

# 洋上における船用自動操舵装置の ゲイン調整について

中谷俊彦\*, 亀井志聖\*\*, 池田陽貴\*\*\*

## Practical Gain Tuning Method for Ship's Autopilot at Sea

NAKATANI Toshihiko\*,  
KAMEI Shisei\*\*,  
IKEDA Haruki\*\*\*

The classical controller is still used for ship's autopilot system as a basic controller and should be tuned the gains appropriately. 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. The critical gain can be calculate using the parameter of ship's maneuvering index and rudder actuator. However, the method has a formidable risk for experiments. The ship's course or rudder angle cannot be predictable until experiment is conducted, therefore the safety of experiment is not protected. In addition, if the calculated critical gain is incorrect, the rudder angle and ship's course increase.

This paper describes the practical method for tuning PID using relay control. The limit cycle method is effective. In this method, using the relay feedback control, and experiments are conducted safety and easily. The limit cycle is occurred based on safe rudder angle which is set in advance, and the describing function of relay control and the period of the limit cycle is equal to critical gain and critical period respectively.

キーワード: 船用自動操舵装置, オートパイロット, PID, ゲイン調整, 限界感度法, 記述関数, リレー制御

### 1. はじめに

船用自動操舵装置(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。また自動制御理論の試金石として古くから利用されてきた歴史がある<sup>1)</sup>。その制御則は PID 制御が基本的なものとして多く使用され、ゲインの適切な調整が必要である。その調整方法は種々提案されているが、洋上では船員が自ら調整を行う特性上、安全かつ容易に行える必要がある。ジエグラとニコルスの限界

感度法<sup>2)</sup>は容易な調整手法として知られており、限界感度状態の理論計算を行った。しかし、この方法は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もあることから、船員にとって大きな危険や不安を伴う。そこで、Åströmらが提案するリレー制御法<sup>3)</sup>によって舵角を任意に設定して使用する、より安全なオートパイロットのゲイン調整を行った。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して、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. 船舶操縦運動方程式

まず基本的なオートパイロットの設計を行うが、設計には船体に関する何らかの操縦運動モデルが必要となる。船体の操縦運動モデルは、日本独自の MMG モデル<sup>4)</sup>など、いくつかのモデルが提案されているが、

\* 商船学科

e-mail: nakatani@nc-toyama.ac.jp

\*\* 商船学科

\*\*\* 株式会社ダイトーコーポレーション

((研究当時)専攻科海事システム工学専攻)

本研究では、船体角速度  $r$  と舵角  $\delta$  の関係を次の式(1)のように示す野本の一次系操縦運動モデル<sup>4)</sup>を採用する。

$$T \frac{r(t)}{dt} + r(t) = K\delta \quad (1)$$

式(1)の  $T$  と  $K$  は船体操縦性指数と呼ばれる係数であり、船舶の操縦性能を示す指標となっている。 $T$  と  $K$  によって表される式(1)を TK モデルや KT モデルと呼ぶこともある。

$T$  と  $K$  は、操縦性試験と呼ばれ、海上で実施される特別な試験を解析することによって算出することができる。特に Z 試験は、連立方程式によって TK 解析を行える有効な試験方法として知られている<sup>5)</sup>。

本研究での供試船は富山高等専門学校・練習船「若潮丸」である。図 1 にその全景を、表1に主要目を示す。



図 1 富山高等専門学校・練習船「若潮丸」

表 1 若潮丸の主要目

Wakashio-maru	
Length over all	53.59 [m]
Breadth	10.00 [m]
Gross tonnage	231 [ton]
Draft	3.20 [m]
Navigation speed	12.5 [knot]
Engine power	1300[PS]
Engine speed	390 [rpm]
Propellor	CPP
Rudder	Schilling rudder

### 3. 船用自動操舵系

#### 3.1 保針制御系の設計

オートパイロットの制御器には、未だ PID 制御則が使用されることが多い。操舵機をシンプルな一次遅れ系とし、船体モデルを 2.で述べた TK モデルを採用する

と、オートパイロットのブロック図は図2のようになる。各ブロックはラプラス変換された伝達関数によって表されている。また、TK モデルは舵角の入力に対して角速度を出力するため、船体ブロックの後に積分器を設け、角度信号をフィードバックしている。

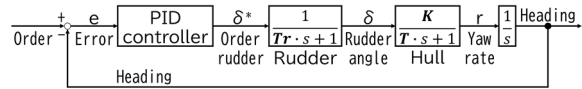


図 2 保針制御系のブロック図

#### 3.2 ブロック図に基づく数値計算シミュレーション

シミュレーションを実行するためには、図 2 のブロック図を数値計算が可能な数式に変換する必要がある。例えば一次遅れ系では、入力を  $X$ 、出力を  $Y$ 、一周期前の出力を  $Y'$ 、シミュレーションのサンプリング周期を  $dt$  とすれば、計算式は式(2)のようになる。

$$Y = \frac{K}{T \cdot s + 1} \cdot X \Rightarrow Y = \frac{T}{T + dt} \cdot Y' + \frac{K \cdot dt}{T + dt} \cdot X \quad (2)$$

