

## THE EXPERIMENTAL VERIFICATION OF A METHOD FOR QUALIFYING THE FOCAL LENGTH UNDER-WATER PHOTOGRAMMETRY CAMERA

## DOŚWIADCZALNA WERYFIKACJA METODY OKREŚLANIA ODLEGŁOŚCI OBRAZOWEJ PODWODNEJ KAMERY FOTOGRAOMETRYCZNEJ

Adam Olejnik<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Polish Naval Academy, Department of Underwater Work Technology, Gdynia

<sup>1)</sup>Akademia Marynarki Wojennej Zakład Technologii Prac Podwodnych w Gdyni

### ARTICLE INFO

**Journal:** PolHypRes 2013 Vol. 43 Issue 2 pp. 69 – 92

**ISSN:** 1734-7009

**eISSN:** 2084-0535

**DOI:** HTTP://DX.DOI.ORG/10.13006/PHR. 43.4

**Pages:** 23, figures: 7, tables: 3

**page www of the periodical:** www.phr.net.pl

#### **Keywords/Słowa kluczowe:**

*(in English):* Underwater work technology, marine engineering, underwater photogrammetry

*(in Polish):* Technologia prac podwodnych, inżynieria morska, fotogrametria podwodna

#### **Polish-English bilingual publication**

#### **Publisher**

Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society

### ABSTRACT

*(in English)*

In the article represented the course and results of connected experiments with experimental marking of the focal length under-water photogrammetry camera. Bases theoretical methods of put-upon in the experiment introduced in the publication placed in PolHypRes 2011 Vol. 37 Issue 4 pp. 21-43. Research performed within the framework of the scientific project No O N502 274039.

**Scientific work financed from educational budget in the years 2010 – 2012 as a research project**

*(in Polish)*

W artykule przedstawiono przebieg i wyniki eksperymentów związanych z doświadczalnym wyznaczaniem odległości obrazowej podwodnej kamery fotogrametrycznej. Podstawy teoretyczne metody wykorzystanej w eksperymencie przedstawiono w publikacji zamieszczonej w PolHypRes 2011 Vol. 37 Issue 4 pp. 21-43. Badania wykonano w ramach projektu badawczego Nr O N502 274039.

**Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010 – 2012 jako projekt badawczy**

The summary in Russian on end of the publication

## 1. WPROWADZENIE

W Zakładzie Technologii Prac Podwodnych Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni od kilku lat prowadzone są prace badawcze związane z inżynierskim wykorzystaniem fotogrametrii podwodnej. Generalnie działania te polegają na opracowaniu metody diagnozowania stanu technicznego powierzchni obiektów podwodnych za pomocą systemu wizyjnego montowanego na pokładzie bezzałogowego pojazdu głębinowego. Ze względu na cel podejmowanych działań prace te wchodzą w zakres diagnostyki technicznej, biorąc pod uwagę środki i metody dotarcia do badanych obiektów zazębiają się z technologią prac podwodnych a uwzględniając metody badań, działania te zazębiają się z fotogrametrią bliskiego zasięgu [5,6].

Jednoznaczne określenie współrzędnych terenowych w oparciu o znane współrzędne tłowe usytuowane na zdjęciu pomiarowym wymaga wprowadzenia do równania dwóch wielkości: odległości obrazowej kamery (ogniskowej) i orientacji przestrzennej kamery pomiarowej [3,6]. Druga z wymienionych wielkości jest ściśle powiązana z warunkami realizacji zdjęcia, natomiast pierwsza ma związek przede wszystkim z konstrukcją podwodnej kamery fotogrametrycznej. Zazwyczaj konstruując i budując taką kamerę wielkość ogniskowej jest znana, dla układu optycznego powietrze – obiektyw. Jest to parametr, który podaje producent kamery. Podczas budowy kamery podwodnej wykorzystującej taki fabryczny element do akwizycji obrazu wprowadza się dodatkowy element w postaci iluminatora izolującego kamerę od przestrzeni wodnej, który zmienia fabryczną optykę urządzenia. Ponadto, podczas obserwacji technicznej obiektu podwodnego dochodzi jeszcze dodatkowy element w postaci wody znajdującej się pomiędzy obiektem a iluminatorem. W takim przypadku powstaje niejako nowy układ optyczny składający się z wody-iluminatora-powietrza. Wartość odległości obrazowej dla takiego układu jest nieznana i należy ją wyznaczyć w drodze eksperymentu. W publikacji autora pt.: *Metoda określania odległości obrazowej kamery fotogrametrycznej*, przedstawiono podstawy teoretyczne, które można wykorzystać w takim eksperymencie [4]. Generalnie równanie na określenie odległości obrazowej kamery ma następującą postać [4]:

$$f = \frac{k(x_2 - x_1)}{x_1 \cot \alpha_1 - x_2 \cot \alpha_2} \quad (1)$$

gdzie:

- f - odległość obrazowa kamery,
- $x_1$  - odległość pomiędzy wyznaczonym w terenie punktem a punktem węzłowym zmierzona na zdjęciu,
- $x_2$  - odległość pomiędzy drugim wyznaczonym w terenie punktem a punktem węzłowym zmierzona na zdjęciu,
- $\alpha_1, \alpha_2$  - kąty zmierzone podczas wykonywania zdjęcia pomiędzy osią optyczną kamery i prostymi wychodzącymi z wyznaczonych w terenie punktów

W niniejszym materiale zostanie przedstawiony przebieg i wyniki eksperymentu, którego celem było określenie odległości obrazowej podwodnej kamery fotogrametrycznej z wykorzystaniem powyższego równania. Badania zrealizowano w ramach projektu badawczego pn.: *Pomiary wielkości uszkodzeń i gabarytów obiektów podwodnych metodą wzorca świetlnego*, projekt Nr O N502 274039 finansowanego ze środków na naukę w latach 2010 – 2012. Eksperyment ten stanowił jedną z faz cyklu badań, których celem było opracowanie metody określania wymiarów uszkodzeń obiektów podwodnych za pomocą systemu wizyjnego i nakładanego na badany obiekt wzorca świetlnego [6]. Podczas badań wykorzystano specjalnie do tego celu skonstruowaną i zbudowaną kamerę podwodną CYKLOP.

## 1. INTRODUCTION

Research connected with the application of underwater photogrammetry in marine engineering has been conducted by the Department of Underwater Works Technology of the Naval Academy in Gdynia for several years now. Generally speaking, the research is focused on the preparation of a method for allowing the evaluation of a technical state of surfaces [a1] of submerged objects, via the use of a visual system installed on an unmanned underwater vehicle. With consideration of the objective of the undertaken activities, the works are categorized as belonging to technical diagnostics, however with regard to the means and methods aimed at reaching the researched objects, these are more related to underwater works technology, though due to the research method they seem closely related to low-range photogrammetry [5, 6].

An unambiguous determination of field coordinates, based on given background coordinates situated on a survey photograph, requires an introduction of two quantities into the equation: image distance of the camera (focal) and spatial orientation of a measurement camera [3, 6]. The latter value is closely related to the conditions in which the photograph is obtained, whereas the first one is mainly connected with the construction of an underwater photogrammetry camera. Usually when constructing such a camera the focal length is known only for the air – lens optical system. This is a parameter specified by the camera's manufacturer. However, when constructing an underwater camera an additional element in the form of an illuminator [a2] isolating the camera from the water space is introduced, which changes the optics provided by the manufacturer. Moreover, the technical observation of underwater objects involves the consideration of one additional element, namely the water present between the object and the illuminator. In such a case it is possible to state that to some extent a new optical system is established: water – illuminator – air. The image distance value for such a system is unknown and needs to be experimentally determined. Another publication by the author titled: *The method for determining the focal length of a photogrammetry camera*, presents the theoretical basis that may also be applied in the said experiment [4]. In general terms, the equation used in determining the focal length of the camera is as follows [4]:

$$f = \frac{k(x_2 - x_1)}{x_1 \cot \alpha_1 - x_2 \cot \alpha_2} \quad (1)$$

where:

- f - focal length of the camera,
- $x_1$  - distance between a designated point in field and a nodal point measured in the photograph,
- $x_2$  - distance between the second designated point and a nodal point measured in the photograph,
- $\alpha_1, \alpha_2$  - angles measured while taking the photograph between the camera's optical axis and the straight lines drawn from the designated points in field.

