

船舶の動特性解析と制御

A Study on Dynamics Analysis and Control of the Ship

中谷俊彦¹⁾、川島優軌²⁾、早勢欣和³⁾、柁伸司⁴⁾、浦恵里夏⁵⁾、牧田祥子⁶⁾、廣澤陽介⁷⁾

Toshihiko Nakatani, Yuki Kawashima, Yoshikazu Hayase, Shinji Toga, Erika Ura, Shoko Makita and Yosuke Hirozawa

- 1) 富山高等専門学校 商船学科 (〒933-0293 富山県射水市海老江練合31, E-mail: nakatani@nc-toyama.ac.jp)
- 2) 富山高等専門学校 専攻科 (〒933-0293 富山県射水市海老江練合31, E-mail: nakatani@nc-toyama.ac.jp)
- 3) 富山高等専門学校 電子情報工学科 (〒933-0293 富山県射水市海老江練合31, E-mail: hayase@nc-toyama.ac.jp)
- 4) 富山高等専門学校 商船学科 (〒933-0293 富山県射水市海老江練合31, E-mail: toga.shinji@nc-toyama.ac.jp)
- 5) 富山高等専門学校 技術室3班 (〒933-0293 富山県射水市海老江練合31, E-mail: ura@nc-toyama.ac.jp)
- 6) 富山高等専門学校 技術室3班 (〒933-0293 富山県射水市海老江練合31, E-mail: makita405@nc-toyama.ac.jp)
- 7) 富山高等専門学校 若潮丸 (〒933-0293 富山県射水市海老江練合31, E-mail: hirozawa@nc-toyama.ac.jp)

This paper describes the Dynamics Analysis of the small ship and the application of PID controller in the ship's autopilot system. Autopilot systems are one of the most popular navigational instruments and are widely used in many ships. In order to implement the system, it is necessary to tune the gains of the controller based on the ship's dynamics. Firstly, the Nomoto gain and time constant were determined using the real data collected from the sea trials at sea. Secondly, the controller was designed based on the ship's dynamics using the ultimate method. Lastly, Digital control simulations were carried out to check the performance of the designed new controller.

Key Words: Autopilot, PID, TK model, Nomoto model, zigzag maneuver, Z test

1. はじめに

船用自動操舵装置は、船舶に搭載される航海計器の1つである。この装置は航海士が設定した目標針路を保持するために必要な舵角を船首方位偏差から計算し、自動的に舵を操作することにより乗組員の負担軽減に貢献している。船用自動操舵装置を効果的に運用するためには、船舶の動特性を正確に把握した上で、適切な調整を行うことが必要である。しかし、一般的に船用自動操舵装置の調整を洋上で行うことが出来ない。

本研究では、船舶の操縦性試験から動特性を示す操縦性指数¹⁾を求め、それに基づいてゲインを計算し、その後船舶の保針制御系のフードバック系を構築した。

2. 洋上でのデータ収録実験

2.1 収録方法

富山高等専門学校所属 練習船若潮丸(以下、若潮丸)(表1)を使用して、富山湾上にて操縦性試験の1つであるZigzag試験を行った。試験は右10度/20度、左10度/20度の計4回実施した。計測にはアナログ入出力機を使用した。プログラムを作成して若潮丸に搭載される各センサからの電圧値を、船首方位・舵角・回頭角速度など4チャンネルについてをサンプリングタイム0.2秒で記録した。

表1 「若潮丸」主要目表

全長	[m]	53.59
型幅	[m]	46.00
型深さ	[m]	10.00
航海速度	[km/s]	23.2

2.2 CPU制御による自動Zigzag試験

今回は、全自動でZigzag試験を実行するプログラムを作成した。Zigzag試験を手動で行う場合は、操舵に要する時間と操舵タイミングは操船者の感覚と経験に任されており、均一な試験を行うことが出来なかった。そこで自動で試験を行うことにより、指令舵角の変化に要する時間を最小すること、タイミングの誤差を均一にすることが出来た。以前に比べ正確な試験の実施が可能となった。実行した結果を以下に示す(図2)。

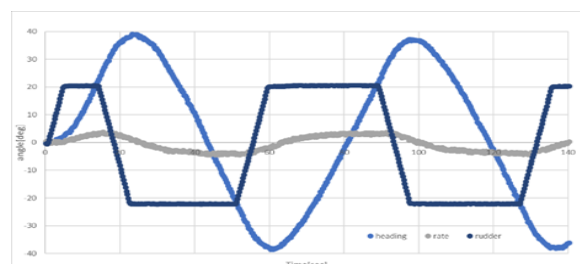


図1 右20度Zigzag試験

3. 解析

船体モデルには「野本の一次系運動方程式」(式1)を採用した。 r は角速度、 δ は舵角を示す。

$$T \frac{dr_{(t)}}{dt} + r_{(t)} = K \times \delta_{(t)} \quad (1)$$

この船体モデルは、舵角と船体角速度の関係を追従性指数 T と旋回性指数 K と呼ばれる2つのパラメータにより表現するモデルである。この2つを合わせて操縦性指数と呼ぶ。最小二乗法を用いた数値解析を行い実験データから若潮丸の動特性を示す操縦性指数を求めた。

