

スライディングモード制御を用いた船舶の自動操船に関する研究

学籍番号 23413567 氏名 松本 悟

指導教員名 水野 直樹

1. 緒言

近年、船舶の運航は先進国での船員の志願者不足、効率的運用などといった観点から自動化が望まれている。自動操船として最短時間操船法^[1]が個人差のない客観的な操船法の一つとして知られている。しかしながら、最短時間操船解は数値的に収束計算によって得るため、計算に時間を要する。また、従来から自動操船に用いられている制御手法である PID 制御は、外乱の影響や船舶の非線形性の影響により著しく制御性能が低下してしまう恐れがある。これらのことから、自動操船においては外乱に対応することのできる優れたロバスト性が必要とされていることがわかる。

そこで、予備研究ではロバスト性に優れた制御手法の一つであるスライディングモード制御^[2]に着目した。チャタリング低減のためにスライディングモード制御にゲインスケジューリングを加えた手法を提案し、最短時間幅寄せを目標として自動操船に適用した。スライディングモード制御の有効性を確認することができたが、チャタリングの低減が不十分である点と目標航路生成の汎用性に課題が残った。

このような問題に対応するために、本研究では汎用性の高い航路生成法を提案し、予備研究よりもさらにチャタリングを低減させるためにゲインの調整に外乱に応じてオンラインで調整する調整則^[4]を用いた。これらの手法を組み合わせた提案システムを自動操船に適用した。提案システムの有効性を確認するために、実船実験を行った。

2. 航路生成

2.1 幅寄せ操船

本研究では幅寄せ操船解を目標とした。幅寄せ操船を Fig. 1 のように一定速度で航行している船舶をコースライン A から、Y 方向に任意距離 l [m] 変位して、コースライン B へとコースライン

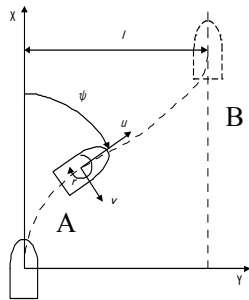


Fig. 1 幅寄せ操船
を変更する操船”と定義する。Fig. 1 中の X [m], Y [m] は船体位置座標, u [m/s], v [m/s] は船体前後方

向速度, 船体横方向速度, ψ [deg] は回頭角度, l [m] は船舶の幅寄せ距離である。

予備研究ではこの幅寄せ操船を最短時間で行う最短時間幅寄せ操船を目標とした。

2.2 エルミート補間とフィルタの適用

本研究ではエルミート補間とフィルタを適用することで汎用性の高い航路生成を行う手法を提案した。まず、エルミート補間によって次式で表せる幅寄せ操船の航路を幾何学的に求める。

$$f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (1)$$

このままでは、船舶の運動特性を考慮していないため、求めた航路に次式のようなフィルタを適用することで、船舶が追従可能な航路を生成する。

$$h_f = \frac{\omega_n^2}{(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)^n} \quad (2)$$

3. 制御系設計

3.1 スライディングモード制御

回頭角度を目標値としてスライディングモード制御を用いて目標航路に追従させる。船舶の運動方程式には次式を用いる。

$$Tr + r = K\delta \quad (3)$$

また、切換関数 s を次のように定める。

$$s = \dot{\psi} + 2\lambda\psi + \lambda^2 \int_0^t \psi(\tau) d\tau \quad (4)$$

ただし、 $\psi = \psi - \psi_d$ であり、 λ は固有値、 ψ_d : 目標回頭角 [deg] である。さらに、スライディングモードの到達則は次式を用いる。

$$\dot{s} = -Q \text{sgn}(s) - K_s s \quad (5)$$

とする。よって制御入力 δ は次式となる。

$$\delta = \frac{T}{K} r + \frac{1}{K} r - Q \text{sgn}(s) - K_s s \quad (6)$$

ここで、 T, K は対象船舶の特性の推定値である。

3.2 到達則ゲインの調整則

3.2.1 予備研究での手法

予備研究では、ゲインスケジューリングを用いてゲイン調整を行った。スライディングモード制御において、ゲイン Q, K_s を外乱やモデル誤差を

含む等価外乱に対して大きくしてしまうと、チャタリングが発生してしまい、逆に等価外乱に対して小さいとロバスト性が低下してしまう。幅寄せ操船においては、幅寄せ操船中は等価外乱が大きく、幅寄せ操船終了後には等価外乱が小さくなると思われる。そこで、次式のように y 方向に幅寄せ操船がほぼ終了する距離 l_c 変位した時に到達則のゲインの大きさに変更するようにした。