The following material presents the course and results of an experiment aimed at determining the focal length of an underwater photogrammetry camera with the use of the above equation. The research was carried out within the framework of a scientific project entitled: *Measurements of dimensions or damage of underwater objects by vision system optics*, project No. O N502 274039 financed from educational funds in the years 2010 – 2012. The experiment constituted one of the phases of a research cycle aimed at the preparation of a method for determining the scope of damage to underwater objects via the use of a visual system and an optical model placed on a given object [6]. The experiment was conducted with the use of a specially constructed CYKLOP underwater camera.

## 2. DOŚWIADCZALNE WYZNACZENIE ODLEGŁOŚCI OBRAZOWEJ KAMERY CYKLOP

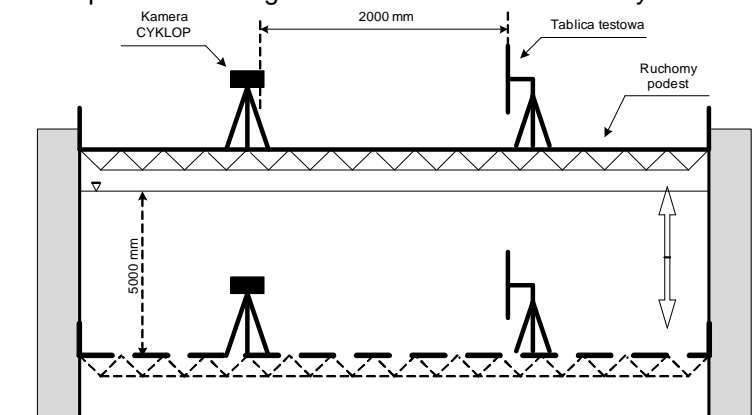
Badania wykonano dzięki uprzejmości Ośrodka Szkolenia Nurków i Płetwonurków Wojska Polskiego (OSNiP WP Gdynia) w specjalnym basenie nurkowym o głębokości 10 metrów wyposażonym w ruchomy podest umożliwiający regulowanie głębokości na której realizowano pomiary i utrzymanie wzajemnego usytuowania statywu kamery oraz tablicy wzorcowej ustalonego przed zanurzeniem podestu. Przed rozpoczęciem badań na ruchomym podeście nad powierzchnią wody ustawiono na statywach kamerę CYKLOP oraz tablicę testową. Odległość pomiędzy płaszczyznami obiektywu a tablicą ustalono na 2000 mm. Po sprawdzeniu i skorygowaniu poziomów cały podest wraz z tak przygotowanym stanowiskiem pomiarowym został zanurzony na głębokości 5 metrów (Rys. 1 i 2). Tablica testowa wykorzystana w pomiarach to specjalnie przygotowana tablica o wymiarach 1 x 1 m na której umieszczono różne symbole, znaki i figury geometryczne (Rys. 3).

Wymagane do obliczenia równania (1) odległości i kąty na tablicy testowej są reprezentowane w następujący sposób:

- odcinek  $k$  – to odcinek AO, (zmierzony na zdjęciu),
- odcinek  $x_1$  – to odcinek A1, (zmierzony na zdjęciu),
- odcinek  $x_2$  – to odcinek A5, (zmierzony na zdjęciu),
- kąt  $\alpha_1$  – to kąt pomiędzy punktem A i punktem 1 (zmierzony kamerą podczas pomiarów),
- kąt  $\alpha_2$  – to kąt pomiędzy punktem A i punktem 5 (zmierzony kamerą podczas pomiarów).



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe zorganizowane na basenie nurkowym OSNiP WP w Gdyni.



Rys. 2. Stanowisko pomiarowe na ruchomym podeście w basenie nurkowym OSNiP WP (rysunek poglądowy bez skali).

## 2. EXPERIMENTAL SPECIFICATION OF THE FOCAL LENGTH OF THE CYKLOP CAMERA

The research was performed, courtesy of the Polish Army Training Centre for Divers and Scuba Divers in Gdynia, in a special swimming pool with a depth of 10 m and equipped with a moveable platform enabling regulation of depths at which the measurements were taken as well as maintenance of the mutual position of the camera tripod and model board specified before platform submergence. Before the experiment commencement the CYKLOP camera and the test board were mounted on the moveable platform over the water surface. The distance between the lens and the board was set at 2000 mm. After some minor corrections to its mechanism, the platform was verified as level and, the entire platform with the prepared measuring station was immersed to a depth of 5 metres (Fig. 1 & 2). The test board used in the measurements was a specially prepared board with the dimensions of 1 x 1 m on which various symbols, signs and geometric figures were placed (Fig. 3).

The distances and angles required in the equation's calculation (1) on the test board are presented as follows:

- segment  $k$  – is the A0 segment (measured on the photograph),
- segment  $x_1$  – is the A1 segment (measured on the photograph),
- segment  $x_2$  – is the A5 segment (measured on the photograph),
- angle  $\alpha_1$  – is the angle between point A and point 1 (measured with the camera during the measurements),
- angle  $\alpha_2$  – is the angle between point A and point 5 (measured with the camera during the measurements).



Fig. 1. Measuring station set up at the diving pool of the Polish Army Training Centre in Gdynia.

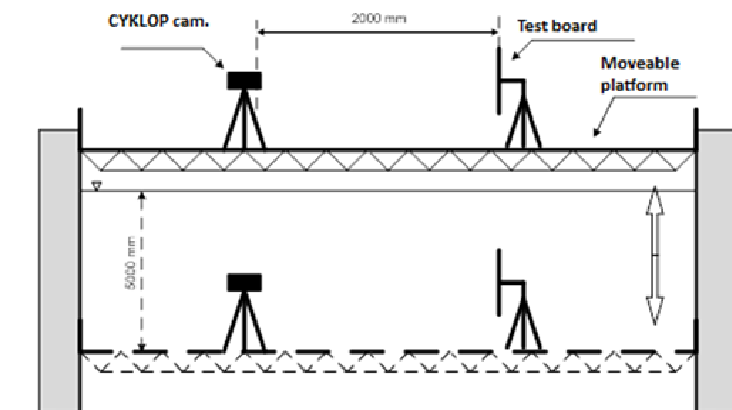
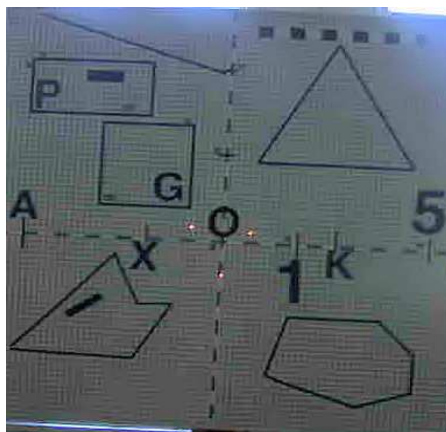
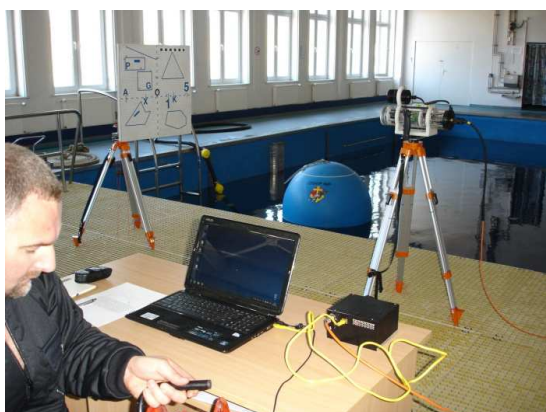


Fig. 2. Measuring station on a moveable platform at the diving pool of the Polish Army Training centre (demonstrative figure without scaling).



