

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14766

研究課題名（和文）自律移動ロボット群のリアルタイムスケールフリー制御

研究課題名（英文）Real-time scale-free control for autonomous mobile robot networks

研究代表者

山本 薫 (Yamamoto, Kaoru)

九州大学・システム情報科学研究所・准教授

研究者番号：20834104

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：自律移動ロボット群の制御において、ロボットの参加や離脱にロバストな分散制御手法の確立を目的とした研究を行った。本研究期間内には、離脱により群制御性能を悪化させる移動体と全く影響を与えない移動体が存在することを示し、その厳密な条件を導いた。さらに、自然界の群れ行動を規範としつつ、工学的な目的を達成するような群モデルを提案し、モデル予測制御を用いた実用的な分散制御手法を考案した。特に、障害物が存在する未知環境での誘導問題への有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多数の移動ロボット群を自律的に動かし、様々な社会的課題を解決しようとする試みが近年盛んに行われており、安全かつ高精度な自律分散制御の確立は喫緊の課題である。本研究においては、多数のロボットが近接して移動することで生じる相互作用による不安定化を防ぐこと、またその理論保証を与えることにその学術的意義および社会的意義がある。また、モデル予測制御により未知環境への適応性を向上させ、さらに、ロボットに搭載可能な小型コンピュータでも制御が実行可能であるよう計算負荷にも考慮しており、実用化を視野に入れた研究である。

研究成果の概要（英文）：The research aims at establishing robust distributed control strategies against the events of robots joining or leaving the swarm. During this research period, we derived some rigorous conditions for maintaining the swarm control performance in such events. We also proposed a swarm model inspired by collective behaviour in nature that achieves engineering goals, and developed a practical distributed control method using model predictive control. In particular, we verified its effectiveness in solving the navigation problem in unknown environments with obstacles.

研究分野：制御工学

キーワード：マルチエージェントシステム 移動ロボット群 スケーラビリティ モデル予測制御

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

車両群の隊列走行や、無人航空機 (UAV, ドローン) 群飛行などの、自律移動ロボット群の制御における系統的な解析・設計手法の枠組みは、未だ確立されていない。その大きな要因として、一般にシステムが大規模かつ複雑であるため、解析が困難であることや、システムの構成要素数が時々刻々と変化することなどが挙げられる。特に、従来手法では構成要素数を一定と仮定しており、構成要素数変動による制御性能の劣化や不安定化を扱うことができない。

複数の移動体が近接して移動する場合、各移動体が安定に制御されていたとしても、移動体間の相互干渉により、群全体での安定性が保証されるとは限らない。例えば、ドローン群の一部に加わった突風等の外乱の影響が群の中で増幅しながら伝播し得る。また、ある移動体が群に参加または離脱することによる一時的な移動体間距離の変化も群全体の安定性に悪影響を及ぼす。これら制御性能の劣化度合いは、ネットワーク構成要素数により大きく異なるため、構成要素数の影響を陽に扱えるネットワーク制御理論の確立は喫緊の課題である。

### 2. 研究の目的

上述のように、群を構成する要素 (ロボット, 移動体) の参加あるいは離脱により構成要素数が変化すると、移動体間相互作用のため群全体の制御性能が劣化あるいは不安定化する。これを、研究代表者が推進してきたスケールフリーネットワーク制御理論に基づいて解決することが本研究の目的である。さらに、本制御問題を、制御対象のモデルに基づいて未来を予測・最適化し、時々刻々の行動を決めるモデル予測制御として定式化し、リアルタイム手法に拡張する。これによって、構成要素数が変動する場合の群を統一的に制御することが可能となる。

### 3. 研究の方法

#### (1) 問題設定

本研究では、リーダー・フォロワーの構造をもつ群を研究対象とし、リーダー移動体は軌道生成を、各フォロワー移動体は自身の検知・通信範囲内の移動体と協調しつつ移動体間距離制御や速度制御を行うものとする。つまり、各移動体は、近くの移動体の位置・速度情報のみを自身の制御に用いる分散制御方式により制御される。

#### (2) スケールフリーネットワーク制御理論の一般化

研究代表者がこれまでに推進してきたスケールフリーネットワーク制御理論は、トラックの隊列走行などの応用例にみられるような、同種類の移動体が1次元上を連なって移動する場合に限定されていた。そこで、本研究では、異種類の移動体が混在する場合や、フォーメーションフライト等移動体群の協調移動時によくみられる形状での群制御において、移動体の参加・離脱による群制御性能への影響をはかる指標の定式化を行う。

#### (3) モデル予測制御による分散制御

さらに、障害物回避やアクチュエータ上限値などの実用上重要な制約条件を陽に扱うため、モデル予測制御の枠組みでの分散制御系設計手法を確立する。モデル予測制御では各サンプル時刻に最適化問題を解く必要があり、実装可能性を考慮すると、高速求解アルゴリズムが求められる。特に、本研究では、ドローン等に搭載できる小型コンピュータでもリアルタイム演算が可能であるような計算効率の高いアルゴリズムを採用し、実用化を念頭に置いた研究開発を行う。

#### (4) ドローン等回転翼機のダウンウォッシュを考慮したより安全性の高い群制御の実現

本研究における成果をドローン等回転翼機群の制御に応用する場合、ロータの回転により生じるダウンウォッシュに注意する必要がある。そこで、複数機が近接飛行する際のロータ周りの気流を分析し、上記(3)のモデル予測制御の制約条件にダウンウォッシュ効果を反映させることで、高精度かつ安全性の高い群制御を目指す。(独立基盤形成支援(試行)制度による)

### 4. 研究成果

主な研究成果は以下のとおりである。

(1) 異種の移動体が混在するような1次元群制御システムにおけるスケールフリー制御理論を提案し、外乱抑制性能が最悪となるような群構成を明らかにした。また、このようなシステムに、研究代表者が過去に提案した、同種の移動体のみで構成される1次元群制御システムのスケールフリー制御系設計法(図式解法)を適用するための手法を考案し、その有効性を確認した。また、図式解法ではなく、数値最適化に基づく手法によるスケールフリー制御系設計法を提案した。これらの成果を査読付き国際会議3件および査読付き国際誌に発表した。

(2) 移動体群協調制御によくみられる形状として、階層型グラフおよび階層型パスグラフ (図1) を提唱し、これらのグラフに特有の性質を理論的に明らかにした。特に、特定フォーメーションへの収束速度の指標ともなる「代数的連結度」を群制御性能の指標とすると、離脱により群制御性能を悪化させる移動体と全く影響を与えない移動体が存在することを示し、その厳密な条件を導いた。これらの成果を分野最大の査読付き国際会議および国内解説記事で発表した。

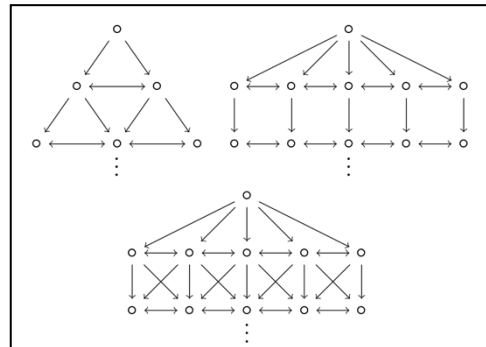


図1：階層型パスグラフ

(3) スケールフリーな分散群制御として、Reynoldsの「ボイド」モデルに着目し、群の誘導制御へ適用した。ボイドモデルは、各個体が検知範囲内の他個体の重心位置に向かう「結合」、他個体の進行方向の平均に向かう「整列」、他個体と近づきすぎると離れる「分離」の3つのルールに従うことで、自然界の群れ行動のような秩序だった動きをみせるというものである。その構成から、スケラブルな分散制御となっていることや、非常にシンプルなモデルであるという利点があるが、群れを形成することに特化したモデルであり、そのまま工学的な目的に応用することは難しい。本研究では、ボイドモデルが重み付き合意問題として捉えることができることに着目し、目的を重みに反映させることで、障害物が存在する未知環境において群れを誘導する問題への応用に成功した。具体的には、周辺状況により適応的に変化する重みを提案し、リーダー・フォロワーの構成において、フォロワー移動群がこの新たな群モデルの行動原理に従うよう制御系設計をすることで、複雑な環境下においても群誘導を可能とした (図2)。制御系設計にはモデル予測制御を用いており、数値シミュレーションにおいて計算効率も含めその有効性を確認した。これらの成果を査読付き国際会議および国内解説記事、国内学会で発表した。また、車輪型ロボットを用いた実証実験も行っている。本成果は、重みモデルの適切な設定により、誘導問題だけでなくさまざまな目的への発展が期待される。

