

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420430

研究課題名(和文) ゲーム理論的学習に基づくビジュアルセンサネットワークの協調能動センシング

研究課題名(英文) Game Theoretic Learning Approach to Cooperative Active Sensing for Visual Sensor Networks

研究代表者

畑中 健志 (Hatanaka, Takeshi)

東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：10452012

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では複数のカメラがネットワークで接続されたビジュアルセンサネットワークに対して、環境情報を最適に計測する分散協調型の能動センシング手法を提案した。まず、ゲーム理論的学習理論に基づいて、未知の環境情報を利用しない二つの異なるセンシング手法の開発に成功した。加えて、環境変化に素早く適用する多様体上の分散最適化手法に基づく能動センシングアルゴリズム、分散的な情報処理によって対象物の運動を予測するアルゴリズムを新規提案した。また、実際にビジュアルセンサネットワークのテストベッドを構築し、以上のアルゴリズムの有効性検証を行った。さらに、3Dアニメーションソフトウェアを用いたシミュレータを構築した。

研究成果の概要(英文)：In this project, we have presented distributed active sensing methods for a visual sensor network, a networked multi-camera system, so as to maximize the acquired information on environment. We first have developed two different active sensing methodologies based on game theoretic learning theory, which do never require prior knowledge on uncertain environment. We then have presented another approach using distributed optimization on matrix manifolds in order to accelerate adaptability to environmental changes. In addition, a novel distributed target motion prediction algorithm has been proposed in the project. Moreover, we have built a testbed of the visual sensor network system and then have demonstrated all of the above algorithms. Also, a novel simulator of the sensor network system has been developed using a 3D animation software, called blender.

研究分野：制御工学

キーワード：制御理論 ゲーム理論 協調制御 ビジュアルセンサネットワーク 能動センシング

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 震災やゲリラ豪雨、台風被害に対する防災・減災、高齢化社会に向けた高度な防犯システム構築に対する要望が高まりを見せていた。

(2) 安心・安全の確保のためのソリューションとして、通信・計算機能を有する複数カメラをネットワーク化して構成されるビジュアルセンサネットワークを用いた監視技術が有力視されていた。

(3) 複数カメラシステムは古くから研究されているものの、その処理を分散化する試みは国内外問わずほとんど行われていなかった。

(4) 研究代表者はいち早くビジュアルセンサネットワークに対する分散協調型アルゴリズム開発に取り組んでいたが、その対象はオブジェクトの推定にあり、推定精度向上や取得情報量の最大化を目的としてカメラパラメータを最適に制御するという視点での研究は行っていなかった。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究では、各カメラが分散的な計測情報と局所的な通信情報をもとに行動し、全体最適な制御パラメータを決定するアルゴリズムの開発を主題とした。ここで、計測対象は未知環境の一部であって、決定パラメータ値と得られる画像情報との関係は事前にモデル化できないため、各カメラは過去に取得されたデータのみから行動を決定する必要がある。そこで、当時当該分野において注目を集め始めていたゲーム理論的学習理論に基づいて、上記の制限の下での目的の達成を目指すこととした。

(2) 以上の目的に加えて、実際にビジュアルセンサネットワークシステムを構築し、開発したアルゴリズムを実装、その有効性を検証することを本研究課題の副題に設定した。

(3) 最後に、視覚に基づくパターン認識において利用されてきた学習理論とゲーム理論的学習の理論を融合させることより挑戦的な課題として設定した。

## 3. 研究の方法

(i) 上記の課題(1)の達成の前提として、対象となる問題の数理的な定式化とゲームへの帰着が必要となる。そこで、ビジュアルセンサネットワークを用いた環境モニタリング問題を対象にこれらの課題に取り組んだ。

(ii) (i)の結果、現実の多くの問題がポテンシャルゲームと呼ばれる特定のゲームに帰着

できることが示されたため、ポテンシャルゲームに対して、各プレイヤーが過去の利得関数値のみをもとに行動決定することで全体最適な行動を選択する学習アルゴリズムを開発した。ここで、従来のアルゴリズムが将来の利得関数値を利用して全体最適性を理論的に保証するアルゴリズムか、過去の値のみを用いるが全体最適性を保証しないアルゴリズムであったため、ここではその両者の利点を併せ持ち、かつ全体最適行動への充足を理論的に保証するアルゴリズムの提案を目指した。

(iii) 提案したアルゴリズムによって、各プレイヤーの行動が全体最適なものに確率収束することを理論的に証明した。

(iv) 上記の理論研究と並行し、ビジュアルセンサネットワークの実験システムの構築を行った。

(v) 上記の実験システムへのアルゴリズム実装に向けて、現実的な適用シナリオを考案し、学習アルゴリズムを適用し、その有効性を検証した。その結果、提案アルゴリズムは比較的遅い、あるいは断続的な環境変化に対しては期待通りのパフォーマンスを示すものの、速度の早い定常的な変化には対応できないことが確認された。