Rys. 3. Wykorzystana w pomiarach tablica testowa.

Podczas badań kamerę Cyklop obsługiwały dwie osoby. Nurek znajdujący się pod wodą, który obsługiwał podwodną część kamery oraz operator pulpitu na powierzchni (Rys. 4 i Rys. 5). Za pomocą bezprzewodowego systemu łączności podwodnej nurek był instruowany przez operatora jak ma sterować położeniem kamery. W pierwszej kolejności, nurek ustawiał kamerę w taki sposób aby jej oś optyczna pokrywała się z punktem O na tablicy testowej. Następnie przesuwał kamerę w płaszczyźnie poziomej w taki sposób, aby oś optyczna pokrywała się z punktem A. Dane otrzymywane za pomocą czujników pokładowych kamery były zapisywane na twardym dysku komputera będącego pulpitem operatorskim kamery. Po ustawieniu osi optycznej kamery na p. A, wykonywano tzw. kalibrację kamery, czyli zerowano wskazania jej czujników pomiarowych (za wyjątkiem pomiaru odległości). Następnie nurek przesuwał kamerę w prawo aż do chwili kiedy oś optyczna kamery pokryła się z punktem 1 na tablicy testowej. W ten sposób mierzono wartość kąta  $\alpha_1$ . Po zarchiwizowaniu pomiaru nurek przesuwał kamerę dalej w prawo, aż do momentu, w którym oś optyczna pokryła się z punktem 5. Był to pomiar wartości kąta  $\alpha_2$ . Następnie nurek przesuwał kamerę w lewo do położenia, w którym oś optyczna ponownie pokrywała się z punktem A. W tym momencie ponownie kalibrowano czujniki pomiarowe a po tej operacji czynności pomiarowe były powtarzane. Zgodnie z opracowaną metodyką określania odległości obrazowej kamery, wielkości kątów mierzono „w terenie” a odległości odcinków wymagane do rozwiązania równania (1) pomierzono na zdjęciu. Na kolejnych rysunkach przedstawiono przykłady dwóch pozyskanych podczas eksperymentu kadrów.



A



B

Rys. 4. Operator powierzchniowej części kamery (A) – podest z częścią podwodną jeszcze na powierzchni – i stanowisko pomiarowe w położeniu roboczym na głębokości 5 metrów przed rozpoczęciem pomiarów (B).

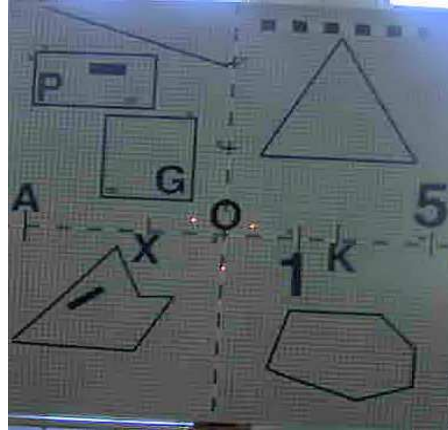


Fig. 3. The test board used in the measurements.

In the course of the experiment the Cyklop camera was operated by two persons: a diver operating its submerged part and the control panel operator located on the surface (Fig. 4 & 5). The diver was instructed by the operator on camera position via a cordless communication system. First, the diver placed the camera in such a way as to make sure that its optical axis corresponded to point O on the test board. Next, he moved the camera along the horizontal plane to make the optical axis match point A. The data obtained with the use of camera sensors were recorded on the hard drive of the computer constituting the camera's control panel. After positioning the camera's optical axis on point A the so-called camera calibration was performed, i.e. its sensor indications were reset (with the exception of the focal length measurement). Next, the diver moved the camera to the right until its optical axis matched point 1 on the test board. This allowed the measurement of the value of angle  $\alpha_1$ . After the result was recorded the diver moved the camera further to the right until its optical axis matched point 5 where the measurement of the angle  $\alpha_2$  was taken. Following this, the diver moved the camera to the left until its optical axis matched point A again. At this point the sensors were recalibrated and the measurements were repeated.

According to the prepared methodology for determining the camera's focal length, the angles were measured 'in field' whereas the distances of the segments required to solve the equation (1) were measured on the photograph. The figures below present exemplary frames obtained in the course of the experiment.



A

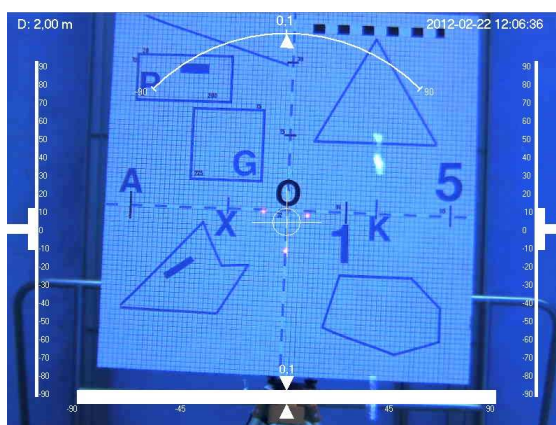


B

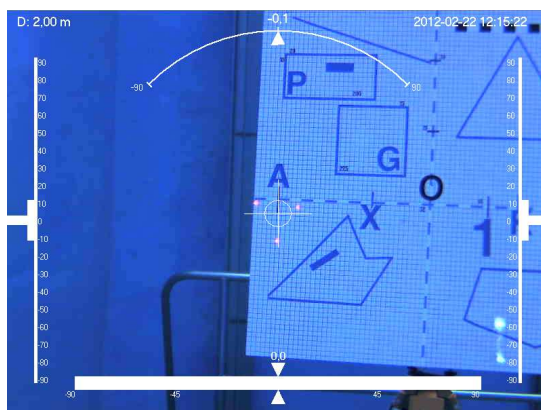
Fig. 4. Operator of the surface part of the camera (A) – platform with the underwater part still on the surface – and measuring station in the working position at the depth of 5 m before measurement commencement (B).



Rys. 5. Nurek obsługujący podwodną część kamery Cyklop podczas pomiarów.



Rys. 6. Przykładowy kadr uzyskany podczas pomiarów.



Rys. 7. Przykładowy kadr uzyskany podczas pomiarów.

Wielkości kątów  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  wymagane do obliczenia równania (1) odczytano bezpośrednio podczas realizacji pomiarów, natomiast odległości odcinków  $k$ ,  $x_1$  i  $x_2$  potrzebne do rozwiązania tego równania mierzono na zdjęciu (kadrze) uzyskanym w trakcie realizacji badań. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabelach poniżej.





Fig. 5. Diver operating the underwater part of the Cyclop camera in the course of measurements.

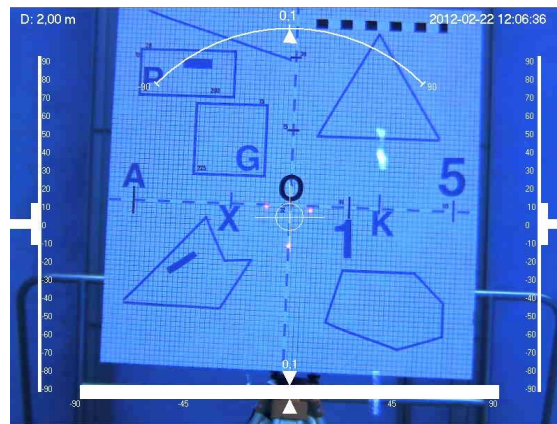


Fig. 6. An exemplary frame obtained in the course of measurements.

