

船舶オートパイロットの安全で簡単なゲインチューニングについて

Practical Gain Tuning Method of The Ship's Autopilot System

中谷俊彦¹⁾, 龜井志聖²⁾, 池田陽貴³⁾, 早勢欣和⁴⁾, 布目明弘⁵⁾,

家城竜也⁶⁾, 浦恵里夏⁷⁾, 牧田祥子⁸⁾,

Toshihiko Nakatani, Shisei Kamei, Haruki Ikeda, Yoshikazu Hayase, Akihiro Nunome, Tatsuya Yashiro, Erika Ura and Shoko Makita

- 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1-2, E-mail: nakatani@nc-toyama.ac.jp)
- 2) 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1-2, E-mail: kamei@nc-toyama.ac.jp)
- 3) 株式会社ヨウコウテクノロジーズ(〒108-8540 東京都港区芝浦2-1-13, E-mail: ikedahalki@gmail.com@ydktechs.co.jp)
- 4) 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-12, E-mail: hayase@nc-toyama.ac.jp)
- 5) 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1-2, E-mail: nunome2020@nc-toyama.ac.jp)
- 6) 株式会社ヨウコウテクノロジーズ(〒151-0051 東京都渋谷区千駄ヶ谷5-23-13, E-mail: tatsuya_yashiro@ydktechs.co.jp)
- 7) 富山高等専門学校 技術室 (〒933-0293 富山県射水市海老江練合1-2, E-mail: ura@nc-toyama.ac.jp)
- 8) 富山高等専門学校 技術室 (〒933-0293 富山県射水市海老江練合1-2, E-mail: makita405@nc-toyama.ac.jp)

Ziegler and Nichols ultimate sensitivity method is well known as the simplest method for PID tuning. The method should be carried out experiment to occur self-oscillation in the stability limit and found out the critical gain and the critical period in point. However, the ship's course or rudder angle cannot be predictable until experiment is conducted, therefore the safety of experiment is not protected. This paper describes the practical method for tuning PID using relay control. In this method, using the relay feedback control, and experiments are conducted safety and easily.

Key Words : Ship, Autopilot, PID, Relay, Limit cycle, Describing function, Bias correction

1. はじめに

船舶用自動操舵装置（以下、オートパイロット）は、船首を設定された針路へ向け、またその針路を保つように自動的に操舵するフィードバック制御系の航海計器である。制御器にはPID制御系が使用されることが多いが、適切なゲイン調整が必要である。その調整方法は種々提案されているが、船員が自ら洋上で調整を行わなければいけないため、安全かつ容易に行える必要がある。ジーグラとニコルスの限界感度法（以下、ZN法）[1]は容易な調整手法として知られるが、使用する舵角を設定することができず、また、システムが不安定になる可能性があることから、船体の危険や船員の不安を伴う。そこで、Åströmらが提案する、舵角を任意に設定できるリレー制御法[2]を使用して、より安全なオートパイロットのゲイン調整を行い、さらに、海上で予想される一定方向からの波や風のような外乱も印加するシミュレーションを行って、より実用的なオートパイロットの制御ゲインの調整を行った。

2. 研究の目的

ZN法に代わって、任意に設定可能な一定の舵角を使用するリレー制御法を用いることで、より安全にオートパイロットのPID制御ゲインを調整する。さらに、海上で想定される一定方向からの風や波などの外乱も想定したシ

ミュレーションを行い、より実用的な調整手法を提案することを目的とする。

3. 2値リレー制御によるゲイン計算

オートパイロットのPIDゲイン調整のシミュレーションを行うにあたり、Pythonを使用して、古典的なPID制御によるオートパイロットの設計を行う。オートパイロットの操舵機モデルを時定数Trとする一次遅れ系、船体モデルを追従性指数Tと旋回性指数Kによって表す野本の一次系操縦運動モデルとし、そのパラメータは表-1に示す本校の練習船・若潮丸のものを用いる。

表-1 若潮丸の操縦性指数、舵取機時定数

Time Constant	T	7.38 [sec]
Nomoto Gain	K	0.13 [1/sec]
Time Constant of Steering Gear	Tr	3.36 [sec]

ZN法は、制御系を比例制御のみとし、そのゲインとして限界ゲイン K_c を使う。 K_c はシステムのパラメータから、 $K_c = (Tr + T) / (Tr \cdot T \cdot K)$ のように求められる。 K_c を使うと、システムは持続振動が発生し、その周期 T_c と K_c を用いてPID制御ゲインが決定できる。この手法は容易に行えるが、

K_c の算出に使用したパラメータに誤差がある場合、システムが不安定となる可能性がある。一方、今回提案するリレー制御法では、制御器をリレー制御としたリレーフィードバック制御を使用し、自励振動を発生させる。リレー制御は、入力信号の正負と同じ符号の一定値を出力する非線形制御で、振幅Xの正弦波を入力すると、その正弦波と同じ周期で一定の振幅Mの矩形波を出力する。この時、入出力から求められる伝達関数は、記述関数N(X)と呼ばれ、 $N(X) = 4M/(\pi X)$ となる。リレーフィードバック制御では、リレー信号である指令舵角を操舵機や船体といったシステムの制御プロセスに入力する。プロセスでは高周波成分が減衰されることで、自励振動と呼ばれる正弦波に近似される応答波形がリレー制御へフィードバックされる。ここで自励振動の周期がTcに、記述関数N(X)がKcに等しくなることから、PID制御ゲインを決定することができる。この手法では、リレー舵角を安全な任意の舵角に設定できるため、自励振動の振幅を抑えることができ、さらに、記述関数はパラメータに依存しないため、システムが不安定となる危険性が小さい。

