DE GRUYTER OPEN

POLISH HYPERBARIC RESEARCH 3(52)2015
Journal of Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society

TRIANGULACYJNY SKANING LASEROWY W FOTOGRAMETRII PODWODNEJ

Aleksander Wojtowicz, Konrad Stolarczyk

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Geodezji

STRESZCZENIE

Zastosowanie laserowego skanera triangulacyjnego 3D może znacząco usprawnić wizyjną inspekcję obiektu pod wodą. W dobie dużego zapotrzebowania na precyzyjną informację niewystarczającym materiałem staje się wyłącznie dokumentacja fotograficzna, obarczona przekłamaniami geometrycznymi.
Autorzy w swoim artykule starają się przybliżyć podstawy nowoczesnej technologii pomiaru, jakim jest skaning laserowy – wiarygodny i relatywnie prosty w użyciu, z zachowaniem podstawowych, dobrych praktyk dotyczących pomiarów. W oparciu o wiązkę światła laserowego generowany jest punktowy model badanego obiektu, o różnej – adaptowalnej do wymagań – rozdzielczości. Dobrze wykonany skaning pozwoli pokryć całą powierzchnię badanego obiektu, bez braków w informacji, jak ma to często miejsce w przypadku dokumentacji fotograficznej, skupiającej się wyłącznie na kluczowych detalach, a obecnie zastępowanej przez technologię Structure from Motion, alternatywy dla skaningu laserowego, tworzącej poteksturowany model 3D ze zbioru fotografii obiektu, z podobną dokładnością, lecz przy zwiększonej czasochłonności.
Słowa kluczowe: skaning laserowy, podwodne zobrazowania fotogrametryczne, diagnostyka obiektów podwodnych.

ARTICLE INFO

PolHypRes 2015 Vol. 52 Issue 3 pp. 35-48
ISSN: 1734-7009 **eISSN:** 2084-0535
DOI: 10.1515/phr-2015-0015
Strony: 14, rysunki: 16, tabele: 0
page www of the periodical: www.phr.net.pl

Publisher
Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society

Typ artykułu: oryginalny

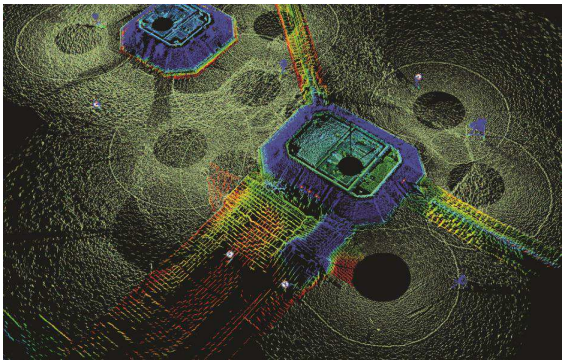
Termin nadesłania: 05.07.2015r.
Termin zatwierdzenia do druku: 22.07.2015r.

WSTĘP

Mówiąc o współczesnych trendach w szeroko rozumianych pomiarach geometrii i położenia nie sposób zapomnieć o obecnej od lat, a jednak wciąż traktowanej niemalże jak wytwór futurystów - fotogrametrii i teledetekcji. Dziedzina, o którym mowa jest odzwierciedleniem obecnego sposobu myślenia, które sprowadza pomiary w terenie (często nieprzyjaznym), z udziałem człowieka do niezbędnego minimum, przenosząc ciężar na kameralną obróbkę danych („post-processing"), nawet kosztem zwiększonej ilości zgromadzonych informacji.

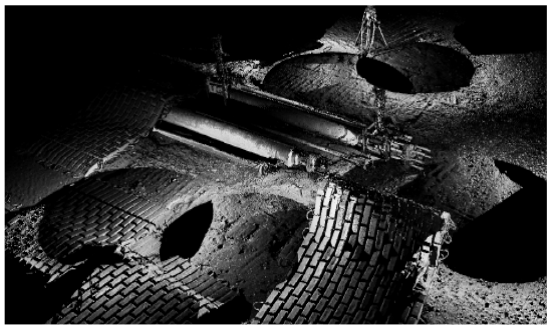
Świat oswoił się już dostatecznie z wszechobecnymi technikami satelitarnymi - są one z dużym powodzeniem wykorzystywane na lądzie, w powietrzu, a co najbardziej nas interesuje, także na morzu. Prowadzimy dzięki nim okręty po trudnych żeglownie akwenach, posadawiamy z precyzją submetrową konstrukcje typu off-shore, dajemy podstawę do nawigacji podwodnej. Kolejnym racjonalnym krokiem, po globalnym dowiązaniu naszych pomiarów - jako że dla wszystkiego obecnie wymaga się georeferencji - jest przejście od pomiarów bezpośrednich do zdalnych.

