za pomocą dedykowanego klawisza na panelu sterującym (Star Mode, Il. 55). Szczegółową instrukcję użytkownika zawiera załączony do urządzenia *Instruction Manual*.

Formaty plików	Rozmiar pliku (kB)	Czas otwierania na IS (s)	Czas otwierania na PC (s)	Czas transmisji za pomocą Wi-Fi (s)	Czas transmisji za pomocą Bluetooth (s)	Czas transmisji za pomocą USB (s)
Topcon *.fsc	9874	8	3	19	11	12
Topcon *.fsn	9874	8	3	19	11	11
Topcon *.imj	17498	n.d.	5	n.d.	n.d.	n.d.
Topcon *.pi3	8842	n.d.	3	n.d.	n.d.	n.d.
Topcon *.pi4	8841	7	3	16	10	11
Topcon *.piv	7652	6	2	14	8	9
*.isv	17 221	n.d.	5	n.d.	n.d.	n.d.
*.foe	12021	n.d.	4	n.d.	n.d.	n.d.
*.fos	12115	10	4	23	14	13
*.hei	334	1	3	2	1	1
*.cl3	438	1	2	2	1	1
*.clr	451	1	3	2	1	1
*.ptx	15732	13	5	30	18	18
*.pts	15746	13	5	30	18	18
*.csv	9871	8	3	19	11	11
*.txt	15004	12	5	28	17	17
*.gcp	21823	n.d.	7	n.d.	n.d.	n.d.
*.apa,	16725	n.d.	5	n.d.	n.d.	n.d.
*.dxf	42182	n.d.	13	n.d.	n.d.	n.d.
*.tin	2571	n.d.	1	n.d.	n.d.	n.d.
*.wrl	8975	n.d.	3	n.d.	n.d.	n.d.
*.obj	12061	n.d.	4	n.d.	n.d.	n.d.

Tabela 6. Porównanie własności plików danych



Il. 55. Menu konfiguracyjne tachimetru (Star Mode) [32]

Topsurv – zaawansowana aplikacja pozwalająca na wykonanie wszystkich typów pomiarów, jakie może realizować tachimetr IS-203, ze skanowaniem włącznie. Jej najważniejsze funkcje obejmują rejestrację dużych zbiorów punktów oraz złożone obliczenia przetwarzające wyniki pomiarów. Podobnie jak w przypadku Standard Measurement do urządzenia dołączono szczegółową instrukcję użytkownika. W ramach projektu sfinansowano również szkolenie w zakresie obsługi programu i zasad dobrej praktyki. Dlatego zostaną tutaj opisane wyłącznie cechy użytkowe i wnioski, jakich próżno szukać w instrukcji oraz materiałach marketingowych producenta. Najważniejsze z nich obejmują:

