

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 1日現在

機関番号：13801  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2009～2011  
 課題番号：21560459  
 研究課題名（和文）走航波外乱抑制機能を持つ中小型船舶用フォーメーション制御系の開発  
 研究課題名（英文）Development of Formation Control Systems with Disturbance Rejection for Small Ships  
 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（和文）：走航波外乱抑制機能を持つ中小船舶のフォーメーション制御系の開発を目指し、コンピュータ制御用の全駆動船舶の非線形フォーメーション制御系設計理論と劣駆動船舶のフォーメーション制御系設計の一部として直線軌道追従制御系の設計理論を構築した。状態フィードバック制御則と低次元オブザーバ型出力フィードバック制御器の2種類の制御器の設計法を提案した。また、提案手法の有効性をコンピュータシミュレーションと実機実験により確認した。

研究成果の概要（英文）：Formation control of sampled-data fully-actuated ships and straight-line path following control of sampled-data under-actuated ships are considered to develop computer-controlled formation control systems with disturbance rejection for small ships. The design methods of state feedback and output feedback controllers are given for both problems. Moreover, effectiveness of the proposed design methods is shown by simulation and experimental results.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：制御システム、船舶制御、フォーメーション制御、非線形サンプル値制御、自動操船システム

1. 研究開始当初の背景

- (1) 国内では、車両・飛行機の制御に比較して、船舶の制御の議論自体少なく、また船舶のフォーメーション制御の議論は皆無である。
- (2) 国外では、船舶の各種制御は議論されているが、フォーメーション制御の議論は、車両・飛行機と比較して少なく、議論も

大型船舶に関するものである。

- (3) 自然外乱(波、風、海流)の影響を受けやすい中小型船舶のフォーメーション制御は、各船舶からの走航波外乱の影響を相互に受けるため、大型船舶の場合より難しくなる。

2. 研究の目的

船舶間相互通信システムの能力から船舶間隔が狭い10数隻程度の船団の効率的な操船制御を目指し、走航波外乱抑制機能を持つ船舶のフォーメーション制御系の開発を行う。具体的には、以下の項目の達成を研究目的とする。

- (1) 船舶のコンピュータ制御の観点から、非線形連続時間系に関し議論が進んでいるフォーメーション制御理論を非線形サンプル値系へ拡張する。
- (2) 走航波外乱のモデリングを行い、走航波外乱の影響を制御系設計に取り入れ、これを抑制する制御方式を考案する。
- (3) 走航波外乱の影響抑制機能を持つ船舶用フォーメーション制御系の設計方法を確立し、Matlab/Simulink による制御系設計アルゴリズムを開発する。
- (4) 1 隻の船舶の走航実験による走航波外乱の計測を行い、走航波外乱のモデリングの評価とモデリングの修正あるいは問題点の導出を行う。
- (5) 走航波外乱抑制機能を持たない船舶用フォーメーション制御系における走航波外乱の影響の確認と評価を行う。
- (6) 走航波外乱抑制機能を持つ船舶用フォーメーション制御系による実証実験と制御系の性能評価を行う。

### 3. 研究の方法

- (1) 船舶のフォーメーション制御系の設計：船舶モデルの非線形性とコンピュータ制御の観点から、線形フォーメーション制御理論と非線形サンプル値制御理論の適用による船舶のフォーメーション制御系設計を最終ゴールとする。以下の手順でより現実的なフォーメーション制御器設計を行う。
  - ① 状態フィードバックフォーメーション制御則の設計：サンプル値全駆動船舶に対し、線形コンセンサス制御理論と非線形サンプル値制御理論を組み合わせることにより、離散時間状態フィードバックフォーメーション制御則を設計する。
  - ② 船舶の速度推定用オブザーバの設計：船舶モデルとそのオイラー近似モデルの特徴を利用して、船舶の位置情報から船舶速度を推定する低次元オブザーバを設計する。
  - ③ 出力フィードバックフォーメーション制御器の設計：状態フィードバックフォーメーション制御則と船舶の速度推定用オブザーバを組み合わせることにより、船舶の位置情報のみを用いて、サンプル値全駆動船舶のフォーメーションを達成する離散時間出力フィードバックフォーメーション制御器を設計する。
  - ④ サンプル値劣駆動船舶の直線軌道追従状

態フィードバック制御則の設計：制御アクチュエータとしてスラスタと舵のみの劣駆動船舶のフォーメーション制御系設計の準備として、1 隻のサンプル値劣駆動船舶の直線軌道追従状態フィードバック制御則を設計する。