Ten kierunek rozwoju, w związku ze specyfiką ośrodka morskiego, dość dawno został zauważony i jest sukcesywnie eksploatowany w technice podwodnej. Potwierdzeniem tego mogą być chociażby coraz doskonalsze sonary wielowiązkowe używane nie tylko w hydrografii, ale również jako narzędzia do pomiarów inżynieryjnych, na przykład: BlueView 3D - firmy Teledyne.



Rys.1. Chmura punktów wygenerowana sonarem wielowiązkowym BlueView 3D [1].

Innym kierunkiem rozwoju fotogrametrii i teledetekcji jest wykorzystanie światła jako swoistego przymiaru. W przypadku fotogrametrii, będącej techniką pasywną - wykorzystującą światło odbite, odtwarzamy wiązkę promieni świetlnych, uwzględniamy imperfekcje układu optycznego, aby następnie odtworzyć obraz w dwu lub trójwymiarze, zależnie od tego czy mamy do czynienia, odpowiednio, z fotogrametrią jedno lub wieloobrazową. W celu pokrycia całego intersującego obiektu, potrzebne jest wykonanie sekwencji zdjęć, zmieniając położenie kamery, tak by fotografowany obiekt pokrywał się na kolejnych obrazach, a następnie wykorzystując tożsame punkty, orientujemy kolejne zdjęcia wzajemnie. Teledetekcja z wykorzystaniem światła to nic innego jak popularny LIDAR (ang. Light Detection and Ranging), a więc w wolnym tłumaczeniu - wykrycie i określenie lokalizacji wykorzystując wygenerowany promień świetlny. Według ostatnich badań producenta podwodnych przyrządów pomiarowych 2GRobotics, skanowanie laserowe dało 100 krotnie wyższą rozdzielczość przestrzenną niż w przypadku używania sonaru wielowiązkowego [2].



Rys. 2. Chmura punktów wygenerowana skanerem laserowym ULS 500 [2].

Warto jednak zauważyć, że nawet pobieżne prześledzenie informacji dotyczących fotogrametrii i teledetekcji jasno określi hierarchię popularności. W związku z medialnym szumem na temat dronów, nagłośnionym rządowym projektem ISOK (Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami), w którym jednym z produktów jest wygenerowany z wykorzystaniem LIDARu Numeryczny Model Terenu bezdyskusyjnie prym wiedzie fotogrametria i teledetekcja lotnicza. Fotogrametria naziemna, choć mniej popularna i w profesjonalnym zastosowaniu zarezerwowana głównie dla osób zajmujących się inwentaryzacjami architektonicznymi nabiera przysłowiowego rozpędu dzięki technologii Structure from Motion (SfM), a więc tworzeniu modeli przestrzennych ze zdjęć, z założeniem ich dużego wzajemnego pokrycia.

Najrzadziej wymienianą w ogólnodostępnych publikacjach jest dziedzina fotogrametrii podwodnej

(subaquafotogrametria) i to pomimo faktu, że dotyczy środowiska najmniej przyjaznego człowiekowi, a co za tym idzie, należałoby rozważyć sprowadzenie obcowania z nim do rangi czysto rekreacyjnej [3]. W związku z tym, każdy dodatkowy wkład w rozwój zaawansowanych technik ułatwiających rzetelne dokumentowanie elementów znajdujących się pod lustrem wody jest nie tylko *l'art pour l'art.* – powiększaniem ogólnego zasobu wiedzy, ale może przynieść także wymierne korzyści w kształtowaniu nowych zbiorów danych geoprzestrzennych i ograniczaniu ryzyka w planowaniu i wykonywaniu zadań pod wodą.

Autorzy w poniższym artykule przybliżą efekty swojej pracy inżynierskiej pt.: "*Weryfikacja przydatności skanera 3D do podwodnych pomiarów fotogrametrycznych*" przygotowanej pod opieką dr. hab. inż. Marka Przyborskiego, prof. nadzw. PG, kierownika Katedry Geodezji PG oraz kmdr. dr. inż. Adama Olejnika, kierownika Zakładu Technologii Prac Podwodnych AMW.

PROBLEMATYKA I CEL BADAŃ

Wybór rozwiązania teledetekcyjnego do pomiarów podwodnych jest podyktowany kilkoma równorzędnymi względami: kompletnością gromadzonych danych, szybkością ich rejestracji, przystosowaniem danych do obróbki w środowisku CAD, ale także wygodą samego zespołu pomiarowego, co dodatkowo kieruje rozważania na połączenie zdalnego pomiaru ze zdalną platformą pomiarową.

Skaning laserowy, pomimo oczywistych zalet potwierdzonych aplikacjami naziemnymi i lotniczymi posiada także ograniczenia charakterystyczne dla systemów polegających na świetle, w związku z czym jego adaptacja jeden do jednego w środowisku morskim stanowi wyzwanie, chociażby ze względu na przewidywany zasięg pomiaru.