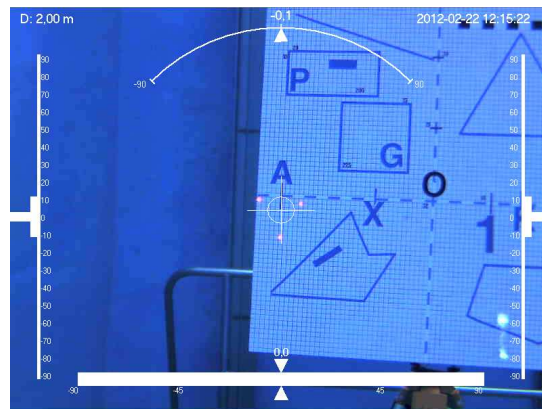


Fig. 7. An exemplary frame obtained in the course of measurements.

The values of  $\alpha_1$  and  $\alpha_2$  required for equation (1) calculation were recorded during measurement realization, whereas the length of  $k$ ,  $x_1$  and  $x_2$  segments necessary for solving the equation were measured on the photograph (frame) obtained during research realization. The calculation results are presented in the tables below.

Tabela 1.

## Wyniki pomiarów odległości na analizowanych kadrach.

Lp.	Kadr Nr	$k_i$	$k$	$x_{1i}$	$x_1$	$x_{2i}$	$x_2$
		[m]		[m]		[m]	
1	8	0,075	0,075±0,001	0,104	0,103±0,001	0,154	0,153±0,001
2	9	0,075		0,104		0,154	
3	10	0,075		0,103		0,153	
4	11	0,075		0,103		0,153	
5	13	0,076		0,104		0,153	
6	17	0,075		0,104		0,154	
7	23	0,076		0,104		0,154	
8	31	0,076		0,104		0,154	
9	34	0,075		0,103		0,153	
10	37	0,075		0,103		0,154	
11	40	0,076		0,103		0,154	
12	44	0,077		0,106		0,156	
13	51	0,072		0,1		0,149	
średnia		0,075	średnia	0,103	średnia	0,153	
mediana		0,075	mediana	0,104	mediana	0,154	
$\overline{S}_{k_i}$		0,001	$\overline{S}_{x_1}$	0,001	$\overline{S}_{x_2}$	0,001	

Tabela 2.

Wyniki pomiarów kąta  $\alpha_1$ .

Lp.	kadr Nr	$\alpha_{1i}$	$\alpha_1$
		[deg]	
1	13	7,2	6,92±0,37
2	20	6,8	
3	25	6,7	
4	31	7,4	
5	40	6,5	
średnia		6,92	
mediana		6,86	
$\overline{S}_{\alpha_1}$		0,37	

Tabela 3.

Wyniki pomiarów kąta  $\alpha_2$ .

Lp.	kadr Nr	$\alpha_{2i}$	$\alpha_2$
		[deg]	
1	15	10,6	10,41±0,146
2	21	10,4	
3	22	10,4	
4	26	10,6	
5	27	10,2	
6	33	10,4	
7	42	10,3	
średnia		10,41	
mediana		10,40	
$\overline{S}_{\alpha_2}$		0,146	

Table 1.

Length measurement results for analysed frames.

No.	Frame	$k_i$	$k$	$x_{1i}$	$x_1$	$x_{2i}$	$x_2$
		[m]		[m]		[m]	
1	8	0.075	0.075±0.001	0.104	0.103±0.001	0.154	0.153±0.001
2	9	0.075		0.104			
3	10	0.075		0.103			
4	11	0.075		0.103			
5	13	0.076		0.104			
6	17	0.075		0.104			
7	23	0.076		0.104			
8	31	0.076		0.104			
9	34	0.075		0.103			
10	37	0.075		0.103			
11	40	0.076		0.103			
12	44	0.077		0.106			
13	51	0.072		0.1			
Mean		0.075	mean	0.103	mean	0.153	
Median		0.075	median	0.104	median	0.154	
$\overline{s_{k_i}}$		0.001	$\overline{s_{x_1}}$	0.001	$\overline{s_{x_2}}$	0.001	

Table 2.

Measurement results for the angle  $\alpha_1$ .

No.	Frame	$\alpha_{1i}$	$\alpha_1$
		[deg]	
1	13	7.2	6.92±0.37
2	20	6.8	
3	25	6.7	
4	31	7.4	
5	40	6.5	
Mean		6.92	
median		6.86	
$\overline{s_{\alpha_1}}$		0.37	

Table 3.

Measurement results for the angle  $\alpha_2$ .

No.	Frame	$\alpha_{2i}$	$\alpha_2$
		[deg]	
1	15	10.6	10.41±0.146
2	21	10.4	
3	22	10.4	
4	26	10.6	
5	27	10.2	
6	33	10.4	
7	42	10.3	
mean		10.41	
median		10.40	
$\overline{s_{\alpha_2}}$		0.146	

Obliczenia odległości obrazowej wykonano zgodnie z wyprowadzoną formułą (1):

$$f = \frac{k(x_2 - x_1)}{x_1 \cot \alpha_1 - x_2 \cot \alpha_2} \quad (1)$$

$$f = \frac{0,074(0,152 - 0,102)}{0,102 \cot 6,55 - 0,152 \cot 10,26} = 7,61 \text{ [cm]}$$

### 3. DYSKUSJA WYNIKÓW

Badaniom podlegała kamera CYKLOP wyposażona w kamerę cyfrową o następujących parametrach: IQEYE 752 1200x1600 pxl, Przekątna przetwornika  $d = \frac{1}{2}$ " (FO), Przetwornik CMOS 2 MPxl, Obiektyw NOVUS NVL-MP4012/IR /  $f_r = 4 - 12$  mm,  $d = \frac{1}{2}$ " ; poziomy kąt widzenia od 92 do 31,3 st.[6]. Ponieważ pole widzenia aparatu cyfrowego jest równoważne polu widzenia obiektywu o dłuższej ogniskowej zastosowanego do aparatu małoobrazkowego (analog 35 mm) z tego powodu dla aparatu (kamery) cyfrowej ogniskową rzeczywistą podaną przez producenta (np.  $f_r \in (4 \div 12) \text{ mm}$ ) należy przeliczyć na ogniskową równoważną (ekwiwalentną), czyli taką jaką miałyby obiektyw aparatu małoobrazkowego zapewniający takie samo odwzorowanie jakie daje obiektyw aparatu cyfrowego na swojej matrycy (przetworniku). Ogniskową ekwiwalentną aparatu cyfrowego oblicza się z zależności [1]:

$$f_e = \frac{f_r}{f_n} \cdot f_{n35} \quad (2)$$

gdzie:

- $f_e$  - ogniskowa ekwiwalentna aparatu cyfrowego,
- $f_r$  - ogniskowa rzeczywista aparatu cyfrowego,
- $f_n$  - ogniskowa normalna matrycy
- $f_{n35}$  - ogniskowa normalna małoobrazkowego aparatu analogowego (43,3 mm).

Ogniskowa normalna to ogniskowa równa wielkości przekątnej elementu rejestrującego (matrycy, błony fotograficznej). Dla aparatów (kamer) cyfrowych dane podawane przez producentów to wielkość matrycy określona w tzw. formacie optycznym oznaczanym symbolem np.  $d = \frac{1}{2}$ ".

