

Adam Olejnik

Katedra Technologii Prac Podwodnych

Akademia Marynarki Wojennej im. Bohaterów Westerplatte w Gdyni

Aleksander Wojtowicz

Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, Gdynia

MIEJSCE I ROLA DIAGNOSTYKI WIZYJNEJ OBIEKTÓW PODWODNYCH W OBSZARZE NAUK TECHNICZNYCH

THE PLACE AND ROLE OF VISIONARY DIAGNOSTICS OF UNDERWATER OBJECTS IN THE FIELD OF TECHNICAL SCIENCES

Wstęp

Diagnostyka wizyjna obiektów podwodnych jest obszarem wspólnym trzech dyscyplin (Rys. 1.1). Ze względu na środowisko i środki techniczne oraz technologie wykonywania czynności badawczych wchodzi w obręb technologii prac podwodnych. Ze względu na cel i przyczyny realizacji badań jest częścią diagnostyki technicznej, a biorąc pod uwagę metody badawcze, obejmuje obszar podwodnej fotogrametrii inżynierskiej. Obecnie tematyka podwodnej fotogrametrii inżynierskiej zaczyna w Polsce wracać, po niemal 4 dekadach jej niebytu. W międzyczasie dokonał się nie tylko przełom w pojmowaniu niektórych opisywanych dalej obszarów – niegdyś bardzo elitarne, silnie związane z zaangażowaniem techniki wojskowej, stały się egalitarne, a podstawowe ich wykorzystanie, to potrzeby przemysłu i tych grup, które dysponują wyobraźnią oraz określonymi zasobami. Co najważniejsze jednak, technologie podwodne i fotogrametria doświadczyły olbrzymiego skoku technologicznego, wprost do epoki cyfrowej, balansując na granicy prawie całkowitego wyeliminowania człowieka z całego procesu. Dotychczasowe

badania autorów wskazują jednoznacznie, że specyficzna część wspólna obszarów: technologii prac podwodnych, powierzchniowych badań nieniszczących w ramach diagnostyki technicznej oraz podwodnej fotogrametrii inżynieryjnej, jaką jest diagnostyka wizyjna obiektów podwodnych, ma potencjał do dalszych analiz, a w określonych przypadkach, także do praktycznego zastosowania wynikającego z potrzeb przemysłu [4, 8, 16, 19].

1. Diagnostyka wizyjna obiektów podwodnych

Diagnostyka wizyjna obiektów podwodnych definiuje badanie stanu technicznego obiektu jako wykonanie jego oceny jakościowej i ilościowej. W przypadku oceny jakościowej należy dokonać skutecznej identyfikacji obiektu, czyli na podstawie obrazu uwidocznionego w kadrze przyporządkować obiekt do odpowiedniej klasy. Z czego wynika konieczność znajomości klasyfikacji obiektów podwodnych z punktu widzenia diagnostyki technicznej. Ocena jakościowa powinna także umożliwić ujawnienie ewentualnych nieciągłości badanego obiektu, czyli jego uszkodzeń. A zatem efektem oceny jakościowej obiektu podwodnego powinno być jego zidentyfikowanie i stwierdzenie, czy jest uszkodzony, czy nie. Wielkość i rozmiar ewentualnego uszkodzenia oraz gabaryty badanego obiektu to efekty jego oceny ilościowej, co oznacza, że ta ocena ma umożliwiać stwierdzenie, jak bardzo obiekt jest uszkodzony. W wyniku prawidłowo wykonanej diagnostyki wizyjnej obiektu podwodnego uzyskujemy wszelkie informacje dotyczące jego klasyfikacji i uszkodzenia z poznaniem jego wymiarów, lub uwidocznionych w kadrze elementów składowych oraz możemy zwymiarować wielkości liniowe pozwalające na zdefiniowanie rozmiarów uszkodzeń. Informacje te umożliwiają dokonanie oceny stanu technicznego powierzchni obiektu i pozwalają na podjęcie decyzji o dalszym z nim postępowaniu. To znaczy o jego naprawie, dalszej eksploatacji lub wycofaniu z użytkowania.



Rys. 1.1 Diagnostyka wizyjna obiektów podwodnych jako część wspólna innych obszarów badań wg: [17]

W praktyce realizacji prac podwodnych, szczególnie ukierunkowanych na ocenę stanu technicznego obiektów znajdujących się w toni wodnej, często pojawiają się niejasności wynikają-

ce z nieuwzględniania różnicy znaczeń pomiędzy pojęciami diagnostyka i inspekcja. Źródłostów wyrazu „diagnostyka” wywodzi się od greckiego *diagnōstikós* i oznacza „umiejący rozpoznać” [27]. W ujęciu diagnostyki maszyn można przyjąć za B. Żółtowskim, że „istota diagnostyki technicznej polega na określaniu stanu maszyny (zespołu, podzespołu, elementu) w sposób pośredni, bez demontażu, w oparciu o pomiar generowanych sygnałów (symptomów) diagnostycznych i porównanie ich z wartościami nominalnymi” [27]. Natomiast wg St. Kluja „diagnostyka stanowi dział nauki zajmujący się zespołem przedsięwzięć (metod i środków), zmierzających do identyfikacji stanu technicznego eksploatowanych urządzeń, nazywanych obiektem diagnostyki” [6]. Można więc wnioskować, że diagnostyka jest nauką, której zadaniem jest (na drodze realizacji odpowiednich pomiarów) rozpoznanie stanu technicznego urządzenia w celu podjęcia decyzji o dalszym z nim postępowaniu. Przytoczone definicje wprost wyjaśniają różnicę pomiędzy pojęciem diagnostyka a pojęciem inspekcja. Łaciński wyraz *inspectiō* oznacza nadzór, kontrolę lub dozór i jako forma kontroli zewnętrznej urządzenia przez część badaczy jest uznawana jako nie w pełni naukowa [6]. W podręcznikach opisujących inspekcję podwodną definiowana jest ona jako „[...] dogodna forma nadzoru nad kontynuacją budowy obiektu podwodnego [...] i przeglądu jego struktury podczas eksploatacji” [2]. Tak więc z powyższego wynika, że zawsze tam, gdzie będziemy jedynie ograniczać się do oględzin zewnętrznych obiektu podwodnego, to należy mówić o wykonaniu jego inspekcji. Natomiast jeśli będziemy mierzyć jego parametry struktury w aspekcie realizowanej przez niego funkcji celu oraz procesu decyzyjnego i podejmowania kroków następczych w rozumieniu eksploatacji obiektu, należy mówić o jego diagnostyce. Z analizy literatury branżowej, szczególnie na podstawie aktów Polskiego Rejestru Statków, trudno jednak znaleźć wyraźne, spójne rozgraniczenie na inspekcję i diagnostykę. Zazwyczaj cały zbiór czynności, niezależnie od stopnia dokładności badań czy zaistnienia faktu rozpoznawania stanu technicznego w procesie diagnostyki, jest zaliczany do terminu – inspekcja. Rzadko również kwerenda literatury anglojęzycznej, pozostającej przez ostatnie dekady na bieżąco ze stanem wiedzy, a także wskazującej kierunki badań nieniszczących, pozwala na „niuansowanie” obu terminów. Kwerenda obejmująca tę tematykę wykazuje, że funkcjonują w zasadzie tylko dwa, wymiennie używane, terminy: *underwater visual inspection* (pol. podwodna inspekcja wizyjna), *survey* (pol. pomiar, badanie) wskazujące na ogólne, zewnętrzne oględziny. Pomimo że język angielski dysponuje również terminem *diagnostics* (pol. diagnostyka), który może być używany w obszarach, takich jak: medycyna, techniki informatyczne, produkcja przemysłowa lub szeroko rozumiane zarządzanie procesami, i opisuje poszukiwanie przyczyny problemów związanych z nieprawidłowym funkcjonowaniem obiektów będących centrum zainteresowania wyżej wymienionych obszarów, to nie jest on używany w kontekście badań obiektów podwodnych. Mimo to część zapisów można zakwalifikować jako odnoszące się stricte do diagnostyki w związku z szerokim użyciem terminu *assessment* (pol. ocena, szacowanie), wskazującym na prowadzenie ewaluacji pod kątem wspomnianej funkcji celu.

