



Ocena jakości fotogrametrycznych zdjęć podwodnych na potrzeby archeologii

MICHALINA WOJTKOWSKA, ROMUALD KACZYŃSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji, Instytut Geodezji,
Zakład Teledetekcji, Fotogrametrii i Rozpoznania Obrazowego,
00-908 Warszawa, ul. gen. S. Kaliskiego 2,
michalina.wojtkowska@wat.edu.pl, romuald.kaczynski@wat.edu.pl

Streszczenie. Wykonanie prawidłowych i wartościowych pod kątem interpretacji podwodnych zdjęć cyfrowych do celów archeologicznych, ze względu na specyficzne warunki fotografowania, nie jest łatwe. Należy mieć na uwadze liczne ograniczenia charakterystyczne wyłącznie dla tego typu ośrodka obrazowania. Dlatego też Autorzy podjęli się próby opisu zmian jakości zdjęć fotogrametrycznych, które zachodzą w dwóch różnych ośrodkach fotografowania. W pierwszej kolejności przeanalizowano zdolność rozdzielczą kamery cyfrowej INTOVA IC500 oraz dokładność geometryczną pozyskanych obrazowań. Następnie określono, jak zmiana ośrodka fotografowania wpływa na rozdzielczość radiometryczną oraz odwzorowanie barw na analizowanych obrazach. W ostatnim etapie pozyskane obrazowania zastosowano w praktyce — do oceny stopnia zniszczeń obiektu archeologicznego, a także wykonano jego dokumentację w postaci rysunku wektorowego z dokładnością $m_{xy} = \pm 2$ piksele.

Słowa kluczowe: fotogrametria i teledetekcja, fotogrametria podwodna, rozdzielczość, zdolność rozdzielcza, archeologia podwodna

DOI: 10.5604/01.3001.0010.5388

1. Wstęp

Dane archeologiczne z natury są niekompletne, niejednorodne, nieciągłe i wymagają częstej aktualizacji i ewentualnych korekt. Ważne jest, aby na bieżąco tworzyć szczegółową dokumentację, która odzwierciedlać będzie ich stan faktyczny. Ma ona zwykle postać materiałów ikonograficznych (rysunki, szkice, fotografie) oraz tekstowych będących nieodłączną częścią archeologicznych prac badawczych.

Jednak nawet najbardziej precyzyjny rysunek jest tylko szacunkowym przedstawieniem dokumentowanego obiektu. Dlatego też konieczne jest gromadzenie i przetwarzanie dokumentacji w pełni metrycznej oraz jej profesjonalna interpretacja. Przełomowym wydarzeniem pozwalającym na tworzenie szerokiej dokumentacji podwodnych stanowisk archeologicznych było wynalezienie w 1943 roku przez Jacques'a-Yves'a Cousteau i Emile'a Gagnana akwalungu, który umożliwił pletwonurkom przebywanie pod wodą przez dłuższy czas. Pozyskane przez naukowców obrazy podwodne były kamieniem milowym w tej dziedzinie, aczkolwiek nie nadawały się do badań naukowych. Dlatego też w latach 60. XX wieku intensywnie dążono do tego, by zaadaptować naziemne metody fotogrametryczne i urządzenia pomiarowe do warunków podwodnych [4, 7, 17, 20]. Ze względu na fakt, że pod wodą niemożliwe było korzystanie z teodolitów czy niwelatorów, jedyną odpowiedzią spełniającą postawione kryteria były metody fotogrametryczne oparte na zdjęciach podwodnych [9, 13, 17, 25]. Od tego czasu zainteresowanie wykorzystaniem fotogrametrii i pomiarów akustycznych w archeologii podwodnej stale wzrastało [6]. W Polsce pionierami fotografii podwodnej byli W. Romer i R. Wojtusiak, którzy jeszcze przed II wojną światową wykorzystywali ją do obserwacji biologicznych prowadzonych w wodzie. Natomiast fotogrametrię podwodną w Polsce jako pierwsi zaczęli stosować L. Becker i R. Kaczyński (od 1970 r.), początkowo wykorzystując do badań proste obudowy wodoszczelne i wykonany na bazie dwóch aparatów Hasselblad 500 C/M stereofotogrametryczny zestaw podwodny [3]. W późniejszym okresie (1980 r.) na zlecenie Muzeum Morskiego w Gdańsku przeprowadzili oni rejestrację stereoskopową i ekspertyzę dotyczącą stanu wraku okrętu szwedzkiego „SOLEN” leżącego od dnia 28.11.1627 r. na dnie Zatoki Gdańskiej [2].

Obecnie zakres zastosowania fotogrametrii podwodnej jest bardzo rozległy — począwszy od badań na obiektach modelowych w warunkach laboratoryjnych do pomiarów obiektów naturalnych wymiarów, od badań prowadzonych na głębokościach od kilku do kilkudziesięciu metrów aż do badań na głębokościach dużych, wymagających zastosowania specjalnej aparatury głębinowej. Mierzone pod wodą obiekty mogą mieć zróżnicowane kształty, a zmiany będące przedmiotem pomiaru mogą przebiegać w różnym czasie. Ponadto ilość miejsca niezbędna do wykonania pomiaru jest ograniczona. W tych przypadkach metodą najefektywniejszą jest metoda fotogrametryczna. Daje ona możliwość otrzymania znacznej ilości informacji w bardzo krótkim czasie, w pełni nieinwazyjny sposób, często za pomocą urządzeń zdalnie sterowanych, nie ingerując w strukturę obiektu. Jednak z uwagi na znaczne osłabienie światła w wodzie należy zwykle skrócić odległość fotografowania, co implikuje zwiększenie liczby zdjęć koniecznej do wykonania opracowania. Dlatego też w celu zwiększenia fotografowanej powierzchni obiektu i zmniejszenia odległości fotografowania stosuje się obiektywy szerokokątne. W ostatnich latach można zauważyć znaczny wzrost zastosowania niskobudżetowych fotograficznych technik cyfrowych do wytwarzania szczegółowej i dokładnej

dokumentacji 3D odwzorowującej archeologiczne obiekty podwodne [5, 8, 12, 15]. Obecnie prowadzonych jest wiele badań wykorzystujących funkcje modelowania podwodnej przestrzeni w 3D z użyciem kompaktowych kamer cyfrowych do pozyskania danych, a następnie przetworzenia zdjęć w niemalże w pełni zautomatyzowany sposób [21]. Dzięki temu otrzymuje się trójwymiarowy model obiektu archeologicznego, którego poprawność można zweryfikować już w miejscu pomiarów [11]. Popularna jest również integracja różnych systemów pomiarowych oraz danych z nich pozyskanych do opracowania metrycznej podwodnej dokumentacji [10, 16, 22, 26].

Pozyskiwane zobrazowania podwodne cechują się zróżnicowaną szeroko pojętą jakością, której oceny dokonuje się poprzez opis różnego rodzaju rozdzielczości, a mianowicie: przestrzennej, radiometrycznej, spektralnej i czasowej [24].

W niniejszym artykule Autorzy skupiają się na analizie rozdzielczości przestrzennej, radiometrycznej oraz spektralnej zobrazowań podwodnych pozyskanych w warunkach laboratoryjnych oraz rzeczywistych. Motywowane jest to faktem, że do wykonania różnego rodzaju kompleksowych analiz, interpretacji pozyskanych danych oraz detekcji obiektów i zjawisk na pozyskanych zobrazowaniach konieczne jest uzyskiwanie możliwie jak najlepszych rozdzielczości [14].