Nie jest to wymiar równy połowie długości 1 cala jakby się mogło wydawać. Symbol formatu optycznego wywodzi się z lat 50-tych XX wieku i jest związany z eksperymentami z telewizją [1]. Elementy rejestrujące obraz umieszczane były na końcu rury o średnicy wyrażanej w ułamku cala. Z kolistego elementu o danej średnicy chciano uzyskać prostokąt o przekątnej równej średnicy koła i stosunku boków 3:4. W wyniku tych eksperymentów zauważono, że z kolistego elementu do uzyskania prostokąta o wymaganych proporcjach wykorzystuje się jedynie  $\frac{2}{3}$  jego pełnego wymiaru. Przekątna takiego elementu jest mniejsza, ale to właśnie tę większą średnicę wykorzystano jako symbol wielkości matrycy wyrażony w ułamkach cala. Z tych powodów, aby wyrazić przekątną matrycy w milimetrach należy zastosować następującą zależność:

$$d_{\text{m}} = \frac{2d}{3} \quad (3)$$

gdzie:

- $d_{\text{m}}$  - przekątna matrycy wyrażona w milimetrach,
- $d$  - przekątna matrycy wyrażona w formacie optycznym.

Focal length calculations were performed in accordance with the derived formula (1):

$$f = \frac{k(x_2 - x_1)}{x_1 \cot \alpha_1 - x_2 \cot \alpha_2} \quad (1)$$

$$f = \frac{0.074(0.152 - 0.102)}{0.102 \cot 6.55 - 0.152 \cot 10.26} = 7.61 \text{ [cm]}$$

### 3. DISCUSSION OF RESULTS

The tests were carried out on the CYKLOP camera equipped with a digital camera of the following parameters: IQEYE 752 1200x1600 pxl, Converter diameter  $d = \frac{1}{2}$ " (FO), Converter CMOS 2 MPxl, Lens NOVUS NVL-MP4012/IR /  $f_r = 4 - 12$  mm,  $d = \frac{1}{2}$ "; horizontal vision angle from 92 to 31.3 degrees. [6]. As the field of vision of a digital camera is equal to the field of vision of a lens of longer focal length when compared with the used 35 mm camera, the real focal length for the camera specified by the manufacturer (e.g.  $f_r \in (4 \div 12) \text{mm}$ ) needs to be calculated into an equivalent focal length, i.e. that of a 35 mm camera ensuring the same transfer as that obtained with the lens of a digital camera on its matrix (converter). Equivalent focal length of a digital camera is calculated from the following equation [1]:

$$f_s = \frac{f_r}{f_m} \cdot f_{m35} \quad (2)$$

where:

- $f_s$  - equivalent focal length of a digital camera,
- $f_r$  - real focal length of a digital camera,
- $f_m$  - regular focal length of the matrix
- $f_{m35}$  - regular focal length of an analogue camera (43.3 mm).

Regular focal length is the focal length equal to the diagonal of recording components (matrix, photographic film). From the data provided by producers [a3] of digital cameras, the focal length is the size of the matrix specified in the so-called optical format marked, for instance, with the symbol  $d = \frac{1}{2}$ ".

The provided dimension is not equal to half an inch, as it may seem. An optical format symbol was established in the 1950s and is related to television experiments [1]. Picture recording components were placed at the end of a pipe with the diameter expressed in a fraction of an inch. The aim was to obtain from a circular component with a given diameter a rectangle with the diagonal equal to the said diameter and the side ratio of 3:4. The experiments resulted in the conclusion that in order to obtain a rectangle of the required proportions it is necessary to use only 2/3 of its full dimensions. The diagonal of such a component is smaller but it was the larger diameter that was used as a matrix size symbol expressed in fractions of an inch. For this reason in order to express matrix diagonal in millimetres we need to apply the following interrelation:

$$d_m = \frac{2d}{3} \quad (3)$$

where:

- $d_m$  - matrix diagonal expressed in millimetres,
- $d$  - matrix diagonal expressed in optical format.

Ostatecznie po podstawieniu równania (3) do (4) otrzymujemy zależność na ogniskową równoważną aparatu cyfrowego:

$$f_s = \frac{f_r}{d_m} \cdot f_{nis} = \frac{f_r}{\frac{2d}{3}} \cdot f_{nis} = \frac{3f_r}{2d} \cdot f_{nis} \quad (4)$$

Dla kamery IQEYE 752 o ogniskowej  $f_r \in (4 \div 12)mm$  najkrótsza ogniskowa równoważna będzie wynosić:

$$f_{smin} = \frac{3 \cdot 4}{2 \cdot 12} \cdot 43,3 = \frac{12}{24} \cdot 43,3 = 0,5 \cdot 43,3 = 21,65 [mm] = 2,17 [cm] \quad (5)$$

Natomiast najdłuższa ogniskowa równoważna dla kamery z tym przetwornikiem wyniesie:

$$f_{smax} = \frac{3 \cdot 12}{2 \cdot 12} \cdot 43,3 = \frac{36}{24} \cdot 43,3 = 1,5 \cdot 43,3 = 64,95 [mm] = 6,50 [cm] \quad (6)$$

Dla układu optycznego zastosowanego w kamerze CYKLOP należy jeszcze określić wpływy iluminatora płaskorównoległego na zmianę położenia ogniskowej w płaszczyźnie przedmiotowej i obrazowej. Dla obiektów fotografowanych z bliskiej odległości iluminator powoduje zmianę położenia ogniska o wielkość  $\Delta x$  w przestrzeni przedmiotowej, którą liczy się z zależności:

$$\Delta x = \frac{n_s - 1}{n_s} \cdot u \quad (7)$$

gdzie:

- $n_s$  - współczynnik załamania światła w szkłe, (przyjmuje się 1,5 dla szkła akrylowego 1,491 – ISO 489),
- $u$  - grubość iluminatora (dla kamery CYKLOP 20 [mm]).

Dla kamery CYKLOP wartość ta wyniesie:

$$\Delta x = \frac{1,491 - 1}{1,491} \cdot 20 = \frac{0,491}{1,491} \cdot 20 = 0,3293u \cong 0,33u \quad (8)$$

Dla  $u = 20[mm]$ ,  $\Delta x$  wyniesie zatem:

$$\Delta x = 0,33u = 0,33 \cdot 20 = 6,6 [mm] \quad (9)$$

Natomiast zmiana położenia ogniska w przestrzeni obrazowej określana jest następującym wzorem:

$$\Delta'x = \Delta x \left( \frac{f}{l_p} \right)^2 \quad (10)$$

gdzie:

- $f$  - ogniskowa w powietrzu,
- $l_p$  - odległość fotografowania.

Finally, after substituting equation (3) with (4) we receive an interrelation for equivalent focal length of a digital camera:

$$f_s = \frac{f_r}{d_m} \cdot f_{nzs} = \frac{f_r}{\frac{2d}{3}} \cdot f_{nzs} = \frac{3f_r}{2d} \cdot f_{nzs} \quad (4)$$

For IQEYE 752 camera of the focal length equal to  $f_r \in (4 \div 12) \text{ mm}$  the shortest equivalent focal length will be as follows:

$$f_{s\min} = \frac{3 \cdot 4}{2 \cdot 12} \cdot 43.3 = \frac{12}{24} \cdot 43.3 = 0.5 \cdot 43.3 = 21.65 [\text{mm}] = 2.17 [\text{cm}] \quad (5)$$

Whereas the longest focal length for a camera with this converter will amount to:

$$f_{s\max} = \frac{3 \cdot 12}{2 \cdot 12} \cdot 43.3 = \frac{36}{24} \cdot 43.3 = 1.5 \cdot 43.3 = 64.95 [\text{mm}] = 6.50 [\text{cm}] \quad (6)$$

In the case of an optical system used in the CYKLOP camera it is also necessary to determine the impact of an optical-flat illuminator on the change of focus position in the object and image surfaces. For objects photographed from a close distance the illuminator will cause a change in focus position by  $\Delta x$  in the object surface, which is calculated based on the following formula:

$$\Delta x = \frac{n_g - 1}{n_g} \cdot u \quad (7)$$

where:

- $n_g$  - coefficient of light refraction in glass (the adopted value is 1.5 for acrylic glass 1.491 – ISO 489),
- $u$  - illuminator thickness (for CYKLOP 20 camera [mm]).