防災のための環境モニタリングでは提案アルゴリズムが有効に機能することが少なくないが、もう一つの研究動機である防犯のための監視システムを想定する場合、提案アルゴリズムの性能は不十分である。そこで、人間行動の監視システム構築という新たな課題を着想した。

(vi) 人間行動監視システムの構築に向けて、多様体上の分散最適化問題を定式化し、多様体上の分散勾配法という新たなソリューションを提案した。

(vii) コンピュータビジョンの知見を援用し、画像内の人間の検出と速度情報の抽出をリアルタイムで実行するアルゴリズムを開発した。

(viii) 最後に、(vi)のアルゴリズムと(vii)のアルゴリズムを融合し、全体の有効性を(iv)の実験システム、および新たに3DアニメーションソフトウェアBlender上に構築したシミュレータを用いて検証した。

## 4. 研究成果

1) 標準画像と現在の画像を比較し、差の大きい画像を取得したカメラに高い利得を与える評価関数を設定し、これをもとにポテンシャルゲームと呼ばれる特定のゲームが構成されるように利得関数を設計した。

2) 各カメラの行動選択の際に、過去の行動から利得関数を減少させる非合理的な行動を所定の確率で選択する学習アルゴリズム Payoff-Based Inhomogeneous Partially Irrational Play を提案し、摂動マルコフ過程と抵抗木の理論に基づいて、各プレイヤーの行動が全体最適なものに確率収束することを理論的に証明した。

3) 5台のPTZ(パン・チルト・ズーム)カメラがネットワークを介してPCに接続されたビジュアルセンサネットワークの実験システムを構築し、上記の内容を実装し、有効性を確認した。以上の成果は当該分野の最重要国際会議である IEEE Conference on Decision and Control に採択され、発表は国際的に高い評価を受けた。実際、ゲーム理論学習の第一人者である Jason Marden 教授の Plenary Talk において、本研究は日本人研究者が発表した研究として唯一引用された。

4) 2)と同様の考え方をを用いて、ポテンシャルゲームに対する新たな学習アルゴリズムを提案し、やはり全体最適解への収束が達成されることを証明した。本成果は国際論文誌に採択、掲載された。

5) 1)と同様の手順によって、多くの現実的な問題がポテンシャルゲームに帰着できることを示すとともに、土砂崩れの監視と空模様モニタリングという現実的な問題に提案法を適用し、その有効性を示した。なお、後者は Cyprus University of Technology との国際共同研究として実施した。これらの成果は当該分野の最難関論文誌である IEEE Transactions on Automatic Control に Regular Paper として採択され、このほど掲載された。

6) 多様体上の分散最適化手法に基づく最適人間行動監視システムの制御法を新規提案した。また、コンピュータビジョンの知見を融合し、制御アルゴリズムのみならず、システム全体の構築を達成した。本成果は2年連続で当該分野の最重要国際会議の一つである American Control Conference に採択され、発表は大きなインパクトを与えた。

7) 設計および解析を容易にするため、3DアニメーションソフトウェアBlender上にビジュアルセンサネットワークシステムのシミュレータを構築した。

8) 最後に、パターン認識等で用いられる学習理論とゲーム理論的学習の融合に関して、以下の成果を得た。

- 上記の5)、6)の実験システムでは、利得関数値のフィードバックを機械学習が担い、その関数値をもとづくカメラの行

動をゲーム理論的学習によって決定する形で両者を融合させることに成功した。また、実験的にその融合の有効性が確認された。

- 理論的には、2)および4)で提案した学習アルゴリズムと機械学習の一つである強化学習との関係を明らかにした。両者は互いに深く関係しているものの、提案アルゴリズムは各カメラの処理を分散化できるという利点を有する。すなわち、本研究課題の成果は強化学習の分散アルゴリズムへの拡張と解釈することができる。

## 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7件)

T. Hatanaka, Y. Wasa, R. Funada, A. Charalambides and M. Fujita, A Payoff-based Learning Approach to Cooperative Environmental Monitoring for PTZ Visual Sensor Networks, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 61, No. 3, 2016, pp. 709-724 (DOI:10.1109/TAC.2015.2450611)

船田陸, 畑中健志, 藤田政之,  $S^0(3)$ 上の勾配法に基づく協調視覚環境モニタリング, 計測自動制御学会論文集, Vol. 51, No. 3, 2015, pp. 139-147 (DOI:10.9746/sicetr.51.139)