W latach osiemdziesiątych dwudziestego wieku towarzystwo klasyfikacyjne Lloyds oraz amerykańskie Naval Facilities Engineering Systems Command wprowadziło klasyfikację poziomów inspekcji podwodnej [3, 4, 19, 23]:

- **Level I:** Visual, tactile inspection/General Visual Inspection (Poziom 1 – inspekcja wizyjna i dotykowa/ogólna inspekcja wizyjna);
- **Level II:** Detailed inspection with partial cleaning (Poziom 2 – szczegółowa inspekcja z częściowym czyszczeniem obiektu);
- **Level III:** Highly detailed inspection with Non-Destructive Testing (NDT) (Poziom 3 – bardzo szczegółowa inspekcja z uwzględnieniem badań nieniszczących – NDT).

Najbliższym wypełnienia przytoczonej wcześniej definicji diagnostyki jest zbiór technik opisywanych jako drugi – szczegółowy, i trzeci, bardzo szczegółowy, poziom inspekcji podwodnej. Dodatkowo, poziom trzeci, poprzez odniesienie do badań nieniszczących (NDT), rozumianych jako jeden z elementów diagnostyki technicznej w procesie dozoru technicznego bezpośrednio wskazuje na badania wizyjne poprzez jedną z kategorii NDT – VT (visual testing, pol. badania wizyjne).

Odniesienia do badań wizyjnych obiektów podwodnych znajdują się między innymi w oficjalnych przepisach towarzystw klasyfikacyjnych (wspomniany wyżej Polski Rejestr Statków) w zakresie przeglądów podwodnych części kadłuba lub podwodnych części jednostek górnictwa morskiego (popularnie zakwalifikowywanych do tzw. przemysłu offshore). Wskazują one na możliwość użycia nurka lub zdalnie kierowanych pojazdów podwodnych do wykonania inspekcji podwodnej i w dalszym etapie także diagnostyki technicznej przy pomocy badań nieniszczących. Nie narzucają one konkretnych metod pomiarów, podkreślając raczej, że powinny one pozwolić na osiągnięcie satysfakcjonujących wyników i dostarczenie inspektorowi odpowiednich informacji do podjęcia decyzji o dalszej eksploatacji obiektu [8, 4, 19, 17].

1.1 Pojęcie obiektu podwodnego

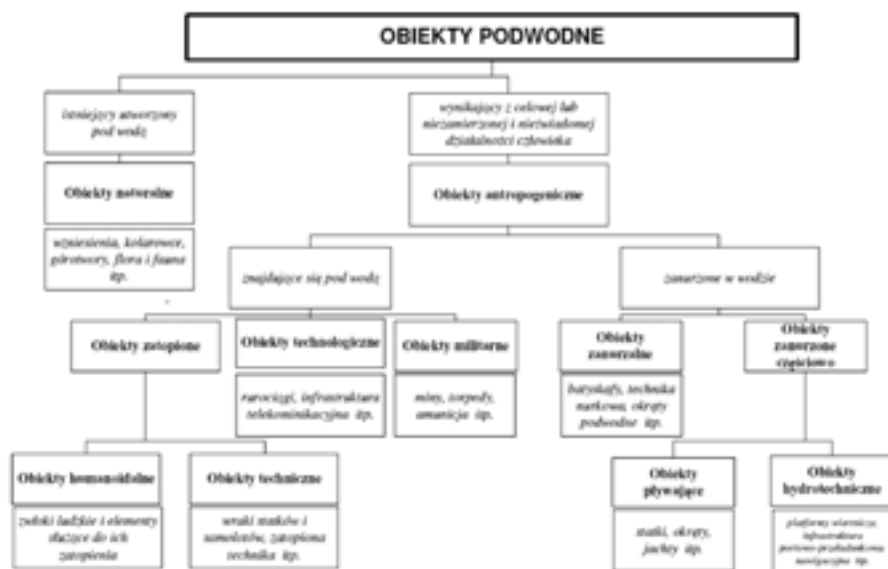
Zastosowanie punktu widzenia obszaru badań diagnostyki wizyjnej dla obiektów podwodnych powinno wyeliminować niejednoznaczności wynikające z różnego pojmowania terminu obiekt podwodny przez różne grupy interesu. Taki obiekt może być czymś innym dla nawigatorów morskich, biologów morza, załóg okrętów podwodnych, pławonurków-minerów, a czymś zupełnie innym dla inspektora towarzystwa klasyfikacyjnego nadzorującego badania infrastruktury przesyłowej. Z tych powodów definicja obiektu podwodnego z punktu widzenia ich diagnostyki powinna być zawężona. Podstawowa definicja obiektu podwodnego jako „...przedmiotu, który istnieje pod wodą, został tam utworzony i tam przebywa lub znajduje się tam, bo został zanurzony”, jak zaproponowano w 2009 [13], wciąż jest aktualna dzięki swojej pojemności i stanowi punkt wyjścia dla dalszych, bardziej szczegółowych rozgraniczeń. Na Rys. 1.2 przedstawiono ogólną klasyfikację obiektów podwodnych [13]. Propozycja zakłada podział znajdujących się w wodzie na naturalne, czyli istniejące pod wodą – tam utworzone bez ingerencji człowieka – i ten typ obiektów nie jest przedmiotem zainteresowania diagnostyki technicznej, także diagnostyki wykonywanej metodami wizyjnymi. Obiekty te są badane,

ale nie w ujęciu związanym z oceną stanu technicznego. Drugim sztandarowym typem obiektu jest antropogeniczny obiekt podwodny, który jest konsekwencją działalności człowieka. Obiekty antropogeniczne jak najbardziej znajdują się w obszarze zainteresowań podwodnej diagnostyki wizyjnej. Aczkolwiek kategoria obiektów naturalnych może być nierozdzielnie, nomen omen, zrośnięta z obiektami antropogenicznymi w momencie, gdy będzie stanowiła warstwę obrostu organicznego na powierzchni badanego obiektu antropogenicznego. W określonych przypadkach, na przykład, gdy stworzony model 3D obiektu obrazować będzie także nagromadzenie obrostu. Obrost ten może stać się obiektem badań z zakresu biologii morza, nie będzie jednak sam w sobie przedmiotem diagnostyki technicznej. Przeważająca liczba podkategorii obiektów antropogenicznych w proponowanym podziale jest spójna z przedmiotem diagnostyki wizyjnej, a więc z obiektami technicznymi. Co oznacza, że charakteryzują się cechami ogólnymi, takimi jak [13]:

- określone przeznaczenie (zbiór zastosowań),
- zdolność do ulegania uszkodzeniom oraz posiadanie możliwości ulepszenia,
- możliwość celowego wykorzystania przez człowieka,
- przechodzenia w trakcie swojego istnienia czterech kolejnych faz: wartościowania, konstruowania, wytwarzania i eksploatacji,
- posiadania możliwości niesienia zagrożeń dla człowieka lub środowiska.

