

平成 21 年 4 月 30 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18560428

研究課題名（和文）非線形予見 H 無限大制御理論による障害物回避を目的とする自動操船システムの開発

研究課題名（英文）Development of Autopilot and Collision Avoidance Systems for Ships by Nonlinear Receding Horizon H_{∞} Control Theory

研究代表者

片山 仁志 (KATAYAMA HITOSHI)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：20268296

研究成果の概要：

障害物回避(衝突回避を含む)機能を持つ船舶の自動操船システムの開発を目指し、船舶のコンピュータ制御用の線形及び非線形サンプル値制御理論を構築した。そして、障害物回避を目的とした制御器(具体的には、安定化制御器、追従制御器)を設計した。さらに、共同研究先企業と共に開発した実験船を用いて、制御器の性能評価を行い、非線形サンプル値制御理論に基づく制御系設計法の適用により、障害物回避機能を持つ自動操船システムの開発の可能性を確認した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,400,000	0	1,400,000
2007年度	500,000	150,000	650,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	300,000	2,700,000

研究分野：非線形制御、船舶制御、ロバスト制御

科研費の分科・細目：(分科)電気電子工学 (細目)制御工学

キーワード：制御システム、船舶制御、障害物回避、自動操船システム、予見 H_{∞} 制御、非線形サンプル値制御

1. 研究開始当初の背景

- (1) 社会的背景：日本近海での航行船舶の増加、熟練船乗りの不足、漁業従事者の高齢化などから、船舶の海難事故が増加しているため、障害物回避(衝突回避を含む)機能を持つ船舶の自動操船システムの開発は重要である。実際、大型船用自動操船システムの研究と開発は進んでいるが、アクチュエータとセンサー数が制限され、波・風などの外乱の影響を受けやすい中小型船用自動操船システム

はほとんど開発されていない。しかし、安全な海上交通の確保のためにも、中小型船舶用の自動操船システムの開発は重要である。

- (2) 理論的背景：コンピュータ制御用の線形サンプル値制御理論、船舶制御用の数学モデル、制御理論の適用による船舶用の制御器設計法は理解している。特に、線形制御理論適用による中小型船舶用の自動操船システムの設計は十分に理解している。そこで、線形制御理論による

制御器の性能の評価を行うと共に、最新の非線形制御理論の開発と船舶制御への適用を考え、より高性能かつ実用的な中小型船舶用の自動操船システムの設計を目指す。

2. 研究の目的

研究目的は、センサー、アクチュエータ数が制限される小型船の障害物回避を目的とした自動操船システムの非線形予見 H_{∞} 制御理論による設計である。具体的には、以下の項目の達成を研究目的とする。

- (1) 船舶の各種制御用数学モデルの導出と簡易的な中小型船舶のパラメータ同定方法の確立。
- (2) 制御理論を用いた自動操船システム設計アルゴリズムの開発。
 - ① 線形予見 H_{∞} 制御理論による設計アルゴリズムの開発。
 - ② 線形サンプル値制御理論による設計アルゴリズムの開発。
 - ③ 非線形予見 H_{∞} 制御理論による設計アルゴリズムの開発。
 - ④ 非線形サンプル値制御理論による設計アルゴリズムの開発。
- (3) Matlabによる自動操船システム設計用プログラムの開発。
- (4) Simulinkによる自動操船システムの性能評価用シミュレーションプログラムの開発と設計したシステムの性能評価。
- (5) 小型船と同サイズの実験船による実証実験
 - ① 実験船のモデル化とパラメータ同定。
 - ② 設計システムによる実証実験。
 - ③ 実証実験によるシステムの性能評価。
 - ④ 外乱に対する性能の劣化の確認と対策。

3. 研究の方法

- (1) 船舶制御用モデルの構築：船舶の航行速度を低速に限定した制御系設計用モデルと制御系の性能評価用の厳密モデルを運動学方程式と流体付加的効果も考慮した運動方程式に基づいて構築する。
- (2) 船舶のパラメータ同定方法の確立：大型船舶用モデルのパラメータ同定に用いられる流体力学用のソフトウェアを使用しないで、ソフトコンピューティングの1つの方法である遺伝的アルゴリズムの利用による船舶モデルのパラメータ同定を行う。
- (3) 自動操船システム設計：船舶モデルの非線形性とコンピュータ制御の観点から、非線形サンプル値制御理論の適用による自動操船システムの設計を最終ゴールとする。また、障害物回避機能を追従制御器の設計により実現する。以上より、以下の手順でより現実的な制御器(自動

