

令和 4 年 5 月 24 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K14701

研究課題名(和文)複数ロボットとオペレータとの協調による超スマート社会のための高信頼な自律分散制御

研究課題名(英文)Reliable distributed control for smart society by cooperation between multiple robots and operators

研究代表者

林 直樹 (Hayashi, Naoki)

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号：80637752

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：近年、様々な分野でネットワーク化が進展している。ネットワークを構成する各デバイスは通信機能を有しており、ネットワークを介して他のデバイスと接続し、多様な機能を提供している。こうした多数のデバイスが接続した大規模ネットワーク化システムは、マルチエージェントシステムとしてモデル化できる。本研究では、このようなマルチエージェントシステムにおいて、時々刻々変化する環境にも柔軟に対処できるような制御法や最適化法を提案し、どのような制御則や最適化アルゴリズムを用いれば、分散協調的に制御目標を達成したり、最適解を見つけたりすることができるかについて、理論的な考察を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

複雑なネットワーク化システムにおいては、ネットワークを構成する各エージェントは、予め決められたタスクをこなすだけでなく、時々刻々変化する環境にも柔軟に対処できるように行動する必要がある。また、ネットワークの規模が大規模になると、各エージェントが自律分散的に制御則や最適化アルゴリズムを実行する必要がある。本研究により、システム制御の観点から、超スマート社会において付加価値の高いサービスを継続的に創出するための制御則や最適化アルゴリズムの設計法に関する基礎理論が構築できた。

研究成果の概要(英文)：In large-scale networked systems, each device connects to other devices through interaction of the network to provide various services. Such a large-scale network system can be modeled as a multiagent system. In this research, we proposed control and optimization methods that can flexibly deal with time-varying environment. Moreover, we theoretically addressed what kind of control laws and optimization algorithms can be used to achieve a control objective and find an optimal solution in a distributed and coordinated manner.

研究分野：システム制御理論

キーワード：マルチエージェントシステム 協調制御 分散最適化

1. 研究開始当初の背景

2016年に閣議決定された第5期基本計画では、近年発展著しい情報通信技術を用い、新しい価値やサービスを継続的に創出する「超スマート社会」が提唱されている。超スマート社会において重要な役割を果たす大規模ネットワーク化システムでは、多種多様なサブシステム間の相互作用が時間とともに複雑に変化する。このようなシステム間の局所的な相互作用を利用し、システム全体の目標を達成する制御法として、マルチエージェントシステムの協調制御が注目され、理論的解析から応用まで幅広い研究がなされている。例えば、Jadbabaieらは、協調制御の中で最も基本的な制御問題である合意制御について、エージェント間の通信をグラフで表現し、合意制御を達成するための条件をグラフの構造を用いて示している (Jadbabaie, Lin, and Morse, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003)。また、Nedicらは、合意制御に基づく最適化アルゴリズムを提案し、最適化問題をネットワーク上で分散的に解く手法について提案している (Nedic and Ozdaglar, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009)。

2. 研究の目的

項目1.で述べた合意制御や分散最適化の文献では、主にエージェント間の情報伝達の構造に注目し、合意制御を実現したり、最適解を探索したりするには、グラフの連結性が重要であることを示している。これらの既存研究の多くでは、エージェント間の通信はアルゴリズムの各反復で実行されることが仮定されている。しかし、大規模ネットワークは小型エージェントから構成され、デバイスが利用できる電力に制約がある場合がある。また、ネットワークを構成するエージェントの数が増加すると、エージェント間の情報伝達に必要な通信帯域も増大してしまう。さらに、現実のネットワークの通信帯域は有限であり、エージェント間の情報伝達は量子化して行われるが、このような通信に関する制約も考慮する必要がある。そこで、本研究では、通信回数や通信帯域を考慮した制御法や最適化法を構築し、高信頼なネットワーク化システムを実現するための協調制御アルゴリズムや分散最適化アルゴリズムを提案し、その収束性について理論的に考察することを目的とする。

3. 研究の方法

マルチエージェントシステムによる高信頼な制御を実現するために、本研究では下記の方法により、エージェント間の通信の制約を考慮した制御則や最適化アルゴリズムを導出する。

(1) ネットワーク上の制御や最適化では、一般に、一定のサンプリング周期ごとに他のエージェントと通信を行う。このような通信法は時間駆動型の通信と呼ばれ、合意制御や分散最適化に関する既存研究の多くは時間駆動型通信を対象にしている。しかし、時間駆動型通信では、他のエージェントとの通信が必要ではない場合においても、サンプリング周期毎に通信が行われてしまう。本研究では、必要なときにだけ他のエージェントと通信を行う事象駆動型の通信による合意ダイナミクスや最適化アルゴリズムを提案する。

(2) 現実の通信では連続値のデータを送ることはできず、量子化された有限長ビットのデータが送受信される。そこで、通信の量子化誤差を考慮した分散最適化アルゴリズムを提案し、エージェント間で送受信されるデータが量子化されている場合においても、マルチエージェントシステムが分散的に最適解を探索できるアルゴリズムを提案する。

