

Krzysztof Naus
Mariusz Wąż
Akademia Marynarki Wojennej

DOKŁADNOŚĆ POMIARU ODLEGŁOŚCI DWIEMA KAMERAMI CCD

STRESZCZENIE

Artykuł dotyczy oceny dokładności pomiaru odległości metodami optycznymi z zastosowaniem stereoskopowego układu kamer CCD. Wymagało to przedstawienia opisu konstrukcji układu stereoskopowego, metody obliczania rozdzielczości i błędu średniego pomiaru odległości do obiektu. Po dokonaniu analizy otrzymanych wyników zaprezentowanych na wykresach przedstawiono uogólnione wnioski.

Słowa kluczowe:

nawigacja optoelektroniczna, pomiar odległości dwiema kamerami, dokładność pomiaru odległości.

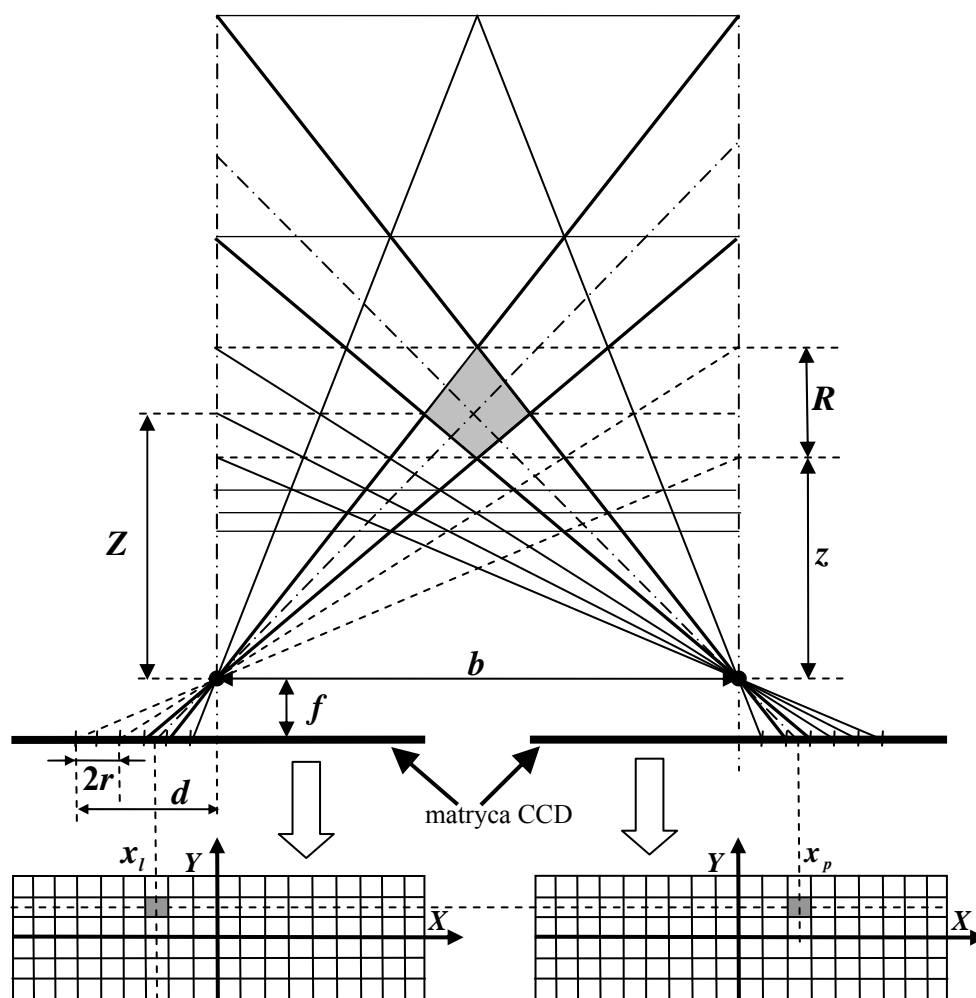
WSTĘP

Podstawowym zagadnieniem podczas analizy otoczenia na podstawie stereowizji jest opracowanie tzw. mapy głębi, odwzorowującej odległość do obserwowanych obiektów. W przypadku stereowizji dwukamerowej mapę głębi tworzy się na podstawie rozbieżności pomiędzy obrazami pochodzącymi z kamer wzajemnie od siebie oddalonych, przy czym ich osie optyczne są do siebie równoległe. Stereowizja może być zastosowana również do pomiaru odległości ze statku do znaku nawigacyjnego, ze statku do statku, ze statku do nabrzeża, z lądu do statku. W artykule przedstawiono badania dotyczące teoretycznej oceny dokładności pomiaru odległości z lądu do statku.