操船システム)の設計を行う。

- ① 船舶の線形化モデルに対し、連続時間 H_{∞} 制御、出力レギュレーション理論を適用し、安定化制御器と追従制御器を設計する。
- ② 船舶の線形化モデルに対し、サンプル値 H_{∞} 制御、出力レギュレーション理論を適用し、コンピュータ制御可能な安定化制御器と追従制御器を設計する。
- ③ 船舶の線形化モデルに対し、サンプル値予見 H_{∞} 制御理論を適用し、コンピュータ制御可能な安定化制御器と追従制御器を設計する。
- ④ 船舶の非線形モデルを陽に用いて、バックステッピング法に代表される連続時間非線形制御理論を適用し、安定化制御器と追従制御器を設計する。
- ⑤ オイラー近似モデルに基づく非線形サンプル値系の制御理論を船舶の非線形モデルに適用可能な理論に拡張する。
- ⑥ 船舶の非線形モデルのオイラー近似モデルに拡張した非線形サンプル値制御理論を適用し、コンピュータ制御可能な安定化制御器と追従制御器を設計する。
- (4) 制御器設計用プログラムの開発：各制御器(自動操船システム)を設計する Matlab プログラムを開発する。
- (5) 性能評価用プログラムの開発：
 - ① Simulinkによる、風、波、潮流などの自然外乱の数学モデル化を行う。
 - ② 船速に依存して変化する船舶モデルの非線形性のモデル化を行う。
 - ③ 以上を導入し、Simulinkによる自動操船システムの性能評価用シミュレーションプログラムの開発する。
- (6) 実験船の準備と制御系の設定：以下の手順で実験船を準備する。
 - ① 実証実験用の小型ボートの用意。
 - ② ダイナミック GPS とジャイロコンパスのセンサーの準備。
 - ③ ダイナミック GPS 用の基地局の設置。
 - ④ 制御アクチュエータとしての電動モータによる推進装置(プロペラ型スクルー)の設置。
 - ⑤ 制御アクチュエータの性能テストと簡単なモデリング。
 - ⑥ アクチュエータの設置によるアクチュエータ配置行列の決定。
- (7) 実験船のモデルの構築：遺伝的アルゴリズムによる実験データとモデルによるシミュレーション結果との最適適合により、船舶モデルのパラメータを同定する。そして、制御器の性能評価用モデルと制御器設計用モデルを構築する。
- (8) 実験船に対する各制御器の設計：実験船のモデルに(4)で開発したプログラム適用し、各制御器を設計する。

- (9) 設計制御器の性能評価：、(5)で開発した評価用プログラムにより、コンピュータシミュレーションの観点から、制御器(自動操船システム)の性能を評価する。
- (10) 実験船による実証実験：実験船に実装可能なサンプル値制御理論を用いて設計した制御器による実証実験を以下の手順で行う。
- ① 線形サンプル値 H_∞ 制御理論、出力レギュレーション理論により設計した制御器の実証実験による評価。
 - ② 線形予見 H_∞ 制御理論により設計した制御器の実証実験による評価。
 - ③ 非線形サンプル値制御理論を用いて設計した制御器の実証実験による評価。
- (11) 実験結果の評価：動作点近傍における次の各実験結果から制御器の性能評価を行う。また、制御性能の限界を考察する。
- ① 初期値応答
 - ② 外乱応答
 - ③ 追従制御
- (12) 制御器設計法と実験船の改良：制御器設計法の高度化と性能間の評価、制御器の更なる改良、性能改善に向けた実験船自体の変更を考察する。

4. 研究成果

コンピュータ利用による自動操船システムの開発のために、船舶制御用の線形及び非線形サンプル値系の制御理論を構築し、安定化制御器と追従制御器を設計した。そして、実験船の準備とその制御用モデルを構築し、制御理論に基づく制御器の性能を実証実験から評価した。主要な研究成果は以下のとおりである。

- (1) 実験船の開発：(株)ヤマハ発動機と共同で自動操船システムの検証用の実験船を開発した。開発した船舶は、全長 3[m]、全幅 1[m]であるが、Matlab、Simulinkで設計した制御器(自動操船システム)を直接実装可能なシステムとした。また、センサー(GPS、ジャイロコンパス、慣性計測システム(IMU))、アクチュエータ(3基の電動スラスタ、スラスタ用制御ユニット(ECU)：船首に1組、船尾の左右に1組づつ)、メインコンピュータ(MABX)を車載用RAN(CAN)でネットワーク通信可能なものとした。その構成を図1に示す。
- (2) 実験船のモデリング：船舶の航行速度を低速に限定した制御系設計用モデルと制御系の性能評価用の厳密モデルを運動学方程式と流体付加的効果も考慮した運動方程式に基づいて構築した。
- (3) 実験船のパラメータ同定：手動による実験船のジグザグ操船、円弧操船、その他自由操船の実験データと船舶の数学モデルに同一の入力を与えたときのシミュレ

