

**Krzysztof Naus**  
**Mariusz Wąż**  
**Akademia Marynarki Wojennej**

## **DOKŁADNOŚĆ POMIARU KĄTA POZIOMEGO KAMERĄ CCD**

### **STRESZCZENIE**

W artykule przedstawiono fragment opisu badań mających na celu ocenę możliwości zastosowania kamer CCD do określania pozycji statku w strefie przybrzeżnej. Skupiono się w nim wyłącznie na teoretycznej ocenie dokładności pomiaru kąta poziomego kamerą CCD. W pierwszej części artykułu opisano metodę obliczania rozdzielczości i błędu średniego pomiaru kąta poziomego między dwoma znakami nawigacyjnymi, zidentyfikowanymi na obrazie zarejestrowanym kamerą CCD. W części drugiej zaprezentowano wykresy rozdzielczości, błędu średniego i tzw. mapę dokładności (rozkładu błędu średniego) pomiaru kąta poziomego kamerą CCD wykonanego względem hipotetycznego układu dwóch znaków nawigacyjnych oraz analizę otrzymanych wyników. Część końcowa zawiera uogólnione wnioski wyprowadzone na podstawie przeprowadzonych badań.

#### Słowa kluczowe:

nawigacja optoelektroniczna, pomiar kąta kamerą, dokładność pomiaru kąta.

### **WSTĘP**

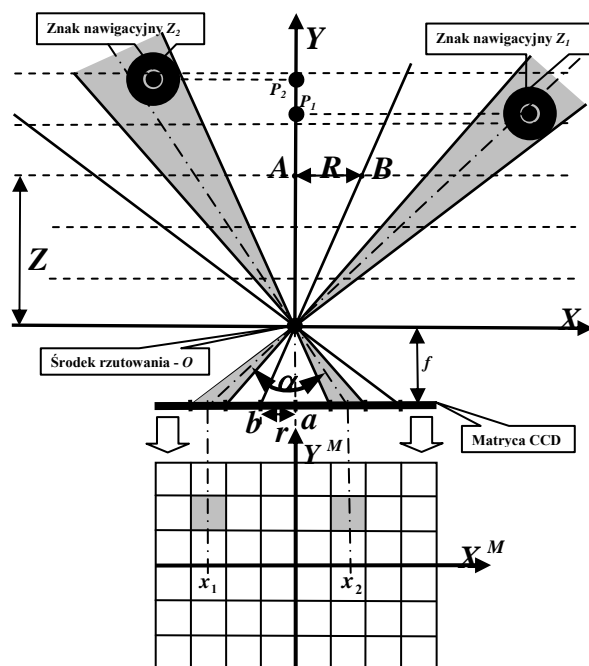
Rozwój techniki cyfrowej, jaki obserwujemy w ostatnich latach, spowodował upowszechnianie się tanich przetworników wizyjnych CCD (*Charge Coupled Device*), a także wzrost możliwości obliczeniowych komputerów. Ta nowa sytuacja z naukowego punktu widzenia implikuje kilka ciekawych pytań, które mogą być również ważne dla dziedziny nawigacji morskiej.

Czy można wykorzystać układy optyczne do wyznaczania współrzędnych pozycji platformy nawodnej manewrującej w strefie przybrzeżnej? Czy istnieją odpowiednie do tego celu urządzenia i metody (algorytmy) obliczeniowe? A jeżeli obie odpowiedzi brzmią „tak”, to czy możliwe jest opracowanie autonomicznego systemu pozycjonowania w oparciu o dostępne urządzenia rejestracji i przetwarzania obrazu?

W artykule podjęto próbę odpowiedzi na pierwsze pytanie, ale tylko w bardzo wąskim zakresie, skupiając się wyłącznie na teoretycznej ocenie dokładności pomiaru kąta poziomego kamerą CCD.