Na nieustępliwość ośrodka morskiego składają się różne czynniki fizyczne, a także zmienność samego środowiska i jego mała przewidywalność. Najczęściej przywoływanym parametrem, stanowiącym główne wyzwanie dla wszystkich planujących i wykonujących prace podwodne jest wpływ ciśnienia hydrostatycznego. Warto tu zauważyć, jak kosztowne i skomplikowane jest przystosowanie sprzętu do pracy na nawet niewielkich głębokościach. Sztuką jest stworzenie konstrukcji, która ochroni wrażliwe elementy elektroniczne przed wpływem wody pod ciśnieniem większym niż to od spadającej kropli deszczu. Dowodem na to mogą być początkowe problemy osób zgromadzonych wokół inicjatywy openrov.com, początkowo zupełnie otwartego, obecnie skomercjalizowanego projektu budowy małych obserwacyjnych pojazdów podwodnych.

W przypadku głębiej położonych wraków, inwentaryzacji i mapowania elementów infrastruktury długotrwała ekspozycja nurków roboczych, oprócz samego kosztu nurkowania, jest potencjalnie niebezpieczna dla życia i zdrowia. O tym jak ciężko jest eksplorować dno morza powinno świadczyć porównanie – 12 astronautów miało możliwość chodzenia po powierzchni Księżyca, ale tylko 3 badaczy dotarło do najgłębiej położonego, zbadanego miejsca na Ziemi – Głębi Challengera. Nie mieli oni także możliwości swobodnego spacerowania po dnie oceanu. Skłania to do refleksji czy uwzględniając cały szereg badań o szkodliwości nurkowania, większość prac podwodnych na dużych i bardzo dużych głębokościach (powyżej 50 m pod poziom morza) nie powinna być prowadzona z wykorzystaniem pojazdów podwodnych [3-5].

Kolejnym czynnikiem mającym bezpośredni wpływ na jakość i możliwość dokładnego wykonania pomiarów jest przejrzystość wody. Na pogorszenie warunków widoczności składają się w sposób znaczny bioseston i abioseston, czyli cząstki stałe unoszące się w toni wodnej pochodzenia odpowiednio: biologicznego i niebiologicznego. O ile bioseston, czyli inaczej plankton unosi się w toni wody, ze względu na swoją charakterystyczną budowę - chociażby ciężar właściwy zbliżony do ciężaru właściwego wody, o tyle abioseston, szczególnie w przypadku prac wykonywanych w strefie przydennej występuje na zasadzie zjawiska resuspensji - podrywania cząstek z dna morskiego – tutaj w wyniku pracy pędników pojazdów podwodnych, ruchu płetw nurka, niekontrolowanego upadku narzędzi.

Alternatywnymi platformami wykonującymi podwodne pomiary teledetekcyjne mogą być pojazdy podwodne. Wykonują one prace w rozległym zakresie, wspomagając lub całkowicie zastępując nurka pod wodą, także jako platforma dla techniki wizyjnej „ich ogromna popularność bierze się stąd, że przyczyniają się do wzrostu standardu bezpieczeństwa i mają pośredni wpływ na poprawę efektywności realizowanych zadań. Co ciekawe obecnie niemal 60% wszystkich eksploatowanych na świecie ROV to pojazdy obserwacyjne" [6]. A zatem ich podstawowym zadaniem jest ocena sytuacji podwodnej w oparciu o obraz telewizyjny.

W związku z powyższym system wizyjny montowany na tym urządzeniu będzie jednym z jego podstawowych układów pokładowych. Niestety standardowy obraz telewizyjny, bez jakichkolwiek odniesień geometrycznych, pozwala jedynie na ocenę jakościową – dobry czy zły, jest lub nie ma (obiektu). Rozwinięciem pokładowych systemów diagnostyki wizyjnej stać się z powodzeniem mogą układy optyczne oparte na pomiarach aktywnym skanerem laserowym [3,6,7].

Autorzy, ze względu na niedostateczną ilość wiarygodnych ogólnodostępnych badań na temat skaningu laserowego pod wodą, postanowili jako cel nadrzędny wybrać potwierdzenie przydatności skanera 3D do pomiarów podwodnych, analizując wierność odwzorowania obiektu testowego. Zdając sobie sprawę z istnienia gotowych rozwiązań komercyjnych postanowiono użyć urządzenia pierwotnie nieprzystosowanego do pomiarów podwodnych, będącego jedynie demonstratorem technologii. Cele dodatkowe odnoszą się do charakterystyki otrzymanego produktu, jakim jest chmura punktów, a więc jej gęstości i równomierności, a także do określenia wpływu ośrodka wodnego i konstrukcji urządzenia na wyniki pomiarów.

OPIS TECHNIKI POMIARU

Za urządzenie pomiarowe przyjęto triangulacyjny skaner 3D firmy Matter & Form, będący kompaktowym urządzeniem do tworzenia „chmur punktów" a w dalszej kolejności modeli 3D z obiektów o maksymalnej średnicy 18cm i wysokości 25cm.

