

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3月31日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560458

研究課題名（和文） 情報結合構造の変化を考慮した群移動ロボットによる物体協調把持

研究課題名（英文） Cooperative Grasping Control by Using Swarm Vehicles with Time-Varying Information Structure

研究代表者

滑川 徹 (NAMERIKAWA TORU)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：30262554

研究成果の概要（和文）：

本課題では「情報結合構造の変化を考慮した群移動ロボットによる物体協調把持」の実現のための研究を行った。まず複数小型移動ロボット制御系の構成と数理モデルを導出し、更には時間的に変化する情報結合構造に対応した新しい取り囲み制御則を導出し、その有効性を数値実験によって検証した。次に対象物とロボットエージェントの相互作用力を考慮し、固定した情報結合構造に対するターゲット把持を達成した。

最後に、「時間的に変化する情報結合構造に対するターゲット把持」を達成する制御則の導出を行った。またその制御則を用いた際にシステム全体の漸近安定性を保証出来る条件を明らかにした。得られた理論結果を数値実験と制御実験により検証した。

研究成果の概要（英文）：

This research dealt with cooperative grasping by distributed vehicle swarms. First, we constructed multiple mobile robot control systems, and derived a mathematical model for the system. Then the enclosure control methodology corresponding to the time-varying information structure was derived and the verification by control simulations and experiments was performed. Finally the grasping control for time-varying information structure between mobile robots was proposed. We proved the asymptotical convergence of the closed-loop systems and cooperative grasping was achieved. Several simulations/experiments showed the effectiveness of the proposed cooperative control.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：制御工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：群移動ロボット，情報結合構造，協調把持，協調取り囲み，マルチエージェントシステム，フォーメーション制御，漸近安定性，合意問題

1. 研究開始当初の背景

複数の制御対象が協調して作業を行うマルチエージェントに関しては、これまでも議論されているが、近年グラフ理論とシステム制御理論の融合からのアプローチが注目を集めている。この協調制御理論はセンサネットワークを中心に、ロボットの協調制御、飛行機や宇宙衛星、自動車など移動体のフォーメーション制御、など様々な分野へ応用されようとしている。ダイナミカルシステムとして表現されたエージェント群を協調動作させることで、これまで困難であった高度で複雑なタスクを達成することが可能となる。また個々のエージェントの故障やシステムの規模の拡張、縮小、構成変更、目的変更にも柔軟に対応できる特徴がある。

マルチエージェントシステムの協調制御問題の中でも特に、複数のエージェントが協調して移動対象物の包含、捕獲、把持する制御問題に関する研究が盛んに行われている。この問題の解決には個々のロボットが自律的に動くだけでなく、他のロボットとの相対的な位置・力情報が必要で、制御工学としてもロボット工学としても未解決な問題を沢山含んでいる。またこの制御技術は、安全・監視・防犯システム、動的な自律観測システム、知的自動搬送システム、など様々な分野への応用が期待されている。

この問題に対するアプローチとしては、まずマルチエージェントによるターゲットの追跡・包含、把持のフェーズがある。例えば「追跡・包含」に関しては、エージェント同士が双方向の情報交換を必要としない取り囲み制御則が提案されている。また対象物がある戦略を持ってエージェント群から逃避する場合の協調捕獲可能などの条件を導出しているが、エージェント同士の情報交換については考慮されていない。

「把持」(把握)に関しては、エージェントの物理的な性質や情報結合構造の詳しい性質や時間的な変化、物理的な接触・干渉を含む内容についてはこれまでに全く考察されていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、移動ロボット間の情報結合構造が時間的に変化する場合について、少なくとも1台の移動ロボットが対象物を認識できる範囲内で動的に変化する場合にターゲット(対象物)の追跡、包含、把持を達成できる制御方策を明らかにすることである。更にはその制御方策の有効性を実験的に検証することにある。本研究の具体的な目標は以下の5点である。