このような数値計算プログラムによってオートパイロットを設計し、PID ゲインについて簡易な調整を行い、10 度変針のシミュレーションを行うと、図 3 のようになる。

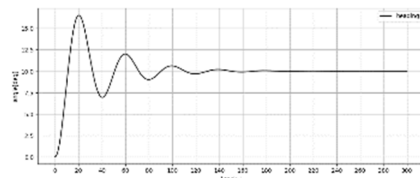


図 3 10 度変針のシミュレーション結果

このシミュレーションで使用した若潮丸の動特性パラメータを表 2 に示す。

表 2 若潮丸の操縦性指数など

Time Constant <b>T</b>	7.38 [ sec]
Nomo Gain <b>K</b>	0.13 [1/sec]
Time Constant of Steering Gear <b>Tr</b>	3.36 [ sec]

### 4. 制御ゲインの調整

オートパイロットの調整方法は、機器の保守や制御系設計者ではない船員が洋上で確実に行える、などの観点から、安全かつ容易に実施できることが必要である。本章では、2つの調整方法を示す。

4.1 限界感度法

限界感度法<sup>2)</sup>は、比例制御のみを使用し、比例ゲインを徐々に大きくし、系を安定限界にする手法である。一般に、安定限界にある系は、図4のような持続振動と呼ばれる周期振動が発生することが知られている。

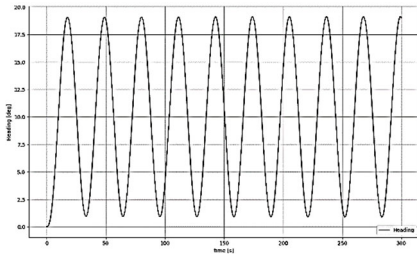


図4 限界感度法による持続振動状態

表3 ジーグラ・ニコルス則<sup>2)</sup>

	Gain of P Kp	Gain of I Ti	Gain of D Td
P	0.5Kc	-	-
PI	0.45Kc	0.83Tc	-
PID	0.6Kc	0.5Tc	0.125Tc

その周期を Tc、ゲインを Kc とすると、PID ゲインは表3に示すようになる。安定限界のとき、系のベクトル軌跡は(-1, j0)の点にある。すなわち、系のモデルが既知である場合、Kc や Tc はベクトル軌跡を用いて、系のパラメータから求めることができる。図2に示した船用自動操舵系の場合、開ループ系 G(s)は、次の式(3)となる。

$$G(s) = \frac{Kc \cdot K}{T \cdot T_r \cdot s^3 + (T + T_r) s^2 + s} \quad (3)$$

ここで、開ループ系の周波数伝達関数 G(jω)は複素数となる。G(jω)=(-1, j0)、すなわち虚部が0となる位相交差角周波数 ωc から、周期 Tc に変形すると、次の式(4)となる。

$$Tc = 2\pi \cdot \sqrt{T \cdot T_r} \quad (4)$$

ωc を G(jω)に代入した G(jωc)は実部のみとなる。G(jωc)=-1となれば系は安定限界となることから、次の式(5)のように限界ゲイン Kc が求められる。

$$Kc = \frac{T_r + T}{T \cdot K \cdot T_r} \quad (5)$$

このように限界感度法は、系の動特性パラメータが既知ならば、それらのパラメータから Kc、Tc が求まる。しかし、比例ゲインを上げる際に、少しでもゲインが大きくなると系が不安定になるため、熟練の技術を要する。また、制御系の動特性パラメータは、常に一定であることの方が少なく、船舶の場合においても、積荷の状況や船体及び操舵機の経年変化によってパラメータは変動する。これらのことから、限界感度法をオートパイロットに適用する場合は困難が予想される。

4.2 リミットサイクル法

一方、リミットサイクル法<sup>2)</sup>は Kc、Tc を求める過程で、図5のような、リレーフィードバック制御を用いて、左右に一定の振幅 M の舵角を使用するため、システムが不安定になる可能性が低い。