METODA WYZNACZANIA PARAMETRÓW DO OCENY DOKŁADNOŚCI POMIARU ODLEGŁOŚCI

Dokładność pomiaru odległości dwiema kamerami charakteryzują dwa parametry: rozdzielczości oraz błędu średniego pomiaru. Ich wielkości zależne są w głównej

mierze od sposobu ustawienia kamer względem siebie, możliwości ogniskowania układów optycznych oraz rozmiaru piksela r na ich matrycach CCD (*Charge Coupled Device*). Ustawienie kamer można opisać za pomocą długości bazy b — określającej odległość między środkami układów współrzędnych matryc CCD. Ogniskowa to kolejny parametr wpływający na dokładność pomiaru. Generalnie jej wpływ jest odwrotnie proporcjonalny do wartości błędu pomiaru odległości. Im krótsza ogniskowa, tym pomiar staje się mniej dokładny. Podobnie rozmiar pojedynczego piksela wpływa na dokładność odwzorowania szczegółów obrazu [4, 5]. Na rysunku 1. przedstawiono ideę pomiaru odległości kamerami w układzie kanonicznym.



Rys. 1. Idea pomiaru odległości kamerami w układzie kanonicznym (normalnym)

Źródło: opracowanie własne.

Wzór na rozdzielczość pomiaru odległości R można łatwo wyprowadzić, korzystając z podobieństwa trójkątów prostokątnych, których przeciwprostokątne wyznaczają promienie rzutowania. Zależności opisujące to przekształcenie mają następującą postać [4]:

$$\begin{cases} \frac{z+R}{b} = \frac{f}{d-2\cdot r} \\ \frac{z}{b} = \frac{f}{d} \end{cases} \Rightarrow R = \frac{2\cdot r\cdot z^2}{b\cdot f - 2\cdot r\cdot z}. \quad (1)$$

Błąd średni pomiaru odległości można wyznaczyć, stosując prawo przeniesienia błędów średnich. Znając błędy średnie zmiennych niezależnych b, f, p funkcji pojedynczego wyniku pomiaru [4]:

$$Z = \frac{b\cdot f}{p}, \quad (2)$$

gdzie: $p = x_l - x_p$,

można zapisać równanie błędu średniego:

$$m_z = \left[\left(\frac{\partial Z}{\partial b} \cdot m_b \right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial f} \cdot m_f \right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial p} \cdot m_p \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (3)$$

które po wyznaczeniu pochodnych cząstkowych przyjmie postać:

$$m_z = \left[\left(\frac{f}{p} \cdot m_b \right)^2 + \left(\frac{b}{p} \cdot m_f \right)^2 + \left(-\frac{b\cdot f}{p^2} \cdot m_p \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (4)$$

Przyjmując, że $p = \frac{bf}{Z}$, otrzymamy:

$$m_z = \left[\left(\frac{Z}{b} \cdot m_b \right)^2 + \left(\frac{Z}{f} \cdot m_f \right)^2 + \left(-\frac{Z^2}{b\cdot f} \cdot m_p \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (5)$$

gdzie:

m_b — błąd średni pomiaru długości bazy;

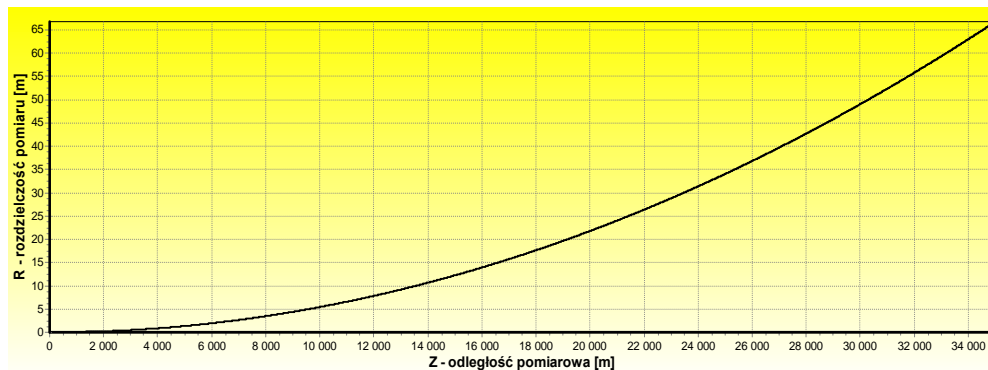
m_f — błąd średni pomiaru ogniskowej;

m_p — błąd średni pomiaru dysparycji p .