### METODA WYZNACZANIA PARAMETRÓW DO OCENY DOKŁADNOŚCI POMIARU KĄTA POZIOMEGO

Dokładność pomiaru kąta poziomego kamerą można scharakteryzować za pomocą dwóch parametrów: rozdzielczości oraz błędu średniego pomiaru. Ich wielkości zależne są w głównej mierze od możliwości ogniskowania układów optycznych oraz rozmiaru piksela  $r$  na ich matrycach CCD. Możliwości ogniskowania określają „siłę skupienia” promieni świetlnych. Im krótsza ogniskowa, tym silniej obiektyw załamuje promienie, czyli bardziej je skupia, powodując oddalenie obrazu i zmniejszenie dokładności pomiaru. Rozmiary pojedynczych pikseli we współczesnych matrycach CCD mają od 3 do 14 mikrometrów. Mniejszy rozmiar piksela zapewnia lepsze odwzorowanie szczegółów obrazu i tym samym zwiększenie dokładności pomiaru [2, 3]. Na rysunku 1. przedstawiono ideę pomiaru kąta poziomego kamerą.



Rys. 1. Idea pomiaru kąta poziomego kamerą

Źródło: opracowanie własne.

Wzór na rozdzielczość pomiaru  $R$  można łatwo wyprowadzić, korzystając z podobieństwa trójkątów prostokątnych  $AOB$  i  $aOb$ . Ma on następującą postać:

$$R = \frac{r \cdot Z}{f}. \quad (1)$$

Błąd średni pomiaru kąta poziomego można wyznaczyć, stosując sformułowane przez C. F. Gaussa prawo przenoszenia błędów średnich.

Znając błędy średnie zmiennych niezależnych  $f, x_1, x_2$  funkcji pojedynczego wyniku pomiaru [3]

$$\alpha = \arctg\left(\frac{x_2}{f}\right) - \arctg\left(\frac{x_1}{f}\right), \quad (2)$$

łatwo można zapisać równanie błędu średniego:

$$m_\alpha = \left[ \left( \frac{\partial \alpha}{\partial f} \cdot m_f \right)^2 + \left( \frac{\partial \alpha}{\partial x_1} \cdot m_{x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial \alpha}{\partial x_2} \cdot m_{x_2} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (3)$$

które po wyznaczeniu pochodnych cząstkowych przyjmie postać:

$$m_\alpha = \left[ \left( \frac{x_1}{f^2 + x_1^2} - \frac{x_2}{f^2 + x_2^2} \right)^2 \cdot m_f^2 + \left( -\frac{f}{f^2 + x_1^2} \right)^2 \cdot m_{x_1}^2 + \left( \frac{f}{f^2 + x_2^2} \right)^2 \cdot m_{x_2}^2 \right]^{1/2}, \quad (4)$$

gdzie:

$m_f$  — błąd średni pomiaru ogniskowej;

$m_{x_1} = m_{x_2}$  — błąd średni pomiaru odległości na matrycy CCD.

Korzystając z podobieństwa trójkątów prostokątnych  $Z_1OP_1$  i  $x_1Oa$  oraz  $Z_2OP_2$  i  $x_2Oa$ , można przyjąć, że:

$$x_1 = \frac{-X_{Z_1}}{Y_{Z_1}} \cdot f, \quad x_2 = \frac{-X_{Z_2}}{Y_{Z_2}} \cdot f, \quad (5)$$

a stąd:

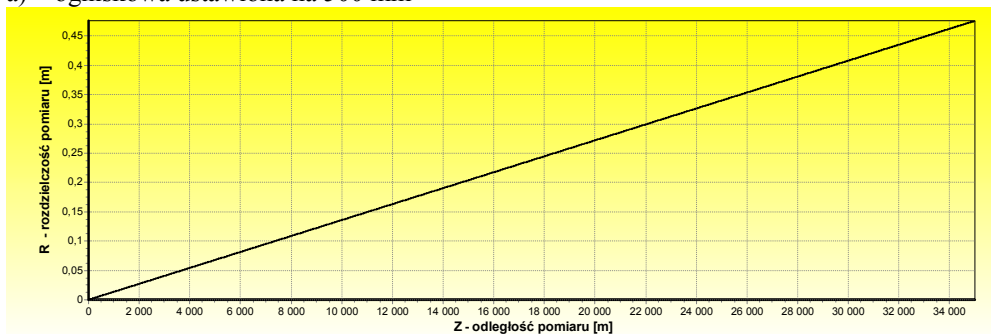
$$m_{\alpha} = \left[ \left( \frac{1}{f \cdot \left( \frac{Y_{Z_1}}{-X_{Z_1}} + \frac{-X_{Z_1}}{Y_{Z_1}} \right)} - \frac{1}{f \cdot \left( \frac{Y_{Z_2}}{-X_{Z_2}} + \frac{-X_{Z_2}}{Y_{Z_2}} \right)} \right)^2 \cdot m_f^2 + \left( \frac{1}{f \cdot \left( 1 + \left( \frac{-X_{Z_1}}{Y_{Z_1}} \right)^2 \right)} \right)^2 \cdot m_{x_1}^2 + \left( \frac{1}{f \cdot \left( 1 + \left( \frac{-X_{Z_2}}{Y_{Z_2}} \right)^2 \right)} \right)^2 \cdot m_{x_2}^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