For the CYKLOP camera this value will be as follows:

$$\Delta x = \frac{1.491 - 1}{1.491} \cdot 20 = \frac{0.491}{1.491} \cdot 20 = 0.3293u \cong 0.33u \quad (8)$$

Thus for  $u = 20 [\text{mm}]$ ,  $\Delta x$  will reach:

$$\Delta x = 0.33u = 0.33 \cdot 20 = 6.6 [\text{mm}] \quad (9)$$

Focus position change in the image surface, on the other hand, is determined by the following formula:

$$\Delta'x = \Delta x \left( \frac{f}{l_p} \right)^2 \quad (10)$$

where:

- $f$  - focal length in the air,
- $l_p$  - photography distance.

Dla najkrótszej ogniskowej kamery CYKLOP ( $f_{s_{min}}$ ) i odległości fotografowania  $l = 2000[mm]$  wartość ta wyniesie:

$$\Delta'x_{min} = 6,6 \left( \frac{21,7}{2000} \right)^2 = 6,6 \cdot (0,000118)^2 = 0,000779 [mm] \quad (11)$$

Co stanowi 0,0038‰, grubości iluminatora ( $u = 2$  cm). Są to zniekształcenia tak małe, że można ich nie uwzględniać. Natomiast dla najdłuższej ogniskowej kamery CYKLOP ( $f_{s_{max}}$ ) i tej samej odległości fotografowania, wartość ta wyniesie:

$$\Delta'x_{max} = 6,6 \left( \frac{65}{2000} \right)^2 = 6,6 \cdot (0,0325)^2 = 6,6 \cdot 0,00106 = 0,0069 [mm] \quad (12)$$

Co stanowi 0,035‰, grubości iluminatora ( $u = 2$  cm). Też można tej wielkości nie uwzględniać. Iluminator płaskościenny wprowadza również dystorsję w przestrzeni przedmiotowej, którą określa się z równania:

$$\Delta y = u \cdot \operatorname{tg} \beta_p \left[ n_g^2 + \operatorname{tg}^2 \beta_p (n_g^2 - 1) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (13)$$

gdzie:

$\beta_p$  - pionowy kąt padania światła na obiektyw.

Producent kamery nie podał w precyzyjnych danych dotyczących pionowego i poziomego kąta padania światła na obiektyw, dane te należy więc obliczyć z zależności:

$$\gamma = 2 \operatorname{arctg} \left( \frac{\frac{1}{2} p}{f_s} \right) \quad (14)$$

$$\beta_p = 2 \operatorname{arctg} \left( \frac{\frac{1}{2} h}{f_s} \right) \quad (15)$$

Gdzie:  $\gamma$  - poziomy kąt widzenia,  $\beta_p$  to pionowy kąt widzenia, a  $p$  i  $h$  to wymiary matrycy poziomy i pionowy. Ponieważ do obliczeń przyjmujemy wielkość ogniskowej równoważnej dla aparatu małoobrazkowego w standardzie 35 mm, wielkości te wyniosą odpowiednio:  $p = 36 [mm], h = 24 [mm]$ .

Wartości kątów należy policzyć dla wyznaczonych minimalnych i maksymalnych wartości ogniskowych równoważnych ( $f_{s_{min}}, f_{s_{max}}$ ), wtedy:

Dla kąta poziomego:

$$\gamma_{min} = 2 \operatorname{arctg} \left( \frac{\frac{1}{2} \cdot 36}{21,7} \right) = 2 \operatorname{arctg} (0,829) = 79,35^\circ \quad (16)$$

$$\gamma_{max} = 2 \operatorname{arctg} \left( \frac{\frac{1}{2} \cdot 36}{65} \right) = 2 \operatorname{arctg} (0,2769) = 30,95^\circ \quad (17)$$



For the shortest focal length of the CYKLOP camera ( $f_{e_{min}}$ ) and photography distance  $l = 2000[mm]$  this value will amount to:

$$\Delta'x_{min} = 6,6 \left( \frac{21,7}{2000} \right)^2 = 6,6 \cdot (0,000118)^2 = 0,000779 [mm] \quad (11)$$

which is 0.0038% of the illuminator's thickness ( $u = 2$  cm). Such insignificant distortions do not need to be taken into account. For the longest focal length of the CYKLOP camera ( $f_{e_{max}}$ ) and the same photography distance, on the other hand, the value will reach:

$$\Delta'x_{max} = 6,6 \left( \frac{65}{2000} \right)^2 = 6,6 \cdot (0,0325)^2 = 6,6 \cdot 0,00106 = 0,0069 [mm] \quad (12)$$

which constitutes 0.035% of the illuminator's thickness ( $u = 2$  cm). This value also may be omitted in calculations. A flat illuminator also introduces a distortion in the object surface, which is determined with the following equation:

$$\Delta y = u \cdot \operatorname{tg} \beta_p [n_g^2 + \operatorname{tg}^2 \beta_p (n_g^2 - 1)]^{-\frac{1}{2}} \quad (13)$$

where:

$\beta_p$  - vertical angle of incidence on the lens.

The camera's manufacturer does not provide accurate data concerning the vertical and horizontal angles of incidence of light on the lens. These are calculated on the base of the following equations:

$$\gamma = 2 \operatorname{arctg} \left( \frac{\frac{1}{2} p}{f_e} \right) \quad (14)$$

$$\beta_p = 2 \operatorname{arctg} \left( \frac{\frac{1}{2} h}{f_e} \right) \quad (15)$$

Where:  $\gamma$  - horizontal angle of vision,  $\beta_p$  vertical angle of vision, and  $p$  and  $h$  are the horizontal and vertical dimensions of the matrix. As the adopted value for calculations is the value of equivalent focal length for a 35 mm camera, the obtained quantities will amount to  $p = 36 [mm]$  and  $h = 24 [mm]$  respectively.

Angle values are to be calculated for the designated minimum and maximum values of equivalent focal length ( $f_{e_{min}}, f_{e_{max}}$ ), and so:

For the horizontal angle:

$$\gamma_{min} = 2 \operatorname{arctg} \left( \frac{\frac{1}{2} \cdot 36}{21,7} \right) = 2 \operatorname{arctg} (0,829) = 79,35^\circ \quad (16)$$

$$\gamma_{max} = 2 \operatorname{arctg} \left( \frac{\frac{1}{2} \cdot 36}{65} \right) = 2 \operatorname{arctg} (0,2769) = 30,95^\circ \quad (17)$$

Dla kąta pionowego:

$$\beta_{p_{\min}} = 2 \arctg \left( \frac{\frac{1}{2} \cdot 24}{21,7} \right) = 2 \arctg(0,5529) = 57,88^\circ \quad (18)$$

$$\beta_{p_{\max}} = 2 \arctg \left( \frac{\frac{1}{2} \cdot 24}{65} \right) = 2 \arctg(0,1846) = 20,92^\circ \quad (19)$$

Następnie podstawiając wyniki obliczeń z równań (19) i (17) do równania (13) otrzymamy minimalne i maksymalne wartości dystorsji w przestrzeni przedmiotowej ( $\Delta y$ ):

$$\Delta y_{\min} = u \cdot \operatorname{tg} 57,88 [(1,491)^2 + \operatorname{tg}^2 57,88 [(1,491)^2 - 1]]^{-\frac{1}{2}} \quad (20)$$

$$\Delta y_{\min} = 13,8 \text{ [mm]} \quad (21)$$

$$\Delta y_{\max} = u \cdot \operatorname{tg} 20,92 [(1,491)^2 + \operatorname{tg}^2 20,92 [(1,491)^2 - 1]]^{-\frac{1}{2}} \quad (22)$$

$$\Delta y_{\max} = 4,93 \text{ [mm]} \quad (23)$$

Wówczas dla przestrzeni obrazowej zmiany położenia ogniska będą wynosić odpowiednio:

$$\Delta' y_{\min} = \frac{\Delta y_{\min}}{l_p} = \frac{13,8}{2000} = 0,0069 \text{ [mm]} \quad (24)$$

Co stanowi 0,035%u, grubości iluminatora ( $u = 2 \text{ cm}$ ), oraz

$$\Delta' y_{\max} = \frac{\Delta y_{\max}}{l_p} = \frac{4,93}{2000} = 0,0025 \text{ [mm]} \quad (25)$$

co stanowi 0,013%u, grubości iluminatora.