ーションデータとの遺伝的アルゴリズムによる最適適合から、船舶モデルのパラメータを同定した。結果として、船速が 1.5[m/s]程度であれば、比較的高精度なパラメータが短期間に得られた。図2に実験データと同定パラメータによるシミュレーション結果との比較を示す。

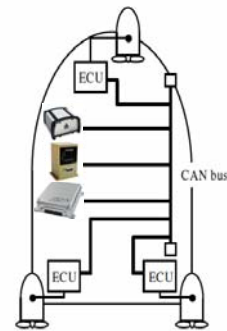


図1. 実験船の構成

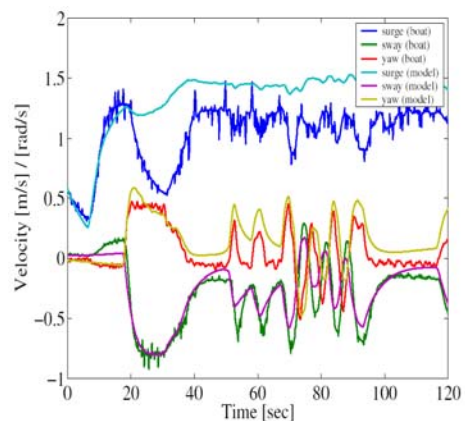


図2. 自由操船での船舶速度の実験とモデルによるシミュレーション結果の比較 (surge, sway, yaw 方向の船速の時間応答)

- (4) 線形理論によるシステムの開発：線形サンプル値出力レギュレーション理論を船舶制御に利用可能な形に拡張し、船舶用の安定化制御器(定点保持用の自動操船システム)と追従制御器(障害物回避機能を持つ自動操船システム)を設計した。また、実験船による実証実験から制御器の性能を評価した。
- ① 初期値応答：セットポイントを原点に指定し、安定化制御器による原点からのずれの修正に対する性能を確認した。船舶の姿勢にいくらかの無理が生じる場合もあるが、良好な原点のずれからの修正(初期値応答)が得られた。実験結果を図3に示す。図中の船型の表示は、5秒ごとの船の位置と姿勢を表す。
 - ② 外乱応答：セットポイントに停泊している実験船を、搭乗者がオールで漕ぐこと

により、左舷に外乱を与え、そのときの時間応答から、安定化制御器の外乱抑制の性能を評価した。与えられた外乱に対し、制御無では船舶はセットポイントからずれていくが、制御ありの場合には、おおむねセットポイント付近に船舶を留められた。実験結果を図4に示す。

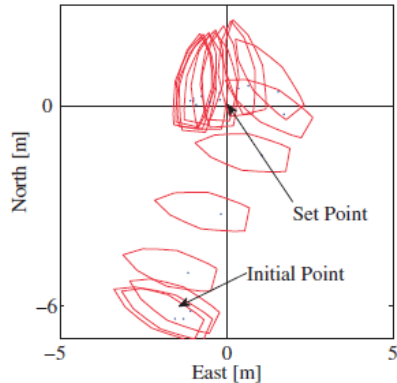


図3. 初期値応答(実験結果)

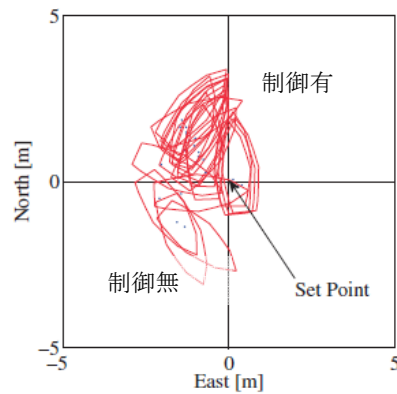


図4. 外乱応答(実験結果)

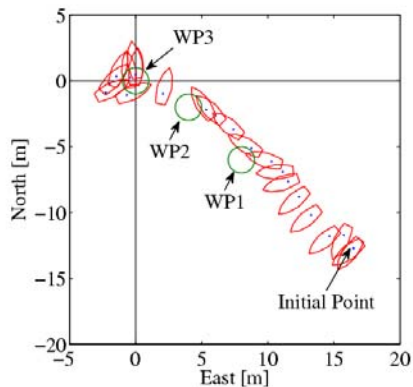


図5. ウェイポイントトラッキング(実験結果)