- a) Wersja oprogramowania – do urządzenia załączono nośniki do instalacji wersji 7.5.1 oraz instrukcję do starszej wersji 7.5. Dodatkowo używana jest wersja spolonizowana. Różnice są niewielkie, jednak przy braku dogłębnej znajomości terminologii geodezyjnej próby pracy na wersji polskiej programu w oparciu o angielskojęzyczną instrukcję prowadzą do poważnych problemów. Dlatego, szczególnie dla początkujących użytkowników, zaleca się instalowanie angielskojęzycznej wersji programu. Zmiana języka oprogramowania jest prosta i wymaga jedynie nadpisania pliku zawierającego dane interfejsu (nie wymaga przeinstalowania programu).
- b) Dotykowy panel sterujący należy do rozwiązań starszej generacji, w związku z tym należy wyzbyć się wielu przyzwyczajęń, wynikających z użytkowania współczesnych tabletów i smartfonów. Panel wymaga pracy rysikiem (próby pracy palcem lub paznokciem kończyły się niepowodzeniem). Urządzenie wymaga zdecydowanej i niezbyt szybkiej interakcji – operacje przesuwania należy wykonywać bez pośpiechu i nie uderzać rysikiem w powierzchnię panelu.
- c) Jednostka sterująca tachimetru nie jest nowoczesnym komputerem, dlatego wiele operacji związanych z interfejsem użytkownika wykonywanych jest ze znaczącym opóźnieniem (czasami sięgającym nawet 10 s). Program wymaga cierpliwości, chociaż z opóźnieniem, to jednak wykonuje wszystkie zadane polecenia. Dlatego niecierpliwe ich powtórzenie może spowodować wykonanie nieplanowanych operacji, które mogą prowadzić nawet do utraty danych.
- d) Rozdzielczość skanowania wynika z rozdzielczości kątowej tachimetru, która jest równa 0.003° . W związku z tym program nie zachowuje dokładnej wartości parametru określającego rozdzielczość (distance, points, angle), ale zaokrągla ją do najbliższej wynikającej z rozdzielczości kątowej. Dlatego nie należy się dziwić, że przy tych samych ustawieniach rozdzielczości uzyskuje się nieco inne skany przy różnych odległościach skanowania.
- e) Zapis danych do pamięci wewnętrznej lub zewnętrznej nie zawsze działa prawidłowo. Podczas testów kilkakrotnie zdarzyło się zapisać pliki, które po otwarciu okazywały się puste. Dlatego należy kontrolować rozmiar zapisywanego pliku i najlepiej podzielić skanowanie na mniejsze obszary, przez co traci się mniej czasu na powtórne pomiary w przypadku niepowodzenia zapisu.
- f) Zapis na zewnętrzną kartę pamięci jest wielokrotnie szybszy niż do pamięci wewnętrznej. W przypadku pliku zawierającego 10 tys. punktów czas zapisu wynosił odpowiednio 10 s i 3,5 minuty. Przed przystąpieniem do rejestracji pomiarów należy zaopatrzyć się w kartę SSD (wielkość pamięci nie jest problemem – pliki pomiarowe tachimetru są bardzo małe, rzadko przekraczają 15 MB).
- g) Zasilanie – tachimetr jest wyposażony w 3 baterie, pozwalające na pracę w czasie do 3,5 h przy ciągłym pomiarze odległości. Jednak urządzenie jest wyposażone w szereg funkcji, które mogą ten czas wydatnie skrócić. Najważniejsze z nich to autofocus i znacznik laserowy. Szczególnie w trakcie operacji skanowania intensywna praca autofocusa powoduje znaczne skrócenie czasu. Dodatkowo należy brać pod uwagę fakt, że starzejące się baterie tracą pojemność i czas pomiarów skraca się wraz z ich wiekiem. Należy również pamiętać o jak najszybszym rozpoczęciu ładowania wyczerpanych akumulatorów – załączona ładowarka potrzebuje na to kilku godzin.
- h) Przed wymianą akumulatora należy zapisać wszystkie dane – wyjęcie baterii z tachimetru powoduje jego reset i utratę wszystkich danych i zmian w konfiguracji.
- i) Przy planowaniu dłuższych pomiarów należy tachimetr zasilac z zewnętrznego źródła. Baterie wystarczają do zarejestrowania najwyżej 200 tys. punktów, a po ich wyczerpaniu program automatycznie wyłącza urządzenie. Niestety, dokonana w takim momencie wymiana baterii bez zewnętrznego podtrzymania zasilania nie tylko powoduje utratę danych, ale również uszkodzenie programu i konieczność jego przeinstalowania.

