

Krzysztof NAUS, Artur GRZĄDZIEL, Mariusz WĄŻ

KAMERA CCD JAKO NARZĘDZIE DO WZORCOWYCH POMIARÓW KĄTA PRZECHYŁU STATKU

Streszczenie

W artykule przedstawiono badania mające na celu ocenę dokładności pomiarów kąta przechyłu statku przy wykorzystaniu kamery CCD. Założono, że pomiary te będą traktowane, jako wzorcowe w stosunku do pomiarów wykonanych inklinometrem.

Pierwsza część artykułu zawiera teoretyczny opis miar dokładności pomiaru kąta przechyłu statku, wyznaczonego na podstawie obrazu linii widnokregu - zarejestrowanego kamerą CCD.

W drugiej części przedstawiono analizę porównawczą wyników pomiarów kątowych wykonanych inklinometrem oraz przy wykorzystaniu kamery CCD.

WSTĘP

Ocena dokładności pomiaru kąta przechyłu statku wykonanego wysokiej klasy sensorem jest bardzo trudna do przeprowadzenia w warunkach morskich. Związane jest to przede wszystkim z brakiem możliwości uzyskania pomiarów wzorcowych, niezbędnych do oceny porównawczej. Szczególnie, że pomiary wzorcowe powinny być wykonywane z dokładnością o rząd wielkości większą od pomiarów ocenianych. Ma to jeszcze większe znaczenie, jeżeli oceniany sensor wyznacza wartości kątowe z bardzo dużą dokładnością. Trudno w takiej sytuacji znaleźć inny wykonujący pomiary jeszcze dokładniejsze. Z tych względów proponuje się zastosowanie, jako narzędzia do pomiarów wzorcowych kąta przechyłu statku systemu optycznego.

W artykule przedstawiono analizę dokładności pomiaru wzorcowego kąta przechyłu statku, wykonywanego z wykorzystaniem kamery CCD rejestrującej obraz linii widnokregu (linii, która jest zawsze prostopadła do linii pionu). Prowadzono ją zarówno teoretycznie, jak i w oparciu o rzeczywiste pomiary wykonane kamerą typu HDR-CX130 firmy Sony i inklinometrem typu AGS005-2-CA1-H0-2RW firmy POSITAL [6][7].

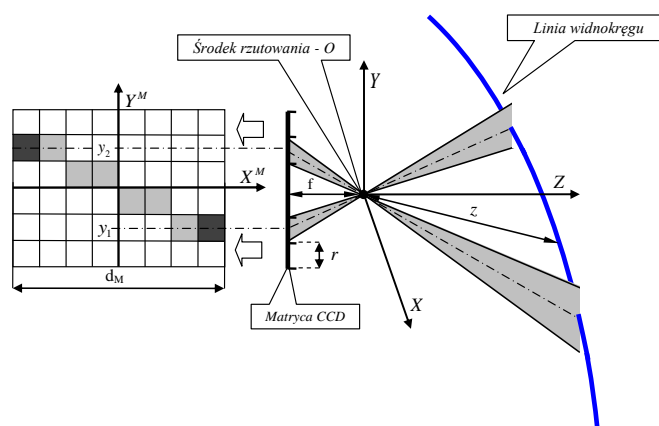
1. DOKŁADNOŚĆ POMIARU KĄTA PRZECHYŁU STATKU Z OBSERWACJI LINII WIDNOKRĘGU

Zaproponowana, optyczna metoda pomiaru kąta bazuje na zależności pomiędzy kątem przechyłu kadłuba statku a kątem utworzonym pomiędzy poziomą krawędzią obrazu z kamery i linią widnokregu (rys. 1).



Rys. 1. Obraz linii widnokregu obserwowany kamerą na przechylnym statku

Idea pomiaru kierunku linii widnokregu kamerą CCD przedstawiona na rys. 2.



Rys. 2. Idea pomiaru kierunku linii widnokregu kamerą

Dokładność pomiaru kierunku linii widnokregu na obrazie można scharakteryzować dwoma parametrami: rozdzielczością oraz błędem średnim pomiaru [1][2][3][4].