- ③ 追従制御：障害物を避けるウェイポイント(WP)を与え、その地点を經由して船舶を原点(セットポイント)へ自動操船させることを目的に追従制御器を設計した。そして、初期状態から出発した実験

船を3点のWPを經由して原点に移動させる自動操船を行った。実験結果として、実験船は、おおむねWPの付近を通過し、原点に到達しているが、船舶の姿勢に無理が生じる場合が見られた。ただし、理論的な理由から、通過点間を直線的に移動する自動操船しか実現できなかった。実験結果を図5に示す。

- (5) 非線形サンプル値制御理論の拡張：非線形連続時間システムのオイラー近似モデルに基づくサンプル値制御系設計法を、船舶モデルに適用可能なものに理論面での拡張を行った。これにより、1入力システムのみならず多入力システムにも適用可能にした。
- (6) 非線形制御理論によるシステムの開発：自動操船システムの性能向上を目指し、船舶の制御系設計モデルの非線形性を陽に利用する。そのために、船舶のオイラー近似モデルに基づく非線形サンプル値制御系設計法を用いると共に、船舶用(全状態と低次元)オブザーバを設計し、船舶用の(出力フィードバック)安定化制御器(定点保持用自動操船システム)と(出力フィードバック)追従制御器(障害物回避機能を持つ自動操船システム)を設計した。また、実験船による実証実験から制御器の性能を評価した。

- ① 初期値応答：セットポイントを原点に指定し、安定化制御器による原点からのずれの修正に対する性能を確認した。線形制御の適用に比べ、船舶は滑らか、かつ短時間で原点に収束した。姿勢に大きな無理が生じることも少なく、良好な原点のずれからの修正(初期値応答)が得られた。実験結果を図6に示す。
- ② 外乱応答：搭乗者が、セットポイントに停泊中の実験船の左舷に外乱を与えたときの時間応答から、安定化制御器の外乱抑制の性能を評価した。与えられた外乱に対し、制御無では船舶はセットポイントからずれるが、制御有では、原点に船舶を留められた。初期値応答と同様に、時間応答は線形制御理論の適用の場合よりも良好であり、原点への収束性(収束時間)、外乱抑制度も良好であった。実験結果を図7に示す。
- ③ 追従制御：障害物を避ける船舶操船軌道を与え、その軌道に沿っての船舶の自動操船を目的に追従制御器を設計した。実証実験では、船舶の位置軌道として正弦波軌道、軌道の接線方向に船舶姿勢を追従させた。実験結果として、実験船が与えられた軌道と姿勢に正確に追従する自動操船を実現できた。船速は比較的低速であるが、高精度な追従性能が得られている。実験結果を図8に示す。

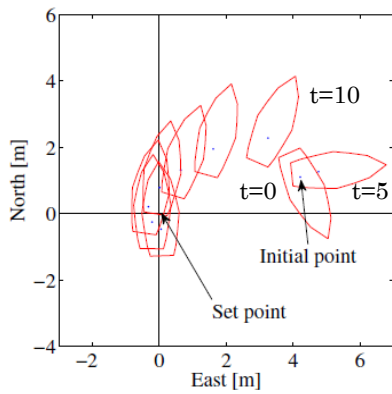


図 6. 初期値応答(実験結果)

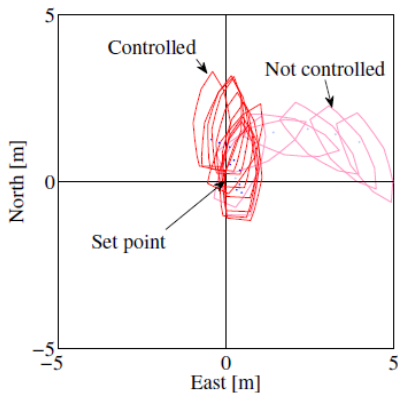


図 7. 外乱応答(実験結果)

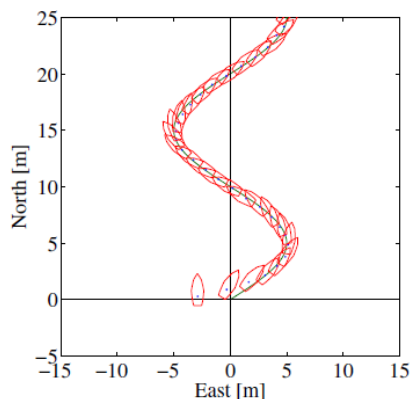


図 8. 位置と姿勢追従制御:位置はsin軌道、姿勢は軌道の接線方向への追従(実験結果)