2. Metodyka badań

Przy wykonaniu prawidłowych i wartościowych pod kątem interpretacji podwodnych zdjęć cyfrowych do celów archeologicznych należy mieć na uwadze liczne ograniczenia charakterystyczne tylko dla tego typu ośrodka obrazowania. Jednym z nich jest pozorne wydłużenie ogniskowej obiektywu. Spowodowane jest to tym, że woda działa jak soczewka, która „przybliża” fotografowany obiekt oraz pochłania bardzo dużo światła padającego na rejestrowany obiekt podwodny i odbitego od niego. Istotne jest również zjawisko „zanikania” barw wraz ze zwiększaniem głębokości oraz odległości fotografowania.

Dlatego też Autorzy podjęli się próby opisu zmian szeroko pojętej jakości zdjęć fotogrametrycznych, które zachodzą w dwóch ośrodkach fotografowania. Badaniom poddano podwodne i napowietrzne obrazy dwóch pól testowych. Pole testowe „A”, opracowane przez autora w 1975 roku, z naniesionymi znaczkami o różnej wielkości i kształcie oraz o znanych współrzędnych geodezyjnych pomierzonych za pomocą koordynatografu. Na powierzchni planszy znajduje się również test do badania zdolności rozdzielczej w formie grup czarno-białych pasków o stopniowo zmniejszającej się szerokości. Pole „B”, o wymiarach tożsamych z polem „A”, na swojej płaszczyźnie ma naniesionych kilka testów. Największy obszar zajmuje grupa do badania zdolności rozdzielczej, również w formie trzech kilkunastoelementowych grup pasków o zmniejszającej się szerokości. Ponadto tablica obejmuje kilka pól

w postaci klinów o skokowo zmniejszającej się wartości DN, co służy jako test do badania kontrastu oraz barwny test paskowy.

W pierwszej kolejności przeanalizowano zdolność rozdzielczą wykorzystanej kamery cyfrowej INTOVA IC500 oraz dokładność geometryczną pozyskanych zobrazowań. Na podstawie zdjęć pola testowego „A” wykonanych na powietrzu i w wodzie wyznaczono położenie wybranych punktów o znanych współrzędnych geodezyjnych, przeanalizowano ich zmiany oraz porównano do danych archiwalnych. Następnie określono, jaki wpływ na rozdzielczość radiometryczną oraz odwzorowanie barw ma zmiana ośrodka fotografowania. Do tego celu wykorzystano testy w postaci klina 20-stopniowego oraz barwny test paskowy. Przeanalizowano, w jaki sposób zmieniały się wartości DN poszczególnych obszarów zarówno w środowisku wodnym, jak i na powietrzu. Ponadto określono zmianę MTF (ang. *Modulation Transfer Function*) i pojemności Shanonna dla wybranych zdjęć pola testowego „B”. W ostatnim etapie pozyskane zobrazowania zastosowano w praktyce — do oceny stopnia zniszczeń obiektu archeologicznego, a także wykonano jego metryczną dokumentację archeologiczną w postaci rysunku wektorowego.

3. Wyniki eksperymentu i dyskusja

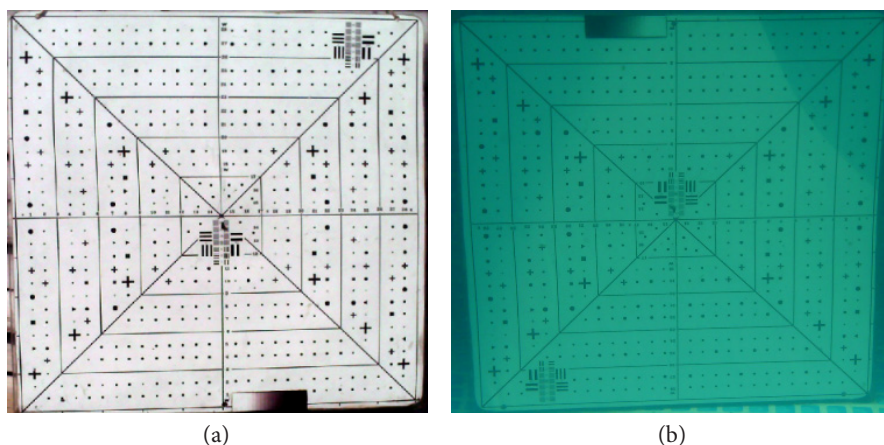
Prace badawcze obejmowały analizę jakości geometrycznej, rozdzielczości przestrzennej, radiometrycznej i odwzorowania barw na podstawie zdjęć wykonanych kamerą INTOVA IC500 w dwóch ośrodkach — powietrzu i wodzie. Kamera INTOVA IC500 charakteryzuje się rozdzielczością 5 Mpix i przeznaczona jest do wykonywania zdjęć podwodnych w odległości od 50 cm. Długość ogniskowej wynosi $f = 6,47$ mm na powietrzu (waga 82 g, migawka 1/1000 sec.) oraz $f = 8,60$ mm pod wodą.

Na podstawie pozyskanych zobrazowań oceniono, w jaki sposób zmiana ośrodka obrazowania wpływa na jakość pozyskanych zdjęć oraz jak należy wykonywać zdjęcia, aby uzyskać najkorzystniejsze rezultaty dla danych warunków fotografowania.

3.1. Ocena jakości geometrycznej

W tym celu wykorzystano dwa zdjęcia cyfrowe, pozyskane w warunkach laboratoryjnych, przedstawiające dwuwymiarowy test płaski „A”: jedno wykonane na powietrzu, a drugie pod wodą (rys. 1). Oba zobrazowania zostały pozyskane kamerą cyfrową INTOVA IC500 umieszczoną w wodoszczelnej obudowie.

Wybrane zdjęcia posłużyły do przeprowadzenia analizy wpływu środowiska obrazowania na dokładność wyznaczenia współrzędnych punktów na badanym polu testowym. W tym celu porównano współrzędne punktów płaskiego pola testowego wyznaczone za pomocą koordynatografu z dokładnością $m_x = m_y = \pm 0,02$ mm oraz współrzędne płaskie wyznaczone cyfrowo na zorientowanych zobrazowaniach.



Rys. 1. Wybrane do opracowania zdjęcia pola testowego „A” wykonane na powietrzu (a) oraz pod wodą (b)