Współcześnie dostępne i opisane w dalszych częściach niniejszego opracowania metody diagnostyki wizyjnej obiektów podwodnych, z odpowiednimi adaptacjami do specyficznych sytuacji, powinny zatem pozwolić wypełnić stawiane przed nimi zadania z zakresu pozyskania informacji przestrzennej niezależnie od kategorii badanego obiektu, co może udowodniać dużą uniwersalność i interoperacyjność danej metody pomiarowej. A jednak, jak wykazano w [13], nie każdy z antropogenicznych obiektów podwodnych będzie sensu stricto przedmiotem diagnostyki wizyjnej takich obiektów. W specyficznym ujęciu diagnostyki wizyjnej obiektów podwodnych, obiekty należące do klasy obiektów zanurzalnych, czyli pojazdy głębinowe itp. nie będą stanowiły przedmiotu badań dla diagnostyki wizyjnej w odniesieniu do obiektów podwodnych. W tym konkretnym pojęciu obiekty te stanowią środek diagnostyki, czyli służą do jej realizacji. W ujęciu ogólnie pojętej diagnostyki technicznej są jej przedmiotem (obiektem badań), ale w odniesieniu do wizyjnego badania obiektów podwodnych są środkiem (narzędziem do badania).

Z powyższego wynika, że obiekt podwodny rozumiany jako przedmiot diagnostyki wizyjnej, jest obiektem technicznych o określonych cechach, który może być badany w aspekcie realizowanej przez niego funkcji celu (przeznaczenia) oraz posiada parametry pozwalające na wartościowanie jego przydatności za pomocą skwantyfikowanych wskaźników. Przykładowo wysokość wolnej wody nad obiektem, stopień skorodowania, stopień ubytku laminatu osłaniającego lub kąt i wielkość uszczerbku płyta śruby (przykładowo Rys. 1.3). Dla obiektów z klasy technologicznej, czyli podwodnych elementów infrastruktury telekomunikacyjnej, tzn. podmorskich kabli lub rurociągów, takimi parametrami jest szczelność, stopień skorodowania po-

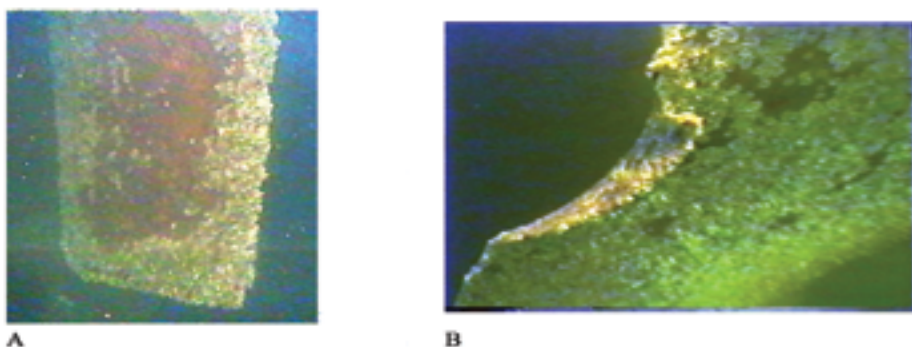


Rys. 1.2 Zaproponowany podział na kategorie obiektów podwodnych wg: [13]

wierzchni, stan powierzchni konstrukcji zabezpieczającej itp. Kontrowersyjnym może wydawać się przypisanie do obszaru diagnostyki wizyjnej obiektów podwodnych uwidocznionych na Rys. 1.2 jako obiekty pływające. W tym przypadku chodzi o podwodną część kadłuba jednostki pływającej, która w zasadzie poza okresem dokowania znajduje się cały czas w środowisku wodnym i tam podlega okresowym badaniom stanu technicznego. Podobnie w przypadku obiektów hydrotechnicznych, jak na przykład elektrownie wodne (Rys. 1.4), niektóre ich części stanowią przedmiot diagnostyki wizyjnej obiektów podwodnych i wymagają cyklicznych kontroli stanu technicznego zgodnie z obowiązującym w kraju prawem [24].

2. Metody inspekcji i diagnostyki wizyjnej obiektów podwodnych

Metody pomiarów wizyjnych stosowane w inspekcji i diagnostyce wizyjnej obiektów podwodnych są specyficzne i obarczone wieloma obostrzeniami wynikającymi przede wszystkim z warunków środowiska, w jakich te pomiary są realizowane. Trudnością jest fakt umiejscowienia badanego obiektu w toni wodnej. W zależności od głębokości posadowienia obiektu można do niego dotrzeć za pomocą ekipy nurkowej albo z wykorzystaniem urządzeń telesterowanych wyposażonych w sprzęt telewizyjny lub fotograficzny. Oznacza to, że podstawową trudnością podczas realizacji tych przedsięwzięć jest dotarcie do obiektu i bardzo częste działanie z dystansu bez bezpośredniego kontaktu diagnosty z badanym obiektem. Co jest specyficzną cechą badań wizyjnych obiektów podwodnych, w porównaniu z tego typu badaniami innych obiektów technicznych.

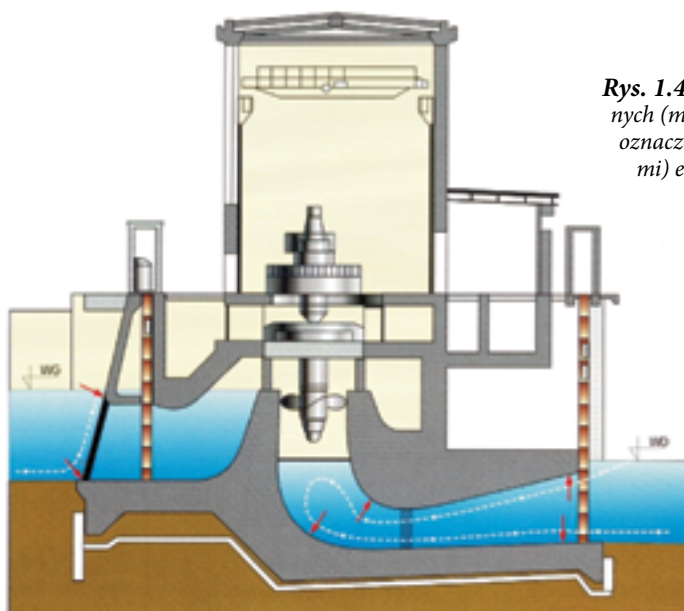


Rys. 1.3 Przykłady wizyjnego badania obiektów podwodnych

A – ubytek laminatu płetwy sterowej,

B – uszkodzenia śruby napędowej

[archiwum KTPP AMW]



Rys. 1.4 Zakres oględzin podwodnych (miejsca badań podwodnych oznaczono czerwonymi strzałkami) elektrowni wodnej niskiego spadku [24]