(3) 協調制御や分散最適化の理論成果を実システムへ応用するには、時々刻々変化する環境にも柔軟に対処できるようにすることが極めて重要である。そこで、目的関数が動的に変化する場合における分散オンライン最適化アルゴリズムを提案し、リグレット解析の観点からその収束性について考察する。

4. 研究成果

本研究では、エージェント間の通信の制約を考慮したネットワーク上の制御や最適化に関し、以下の成果が得られた。

(1) 事象駆動型通信による協調制御

時変の非線形なダイナミクスをもつエージェントからなるマルチエージェントシステムにおいて、事象駆動型の通信により、分散協調的に終局有界性を達成する制御則を提案した。さらに、事象駆動型通信により通信回数を削減する分散最適化アルゴリズムを導出し、それらの収束性に関する理論的考察を行った。具体的には、エージェント間の通信回数を低減する事象駆動型の分散劣勾配アルゴリズムを提案し、アルゴリズムの収束速度が劣線形のオーダーであることを示した。また、個々のエージェントの目的関数が強凸かつ平滑な場合において、一次収束を達成する事象駆動型分散アルゴリズムについても提案した。提案アルゴリズムを用いることで、時間駆動型アルゴリズムと比べてほぼ同等の収束性を維持しながら、エージェント間の通信回数を削減できることを示した。

(2) 量子化通信による分散最適化

エージェント間の通信の量子化誤差を考慮した分散最適化アルゴリズムを導出し、それらの収束性に関する理論的考察を行った。特に、個々のエージェントの目的関数が強凸かつ平滑な場合において、一次収束を達成する分散勾配追跡アルゴリズムを提案した。

(3) ネットワーク上のオンライン最適化

エージェント間の情報伝達が有向グラフで表されるマルチエージェントシステムにおいて、目的関数が時間とともに変化していく場合における分散オンライン最適化アルゴリズムを提案した。また、リグレットが劣線形となることを示し、提案アルゴリズムによって、各エージェントがオンライン最適化問題の最適固定戦略を適切に推定できることを明らかにした。さらに、不必要な通信をできるだけ省く事象駆動型の分散オンライン最適化アルゴリズムを提案し、従来のオンライン最適化アルゴリズムと変わらない収束性を保ちつつ、通信回数を削減できることを示した。