Wyniki obliczeń równań (10), (11), (24) i (25) świadczą o tym, że moc optyczna iluminatora płaskorównoległego o grubości  $u = 20 \text{ mm}$  jest praktycznie równa zero dla obiektów fotografowanych z odległości  $l_p = 2000 \text{ mm}$ . Co jest dowodem na to, że zastosowany iluminator nie zmienia skali obrazu i kąta widzenia obiektywu i co potwierdza literatura przedmiotu [2].

Dodatkową trudnością która występuje i ma znaczący wpływ na wynik przeprowadzonych pomiarów jest ich realizacja w środowisku podwodnym, ma to bezpośredni wpływ na zmianę położenia ogniskowej kamery. Ogniskową układu optycznego w wodzie oblicza się z równania [2]:

$$f_w = n_w \cdot f_e [1 - 0,78 \operatorname{tg}^2 \beta_w]^{-\frac{1}{2}} \quad (26)$$

Wielkość kątową obiektu można obliczyć posługując się prawem załamania światła Sneliusa, z którego wiemy, że:

$$\frac{\sin \beta_w}{\sin \beta_p} = \frac{n_p}{n_w} \quad (27)$$

Wtedy:

$$\beta_w = \arcsin \left( \frac{n_w \sin \beta_p}{n_p} \right) = \arcsin \left( \frac{1,33 \sin 20,92}{1} \right) = \arcsin 0,4748 = 28,35^\circ \quad (28)$$

For the vertical angle:

$$\beta_{p_{\min}} = 2 \arctg \left( \frac{\frac{1}{2} \cdot 24}{21.7} \right) = 2 \arctg (0.5529) = 57.88^\circ \quad (18)$$

$$\beta_{p_{\max}} = 2 \arctg \left( \frac{\frac{1}{2} \cdot 24}{65} \right) = 2 \arctg (0.1846) = 20.92^\circ \quad (19)$$

Next, after providing the results from equations (19) and (17) to equation [a4](13) we will receive the minimum and maximum values of distortion in the object surface ( $\Delta y$ ):

$$\Delta y_{\min} = u \cdot \tg 57.88 [(1.491)^2 + \tg^2 57.88 [(1.491)^2 - 1]]^{-\frac{1}{2}} \quad (20)$$

$$\Delta y_{\min} = 13.8 \text{ [mm]} \quad (21)$$

$$\Delta y_{\max} = u \cdot \tg 20.92 [(1.491)^2 + \tg^2 20.92 [(1.491)^2 - 1]]^{-\frac{1}{2}} \quad (22)$$

$$\Delta y_{\max} = 4.93 \text{ [mm]} \quad (23)$$

In such a case, focus position changes for the object surface will be equal to:

$$\Delta' y_{\min} = \frac{\Delta y_{\min}}{l_p} = \frac{13.8}{2000} = 0.0069 \text{ [mm]} \quad (24)$$

which constitutes 0.035%u of the illuminator's thickness ( $u = 2 \text{ cm}$ ), and

$$\Delta' y_{\max} = \frac{\Delta y_{\max}}{l_p} = \frac{4.93}{2000} = 0.0025 \text{ [mm]} \quad (25)$$

which constitutes 0.013%u of the illuminator's thickness.

The results of equations (10), (11), (24) and (25) confirm that the optical strength of a flat illuminator of the thickness of  $u = 20 \text{ mm}$  is practically equal to zero with regard to objects photographed from the distance of  $l_p = 2000 \text{ mm}$ . This proves that the applied illuminator does not change the image scale and the vision angle of the lens, which is also confirmed by the related literature [2].

An additional difficulty with a significant impact on the results of the measurements is related to the aquatic environment in which they are carried out. The focus of an optical system in water is calculated based on the following equation [2]:

$$f_w = n_w \cdot f_s [1 - 0.78 \tg^2 \beta_w]^{-\frac{1}{2}} \quad (26)$$

An angular diameter of an object may be calculated based on Snell's law of refraction, which says that:

$$\frac{\sin \beta_w}{\sin \beta_p} = \frac{n_p}{n_w} \quad (27)$$

Thus:

$$\beta_w = \arcsin \left( \frac{n_w \sin \beta_p}{n_p} \right) = \arcsin \left( \frac{1.33 \sin 20.92}{1} \right) = \arcsin 0.4748 = 28.35^\circ \quad (28)$$

Wówczas odległość ogniskowa kamery CYKLOP pod wodą wyniesie:

$$f_{w_{max}} = 1 \cdot 6,5 [1 - 0,78 \operatorname{tg}^2 28,35]^{-\frac{1}{2}} = 8,65 [1 - 0,2271]^{-\frac{1}{2}} \quad (29)$$

$$f_{w_{max}} = 6,5 \cdot 1,137 = 7,391 \cong 7,4 \text{ [cm]} \quad (30)$$

$$f_{w_{min}} = 1 \cdot 2,17 [1 - 0,78 \operatorname{tg}^2 28,35]^{-\frac{1}{2}} = 2,17 [1 - 0,2271]^{-\frac{1}{2}} \quad (31)$$

$$f_{w_{min}} = 2,17 \cdot 1,137 = 2,467 \cong 2,5 \text{ [cm]} \quad (32)$$

Z powyższych obliczeń wynika, że odległość ogniskowa kamery CYKLOP w wodzie wynosić będzie maksymalnie 7,4 cm, natomiast minimalnie odległość ta wyniesie 2,5 cm. Wartość tej wielkości ustalona na podstawie pomiarów wyniosła 7,61 cm, co wynika z zastosowanego podczas eksperymentu ustawienia obiektywu. Różnica pomiędzy maksymalną wartością analityczną ( $f_{w_{max}} = 7,4 \text{ cm}$ ) a wartością z pomiarów wynosi 0,21 cm i jest związana z błędem przyjętej metody pomiarowej. Określenia tego błędu można dokonać na podstawie szacowania niepewności metody pomiarowej rozumianej jako średni błąd kwadratowy wyników pomiarów bezpośrednich wielkości niezależnych typu  $z = f(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n)$  liczonej jako:

$$\delta(x_i) = \sqrt{\left(\frac{dz}{dx_1}\right)^2 \delta^2(x_1) + \left(\frac{dz}{dx_2}\right)^2 \delta^2(x_2) + \dots + \left(\frac{dz}{dx_n}\right)^2 \delta^2(x_n)} \quad (33)$$