Po rozłożeniu skaner składa się z wertykalnej części skanującej i horyzontalnej, z obrotowym talerzem, umożliwiającym pomiar całego obiektu. W części wertykalnej zainstalowano układ pomiarowy poruszający się dzięki zębatkom po pionowym, plastikowym elemencie, nagwintowanym prawoskrętnie. Pionowy ruch układu pomiarowego umożliwia zeskanowanie obiektu w pełnym zakresie 25 cm wysokości.

Talerz w części horyzontalnej jest okrągłym, gumowym (dla zwiększenia stabilności obiektu) elementem, na którym umieszcza się skanowany obiekt. Następnie poprzez obrót talerza o wartość kątową, domyślną (1,5 deg) lub definiowalną przez użytkownika w oprogramowaniu, możliwe jest rozprowadzenie wiązki równomiernie po powierzchni całego obiektu. Na potrzeby badania zastąpiło to występującą w rzeczywistych warunkach konieczność opłynięcia i rozlokowania systemu pomiarowego dookoła obiektu.

Dodatkowo w obudowie znajdują się: wejście do podłączenia zasilania prądu stałego oraz wejście USB w celu połączenia z jednostką sterującą - komputerem.

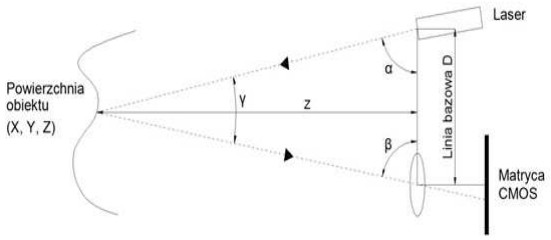
Rys. 3. Skaner triangulacyjny Matter & Form [8].

Zasadę działania skanera można przedstawić, jako pozyskanie przestrzennej struktury widocznego obiektu, ze zdjęć wykonanych kamerą, stanowiących dwuwymiarowe zobrazowanie. W tym celu wykorzystuje się metodę triangulacji optycznej wspartej oświetlaniem wiązką lasera. Każda zmiana pozycji emitowanej wiązki lasera jest obrazowana w sposób skokowy, a następnie rejestrowana.

Ów system działa w oparciu o proste zależności trygonometryczne. W celu rozwiązania problematyki określenia współrzędnych przestrzennych punktów, wystarczy wyznaczyć dwa kąty (α, β) i długość linii bazowej D (rysunek 4). Kąt padania wiązki lasera α oraz odległość między diodami emitera laserowego, a środkiem optycznym kamery są znane i wynikają w całości z budowy/geometrii zespołu pomiarowego. Natomiast niezbędny do wykonania obliczeń kąt β, będący kątem, pod jakim odbita i rozproszona wiązka lasera została zarejestrowana przez sensor CMOS, jest zależny od odległości badanego obiektu do zespołu pomiarowego *z* i jest wyznaczany dynamicznie w każdym pomiarze [%cytowanie]. Kolejny krok stanowi już wyłącznie obliczenie brakującego kąta pomiędzy wiązką padającą a odbitą γ i wielkości odsunięcia rejestrowanego punktu od zespołu pomiarowego *z*, następującymi wzorami:

$$y = 180° - (a+b)\ [°] \qquad (1)$$

$$z = (D*\sin a*\sin b)/(\sin y) \qquad (2)$$



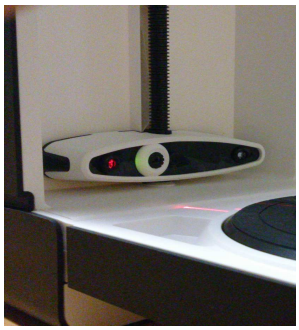
Rys. 4. Metoda triangulacji optycznej.

Układ optyczny (pomiarowy) składa się z dwóch układów laserów diodowych (rys.5) (macierz diod o nieustalonych wymiarach), które scharakteryzowano, jako: „bezpieczne dla oka, o przestrzennej długości impulsu nadawczego między 100, a 200mm" [dialog techniczny z producentem].

W związku z charakterystyczną dla tego typu technologii, sporą rozbieżnością i asymetrią wiązki, co znacząco mogłoby wpłynąć na zasadniczą cechę pomiaru, czyli precyzyjne oświetlenie fragmentu obiektu, zastosowano najprawdopodobniej układ soczewek, które formują wiązkę o lepszych, choć wciąż obarczonych stratami energii, właściwościami. W najprostszych i najtańszych rozwiązaniach, prawdopodobnie zastosowanych w skanerze Matter & Form, formowanie odbywa się poprzez soczewki sferyczne.

Diody laserowe, zgodnie z teorią działania skanera triangulacyjnego, rozmieszczone są po obu stronach jednostki rejestrującej - kamery, pod pewnymi, różnymi kątami (rys.5). Zastosowanie dwóch laserów, do tego w różnej konfiguracji geometrycznej zamiast jednego, jak w klasycznym rozwiązaniu, ma za zadanie przyśpieszyć pomiar, zmniejszyć martwe pola, nieoświetlone pojedynczą wiązką oraz zwiększyć dokładność poprzez podwójne wyznaczenie współrzędnych.