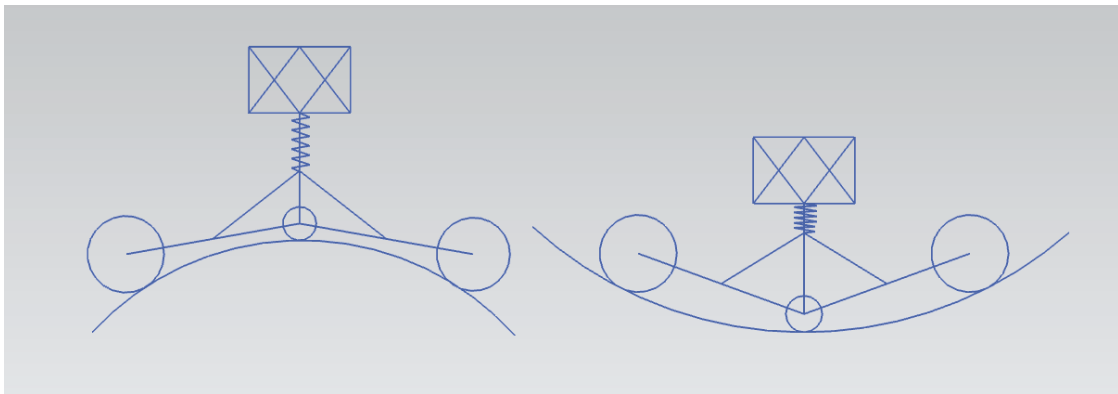
4. Wnioski

Wnioski z przeprowadzonych pomiarów obejmują szereg sugestii dotyczących procedury przeprowadzania pomiaru, jak i późniejszego przetwarzania danych. Istotne są również nowe rozwiązania techniczne oraz nietypowe aplikacje standardowych urządzeń pomiarowych. Najważniejsze proponowane wnioski obejmują:

- a) Doskonałe wyniki uzyskano przez połączenie pomiarów w skali globalnej eksponatu, wykonanych za pomocą tachimetru oraz pomiarów (skanów) lokalnych, wykonanych za pomocą ramienia pomiarowego i skanera ręcznego.
- b) Należy zapewnić realizację całości procesu digitalizacji (skanowanie, przetwarzanie, archiwizacja) przez tego samego operatora, co prowadzi do uzyskania danych o wyższej jakości, a w efekcie również przyspieszenie i obniżenie kosztów całego procesu. Poziom wiedzy merytorycznej i narzędziowej, prezentowanej przez operatora, jest krytyczny dla efektywności procesu digitalizacji.
- c) Największy błąd pomiaru zaobserwowano w sytuacji, gdy tachimetr i cel znajdowały się w różnych warunkach termicznych (oświetlony/zacieniony), skąd wynika konieczność zachowania jednorodnego sposobu ekspozycji

na światło całej przestrzeni pomiarowej. W sytuacjach, gdy jest to niemożliwe, zaleca się wykonanie pomiarów w nocy, gdy warunki oświetleniowe wyrównują się w naturalny sposób.

- d) Dla wykonalności pomiarów krytyczne jest spełnienie podstawowych warunków dotyczących zasad wykonywania pomiarów tachymetrycznych. Obejmują one operacje związane z przygotowaniem stanowiska pomiarowego (ustawienie, poziomowanie, zabezpieczenie przed poruszeniem tachimetru), jak również szczegóły procedury pomiarowej. Należy pamiętać, że tachimetr jest urządzeniem wymagającym profesjonalnej obsługi i odpowiedniego przygotowania operatora. Niewłaściwe użytkowanie może powodować nie tylko błędne wyniki pomiarów, ale jest również niebezpieczne dla sprzętu i obsługi.
- e) Wykorzystanie mąki ziemniaczanej jako substancji podnoszącej refleksyjność pozwala na bezpieczne i stosunkowo tanie wykonanie pomiarów na eksponatach o ciemnej i błyszczącej powierzchni.
- f) Tachimetr z funkcją skanowania nie jest w stanie zastąpić skanera 3D. Można myśleć o wykorzystaniu tej funkcji okazjonalnie lub awaryjnie.
- g) Przed rozpoczęciem pomiarów tachymetrycznych należy zaplanować pracę i stanowisko w taki sposób, aby unikać kątów obserwacji/oświetlenia mniejszych niż 45° .
- h) W przypadku śledzenia celu, zaleca się użycie wózka do montażu reflektora i wykorzystanie takiego zestawu do pomiarów w trybie śledzenia obiektu. Dokładne odtworzenie skanowanego w ten sposób kształtu wymaga najpierw konwersji chmury punktów w powierzchnię, a następnie wykonania operacji offsetu o wartość odsunięcia osi reflektora od punktu styku środkowego koła z obiektem. Spośród różnych typów reflektorów najlepsze wyniki zapewnia użycia pryzmatu 360° .