1. グラフ理論とアルゴリズム論、システム制御理論に基づく、時間的に変化する情報結合構造を考慮した群移動ロボットによるターゲット包含(取り囲み)制御則を明らかにする。

2. 包含から把持への発展、つまり、物理的な接触と作用力・反作用力を考慮したマルチエージェントシステムのモデルを導出し、それに対する制御則を提案する。

3. 上記目標1. 2を融合・発展させ、時間的に変化する情報結合構造下での群移動ロボットによるターゲット把持を達成する制御則を明らかとする。

4. 提案法の安定性解析を行い、安定条件の導出とフィードバック系の漸近安定性をリアプノフ関数の切り替えを用いて証明する。

5. 知的群移動ロボットシステムとそのデジタル通信・制御システムを構築し、提案制御則の有効性をシミュレーションと制御実験により明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 小型移動ロボットの導入・拡張と数理モデルの導出

本科研費補助金で購入する小型移動ロボット数台を用いてマルチビークルシステムを構成する。また通信装置、リアルタイムビジョンシステム、更にはデジタル制御装置、信号処理ボードを統合・発展させることによって、高速・高精度実時間デジタル制御環境を構築し、研究代表者の研究室の既存の移動ロボット数台と融合し、マルチエージェントシステムを完成させる。作成したエージェント運動学、動力学モデルを計算し、またセンサの特性を計測する。モデルとセンサ特性、アクチュエータ特性を基に同定実験を行い、モデルパラメータを決定する。

(2) 時間的に変化する情報結合構造に対応した取り囲み制御則の導出

マルチエージェントシステムの合意問題に対する協調制御系の設計法と取り囲み制御則を提案する。更にはこれらの結果を基盤に、スイッチング制御則に基づく、時間的に変化する情報結合構造に対応した取り囲み制御則を導出する。

(3) 統合的な制御環境の構築

(1)で構成したマルチビークルシステムを用いて制御実験を行い、(2)で提案した制御則と導出した定理を検証する。さらには従来法と比較検討し、提案法の有効性、問題点を検証する。

(4) エージェントの情報共有によるターゲット把持の達成

ロボット制御のkinematicsを制御するアプローチの1つにTask Functionを用いた制

御方策がある。この制御をマルチエージェントの動作計画に応用し、タスクを n 台のエージェントに振り分ける。エージェントが成す群の状態によって決定される出力値を定義し、それによって群の形態を制御する。これらを統合的に制御することで包含、さらには把持の達成が期待される。

(5) シミュレーションと制御実験

(4) で提案した制御則と導出した定理の検証を主目的とし、複数の把持対象を考慮し、それに関する対応法について制御実験により検討を行う。更には従来法と比較検討し、提案法の有効性、問題点を検証する。

(6) 時間的に変化する情報結合構造に対するターゲット把持の達成

(2) で導出した制御則に基づく、時間的に変化する情報結合構造に対応した取り囲み制御則と(4)で導出した協調制御則を融合、発展させ、動的に変化する情報結合構造に対するターゲット把持を達成させる制御則を最終的に導出する。更には制御則を実システムへ適用し、提案法の検証を行う。

(7) 得られた理論結果、実験結果の解析・考察・検討

得られた制御理論に関する結果と実験結果を分析し、理論と制御系設計にフィードバックをかける。更には研究成果をまとめ、国内外での研究発表と定期刊行雑誌への投稿を行う。

4. 研究成果

本研究の目的は、移動ロボット間の情報結合構造が時間的に変化する場合について、ターゲットの追跡、包含、把持を達成できる制御方策を理論的に明らかにし、更にはその提案制御方策の有効性を実験的に検証することにある。

この目的を達成するため以下の項目に関して研究を行った。

(1) 複数移動ロボット制御系の構成と数理モデルの導出

複数台の小型移動ロボットを用いてマルチビークルシステムを構成した。また通信装置、リアルタイム制御システムを統合・発展させることによって、「高速・高精度実時間デジタル制御環境」を構築した。更に作成したエージェントの運動学、動力学モデルを計算し、またセンサの特性を計測した。そのモデルとセンサ・アクチュエータ特性を基に同定実験を行い、小型移動ロボットのモデルパラメータを決定した。