線形制御理論に基づき設計された制御器では、船舶モデルの線形化や外乱に基づく性能劣化を保証しきれないが、非線形サンプル値理論に基づく制御器は、安定性と制御性能に対し高いロバスト性と高機能性を持つことが分かった。このことから、障害物からの回避軌道の生成と非線形サンプル値理論による追従制御器の組み合わせにより、障害物回避目的とする実用的な自動操船システムを設計できることを実証した。

世界的に見ても、連続時間制御理論に基づく船舶制御系設計がほとんどであり、船舶の

コンピュータ制御に関する結果はほとんど存在しない。また、得られた結果の有効性は、実証実験により確認されたものでもある。このような点から、本研究結果は、船舶制御におけるサンプル値系の制御理論の有効性と実現性に大きく貢献したものと思われる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- (1) 片山仁志, Nonlinear sampled-data stabilization of dynamically positioned ships, IEEE Transaction on Control Systems Technology, 査読有(掲載決定).
- (2) 市原裕之, 片山仁志, Finite time control with observer-based output feedback for linear discrete-time systems, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol. 2, No. 2, 2009, pp. 65-71.
- (3) 佐藤康之, 中村文一, 片山仁志, 西谷紘一, Adaptive inverse optimal control of a magnetic levitation system, In Adaptive Control, edited by Kwanho You, 査読有, IN-TECH, Austria, 2009, pp. 307-322.
- (4) 片山仁志, 市川 朗, Receding horizon H_∞ control problems for sampled-data systems, International Journal of Systems Science, 査読有, Vol. 38, No. 12, 2007, pp. 957-976.
- (5) 片山仁志, 市川 朗, Output feedback receding horizon stabilization and H_∞ control for time-varying discrete-time systems, International Journal of Systems Science, 査読有, Vol. 38, No. 1, 2007, pp. 73-85.
- (6) 市川朗, 片山仁志, Output regulation of time-varying systems, Systems and Control Letters, 査読有, Vol. 55, No. 12, 2006, pp. 999-1005.

[学会発表] (計 13 件)

- (1) 片山仁志, Nonlinear sampled-data stabilization of dynamically positioned ships by reduced order observer-based controllers, 2009 European Control Conference, 2009年8月, Budapest, Hungary.
- (2) 梶 洋隆, 片山仁志, Digital control problems for dynamically positioned ships, 2009 IEEE Multi-conference on Systems and Control, 2009年7月9日 Saint Petersburg, Russia (2009).
- (3) 片山仁志, 船舶の動的位置決め制御用低次元オブザーバの設計, 第9回制御部

- 門大会, 2009年3月4日, 広島大学.
- (4) 梶 洋隆, 片山仁志, 船舶のデジタル制御問題, 第9回制御部門大会, 2009年3月4日, 広島大学.
 - (5) 片山仁志, Nonlinear sampled-data stabilization control for ships, 2008 American Control Conference, 2008年6月11日, Seattle, USA.
 - (6) 梶 洋隆, 片山仁志, Sampled-data output regulation for ships, SICE Annual Conference 2008年8月20日, 電気通信大学.
 - (7) 森口達也, 片山仁志, 船舶のサンプル値追従制御, 第51回自動制御連合講演会, 2008年11月23日, 山形大学.
 - (8) 片山仁志, 出力フィードバックによる船舶のサンプル値安定化, 第8回制御部門大会, 2008年3月6日, 京都大学.
 - (9) 片山仁志, 市川 朗, Output regulation for sampled-data systems with application to marine systems, 46th IEEE Conference on Decision and Control, 2007年12月12日, New Orleans, USA .
 - (10) 片山仁志, 船舶のサンプル値制御, 第36回制御理論シンポジウム, 2007年9月5日, 札幌.
 - (11) 片山仁志, 中川雅史, 市川 朗, 出力レギュレーションによる船舶の追従制御, 第7回制御部門大会, 2007年3月6日, 電気通信大学.
 - (12) 片山仁志, 市川 朗, Robust model predictive control for sampled-data systems, SICE-ICASE International Joint Conference 2006, 2006年10月21日, プサン, 韓国.
 - (13) 片山仁志, 市川 朗, Receding horizon H_∞ control for nonlinear sampled-data systems, 17th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems, 2006年7月25日, 京都.

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
片山 仁志 (KATAYAMA HITOSHI)
静岡大学・工学部・准教授
20268296
- (2) 研究分担者
なし
- (3) 連携研究者
なし