Zakłada się przy tym, że znaki nawigacyjne znajdują się w punktach o znanym położeniu:  $\mathbf{Z}_1 = (X_{Z_1}, Y_{Z_1})$ ,  $\mathbf{Z}_2 = (X_{Z_2}, Y_{Z_2})$ , określonym względem układu współrzędnych  $OXY$ .

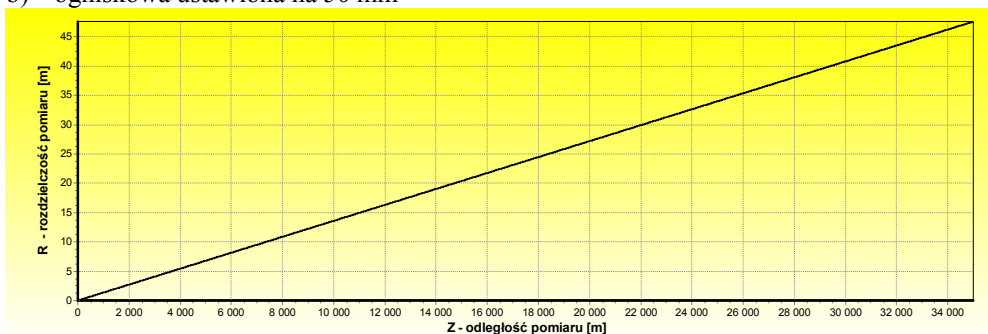
### ANALIZA ROZDZIELCZOŚCI POMIARU

Ze wzoru (1) wynika, że rozdzielczość pomiaru jest wprost proporcjonalna do iloczynu odległości pomiarowej i rozmiaru piksela na matrycy CCD oraz odwrotnie proporcjonalna do długości ogniskowej. Na rysunkach 2. i 3. przedstawiono wykresy zmiany rozdzielczości w funkcji odległości pomiaru wykonanego kamerą firmy Rolleiflex (rozmiar piksela na matrycy wynosił 6,8  $\mu\text{m}$ ) i Sony (rozmiar piksela na matrycy wynosił 5,94  $\mu\text{m}$ ).

