

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 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：2012～2014

課題番号：24560540

研究課題名(和文) 動的環境モニタリングのためのモバイルセンサネットワークの協調制御に関する研究

研究課題名(英文) Cooperative Control of Mobile Sensor Networks for Dynamic Environmental Monitoring

研究代表者

藤田 政之 (FUJITA, MASAYUKI)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：90181370

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、動的環境モニタリングシステム構築に向けて、受動性に基づく人間・モバイルセンサ群の協調制御法と、環境適応を可能とするゲーム理論的学習アルゴリズムの開発に取り組んだ。前者の研究に関しては、人間・モバイルセンサ群の協調制御法の新規提案に成功した。また、本研究から派生して協調推定アルゴリズムを新規提案し、当該分野で最難関の論文誌に掲載された。さらに、一連の研究成果をまとめた書籍がこのたび Springer社より出版された。後者の研究に関しては、新規のゲーム理論的学習アルゴリズムを開発し、当該分野の最重要会議に採択されるとともに、上記最難関論文誌に条件付き採録という状態である。

研究成果の概要(英文)：This project aimed at proposing (i) a novel passivity-based cooperative control scheme for human-mobile sensor networks and a novel game theoretic learning algorithm with adaptability to uncertain environment. Regarding the former issue, we succeeded in developing a novel passivity-based control architecture. Also, as an extension of the work, we presented a novel cooperative estimation algorithm, and the results were published in a premier journal of our research field. Moreover, a series of the related works were compiled into a book, and it has been recently published by Springer. In terms of the latter issue, we presented a novel payoff-based learning algorithm which ensures total optimality even under environmental uncertainties, and applied it to scenarios of environmental monitoring. These results were presented at a premier conference, and also almost accepted (with some minor revisions) for publication by a premier journal.

研究分野：制御工学

キーワード：制御理論 協調制御 モバイルセンサネットワーク 意思決定 ゲーム理論的学習

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 東日本大震災や台風被害を受けて、人々の生活の安心・安全の確保の重要性が高まっていた。

(2) 無線通信機能つき小型センサや安価な移動ロボットの開発を背景として、モバイルセンサネットワーク技術に関する研究・開発が進められており、安全・安心の確保を達成する有望な解決策の一つとして目されていた。

(3) システム制御分野では、複数の制御対象を分散的な制御によって協調させる協調制御に関する活発な研究が行われていた。また、協調制御の有力な適用対象の一つとしてモバイルセンサネットワークがあげられており、実際に理論・実証研究が行われていた。

(2) 多くの研究がセンサ群を協調的に動作させることにのみ注力するのに対して、協調的に動くモバイルセンサ群に対して、不確かな環境の下でどのように上位層の目的を実行させるか、という課題についての取り組みは限定的であった。より具体的には、海外においてはこのようなプロジェクトが始動しつつあったのに対して、国内での取り組みは皆無に等しい状況にあった。

### 2. 研究の目的

本研究は主に以下の二つの課題に取り組むことを目的とした。

(1) まず、人間オペレータとセンサ群によって構成されるネットワークに対して、分散的な情報交換のもとで全体を協調させる制御構造を提案することを目的の一つとして設定した。ここで、制御構造の提案に際しては、受動性とよばれるシステム制御工学の概念にもとづくこととした。

(2) 人間を介入させることなく、センサ群に自律的に不確かな環境を学習し、適応させる制御アルゴリズムを提案することをもう一つの目的と設定した。これを達成する唯一の方法論として、ゲーム理論的学習アルゴリズムに着目し、実際に計測したデータのみを用いる利得に基づく学習アルゴリズムを開発することとした。