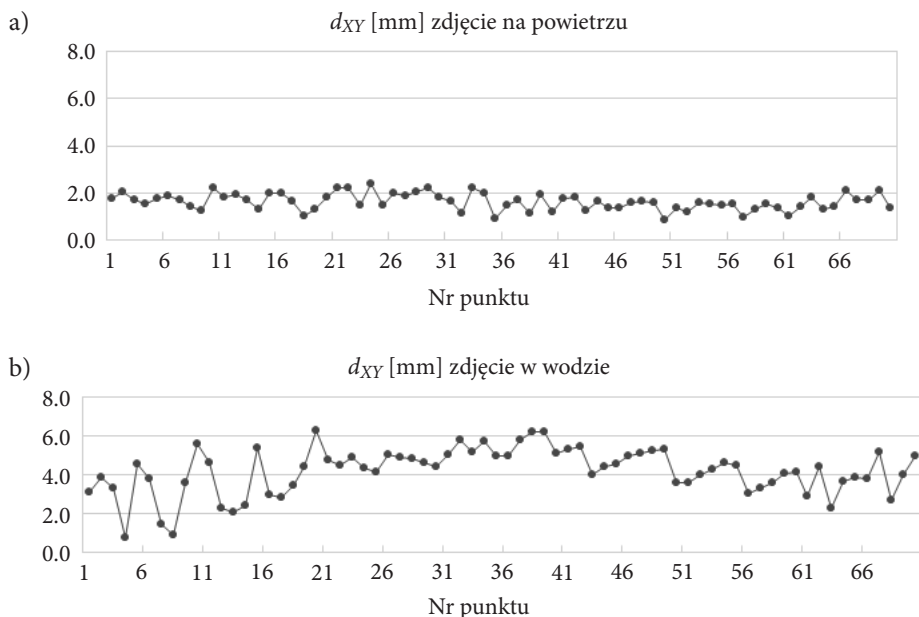
TABELA 1

Współrzędne punktów dostosowania oraz wyniki transformacji obrazowań

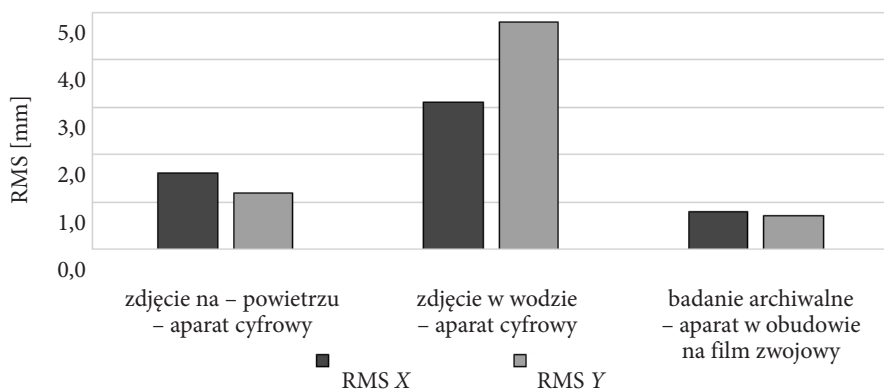
Nr	Współrzędne punktów dostosowania wyznaczone koordinatografem		Zdjęcie wykonane na powietrzu			Zdjęcie wykonane pod wodą		
	X [mm]	Y [mm]	X _{res} [mm]	Y _{res} [mm]	RMS [mm]	X _{res} [mm]	Y _{res} [mm]	RMS [mm]
1	16,22	382,38	0,019	-0,036	0,03	0,132	-0,009	0,09
2	0,14	66,98	-0,021	0,041	0,03	-0,149	0,010	0,11
3	365,42	83,82	0,020	-0,039	0,03	0,144	-0,010	0,10
4	432,54	416,13	-0,018	0,035	0,03	-0,126	0,009	0,09
			dX [mm]	dY [mm]	dXY [mm]	dX [mm]	dY [mm]	dXY [mm]
			0,02	0,04	0,03	0,14	0,01	0,10

W obu przypadkach zastosowano transformację afiniczną przeprowadzoną w oparciu o cztery punkty dostosowania, umieszczone w narożnikach pola testowego o współrzędnych pozyskanych koordinatografem zamieszczonych w tabeli 1. Po wykonaniu transformacji obrazowania przepróbkowano metodą bilinearną, zachowując wymiar piksela równy 0,34 mm dla zdjęcia wykonanego na powietrzu oraz 0,31 mm dla zdjęcia wykonanego pod wodą. Na przetransformowanych obrazach wyznaczono współrzędne 70 punktów testu i porównano je z ich współrzędnymi pomierzonymi koordinatografem. Wyniki przedstawiono na rysunkach 2a i 2b.

Porównanie błędów dla wszystkich punktów wyznaczanych dla każdego ze zdjęć przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 2. Wartości odchyłek d_{XY} dla współrzędnych wyznaczonych na przetransformowanym zdjęciu wykonanym na powietrzu (a) i w wodzie (b)



Rys. 3. Wartości RMS_X i RMS_Y dla analizowanych obrazów porównane z danymi archiwalnymi

Dla współrzędnych wyznaczonych na zdjęciu na powietrzu otrzymano błędy $RMS_X = \pm 1,6$ mm oraz $RMS_Y = \pm 1,3$ mm, natomiast dla zdjęcia wykonanego w wodzie współrzędne obarczone były błędami $RMS_X = \pm 3,5$ mm oraz $RMS_Y = \pm 4,8$ mm, z czego wynika, że zmiana ośrodka fotografowania znacznie, bo niemal dwukrotnie dla współrzędnej X i czterokrotnie dla współrzędnej Y, obniżyła dokładność opracowania. Na podstawie opracowania archiwalnego osiągnięto wysokie dokładności wyznaczenia współrzędnych,

wynoszące $\pm 0,8$ mm i $\pm 0,7$ mm odpowiednio dla współrzędnych X i Y . Ponadto można zauważyć, że dla zobrazowania wykonanego pod wodą widoczna jest tendencja wzrostowa wartości błędów dla punktów oddalonych od środka pola testowego.

3.2. Ocena rozdzielczości przestrzennej

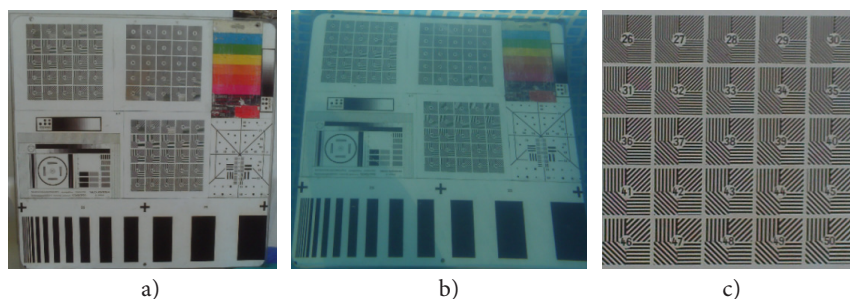
W kolejnym etapie przeprowadzono analizę rozdzielczości przestrzennej wykonanych obrazów, która jest jedną z najistotniejszych parametrów opisujących jakość i przydatność interpretacyjną pozyskiwanych zobrazowań. Przy znanej odległości sensora od obiektu H zależność między wymiarami najmniejszego identyfikowalnego obiektu na obrazie Δx_i i w rzeczywistości definiowana jest przez równanie (1) [19, 24].

$$GRD = H \frac{\Delta x_i}{f}, \quad (1)$$

gdzie: H — odległość pomiędzy sensorem a obiektem;
 f — ogniskowa sensora.

Na obszarze analizowanej planszy znajdowały się pola testowe do badania terenowej zdolności rozdzielczej. Miały one postać grup pasków o zadanej szerokości ułożonych w zestawy o różnej liczbie elementów. Odstęp pomiędzy paskami był równy ich szerokości. Rozdzielczość danego układu optycznego określono, obserwując fragment z ostatnimi rozróżnialnymi grupami pasków. Numer grupy i elementu umożliwia odczytanie rozdzielczości w tablicach dołączonych do testu oraz opisanie rozdzielczości obiektywu kamery INTOVA IC500 w konkretnej liczbie par linii na milimetr. Jednak ze względu na brak odpowiednich tablic dla pola testowego „A” było to możliwe jedynie w przypadku pola testowego „B” (rys. 4), które sfotografowano na powietrzu i pod wodą z odległości 1 m.

