

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	自律移動体群の局所空間的な相互作用の場を用いた情報伝播による機能的秩序の形成
Title(English)	Functional Order Generation by Local Space Interaction Field for Automatic Decentralized Swarm Systems
著者(和文)	折金悠生
Author(English)	Yuki Origane
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第267号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:倉林 大輔,天谷 賢治,塚越 秀行,中尾 裕也,畑中 健志
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第267号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	システム制御 システム制御	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	折金 悠生		審査員主査： Chief Examiner	倉林 大輔

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本研究では、自律移動体群における局所観測のみを用いた群の大域的状態推定法と、推定された情報を利用した機能的秩序形成の方法を提案する。

局所的な観測と分散的な制御によって動作する自律移動体群では、各移動体の制約と大域的な目的を調停する秩序の形成が必要不可欠である。特に典型的な無秩序状態である停留や行動の不一致を打破するためには、大域的な群の空間的・時間的狀態に基づいた行動を個々の移動体が行わなければならないが、局所的な観測のみで大域狀態をどのように獲得するかが問題となる。生物における群集団や物理現象においては、低次元の狀態量による局所的相互作用のみを用いているにも関わらず、複雑な振る舞いを実現できる。こういった振る舞いを工学的な機能実現に応用するためには、局所相互作用から得られる情報の意味を知る必要がある。そこで本研究では、位相振動子を移動体に搭載し、互いの位置関係に基づく相互作用を導入した。これにより、振動子群が作る“場”が結合狀態に応じて振る舞うために、局所的な観測によって移動体全体の空間配置に関する情報を推定でき、機能的な秩序の形成が可能となる。

移動体間の衝突は安全のため避けられなければならないが、制御バリア関数法のように不等式制約でオリジナルの入力を打ち消してしまう場合、タスク達成が望めない停留狀態に陥ることがある。特にリーダーフォロワ型の誘導を行う移動体群においては、リーダーがフォロワ移動体に取り囲まれてしまう停留が生じる。この無秩序狀態を解決するために、拡散方程式に似た放物型の相互作用をリーダーの進行方向を反映させる形で設計した。相互作用により場に勾配が生じることで、リーダー移動体の進行方向を避けるようにフォロワ移動体を誘導することが可能であることを確認した。

リーダーという基準となる移動体が存在しない場合でも機能的な秩序の形成を可能とするために、また伝搬できる情報の次元を高くするために、双曲型の相互作用を新たに提案した。双曲型の相互作用では場に移動体のネットワーク構造に応じた定常波が生じることで、群の絶対的・相対的な空間狀態や、配置の時間変化といった大域狀態を分散的に推定できる。これは結合關係が移動体の配置を反映していることから、移動体同士が行う相互作用により、有限要素解析のように空間上の場で波動方程式が離散的に計算されていることによる。この有限要素解析との対応關係により、定常波が安定となるためのパラメータ範囲をフォン・ノイマン条件を用いて求めた。結果として、システムの計算性能と定常波の検出性の間でトレードオフが存在することが明らかになった。シミュレーションの結果から、群体のサイズ、群体における相対的な位置及び群形状の変化といった複数の情報を、双曲型相互作用に従う一つの場合から取り出せることを確認した。

双曲型相互作用を用いて推定できる大域狀態を用いて、単一性の維持や停留の解消といった機能的な秩序の形成を行った。定常波のピーク周波数から群全体の移動狀態を推定することで、群全体の配置変換が停止したことを全ての移動体が検出することができる。これを各移動体のタスク遷移条件に設定することで、群全体として行動遷移を同期的に行うことができる。また、停留が生じたことを配置変化の停止から検出し、さらには群内部における相対位置推定を利用することで、狭所停留の要因となる幾何的なアーチ構造を時空間的な非対称行動によって解消できることを確認した。

自律移動体群の耐故障性や拡張性といった利点を活かすためには、相互作用に必要な通信量が小さいことが望ましい。この観点から、提案手法を実装可能なシステムの下限を示すために、発光タイミングを用いた通信システムを持つ移動ロボットに対して、提案手法の実装を行った。実装においては、特に通信できる観測量の範囲の制約から、定常波のエネルギーが増大しないよう注意しなければならない。しかし双曲型相互作用自体がエネルギーを保存する性質があり、かつネットワークの時間変化や不確かさによる外部からのエネルギー注入を避けられないことから、粘性項と自励項の導入によって分散的なエネルギー管理を行った。実ロボットを用いた実験の結果、情報量の少ない通信しか持たないデバイスにおいても、双曲型相互作用を用いた大域狀態推定が可能であることが明らかになった。

以上より、相互作用を設計し場に伝搬される情報を明らかにすることで、局所的かつ低次元の観測から大域状態推定と機能的秩序の形成法を提案した。自律分散的な移動体群が局所的な観測のみで対応できるタスクや環境の幅が広がったことで、より広い場面で耐故障性や拡張性に優れたシステムの構築を可能とした。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	システム制御 システム制御	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	折金 悠生		審査員主査： Chief Examiner	倉林 大輔	

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

This research proposes a method that enables robots in a swarm to estimate global geometric information and achieve functional order using only local observation.

In a robotic swarm system, which consists of autonomous and distributed mobile agents, local constraints can hinder the achievement of global tasks. To overcome disordered situations, such as deadlock or failure to unify, agents must move based on the global time-space states of the entire swarm, relying only on local observations.

To address this problem, this study implemented a phase oscillator in the agents and introduced local interactions among the oscillators. By sharing a field over oscillators, the agents can estimate global time-space information about the entire swarm system.

Collision avoidance constraints, such as those derived from the control barrier function method, restrict nominal inputs for task achievement. This can lead to an entrainment deadlock problem in leader-follower navigation. To address this, this study modified the interaction mechanism to propagate the leader's direction, enabling movement and resolving the deadlock problem in a distributed manner.

To propagate higher-order information, this study proposed a wave-type interaction. This interaction generates steady waves across the field, with the frequency and amplitude of these waves reflecting the interaction network of the swarm system. By extracting this information through Fourier analysis, each agent could estimate the dynamic location changes of all agents and determine their relative positions. By applying the Von Neumann stability condition to the system with wave-type interaction, the study identified a stable range for the coupling parameter. Simulation results demonstrated that the agents maintained unification and resolved deadlock situations.

The proposed method was further validated through real-world experiments with robots. In these experiments, robots communicated their phases via intermittent LED flashes. Implementation required preserving the virtual energy of the interactions. A viscosity term was introduced to prevent energy divergence caused by network changes and uncertainties, while a self-excitation term restored energy to enable repeated detection of steady waves.

Consequently, this study enhanced the swarm's ability to resolve disordered situations and contributed to the development of robotic swarm systems capable of handling complex tasks and environments.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).