(2) 時間的に変化する情報結合構造に対応した取り囲み制御則の導出

時間的に変化する情報結合構造に対応した協調取り囲み制御則と、更にはエージェントの絶対位置ではなく、相対距離に基づく動的

協調取り囲み制御則を提案した。これにより物理的にエージェント間のネットワークが動的に変化しても取り囲みを達成することを可能とした。また制御則を用いた場合の閉ループ系の漸近安定性を制御理論的に証明した。

(3) 統合的な制御環境の構築と制御実験による検証

(1)で構成した「高速・高精度実時間デジタル制御環境」を用いて制御実験を行った。これにより(2)で提案した制御則と導出した定理の有効性が検証された。

(4) 固定した情報結合構造に対するターゲット把持の達成

マルチエージェントシステム全体の動作計画を行う際に、特に情報結合構造が固定されている場合に関して、「対象物の取り囲み」と「運搬・把持」の2つのモードに分けた分散制御方策を提案した。具体的には、「取り囲み」モードでは、これまでに申請者が提案してきた制御則を発展させ、新たな制御則として自由なフォーメーション形態を構成可能な制御則へと拡張した。また提案制御方策を用いた閉ループ系の漸近安定性を理論的に証明した。つぎに「運搬・把持」モードでは、仮想の把持対象物の入力を、適当なポテンシャル関数の勾配として設計することで達成した。

(5) シミュレーションと制御実験による提案法の有効性検証

上記で提案した「対象物の取り囲み」と「運搬・把持」の2つのモードでの制御則と導出した定理の検証を主目的として、シミュレーションと制御実験によって有効性を検証した。またアニメーションを用いたシミュレーション評価の可視化を行った。

(6) 時間的に変化する情報結合構造に対するターゲット把持の達成

これまでに理論的に導出した「時間的に変化する情報結合構造に対応した取り囲み制御則」と「対象物の取り囲み」と「運搬・把持」の2つのモードに分けた分散制御方策を融合、発展させ、時間的に変化するダイナミカルな情報結合構造に対するターゲット把持を達成させる制御則を最終的に導出した。またその制御則を用いた際にシステム全体の漸近安定性を保証出来ることを明らかにした。

(7) 得られた理論結果、実験結果の解析・考察・検討

理論的に導出した制御則を用いて数値実験を行い、提案法の検証を行った。3年間に得られた制御理論に関する結果と実験検証結果を分析し、理論と制御系設計にフィードバックをかけ、更には研究成果をまとめ、国内外での研究発表と定期刊行雑誌への論文投稿を行った。

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 34 件)