$$|l - y(t)| > l - l_c \quad Q = Q_0, K_s = K_{s0} \quad (7)$$

$$|l - y(t)| \leq l - l_c \quad Q = Q_1, K_s = K_{s1} \quad (8)$$

3.2.2 到達則ゲインのオンライン調整則

本研究ではゲインをオンラインで調整する手法を用いた。予備研究では予め設定しておいた値を用いてゲインを調整していたため、等価外乱を大きく見積もってゲインを設定してしまうとチャタリングが発生してしまう。等価外乱の大きさを正確に見積もることが可能であればよいが、自動操船における外乱は時々刻々と変化するため、正確に見積もることはできない。そこで、次式のように外乱の大きさに応じてゲインを自動的に調整するゲインの調整則を用いる。

$$s(t) = -Q(t) \cdot s(t) - Ks(t) \cdot sig(s) \quad (9)$$

$$Q(t) = \tilde{Q}|s(t)| \cdot sig(|s(t)| - \varepsilon) \quad (10)$$

$$Ks(t) = \tilde{K}s|s(t)| \cdot sig(|s(t)| - \varepsilon) \quad (11)$$

3.3 目標回頭角度の補正

スライディングモード制御では回頭角度のみを目標値として追従させるため、目標航路から誤差を生じると、そのままでは航路への追従が達成できなくなる。

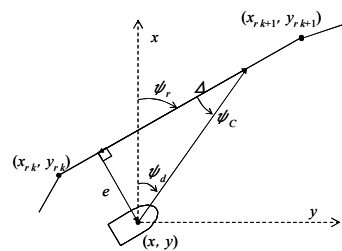


Fig. 2 回頭角度補正の概略図

そこで、Fig. 2 のように目標回頭角度を補正する^[5]。Fig.2 中の e は目標位置と現在位置の誤差[m]、 Ψ_r は目標回頭角度[deg]、 Ψ_c は補正角度[deg]、 Ψ_d は補正後の目標回頭角度[deg]、 Δ は任意の定数[m]である。

4. 実船実験

4.1 実験条件

小型練習船を用いて実船実験を行った。実験条件として、初期船速を約 10 ノット、幅寄せ距離は 150m とした。制御手法は予備研究での手法と提案手法の 2 種類を比較した。

4.2 実験結果

実験結果を Fig. 3 に示す。実験結果を見ると提案手法は目標航路によく追従しており、制御入力も予備研究での手法と比較して、大きく振動していないことが分かる。このことから、追従可能な航路生成が行うことができている。また、チャタリング低減についても提案手法は予備研究の手法と比較して有効であるといえる。

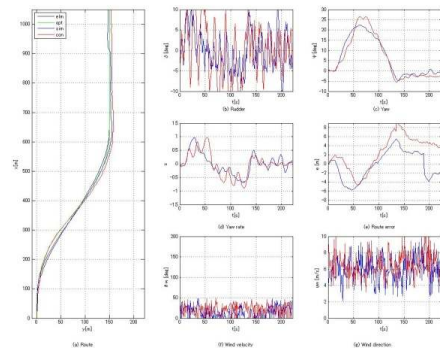


Fig. 3 実験結果

5. 結言

予備研究において、チャタリングを低減するためにゲインスケジューリングをスライディングモード制御に加えた手法を最短時間幅寄せ操船を目標として自動操船に適用し、スライディングモード制御の有効性を確認することができた。しかしながら、チャタリングの低減が不十分である点、目標航路生成における汎用性に課題が残った。それらの問題に対応するため、本研究ではゲインをオンラインで調整する手法と汎用性の高い航路生成法を組み合わせたシステムを提案し、実船実験を行い、その有効性を確認した。実船実験の結果、提案システムは目標航路によく追従し、航路生成法の有効性を確認できた。また、提案システムを用いることで予備研究のシステムと比較して、チャタリングを低減することができた。

参考文献

- [1] 大津皓平, 非線形計画法による最短時間操船の数値解法, 造船学会論文集, 第 196 号, 99-104, (2004)
- [2] 野波健蔵, 田宏奇, スライディングモード制御. コロナ社, (1994)
- [3] Leonid Fridman, Jaime Moreno, Rafael Iriarte, Sliding Modes after the First Decade of the 21st Century, Springer, (2011)
- [4] Thor I. Fossen, Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, John Wiley & Sons, (2011)