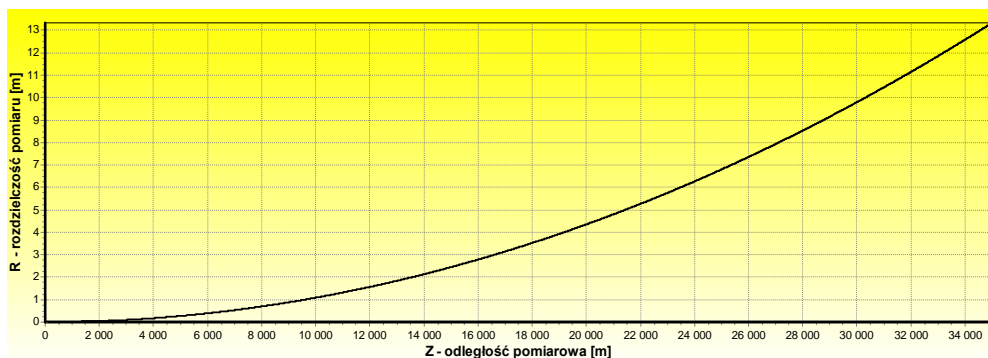
ANALIZA ROZDZIELCZOŚCI POMIARU

Opierając się na wyprowadzonej zależności (1), opracowano wykresy rozdzielczości dla dwóch układów stereoskopowych zbudowanych z kamer firmy Rolleiflex oraz Sony. Do obliczeń przyjęto, że długości bazy w obu układach równe są 1000 i 5000 metrów, długości ogniskowych równe są 250 milimetrów, rozmiar piksela na matrycy kamery Rolleiflex wynosi $6,8 \mu\text{m}$, a na matrycy kamery Sony $5,94 \mu\text{m}$.

a) długość bazy 1000 m



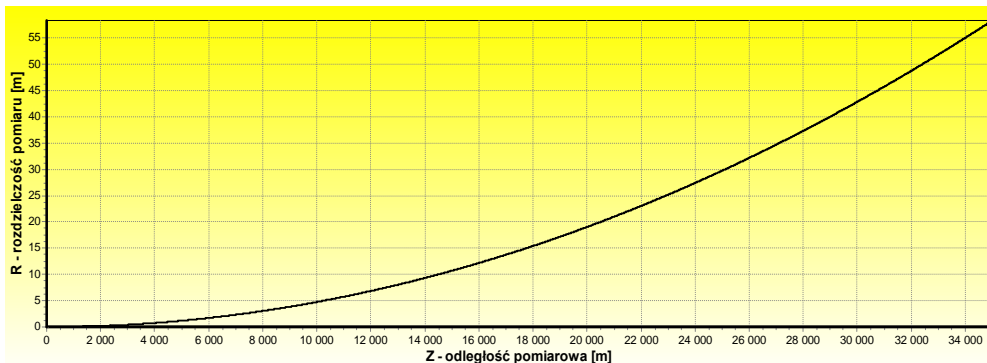
b) długość bazy 5000 m



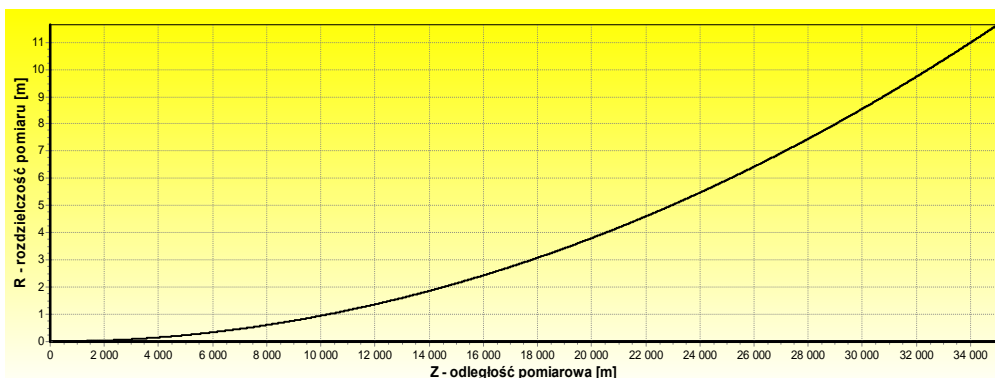
Rys. 2. Wykres zmiany rozdzielczości R pomiaru wykonanego kamerą Rolleiflex 6008

