

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：12608

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560457

研究課題名（和文） ロボティックセンサネットワークのための柔軟な協調アルゴリズム設計と検証実験

研究課題名（英文） Robust Cooperative Algorithm Design for Robotic Sensor Networks and Experimental Verification

研究代表者

藤田 政之（FUJITA MASAYUKI）

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：90181370

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、1. 視覚オブザーバ型協調制御、2. 状況に応じて複数のタスクを切り替える協調制御アルゴリズム設計、3. 柔軟な協調アルゴリズムの提案、4. ロボティックセンサネットワークシステムの構築の4点に取り組んだ。1. に関しては当初の予定通り、理論結果の導出に成功し、当該分野の主要国際会議や論文誌に採択されるなど、高い評価を得た。また、全方位カメラを前提とした理論へと拡張し、これも国際会議や論文誌に採択された。2. に関しても予定した理論結果を導出し、American Control ConferenceにてBest Presentation Awardを受賞するなどの目覚ましい成果を得た。また、進化ゲーム理論に基づくタスク切り替え手法を提案し、この結果は国際論文誌に掲載された。3. に関しては、ゲーム理論と学習アルゴリズムを協調制御と融合させることで、目的の柔軟なアルゴリズム設計が可能となる事実を着想した。まず、準備として行った研究が国際会議や論文誌に採択され、さらに環境に関する事前知識がない場合でも時間の経過とともに環境を学習し、分散的な処理のみによって最適な状態にセンサを収束させる学習アルゴリズムを提案した。本研究成果は既に来年度の6月に開催されるAmerican Control Conferenceに採択済みであり、このほど学術論文として国内誌への掲載が決定した。4. に関しては想定したロボティックネットワークシステムが完成し、上記の理論研究の多くは本システムを利用した検証実験を含んでいる。

研究成果の概要（英文）：This project aimed at (1) Visual Observer-Based Cooperative Control, (2) Cooperative Task Switching Algorithm Design, (3) Robust Cooperative Control Algorithm Design, (4) Establishment of a Robotic Sensor Network System. On Topic (1): We succeeded in deriving theoretical results on conditions for achieving successful cooperation. The result was accepted for presentation at premier conferences, where it received a high evaluation as the first paper providing a nonlinear observer-based cooperative control scheme with theoretical guarantees. The result was also published in a domestic journal. We also extended the result from a pin-hole type camera model to a panoramic camera model so as to overcome the view angle issue which is an essential problem when we use a vision sensor. The result was also published in an international conference and a domestic journal. On Topic (2): We have succeeded in presenting a task switching law based on a so-called consensus protocol. The paper received a best presentation award at a premier conference. Moreover, we presented another distributed task switching algorithm based on evolutionary game theory, which was published in an international journal. On Topic (3): We thought of an idea that robust cooperation is met by integrating game theory with cooperative control. As a preliminary, we first addressed the problem in (i) via game theoretic approach, which was successfully accepted for an international conference and a domestic journal. Moreover, we presented a learning algorithm leading agents to the optimal actions even without any prior knowledge on environment. A series of the results will be presented at a conference and, recently, the journal version was accepted for publication. On Topic (iv): We succeeded in establishing a robotic sensor network system and most of the papers mentioned above include experimental verification using the system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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：制御理論

1. 研究開始当初の背景

(1) 社会生活における社会インフラ、災害、事故、犯罪に対する安心・安全の確保、森林破壊や海洋汚染などの環境問題への対策、プラントの異常監視など幅広い応用可能性と無線通信機能つき小型センサの開発を背景として、センサネットワークが注目を集めていた。移動可能なセンサを用いたロボティックセンサネットワークなる概念も提案されていた。

(2) センサネットワークの研究自体は通信・計測・ロボット・制御など多分野において精力的な研究が行われていた。

(3) 制御理論の分野では、ネットワークで接続された複数の対象に対して集団目的を達成する協調制御の研究が盛んに行われており、ロボティックセンサネットワークはその重要アプリケーションとして注目され始めていた。