Il. 56. Zasada działania wózka wspomagającego przemieszczanie reflektora w trybie śledzenia celu

Podsumowując, należy stwierdzić, że mocną stroną urządzenia są typowe pomiary geodezyjne, jednak próby wykorzystania go jako substytutu skanera lub trackera nie przynoszą oczekiwanych efektów. Wprawdzie dobra znajomość cech użytkowych i ograniczeń tachimetru pozwala wykraczać poza typowe zastosowania, jednak nie należy brać pod uwagę jego „produkcyjnego” zastosowania do pozyskiwania skanów obiektów 3D.

5. Bibliografia

1. Barber D., Mills J. et al., *3D Laser Scanning for Heritage*, English Heritage Publishing, July 2007.
2. Barber D., Mills J. et al., *3D Laser Scanning for Heritage (second edition)*, English Heritage Publishing, October 2011.
3. Binkowski M., *Skanowanie eksponatów muzealnych CMM*, Laboratorium Mikrotomografii, Zakład Komputerowych Sytemów Biomedycznych, Instytut Informatyki, Uniwersytet Śląski, Katowice. Kontakt: marcin.binkowski@us.edu.pl.
4. Błażejowski B., Binkowski M., Bitner M.A., Gieszcz P., *X-ray microtomography (XMT) of fossil brachiopod shell interiors for taxonomy*, „Acta Palaeontologica Polonica”, 56(2), 2011.
5. Boehler W., Bordas Vicent M., Marbs A., *Investigating of scanner accuracy*, XIX CIPA Symposium, Antalya, Turkey, 2003.
6. Bunsch E., *Planowanie rozdzielczości przestrzennej w procesie digitalizacji 3D w zależności od zakresu wykorzystania powstającej dokumentacji*. Zalecenia NIMOZ, Warszawa 2011.
7. Buśko M., *Charakterystyka wybranych cech funkcjonalnych tachimetrów elektronicznych*, „Geodezja”, t. 12, z. 1, 2006.