Zanim wykonamy badanie obiektu podwodnego, jawi się problem z zastosowaniem odpowiedniej technologii podwodnej pozwalającej nam na dotarcie do obiektu. De facto jest to problem wyboru odpowiedniego wykonawcy: nurka, zdalnie kierowanego pojazdu podwodnego lub w przypadku obiektu o znanym, regularnym posadowieniu, autonomicznego pojazdu podwodnego. Jest to problem z obszaru technologii prac podwodnych, gdzie w szeregu dotychczasowych opracowań wymieniono zalety wynikające z użycia technologii bez udziału nurka, wykluczających najsłabsze ogniwo – człowieka [25, 19]. Głównym „proble-

mem” człowieka są jego biologiczne ograniczenia wynikające z funkcjonowania pod ciśnieniem i wszystkich związanych z tym specyficznych zagadnień opisywanych szeroko w wielu pracach z pogranicza medycyny nurkowej i technologii prac podwodnych [18]. Człowiek operujący niejako na przestrzeni dwóch ośrodków o diametralnie różnych charakterystykach – powietrza i wody, musi uwzględnić szereg różnych elementów, w tym: czasowe ograniczenia warunkujące transfer pomiędzy tymi ośrodkami. Użycie pojazdu podwodnego, przy zastosowaniu odpowiedniego, kombinowanego podejścia, łączenia kilku metod badań i prowadzenie go przez doświadczonego operatora ma szansę być równie skuteczne, jak posłanie pod wodę odpowiednio przygotowanego nurka. Niemniej jednak rozważania dotyczące wyboru optymalnego sposobu badania powinny wziąć pod uwagę dużo więcej czynników, nie tylko środowiskowych.

Następnym problemem ściśle związanym z badaniami wizyjnymi jest praca w warunkach chronicznego niedoboru dostępnego światła, a więc fali będącej ni mniej, ni więcej, nośnikiem informacji o badanym obiekcie. Intensyfikacja problemu może zależeć nie tylko od głębokości i selektywnego pochłaniania światła przez kolumnę wody, ale także od lokalizacji geograficznej, w której badanie ma być przeprowadzane. Zawartość suspensoidów w toni wody, wpływająca nie tylko na masę pochłaniania promieniowania, ale również na jej koloryt, może spowodować, że niektóre metody takie jak skaning laserowy z użyciem np.: zielonej części spektrum pasma widzialnego, będą musiały być dostosowane, aby różnica radiacji fali świetlnej a promieniowania tła była większa. Podobnie dla technik pasywnych, konieczne będzie zadbanie o odpowiednio mocne, ale jednorodne doświetlenie obiektu światłem sztucznym, tak by algorytmy poszukujące cech wspólnych na kolejnych obrazach nie zostały zmyłone poprzez różnice w oświetleniu. Ogólnie rozumiana nieprzejrzystość toni wodnej wynikająca z zawartości suspensoidów może skutecznie uniemożliwić prowadzenie jakiejkolwiek diagnostyki wizyjnej obiektów podwodnych. W niektórych przypadkach problem może stanowić obrost obiektu. W tym przypadku przed rozpoczęciem badania konieczne może być kompleksowe odczyszczenie obiektu, tak by obiektem diagnozowanym była faktycznie jego struktura, a nie jego obrost. Ten ostatni w określonych przypadkach może stać się obiektem podlegającym pomiarowi (np.: objętości – znając powierzchnię odniesienia chociażby z planów konstrukcyjnych). W celu wyliczenia zwiększenia obciążeń konstrukcyjnych wynikających z wagi obrostu lub większych sił falowania/prądów morskich przenoszonych na powiększony, przez obrost, obrys obiektu podwodnego. Dodatkowo, zbliżenie i dotarcie do niektórych elementów, na przykład takich, które wymagałyby manewrowania pojazdem podwodnym, tak by jego sensory optyczne zostały skierowane do położenia zenitalnego, może okazać się wymagające. W przypadku metod wizyjnych elementy konstrukcyjne mogą również stanowić źródło cienia, który uniemożliwi wiązkę światła objęcie fragmentu obiektu, a co za tym idzie, także uniemożliwić jego pomiar. Układ takich elementów może wymusić bardzo skomplikowane manipulowanie aparatem pomiarowym, tak by obiekt został prawidłowo ujęty w kadrze i był w optymalnej odległości przedmiotowej.

2.1 Metody inspekcji obiektów podwodnych

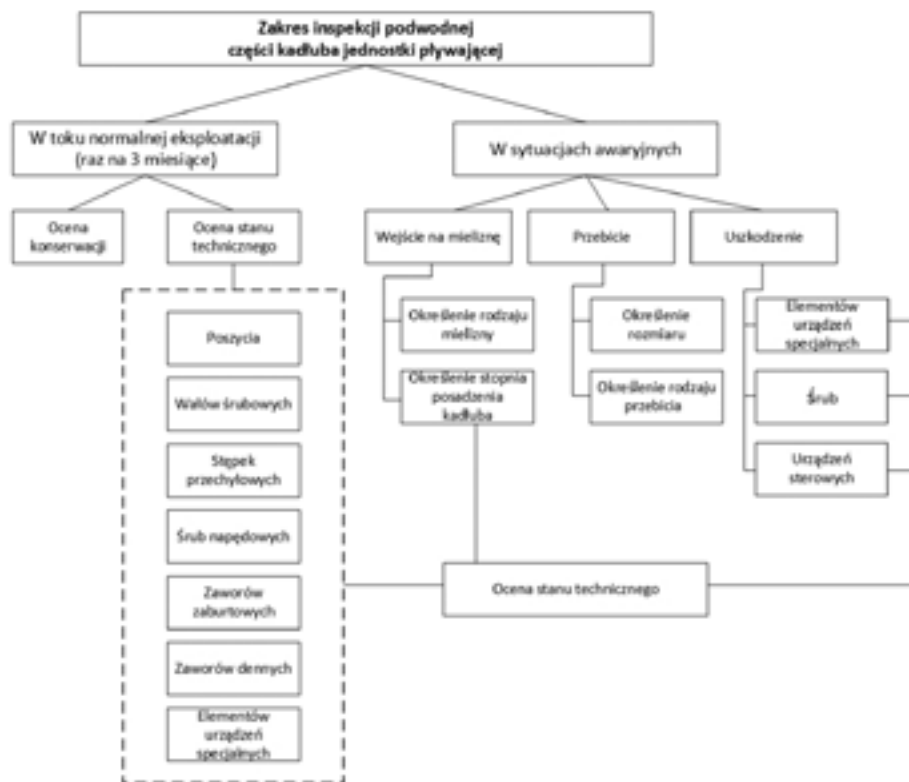
Na potrzeby inspekcji obiektów podwodnych wykorzystywane są głównie oględziny wzrokowe oraz techniki fotografii oraz filmowania (Rys. 1.5). W przypadku oględzin wzrokowych prowadzonych przez nurka, można się opierać wyłącznie na zmysłach i doświadczeniu operatora. Wskazane jest, by prace te były prowadzone niezależnie przez dwie osoby. Przy czym tzw. „dobra praktyka nurkowa” zakłada, że pierwsze badanie wykonywane jest przez nurka o mniejszym doświadczeniu niż drugie. Ma to na celu obiektywizację badań i sporządzanego raportu, zdawanego inspektorowi w formie pisemnej po zakończeniu robót, ale także poprzez raport ustny przy zachowaniu dwukierunkowej komunikacji głosowej podczas wykonywania inspekcji pod wodą. Sporządzanie zapisu meldunków nurka zmierzać ma do uzupełnienia ewentualnych braków w raporcie końcowym. W odróżnieniu od relacji ustnej czy pisemnej nurka, materiał wizualny jest rejestrowany w pamięci sprzętu foto/wideo i/lub przekazywany na bieżąco na powierzchnię, gdzie jest analizowany przez specjalistów poszczególnych dziedzin (np.: kadłubowców, napędu, ratownictwa morskiego i prac podwodnych). Należy również założyć, że materiał foto/wideo jest z natury rzeczy obiektywny. Jednak jego analiza po wynurzeniu może nosić znamiona subiektywizmu i w związku z tym powinna być także prowadzona niezależnie przez dwie osoby (podobnie do zdublowanego raportu nurka).