Równorzędnym pod względem hierarchii w układzie optycznym jest moduł rejestrujący obraz. W przypadku skanera Matter & Form rejestracja obrazu realizowana jest przez kamerę firmy Logitech, oryginalnie adaptowaną, jako kamera internetowa.



Rys. 5. Budowa układu optycznego [badania własne].

Ostatnim elementem, odpowiadającym za zbieranie danych jest komputer z dedykowanym programem Matter & Form. W związku z tym, że skaner jest urządzeniem, które jedynie wykonuje pomiar, potrzebuje więc jednostki nadrzędnej, która odpowiadałaby za kalibrację, zapis oraz pierwszą wizualizację pomiaru i jego szczątkową obróbkę. Szybkość przetworzenia surowych danych zależy, więc jedynie od parametrów procesora komputera, wspomagania tego jednostką graficzną i szybkością zapisu/odczytu z pamięci podręcznej RAM. Realizacja połączenia odbywa się poprzez wspomniany wcześniej przy opisie skanera kabel USB.

Pomiarów dokonywano symulując skaner zabudowany w systemie przystosowanym do pomiarów pod wodą, a więc z wykorzystaniem iluminatora. W szeregu prób wybrano początkowo tafle szkła sodowo-wapiennego i taflę szkła akrylowego (pleksiglas), nie uwzględniając w pierwszych przypadkach wpływu środowiska wodnego. Była to także weryfikacja dla samego urządzenia, czy jest zdolne poradzić sobie w przypadku wystąpienia przezroczystej przeszkody na drodze biegu wiązki lasera.

Rys. 6. Pomiar przez taflę pleksiglasu [badania własne].

W następnych, w celu sprawdzenia właściwości ośrodka na penetrację wiązką lasera zastosowano szklane zbiornik o różnej wielkości i geometrii, co później przekładało się bezpośrednio na: zmienną grubość warstwy wody na drodze układ optyczny – obiekt, a także kształt iluminatora układu optycznego.

Weryfikację metody pomiarowej przeprowadzono mierząc pojedynczy obiekt, stanowiący imitację śruby napędowej wykonanej z mosiądzu. Obiekt był na tyle mały, że możliwe było zeskanowanie całej jego powierzchni. Jednocześnie był on wystarczająco skomplikowany geometrycznie i posiadał na tyle dużą liczbę szczegółów, że możliwym było dokładne sprawdzenie potencjału zarówno urządzenia, jak i samej metody pomiarowej. Testy przeprowadzono w czterech seriach, każdorazowo modyfikując środowisko pomiaru, co krok przybliżając je do środowiska docelowej implementacji, tj. zdalnego pomiaru urządzeniem pracującym pod wodą.

W pierwszej serii, z naczyniami opróżnionymi lepsze rezultaty pod względem ilości pomierzonych punktów, ich spójności oraz liczby błędów wykazał pomiar w małym akwarium prostopadłościennym.

W czasie obrotu talerza skanera ściany akwarium tworzyły iluminator płaskościenny, który jak pokazały wcześniejsze pomiary przez szybę oraz pleksiglas nie stanowi żadnej przeszkody dla skanera. Tylko przy określonym kącie nachylenia ścian akwarium (zarówno dłuższej jak i krótszej) powstawały błędy wynikające prawdopodobnie z kąta padania promieni obu wiązek lasera i kąta, pod którym kamera rejestrowała padającą wiązkę. Co oczywiste w miejscach łączenia ścian, które same w sobie są nieprzezroczyste wiązki lasera nie dotarły do obiektu-śruby.

W przypadku naczynia cylindrycznego o średnicy 18 cm wymienione wcześniej błędy, spójność punktów oraz możliwość ich jednoznacznej interpretacji charakteryzowały się na gorszym poziomie niż przy małym akwarium. Pojawiło się dużo punktów zarejestrowanych na powierzchni naczynia oraz dużo punktów rozproszonych trudnych do interpretacji. Mogło to wynikać ze stworzonego układu optycznego – naczynie zadziałało jak soczewka wypukło-wklęsła, która ma właściwości rozpraszające, ale także z niedoskonałości optycznych szkła, z którego było wyprodukowane.

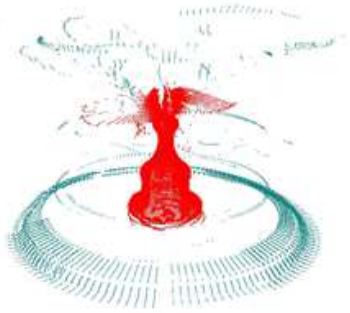
Rys. 7. Pomiar w okrągłym naczyniu w serii pomiarów bez wody [badania własne].