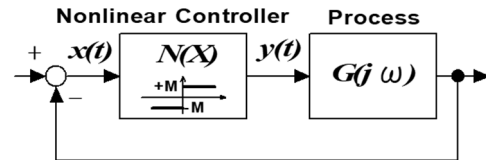


図5 リレーフィードバック制御

リミットサイクル法では、リレー操舵によって、一定の幅 X のリミットサイクルを発生させる。Kc はリミットサイクルの振幅 X とリレー振幅 M から記述関数<sup>3)</sup>と呼ばれる X と M の関係式 N(X)から、式(6)となる。

$$N(X) = \frac{4M}{\pi X} \quad (6)$$

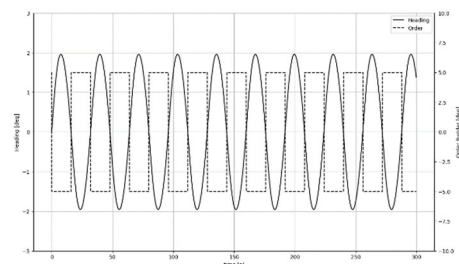


図6 リミットサイクル

図6にリミットサイクル法のシミュレーション結果を示す。図6において、リミットサイクル法で求めた  $K_c$ 、 $T_c$  と式(4)、(5)で示した  $K_c$ 、 $T_c$  との誤差を計算すると、それぞれ 2.33%と 1.16%であり、実用上問題の無い誤差であった。リミットサイクル法は、使用する舵角  $M$  を海技者が決めるだけですぐに試験を実施できる。 $K_c$  や  $T_c$  は、応答波形から求めればよく、動特性パラメータを全く使用しないため、洋上での調整を簡便に且つ安全に実施できる。この手法では、左右に一定の舵角を取るよう操舵すれば、手動操舵でもただちに試験が実施できる点からも、限界感度法よりも利便性や安全性が高いと考えられる。

### 5. 外乱への適用

リミットサイクル法は、リレー制御を使用することで、システムを安定限界にせずに  $K_c$  と  $T_c$  を求められる手法である。しかし、海上での一定方向からの風や波浪などの外乱の下では図7の左半分に示すように、リミットサイクルの形が変形するため、通常の手法のように  $K_c$ 、 $T_c$  を求められない。そのような場合、リレー出力の正負の時間  $T_1$ 、 $T_2$  を用いて式(7)のように補正值  $M_0$  を求める<sup>6)</sup>。

$$M_0 = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} \cdot M \quad (7)$$

式(7)は、リレー出力の一周期あたりの平均値である。求められた  $M_0$  をリレー舵角に加減したものを、制御プロセスに入力することで、図7の右半分のように通常のリミットサイクルを発生させ、 $K_c$ 、 $T_c$  を求めることができる。一定外乱に対する補正の実施後の  $K_c$ 、 $T_c$  の誤差は、それぞれ、5.62%、2.21%であった。

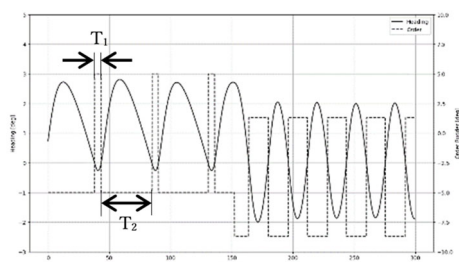


図7 外乱下におけるバイアス補正の効果

海上では一定外乱のほかにも不規則な外乱も存在し、そちらの影響の方が大きい場合もある。シミュレーションではそのような外乱も加えて検討を行い、期待したリミットサイクルが発生していることを確認している。

### 6. 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の調整方法について、リミットサイクル法を適用した手法を示した。この方法では、未知のモデルに対しても応答波形からゲインを調整できる。また、一定外乱の下でも、外乱で変形されたリミットサイクルに補正を加えれば、適切なリミットサイクルを発生させることができる。これらのことから、本手法は限界感度法よりも高い実用性と安全性を持つ手法であることが示された。

### 7. 謝辞

本研究を実施するにあたって、若潮丸金山船長、山谷機関長以下乗組員の方々に大変御世話になりました。またデータ解析にあたって、浦技術専門職員、牧田技術専門職員にはご協力を頂きました。これらの方々に深く感謝致します。

### 8. 参考文献

- (1) N.Minorsky, “Directional Stability of Automatically Steered Bodies”, J.of ASNE, 42(2), 280-309(1922)
- (2) J.G. Ziegler and N.B. Nichols, “Optimum Settings for Automatic Controllers”, Transactions of the ASME, 64, 759-768(1942)
- (3) K.J. Åström and T. Hägglund, “Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins”, Automatica, 20(5), 645-651(1984)
- (4) 野本,田口, “船の操縦性について”, 造船協会論文集, 101, 57-66(1957)
- (5) 野本,村瀬,他, “操縦性の研究における自航模型の適用について”, 造船協会論文集, 110, 43-50(1961)
- (6) C. C. Hang and K. J. Åström, “Practical Aspects of Auto-tuners Based on Relay Feedback”, IFAC Proceedings, 21(7), 153-158(1988)