Źródło: opracowanie własne.

a) długość bazy 1000 m



b) długość bazy 5000 m



Rys. 3. Wykres zmiany rozdzielczości R pomiaru wykonanego kamerą Sony α 900 F4-5.6 G SSM

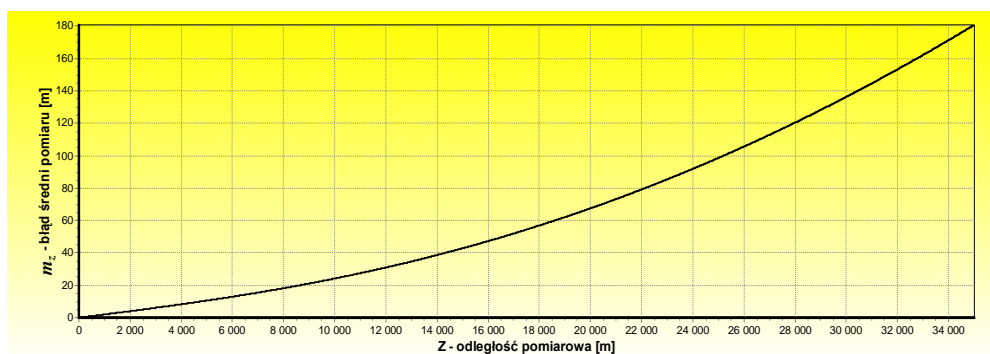
Źródło: opracowanie własne.

Po analizie wykresów można sformułować wniosek, że rozdzielczość pomiaru maleje wykładniczo w funkcji odległości. Dla długości bazy równej 5000 metrów jest ona bardzo wysoka, co gwarantuje dobrą rozróżnialność małych obiektów (takich jak na przykład kutry rybackie czy holowniki), nawet na granicy widzialności optycznej. Zmniejszenie długości bazy do 1000 metrów wpływa niekorzystnie na proces identyfikacji, szczególnie tych obiektów, które znajdują się na zbliżonym kierunku obserwacji bądź na granicy zasięgu widzialności optycznej.

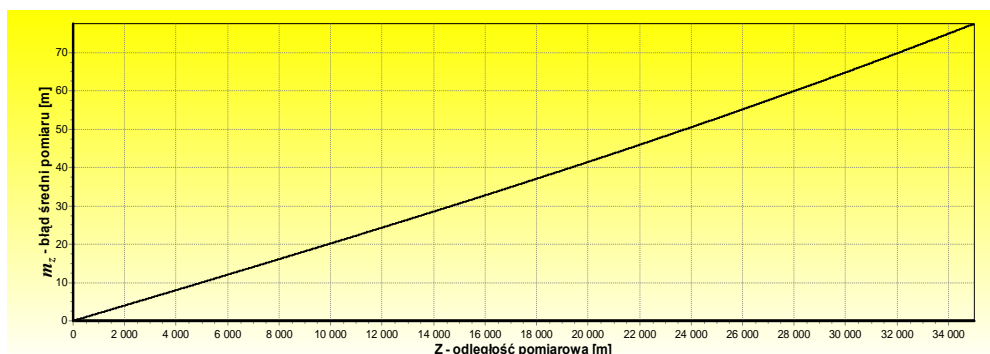
ANALIZA BŁĘDU ŚREDNIEGO POMIARU ODLEGŁOŚCI

Opierając się na wyprowadzonej zależności (5), opracowano wykresy błędu średniego pomiaru odległości dla dwóch układów stereoskopowych zbudowanych z kamer firmy Rolleiflex i Sony. Do obliczeń przyjęto, że błąd średni pomiaru długości bazy $m_b = 0,005$ metra, ogniskowej $m_f = 0,0001$ metra, dysparycji m_p równy jest $6,8 \mu m$ dla kamery Rolleiflex i $5,94 \mu m$ dla kamery Sony (założono, że m_p odpowiada rozmiarowi piksela na matrycy CCD).