(4) しかしながら、この時点において本研究課題で取り組んだような柔軟性を中心に据えた研究は限られており、むしろ従来の協調制御法が必ずしも望ましい性質を満たさないことが報告されるなど、まさにこれから取り組むべき課題であると認識されていた。

(5) ただし、以上は海外の動向であって、国内における本課題への注目はほとんどなされていなかった。

2. 研究の目的

本研究課題は、移動可能なセンサ端末を想定するロボティックセンサネットワークを対象とし、制御理論の立場から見た課題を解決するための協調制御理論の確立と実験検

証を目的とした。特に、センサネットワークの構築における最重要課題である耐故障性などの機能を有する柔軟な協調アルゴリズム設計を目指すものである。具体的には以下の4課題への取り組みを中心に据えた。

- (1) 推定機構を併合した協調制御則
- (2) 状況に応じて複数のタスクを切り替える協調制御アルゴリズム設計
- (3) 端末の故障・追加に適応する協調アルゴリズム設計
- (4) ロボティックセンサネットワークシステムの構築および理論の検証

また、本研究課題はそれを通じて制御理論自体の発展も視野に入れたものである。

3. 研究の方法

- (1) 課題1. について
 - ① 申請者らの異なる2つの先行研究をもとに問題設定を行った。
 - ② これらの先行研究の内容を併合することで制御則を決定した。
 - ③ 同期条件を明らかにする。両先行研究との相性を鑑みて、証明にはエネルギーベースのアプローチを採用した。当初から想定された課題は、どのようなエネルギーを用いれば証明が可能となるか、であり、想定通りここに本課題の主要アイデアが込められた。
 - ④ 課題4. で構築するシステムを利用して提案制御則の有効性および理論結果の妥当性を検証した。

- (2) 課題2. について
 - ① 動的モデルの状態に加えて二つの情報状態を用意し、状況に応じてこれを更新するこ

とで分散タスク切り替えを実現する枠組みを決定した。

② 合意プロトコルを改良することで望ましいタスク切り替えを実現するアルゴリズムを提案した。また、アルゴリズムの計算複雑さについても理論的に明らかにした。

③ シミュレーションによって上記のアルゴリズムの有効性を確認した。

④ 他方、タスク切り替え機構の設計に進化ゲーム理論を用いるアイデアを着想し、実際にアルゴリズムの設計を行った。

⑤ シミュレーションによってアルゴリズムの有効性を検証した。

(3) 課題 3. について

① 柔軟なアルゴリズム設計をゲーム理論に基づくアプローチで実現できることを着想した。

② 課題 1. の問題に適用し、その有効性を確認した。

③ 環境の事前情報がないという問題設定の下でも目的を達成するアルゴリズムを提案し、理論証明を行った。

④ シミュレーションおよび実験によってその有効性を確認した。

(4) 課題 4. について

① 全方向移動ロボットおよびカメラを購入した。

② これまでのシステムを拡張し、カメラ情報をもとにロボットを遠隔操作するロボティックセンサネットワークシステムを構築した。

③ カメラ同士が通信情報をもとに推定を行うビジュアルセンサネットワークシステムを構築した。

4. 研究成果

(1) 課題 1. に関しては当初の予定通り、理論結果の導出に成功し、当該分野の主要国際会議である IEEE Conference on Decision and Control や American Control Conference など複数の国際会議や論文誌に採択されるなど、非線形オブザーバ型の協調制御によって協調の達成を保証した初の論文として高い評価を得た。また、視野角の問題を軽減するために、従来のピンホールカメラを想定する理論から、全方位カメラを前提とした理論へと拡張し、これも国際会議や論文誌に採択された。さらに、通信構造の仮定の緩和という理論成果の導出に成功し、この成果は国際会議に投稿中である。

(2) 課題 2. に関しても予定した理論結果を導出し、American Control Conference に

て Best Presentation Award を受賞するなどの目覚ましい成果を得た。また、進化ゲーム理論に基づくタスク切り替え手法を提案し、この結果は国際論文誌に掲載された。