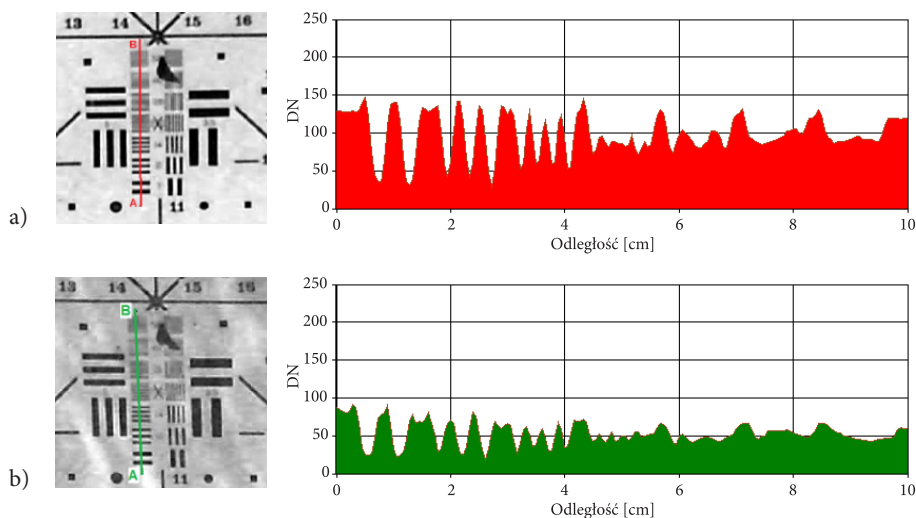
Zdolność rozdzielczą określono na podstawie testów paskowych przedstawionych na rysunku 4c. W tym celu posłużono się wymiarami i rozdzielczością pól testowych



Rys. 4. Pole testowe „B” wykorzystane do badania zdolności rozdzielczej kamery INTOVA IC500:
a) zdjęcie na powietrzu; b) zdjęcie w wodzie; c) test do badania zdolności rozdzielczej

zamieszczonych na tablicy. Badanie zdolności rozdzielczej polegało na określeniu tej grupy pasków, która jest ostatnią rozróżnialną na zobrażowaniu. Dla zdjęcia wykonanego na powietrzu ostatnią rozróżnialną była grupa 19, co odpowiada zdolności rozdzielczej 0,2 lp/mm. Natomiast zdjęcie wykonane w wodzie charakteryzowało się o wiele słabszą radiometrią, co znacznie wpłynęło na jednoznaczność interpretacji rozróżnialności poszczególnych pasków w grupie. Ostatecznie stwierdzono, że ostatnią rozróżnialną grupą była 25, co odpowiada zdolności rozdzielczej 0,3 lp/mm. Podsumowując, można stwierdzić, że zmiana ośrodka fotografowania znacznie zmniejsza zdolność rozdzielczą wykorzystanej kamery, aczkolwiek jest to strata niemożliwa do pominięcia w przypadku konieczności wykonywania zobrażeń pod wodą.

W przypadku pola testowego „A” nie dysponowano tablicami opisującymi faktyczne parametry geometryczne testów paskowych, gdyż zostało ono wykonane w latach 70. XX w. Dlatego też przeanalizowano, w jaki sposób zmienia się wartość DN w przekroju zestawu pasków w zależności od ośrodka fotografowania. Pole testowe miało postać 18 grup pasków ułożonych zarówno w kierunku pionowym, jak i poziomym. Przykładowe wyniki prac badawczych przedstawiono na rysunku 5. Profile testów paskowych dla zdjęcia wykonanego na powietrzu przedstawiono w kolorze czerwonym, natomiast dla fotografii podwodnej — w kolorze zielonym.



Rys. 5. Profile DN testów na zdjęciu wykonanym na powietrzu (a) oraz w wodzie (b)

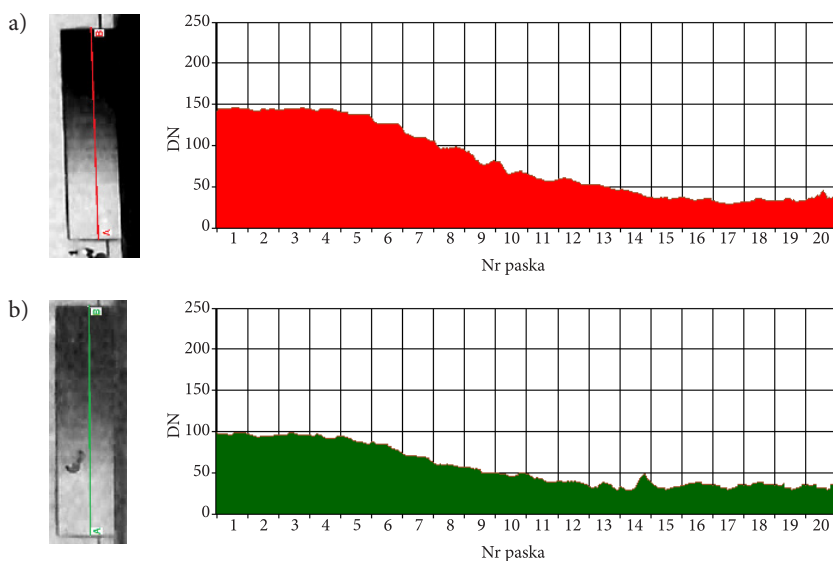
Na podstawie powyższych profili można stwierdzić, że dla zdjęcia wykonanego w powietrzu ostatnią rozróżnialną grupą jest grupa 5, natomiast dla zdjęcia podwodnego — grupa 3. Świadczy to o znacznym spadku zdolności rozdzielczej wykorzystanego systemu optycznego. Warto również zwrócić uwagę na zmianę wartości różnic DN — dla zdjęć w powietrzu ΔDN charakteryzują się dużymi wartościami

(DN_{max} dochodzące do 150), a przejścia między czarno-białymi pasami są wyraźne. Natomiast dla zdjęć wykonanych w wodzie wartości DN dla całego testu są o wiele niższe (DN_{max} poniżej 100), ΔDN nie mają już tak dużych wartości jak w przypadku zdjęcia wykonanego w powietrzu, przez co o wiele trudniej rozróżnia się poszczególne grupy pasków. Przy zmianie ośrodka fotografowania, w przypadku grup pasków o największej szerokości, spadek DN wynosi ok. 15% i wraz ze zmniejszaniem ich szerokości jest coraz większy, dochodząc nawet do 50% dla pasków najwęższych. Opisane powyżej zmiany wartości DN są szczególnie istotne w sytuacjach, kiedy nie ma możliwości, by w sposób liczbowy opisać rozdzielczość przestrzenną. Jakość analizowanych obrazów może zostać wtedy oceniona względnie w oparciu o kontrast, który jest często używany jako parametr mający wpływ na rozdzielczość przestrzenną obrazu.

3.3. Ocena rozdzielczości radiometrycznej

3.3.1. Pole testowe „klin 20-stopniowy”

W kolejnym etapie przeanalizowano wpływ ośrodka obrazowania na rozdzielczość radiometryczną pozyskanych zobrazowań. Do tego celu wykorzystano pola testowe w postaci klinów 20-stopniowych zamieszczonych na planszy „A” oraz „B”. Dla każdego ze zdjęć zarejestrowanych na powietrzu i w wodzie wykonano profile DN (rys. 6).