Rys. 1.5 Podział metod inspekcji wizyjnej obiektów podwodnych

Wszystkie pokazane na rysunku powyżej metody można uznać za wypełniające znamiona pierwszego poziomu inspekcji wizyjnej (Level I General Visual Inspection) – zgodnie z [4, 19, 23]. Działania na tym poziomie szczegółowości mogą potwierdzić, czy zastana sytuacja pod wodą odpowiada np.: planom konstrukcyjnym, wykryć oczywiste poważne uszkodzenia lub pogorszenie stanu z powodu przeciążeń (kolizje, lód, inne działania np.: dywersja), poważnej korozji lub rozległego wzrostu biologicznego. Inspekcja wizyjna może zapewnić wstępny wkład do strategii dalszej diagnostyki technicznej. Ten rodzaj inspekcji zazwyczaj nie wymaga czyszczenia żadnych elementów konstrukcyjnych i dlatego może być przeprowadzony znacznie szybciej niż diagnostyka. Obserwacje te prowadzone są na określonej powierzchni zewnętrznej obiektu podwodnego lub jego całości,

niezależnie od tego, czy jest to budowla hydrotechniczna, obiekt posadowiony na dnie czy obiekt pływający [21].



Rys. 1.6 Zakres inspekcji podwodnej części kadłuba jednostki pływającej [5]

Prace inspekcyjne wbrew pozorom są wykonywane dość często. Wykonywane są podczas oceny klasyfikacyjnej statków lub przed ich remontem. W Marynarce Wojennej RP obligatoryjnie są realizowane raz na trzy miesiące. W tym przypadku obowiązujące procedury przewidują realizację inspekcji podwodnej części kadłuba podczas normalnej eksploatacji oraz w stanach awaryjnych, takich jak wejście jednostki na mieliznę, przebiecie kadłuba lub uszkodzenia elementów podkadłubowych (Rys. 1.6). W zależności od sytuacji ich zakres jest zróżnicowany, ale w większości przypadków polega na ocenie stanu technicznego w zakresie jakościowej – czyli czy badana struktura jest uszkodzona, czy nie. Czynności te, ze względu na niewielką głębokość operacyjną, mogą być realizowane zarówno za pomocą ekipy nurkowej, jak i zdalnie sterowanego pojazdu podwodnego [5]. W przypadku pojazdu zdalnie sterowanego zastosowanie ma odpowiednia metodyka badania związana z odmienną trajektorią pojazdu w strefie podkadłubowych elementów napędu głównego jednostki, gdzie dokonuje się umownego podziału kadłuba na część dolną i górną, a granicą podziału jest obłó.

2.2 Metody diagnostyki wizyjnej obiektów podwodnych

Diagnostyka wizyjna obiektów podwodnych ma na celu dostarczyć dużo więcej szczegółowych informacji i parametrów badanego obiektu (wymiarów, powierzchni, objętości, parametrów struktury), a przede wszystkim stanowić wkład do oceny obiektu pod kątem dalszej eksploatacji. Utożsamiane z poziomem II i III działania są kompletnymi, szczegółowymi badaniami wybranych zespołów lub podzespołów obiektów podwodnych czy krytycznych elementów budowli hydrotechnicznych, ukierunkowanymi nie tylko na wykrycie, ale także na opisanie uszkodzonych lub zdegradowanych obszarów, które mogą być ukryte pod warstwami obrotu organicznego. Biorąc pod uwagę czasochłonność procesów czyszczenia, diagnostyka może ograniczyć się do krytycznych obszarów konstrukcji lub w szczególnych przypadkach całości konstrukcji, co może być konieczne do określenia ogólnego stanu obiektu. W przypadku bardzo dokładnej diagnostyki (na poziomie III), badania mają na celu wykrycie trudno zauważalnych uszkodzeń np.: utraty przekroju poprzecznego, wyboczeń, oznak płynięcia materiału czy rozmiaru rys/pęknięć materiału lub spoin, które mogą być opisane wiarygodnie wyłącznie przy osiągnięciu dokładności milimetrowych. Badanie na poziomie III prawie zawsze wymaga uprzedniego oczyszczenia. Zastosowanie metod diagnostyki wizyjnej na poziomie III może zostać ograniczone do kluczowych obszarów strukturalnych, które mogą być podejrzewane o wystąpienie usterki, lub do obszarów strukturalnych, które mogą być reprezentatywne dla całej konstrukcji [19]. Szczegółowe badania wizyjne mogą stanowić podstawę do podjęcia jeszcze bardziej szczegółowych oględzin z wykorzystaniem innych metod badań nieniszczących pozwalających na badanie, nie tylko objawów występujących na powierzchni, ale także struktury samego materiału. Informacje te mogą wskazać trzy kierunki dalszego postępowania względem badanej konstrukcji: czy dany obiekt podwodny może być eksploatowany dalej w zakresie parametrów projektowych, czy należy podjąć działania naprawcze na miejscu (lokalne wzmocnienia konstrukcji, ograniczenie parametrów eksploatacyjnych, inne działania naprawcze) lub w ostateczności czy wycofać konstrukcję z eksploatacji, bowiem jej stan techniczny uległ degradacji niekwalifikującej jej do naprawy.

Metody diagnostyki w proponowanym podziale (Rys. 1.7) ułożono zarówno w zależności od możliwości uchwycenia dwóch-trzech wymiarów, ale także ze względu na zastosowaną technologię zbierania danych przestrzennych.

Metodą dwuwymiarową jest metoda wzorca świetlnego opisywana ze szczegółami w opracowaniach wieńczących projekt badawczy prowadzony w Katedrze Technologii Prac Podwodnych AMW [17, 14, 26, 15]. Generalnie metoda ta polega na naświetlaniu na badany obiekt wzorca laserowego sprzężonego z osią optyczną kamery, w fazie obróbki zdjęć zmiana geometrii tego wzorca służy do wymiarowania obiektów uwidocznionych w kadrze [15]. Metody trójwymiarowe podzielono ze względu na główną użytą technologię obrazowania – laser lub aparat fotograficzny/fotogrametryczny. Nie oznacza to, że w technologiach triangulacyjnego skaningu laserowego nie występuje aparat (kamera) rejestrujący wiązkę światła laserowego

nałożoną na obiekt, ale z gruntu pełni on rolę towarzyszącą przy skanerze liniowym [25]. W określonych przypadkach, na przykład przy wykorzystaniu lasera o chaotycznie modulowanej intensywności zaproponowano układ bez kamery [22]. Niemniej jednak dotychczasowe próby wykonywano przede wszystkim na zasadzie pomiaru czasu powrotu wiązki (tzw. ToF – j. ang. Time of Flight) – Rys. 1.8 – oraz metod triangulacyjnych.