W związku z powyższym dla pomiarów wykonywanych podczas eksperymentów niepewność metody pomiarowej określono z równania:

$$\delta(f_w) = \sqrt{\left(\frac{df_w}{dk}\right)^2 \delta^2(k) + \left(\frac{df_w}{dx_1}\right)^2 \delta^2(x_1) + \left(\frac{df_w}{dx_2}\right)^2 \delta^2(x_2) + \left(\frac{df_w}{d\alpha_1}\right)^2 \delta^2(\alpha_1) + \left(\frac{df_w}{d\alpha_2}\right)^2 \delta^2(\alpha_2)} \quad (34)$$

Pomiary realizowane podczas eksperymentu były wykonywane jako pomiary bezpośrednie, w związku z powyższym do obliczeń odchyłeń standardowych posłużono się wartościami poszczególnych odchyłeń podanymi w tabelach 1; 2 i 3. Po podstawieniu tych wartości do równania (34), otrzymuje się wynik  $\delta(f_w) = 0,72 \text{ cm}$ . W związku z powyższym finalny wynik eksperymentalnego wyznaczenia odległości obrazowej kamery fotogrametrycznej CYKLOP będzie wynosił:

$$f_w = 7,61 \mp 0,72 \text{ cm} \quad (35)$$

Co oznacza, że wartość ta zawiera się w przedziale:

$$f_w \in (6,89 + 8,33) \text{ cm} \quad (36)$$

Przedział ten pokrywa się z otrzymaną wartością analityczną, obliczoną z równania (1). Badania wykazały ponadto, że iluminator płaskorównoległy cechuje się zerową mocą optyczną nie mając wpływu na zmianę skali zdjęcia i kąt widzenia fotografowanego obiektu.

And so the focal length of the CYKLOP camera under water will reach:

$$f_{w_{max}} = 1 \cdot 6,5 [1 - 0,78 \operatorname{tg}^2 28,35]^{-\frac{1}{2}} = 8,65 [1 - 0,2271]^{-\frac{1}{2}} \quad (29)$$

$$f_{w_{max}} = 6,5 \cdot 1,137 = 7,391 \cong 7,4 \text{ [cm]} \quad (30)$$

$$f_{w_{min}} = 1 \cdot 2,17 [1 - 0,78 \operatorname{tg}^2 28,35]^{-\frac{1}{2}} = 2,17 [1 - 0,2271]^{-\frac{1}{2}} \quad (31)$$

$$f_{w_{min}} = 2,17 \cdot 1,137 = 2,467 \cong 2,5 \text{ [cm]} \quad (32)$$

The above calculations show that the focal length of the CYKLOP camera in water will reach the maximum value of 7.4 cm, whereas the minimum length will be 2.5 cm. The value determined on the basis of measurements was equal to 7.61 cm, which was related to the lens setting applied during the experiment. The difference between the maximum analytical value ( $f_{w_{max}} = 7.4 \text{ cm}$ ) and the value obtained in measurements reaches 0.21 cm and is related to an error in the adopted measurement method. The error may be determined based on the measurement method uncertainty assessment [a5] understood as a mean squared error of the results of direct measurement of independent values of the type  $z = f(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n)$  calculated as:

$$\delta(x_i) = \sqrt{\left(\frac{dz}{dx_1}\right)^2 \delta^2(x_1) + \left(\frac{dz}{dx_2}\right)^2 \delta^2(x_2) + \dots + \left(\frac{dz}{dx_n}\right)^2 \delta^2(x_n)} \quad (33)$$

With regard to the above statement, the uncertainty of the measurement method was specified by the following equation:

$$\delta(f_w) = \sqrt{\left(\frac{df_w}{dk}\right)^2 \delta^2(k) + \left(\frac{df_w}{dx_1}\right)^2 \delta^2(x_1) + \left(\frac{df_w}{dx_2}\right)^2 \delta^2(x_2) + \left(\frac{df_w}{d\alpha_1}\right)^2 \delta^2(\alpha_1) + \left(\frac{df_w}{d\alpha_2}\right)^2 \delta^2(\alpha_2)} \quad (34)$$

The measurements obtained during the experiment were carried out as direct measurements, thus the standard deviations calculations were based on the values of particular deviations specified in tables 1; 2 and 3. After providing these values in equation (34) we receive  $\delta(f_w) = 0.72 \text{ cm}$ . Consequently, the final result of the experiment consisting in the determination of the focal length of the CYKLOP photogrammetry camera is as follows:

$$f_w = 7.61 \mp 0.72 \text{ cm} \quad (35)$$

This means that the obtained value is contained in the interval:

$$f_w \in (6.89 + 8.33) \text{ cm} \quad (36)$$

Natomiast znaczny wpływ na zmianę skali zdjęcia (zwiększenie skali) ma fakt wykonywania pomiarów w środowisku wodnym. Wynika to ze zwiększenia wartości odległości obrazowej kamery w wodzie w stosunku do tej wartości w powietrzu. Podczas eksperymentu zaobserwowano wzrost tej wartości niemal o 20%.

Eksperyment pokazał, że możliwe jest doświadczalne wyznaczenie odległości obrazowej kamery fotogrametrycznej. Otrzymane wyniki były następnie wykorzystane w dalszych pracach badawczych związanych z pracami nad metodą pomiarów wielkości geometrycznych obiektów podwodnych za pomocą systemu wizyjnego.

The above internal corresponds to the received analytical value calculated from equation (1). Moreover the tests indicated that the illuminator is characterised by a zero optical power and, therefore, does not affect photograph scale and the angle of view of a photographed object. However, what has a significant impact on the photograph scale (scale increase) is the fact of performing measurements in the aquatic environment. This is due to an increase of the camera's focal length value in water in relation to its value in the air. During the experiments it was observed that this value increased by nearly 20%.

The experiment showed that experimental determination of the focal length of a photogrammetry camera is possible. The obtained results were used in further research on the measurement method of geometric dimensions of underwater objects with the use of a vision system.

## BIBLIOGRAPHY

1. Ang T.: Digital photograph; ARKADY, Poland 2004; ISBN 83-213-4359-7 (*in Polish*),
2. Bekier L., Kaczyński R.: Underwater photo and photogrammetry, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Poland 1985; ISBN 83-204-0669-2, (*in Polish*),
3. Dorozhynskyy O., Wrona T.: Bases of the Photogrammetry; Wydawnictwo Ploitechniki Lwowskiej, Lwów, Ukraine 2003, ISBN 966-553-333-9, (*in Polish*),
4. Olejnik A.: Method of determining focal length in photogrammetric camera; Polish Hyperbaric Research (PolHypRes) 2011, Volume 37 Issue 4, pp. 21 – 42, ISSN 1734-7009, EISSN 2084-0535; (*Polish-English bilingual publication*),
5. Olejnik A.: The system of visual assessment of technical state of underwater objects; Solid State Phenomena 2013 Volume 196, pp. 102- 106, DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.196.102; ISBN-13: 978-3-03785-274-3, (*in English*),
6. Praca zbiorowa pod red. Olejnik A.: Report from the scientific project No O N502 274039; Polish Naval Academy, Gdynia Poland 2012, (*in Polish*).

## **Экспериментальные проверки методы определения расстояния подводной камерой фотограмметрических изображений**

*В данной работе представлены ход и результаты экспериментов, связанных с экспериментальным значением расстояний подводного видения камеры фотограмметрической. Теоретические основы метода, используемого в эксперименте показаны в публикации, опубликованной в PolHyper 2011 Vol. 37 выпуск 4 процентных пункта 21-43. Исследование было проведено в рамках научно-исследовательского проекта N: 274039 N502 O.*

**Ключевые слова:** технология дноуглубительных работ, морская инженерия, подводная фотограмметрия.

**dr inż. Adam Olejnik**  
Zakład Technologii Prac Podwodnych  
Akademia Marynarki Wojennej  
ul. Śmidowicza 69, 81-103 Gdynia  
+48 58 6262746  
a.olejnik@amw.gdynia.pl