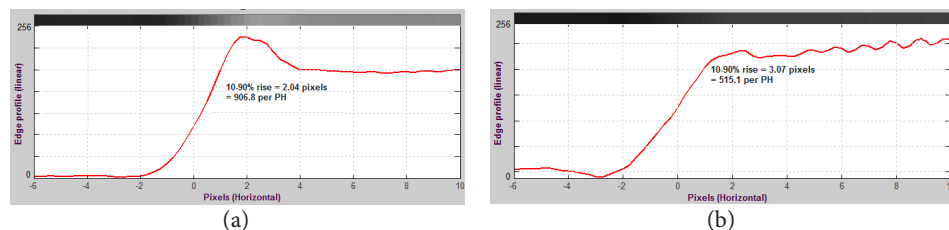
Rys. 6. Profile DN klina 20-stopniowego z planszy „A” ze zdjęcia wykonanego na powietrzu (a) oraz w wodzie (b)

Na podstawie profili z rysunku 6 można stwierdzić, że wpływ ośrodka fotografowania na wartości DN pozyskanych zdjęć jest znaczny. Dla pola testowego w postaci klina 20-stopniowego na zdjęciu wykonanym w wodzie można zaobserwować spadek wartości DN nawet o połowę. Początkowa część wykresów przedstawia obszar prześwietleń. Zarówno w przypadku zdjęcia wykonanego w powietrzu, jak i w wodzie obejmuje on obszar aż do 4. paska klina łącznie. Końcowy fragment profili to obszar niedoświetleń. Dla zdjęć z powietrza rozpoczyna się on od 16 pasma, z kolei dla zdjęć podwodnych już dla pasma 13. Wynika z tego, że odcinek poprawnego odwzorowania odcieni szarości (obszar pomiędzy obszarem niedoświetleń i prześwietleń) dla zdjęć napowietrznych obejmuje 11 pasków, a dla zdjęć podwodnych jedynie 8. Świadczy to o znacznym zawężeniu obszaru poprawnego odwzorowania odcieni szarości, co z kolei przekłada się na spadek rozdzielczości radiometrycznej i możliwości interpretacyjne pozyskiwanych zobrazowań.

3.3.2. Pole testowe „przekoszona krawędź”

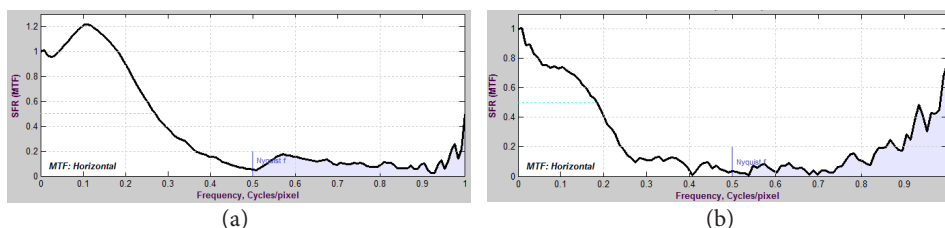
W kolejnym etapie przeanalizowano funkcję przenoszenia modulacji (MTF) kamery cyfrowej na przykładzie pola testowego w postaci przekoszonej krawędzi zobrazowanej na zdjęciu podwodnym i napowietrznym. Można ją wyznaczyć kilkoma metodami [18], jednak zgodnie z normami ISO (ISO 15529) oraz wytycznymi NATO powinno się ją wyznaczać metodą tzw. przekoszonej krawędzi. Opiera się ona na teorii filtracji liniowej, zgodnie z którą proces przetwarzania obrazu możemy traktować jako proces dwustopniowy. W pierwszym etapie dokonujemy rozłożenia sygnału przedmiotu na widmo harmonik za pomocą transformaty Fouriera. W drugim etapie odtwarza się obraz przedmiotu poprzez syntezę harmonik widma z przestrzeni obrazowej w rozkład sygnału obrazu za pomocą odwrotnego przekształcenia Fouriera. Różnica w widmach sygnałów mówi o jakości procesu przetwarzania [1]. W wyniku prac badawczych otrzymano profile brzegowe dla testu „przekoszona krawędź”, które przedstawiono na rysunku 7.

Na podstawie powyższych rysunków można stwierdzić, że krzywe różnią się w swym przebiegu — profil dla zdjęcia wykonanego na powietrzu przedstawia wyższe



Rys. 7. Profile brzegowe przekoszonych krawędzi dla zdjęcia wykonanego na powietrzu (a) oraz w wodzie (b)

maksymalne zarejestrowane wartości DN — powyżej 220 (dla zdjęcia w wodzie $DN_{\max} < 220$). Na obrazie wykonanym w wodzie występuje charakterystyczne plamkowanie — obszary białe i czarne nie są jednolite, co skutkuje widocznym, zwłaszcza w końcowej części wykresu, pofalowaniem krzywej profilu. Ponadto zdjęcie wykonane na powietrzu cechuje się lepszą rozdzielczością — 2,04 Pix/PH (dla obrazu wykonanego w wodzie 3,07 Pix/PH). Podobna zależność wynika z krzywych MTF (SFR — ang. *Spectral Function Response* — odpowiedź spektralna sensora) przedstawionych na rysunku 8.



Rys. 8. Krzywe MTF dla testu „przekoszonej krawędzi” na zdjęciu wykonanym na powietrzu (a) i w wodzie (b)

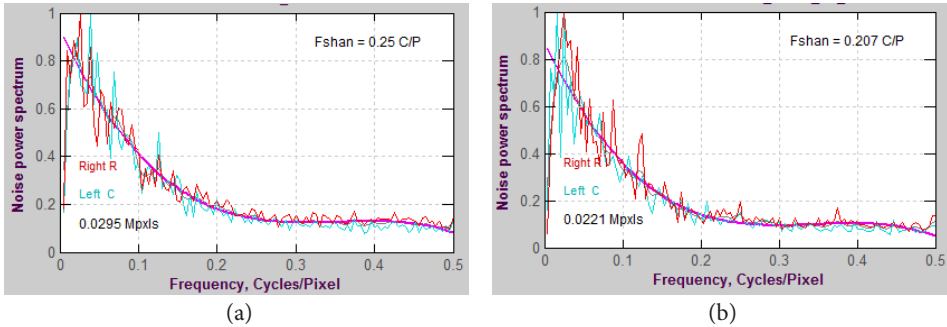
Na podstawie wielkości odczytanych z powyższych wykresów można dokonać oceny jakości wykorzystanego systemu optycznego. Parametry MTF dla obu analizowanych zdjęć zestawiono w tabeli 2.

TABELA 2

Wartości MTF dla „przekoszonej krawędzi” na zdjęciu wykonanym w wodzie i na powietrzu

	Zdjęcie wykonane na powietrzu	Zdjęcie wykonane w wodzie
MTF 50	0,27 cyklu/Pix = 998 LW/PH	1,84 cyklu/Pix = 582 LW/PH
MTF 30	0,33 cyklu/Pix	0,22 cyklu/Pix
MTF at Nyquist	0,049 cyklu/Pix	0,035 cyklu/Pix

Do najpopularniejszych parametrów można zaliczyć MTF50 — częstotliwość przestrzenną, dla której kontrast obrazu spada o połowę. Wielkość tę uznaje się za wyznacznik ostrości obrazu. Dla zdjęcia wykonanego na powietrzu jest ona niższa w porównaniu ze zdjęciem podwodnym. Podobną tendencję spadkową można zauważyć dla wartości MTF30 oraz częstotliwości Nyquista (częstotliwości granicznej próbkowania stanowiącej teoretyczny limit rozdzielczości sensora). Oznacza to, że wraz ze zmianą ośrodka obrazowania zdolność rozdzielcza sensora znacznie spada, co odzworowało się w postaci osłabienia radiometrii pozyskanych zobrazowań. Potwierdzają to również krzywe przedstawiające zaszumienie obrazu (rys. 9).