Rys. 1.7 Podział metod diagnostyki wizyjnej obiektów podwodnych

W rozwiązaniach triangulacyjnych laser, czujnik przechwytyjący falę świetlną i obiekt są ustawione w trójkącie, stąd wyróżnienie technik jako triangulacyjny skaning laserowy. W zależności od zastosowanego typu lasera, długości fali świetlnej wykorzystanej do pomiaru czy rozdzielczości detektora dokładność tego typu metod oscyluje od 5 mm–4,5 cm, przy rozdzielczości od 1 mm–1 cm [10]. Rodzaj zastosowanej metody skaningu w zasadzie zależy od charakterystyki wykonywanego zadania pomiarowego. Decyzja, czy powinien być to laser typu ToF, czy triangulacyjny, jest kompromisem pomiędzy dokładnością pomiaru a zasięgiem. Laser ToF jest bardziej odpowiedni dla odległości do kilkunastu metrów, natomiast czuj-

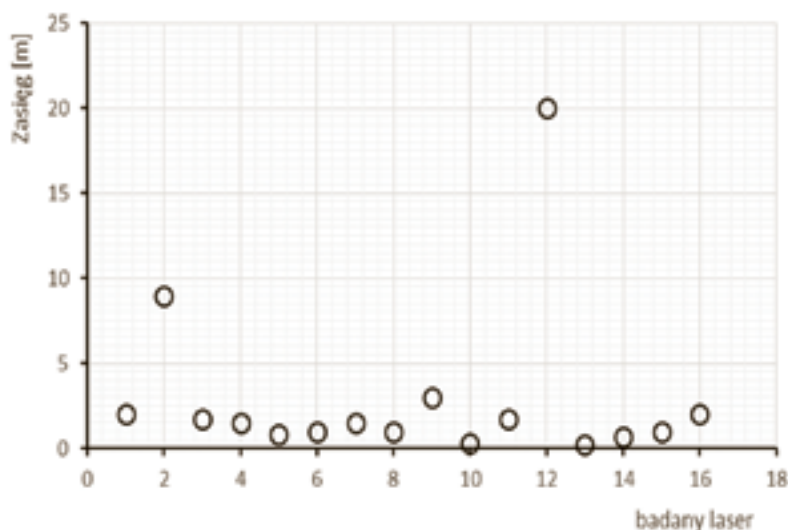


Rys. 1.8 Podwodny skaner typu ToF firmy NewtonLabs [11]

nik triangulacyjny osiąga podobną dokładność na o wiele mniejszych zasięgach [10, 1]. Przykładowe zasięgi podwodnych skanerów laserowych przedstawiono na Rys. 1.9.

Jednym z podstawowych wyzwań pomiarów wizyjnych pod wodą za pomocą skanerów laserowych jest mętność wody. Doniesienia naukowe wskazują, że wraz ze wzrostem zmętnienia wody pogarsza się dokładność czujników laserowych związana z trudniejszym wykrywaniem liczby punktów, co w rezultacie prowadzi do niepełnej rekonstrukcji 3D badanej powierzchni [1, 10].

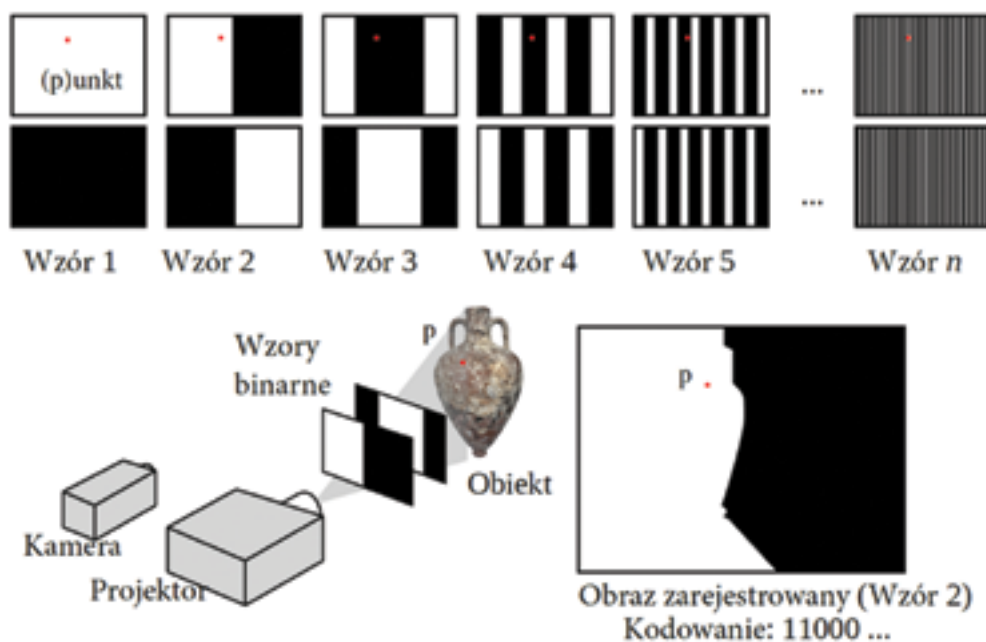
W metodach oznaczonych jako obrazowe to kamera pełni swoją oczywistą rolę detektora światła naturalnego czy sztucznego (po oświetleniu lub doświetleniu obiektu poprzez reflektory lub rzutnik w przypadku światła strukturalnego), a obrazy po odpowiednich przekształceniach i złożeniu pozwalają na odtworzenie cech trójwymiarowych obiektu i wygenerowanie modelu 3D w formie punktowej, który z kolei pozwala na przeprowadzanie pomiarów pomiędzy punktami wygenerowanej na podstawie pikseli obrazów – chmury punktów. Obrazowe metody aktywne wymagają oświetlenia obiektu przy pomocy światła strukturalnego, najczęściej białego (rzadziej odcieni szarości lub laserowego) w postaci specjalnego, zmieniającego się pomiędzy kolejnymi ujęciami wzoru (umożliwiającego binarne kodowanie) – Rys. 1.10. Na podstawie kolejnych kodów, które zostają przypisane punktowi możliwe jest określenie jego położenia względem kamery i dalsze opracowania. Deklarowa-



Rys. 1.9 Rozkład przykładowych zasięgów podwodnych skanerów laserowych wg [10, 1]

na dokładność dla tego typu metod to 1 mm–1 cm przy rozdzielczości od 0,23 mm–1 cm [1]. Należy jednak zaznaczyć, że tego typu metoda może być czasochłonna ze względu na tempo wyświetlania i rejestrowania kolejnych kodów binarnych.