以上の研究成果により、エージェント間の通信の制約を考慮したネットワーク上の制御法や最適化法に関する基礎理論を構築することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Makoto Yamashita, Naoki Hayashi, Takeshi Hatanaka, Shigemasa Takai	4. 巻 E104-A
2. 論文標題 Logarithmic Regret for Distributed Online Subgradient Method over Unbalanced Directed Networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 1019/1026
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.2020EAP1111	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hiroaki Sakuma, Naoki Hayashi, Shigemasa Takai	4. 巻 9
2. 論文標題 Distributed Primal-Dual Perturbation Algorithm over Unbalanced Directed Networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 75324/75335
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2021.3082537	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Takashi Adachi, Naoki Hayashi, Shigemasa Takai	4. 巻 15
2. 論文標題 Distributed Gradient Descent Method with Edge-Based Event-Driven Communication for Non-Convex Optimization	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IET Control Theory & Applications	6. 最初と最後の頁 1588/1598
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1049/cth2.12127	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yuichi Kajiyama, Naoki Hayashi, Shigemasa Takai	4. 巻 66
2. 論文標題 Linear Convergence of Consensus-Based Quantized Optimization for Smooth and Strongly Convex Cost Functions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automatic Control	6. 最初と最後の頁 1254/1261
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TAC.2020.2989281	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Makoto Yamashita, Naoki Hayashi, Shigemasa Takai	4. 巻 E104-A
2. 論文標題 Dynamic Regret Analysis for Event-Triggered Distributed Online Optimization Algorithm	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 430/437
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.2020MAP0003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 橋本 航, 林 直樹, 原 尚之, 高井 重昌	4. 巻 56
2. 論文標題 浮体式洋上ウィンドファームにおける総発電量の調整を考慮した分散ブレードピッチ角制御	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 395/402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.56.395	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Naoki Hayashi, Yuichi Kajiyama, Shigemasa Takai	4. 巻 vol. E103-A, no. 2
2. 論文標題 Consensus-Based Quantized Algorithm for Convex Optimization with Smooth Cost Functions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 435/442
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.2019MAP0008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Naoki Hayashi, Kazuyuki Ishikawa, Shigemasa Takai	4. 巻 vol. E103-A, no. 2
2. 論文標題 Distributed Subgradient Method for Constrained Convex Optimization with Quantized and Event-Triggered Communication	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 428/434
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.2019MAP0007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Naoki Hayashi, Tomohiro Sugiura, Yuichi Kajiyama, Shigemasa Takai	4. 巻 vol. 14, no. 2
2. 論文標題 Distributed Event-Triggered Algorithm for Unconstrained Convex Optimization over Weight-Balanced Directed Networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IET Control Theory & Applications	6. 最初と最後の頁 253/261
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1049/iet-cta.2019.0377	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 神村 素輝, 林 直樹, 高井 重昌	4. 巻 vol. 33, no. 2
2. 論文標題 合意制御に基づく協調型トンプソン抽出の検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 システム制御情報学会論文誌	6. 最初と最後の頁 57/65
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5687/iscie.33.57	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshifumi Kusunoki, Naoki Hayashi, Takeshi Hatanaka, Keiji Tatsumi	4. 巻 vol. 32, no.9
2. 論文標題 Adaptive Stepsize Rule for Consensus Optimization by Supervisory Control Architecture	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 システム制御情報学会論文誌	6. 最初と最後の頁 338/348
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5687/iscie.32.338	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuichi Kajiyama, Naoki Hayashi, Shigemasa Takai	4. 巻 vol. E102-A, no. 2
2. 論文標題 Distributed Constrained Convex Optimization with Accumulated Subgradient Information over Undirected Switching Networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 343/350
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.E102.A.343	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Naoki Hayashi, Masaaki Nagahara	4. 巻 vol. E102-A, no. 2
2. 論文標題 Distributed Proximal Minimization Algorithm for Constrained Convex Optimization over Strongly Connected Networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 351/358
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.E102.A.351	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuichi Kajiyama, Naoki Hayashi, Shigemasa Takai	4. 巻 vol. 63, no. 7
2. 論文標題 Distributed Subgradient Method with Edge-Based Event-Triggered Communication	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automatic Control	6. 最初と最後の頁 2248/2255
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TAC.2018.2800760	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kazuyuki Ishikawa, Naoki Hayashi, Shigemasa Takai	4. 巻 E101-A
2. 論文標題 Consensus-Based Distributed Particle Swarm Optimization with Event-Triggered Communication	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 338-344
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.E101.A.338	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 梶山 祐一, 林 直樹, 高井 重昌	4. 巻 61
2. 論文標題 合意制御に基づく分散事象駆動型劣勾配アルゴリズムによる制約なし凸最適化	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 システム制御情報学会論文誌	6. 最初と最後の頁 253-262
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5687/iscie.30.253	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計32件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 Yoshifumi Kusunoki, Naoki Hayashi, Takeshi Hatanaka, Keiji Tatsumi
2. 発表標題 Refinement of Convergence Analysis for Consensus Optimization Algorithm with Adaptive Step-size Rule
3. 学会等名 The SICE Annual Conference 2019 (SICE2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoki Hayashi, Tomohiro Sugiura, Yuichi Kajiyama, Shigemasa Takai
2. 発表標題 Event-Triggered Consensus-Based Optimization Algorithm for Smooth and Strongly Convex Cost Functions
3. 学会等名 Proceedings of the 57th IEEE Conference on Decision and Control (CDC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenta Suzuki, Naoki Hayashi, Shigemasa Takai
2. 発表標題 Uniform Ultimate Stability for Time-Varying Nonlinear Systems with Event-Triggered Control
3. 学会等名 Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Makoto Yamashita, Naoki Hayashi, Shigemasa Takai
2. 発表標題 Regret Analysis of Distributed Online Subgradient Method with Event-Triggered Communication
3. 学会等名 Proceedings of the SICE Annual Conference (SICE2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Naoki Hayashi, Masaaki Nagahara
2 . 発表標題 Consensus-Based Distributed Event-Triggered Sparse Modeling
3 . 学会等名 Proceedings of the SICE Annual Conference (SICE2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Tatsuya Ito, Kohei Segawa, Naoki Hayashi, Shigemasa Takai
2 . 発表標題 Cooperative Voronoi Tracking by Multiple Quadrotors with Onboard PTZ Cameras
3 . 学会等名 Proceedings of the SICE Annual Conference (SICE2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Yuichi Kajiyama, Naoki Hayashi, Shigemasa Takai
2 . 発表標題 Distributed Multi-Step Subgradient Algorithm for Constrained Convex Optimization with Undirected Time-Varying Communications
3 . 学会等名 The 56th IEEE Conference on Decision and Control (CDC2017) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Naoki Hayashi, Masaaki Nagahara
2 . 発表標題 Distributed Proximal Gradient Algorithms for Sparse Modeling over Networks
3 . 学会等名 The 2nd International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (SWARM2017) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 林 直樹
2. 発表標題 合意制御に基づく分散凸最適化
3. 学会等名 電子情報通信学会 2017年ソサイエティ大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuichi Kajiyama, Naoki Hayashi, Shigemasa Takai
2. 発表標題 Distributed Event-Triggered Subgradient Method for Convex Optimization with a Common Constraint Set
3. 学会等名 The 20th IFAC World Congress (IFAC2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究者webページ http://www-inulab.sys.es.osaka-u.ac.jp/index.php?page=hayashi</p> <p>Researchmap https://researchmap.jp/zu3rv2h</p>

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------