a) ogniskowa ustawiona na 500 mm

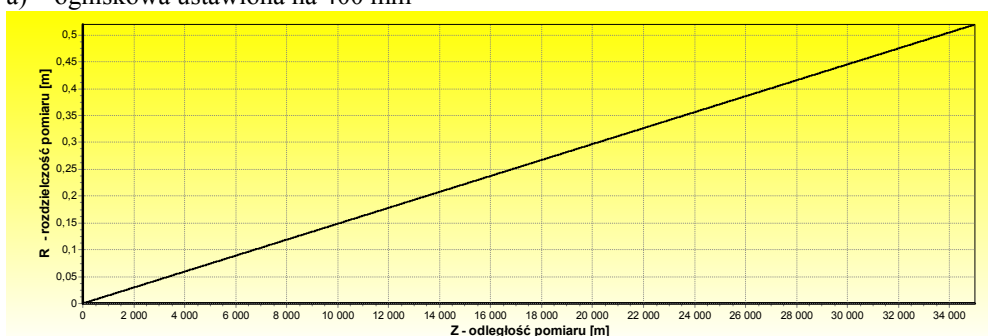


b) ogniskowa ustawiona na 50 mm

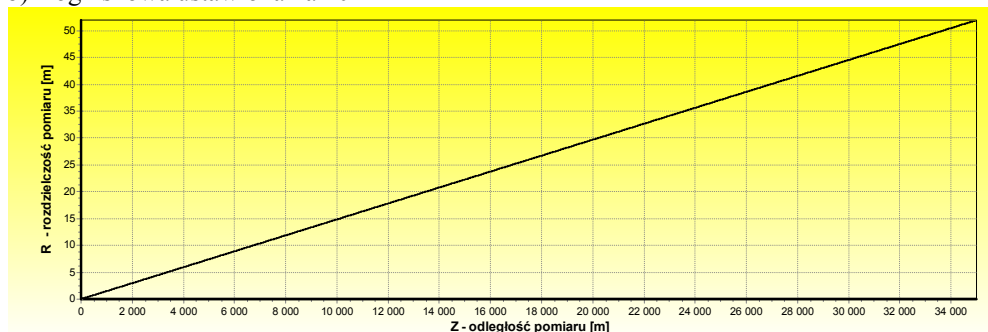


Rys. 2. Wykres zmiany rozdzielczości  $R$  pomiaru wykonanego kamerą Rolleiflex 6008  
*Źródło: opracowanie własne.*

a) ogniskowa ustawiona na 400 mm



b) ogniskowa ustawiona na 40 mm



Rys. 3. Wykres zmiany rozdzielczości pomiaru  $R$  wykonanego kamerą Sony  $\alpha$  900 F4-5.6 G SSM  
*Źródło: opracowanie własne.*

Po analizie wykresów można sformułować wniosek, że rozdzielczość pomiaru maleje liniowo w funkcji odległości. Dla ogniskowych rzędu 400–500 mm jest ona bardzo wysoka, co gwarantuje dobrą rozróżnialność znaków nawigacyjnych, nawet na granicy widzialności optycznej. Zmniejszenie długości ogniskowej do kilku centymetrów wpływa niekorzystnie na proces identyfikacji znaków nawigacyjnych, szczególnie znajdujących się na zbliżonym kierunku obserwacji. Kamery Sony i Rolleiflex z ustawioną długością ogniskowych powyżej 200 mm mogą zapewnić obserwację konstrukcji znaku nawigacyjnego o średnicy jednego metra w całym obszarze widzialności optycznej. Przyjęta do dalszych badań długość ogniskowej równa 50 mm pozwala na obserwację małych obiektów (takich jak stawy czy pławy) na odległościach do 12 mil morskich i dużych obiektów (takich jak latarnie morskie i wieże kościoła) na granicy zasięgu widzialności optycznej.

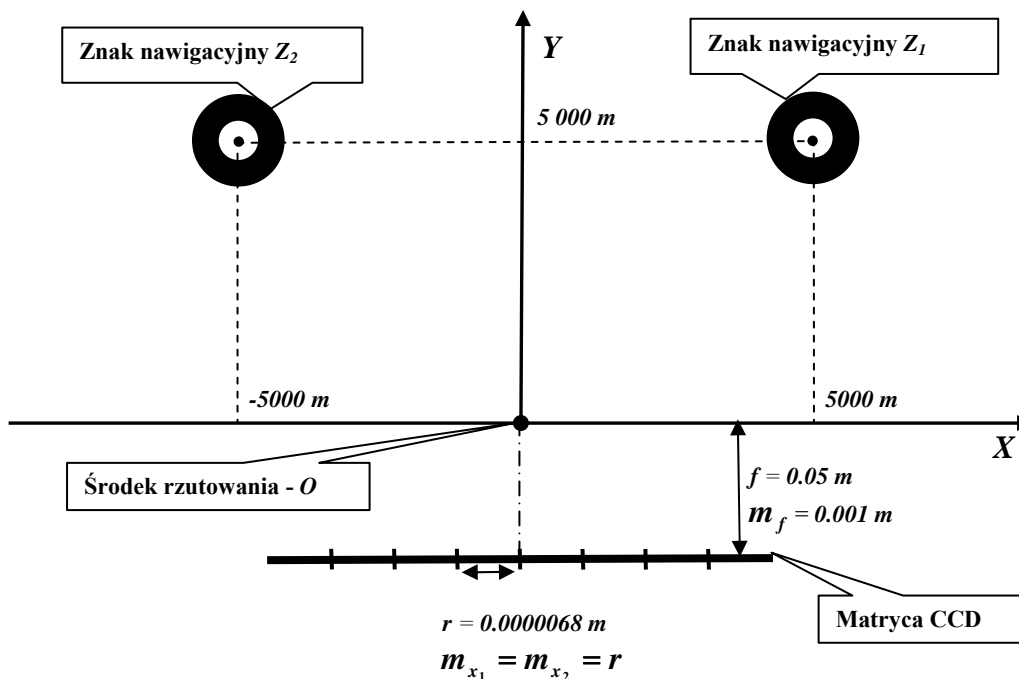
### ANALIZA BŁĘDU ŚREDNIEGO POMIARU KĄTA POZIOMEGO

Do badań przyjęto hipotetyczny układ dwóch znaków nawigacyjnych. Sposób rozmieszczenia znaków w układzie przedstawiono na rysunku 4.