Rozdzielczość pomiaru R można opisać wzorem:

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

Jak wynika ze wzoru (1) jest ona zależna przede wszystkim od rozmiaru piksela r na matrycy CCD oraz długości ogniskowej f obiektywu, ponieważ odległość $z = 2.8\sqrt{a}$ do linii widnokregu można przyjąć, jako stałą (oczywiście przy założeniu, że wysokości umiejscowienia kamery względem lustra wody a jest niezmienna) [5]. Dlatego też, przy tego typu pomiarach, ustawienie maksymalnej długości ogniskowej obiektywu jest konieczne dla uzyskania maksymalnej rozdzielczości pomiaru. W przypadku kamery firmy Sony typu HDR-CX130 (tj. $r = 1.34 \mu\text{m}$ oraz maksymalnej $f = 63 \text{ mm}$) rozdzielczość pomiaru wyniosła $\approx 0.3 \text{ m}$. Należy jednak pamiętać o tym, że linia widnokregu jest prawie zawsze zniekształcona na styku z morzem przez falowanie powierzchni wody. Dlatego zwiększanie rozdzielczości pomiaru do wartości mniejszych od wysokości fal z pewnością nie spowoduje zwiększenia dokładności pomiaru kierunku linii widnokregu. W przypadku przeprowadzonej sesji pomiarowej wysokość fali wynosiła około 0.5 m , a rozdzielczość pomiarowa 0.3 m . Zatem można uznać, że została dobrana prawidłowo.

Błąd średni pomiaru m_α można obliczyć stosując następujący wzór [4]:

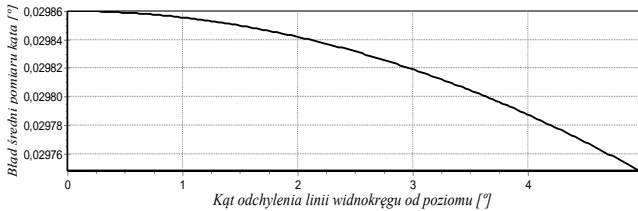
$$m_{\alpha} = \left[\left(-\frac{\Delta y}{d_M^2 + \Delta y^2} \cdot m_{d_M} \right)^2 + \left(\frac{d_M}{d_M^2 + \Delta y^2} \cdot m_{\Delta y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

gdzie:

$$\Delta y = y_2 - y_1,$$

m_{d_M} – błąd średni pomiaru długości matrycy CDD,

$m_{\Delta y}$ – błąd średni pomiaru odległości na matrycy CCD.



Rys. 3. Wykres błędu średniego pomiaru kierunku linii widnokregu kamerą Sony HDR-CX130

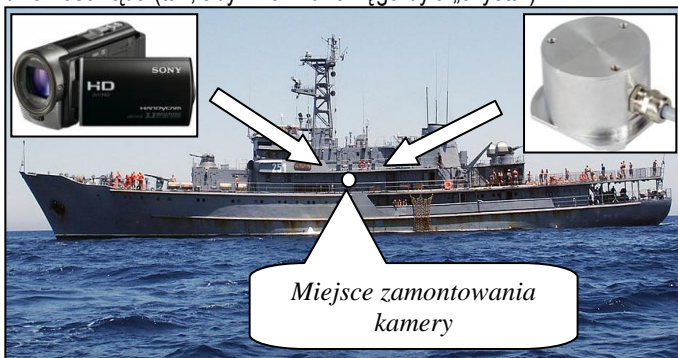
Jak widać na wykresie (rys. 3.) pomiar małych kątów (do 0.5°) wykonany kamerą Sony HDR-CX130 obarczony jest prawie stałą, nieprzekraczającą 0.03° wartością błędu średniego. Natomiast, z wzoru (2) wynika, że dokładność pomiaru kąta zależy przede wszystkim od rozmiarów i rozdzielczości matrycy CCD. Zamiana zastosowanej do pomiarów matrycy o rozdzielczości full HD (1920x1080) na matrycę o czterokrotnie wyższej rozdzielczości 4K (3840x2160) pozwoliłaby na uzyskiwanie dokładności pomiaru kąta rzędu tysięcznych części stopnia.