- ⑤ サンプル値劣駆動船舶の直線軌道追従出力フィードバック制御器の設計：直線軌道追従状態フィードバック制御則と船舶の速度推定用低次元オブザーバを組み合わせから、船舶の位置情報のみを用いて、サンプル値劣駆動船舶の直線軌道追従を達成する離散時間出力フィードバック制御器を設計する。
  - ⑥ サンプル値劣駆動船舶の状態フィードバックフォーメーション制御則の設計：直線軌道追従制御則設計の際に、船舶間の距離に対応するパラメータを指定することにより、サンプル値劣駆動船舶の状態フィードバックフォーメーション制御則を設計する。
  - ⑦ サンプル値劣駆動船舶の出力フィードバックフォーメーション制御器の設計：直線軌道追従出力フィードバック制御器設計の際に、船舶間の距離に対応するパラメータを指定することにより、サンプル値劣駆動船舶の出力フィードバックフォーメーション制御器を設計する。
- (2) フォーメーション制御器設計用プログラムの開発  
フォーメーション制御器等の設計用 Matlab/Simulink プログラムを開発する。
  - (3) シミュレーションによる性能評価  
サンプル値全駆動船舶とサンプル値劣駆動船舶に対する各制御器の性能を以下の手順に基づき、コンピュータシミュレーションにより評価する。
    - ① サンプル値全駆動船舶に対する状態フィードバックフォーメーション制御則の制御性能の評価。
    - ② サンプル値全駆動船舶に対する出力フィードバックフォーメーション制御器の制御性能の評価。
    - ③ 1 隻のサンプル値劣駆動船舶に対する状態フィードバック直線軌道追従状態フィードバック制御則の追従制御性能の評価。
    - ④ 1 隻のサンプル値劣駆動船舶に対する出力フィードバック直線軌道追従制御器の追従制御性能の評価。
    - ⑤ サンプル値劣駆動船舶に対する状態フィードバックフォーメーション制御則の制御性能の評価。
    - ⑥ サンプル値劣駆動船舶に対する出力フィードバックフォーメーション制御器の制御性能の評価。

- (4) 実機実験による性能評価  
劣駆動実験船に実装可能なサンプル値制御理論を用いた設計制御器による実証実験を以下の手順で行い、設計制御器の性能を評価する。
- ① 1隻のサンプル値劣駆動船舶に対する状態フィードバック直線軌道追従制御則の追従制御性能の評価。
  - ② 1隻のサンプル値劣駆動船舶に対する出力フィードバック直線軌道追従制御器の追従制御性能の評価。
  - ③ 仮想的に1隻の劣駆動船舶を設定し、状態フィードバックフォーメーション制御則による制御性能の評価。
  - ④ 仮想的に1隻の劣駆動船舶を設定し、出力フィードバックフォーメーション制御器による制御性能の評価。

#### 4. 研究成果

船舶のフォーメーション制御系の開発のために、3個の独立な制御アクチュエータを利用可能な全駆動船舶に対するフォーメーション制御系設計法を構築し、その有効性をシミュレーションにより確認した。次に、制御アクチュエータとしてスラスターと舵のみが利用可能となる、より現実的な劣駆動船舶のフォーメーション制御系の設計の一部として、劣駆動船舶の直線起動追従制御器設計法を構築し、その有効性をシミュレーション及び実機実験により検証した。主要な研究成果は以下のとおりである。

- (1) サンプル値全駆動船舶のフォーメーション制御系の設計
  - ① 線形コンセンサス制御理論と非線形サンプル値制御理論を組み合わせによる状態フィードバックフォーメーション制御則の設計法の構築。
  - ② 船舶モデルとそのオイラー近似モデルの特徴を利用した低次元オブザーバに基づく出力フィードバックフォーメーション制御器の設計法の構築。
  - ③ ①-②による設計制御器のシミュレーションによる性能評価 (図 1)。

図 1 のシミュレーション結果から制御開始 4 秒後に、設計制御器が 3 隻の全駆動船舶の三角形フォーメーションを達成している。また、各船舶は同速度となる。このことから、提案設計法は十分な制御性能を持つことがわかる。

- (2) サンプル値劣駆動船舶に対する直線軌道追従制御系の設計
  - ① サンプル値劣駆動船舶のオイラー近似モデルに Line-of-Sight ガイダンスアルゴリズムと非線形サンプル値制御理論の

適用による直線軌道追従状態フィードバック制御則の設計法の構築。

- ② 船舶モデルとそのオイラー近似モデルの特徴を利用した低次元オブザーバと①で設計した直線軌道追従状態フィードバック制御則の組み合わせによる直線軌道追従出力フィードバック制御器の設計法の構築。
- ③ ①-②による設計制御器のシミュレーションによる性能評価 (図 2)。
- ④ ①-②による設計制御器の実機実験による性能評価 (図 3)。