Układ znaków obserwowano kamerą:

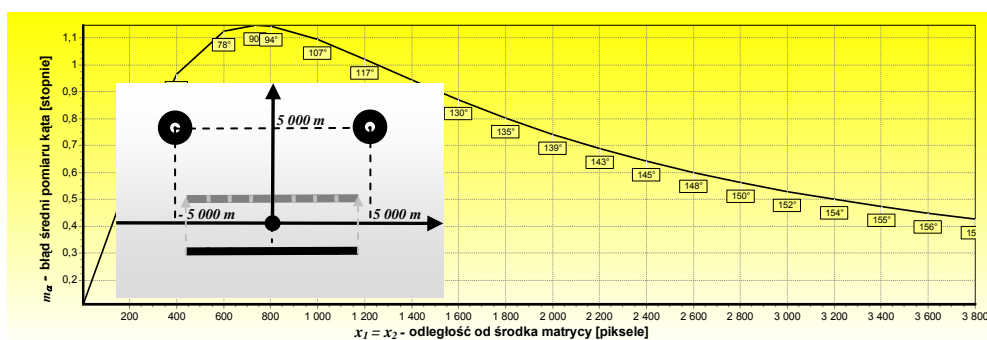
- przesuwaną wzdłuż osi  $OY$  (oś optyczna kamery ustawiona była zgodnie z kierunkiem osi  $OY$ );
- obracaną wokół punktu  $O$ ;
- przesuwaną w obszarze widzialności optycznej znaków (oś optyczna ustawiona była zgodnie z kierunkiem osi  $OY$ ).

Na rysunku 5. przedstawiono wykres zmiany wartości błędu średniego pomiaru kąta poziomego wykonanego kamerą przesuwaną wzdłuż osi  $OY$ . Parametry  $x_1$  i  $x_2$  obliczano za pomocą zależności (5), natomiast wartość błędu średniego  $m_\alpha$  za pomocą zależności (6).



Rys. 4. Sposób rozmieszczenia znaków nawigacyjnych w hipotetycznym układzie

Źródło: opracowanie własne.



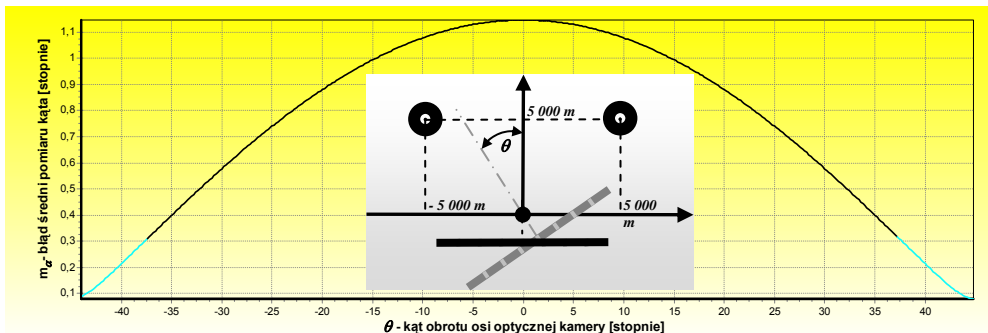
Rys. 5. Wykres zmiany wartości błędu średniego  $m_\alpha$  pomiaru kąta poziomego w funkcji zmierzonych na matrycy odległości  $x_1$  i  $x_2$  (w ramkach podano wartość zmierzonego kąta poziomego  $\alpha$ )

Źródło: opracowanie własne.

Analizując wykres, można stwierdzić, że funkcja pojedynczego pomiaru osiąga maksimum dla kąta poziomego równego 90°. Jej wartość maleje gwałtownie

dla kątów ostrych, których ramiona znajdują się bardzo blisko linii osi optycznej oraz łagodnie dla kątów rozwartych, których ramiona zbliżają się do granic matrycy.