Ponieważ wszystkie próby bez użycia wody przebiegły pomyślnie, a ich wyniki nie różniły się od siebie znacząco, niemożliwym było określenie słusznego wyboru odpowiedniego iluminatora w dalszym postępowaniu. W kolejnych dwóch seriach pomiarowych sprawdzono możliwości pomiaru przez skaner obiektu zanurzonego w wodzie (destylowanej i morskiej). Pomimo początkowych obaw, związanych z ograniczeniami wynikającymi z właściwości optycznych stworzonych układów – obecność wody, załamanie wiązki na granicy ośrodków, odległość iluminatorów od układu optycznego skanera, pomiar przebiegł prawidłowo – punkty były rejestrowane.

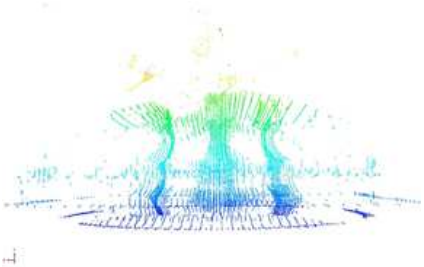
Naczynie cylindryczne w tej sytuacji zachowało się dużo lepiej niż małe akwarium prostopadłościenne. Przede wszystkim śruba została odwzorowana tak, że jednoznacznie można było rozpoznać obiekt (rys. 8). Zarejestrowano jednak dużo punktów błędnych (rozproszonych). W przypadku akwarium punkty, choć w niektórych miejscach układały się w spójne struktury, tylko dzięki wcześniejszej znajomości skanowanego obiektu, mogłyby zostać uznane za tworzące realny kształt imitacji pędnika poddanego badaniu (rys. 9).

W związku z powyższym problemem do pomiaru w wodzie morskiej dopuszczono jedynie naczynie cylindryczne. W ostatniej serii pomiarowej (woda morska) (rys. 10), zgodnie z doświadczeniami z wykorzystaniem wody destylowanej, śruba została odwzorowana poprawnie. Pojawiły się natomiast punkty na dnie naczynia, których wcześniej nie było – najprawdopodobniej efekt sedymentacji cząstek stałych oraz spora ilość punktów w przestrzeni naczynia, co świadczyło o znacznie mniejszej przejrzystości (rys. 11).

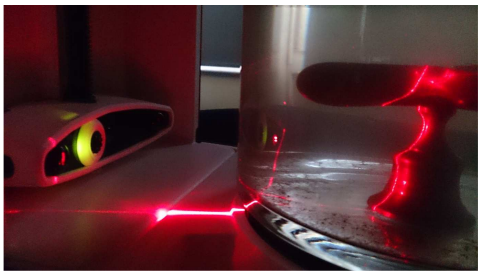
Czwarta seria pomiarowa była serią referencyjną w celu wiernego odwzorowania śruby, które jednocześnie posłużyła do celów porównawczych, jako model wzorcowy. Zrezygnowano z naczyń, a śrubę postawiono na talerzu skanera, jak w przypadku standardowego pomiaru określonego przez producenta. Pomiar przebiegł więcej niż pomyślnie, a śruba została zarejestrowana bardzo dokładnie (rys. 12), a otrzymana gęstość punktów pozwoliła na wiarygodną ocenę dokładności i poprawności pozostałych pomiarów w odpowiednim oprogramowaniu.



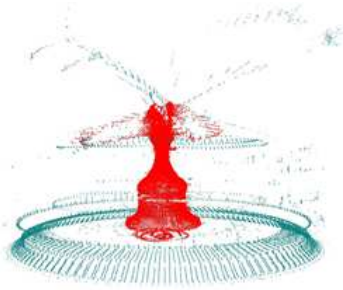
Rys. 8. Skan obiektu w naczyniu cylindrycznym przy użyciu wody destylowanej [badania własne].



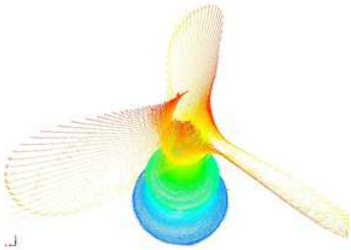
Rys. 9. Skan obiektu w akwarium przy użyciu wody destylowanej [badania własne].



Rys. 10. Pomiar w wodzie morskiej [badania własne].



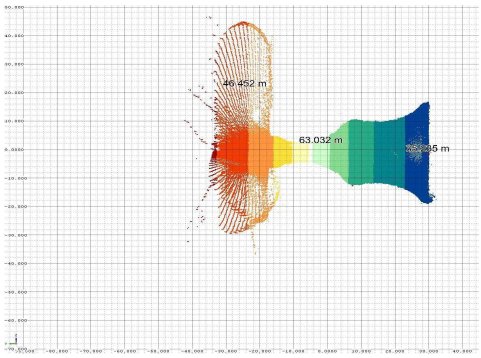
Rys. 11. Skan obiektu w naczyniu cylindrycznym przy użyciu wody morskiej [badania własne].



Rys. 12. Skan obiektu służący za model referencyjny w dalszym postępowaniu [badania własne].

