飽和を持つ船体操縦運動の指数安定化制御

地球総合工学専攻　船舶海洋工学コース
船舶知能化領域　　巣山　凜

1.　概要

船舶は貨物や旅客の大量輸送を扱う輸送手段の一つであり，その船舶の安全航行のための技術は重要な研究課題である．本研究では，船舶の針路を制御するオートパイロットの設計において，操舵の制約を陽に考慮し，船首方位角の追従誤差をゼロへ収束させる問題を扱った．舵などの船舶のアクチュエータには，機械的構造に起因する制約が必ず存在し，これらを陽に考慮した制御設計は，重要な課題である．本研究では，操舵において，舵角と操舵レートの双方に制約の存在するモデルを対象とした．制御理論の分野では，入力の制約の存在により，制御則が劣化する可能性のあることが古くから指摘されている．これは，系への入力が制御器により指定された値をとれず，飽和してしまう場合があるためである．入力に上記のような制約が課されたシステムの制御手法が研究されてきており，入力の大きさの制約のみを課す場合や，線形システムを対象とした場合では，有効な制御手法が提案されている．しかしこれまでに非線形システムを対象とし，入力の大きさとレートの双方に制約が存在するシステムに対し，指数安定性を得る制御則の設計は，いまだ未解決の問題である．

本研究は船舶の船舶操縦運動の非線形応答モデルを対象とし，舵角の大きさと操舵レートに制約が存在する場合であっても，一定の条件を満たす目標船首方位角の信号に対して，追従誤差を原点で指数安定とするオートパイロットを設計することを試みた．まず，アクチュエータ状態を，出力が有界な tanh 関数を用いて表現することで，制約条件満足を保証した．次に，この表現に従い，制御対象が状態や入力に制約を持たないカスケード系を導出した．そして，入力制約の範囲内で追従可能な目標船首方位角の時系列を対象とし，バックステッピング法を適用して，追従誤差を原点で指数安定化する制御則を設計した．また数値シミュレーションを行い，提案手法の有効性を確認した．

2.　手法

まず，操舵の制約は舵角と操舵レートに対し

$$|s(t)| \leq \bar{s}\ \forall t$$

と定式化した．ここで$s(t)$は舵角または操舵レートを表し，$\bar{s}$はその限界である．この制約に対し，状態$s(t)$を，出力が有界な tanh 関数を用いて，

$$s(t) = \bar{s}\tanh(k_s\tilde{s}(t))$$

（$k_s > 0$，$\tilde{s}(t)$は補助変数）と表現する．すると，上記の不等式条件は満足されることが保証される．

上記表現に従い，状態量の時間微分を計算することで，補助的に導入された変数状態方程式を含んだカスケードシステムが得られた．さらにこのシステムに対しては，段階を踏んで安定化する手法であるバックステッピング法によって，望ましい制御則が設計可能であることが確認された．

3. 数値実験

導出されたカスタードシステムに対し，バックステッピング法を適用して設計したオートパイロットを用いて目標船首方位角の追従制御をした際の時系列の例を図 1 に示す．ただし図 1 には，船首方位角ψとその目標信号ψ^{d}，舵角δ，操舵レート$\dot{\delta}$の時系列のみを示しており，補助変数の時系列は省略した．青色実線，黄色点線，赤色点線はそれぞれ，カスタードシステムに従う状態量，目標船首方位角ψ^{d}，操舵の制約の閾値を表す．図 1 のψ^{d}は，従来の手法で追従を試みると，操舵の制約によって追従が困難となる場合のある目標信号である．図 1 より，提案制御則によって，操舵の制約を満足しながら，目標信号を追従することが確認できる．

4. まとめ

本研究では，操舵の制約（舵角と操舵レート）を考慮した船舶のオートパイロット設計問題を扱った．提案手法では，まず出力の有界な tanh 関数によって制約の満足を保証し，その上で，バックステッピングによって安定化が可能なシステムを導出した．

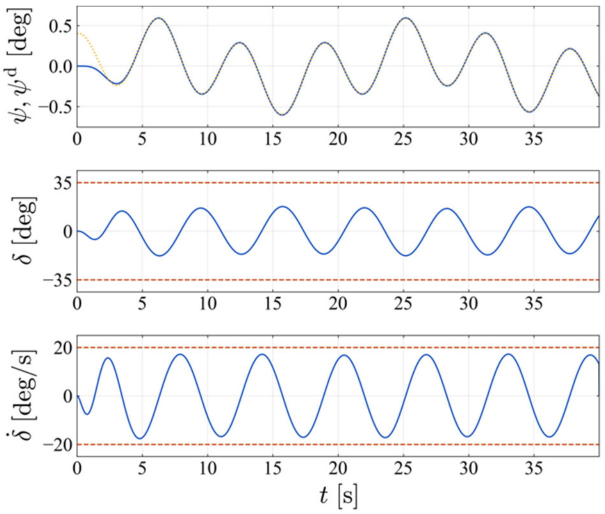

図 1 設計したオートパイロットによる制御の時系列