a) długość bazy 1000 m



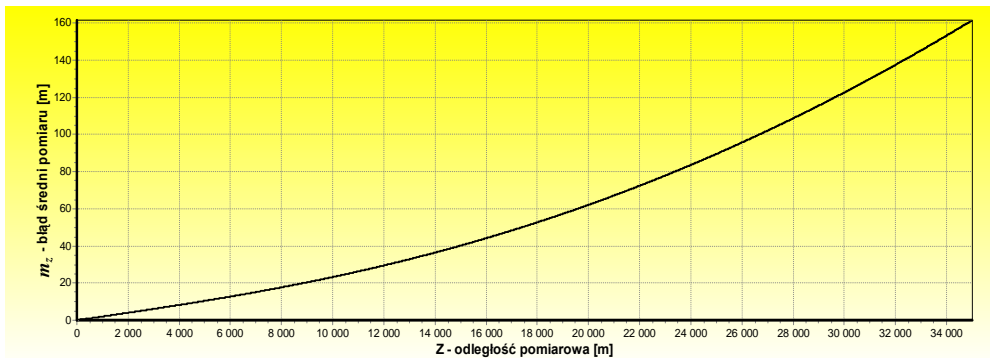
b) długość bazy 5000 m



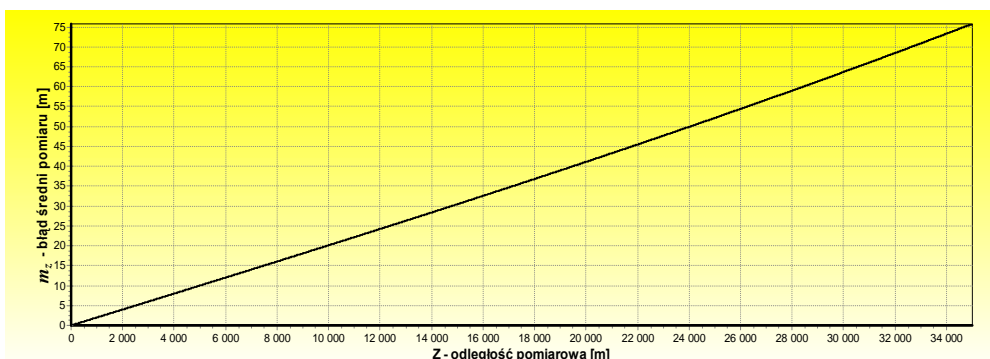
Rys. 4. Wykres zmiany wartości błęd średni m_z pomiaru wykonanego kamerą Rolleiflex 6008

Źródło: opracowanie własne.

a) długość bazy 1000 m



b) długość bazy 5000 m



Rys. 5. Wykres zmiany wartości błędu średniego m_z pomiaru wykonanego kamerą Sony α 900 F4-5.6 G SSM

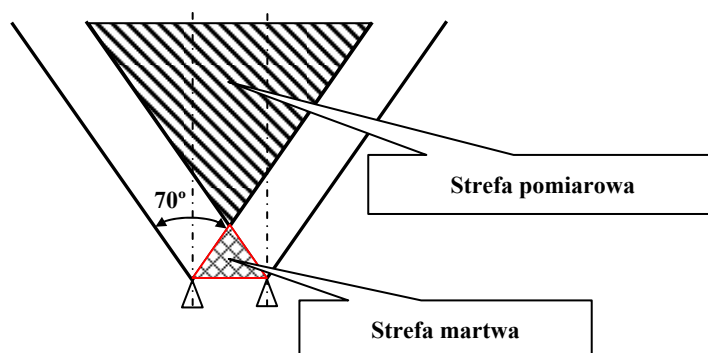
Źródło: opracowanie własne.

Analizując otrzymane wyniki, można sformułować hipotezę, że dostępne na rynku kamery mogą zapewnić wysoką dokładność pomiaru odległości już przy bazie o długości około 1000 metrów. Wartość błędu średniego takiego pomiaru jest dwukrotnie niższa w stosunku do pomiaru wykonanego radarem, dla którego przyjmuje się błąd równy 1% zakresu obserwacji lub 50 metrów, w zależności od tego, która z tych wielkości jest większa.

Zwiększanie długości bazy powoduje zmniejszanie wielkości błędu pomiaru odległości. Jak widać na rysunkach 4. i 5. zwiększenie bazy z 1000 do 5000 metrów spowodowało zmniejszenie wartości błędu średniego pomiaru o połowę.