8. Chmielewski K., Szulwic J., *Niemetryczne zdjęcia cyfrowe w fotogrametrii bliskiego zasięgu w systemie Topcon PI-3000*, Sesja jubileuszowa 60-lecia Katedry Geodezji Politechniki Gdańskiej.
9. Crumlin Pedersen O., McGrail S., *Some Principles of Reconstruction of Ancient Boat Structures*, „The International Journal of Nautical Archaeology”, 2006.
10. Denard H., *The London Charter for the Computer-based Visualisation of Cultural Heritage*, King's College, London 2009.
11. 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.
12. Faro ScanArm – *Instrukcja obsługi*, 2009.
13. Forte M., *Cyber-Archaeology*, Archaeopress, Oxford 2010, dostępny w Internecie: http://ucmerced.academia.edu/MaurizioForte/Papers/367641/Introduction_to_Cyber-Archaeology.
14. Geomax, Totalstation ZTS600, *materiały marketingowe* – www.szwjcarskaprecyzja.pl.
15. Gzowski & Gzowski, Młynarczyk J., *Raport: Wykonanie cyfrowej inwentaryzacji zespołu zabytkowych łodzi ludowych ze zbiorów Narodowego Muzeum Morskiego w Gdańsku w ramach realizacji projektu Centralne Muzeum Morskie – Cyfrowe Muzeum Morskie (etap 2)*, Gdańsk 2014
16. Hocker F., *Three-dimensional documentation of ship timbers using the FaroArm*, May 2003.
17. <https://www.facebook.com/pages/Faro-Rhino-Archaeological-User-Group-FRAUG/156359647780449>.
18. *Instrukcja użytkownika programu Geomagic Studio i Geomagic Qualify*.
19. Jones T., *The Newport Medieval ship. Timber recording manual. Digital recording of ship timbers using a FARO arm and Rhinoceros 3D software*, 2007.
20. Kępniak K., *Opowieść o leniwym cieśli*, „Dachy” nr 1 (157) 2013.
21. Klimkowska H., Wróbel A., *Uwagi o wykorzystaniu tachimetrów bezlustrowych w inwentaryzacji architektonicznej*, Badania statutowe AGH nr 11.11.150.149.
22. Kochi N., Ito T., Noma T., Otani H., Nishimura S., Ito J., *PC-based 3D image measuring station with digital camera, an example of its actual application on a historical ruin*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV, Part 5/W12.
23. Leica TPS800, *Instrukcja obsługi*.
24. Margounakis D., *Virtual Reconstructions in Archaeology, The e-learning Dimension of Computer Applications in Archaeology*, red. D. Politis, Klidarithmos Publications, Athens 2006, s. 146–156.
25. *Materiały marketingowe firmy Faro*, <http://www.faro.com/>.
26. McKenna G., De Loof C., *Report on existing standards applied by European museums*, eContentplus – Athena, ECP-2005-CULT-038099, April 2009.
27. 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.
28. Papaioannou G., Theoharis T., *Fast Fragment Assemblage Using Boundary Line and Surface Matching*, Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Madison, Wisconsin, 2003.
29. Sitnik R., *Opis planowania procesu digitalizacji 3D, procedur postępowania podczas digitalizacji oraz tworzenia dokumentacji cyfrowej*. Zalecenia NIMOZ, Warszawa 2011.
30. Świerczyńska E., Szumowska E., Pieniak M., *Charakterystyki odbicia wiązki laserowej od powierzchni w kontekście generowania modeli przestrzennych*, Politechnika Warszawska, Zakład Geodezji Inżynierskiej i Pomiarów Szczegółowych.
31. *The Seville Charter: International Charter of Virtual Archaeology*.
32. Topcon IS-203, *Instrukcja użytkownika*.
33. Toś C., *Geodezyjne metody inwentaryzacji wałów przeciwpowodziowych na przykładzie Bulwarów Wiślanych w Krakowie*, „Środowisko” nr 2, 2012.
34. Toś C., Wolski B., Zielina L., *Zastosowanie tachimetru skanującego w praktyce geodezyjnej*, „Środowisko” nr 1, 2010.
35. Urbańczyk P., *Przegląd możliwości automatyzacji graficznej analizy archeologicznej dokumentacji terenowej*, „Archeologia Polski”, 1987, t. 32, s. 377–394.
36. Winkelbach S., Wahl F.M., *Pairwise Matching of 3D Fragments Using Cluster Trees*, „International Journal of Computer Vision”, Vol. 78, 2008.
37. *Zalecenia NIMOZ dotyczące planowania i realizacji projektów digitalizacyjnych w muzealnictwie*, Warszawa 2011.
38. Zapłata R., *Digitalizacja dziedzictwa archeologicznego*, Wiedza i Edukacja, Lublin 2011.
39. Żrodowski C., Kłós M., *Metodyka pracy ramieniem 3D*, Centralne Muzeum Morskie, Gdańsk 2012.