Na rysunku 6. przedstawiono wykres zmiany wartości błędu średniego pomiaru kąta poziomego  $m_\alpha$  wykonanego kamerą obracaną wokół punktu  $O$ . Kolorem czarnym zaznaczono tę część wykresu, w której na rejestrowanym kamerą obrazie widoczne były dwa znaki. Odpowiada ona obserwacjom prowadzonym z kierunków po rotacji osi optycznej o kąt  $\theta$  w przedziale  $\langle -37^\circ, 37^\circ \rangle$ . Pozostała część wykresu reprezentuje kierunki obserwacji, w których kamera rejestrowała obraz tylko jednego znaku.



Rys. 6. Wykres zmiany wartości błędu średniego  $m_\alpha$  pomiaru kąta poziomego w funkcji kąta obrotu osi optycznej kamery

*Źródło: opracowanie własne.*

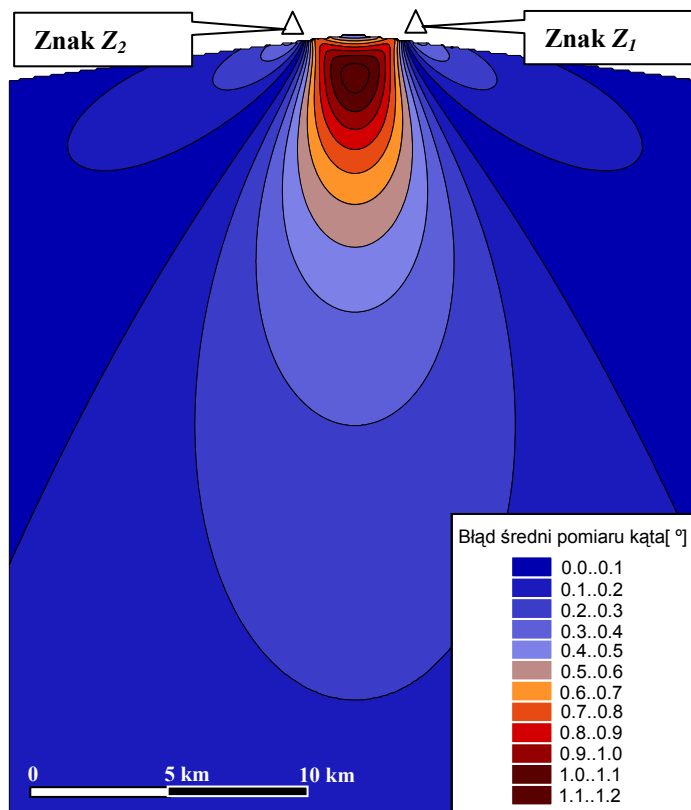
Przedstawiony na rysunku 6. wykres wskazuje na to, że zmiana ustawienia kierunku osi optycznej kamery w stosunku do układu znaków nawigacyjnych powoduje zmianę dokładności pomiaru kąta poziomego. Największą dokładność pomiaru uzyskuje się, jeżeli oś optyczna kamery pokrywa się z kierunkiem na jeden ze znaków nawigacyjnych. Wówczas obraz kolejnego znaku budowany jest na granicy matrycy, za pomocą promieni rzutujących tworzących z matrycą ostre kąty (przy dobrze dobranej ogniskowej). Na tej podstawie można wnioskować, że im mniejszy jest kąt między matrycą a promieniami rzutującymi, tym dokładniejszy uzyskujemy pomiar. Tezę tę można również potwierdzić w oparciu o wykres przedstawiony na rysunku 5. Widać na nim, że zbliżając promienie rzutujące do granicy matrycy, zmniejszamy błąd pomiaru.

Zmniejszenie wielkości kąta między promieniami rzutującymi a matrycą można uzyskać poprzez zmniejszenie długości ogniskowej oraz zwiększanie rozmiarów matrycy. W badaniach wykorzystano matrycę o szerokości 8000 pikseli. Przy



ogniskowej równej 50 mm i kącie  $\theta = 37^\circ$  oraz  $\theta = -37^\circ$  pozwoliła ona na uzyskanie pomiaru z błędem średnim równym  $0.32^\circ$ .

Na rysunku 7. przedstawiono mapę rozkładu błędu średniego  $m_\alpha$  pomiaru kąta poziomego wykonanego kamerą, w obszarze widzialności optycznej znaków. Obliczenia prowadzono przy założeniu, że oś optyczna kamery skierowana jest zgodnie z osią  $OY$ .