- ① 滑川徹, スマートグリッドのための分散予測制御, 計測と制御, 査読無, Vol. 51, No.1, pp.62-68, 2012
- ② 小杉和也・滑川徹, 近傍比較戦略に基づく異種混合センサスケジューリング, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 47, No. 8, pp. 329-336, 2011
- ③ Hamzah Ahmad and Toru Namerikawa, Intermittent Measurement in Robotic Localization and Mapping with FIM Statistical Bounds, IEEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, 査読有, Vol. 131, No. 6, pp. 1223 – 1232, 2011
- ④ Toru Namerikawa, Takeshi Hatanaka and Masayuki Fujita, On Predictive Control for Systems with Information Structured Constraints, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol. 4 , No. 6, pp. 452-459, 2011
- ⑤ Nam Duc Do, Yusuke Yamashina, and Toru Namerikawa, Multiple Cooperative Bilateral Teleoperation with Time-Varying Delay, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol. 4, No. 2, pp. 089–096, 2011
- ⑥ Hamzah Ahmad and Toru Namerikawa, Robotic Mapping and Localization Considering Unknown Noise Statistics, Journal of System Design and Dynamics, 査読有, Vol. 5, No. 1, pp. 70-82, 2011
- ⑦ Koji Ishimura and Toru Namerikawa, Cooperative Conveyance by Vehicle Swarms with Dynamic Network Topology, SICE Annual Conference 2011, 査読有, pp. 694 – 699, 2011
- ⑧ Kazuya Kosugi and Toru Namerikawa, Dynamic Target Navigation based on Multi-sensor Kalman Filtering and Neighbor Discovery Algorithm, SICE Annual Conference 2011, 査読有, 2011
- ⑨ Taichiro Kato and Toru Namerikawa, Distributed Control for Load Frequency of Power Networks based on Iterative Gradient Methods, SICE Annual Conference 2011, 査読有, 2011
- ⑩ Yasunori Kawai, Kentarou Nagashima and Toru Namerikawa, Experiments on Transportation Support System using Multi-Vehicle's Formation, SICE Annual Conference 2011, 査読有, 2011
- ⑪ Toru Namerikawa, Takeshi Hatanaka and Masayuki Fujita, Predictive Control and Estimation for Systems with Information Structured Constraints, ICCAS 2011, 査読有, 2011
- ⑫ Nam Duc Do and Toru Namerikawa, Cooperative Control Based on Force-Reflection with Four-channel Teleoperation System, 2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC), 査読有, 2011
- ⑬ Toru Namerikawa and Taichiro Kato, Distributed Load Frequency Control of Electrical Power Networks via Iterative Gradient Methods, 2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, 査読有, 2011
- ⑭ Nam Duc Do and Toru Namerikawa, Four-channel force-reflecting teleoperation with impedance control, International Journal of Advanced Mechatronic Systems, 査読有, Vol. 2 No. 5/6 pp. 318 - 329, 2010
- ⑮ Hamzah Ahmad and Toru Namerikawa, Feasibility Study of Partial Observability in H-infinity Filtering for Robot localization and Mapping Problem, 2010 American Control Conference, 査読有, 2010
- ⑯ Takashi Takeda and Toru Namerikawa, A Sensor Network Configuration Considering Prior Estimation Error and Communication Energy, 12th IFAC LSS Symposium, 査読有, 2010
- ⑰ Hamzah Ahmad and Toru Namerikawa, Robot Localization and Mapping Problem with Unknown Noise Characteristics, 2010 IEEE Multi-conference on Systems and Control, 査読有, 2010
- ⑱ Takashi Takeda and Toru Namerikawa, Sensor Network Scheduling Algorithm Considering Estimation Error Variance and Communication Energy, 2010 IEEE Multi-conference on Systems and Control, 査読有, 2010
- ⑳ Yasunori Kawai, Toru Namerikawa and Masayuki Fujita, Bilateral Teleoperation of Wheeled Mobile Robot with Time Delay Using Virtual Image Robot, 2010 IEEE Multi-conference on