Rys. 9. Zaszumienie oraz pojemność Shannona dla testu „przekoszona krawędź” — zdjęcie podwodne (a) i na powietrzu (b)

Pojemność Shannona jest miarą pozwalającą określić maksymalną ilość informacji, które można przesłać przez jeden kanał komunikacyjny. Można ją wyznaczyć z zależności (2), gdzie S/N jest stosunkiem sygnału do szumu [1].

$$C = W \cdot \log_2 \left(\frac{S}{N} + 1 \right), \quad (2)$$

gdzie: W — szerokość kanału, która odpowiada rozdzielczości obrazu;
 S — energia sygnału (kwadrat napięcia sygnału);
 N — energia szumów (kwadrat napięcia skutecznego sygnału zakłócającego).

Dla obrazu wykonanego na powietrzu pojemność Shannona wyniosła 4,0 bity/pix, natomiast dla zdjęcia podwodnego zaobserwowano jej spadek do poziomu 3,3 bitu/pix. Potwierdza to wyższą zdolność rozdzielczą układu obrazującego na powietrzu, gdyż jakość obrazu jest proporcjonalna do pojemności Shannona, która z kolei jest funkcją MTF i szumu.

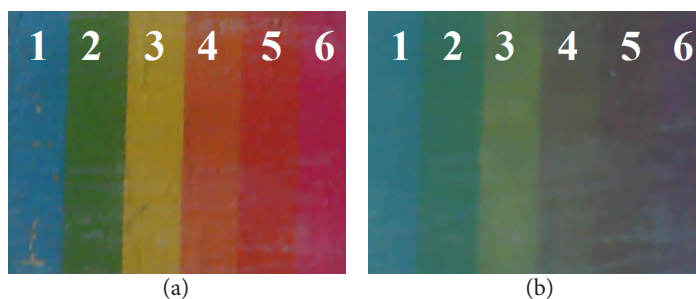
Ocena radiometrii obrazów często realizowana jest również za pomocą zależności Michelsona (3), gdzie kontrast K wyznaczany jest za pomocą DN_{\min} i DN_{\max} — minimalnej i maksymalnej wartości DN występującej na analizowanym obrazie [23].

$$K = \frac{DN_{\max} - DN_{\min}}{DN_{\max} + DN_{\min}}. \quad (3)$$

Dla analizowanych fragmentów obrazów kontrast wyniósł odpowiednio $K_1 = 0,79$ dla zdjęcia na powietrzu i $K_2 = 0,65$ dla zdjęcia wykonanego w wodzie. Potwierdza to również CTF (ang. *Contrast Transfer Function*), którego wartość dla analizowanych zdjęć wyniosła 0,83.

3.4. Ocena odwzorowania barw

Obok rozdzielczości przestrzennej oraz radiometrycznej przeanalizowano również **odwzorowanie barw na rozpatrywanych obrazach**. Obrazy te w barwach naturalnych zapisane są w systemie RGB — każdy piksel ma przyporządkowane trzy odpowiedzi spektralne: w zakresie promieniowania widzialnego odpowiadającego barwie czerwonej, zielonej i niebieskiej. Na tym etapie prac badawczych przeanalizowano zmiany, które zaszły na zdjęciach przy zmianie ośrodka obrazowania dla testu barwnego umieszczonego na polu testowym „B” (rys. 10).

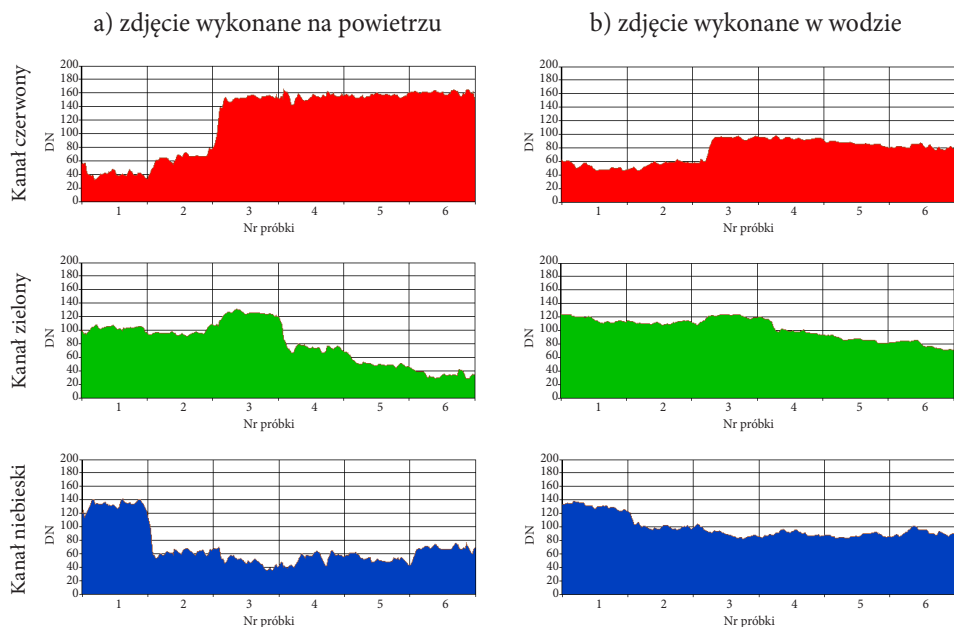


Rys. 10. Barwne sześcioelementowe pole testowe zobrazowane na zdjęciu wykonanym na powietrzu (a) i pod wodą (b)

Oba zdjęcia zostały wykonane kamerą cyfrową wykorzystującą filtr Bayera. Sensor taki nie pozyskuje bezpośrednio informacji dotyczącej barwy obrazowanego obiektu. Nad każdym detektorem (pikselem) umieszczony jest czerwony, niebieski lub zielony filtr. Na powierzchni całej matrycy znajduje się po 25% pikseli rejestrujących czerwoną i niebieską składową światła oraz 50% pikseli rejestrujących promieniowanie zielone, równomiernie rozłożonych na całej jej powierzchni. Wynikowy kolor piksela wyznaczany jest na podstawie odpowiednio ważonej interpolacji z wartości zarejestrowanych przez sąsiadujące piksele [27].

Na podstawie analizowanego fragmentu pola testowego określono, w jaki sposób zmieniły się wartości pikseli w poszczególnych kanałach zdjęć przy zmianie ośrodka obrazowania. Wyniki przedstawiono na rysunku 11.

Dla kanału czerwonego największe zmiany można zaobserwować dla próbek 3-6 (barwy ciepłe), dla których spadek DN wyniósł średnio 64. W kanale zielonym, przy zmianie ośrodka z powietrza na wodę, zaobserwowano wzrost wartości DN praktycznie dla wszystkich próbek (średnio o 24). Jedyną próbką odbiegającą od pozostałych była próbka 3 (żółta), dla której DN spadło o 6. Dla kanału niebieskiego, tak jak w poprzednim przypadku, zarejestrowano wzrost DN (średnio o 31), z wyjątkiem próbki 1 — niebieskiej (spadek o $DN = 6$).