Spis ilustracji

II. 1. Idea zastosowania tachimetru [20]	7
II. 2. Idea pomiarów ze zwierciadłem [23]	7
II. 3. Idea integracji pomiarów wielko- i małowgabarytowych [25]	8
II. 4. Idea skanowania za pomocą trackera [25]	8
II. 5 Tachimetr Topcon IS-203 [32]	11
II. 6. Przykładowe sytuacje prowadzące do obniżenia dokładności i rozdzielczości (opr. własne)	16
II. 7. Wyniki pomiarów powtarzalności dla 24 m (opr. własne)	19
II. 8. Wartości odchyłki dla pomiarów powtarzalności przy odległości 24 m (opr. własne)	20
II. 9. Wartości odchyłki dla pomiarów powtarzalności w funkcji odległości (opr. własne)	20
II. 10. Błąd pomiaru w trybie punktowym z reflektorem [7]	21
II. 11 Błąd pomiaru w trybie punktowym z markerem odbłaskowym [7]	21
II. 12. Błąd pomiaru w trybie punktowym bez reflektora w zależności od odległości (opr. własne)	21
II. 13. Błąd pomiaru w trybie punktowym bez reflektora [7]	22
II. 14. Ekspozyty wybrane do badania własności optycznych powierzchni (opr. własne)	22
II. 15. Wynik skanowania tylnicy wraku W-5 (opr. własne)	23
II. 16. Wynik skanowania burty wraku W-5 (opr. własne)	23
II. 17. Wynik skanowania burty s.s „Sołdek” (opr. własne)	23
II. 18. Wzorcowe płyty wykorzystane do pomiarów	24
II. 19. Wzorcowe płyty wykorzystane do pomiarów	24
II. 20. Wzorcowe płyty wykorzystane do pomiarów	25
II. 21. Porównanie chmur punktów dla pomiarów płyty chłodnej i gorącej	25
II. 22. Porównanie dystrybucji odchylek dla pomiarów płyty chłodnej i gorącej	25
II. 23. Kompletny skan tylnicy wraku W-5	26
II. 24. Stępka wraku W-5 (panorama z połączonych ujęć kamery tachimetru)	27
II. 25. Stępka wraku W-5, porównanie skanu Artec (szary) i Topcon (niebieski)	28
II. 26. Kompletny skan stępki wraku W-5	28
II. 27. Pomiar ugięcia stępki wraku W-5	28
II. 28. Pomiary skręcenia stępki wraku W-5	29
II. 29. Burta W-5/377/75	29
II. 30. Model burty W-5/377/75	30
II. 31. Model burty W-5/377/75	30
II. 32. Stanowisko do skanowania płyt wzorcowych	31
II. 33. Efektywność rejestracji danych	31
II. 34. Odchyłki dla płyty białej przy orientacji prostopadłej do wiązki lasera	32
II. 35. Odchyłki dla różnych orientacji płyt wzorcowych, przy odległości 25 m	32
II. 36. Odchyłki dla różnych orientacji płyt wzorcowych, przy odległości 25 m	32
II. 37. Osiągalna rozdzielczość w zależności od odległości skanowania	33
II. 38. Widok skanu płyty wzorcowej z boku	33
II. 39. Rozkład odchylek punktów skanu płyty wzorcowej	33
II. 40. Stanowisko do badania funkcji śledzenia celu	34
II. 41. Uzyskane wyniki i odchyłki skanowania dla trybu śledzenia pryzmatu	34
II. 42. Stanowisko pomiaru ekspozytu testowego, w warunkach symulowanych opadów atmosferycznych	35
II. 43. Chmura punktów pozyskana za pomocą tachimetru	35
II. 44. Rozkład odchylek pomiarów tachimetrycznych w stosunku do pomiarów referencyjnych	35
II. 45. Łódź rybacka DĘB-5 ze zbiorów placówki NMM w Helu	36
II. 46. Wynik skanowania łodzi DĘB-5 z widoczną utratą punktów pomiarowych poniżej wodnicy	36
II. 47. Wynik skanowania tachimetrem łodzi CHA-11 i KAR-4	37
II. 48. Sposób przeprowadzenia pomiarów punktowych	37
II. 49. Kuter Hel-27	38
II. 50. Skan kutra HEL-27 (Faro Focus 3D) [15]	38
II. 51. Skan kutra HEL-27 (Topcon IS-203, opr. własne)	39
II. 52. Mapa odchylek pomiędzy skanami dla kutra HEL-27 (Topcon IS-203/Faro Focus 3D, opr. własne)	39
II. 53. Rozkład odchylek między obiema chmurami punktów	39
II. 54. Para zdjęć do pomiaru fotogrametrycznego	40
II. 55. Menu konfiguracyjne tachimetru (Star Mode)[32]	41
II. 56. Zasada działania wózka wspomagającego przemieszczanie reflektora w trybie śledzenia celu	43