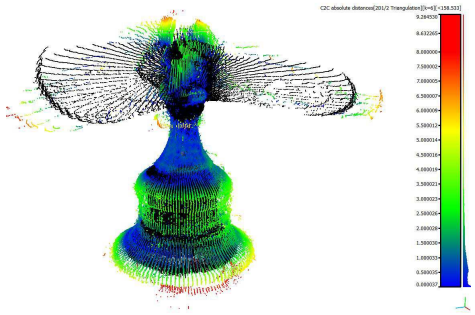
W procesie obróbki danych zastosowano dwa programy komputerowe przystosowane do pracy z "chmurami punktów": RiScan Pro oraz Cloud Compare. Pierwszy z nich, będący narzędziem do wizualizacji, wymiarowania i filtracji posłużył jako źródło dokumentacji graficznej pozyskanego obiektu i wstępnego określenia wierności odwzorowania, poprzez pomiary charakterystycznych wymiarów, a także do eliminacji ewidentnie błędnych punktów. (rys. 13). Warto zwrócić uwagę, że domyślnie program zaimportował chmurę punktów z jednostkami w metrach, podczas gdy faktycznie były to milimetry.

Wynikało to z braku możliwości określenia jednostki, na poziomie eksportu z oprogramowania Matter & Form w formacie *.ascii.



Rys. 13. Wymiarowanie w programie Riscan PRO [badania własne].

Cloud Compare, jak wynika wprost z jego nazwy, jest programem umożliwiającym wśród kilku swoich funkcji, wykrywanie zmian w "chmurach punktów" tożsamych obiektów. Polega to na dopasowaniu chmura do chmury, z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów dwóch zbiorów danych i następnie automatycznego znalezienia różnic, zaznaczając uprzednio, który zbiór danych - chmura, jest obiektem referencyjnym. Program umożliwia zwizualizowanie wyniku w postaci rozkładu kolorystycznego (RGB) nałożonego na punkty - im bliżej koloru niebieskiego, tym odchylenia kształtu mniejsze, im bliżej czerwonego, tym większe, wraz z rozkładem gęstości poszczególnych wyników (rys. 14).



Rys. 14. Porównanie w programie CloudCompare [badania własne].

WNIOSKI I DALSZE KIERUNKI BADAŃ

Weryfikacja przydatności skanera triangulacyjnego do podwodnych pomiarów fotogrametrycznych przebiegła pomyślnie. Mając do dyspozycji sprzęt nieprzystosowany do tego rodzaju robót, udało się osiągnąć zadowalające rezultaty. Dało to podstawy do stwierdzenia, że użyta technologia znajduje zastosowanie w pracach na większą skalę, np. inwentaryzacja i diagnostyka infrastruktury podmorskiej. Według autorów, w świetle uzyskiwanych dokładności, taki system pomiarowy stanowiłby idealne uzupełnienie pomiarów zestawami ultradźwiękowych sond wielowiązkowych, w przypadkach inspekcji obiektów wymagających zwiększenia precyzji detekcji.

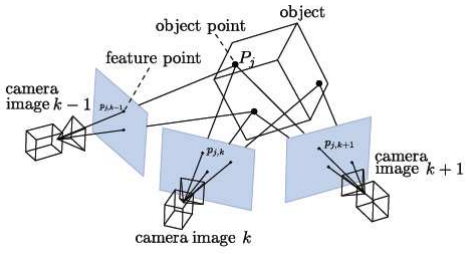
Z punktu widzenia optyki, najlepsze wyniki były otrzymywane przy użyciu iluminatorów płaskich. Najlepszym rozwiązaniem w laserowym systemie pomiarowym, przystosowanym do pomiarów w środowisku wodnym, byłby iluminator w postaci płytki płaskorównoległej ze szkła akrylowego, ściśle przylegającej do emitera wiązki i do obiektywu kamery. Płytki te byłyby integralną częścią szczelnej obudowy skanera, chroniącej go przed wodą. Przy możliwości kalibracji urządzenia pomiarowego, w prosty sposób można by pozbyć się niekorzystnego wpływu płytek na pomiar. Kalibracji należałoby dokonywać każdorazowo przed pomiarem, tak aby również uwzględnić wpływ stanu jakości wód i grubości warstwy wody, w przypadku większej odległości obiektu poddawanego inspekcji, od urządzenia pomiarowego.

Skomplikowana geometria obiektu okazuje się być bardzo problematyczna w optycznych systemach pomiarowych. Podczas skanowania wybranego zakresu, należy zwrócić uwagę na ustawienie układu optycznego skanera względem skanowanych płaszczyzn oraz ilość występujących krawędzi. W przypadku, gdy część lub całość przedmiotu pomiaru jest bardzo nachylona (więcej niż 45°) w kierunku równoległym do osi optycznej, dochodzi do znacznego tzw. poślizgnięcia plamki lasera. Wówczas plamka ulega rozciągnięciu i zniekształceniu. W systemach triangulacyjnych w dalszym ciągu możliwa jest detekcja punktów, lecz to zjawisko znacznie wpływa na ich rejestrowaną ilość.

Liczba punktów, bezpośrednio wpływająca na uzyskiwaną szczegółowość skanowanego obiektu, powstała w procesie pomiaru, może być zwiększona poprzez użycie kamer o większych rozdzielczościach, w myśl idei, więcej pikseli przedstawiających oświetlenie wiązką, będzie równe większej ilości rejestrowanych punktów. Jednakże należy pamiętać, że sama zwiększona rozdzielczość rejestratora, nie wpłynie na zwiększenie uzyskiwanych dokładności, gdyż w ośrodku wodnym rozbieżność promienia lasera jest bardzo duża.

Prowadzi to do rozszerzenia widocznej wiązki na powierzchni, przez co traci swój liniowy/punktowy charakter. Utrudnia to detekcję właściwych punktów, bo więcej obszaru zostaje oświetlona nasyconym światłem i załamanym na powierzchni obiektu światłem. Dlatego też, dobrym rozwiązaniem w znacznym stopniu niwelującym ów problem jest zmniejszenie szerokości emitowanej wiązki. W rozumieniu autorów wysoka rozdzielczość kamery w połączeniu z dostatecznie cienką linią lasera, dałaby wystarczającą dokładność i szczegółowość do znacznej większości możliwych aplikacji związanych z diagnostyką podwodną, oraz precyzyjnego wyznaczania krawędzi.

Przydatne, w dalszym rozwijaniu technologii bezdotykowych pomiarów podwodnych, będzie zestawienie chmury punktów wykonanej skanowaniem laserowym z chmurą punktów wygenerowaną wyłącznie przy pomocy techniki fotogrametrycznej (same zdjęcia) (rys.16). Jest to możliwe dzięki wspomnianej wcześniej technologii Structure from Motion, a więc dzięki wykonaniu dokładnej dokumentacji fotograficznej obiektu podwodnego, dzięki wysokiemu pokryciu wzajemnemu kolejnych zdjęć, z wykorzystaniem kamery o dużej rozdzielczości dokonujemy rekonstrukcji punktów wykorzystując wielokrotne przestrzenne wcięcie wstecz. Odbywa się to dla odpowiadających sobie pikseli kolejnych zarejestrowanych obrazów (rys. 15).



Rys. 15. Podstawa działania technologii SfM [9].

Rys. 16. Fragment chmury punktów wygenerowanej ze zdjęć podwodnych [10].

Autorzy składają serdeczne podziękowania:

Panu kmdr. dr. inż. Adamowi Olejnikowi, kierownikowi Zakładu Technologii Prac Podwodnych AMW, współopiekunowi i recenzentowi pracy inżynierskiej ze strony Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni, za umożliwienie badań na terenie Zakładu, cierpliwość w trakcie pisania pracy i wiele cennych uwag o niszowych zagadnieniach pomiarów podwodnych i nawigacji podwodnej oraz Panu dr. hab. inż. Markowi Przyborskiemu, prof. nadzw. PG, kierownikowi Katedry Geodezji PG, promotorowi i współopiekunowi ze strony Politechniki Gdańskiej, za przyjęcie pod swoją opiekę, cenne uwagi merytoryczne i edycyjne oraz nieocenione rozmowy motywujące.

BIBLIOGRAFIA

1. Blueview, Teledyne: http://www.blueview.com/assets/Uploads/documents/BlueView-Spool-Piece-Metrology-WP12001-Rev-.pdf. access: 15/09/2015
2. 2gRobotics: http://www.2grobotics.com/spool-metrology-with-2g-robotics-uls-500/. access: 15/09/2015
3. Olejnik A.: Analiza systemów wizyjnych pod kątem ich zastosowania w zobrazowaniu przestrzennym obiektów podwodnych Polish Hyperbaric Research Vol. 15 No 2, 2006, pp. 31–65.
4. Olszański, R., Siermontowski, P.: ABC zdrowia nurka. Głogów, 2002.
5. RP, M.S.: Underwater Work Act of 17 October 2003 - a consolidated text 2014, pp. 1–15.
6. Olejnik A.: Problematyka wizyjnej diagnostyki obiektów podwodnych Polish Hyperbaric Research Vol. 33 No 4, 2010, pp. 43-62.
7. Society, M.T.: ROV Applications - Design - Laser Line Scanning. http://www.rov.org/rov_design_scanners.cfm. dostęp: 14/11/2014.
8. Form, M.A.: Scanner. https://matterandform.net/scanner. access: 15/11/2014.
9. openMVG: http://openmvg.readthedocs.org/en/latest/openMVG/sfm/sfm. access: 20/09/2015
10. Ocean Discovery: http://www.oceandiscovery.org/sites/default/files/1271447_10200795445913005_1559467036_o.jpg. access: 13/09/2015

inż. Aleksander Wojtowicz
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Geodezji
ul. Narutowicza 11-12, 80-233 Gdańsk.
e-mail: aleksander.wojtowicz@yahoo.pl