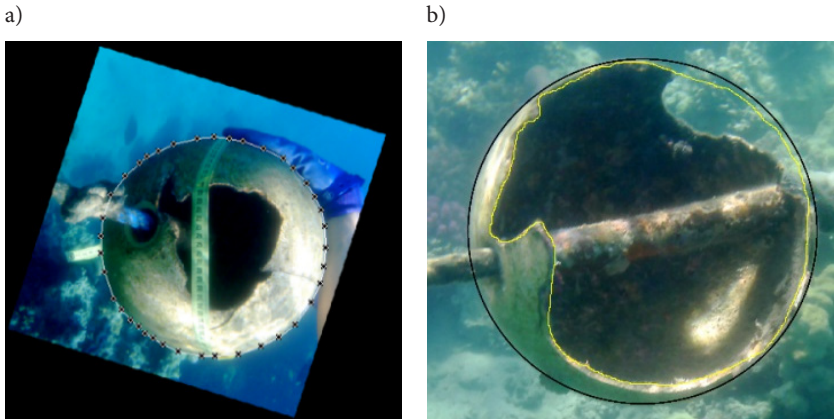


Rys. 11. Wartości DN dla kanału czerwonego, zielonego i niebieskiego dla zdjęć wykonanych na powietrzu (a) i pod wodą (b)

Na podstawie wyników przedstawionych prac badawczych można stwierdzić, że zmiany, jakie zaszły w odwzorowaniu barw przy zmianie ośrodka obrazowania z powietrza na wodę, są znaczące, co przekłada się na znaczny spadek możliwości interpretacyjnych analizowanych obrazów. Świadczy to o tym, że aby poprawnie odwzorować barwy na zdjęciu wykonanym w wodzie, należy dokonać ich korekcji oraz posłużyć się wzorcem barw otrzymanym z obrazu na powietrzu o znanych wartościach referencyjnych RGB.

3.5. Pomiar powierzchni zniszczenia fragmentu obiektu zatopionego

Przeprowadzone prace badawcze służą wyznaczeniu optymalnych warunków wykonania i opracowania zdjęć podwodnych, które mogą być materiałem do badań archeologicznych. Przykładem może tu być zabytkowa boja znajdująca się na wybrzeżu Morza Czerwonego, w pobliżu miejscowości Marsa Alam w Egipcie. Wraz z biegiem czasu kula stopniowo ulegała degradacji, co skutkowało stale zwiększającym się ubytkiem części jej powierzchni (rys. 12). Została ona zobrazowana dwukrotnie w odstępnie dwóch lat, kamerą cyfrową INTOVA IC500. Pozyskane zobrazowania charakteryzowały się następującą rozdzielczością przestrzenną — wymiar piksela wyniósł 0,21 mm dla zdjęcia z 2014 roku i 0,13 mm dla zdjęcia z 2016 roku. Oba zdjęcia są barwne (RGB), zarejestrowane z 24-bitową rozdzielczością radiometryczną.



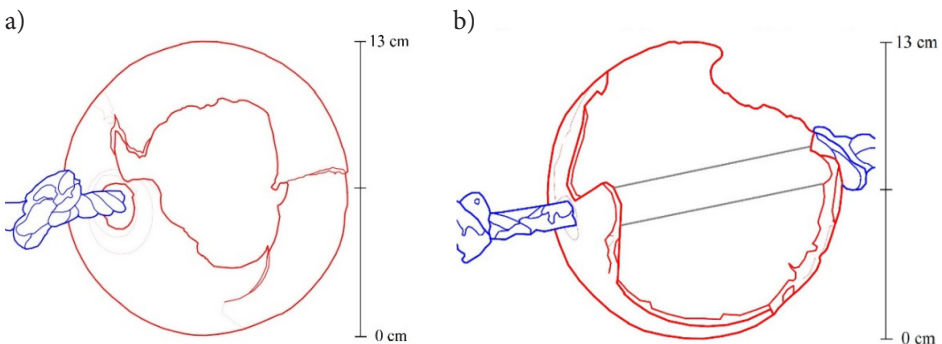
Rys. 12. Zabytkowa kula: zdjęcie z 2014 r. (a) i z 2016 r. (b)

W pierwszej kolejności przeprowadzono korekcję radiometryczną pozyskanych zobrazowań — wyrównano histogramy, skorygowano kontrast oraz balans barw. Następnie dzięki podziałce liniowej sfotografowanej na powierzchni analizowanego obiektu pierwszemu zdjęciu nadano georeferencję, po czym drugie zobrazowanie dostosowano do układu współrzędnych pierwszego metodą *image-to-image*.

W wyniku pomiarów stwierdzono, że rzeczywiste wymiary kuli wynoszą: promień $R = 12,9$ cm oraz powierzchnia całkowita $P = 2117$ cm². Powierzchnia ubytku na zdjęciu z 2014 roku wynosi 301 cm² (14% powierzchni całkowitej), a uszkodzenia z 2016 roku — 944 cm² (45% powierzchni całkowitej).

Oznacza to, że obszar zniszczenia zwiększył się ponad trzykrotnie. Dodatkowo wykonano również rysunek wektorowy analizowanego obiektu (rys. 13), który może zostać uznany za jedną z form dokumentacji wybranego obiektu zabytkowego.

Podsumowując, można stwierdzić, że pomiary tego typu są niezbędne, zwłaszcza w przypadku obiektów zabytkowych, które w środowisku wodnym degradują się znacznie szybciej niż na powietrzu. Wskazana metoda inwentaryzacji charakteryzuje



Rys. 13. Rysunek wektorowy analizowanego obiektu z roku 2014 (a) i 2016 (b)

się stosunkowo wysoką dokładnością ($m_{xy} = \pm 2$ pix) w porównaniu do metod tradycyjnych. Jest ona obiektywna, gdyż bazuje na zdjęciach cyfrowych, a nie na subiektywnym szkicu obserwatora, a także jest stosunkowo tania w realizacji. Zdjęcia cyfrowe są możliwe do pozyskania w krótkim czasie i z dużą częstotliwością, co znacznie obniża koszty inwentaryzacji i całość procesów kompletowania danych archeologicznych. Ponadto opracowanie i analiza pozyskanych zdjęć może odbywać się w post-processingu, co znacznie skraca czas pracy pod wodą, a także umożliwia wykonywanie złożonych analiz i pomiarów.

4. Wnioski

Fotogrametria podwodna jest jedną z metod penetracji środowiska wodnego, która jest zarazem prosta, szybka, ekonomiczna oraz dokładna. Ta nieinwazyjna metoda badań pozwala na znaczne skrócenie czasu pobytu pływaka pod wodą do niezbędnego minimum, kiedy to wykonuje się zdjęcia obiektów pod wodą, które następnie opracowuje się kameralnie metodami fotogrametrii cyfrowej. Dotychczas stosowane metody wymagały długiego pobytu pływaka pod wodą, w celu rysowania szczegółów obiektu, co skutkowało niską dokładnością, subiektywizmem, pracochłonnością, a w rezultacie nie dawało dobrych wyników.

Wskutek prac badawczych stwierdzono, że środowisko wodne znacznie wpływa na możliwości interpretacyjne pozyskanych obrazów. Dlatego też w pierwszej kolejności należy skupić się na prawidłowym pozyskaniu obrazów oraz fotografować z niewielkich odległości (0,5-1 m). Pozwoli to na osiągnięcie wysokiej zdolności rozdzielczej i największej dokładności geometrycznej pozyskanych obrazów (2 piksele). Dla zdjęcia wykonanego pod wodą pojemność Shannona, będąca funkcją MTF i szumu, spadła o ponad 18% w porównaniu do zdjęcia wykonanego na powierzchni. Woda pochłania ciepłe barwy, takie jak czerwień i żółć, co szczególnie widać w wyniku analizy testu barwnego w kanale czerwonym. Aby przeciwdziałać temu zjawisku, można stosować sztuczne źródło światła podczas wykonywania zdjęć oraz wykorzystać algorytmy korekcji barw na etapie wstępnego opracowania danych.