4. 結果と検証

実験解析の結果以下の操縦性指数TKを得た(表2)。

表2 若潮丸の操縦性指数

追従性指数 T [sec]	6.5
旋回性指数 K [1/sec]	0.16

検証は舵角の実験データを若潮丸の船体モデルに入力し、そのモデルから計算し出力される角速度応答と実験で計測された実際の角速度応答を比較することにより行った。図2は比較結果のグラフである。この比較から船体モデルと操縦性指数の妥当性を確認した。

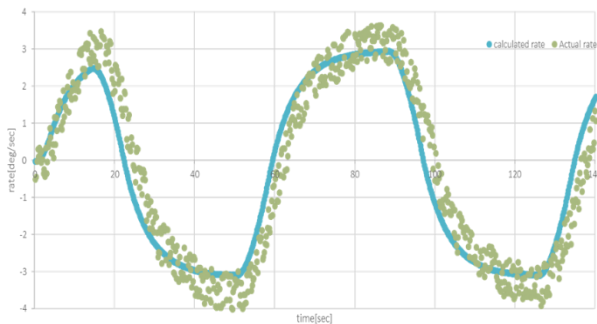


図2 計算角速度と実験角速度の比較

5. 制御系の構築と調整

若潮丸の操縦性指数を船体モデルに適用し、針路制御を行うフィードバック回路(図3)をMATLABにて作成した。また針路制御系の特性方程式(式2)を求めた。

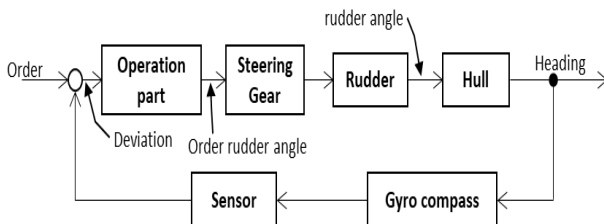


図3 保針系ブロック線図

$$TT_r s^3 + (T + T_r) s^2 + s + Kk_c = 0 \quad (2)$$

コントローラにはPID制御を使用した。式2とラウスの安定判別法(表3)により限界感度は2.73となった。各ゲインはジューグラ・ニコルスの限界感度法(表4)を使用して比例ゲイン1.64微分ゲイン3.58積分ゲイン14.3と求めた。その後、航海実習の経験をもとに比例ゲインを0.8倍、微分ゲインを2倍、積分ゲインを5倍にするチューニングを行った。30度変針のシミュレーション結果を図4に示す。

表3 ラウスの表

	1列目	2列目	3列目
s^n	a_n	a_{n-2}	a_{n-4}
s^{n-1}	a_{n-1}	a_{n-3}	a_{n-5}
s^{n-2}	$-\frac{ a_n \ a_{n-2} }{a_{n-1}}$	$-\frac{ a_n \ a_{n-4} }{a_{n-1}}$...
⋮	⋮	⋮	⋮

表4 ジューグラ・ニコルスの限界感度法

	Kp	Ti	Td
PID	0.6Kc	0.5Tc	0.125Tc

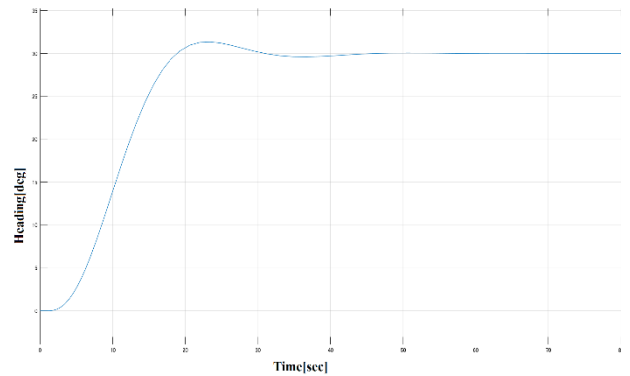


図4 右30度変針シミュレーション

6. おわりに

本研究では洋上でCPU制御による操縦性試験を行ってデータを収録した。その後、船体モデルに基づいて操縦性指数を求めた。その若潮丸の操縦性指数を元に、船舶の保針制御を行うフィードバック制御系をMATLABにより設計した。コントローラにはPID制御を使用し、各ゲインはジューグラ・ニコルスの限界感度法により定め、さらに経験に基づくチューニングを行うことにより、若潮丸に最適化したPID制御の各ゲインを決定した。

参考文献

- 1) 中谷俊彦, 小型練習船の動特性解析と制御について, 計算工学講演会議文集 Vol23, 2018
- 2) 日本造船学会: 第二回操縦性シンポジウム, 1970
- 3) 高谷邦夫: MATLABの総合応用, 2002年
- 4) 広井和男, 宮田郎: 自動制御技術入門, 2004