Rys. 7. Mapa rozkładu błędu średniego  $m_\alpha$  pomiaru kąta poziomego wykonanego kamerą w obszarze widzialności optycznej znaków

Źródło: opracowanie własne.

Analizując mapę rozkładu błędu średniego, można próbować wyprowadzić uogólniony wniosek, że błąd pomiaru rośnie, gdy pomiary prowadzone są w obszarze znajdującym się w bliskiej odległości od znaków. Jest to stwierdzenie prawdziwe tylko w tym konkretnym przypadku. Jeżeli zmienimy długość ogniskowej oraz

kierunek osi optycznej kamery, uzyskamy inny rozkład błędu. Prezentowany rozkład może natomiast potwierdzić wcześniejsze wnioskowanie, a mianowicie:

- największą dokładność pomiaru uzyskuje się, jeżeli oś optyczna kamery pokrywa się z kierunkiem na znak nawigacyjny;
- dokładność pomiaru wzrasta dla kątów ostrych, których ramiona znajdują się bardzo blisko linii osi optycznej oraz rozwartych, których ramiona zbliżają się do granic matrycy (ramiona tych kątów są tworzone przez promienie rzutujące przechodzące przez znaki i matrycę);
- aby wykonać pomiar najdokładniejszy, należy „sprowadzać” jeden znak do środka matrycy, a drugi do jej granic.

## WNIOSKI

1. Dostępne na rynku wysokorozdzielcze kamery CCD mogą zagwarantować wysoką dokładność pomiaru kąta poziomego w granicach optycznego zasięgu widzialności znaków i świateł nawigacyjnych (przy bardzo dobrej widzialności zasięg optyczny może dochodzić nawet do 30 mil morskich).
2. Dokładność pomiaru kąta kamerą można poprawić poprzez odpowiednie ustawienie długości ogniskowej i kierunku osi optycznej kamery. Błąd średni pomiaru przeprowadzonego właściwie ustawioną kamerą może być porównywalny do pomiaru sekstantem, kompasem żyrokompasowym i magnetycznym. W przypadku kamer Sony i Rolleiflex powinien on wynosić  $\pm 0.32^\circ$ .
3. Choć przeprowadzone badania są obiecujące, to należy mieć na uwadze fakt, iż pominięto w nich dwa ważne czynniki wpływające na dokładność pomiarów optycznych, tj. 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 wnioskowanie co do celowości wykorzystywania do pomiarów kąta poziomego kamer CCD.
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 się próby wykorzystania już istniejących lub opracowania nowych rozwiązań

w dziedzinie komputerowego przetwarzania obrazu oraz fotogrametrii analitycznej dla zaprojektowania 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, 4, 5].

### BIBLIOGRAFIA

- [1] 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.
- [2] Naus K., *Evaluation of accuracy the position of the vessel designated stereoscopic cameras system*, Reports on Geodesy, 2010.
- [3] Naus K., Wąż M., *Accuracy in fixing ship's positions by camera survey of bearings*, Geodesy and Cartography, 2011, Vol. 60, No 1.
- [4] Ryynanen K., Vehkaoja A., Osterberg P., Joro R. *Automatic recognition of sector light boundaries based on digital imaging*, IALA Bulletin, issue 1/2007, pp. 30–33.
- [5] Snyder F. D., Morris D. D., Haley P. H., Collins R., Okerholm A. M., Northrop Grumman, *Autonomous River Navigation*, Proceedings of SPIE, Mobile Robots XVII, 2004, pp. 221–232.

## ACCURACY OF HORIZONTAL ANGLE MEASUREMENT PERFORMED WITH CCD CAMERA

### ABSTRACT

This article presents part of description of the research on possibility to use CCD cameras to fix ship's position in the coastal zone. It focuses exclusively on the theoretical measurement evaluation of accuracy of the horizontal angle with a CCD camera. The first part of the article describes the method for calculating resolution and a mean error of measurement of the horizontal

angle between two navigation aids, identified in the image recorded with the CCD camera. The second part presents diagrams of resolution, a mean error and map accuracy (mean error distribution) of the horizontal angle measurement performed with the CCD camera. The measurement was made in relation to a hypothetical system of two navigation aids and an analysis of the results obtained. The final part contains a generalized conclusions based on the tests.

Keywords:

navigation optoelectronic, measuring angle with camera, angle measurement accuracy.