Prawidłowo pozyskane oraz opracowane podwodne fotogrametryczne zdjęcia cyfrowe w praktyce mogą być zastosowane do określania kształtów i odkształceń stałych obiektów podwodnych, wykonania dokumentacji fotograficznej i kartograficznej podwodnych odkryć archeologicznych, określenia liczby i wymiarów pęcherzyków gazów w zbiornikach z cieciami, a także badań modelowych prowadzonych w środowisku wodnym.

Źródło finansowania pracy: PBS 933/2016.

Artykuł wpłynął do redakcji 5.04.2017 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 31.07.2017 r.

LITERATURA

- [1] BAREŁA J., FIRMANTY K., KASTEK M., DŁUGASZEK A., *Stanowiska do pomiaru podstawowych parametrów kamer termowizyjnych spełniające wymogi metrologiczne WP*, Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, 61, 2, 2012, 81-91.
- [2] BEKER L., KACZYŃSKI R., MIZERSKI W., *Możliwość wykonania pomiarów obiektów podwodnych metodami fotogrametrycznymi (na przykładzie inwentaryzacji wraku statku Solen)*, Prace Instytutu Geodezji i Kartografii, t. 28, z. 2, 68, 1981, 3-35.
- [3] BEKER L., KACZYŃSKI R., *Fotografia i fotogrametria podwodna*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1985.
- [4] BASS G.F., *Archaeology under water*, Thames and Hudson, London, 1966.
- [5] BASS G.F., *New Techniques of Archaeology and Greek Shipwrecks of the Sixth and Fifth Centuries BC*, PAPS 150, 2006, 1-14.
- [6] BASS G.F., ROSENCRANTZ D.M., *The Asherah-A Pioneer in Search of the Past*, Elsevier Oceanography Series, 17, 1977, 335-351.
- [7] CAPRA A., *Non-conventional system in underwater photogrammetry*, International Archives Photogrammetry and Remote Sensing, XXIX-B5, 1992, 234-240.
- [8] CANCIANI M., GAMBOGI P., ROMANO F.G., CANNATA G., DRAP P., *Low Cost Digital Photogrammetry for Underwater Archaeological Site Survey And Artifact Insertion. The Case Study of the Dolia Wreck In Secche Della Meloria- Livorno-Italia*, International Archives Photogrammetry and Remote Sensing, XXXIV- 5/W12, 2003, 95-100.
- [9] CIANI J.B., HUNTER E.K., DOWLING C.B., BRUNK D.H., *Seafloor surveying by divers*, Journal of Surveying Engineering ASCE, vol. 97, 1971, 149-164.
- [10] DEMESTICHA S., SKARLATOS D., NEOPHYTOU A., *The 4th century B.C. shipwreck at Mazotos, Cyprus: new techniques and methodologies in the 3D mapping of shipwreck excavations*, Journal of Field Archaeology, 39, 2, 2014, 134-150.
- [11] DRAP P., MERAD D., SEINTURIER J., MAHIDDINE A., PELOSO D., BOI J.-M., LONG L., CHEMISKY B., GARRABOU J., *Underwater photogrammetry for archaeology and marine biology: 40 years of experience in Marseille, France*, Digital Heritage International Congress, vol. 1, 2013, 42-49.
- [12] DRAP P., SEINTURIER J., SCARADOZZI D., GAMBOGI P., LONG L., GAUCH F., *Photogrammetry for virtual exploration of underwater archeological sites*, International Archives Photogrammetry and Remote Sensing, XXXVI- 5/C53, 2007, 123-132.
- [13] FAIG W., *Photogrammetric surveys of underwater objects*, Proceedings of Coastal Mapping Symposium, Maryland, 1979, 183-187.
- [14] GONZÁLEZ-AUDÍCANA M., OTAZU X., *Comparison between Mallat's and the a'trous discrete wavelet transform based algorithms for the fusion of multispectral and panchromatic images*, International Journal of Remote Sensing, 26, 3, 2005, 595-614.
- [15] GREEN J., *Maritime Archaeology: a technical handbook*, 2nd Edition, London, 2004.
- [16] HENDERSON J., PIZARRO O., JOHNSONS-ROBERSTON M., MAHON I., *Mapping Submerged Archaeological Sites using Stereo-Vision Photogrammetry*, The International Journal of Nautical Archaeology, 42.2, 2013, 243-56.
- [17] HOHLE J., *Reconstruction of the underwater object*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, PE&RS Archives, 1971, 949-954.
- [18] HOLST G.C., *Infrared imaging system testing*, Electro-Optical Systems Design, Analysis and Testing, 4, 1993, 235-241.

- [19] KEATING D.D., *Automatic digital processing for calibration data of Open Skies Treaty sensors*, Air Force Institute of Technology Wright-Patterson, 1997, 23-36.
- [20] LEATHERDALE J.D., TURNER D.J., *Operational experience in underwater photogrammetry*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 46, 1991, 104-112.
- [21] MCCARTHY J., BENJAMIN J., *Multi-image photogrammetry for underwater archaeological site recording: an accessible, diver-based approach*. Journal of Maritime Archaeology, 3, 2014, 213-222.
- [22] MENNA F., NOCERINO E., DEL PIZZO S., ACKERMANN S., SCAMARDELLA A., *Underwater photogrammetry for 3D modeling of floating objects: The case study of a 19-foot motor boat*, Sustainable Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources, Rizzuto E., Guedes Soares C., Crc Press, 2011, 537-544.
- [23] MICHELSON A.A., *Studies in optics*, Courier Corporation, 1995.
- [24] ORYCH A., WALCZYKOWSKI P., *Wyznaczanie terenowej zdolności rozdzielczej sensorów cyfrowych w oparciu o cele kalibracyjne*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, 21, 2010, 23-32.
- [25] POLLIO J., *Underwater Mapping with Photography and SONAR*, Photogrammetry Engineering, vol. 37, 1971, 955-968.
- [26] SKARLATOS D., DEMESTIHA S., KIPARISSI S., *An "open" methods for 3D modeling and mapping underwater archaeological sites*, International Journal of Heritage in the digital era, vol. 1, 1, 2012.
- [27] SKARLATOS D., DEMESTIHA S., KIPARISSI S., *An "open" methods for 3D modeling and mapping underwater archaeological sites*, International Journal of Heritage in the digital era, vol. 1, 1, 2012.

M. WOJTKOWSKA, R. KACZYŃSKI

Quality assessment of underwater photogrammetric images for archeology purposes

Abstract. Archaeological data are usually inherently incomplete, heterogeneous, discontinuous and require frequent updates and possible adjustments. It is important to constantly create detailed documentation, which will precisely represent the actual situation. However, even the most precise figure is only an estimated representation of the documented object. Therefore, it is necessary to collect fully metric documentation and its professional archaeological interpretation. Acquiring correct and valuable underwater digital images for the archaeology purposes is not easy due to specific shooting conditions. It should be noted a number of limitations are unique to this type of imaging environment — the apparent extension of the focal length, the “disappearance” of colours, as well as a significant reduction in the transparency of the water environment. Therefore, the authors have made attempts to describe changes, in a much broader sense, in the quality of photogrammetric images that had been taken in various shooting conditions. Underwater and aerial images of two test fields were tested. First, the ground sampling distance of the INTOVA IC500 digital camera and the geometric accuracy of the acquired images were examined. Then, the impact of changes to the imaging conditions on the radiometric resolution and colour projection were designated. In the last stage, the acquired images were used in practice — to assess the progress of the erosion process of an archaeological object, and also to comply its documentation in the form of vector drawing with the accuracy of $mxy = \pm 0.5$ mm.

Keywords: photogrammetry and remote sensing, archaeology, underwater photogrammetry, resolution, ground resolved distance

DOI: 10.5604/01.3001.0010.5388