一般的に海上では一定方向からの風や波も発生する。そのような一定外乱を印加すると、リレー信号の正負の時間が非対称となり、望ましい自励振動が発生せず、記述関数や振動周期を正しく求めることができなかつた。そこで、一周期あたりのリレー出力の平均値を正負の時間T₁、T₂を用いて求め、その値を元のリレー出力へ足し合わせて補正を行う[3]。すなわちリレー平均出力M₀=M·(T₁-T₂)/(T₁+T₂)を計算し、補正值M^{*}=M+M₀を用いて正常な自励振動を発生させる。

リレー制御法を評価するにあたってまず、ZN法とのシミュレーション結果を比較することでその有用性を検証し、次にリレー制御法について一定外乱を加え、補正を行い外乱の下でも有効であることを示す。最後に、ZN法とリレー制御法のそれぞれで調整した制御ゲインを用いて変針シミュレーションを行うことで動作確認をし、リレー制御法を評価する。

4. 提案する手法による制御結果

PID型オートパイロットの制御ゲイン調整のシミュレーションを行う前に、Pythonによって、古典的なPID制御によるオートパイロットを設計し、動作確認のため保針・変針シミュレーションを行った。

次に、図-1に示すZN法による持続振動と図-2に示すリレー制御法による自励振動を比較し、リレー制御法の有用性を検証した。図-2では、使用する舵角を

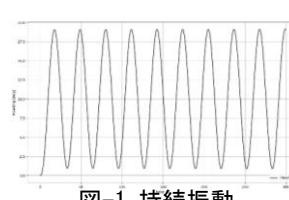


図-1 持続振動

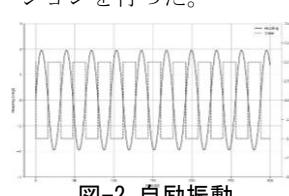


図-2 自励振動

一定に設定することで持続振動より振幅を抑制していることが分かる。図-2のシミュレーション結果から、リレー制御の記述関数と自励振動周期を求め、

それぞれZN法のKc及びTcとほぼ等しいことを確認する。

さらに、リレー制御法の実用性を高めるため、海上で想定される一定方向からの風や波を模擬した外乱を印加し、シミュレーションを実施した。図-3の左半分から、自励振動が正常に発生していないことが分かる。そこで、リレー出力を補正した結果、図-3の右半分では正常な自励振動が発生していることが分かる。さらに、この場合においても、記述関数や振動周期はKcとTcとほぼ等しいことを確認した。

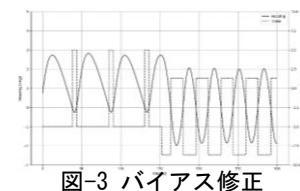


図-3 バイアス修正

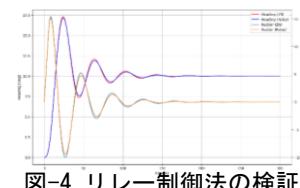


図-4 リレー制御法の検証

最後に、ZN法とリレー制御法のそれぞれの手法で調整されたゲインを用いて、保針・変針シミュレーションを行った。図-4では、リレー制御法による調整が、ZN法による調整によるシミュレーションとほぼ重なっていることから、リレー制御法による調整が実用上問題ないことが示された。

5. おわりに

本研究では、PID型オートパイロットの制御ゲイン調整手法について、リレー制御法を用い、ZN法よりも安全性が高く、海上での外乱下でも調整可能な実用的な手法を示した。この手法では、リレー制御による自励振動の周期や記述関数を求めれば調整が可能であることから、動特性パラメータを必要としない。また航海士が安全な舵角を設定できることからZN法のような大きな振動が発生することも防げる。このことから、荷役直後で操縦性能に変更が生じた時や、一定方向から強い風や波を受ける悪天候の下でも、安全かつ簡便に制御ゲインの調整を行うことができる実用的な手法であることが示された。

今回はシミュレーションを用いたが、実際の船舶を用いて洋上でリレー制御法による調整を実施し、シミュレーションとの相違点を解析、評価することで、より実用性を高めることができると考えられる。

参考文献

- [1] J.G. Ziegler and N.B. Nichols: Optimum Settings for Automatic Controllers, Transactions of the ASME, Vol.64, pp. 759-768, 1942
- [2] K.J. Åström and T. Hägglund: Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins, Automatica, Vol.20, No.5, pp.645-651, 1984
- [3] C.C.Hang and K.J. Åström: Practical Aspects of Autotuners Based on Relay Feedback, IFAC Proceedings. Vol.21, No.7, pp. 153-158, 1988