- Systems and Control, 査読有, 2010
- ⑳ Nam Duc Do, Yusuke Yamashina and Toru Namerikawa, Bilateral Teleoperation of Multiple Cooperative Robots with Time-Varying Delay, 2010 IEEE Multi-conference on Systems and Control, 査読有, 2010
- 21 Toru Namerikawa, Electric Demand Prediction and Predictive Control of Micro Grid, 2010 IEEE Multi-conference on Systems and Control, 査読有, 2010
- 22 Hamzah Ahmad and Toru Namerikawa, H-infinity Filter-based Robotic Localization and Mapping with Intermittent Measurements, MECATRONICS 2010 - Yokohama, 査読有, 2010
- 23 Nam Duc Do and Toru Namerikawa, Four-channel Force Reflecting Teleoperation System Based on ISS Small Gain Theorem, MECATRONICS 2010 - Yokohama, 査読有, 2010
- 24 Hiroyuki Fujita and Toru Namerikawa, Delay-Independent Stabilization of Teleoperation Systems with Time-Varying Delay, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol. 2, No. 3, pp. 177-183, 2009
- 25 滑川徹, マルチエージェントシステムの合意問題と協調取り囲み, システム/制御/情報, 査読無, Vol. 53, No. 10, pp. 443-448, 2009
- 26 川上裕樹, 滑川徹, ビークル群によるネットワークの変化に依存しない協調取り囲み行動, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 45, No. 12, pp. 688 - 695, 2009
- 27 Hiroki Kawakami and Toru Namerikawa, Cooperative Target-capturing Strategy for Multi-vehicle Systems with Dynamic Network Topology, 2009 American Control Conference, 査読有, 2009
- 28 Kouei Yoshida and Toru Namerikawa, Stability and Tracking Properties in Predictive Control with Adaptation for Bilateral Teleoperation, 2009 American Control Conference, 査読有, 2009
- 29 Hiroyuki Fujita and Toru Namerikawa, Delay-Independent Stabilization for Teleoperation with Time Varying Delay, 2009 American Control Conference, 査読有, 2009
- 30 Yusuke Nakashima and Toru Namerikawa, GIMC Structure based Anti-Windup Control Considering L2 Performance, 2009 IEEE Multi-conference on Systems and Control, 査読有, 2009
- 31 Hamzah Ahmad and Toru Namerikawa, H^∞ filtering Convergence and It's Application to SLAM, ICROS-SICE International Joint Conference 2009, 査読有, 2009
- 32 Nam Do Duc and Toru Namerikawa, Impedance Control for Force - Reflecting Teleoperation with Communication Delays Based on IOS Small Gain Theorem, ICROS-SICE International Joint Conference 2009, 査読有, 2009
- 33 Toru Namerikawa, Bilateral Control with Constant Feedback Gains for Teleoperation with Time Varying Delay, Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference, 査読有, 2009
- 34 滑川徹, 2008 American Control Conference, システム/制御/情報, 査読無, Vol. 53, No. 1, p. 48, 2009

[学会発表] (計 51 件)

- ① 宮野雄基, 滑川徹, 再急降下法を用いたリアルタイム料金設定による負荷平準化, 第12回制御部門大会, 2012年3月14日, 奈良
- ② 大川佳寛, 滑川徹, H^∞ フィルタを用いた移動ロボットの自己位置推定問題における可観測性と逃避時間回避, 第12回制御部門大会, 2012年3月14日, 奈良
- ③ 石村晃士, 滑川徹, マルチビークルシステムを用いた物体協調把持と収束条件, 第12回制御部門大会, 2012年3月16日, 奈良
- ④ 橘義博, 滑川徹, 通信遅延を考慮した複数剛体の分散協調姿勢制御, 産業計測制御研究会, pp. 19-24, 2012年3月7日, 横浜
- ⑤ 大谷達也, 滑川徹, マルチロボットの協調自己位置推定と環境認識問題とその収束性解析, 第54回自動制御連合講演会, pp. 7-12, 2011年11月19日, 豊橋
- ⑥ 大川佳寛, 滑川徹, 逃避時間回避を考慮した H^∞ フィルタによる移動ロボットの自己位置推定と環境認識, 第54回自動制御連合講演会, pp. 13-18, 2011年11月19日, 豊橋
- ⑦ 石村晃士, 滑川徹, ネットワーク構造に依存しないマルチビークルシステムによる物体協調把持, 第54回自動制御連合講演会, pp. 96-101, 2011年11月19日, 豊橋