2. ANALIZA PORÓWNAWCZA POMIARU KĄTA INKLINOMETREM Z KAMERĄ

W celu dodatkowej oceny kamery CCD, jako narzędzia do pomiarów kąta przechyłu statku przeprowadzono analizę porównawczą w oparciu o wyniki rzeczywistych pomiarów:

- wzorcowych, wykonanych kamerą typu HDR-CX130 firmy Sony [6],
- do porównywania, wykonanych inklinometrem typu AGS005-2-CA1-H0-2RW firmy POSITAL [7].

Sesję pomiarową przeprowadzono na okręcie ORP „Wodnik” stojącym w dryfie na pozycji znajdującej się poza zasięgiem widzialności lądu (tak, aby linia widnokregu była „czysta”).

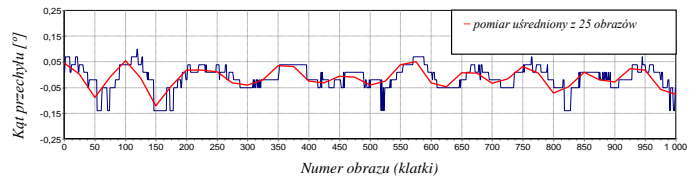


Rys. 4. Umiejscowienie kamery i inklinometru na okręcie ORP „Wodnik”

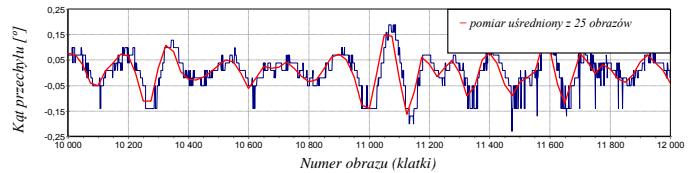
Z 12-to minutowej sesji pomiarowej wyodrębniono charakterystyczne przebiegi zmiany kąta w trzech przedziałach czasowych, które poddano następnie szczegółowej analizie.

W celu porównania, na rys. 5, 6 i 7 przedstawiono wykresy kąta przechyłu wzdłużnego okrętu, wyznaczanego z obrazu pojedynczej

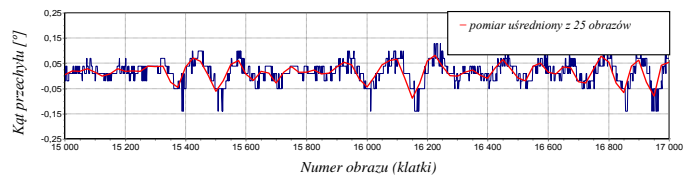
klatki oraz z obrazów kolejnych 25-ciu klatek (po uśrednianiu wyników) w trzech przedziałach czasowych: $\langle 0s, 40s \rangle$, $\langle 400s, 480s \rangle$ i $\langle 600s, 680s \rangle$.



Rys. 5. Wykresy kąta przechyłu wzdłużnego okrętu wyznaczanego z obrazu pojedynczej klatki oraz z obrazów 25-ciu kolejnych klatek w przedziale czasowym $\langle 0s, 40s \rangle$



Rys. 6. Wykresy kąta przechyłu wzdłużnego okrętu wyznaczanego z obrazu pojedynczej klatki oraz z obrazów 25-ciu kolejnych klatek w przedziale czasowym $\langle 400s, 480s \rangle$

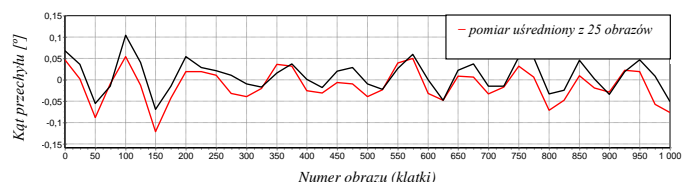


Rys. 7. Wykresy kąta przechyłu wzdłużnego okrętu wyznaczanego z obrazu pojedynczej klatki oraz z obrazów 25-ciu kolejnych klatek w przedziale czasowym $\langle 600s, 680s \rangle$

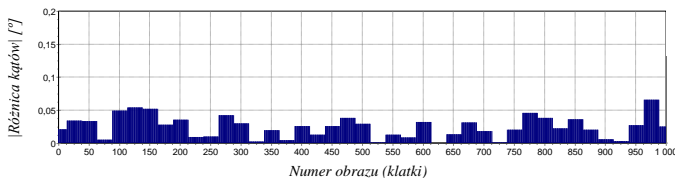
Widać na nich wyraźnie, iż rozdzielczość kątowa pomiaru mieści się na poziomie 0.03° oraz również to, że zdarzają się pomiary obarczone błędem grubym (spowodowanym najprawdopodobniej złą detekcją linii widnokregu w obrazie i w konsekwencji wyznaczonym kątem). Z tego właśnie powodu zaproponowano uśrednianie wyników pomiarów z obrazów kolejnych 25-ciu klatek. Metoda ta nie eliminuje, ale na pewno, w prosty sposób zmniejsza wpływ błędów grubych na ostateczny wynik pomiaru.

W celu porównania do siebie uśrednionych wyników pomiarów z obrazów kolejnych 25-ciu klatek oraz pomiarów wykonanych, co jedną sekundę inklinometrem przygotowano wykresy kąta przechyłu wzdłużnego okrętu oraz histogramy wartości bezwzględnych różnic tych kątów.

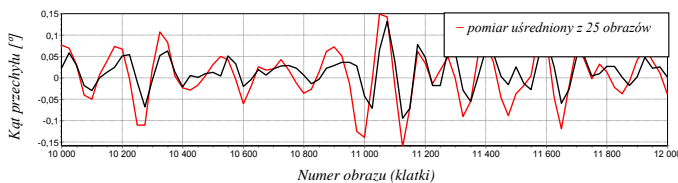
Na rys. 8, 10, 12 przedstawiono wykresy kąta przechyłu wzdłużnego okrętu wyznaczanego z obrazu i inklinometrem, a na rys. 9, 11, 13 wykresy bezwzględnych różnic tych kątów.



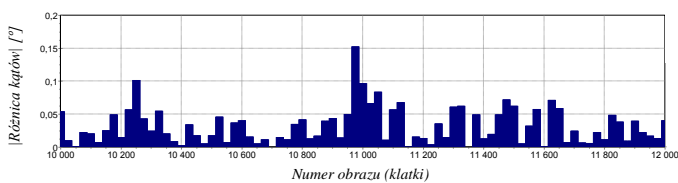
Rys. 8. Wykresy kąta przechyłu wzdłużnego okrętu wyznaczanego z obrazu oraz inklinometrem



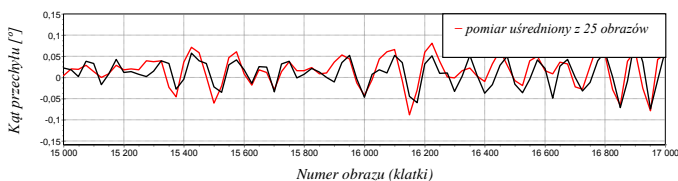
Rys. 9. Wykres wartości bezwzględnej różnicy kątów przechyłów wzdłużnych okrętu wyznaczonych z obrazu oraz inklinometrem



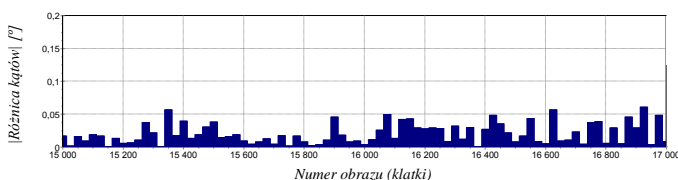
Rys. 10. Wykresy kąta przechyłu wzdłużnego okrętu wyznaczanego z obrazu oraz inklinometrem



Rys. 11. Wykres wartości bezwzględnej z różnicy kąta przechyłu wzdłużnego okrętu wyznaczonego z obrazu oraz inklinometrem



Rys. 12. Wykresy kąta przechyłu wzdłużnego okrętu wyznaczanego z obrazu oraz inklinometrem



Rys. 13. Wykres wartości bezwzględnej z różnicy kąta przechyłu wzdłużnego okrętu wyznaczonego z obrazu oraz inklinometrem

Przedstawione na wykresach (rys. 8, 10 i 12) wyniki pomiarów kąta z obrazu (po uśrednieniu) i inklinometrem są bardzo podobne do siebie. Współczynnik korelacji liniowej pomiędzy nimi wyniósł 0.76. Dla porównania, ten sam współczynnik dla wyników pomiaru z obrazu bez uśredniania (z pojedynczej klatki) wyniósł zaledwie 0.26.

Dodatkowo, z wykresów przedstawionych rys. 9, 11 i 13 wynika, że różnice w pomiarach rosną wraz ze wzrostem częstotliwości i amplitudy kołysania okrętu. Może to świadczyć np. o tym, że inklinometr pojemnościowy z płynem elektrolitycznym, w których poziom płynu elektrolitycznego w celi wskazuje kąt przechyłu wykonuje pomiary z pewną zwłoką czasową.

PODSUMOWANIE

Na podstawie otrzymanych wyników badań i przeprowadzonej ich analizy można wyprowadzić uogólnione wnioski:

- metoda pomiaru kątów przechyłu z obserwacji linii widnokregu kamerą jest bardzo dokładna, dla matrycy rozdzielczości 4K

(3840x2160) błąd średni pomiaru może być rzędu tysięcznych części stopnia,

- dokładność pomiaru kątów przechyłu z obserwacji linii widnokregu może być poprawiana przede wszystkim poprzez zwiększenie rozmiaru matrycy CCD, a w małym stopniu poprzez zmianę długości ogniskowej obiektywu,
- pomiary otrzymywane w wyniku przetwarzania „zaszumionego” obrazu mogą być obciążone błędami grubymi, zatem należy je wykrywać i usuwać, aby omawiana metoda mogła zostać wdrożona do stosowania.

BIBLIOGRAFIA

1. Naus K., *Accuracy in fixing ship's positions by CCD camera survey of horizontal angles*. Geomatics and Environmental Engineering, Vol. 5/4 (2011), pp. 47–61, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2011
2. Naus K., Wąż M., *Dokładność pomiaru kąta poziomego kamerą CCD*. Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, No. 3 (186), pp. 83–94, Gdynia 2011
3. Naus K., Wąż M., *Dokładność pomiaru odległości dwiema kamerami CCD*. Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, No. 4 (187), pp. 73–82, Gdynia 2011
4. Naus K., Wąż M., *Accuracy in fixing ship's positions by camera survey of bearings*. Geodesy and Cartography, Vol. 60, No. 1, pp. 61–73, Warszawa 2011
5. Urbański J., Kopacz Z., Posiła J., *Nawigacja Morska*. Wydawnictwo Akademii Marynarki Wojennej, Podręcznik, Część I, pp. 51–54, Gdynia 1995
6. <https://www.posital.com/pl/produkty/inklinometry/tiltix-product-finder/detail.php?productid=111183908>
7. <https://www.sony.pl/support/pl/product/HDR-CX130E>

CCD CAMERA AS A TOOL FOR REFERENCE MEASUREMENTS OF THE TILT ANGLE OF THE VESSEL

Abstract

The article presents a research aimed to assess the accuracy of measurement of tilt angle of the vessel using a CCD camera. It was assumed that these measurements were treated as a reference in relation to the measurements made by use of inclinometer. The first part of the article contains the theoretical description of the measurement accuracy of the vessel tilt angle, determined on the basis of the image of the horizon line – recorded by a CCD camera. The second part presents a comparative analysis of the results of angular measurements made by use of inclinometer as well as a CCD camera.

Autorzy:

dr hab. inż. **Krzysztof Naus** – starszy wykładowca, Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Nawigacji i Uzbrojenia Okrętowego, Instytut Nawigacji i Hydrografii Morskiej

mgr inż. **Artur Grządziel** – dowódca ORP Arctowski, dywizjon Zabezpieczenia Hydrograficznego MW

dr hab. inż. **Mariusz Wąż** – starszy wykładowca, Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Nawigacji i Uzbrojenia Okrętowego, Instytut Nawigacji i Hydrografii Morskiej