(3) 課題 3. に関しては、ゲーム理論と学習アルゴリズムを協調制御と融合させることで、目的の柔軟なアルゴリズム設計が可能となる事実を着想した。まず、準備として 1. の課題をゲーム理論的な切り口で取り組み、本研究は国際会議や論文誌に採択された。さらに、本理論を拡張し、環境に関する事前知識がない場合でも時間の経過とともに環境を学習し、分散的な処理のみによって最適な状態にセンサを収束させる学習アルゴリズムを提案した。従来、このような機能を実現するアルゴリズムは発見的な手法に依存するものがほとんどであるのに対して、この成果は収束に関する理論的な保証を与えるものであり、当該分野に強いインパクトを与えた。また、準備結果のアルゴリズムは 1 反復辺り 1 台のエージェントのみに行動変化の権利を与えるものであったが、ここで提案したアルゴリズムは全エージェントが同時に行動変化することを許容しており、収束速度の高速化の意味でも重要な結果であった。本研究成果は既に来年度の 6 月に開催される American Control Conference に採択済みであり、このほど学術論文として国内誌への掲載が決定した。なお、本アルゴリズムはセンサネットワークの協調のみならず、エネルギーの分散協調管理システムの構築など、大規模システムの制御全般に有効であると考えられる。

(4) 課題 4. に関しては想定したロボティックネットワークシステムが完成し、上記の理論研究の多くは本システムを利用した検証実験を含んでいる。ただし、当初予定していた一般の無線センサではなく、1. の研究の進捗に伴い、視覚カメラをロボットに搭載するシステムを構築するように計画を変更した。

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 15 件)

① 和佐泰明, 後藤達彦, 畑中健志, 藤田政之、被覆ゲームに対する最適均衡解の探索: 利得に基づく学習アルゴリズム設計、システム制御情報学会論文誌、査読有、Vol. 25、

2012

② T. Hatanaka, Y. Igarashi, M. Fujita and M. W. Spong, Passivity-based Pose Synchronization in Three Dimensions, IEEE Transactions on Automatic Control, 査読有, Vol. 57, 2012, 360-375

③ 伊吹竜也, 畑中健志, 藤田政之、視覚フィードバックによるリーダー追尾型姿勢協調制御、システム制御情報学会論文誌、査読有、Vol. 24、2011、155-164

④ M. Saito, T. Hatanaka and M. Fujita, Decision Dynamics in Cooperative Search Based on Evolutionary Game Theory Communications in Information and Systems, Special Issue on Control of Complex and Nonlinear Systems, 査読有, Vol. 11, 2011, 57-70

⑤ Y. Igarashi, T. Hatanaka, M. Fujita and M. W. Spong, Passivity-based Attitude Synchronization in SE(3), IEEE Transactions on Control Systems Technology, 査読有, Vol. 17, 2009, 1119-113

[学会発表] (計37件)

① T. Goto, T. Hatanaka and M. Fujita, Payoff-based Inhomogeneous Partially Irrational Play for Potential Game Theoretic Cooperative Control: Convergence Analysis, 2012 American Control Conference, Montreal, Canada, 28th, Jun, 2012

② T. Ibuki, T. Hatanaka, M. Fujita and M. W. Spong, Visual Feedback Pose Synchronization with a Generalized Camera Model, 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Florida, Orlando, USA, 14th, Dec, 2011

③ T. Ibuki, T. Hatanaka, M. Fujita and M. W. Spong, Visual Feedback Attitude Synchronization in Leader-follower Type Visibility Structures, 49th IEEE Conference on Decision and Control, Atlanta, USA, 15th, Dec, 2010

④ T. Hatanaka and M. Fujita, Passivity-based Visual Motion Observer: From Theory to Distributed Algorithms, Tutorial Session on Computer Vision and

Control for the CACSD component on the IEEE 2010 MSC, Tokyo, Japan, 8th, Sep, 2010

⑤ J. Wagenpfeil, A. Trachte, T. Hatanaka, M. Fujita and O. Sawodny, Distributed decision making for task switching via a consensus-like algorithm, 2009 American Control Conference, Louis, Missouri, USA, 12th, June, 2009

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤田 政之 (FUJITA MASAYUKI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：90181370

(2) 研究分担者

畑中 健志 (HATANAKA TAKESHI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：10452012