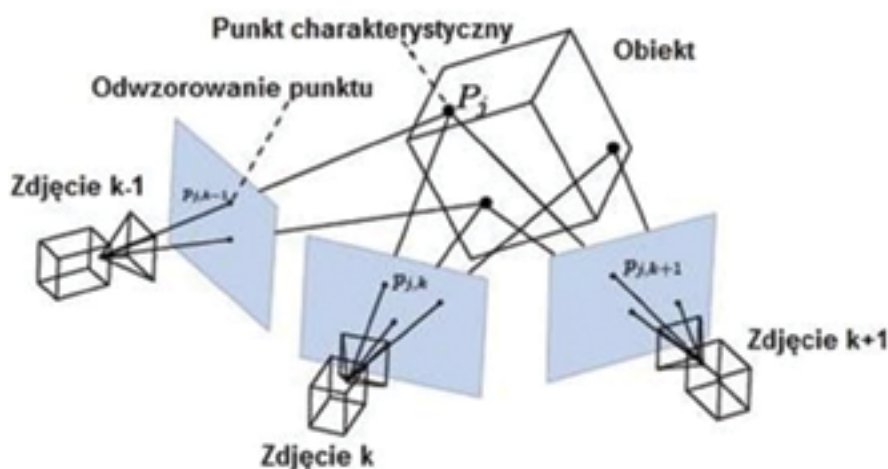
Obrazowe metody pasywne wykorzystują zasady trygonometrii znane i dopracowane wraz z rozwojem technologii fotogrametrycznych. Metoda stereoskopowa wymaga układu pomiarowego zbudowanego z dwóch kamer pomiarowych i wykonania dwóch, synchronicznych zdjęć w każdym położeniu układu. Następnie kolejne stereopary są łączone np.: z wykorzystaniem algorytmu GraphSLAM – symultanicznej lokalizacji i mapowania, wykorzystującego rzadkie matryce informacji (cech ekstrahowanych ze zdjęć) i poszukiwanie współzależności obserwacji na kolejnych obrazach [10]. Jednocześnie jest to metoda pozwalająca na dokładne określenie skali obiektów na podstawie każdej stereopary. Deklarowana dokładność dla metod stereoskopowych wynosi 1,5-2 cm [10, 12].



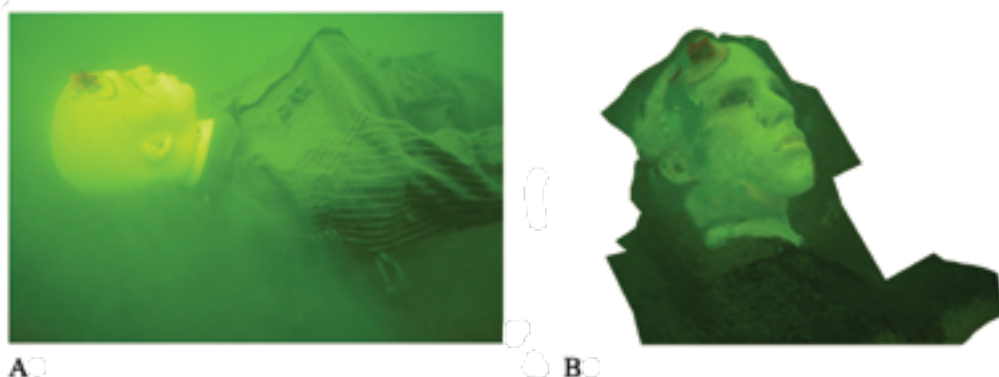
Rys. 1.10 Zasada odwzorowania przy pomocy światła strukturalnego wg [1]

Jedną z nowszych pasywnych metod obrazowania jest metoda trójwymiarowego modelowania ze zdjęć dwuwymiarowych, w uproszczeniu nazywana metodą modelowania ze zdjęć. Jej popularność wynika przede wszystkim z faktu możliwości zastosowania dowolnego wysokorozdzielczego aparatu fotograficznego oraz odpowiedniego oprogramowania. Metoda bazuje na konwersji zdjęć płaskich w model trójwymiarowy, co bazuje na technologii Structure from Motion (SfM). Algorytm realizuje zbiór następujących po sobie etapów składających się z korelacji obrazów dwuwymiarowych, identyfikacji homologicznych punktów charakte-

rystycznych na nakładających się na siebie obrazach oraz monitoring i rejestrację ich położenia na kolejnych obrazach w serii (minimum 3 jak na Rys. 1.11). Piksele zdjęć stanowią najmniejszy dyskretny element obrazowy i to między nimi sprawdzany jest w efekcie stopień zgodności cech, szacowany przez algorytmy obliczeniowe [7]. Kolejność algorytmów jest ściśle określona i rozpoczyna się od zidentyfikowania punktów kluczowych. Zakończenie czynności związanych z identyfikacją punktów i odnalezienie funkcji łączących ich na zdjęciach stanowi podstawę do określenia elementów orientacji zewnętrznej zbioru zdjęć wybranych do opracowania modelu 3D. Oprócz wyrównania współrzędnych punktów wiążących, obliczenia orientacji zewnętrznej zdjęć, wyznaczona zostaje wartość dystorsji radialnej dla kamery niemetrycznej [7].



Rys. 1.11 Zasada działania technologii Structure from Motion na podstawie [9]



Rys. 1.12 Wykorzystanie technologii Structure from Motion (SfM) do oględzin podwodnego miejsca znalezienia zwłok – badania w ramach projektu POIR.01.01.01.-00-0997/18 realizowanego w Katedrze Technologii Prac Podwodnych AMW. Zdjęcie A – model fizyczny zwłok z inscenizowaną raną postrzałową skroni. Zdjęcie B – model 3D fragmentu imitowanych zwłok z raną postrzałową skroni wykonany technologią SfM – archiwum KTPP AMW

Podsumowanie

W materiale przedstawiono miejsce i rolę diagnostyki wizyjnej w obszarze nauk technicznych takich jak diagnostyka techniczna, podwodna fotogrametria inżynierska i technologia prac podwodnych. Wskazano, że ze względu na sposób i cel realizacji pomiarów oraz środowisko ich wykonywania jest częścią wspólną wyżej wymienionych dyscyplin. Szczegółowo opisano obszar zainteresowania diagnostyki wizyjnej obiektów podwodnych oraz dokonano jej podziału na inspekcję i diagnostykę wizyjną. Podkreślono, że działania te polegają na ocenie stanu technicznego powierzchni obiektów podwodnych w zakresie jakościowym i ilościowym. Omówiono pojęcie obiektu podwodnego jako przedmiotu diagnostyki wizyjnej oraz scharakteryzowano podstawowe metody pomiarów specyficzne dla procesu inspekcji i diagnostyki.

Jak wynika z przeprowadzonej analizy, diagnostyka wizyjna obiektów podwodnych jest ważnym elementem obsługi profilaktycznej obiektów technicznych znajdujących się w wodzie. Pozwala na dokonanie oceny ich stanu technicznego, za pomocą czego możliwe jest podejmowanie decyzji o dalszym postępowaniu z badanym obiektem. Obecnie wykorzystywane metody diagnostyki wizyjnej obiektów podwodnych pozwalają na uzyskanie informacji wizyjnej o badanych powierzchniach za pomocą różnych rozwiązań i środków technicznych. Od prostych i tradycyjnych metod oglądu wzrokowego dokonanego przez nurka po bardziej skomplikowane metody wykorzystujące, na przykład laserowe skanery podwodne. Metody te charakteryzują się zatem różnym poziomem technicznego skomplikowania środków pozwalających na realizację badań. W celu usprawnienia i ograniczenia kosztów realizacji badań wydaje się logicznym poszukiwanie rozwiązań, które będą relatywnie tańsze, ale nie mniej skuteczne. Takim rozwiązaniem wydaje się metoda modelowania ze zdjęć. Po pierwsze, jej zastosowanie nie wymaga wykorzystania skomplikowanego sprzętu fotograficznego, zdjęcia można wykonać za pomocą standardowych urządzeń. Po drugie, metoda może być z powodzeniem zastosowana zarówno przez nurków, jak i za pomocą środków telesterowanych, a to znacząco poszerza jej głębokość operacyjnego wykorzystania. W sumie podstawową barierą stosowania metody, jest koszt zakupu odpowiedniego oprogramowania do obróbki fotogramów. Metoda ta dość dobrze sprawdza się w zastosowaniach fotogrametrii bliskiego zasięgu w warunkach naziemnych, dotychczas nie była jednak szeroko rozpatrywana w kontekście inżynierskim w pracach podwodnych związanych z oceną stanu technicznego obiektów podwodnych. Stanowi to przesłankę do realizacji szeregu badań mających na celu zweryfikowanie użyteczności tej metody w zastosowaniach inżynierskiej diagnostyki wizyjnej obiektów podwodnych.