Należy jednak zdawać sobie sprawę, że istotnym problemem przy zwiększaniu długości bazy i długości ogniskowych kamer jest zmniejszająca się strefa pomiarowa i zwiększająca się strefa martwa (rys. 6.). Przy ogniskowej o długości 250 milimetrów i matrycach CCD szerokości 12 000 pikseli sektor obserwacji kamerą wynosi zaledwie 12 stopni (założono, że rozmiar piksela ma 5,94 μm). Przekłada się to w wypadku 1 kilometra bazy na 5 kilometrów oddalenia strefy martwej od kamery, a dla 5 kilometrów bazy na oddalenie 24 kilometrów.

W prowadzonych badaniach błędu średniego pomiaru odległości przyjęto, że kamery mają ogniskowe ustawione na 50 milimetrów. Pozwoliło to na prowadzenie obserwacji w 70-stopniowych sektorach i zmniejszenie oddalenia strefy martwej od kamer: dla 5 kilometrów bazy do 3,6 kilometra i dla 1 kilometra bazy do 720 metrów.



Rys. 6. Interpretacja strefy pomiarowej i martwej

Źródło: opracowanie własne.

WNIOSKI

1. System stereoskopowy o bazie długości 1000 metrów, zbudowany w oparciu o dostępne na rynku wysokorozdzielcze kamery może zagwarantować wysoką dokładność pomiaru odległości z lądu do statku w granicach optycznego zasięgu widzialności (przy bardzo dobrej widzialności zasięg optyczny może dochodzić nawet do 30 mil morskich).
2. Dokładność pomiaru odległości można poprawić bez zmiany parametrów zewnętrznych i wewnętrznych układu kamer poprzez dokładniejszy pomiar długości bazy i ogniskowej.

3. Choć przeprowadzone badania są obiecujące, należy mieć na uwadze fakt, że pominięto w nich dwa ważne czynniki wpływające na dokładność pomiarów optycznych: dystorsję obiektywu i refrakcję atmosfery. Dlatego kolejne badania kamer CCD powinny być przeprowadzone na statku manewrującym w strefie przybrzeżnej w warunkach różnej widzialności, w dzień i nocą. Analiza połączonych wyników badań teoretycznych i praktycznych zapewniłaby optymalne wnioski co do celowości wykorzystywania kamer CCD do pomiarów odległości z lądu do statku.
4. Potrzeby nawigacji morskiej w dziedzinie komputerowego przetwarzania obrazu są obecnie zaspokajane tylko w części i dotyczą wizualizacji ENC w ECDIS, nawigacji porównawczej prowadzonej w oparciu o obraz radarowy, prezentacji obrazów sonarowych dna morskiego. Brakuje badań naukowych, w których podjęto by próbę wykorzystania już istniejących lub opracowania nowych rozwiązań w dziedzinie komputerowego przetwarzania obrazu oraz fotogrametrii analitycznej dla opracowania systemu optycznego przeznaczonego do określania pozycji platformy nawodnej w strefie przybrzeżnej. Nieliczne badania związane z przetwarzaniem obrazu dotyczą jedynie automatyzacji procesu prowadzenia jednostki pływającej w osi toru wodnego, linii nabieżnika w określonym sektorze świetlnym oraz integracji z innymi systemami nawigacyjnymi [1, 2, 3].

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ryynanen K., Vehkaoja A., Osterberg P., Joro R., *Automatic recognition of sector light boundaries based on digital imaging*, 'IALA Bulletin', 2007, issue 1, pp. 30–33.
- [2] Snyder F. D., Morris D. D., Haley P. H., Collins R., Andrea M., Okerholm Northrop Grumman, *Autonomous River Navigation*, Proceedings of SPIE, Mobile Robots 2004, XVII, pp. 221–232.
- [3] Hoshizaki T., Andrisani II D., Braun A. W., Mulyana A. K., Bethel J. S., *Performance of integrated electro-optical navigation systems*, 'Navigation', Journal of the Institute of Navigation, 2004, Vol. 51, No 2, pp. 101–129.
- [4] Naus K., *Evaluation of accuracy the position of the vessel designated stereoscopic cameras system*, 'Reports on Geodesy', 2010.
- [5] Naus K., Waż M., *Accuracy in fixing ship's positions by camera survey of bearings*, 'Geodesy and Cartography', 2011, Vol. 60, No 1.

DISTANCE MEASUREMENT ACCURACY WITH TWO CCD CAMERAS

ABSTRACT

The paper deals with distance measurement accuracy with optical methods with stereoscopic array of CCD cameras. And mean measurement error of distance to object. It includes generalized conclusions based on the analysis of the results obtained.

Keywords:

navigation optoelectronic, distance measurement with two cameras, distance measurement accuracy.