山内淳矢, 佐藤訓志, 畑中健志, 藤田政之, 視覚運動オブザーバの確率的推定性能解析, システム制御情報学会論文誌, Vol. 27, No. 11, pp. 443-451, 2014 (DOI:10.5687/iscie.27.443)

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, Vol. 7, No. 4, 2014, pp. 199-204 (DOI:10.9746/jcmsi.7.199)

T. Ibuki, T. Hatanaka and M. Fujita, Passivity-based Visual Feedback Pose Regulation Integrating a Target Motion Model in Three Dimensions, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 6, No. 5, 2013, pp. 322-330 (DOI:10.9746/jcmsi.6.322)

A. Gusrialdi, R. Dirza, T. Hatanaka and M. Fujita, Improved Distributed Coverage Control for Robotic Visual Sensor Network

under Limited Energy Storage,  
International Journal of Imaging and  
Robotics, Vol. 10, No. 2, 2013, pp. 58-74

T. Hatanaka and M. Fujita, Cooperative  
Estimation of Averaged 3D Moving Target  
Object Poses via Networked Visual Motion  
Observers, IEEE Transactions on Automatic  
Control, Vol. 58, No. 3, 2013, pp. 623-638  
(DOI:10.1109/TAC.2012.2215732)

〔学会発表〕(計 14 件)

畑中健志, 分散最適化, SICE 第 3 回 制  
御部門マルチシンポジウム, ワークショッ  
プ マルチエージェントシステムの制御  
IoT/CPS 時代の制御理論, 2016 年 3 月 10 日,  
名古屋市, 愛知

Takeshi Hatanaka, Passivity-Based  
Control and Optimization in Networked  
Robotics, CCDC Seminar, 2016 年 3 月 4 日,  
University of California, Santa Barbara,  
USA

畑中健志, 分散最適化, 第 58 回自動制御  
連合講演会, チュートリアル マルチエー  
ジェントシステムの制御, 2015 年 11 月 15 日,  
神戸, 兵庫

T. Hatanaka, Experimental Study on  
Persistent Coverage Control with  
Information Decay, 34th Chinese Control  
Conference & SICE Annual Conference 2015,  
2015 年 7 月 28 日, Hangzhou China

T. Hatanaka, Experimental Study of  
Gradient-Based Visual Coverage Control on  
SO(3) Toward Moving Object/Human  
Monitoring, 2015 American Control  
Conference, 2015 年 7 月 2 日, Chicago, IL,  
USA

J. Yamauchi, Stochastic Performance  
Analysis of Visual Motion Observer and  
Experimental Verifications, 10th Asian  
Control Conference 2015, 2015 年 5 月 31 日,  
Kota Kinabalu, Malaysia

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, 草津市, 京都

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(招待講演), 第 2 回制御部門マル  
チシンポジウム, 2014 年 3 月 6 日, 足立区,  
東京

船田陸, ズーム動作を考慮した勾配法に

基づく協調視覚環境モニタリング, SICE 第 2  
回制御部門マルチシンポジウム, 2014 年 3 月  
5 日, 足立区, 東京

仲野聡史, フレームレートに基づく視覚  
フィードバック型位置・姿勢制御, 第 57 回  
自動制御連合講演会, 2014 年 11 月 10 日, 群  
馬

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

T. Hatanaka, 3-D Visual Coverage Based  
on Gradient Descent Algorithm on Matrix  
Manifolds and Its Application to Moving  
Objects Monitoring, 2014 American Control  
Conference, 2014 年 6 月 4 日, Portland,  
Oregon, USA,

T. Ibuki, Passivity-based Discrete  
Visual Motion Observer Taking Account of  
Camera Frame Rates, 52nd IEEE Conference  
on Decision and Control, 2013 年 12 月 13  
日, Firenze, Italy

T. Hatanaka, Game Theoretic  
Cooperative Control of PTZ Visual Sensor  
Networks for Environmental Change  
Monitoring, 52nd IEEE Conference on  
Decision and Control, 2013 年 12 月 13 日,  
Firenze, Italy

〔図書〕(計 2 件)

東俊一, 永原正章, 石井秀明, 林直樹,  
桜間一徳, 畑中健志, マルチエージェントシ  
ステムの制御, システム制御工学シリーズ  
22, コロナ社, 2015, 218 (ISBN-10:  
4339033227, ISBN-13: 978-4339033229)

T. Hatanaka, N. Chopra, M. Fujita and  
M. W. Spong  
Passivity Based Control and Estimation in  
Networked Robotics, Communications and  
Control Engineering Series, Springer  
Verlag, 2015, 349 (eBook  
ISBN:978-3-319-15171-7, Hardcover  
ISBN:978-3-319-15170-0)

〔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

畑中健志 (Hatanaka, Takeshi)  
東京工業大学・理工学研究科・准教授  
研究者番号：10452012

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：