- ⑧ 滑川徹, 再生可能エネルギーを含む分散型エネルギーシステムの分散制御, 制御技術フォーラム ; 計測自動制御学会 制御部門 制御技術部会, 2011 年 11 月 16 日, 東京
- ⑨ 小杉和也, 滑川徹, 故障診断と観測データ補償に基づく耐故障性を有したセンサーネットワークの構成, 第 40 回制御理論シンポジウム, 2011 年 9 月 27 日, 大阪
- ⑩ 滑川徹, エネルギーネットワークと制御理論, 制御フォーラム第 2 回公開フォーラム, 日本鉄鋼協会計測・制御・システム工学部会, 2011 年 4 月 20 日, 東京
- ⑪ 滑川徹, 電力ネットワークの需要予測と分散予測制御, SICE プラントモデリング部会 第 2 回オープンフォーラム, 2010 年 12 月 3 日, 東京
- ⑫ 滑川徹, マルチエージェントシステムと最適センサスケジューリング, 第 8 回安全・安心な社会を支える運動と振動の制御研究分科会, 日本機械学会, 2010 年 10 月 18 日, 横浜
- ⑬ 滑川徹, 電力需要予測と電力ネットワークの分散予測制御, JST/CRDS 制御システム分科会-SICE 合同ワークショップ, JST 研究開発戦略センター, 2010 年 10 月 2 日, 東京
- ⑭ 滑川徹, 制御とエネルギー環境問題, 2010 IEEE Multi-conference on Systems and Control, 2010 年 9 月 7 日, 横浜
- ⑮ Toru Namerikawa, Electric Demand Prediction and Predictive Control of Micro Grid, 2010 IEEE Multi-conference on Systems and Control, 2010 年 9 月 9 日, 横浜
- ⑯ 大谷達也, 滑川徹, マルチロボットの協調自己位置推定問題と収束性解析, 第 55 回システム制御情報学会研究発表講演会, pp. 159-160, 2011 年 5 月 17 日, 大阪
- ⑰ 石村晃士, 滑川徹, 相対距離に基づくマルチビークルシステムによる動的協調取り囲み行動, 第 54 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2010 年 5 月 21 日, 京都
- ⑱ 加藤太郎, 滑川徹, 複数の協調ロボットを用いた PID 型テレオペレーションによる物体把持, 第 54 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2010 年 5 月 21 日, 京都
- ⑲ 滑川徹, 合意アルゴリズムとビークル群による協調取り囲み, SICE 第 27 回誘導制御シンポジウム, 2010 年 5 月 13 日, 東京
- ⑳ 滑川徹, 藤田裕之, 武田孝史, 金尾則一, 需要曲線の特徴を考慮した H_∞ フィルタ

による電力需要予測, 第 10 回計測自動制御学会制御部門大会, 2010 年 3 月 18 日, 熊本

- 21 滑川徹, 武田孝史, 推定誤差と通信エネルギーに基づくセンサスケジューリング, 第 10 回計測自動制御学会制御部門大会, 2010 年 3 月 18 日, 熊本
- 22 滑川徹, 制御理論は環境問題に貢献できるか, 計測自動制御学会, 制御部門セミナー, 2009 年 12 月 3 日, 東京
- 23 滑川徹, ネットワークロボティクスとシステム制御, SICE 四国支部チュートリアルセミナーと講演会, 高知工科大学, 2009 年 11 月 7 日, 高知
- 24 上坂洋介, 滑川徹, Inverse Kinematics を用いたビークル群による対象物の協調取り囲み行動, 第 11 回「運動と振動の制御」シンポジウム, pp. 208-213, 2009 年 9 月 3 日, 福岡
- 25 山科勇輔, 滑川徹, 複数の協調ロボットを用いたテレオペレーションによる物体把持, 第 11 回「運動と振動の制御」シンポジウム, pp. 214-219, 2009 年 9 月 3 日, 福岡
- 26 滑川徹, 通信遅延を考慮したネットワークテレオペレーションの協調制御, 日本鉄鋼協会 計測制御システム工学部会 制御フォーラム, 2009 年 5 月 25 日, 東京

〔図書〕 (計 1 件)

- ① Takashi Takeda and Toru Namerikawa, Optimal Sensor Network Configuration Based on Control Theory, Advances in Wireless Sensors and Sensor Networks, Springer, pp. 151-176, 2010

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.namerikawa.sd.keio.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

滑川 徹 (NAMERIKAWA TORU)
慶應義塾大学・理工学部・准教授
研究者番号 : 30262554

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし