

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：27101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14006

研究課題名(和文)大量の低信頼エージェントによる超分散制御系の設計理論とその災害地調査への応用

研究課題名(英文) Design of super-distributed control systems for unreliable multi-agents and its application to disaster area survey

研究代表者

永原 正章 (Nagahara, Masaaki)

北九州市立大学・環境技術研究所・教授

研究者番号：90362582

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、信頼性の低い大量のエージェントを用い、少数のエージェントの安定性を犠牲にすることによってシステム全体の制御性能を高める分散制御理論(超分散制御と呼ぶ)を提案した。スパース最適制御(動的スパースモデリング)のアイデアを援用し、マルチエージェントシステムに対するスパース分散制御を確立した。

L1ノルム最適化にもとづくスパース分散制御の制御則を導出し、その安定性条件を導いた。また、マルチエージェントシステムの制御理論の応用として分散最適化のアルゴリズムを考案した。ドローンおよびロボットを用いた実験を行い、超分散制御の有効性を検証した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we proposed a super-distributed control that uses multiple agents with low reliability to enhance the control performance of the system by sacrificing the stability of a few agents. By using the idea of sparse optimal control, or dynamic sparse modeling, sparse distributed control for multi agent system was established for the purpose.

We derive a sparse distributed control law based on L1 norm optimization with stability conditions. We also devised an algorithm of distributed optimization as an application of the control theory for multi-agents. Experiments using a drone and a robot were carried out to verify the effectiveness of the proposed super-distributed control.

研究分野：自動制御，スパースモデリング，人工知能

キーワード：分散制御 分散最適化 マルチエージェント スパースモデリング IoT

1. 研究開始当初の背景

火山噴火など災害地域の人命探索や調査のために人員を動員することは二次災害につながることから、近年、無人機の利用が盛んに提唱されている。その際の最も大きな問題点は、無人機の動作持続時間である。例えば、11.1V, 1000mAh のリチウムイオンバッテリーを搭載した無人機 AR.Drone (Parrot 社製) は 10 分程度しか連続飛行ができない。このようなシステムに対して、応募者らは文献[1]においてスパース最適制御を提唱し、制御の休止区間(制御が 0 の値をとる時間区間)を最大化する手法を提案した。この制御法により、飛行時間は伸びるが、制御の休止区間で確率的な外乱が入った場合、非常に脆弱となる。この影響を考慮した安定化手法も提案されているが[2]、制御系は保守的にならざるを得ない。一方、安定化を行わない場合、確率的外乱のもとでは一定の確率で安定条件が破られることになる。このような現象を許容する制御法として文献[3]において確率的モデル予測制御の枠組みによる手法が提案されているが、分散制御系での考察はこれまで報告されていない。火山噴火など災害時における人命探索のような応用を考えると、無人機(制御対象)の安定性よりも、探索時間や探索範囲の拡大(すなわち制御性能の向上)のほうが重要な場面は多いが、そのような状況に即した制御理論は今のところ存在しない。

[1] M. Nagahara, D. E. Quevedo, and D. Nesic, IEEE CDC, 2013.

[2] M. Nagahara, D. E. Quevedo, and J. Ostergaard, IEEE Trans. AC, 2014.

[3] M. Korda et al., IEEE Trans. AC, 2014.

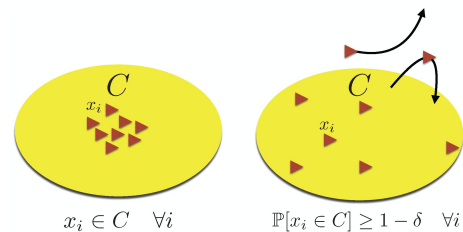
2. 研究の目的

本研究における理論的考察において鍵となるのは大数の法則である。マルチエージェントシステムに対する制御理論に大数の

法則をあてはめ、個々のエージェントが安定条件を破る確率が与えられたとき、それら大量のエージェントによる分散制御系全体の制御性能を期待値の意味で求め、またそれらを所望の値に制御する分散制御(超分散制御と呼ぶ)の理論を構築する。これにより、期待値の意味で制御性能を達成するために必要な総エージェント数や損失コスト等の見積もりも可能となる。また、多数の無人機による災害地域調査を模した実験により、安定性を保証した従来の分散制御系との比較を行い、災害救助の観点から提案手法の有効性を検証する。

3. 研究の方法

下の図に従来の分散制御と提案する超分散制御との違いを図示する。



ここでは、領域 C にエージェント x_i が入っていれば、そのエージェントは発散しない(安定である)というタイプの安定条件が得られていると仮定する。有界な外乱のもとですべてのエージェントを確実に安定化させるために、最悪ケースを想定した従来のロバスト制御では、すべてのエージェントが領域 C の中心近くに留まるように制御される(図の左)。一方、右図は超分散制御を表す。ここでは、各エージェントが領域 C に留まる確率が 1 より真に小さいことを許容している。この場合、あるエージェントは領域 C から離れて、無限遠方に発散するかもしれないし、いったん領域 C から離れたエージェントが戻ってくる可能性もある。いずれにしても、従来の分散制御よりも幅広い領域をカバーすることが可能である。また、前ページの研究目的で述べたスパース最適制御を用いれば、探索時間の延長も期待できる。

以上の説明は定性的な説明であり、実際にこのような制御則を構築するためには、エージェント間のつながりや時間発展などを考慮に入れて確率を議論する必要がある。数学的には、確率的に変動するグラフラプリアンのもとでのマルチエージェントシステムを考え、大量のエージェントの使用を前提とした大数の法則にもとづく新しい制御理論を構築しなければならない。このような定式

化は、これまで報告されておらず、この理論が確立すれば、理論的にも大きな発展が期待できる。

4. 研究成果

上で述べたアイデアを実現するために、スパース最適制御の理論をマルチエージェントシステムの制御に援用し、スパースな分散制御で超分散制御を実現できるような枠組みを提案した。

ここでスパースな制御とは、アクチュエータを停止させる時間長を最大化するような制御であり、積極的にアクチュエータを停止させるような制御となる。アクチュエータの停止中は制御が効かず、安定領域の境界付近にいるエージェントは領域外に出てしまう可能性が生じる。超分散制御でそれを許容することにより、燃料消費を最小化させるような制御が設計できることを理論的にしめした。この成果は制御分野のトップカンファレンスである IEEE CDC 2016 や IFAC World Congress 2017 で発表された（なお、IFAC World Congress 2017 は発表予定）。

さらに、マルチエージェントシステムの制御理論を応用し、分散最適化のアルゴリズムを提案し、その収束性を検証した。この成果を国際会議 IEEE CDC 2017 に投稿した。

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 11 件)(すべて査読有)

1. T. Ikeda and M. Nagahara, Discrete-valued Model Predictive Control using Sum of Absolute Values Optimization, Asian Journal of Control, 2017 (to appear)
2. T. Ikeda, M. Nagahara, and S. Ono, Discrete-Valued Control of Linear Time-Invariant Systems by Sum of Absolute Values Optimization, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 62, No. 6, pp. 2750-2763, June 2017.
3. N. Hayashi, M. Nagahara, and Y. Yamamoto, Robust AC Voltage Regulation of Microgrids in Islanded Mode with Sinusoidal Internal Model, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 10, No. 2 p. 62-69, 2017.
4. H. Sasahara, K. Hayashi and M. Nagahara, Symbol Detection for Faster Than Nyquist Signaling by Sum of Absolute Values Optimization, IEEE Signal Processing Letters, vol. 23, no. 12, pp. 1853-1857, Dec. 2016.

5. M. Nagahara, J. Ostergaard, D. E. Quevedo, Discrete-time hands-off control by sparse optimization, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2016:76, Dec. 2016.
6. D. Chatterjee, M. Nagahara, D. E. Quevedo, and K. S. M. Rao, Characterization of maximum hands-off control, Systems & Control Letters, vol. 94, pp. 31-36, Aug. 2016.
7. M. Nagahara and Y. Yamamoto, Digital repetitive controller design via sampled-data delayed signal reconstruction, Automatica, vol. 65, pp. 203-209, Mar. 2016
8. T. Ikeda and M. Nagahara, Value function in maximum hands-off control for linear systems, Automatica, vol. 64, pp. 190-195, Feb. 2016
9. M. Nagahara, D. E. Quevedo, and D. Nesic, Maximum Hands-off Control: A Paradigm of Control Effort Minimization, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 61, No. 3, pp. 735-747, 2016.
10. M. Nagahara, Discrete Signal Reconstruction by Sum of Absolute Values, IEEE Signal Processing Letters, Vol. 22, no. 10, pp. 1575-1579, Oct. 2015.
11. H. Sasahara, M. Nagahara, K. Hayashi, and Y. Yamamoto, Digital Cancellation of Self-Interference for Single-Frequency Full-Duplex Relay Stations via Sampled-Data Control, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 8, No. 5, pp. 321-327, 2015.