(3) 上記の課題に加えて、実際にモバイルセンサネットワークシステムを構築し、上記のそれぞれの方法論の妥当性を検証することも目的とした。

### 3. 研究の方法

上記課題(1)に関する研究方法は以下の通りである。

(1-1) まず、当初の計画通り、過去の研究を拡張し、一部のセンサのみが人間の指令を受け取ることができるという問題設定を考え、

収束性の証明に取り組んだ。

(1-2) センサが人間の運動モデルを利用できるという設定を考え、制御則提案と収束性の証明に取り組んだ。

(1-3) 上記の研究を通じて、受動性に基づく分散協調推定に関する新たなアイデアを着想し、推定精度の理論解析に取り組んだ。

(1-4) (1-3)のアルゴリズムを実装し、理論結果の妥当性検証に取り組んだ。

(1-5) 情報の分散化に関して、当初は想定していなかった、人間を受動的な要素と見なす新規の制御構造を着想した。

(1-6) (1-5)の制御構造に対して収束性の証明に取り組んだ。

(1-7) 人間を含むシミュレータ及び実験システムを利用して取得されたデータをもとに人間の受動性解析に取り組んだ。

上記課題(2)に関する研究方法は以下の通りである。

(2-1) まず、当初の計画通り、ゲーム理論的学習に関する文献を調査し、最新の動向と方法論をまとめた。

(2-2) モバイルセンサネットワークを用いた動的環境モニタリング問題をポテンシャルゲームとして定式化した。

(2-3) 目的関数の最大点にセンサの行動を収束させる学習アルゴリズムを新規提案した。

(2-4) センサ行動の全体最適解への収束性証明に取り組んだ。

(2-5) モバイルセンサネットワークシステムを用いて、提案アルゴリズムの動的環境に対する有効性の実験検証に取り組んだ。

(2-6) 視覚センサネットワークを用いて、提案アルゴリズムの動的環境に対する有効性の計測データの処理も含めた実験検証に取り組んだ。

上記課題(3)に関する研究方法は以下の通りである。

(3-1) これまでのマルチロボットシステムを拡張し、モバイルセンサネットワークシステムを構築した。

(3-2) 課題(1)の検証のため、iPad を用いて人間とセンサ群の情報交換を可能にするシステムを構築した。

(3-3) 複数の Pan-Tilt-Zoom カメラを用いた視覚センサネットワークシステムを構築した。

### 4. 研究成果

上記課題(1)に関する研究成果下の通りである。

(1-1) 摂動システムの安定化理論に基づいて、すべてのセンサが人間からの共通の指令を受け取るという状況下でセンサ間の相対情報の交換のみで収束が可能であること理論的に明らかにした。本結果は当該分野の最重要国際会議と目される IEEE Conference on

Decision and Control (CDC) とともに国内論文誌に採択・掲載された。

(1-2) 再度摂動システムの安定化理論に基づいて、人間の運動モデルが利用可能であるという状況下において、センサがモデルの未知パラメータを学習しながら運動する制御則を新規提案し、収束性を理論的に証明することに成功した。本結果は IEEE CDC とともに国際論文誌に採択・掲載された。

(1-3) 受動性に基づく視覚協調推定アルゴリズムを新規提案し、推定精度の理論解析に成功するとともに、その有効性を実験的に明らかにした。本結果は IEEE CDC に加え、当該分野の最難関学術雑誌である IEEE Transactions on Automatic Control (TAC) に Regular Paper として採択・掲載された。

(1-4) 人間を受動的な要素であるとみなす新たな研究の枠組みを確立することに成功し、人間-センサ間およびセンサ-センサ間の分散的な情報交換のもとで理想的な協調を達成できることを理論的に証明した。

(1-5) 人間を含むシミュレータおよび実験システムを構築し、データに基づく人間の受動性解析という新たな研究課題を創出し、部分的にとはいえネットワーク構造と人間の受動性の関係を明らかにすることに成功した。

(1-6) 上記を含む受動性に基づく一連の研究成果を Passivity-Based Control and Estimation in Networked Robotics と題した書籍にまとめ、このほど Springer 社より出版された。

(1-7) 以上の結果によって、研究分担者が計測自動制御学会制御部門パイオニア賞を受賞するなど、大きなインパクトを与えることに成功した。

上記課題(2)に関する研究成果下の通りである。

(2-1) 動的環境モニタリング問題をポテンシャルゲームに帰着させることに成功した。

(2-2) 環境の事前情報を前提としない新たな学習アルゴリズムを提案し、摂動マルコフプロセスと抵抗木の理論をもとに、センサ行動の全体最適解への収束性の証明に成功した。

(2-3) モバイルセンサネットワークシステムに提案アルゴリズムを実装し、その有効性を明らかにした。本結果はもう一つの最重要国際会議である American Control Conference および国内論文誌に採択・掲載された。

(2-4) 上とは異なる学習アルゴリズムを提案し、やはり全体最適解への収束性を理論的に証明した。本結果は国際論文誌に採録・掲載された。

(2-5) 上記の成果を視覚センサネットワークによる環境モニタリング問題に展開し、画像処理とゲーム理論的学習を融合した新たなアルゴリズムを提案することに成功した。

(2-6) 視覚センサネットワークシステムに提案アルゴリズムを実装し、その有効性を明らかにした。本結果は IEEE CDC に採択され、IEEE TAC に投稿中の論文は現在条件付き採録のステータスではあるが、ほぼ採録に近い状態にある。