BIBLIOGRAFIA

1. Castiglione M., Palomer A., Forest J. & Ridao P.: *State of the art of underwater optical 3D Scanners*. Sensors 2019 Nr 19
2. Hoywood M., Matters N.: *Underwater Inspection*. Center for Underwater Technology. USA, 1986
3. International Association of Certification Societies: *Procedural Requirements for Service Suppliers* Z17. London, 2008
4. Kelly, S W. *Underwater Inspection Criteria*. Port Hueneme, California. 1999
5. Kluczyk M.: *Wizyjna metoda oceny stanu technicznego podwodnej części kadłuba jednostki pływającej, praca dyplomowa magisterska pod kierownictwem A. Olejnika*, AMW, Gdynia, 2007
6. Kluj S.: *Diagnozowanie urządzeń okrętowych*. WSM, 2000
7. Kwoczyńska B., Michałowska K., Kuras P., Głowienka E., Jankowicz B., Mikrut S., Moskal A., Piech I., Strach M., & Sroka J.: *Fotogrametria i skaning laserowy w modelowaniu 3D*: Wyższa Szkoła Inżynierijno-Ekonomiczna, Rzeszów, 2015
8. Łukasiewicz, M. & Żółtowski, B.: *Diagnostyka drganiowa maszyn*. Bydgoszcz: Wydaw. Nauk. Inst. Technologii Eksploatacji – PIB, 2012. ISBN 9788377891384
9. Malisiewicz T.: Tombone's Computer Vision Blog: The Future of Real-Time SLAM and Deep Learning vs SLAM. 2016. Online: <http://www.computervisionblog.com/2016/01/why-slam-matters-future-of-real-time.html>, [dostęp: 25.8.2016]
10. Massot-Campos M & Oliver-Codina G.: *Optical Sensors and Methods for Underwater 3D Reconstruction*. Sensors 15 grudzień 2015, T. 15, nr 12, s. 31525–31557
11. Newtonlabs (Praca zbiorowa) – broszura informacyjna
12. O'Byrne, Michael, Pakrashi, Vikram, Schoefs, Franck & Ghosh, Bidisha A. A comparison of image based 3D recovery methods for underwater inspections. W: 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, EWSHM 2014 – 2nd European Conference of the Prognostics and Health Management (PHM) Society
13. Olejnik A. *Klasyfikacja Obiektów Podwodnych*. Polish Hyperbaric Research. 2009, T. 2, nr 27, s. 57–66
14. Olejnik A.: *Badania systemu zobrazowania przestrzennego na podwodnym teście płaskim*. Polish Hyperbaric Research, 2008, T. 22, nr 1, s. 15–30
15. Olejnik A.: *Sposób diagnozowania powierzchni obiektów podwodnych z wykorzystaniem techniki wizyjnej*; Prawo ochronne na wynalazek Patent nr 231370 UP RP 2018
16. Olejnik, A. & et al.: *Ocena skuteczności diagnostyki wizyjnej podwodnej części kadłuba jednostki pływającej z wykorzystaniem metody wzorca świetlnego*. Etap 2. Praca Statutowa. Gdynia: Zakład Technologii Prac Podwodnych WME AMW, 2017
17. Olejnik, A.: *Metoda diagnozowania powierzchni obiektów podwodnych z wykorzystaniem systemu wizyjnego*. Gdynia: Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, nr 56/200. 2015
18. Olszański R. i inni: *Problemy Medycyny i Techniki Nurkowej*. Wyd. Okrętownictwo i Żegluga. Gdańsk, 1997

19. Outa, A., Diaz Ledezma, F., Amer, A., Abdellatif, F., Trigui, H., Patel, S., Obedan, A., Al Saiari, H. & Taie, I.: Survey of Underwater NDT Technologies for Offshore Assets. 7th Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition. Bahrain, 2015. s. 2–6
20. Polski Rejestr Statków: *Część I. Przepisy klasyfikacji i budowy statków morskich część i zasady klasyfikacji*. Gdańsk, 2020
21. Polski Rejestr Statków: Publikacja nr 52/P *Przegląd części podwodnej ruchomych jednostek górnictwa morskiego bez ich dokowania*. Gdańsk, 2001
22. Rumbaugh K., Bollt M., Jemison D. & Li Y.: A 532 nm chaotic lidar transmitter for high resolution underwater ranging and imaging. OCEANS 2013 MTS/IEEE – San Diego: An Ocean in Common. 2013, s. 2–3
23. Terence Browne M, Collins Thomas J, Garlich Michael J, O’Leary John E, Stromberg Daniel G & Heringhaus Katherine C.: Underwater Bridge Inspection (Manual), U.S. Department of Transport 2010
24. Wachowski W.: Zasady wykonywania przeglądów i badań podwodnych dla oceny stanu technicznego budowli piętrzących, IMiGW PIB Ośrodek Technicznej Kontroli Zapór Warszawa, 2013
25. Wojtowicz A & Stolarczyk K.: Triangular 3D Laser Scanning in Underwater Photogrammetry. Polish Hyperbaric Research, 2015, T. 52, nr 3
26. Zakład Technologii Prac Podwodnych. Sprawozdanie z realizacji pracy badawczej statutowej pk. FUGAS. *Ocena skuteczności diagnostyki wizyjnej podwodnej części kadłuba jednostki pływającej z wykorzystaniem wzorca świetlnego*. Gdynia. 2017
27. Żółtowski B.: *Podstawy diagnostyki maszyn*. ATR Bydgoszcz, 1996

STRESZCZENIE

W materiale przedstawiono miejsce i rolę diagnostyki wizyjnej obiektów podwodnych w obszarze nauk technicznych. Wykazano, że jest to część wspólna diagnostyki technicznej, podwodnej fotogrametrii inżynierskiej i technologii prac podwodnych. Omówiono różnicę pomiędzy diagnostyką a inspekcją podwodną. Scharakteryzowano metody diagnostyki i inspekcji, wskazano też kierunki badań.

SŁOWA KLUCZOWE: inżynieria mechaniczna, diagnostyka wizyjna obiektów podwodnych, automatyka i robotyka, technologia prac podwodnych.

SUMMARY

The paper presents the place and role of visionary diagnostics of underwater objects in the field of technical sciences. It is demonstrated that this is a common part of technical diagnostics, underwater engineering photogrammetry, and underwater work technology. The difference between diagnostics and underwater inspection is discussed. Methods of diagnostics and inspection are characterized, and directions for research are also indicated.

KEYWORDS: mechanical engineering, visionary diagnostics of underwater objects, automation and robotics, underwater work technology.