〔学会発表〕(計 20 件)

1. K. Yamamoto*, Y. Yamamoto, and M. Nagahara, Simultaneous rejection of signals below and above the Nyquist frequency, 1st IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), Hawaii (USA), 2017 年 8 月 (発表予定)。
2. N. Challapalli*, M. Nagahara, and M. Vidyasagar, Continuous Hands-off Control by CLOT Norm Minimization, IFAC World Congress 2017, Toulouse (France), 2017 年 7 月 14 日 (発表予定)
3. K. Yamamoto, Y. Yamamoto, and M. Nagahara, Hypertracking Beyond the Nyquist Frequency, Emerging Applications of Control and System

- Theory (EACST 2017), Dallas (USA), 2017年9月(発表予定)
4. H. Sasahara, K. Hayashi, M. Nagahara, Symbol Detection for Faster-than-Nyquist Signaling by Sum-of-Absolute-Values Optimization, 42nd IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2017), New Orleans (USA), 2017年3月5日.
 5. S. Ohno, T. Shiraki, M. R. Tariq, M. Nagahara, Rate-distortion analysis of delta-sigma modulators, 42nd IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2017), New Orleans (USA), 2017年3月5日.
 6. Y. Yamamoto, K. Yamamoto and M. Nagahara, Tracking of signals beyond the Nyquist frequency, 2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC), Las Vegas (USA), 2016年12月12日, pp. 4003-4008.
 7. T. Ikeda, M. Nagahara and K. Kashima, Consensus by maximum hands-off distributed control with sampled-data state observation, 2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC), Las Vegas (USA), 2016年12月12日, pp. 962-966.
 8. M. R. Tariq, S. Ohno and M. Nagahara, Synthesis of IIR error feedback filters for modulators using approximation, 2016 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA), Jeju (Korea), 2016年12月13日.
 9. R. Hayakawa, K. Hayashi, H. Sasahara, and M. Nagahara, Massive Overloaded MIMO Signal Detection via Convex Optimization with Proximal Splitting, The 2016 European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Budapest (Hungary), 2016年8月29日.
 10. T. Ikeda, M. Nagahara and D. E. Quevedo, Quantized self-triggered control by sum-of-absolute-values optimization, 22nd International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems (MTNS), Minneapolis (USA), 2016年7月12日.
 11. H. Sasahara, K. Hayashi, M. Nagahara, and Y. Yamamoto, Control Theoretical Approach for Single Frequency Full Duplex Wireless Relaying, 22nd International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems (MTNS), Minneapolis (USA), 2016年7月12日.
 12. T. Ikeda and M. Nagahara, Fundamental analysis of sparse optimal control and its application to discrete-valued control, American Control Conference (ACC), Boston (USA), 2016年7月12日.
 13. T. Ikeda and M. Nagahara, Maximum hands-off control without normality assumption, American Control Conference (ACC), Boston (USA), 2016年7月12日.
 14. H. Sasahara, K. Hayashi, and M. Nagahara, Multiuser Detection by MAP Estimation with Sum of Absolute Values Relaxation, IEEE International Conference on Communications (ICC), Kuala Lumpur (Malaysia), 2016年5月23日.
 15. H. Sasahara, M. Nagahara, K. Hayashi, Y. Yamamoto, Sampled-data H-infinity optimization for self-interference suppression in baseband signal subspaces, 54th IEEE Conference on Decision and Control, 大阪国際会議場(大阪府大阪市), pp. 7244-7249, 2015年12月18日.
 16. H. Sasahara, M. Nagahara, K. Hayashi, Y. Yamamoto, Time-domain equalization for single-frequency full-duplex wireless relay using H2 optimal control, 47th ISCTE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS'15), Hawaii (USA), 2015年12月5日.
 17. T. Ikeda and M. Nagahara, Discrete model predictive control by sum of absolute values optimization, 47th ISCTE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS'15), Hawaii (USA), 2015年12月5日.
 18. M. Ogura, M. Nagahara, and V. M. Preciado, L1-optimal disturbance rejection for disease spread over time-varying networks, The First International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (SWARM2015), pp. 377-378, October

28-30, 京都大学 (京都府京都市),
2015 年 10 月 28 日.

19. H. Sasahara, M. Nagahara, K. Hayashi, and Y. Yamamoto, Loop-Back Interference Suppression for OFDM Signals via Sampled-Data Control, 10th Asian Control Conference (ASCC), paper ID: 1570072769, pp. 1-4, Kota Kinabalu (Malaysia), 2015 年 5 月 31 日.

20. T. Ikeda and M. Nagahara, Continuity of the Value Function in Sparse Optimal Control, 10th Asian Control Conference (ASCC), paper ID: 1570074957, pp. 1-4, Kota Kinabalu (Malaysia), 2015 年 5 月 31 日.

〔図書〕(計 2 件)

1. 川田編著, 永原ほか著, 倒立振子で学ぶ制御工学, 森北出版, 2017 年 2 月 (担当ページ: 60-75, 119-132, 169-196)
2. 東, 永原 編著, マルチエージェントシステムの制御, コロナ社, 2015 年 9 月 (担当ページ: 21-79)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<https://nagahara-masaaki.github.io/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永原 正章 (NAGAHARA, Masaaki)

北九州市立大学・環境技術研究所・教授

研究者番号: 90362582