## 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 9 件)

伊吹竜也, Daniel Seitz, 畑中健志, 藤田政之, 相対情報に基づく 3 次元群れ制御 (Relative Pose Information-based 3-D Flocking Control), 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 51, 2015, 189-196

Y. Wasa, T. Hatanaka and M. Fujita, Application of Irrational Decisions to Simple Experimentation to Guarantee Welfare Maximization, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol. 7, 2014, 199-204

伊吹竜也, 畑中健志, 藤田政之, 3 次元位置・姿勢協調制御 - 固定グラフ構造における必要十分条件の導出 - (3-D Pose Synchronization: A necessary and Sufficient Condition on Digraphs), 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 50, 2014, 374 - 382

Takeshi Hatanaka, Cooperative

Estimation of Averaged 3D Moving Target Object Poses via Networked Visual Motion Observers, IEEE Transactions on Automatic Control, 査読有, Vol. 58, 2013, 623-638

A. Gusrialdi, Improved Distributed Coverage Control for Robotic Visual Sensor Network under Limited Energy Storage,

International Journal of Imaging and Robotics, 査読有, Vol. 10, 2013, 58-74

Tatsuya Ibuki, Takeshi Hatanaka, Masayuki Fujita, Passivity-based Visual Feedback Pose Regulation Integrating a Target Motion in Three Dimensions, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol. 6, 2013, 322-330

和佐泰明, 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, 247-255

Takeshi Hatanaka, Passivity-based Visual Motion Observer Integrating 3D Target Motion Models, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol. 5, 2012, 276-282

Takeshi Hatanaka, Passivity-based Pose Synchronization in Three Dimensions, Passivity-based Pose Synchronization in Three Dimensions, 査読有, Vol. 57, 2012, 360-375

〔学会発表〕(計 9 件)

畑中健志, ゲーム理論的視覚環境モニタリング, 2015 年電子情報通信学会総合大会, 2015 年 3 月 11 日 ~ 2015 年 3 月 11 日, 立命館大学 びわこ・くさつキャンパス, 滋賀県草津市

畑中健志, ネットワークロボティクスにおける分散協調制御, 2014 年パイオニア賞受賞記念講演, 第 2 回制御部門マルチシンポジウム(招待公演), 2015 年 3 月 6 日 ~ 2015 年 3 月 6 日, 東京電機大学, 東京都調

布市

T. Hatanaka, Cooperative Visual Coverage Control and Its Applications, Symposium on the Control of Network Systems(SCONES), 2014 年 10 月 28 日 ~ 2014 年 10 月 28 日, Boston University, Boston, Massachusetts, USA

Takeshi Hatanaka, Game Theoretic Cooperative Control of PTZ Visual Sensor Networks for Environmental Change Monitoring, 52<sup>nd</sup> IEEE Conference on Decision and Control, 2013年12月10日 ~ 2013年12月13日, Congress Centre Firenze, Firenze, Italy

和佐泰明, ポテンシャルゲームに対する非合理的選択を含む学習アルゴリズムの設計と被覆制御問題への適用, 計測自動制御学会第12回制御部門大会, 2013年03月16日 ~ 2013年03月16日, 奈良県文化会館, 奈良県奈良市

Tatsuya Ibuki, Passivity-based Visual Pose Regulation for a Moving Target Object in Three Dimensions: Structure Design and Convergence Analysis, the 51st IEEE Conference on Decision and Control, 2012 年12月12日 ~ 2012年12月12日, Maui, HI, USA

Tatsuya Ibuki, Passivity-based Pose Synchronization Using Only Relative Pose Information under General Digraphs, the 51st IEEE Conference on Decision and Control, 2012年12月12日 ~ 2012年12月12日, Maui, HI, USA

Takeshi Hatanaka, Vision-Based Cooperative Estimation of 3D Target Pose under Imperfect Visibility, 3rd IFAC

Workshop on Distributed Estimation and Control in Networked Systems (NecSys '12), 2012年09月15日～2012年09月15日, Santa Barbara, CA, USA

Tatsuhiko Goto, Payoff-based Inhomogeneous Partially Irrational Play for Potential Game Theoretic Cooperative Control: Convergence Analysis, 2012 American Control Conference, 2012年06月28日～2012年06月28日, Montreal, Canada

〔図書〕(計 1 件)

T. Hatanaka, N. Chopra, M. Fujita and M. W. Spong, Springer Verlag, Passivity Based Control and Estimation in Networked Robotics, 2015, 349

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

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・准教授  
研究者番号：10452012

(3)連携研究者

( )

研究者番号：