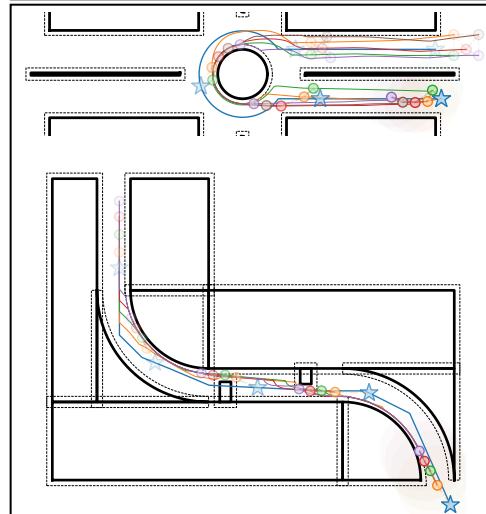


図2：新しい群モデルに基づくモデル予測群誘導制御 (上：ラウンドアバウト, 下：障害物の存在するS字路)。星印がリーダー、丸印がフォロワー。数ステップごとのスナップショットを示している。複雑な環境においても全移動体の誘導に成功している。

(4) ドローン等回転翼機型飛行体では、ロータの回転により生じる強い下降気流、いわゆるダウンウォッシュが重大な事故を引き起こす恐れがある。複数ドローン群飛行時のダウンウォッシュによる不安定化を抑制し、安全性および飛行エネルギー効率の高いドローン群飛行を実現することを目的とし、粒子画像流速測定法 (PIV) により可視化、分析を行なった (図3)。分析内容に基づく結果を国内会議で発表した。当初の計画では、分析結果をもとにモデル予測制御の制約条件としてダウンウォッシュ効果を反映させ、より高精度かつ安全な群制御の実現を目指すものであったが、適切な実験データの取得に難航し、現在引き続き検討を行なっている。

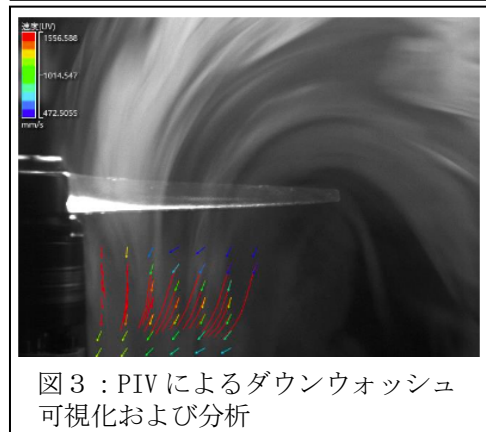


図3：PIVによるダウンウォッシュ可視化および分析

(5) 上記に加え、さらに応用寄りの研究として、弾性波探査のためのドローン群制御や、ヨーロッパ市場における電力ネットワーク最適化に関する研究に取り組んだ。前者は、広大な敷地での地震計設置および計測を、ドローンの巡回により行おうとするもので、世界初の試みである。査読付き国際誌および査読付き国内誌に成果を発表した。後者は、移動体群を対象とした本研究をより一般的にマルチエージェントシステムとして捉え、拡張しようとするもので、国際共同研究を立ち上げ、現在査読付き国際誌に投稿中である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計23件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 19件）

1. 著者名 久保 亮太、山本 薫、セメリス アンドレアス	4. 巻 65
2. 論文標題 人工ポテンシャル法を用いた未知環境での移動ロボットナビゲーションにおける停留回避	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 自動制御連合講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 8~13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11511/jacc.65.0_8	査読の有無 無
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 石井 貴悠、坂口 聡範、山本 薫	4. 巻 65
2. 論文標題 集中制御による自動運転車両合流時の挙動円滑化	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 自動制御連合講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 588~591
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11511/jacc.65.0_588	査読の有無 無
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 Sakaguchi Akinori、Yamamoto Kaoru	4. 巻 7
2. 論文標題 A Novel Quadrotor With a 3-Axis Deformable Frame Using Tilting Motions of Parallel Link Modules Without Thrust Loss	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 9581~9588
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2022.3191195	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 Nag Aneek、Huang Shuo、Themelis Andreas、Yamamoto Kaoru	4. 巻 -
2. 論文標題 Flock navigation with dynamic hierarchy and subjective weights using nonlinear MPC	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 2022 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)	6. 最初と最後の頁 1135-1140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CCTA49430.2022.9966067	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 Yoshise Ryusei, Yamamoto Kaoru	4. 巻 -
2. 論文標題 Algebraic connectivity of layered path graphs under node deletion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 2022 IEEE 61st Conference on Decision and Control (CDC)	6. 最初と最後の頁 975-980
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CDC51059.2022.9992940	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 山本 薫	4. 巻 67
2. 論文標題 移動ロボット群における連結性	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 システム / 制御 / 情報	6. 最初と最後の頁 12-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Yamamoto Kaoru, Yamamoto Yutaka, Nagahara Masaaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Hypertracking and Hyperrejection: Control of Signals beyond the Nyquist Frequency	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automatic Control	6. 最初と最後の頁 1~8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TAC.2022.3230599	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 Stephen Hardy, Andreas Themelis, Kaoru Yamamoto, Hakan Ergun, Dirk Van Hertem	4. 巻 -
2. 論文標題 Optimal Grid Layouts for Hybrid Offshore Assets in the North Sea under Different Market Designs	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Energy Markets, Policy and Regulation	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 該当する

1. 著者名 濱里 洋平、坂口 聡範、山本 薫、辻 健	4. 巻 36
2. 論文標題 弾性波探査のためのドローン群の巡回経路最適化	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 システム / 制御 / 情報	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Hamasato Yohei, Sakaguchi Akinori, Tsuji Takeshi, Yamamoto Kaoru	4. 巻 35
2. 論文標題 Optimization of Drone-Based Surface-Wave Seismic Surveys Using a Multiple Traveling Salesman Problem	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 271 ~ 278
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2023.p0271	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 山本 薫, Themelis Andreas	4. 巻 -
2. 論文標題 非線形モデル予測制御による車両群の分散誘導制御 : 群れのモデルとその制御	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 システム / 制御 / 情報	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Yamamoto Yutaka, Yamamoto Kaoru	4. 巻 -
2. 論文標題 Nonlinear Sampled-data Systems -- A lifting framework	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 山本 薫	4. 巻 60
2. 論文標題 次世代モビリティと持続可能な社会の実現に向けて	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 計測と制御	6. 最初と最後の頁 509 ~ 513
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11499/sicejl.60.509	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 築城 大知、坂口 聡範、越智 亮太、山本 薫	4. 巻 64
2. 論文標題 Pure pursuit法を用いた移動ロボットにおける滑らかな障害物回避手法の提案	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 自動制御連合講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 746 ~ 750
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11511/jacc.64.0_746	査読の有無 無
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 Yamamoto Kaoru	4. 巻 -
2. 論文標題 Scale-invariant Controller Synthesis in Mass Chains	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Yamamoto Kaoru	4. 巻 -
2. 論文標題 Synthesis of passive interconnections in mass chains achieving a scale-free performance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/09596518211004303	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 Yamamoto Yutaka, Yamamoto Kaoru, Nagahara Masaaki, Khargonekar Pramod P	4. 巻 2020
2. 論文標題 Signal processing via sampled-data control theory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Impact	6. 最初と最後の頁 6~8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21820/23987073.2020.2.6	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 該当する

[学会発表] 計17件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 久保 亮太、山本 薫、セメリス アンドレアス
2. 発表標題 人工ポテンシャル法を用いた未知環境での移動ロボットナビゲーションにおける停留回避
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石井 貴悠、坂口 聡範、山本 薫
2. 発表標題 集中制御による自動運転車両合流時の挙動円滑化
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nag Aneek, Huang Shuo, Themelis Andreas, Yamamoto Kaoru
2. 発表標題 Flock navigation with dynamic hierarchy and subjective weights using nonlinear MPC
3. 学会等名 2022 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA) (国際学会)
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 Yoshise Ryusei、Yamamoto Kaoru
2. 発表標題 Algebraic connectivity of layered path graphs under node deletion
3. 学会等名 2022 IEEE 61st Conference on Decision and Control (CDC) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 濱里 洋平、山本 薫、辻 健
2. 発表標題 弾性波探査のためのドローン群の巡回経路最適化
3. 学会等名 第66回 システム制御情報学会 研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yamamoto Kaoru
2. 発表標題 Controller synthesis for an arbitrary length of mass chain
3. 学会等名 25th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems (MTNS 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本 薫
2. 発表標題 車両群のナビゲーション -- 群れのモデルとその制御
3. 学会等名 第67回 システム制御情報学会 研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yamamoto Yutaka, Yamamoto Kaoru
2. 発表標題 Nonlinear Sampled-data Systems -- A lifting framework
3. 学会等名 The 22nd World Congress of the International Federation of Automatic Control
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 築城 大知, 坂口 聡範, 越智 亮太, 山本 薫
2. 発表標題 Pure pursuit法を用いた移動ロボットにおける滑らかな障害物回避手法の提案
3. 学会等名 第64回自動制御連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上村凌雅, 坂口聡範, 越智亮太, 山本薫
2. 発表標題 複数クアッドコプター近接飛行時の乱流に基づく相互干渉分析を目的とするPIV計測
3. 学会等名 第40回計測自動制御学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 築城大知, 坂口聡範, 越智亮太, 山本薫
2. 発表標題 Pure pursuit法を用いた移動ロボットにおける滑らかな障害物回避手法の提案
3. 学会等名 第40回計測自動制御学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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			
ベルギー	KU Leuven			