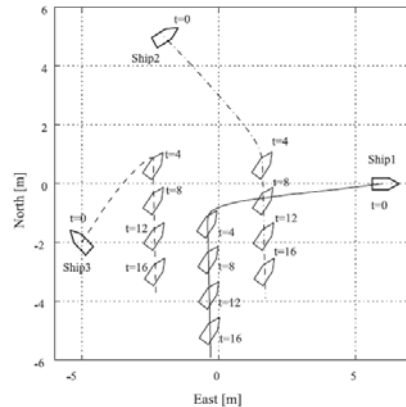


図 1. 3 隻の全駆動船舶の三角型フォーメーション制御結果

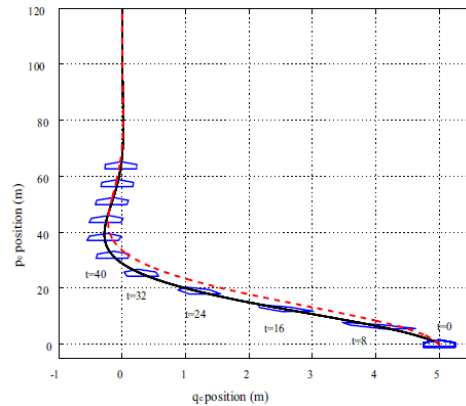


図 2. シミュレーション結果 (黒実線: 出力フィードバック, 赤破線: 状態フィードバック)

図 2, 3 のシミュレーション及び実験結果より、提案手法による設計制御器が良好な直線軌道追従性能を有することが確認できる。

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、船舶のサンプル値 (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、得られた結果の一部の有効性は、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、船舶のフォーメーション制御における非線形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である。

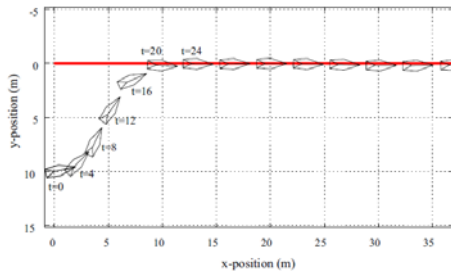


図 3. 実験結果(出力フィードバック)

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- (1) 片山仁志, Sampled-data consensus control for nonlinear multi-agent systems of strict-feedback form with application to marine systems, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol. 4, No. 6, 2011, pp. 417-422.
- (2) 佐藤康之, 中村文一, 中村奈美, 片山仁志, 西谷紘一, Universal control formula for feedback linearizable systems with local LQ performance, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol. 4, No. 1, 2011, pp. 22-28.
- (3) 片山仁志, Nonlinear sampled-data stabilization of dynamically positioned ships, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 査読有, Vol. 18, No. 2, 2010, pp. 463-468.

[学会発表] (計 17 件)

- (1) 片山仁志, 出力フィードバックによる劣駆動船舶のサンプル値直線軌道追従制御, 第 12 回 制御部門大会, 2012 年 3 月 15 日, 奈良市.
- (2) 片山仁志, Sampled-data straight-line path following control for underactuated ships, 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, 2011 年 12 月 13 日, Orlando, USA.
- (3) 片山仁志, 劣駆動船舶のサンプル値直線軌道追従制御, 第 54 回自動制御連合講演会, 2011 年 11 月 20 日, 豊橋市.

- (4) 片山仁志, 厳密フィードバック形の非線形サンプル値マルチエージェント系の出力フィードバックコンセンサス制御, 第 40 回制御理論シンポジウム, 2011 年 9 月 27 日, 大阪市.
- (5) 片山仁志, Stabilization of a Magnetic Levitation System by Backstepping and High-Gain Observers, SICE Annual Conference, 2011 年 9 月 14 日, Tokyo.
- (6) 片山仁志, LOS ガイダンスに基づくサンプル値劣駆動船舶の円軌道追従制御, 第 11 回 制御部門大会, 2011 年 3 月 18 日, 那覇市.
- (7) 片山仁志, Sampled-data consensus control for nonlinear fully-actuated ships, 49th IEEE Conference on Decision and Control, 2010 年 12 月 16 日, Atlanta, USA.
- (8) 片山仁志, LOS ガイダンスによる劣駆動船舶のサンプル値軌道追従制御, 第 39 回制御理論シンポジウム, 2010 年 9 月 27 日, 大阪市.
- (9) 片山仁志, Design of reduced-order observer-based emulation controllers for dynamically positioned ships, 2010 IEEE Multi-conference on Systems and Control, 2010 年 9 月 9 日, Yokohama.
- (10) 片山仁志, Consensus control problem of nonlinear sampled-data fully-actuated ships, SICE Annual Conference Taipei, 2010 年 8 月 21 日, Taipei, Taiwan.
- (11) 片山仁志, Sampled-data cross-track control for underactuated ships, 19th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems, 2010 年 7 月 6 日, Budapest, Hungary.
- (12) 片山仁志, 船舶のサンプル値動的位相決め制御のための低次元オブザーバ型 Emulation 安定化制御器の設計, 第 10 回 制御部門大会, 2010 年 3 月 16 日, 熊本市.
- (13) 森口達也, オイラー近似モデルに基づく船舶のコンセンサス制御, 第 52 回自動制御連合講演会, 2009 年 11 月 23 日, 米沢市.
- (14) 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 26 日, Budapest, Hungary.
- (15) 片山仁志, Design of reduced-order observer-based output feedback stabilizing controllers for dynamically positioned ships,

ICROS-SICE International Joint  
Conference 2009, 2009年8月19日,  
Fukuoka.

- (16) 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.

## 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

研究者番号: 20268296

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし