

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	分散最適化と集団ダイナミクスのための受動性に基づく解析および設計に関する研究
Title(English)	Passivity-based Analysis and Design for Distributed Optimization and Population Dynamics
著者(和文)	山下駿野
Author(English)	Shunya Yamashita
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11745号, 授与年月日:2022年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:畑中 健志,三平 満司,倉林 大輔,早川 朋久,石崎 孝幸,藤田 政之
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11745号, Conferred date:2022/3/26, 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)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	山下 駿野		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	畑中 健志	
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)	藤田 政之	

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx. 2000 Japanese Characters)

本論文では、分散最適化と集団ダイナミクスを対象に、受動性に基づく解析と設計を行う。各章の概要は以下のとおりである。

第1章「Introduction」では、本論文の研究背景および動機について述べる。まず、サイバーフィジカルソーシャルシステムの構成要素である、サイバー空間での分散最適化と人間社会における集団意思決定プロセスに焦点を当て、分散最適化アルゴリズムと集団ダイナミクスの特性解析の重要性を示す。つぎに、最適化アルゴリズムの収束性、通信遅延下での分散最適化、限定合理性と集団ダイナミクスに関する既存研究を紹介し、システムの受動性に基づく解析および設計の利点と課題を明らかにする。最後に、分散最適化と集団ダイナミクスの各研究分野に対する本論文の貢献を述べる。

第2章「Preliminaries: Convexity, Passivity and Foundation of Population Dynamics」では、本論文で用いる数学的概念と基盤理論を紹介する。まず、凸関数についての数学的性質を説明する。つぎに、システムの受動性を定義し、受動システムの重要な性質を示す。また、受動性に基づく協調制御の例として、双方向テレオペレーションとネットワークシステムの出力同期制御を紹介する。特に、通信遅延が存在する場合でのこれらの制御手法について説明する。最後に、人間の合理性を仮定した集団ダイナミクスとしてロジットダイナミクスを紹介し、受動性との関係を示す。

第3章「Passivity-based Generalization of Primal-dual Dynamics」では、凸計画問題を解く連続時間アルゴリズムである主双対ダイナミクスを再訪し、受動性に基づいてこれを一般化する。まず、目的関数が狭義凸関数ではない凸計画問題に主双対ダイナミクスを適用すると、応答が最適解へ収束しないことを例題をもとに確認する。また、閉ループ系に安定ゼロ点を供給することが収束性の鍵となるという仮説を立てる。つぎに、受動性に基づき安定ゼロ点の供給を許容する一般化主双対ダイナミクスを提案し、上述の仮説が正しいことを理論的に証明する。さらに、提案法が拡張ラグランジュ法の一般化であることを明らかにし、設計自由度の観点で提案法の優位性を示す。最後に、照明最適制御問題に一般化主双対ダイナミクスを適用し、理論的結果の妥当性と提案法の有効性をシミュレーションにより検証する。

第4章「Distributed Optimization Inspired by ADMM」では、コーディネータとエージェントで管理される分散凸計画問題を考え、コーディネータとエージェント間に通信遅延が存在する状況での分散最適化アルゴリズムを提案する。まず、代表的な分散最適化手法の一つである ADMM (Alternating Direction Method of Multipliers) に基づき対象問題を再定式化し、連続時間 ADMM アルゴリズムを提案する。また、アルゴリズム内の各サブシステムの受動性を明らかにし、通信遅延がない場合での最適解への収束性を証明する。つぎに、コーディネータとエージェント間の通信に遅延がある状況を考える。ここで、連続時間 ADMM と双方向テレオペレーションの構造類似性を示し、双方向テレオペレーションで用いられている通信遅延ロバスト化手法を採用することで連続時間 ADMM を再設計する。さらに、再設計したアルゴリズムが通信遅延下で最適解への収束性を保証することを理論的に証明する。最後に、環境モニタリングにおける対象物割り当て問題に連続時間 ADMM を適用し、提案法の有効性および理論的結果の妥当性をシミュレーションで確認する。

第5章「Consensus-based Distributed Optimization」では、エージェントのみから構成されるネットワーク上での分散凸計画問題を考え、エージェント間通信に不均一な遅延が存在する状況で最適解を求解する分散アルゴリズムを提案する。まず、合意制約を有する分散凸計画問題を定式化し、第3章で示した一般化主双対ダイナミクスに基づきアルゴリズムを構築する。このアルゴリズムを構成するサブシステムの受動

性を示し、通信遅延がない状況での最適解への収束性を証明する。つぎに、エージェント間通信に不均一な遅延が存在する状況を想定する。ここで、エージェントごとの更新則に焦点を当て、受動性に基づく出力同期制御則と類似の構造をもつことを明らかにする。この類似性に着目し、出力同期制御で用いられている遅延環境下での制御則を適用することで分散最適化アルゴリズムを再設計する。加えて、再設計したアルゴリズムが不均一な通信遅延下でも最適解求解を保証することを理論的に証明する。最後に、提案した分散最適化アルゴリズムを第4章と同様の対象物割り当て問題に適用し、理論的結果の妥当性をシミュレーションにより検証する。

第6章「Passivity Analysis and Design for Biased Population Dynamics」では、同調バイアスの影響を受けた限定合理的な集団ダイナミクスと、それに対する行動変容メカニズムについて考察する。まず、同調バイアスを表現する2種類の数理モデルを導入し、それぞれのバイアスをロジットダイナミクスに適用した集団ダイナミクスを提案する。つぎに、提案した集団ダイナミクスを受動性に基づき解析する。ここでは、同調バイアスの影響が正のフィードバックとして現れ、合理的な意思決定の受動性を崩すことを示す。以上の結果を踏まえて、同調バイアスを有する集団を望ましい社会状態に誘引する行動変容メカニズムを設計する。さらに、その安定性と同調バイアスによる影響を議論する。

第7章「Conclusion」では、本論文の主要な研究成果をまとめ、本研究の今後の方向性を議論する。

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、東工大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 Tokyo Tech 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	山下 駿野		指導教員 (主) : Academic Supervisor(main)	畑中 健志	
			指導教員 (副) : Academic Supervisor(sub)	藤田 政之	

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

This dissertation investigates analyses and design methods for distributed optimization and population dynamics based on a unified concept of passivity.

We revisit a traditional continuous-time distributed optimization algorithm, termed primal-dual dynamics, and address its fundamental limitation that the cost function needs to be strictly convex. Then, we present a novel control theoretic insight that supplying stable zeros is a key factor to ensure the convergence of the algorithm. From this insight, a passivity-based generalization of the primal-dual dynamics is proposed, and its asymptotic convergence without strict convexity is proved under the existence of stable zeros. In addition, it is revealed that the present optimization dynamics encompass existing augmented Lagrangian-based methods as special cases. The effectiveness of the generalized primal-dual dynamics is validated through simulations of illumination control.

Subsequently, we address passivity-based robustification against communication delays for two types of distributed optimization algorithms, namely alternating direction method of multipliers and consensus optimization. We start with revealing the architectural analogy, from the passivity-based perspective, between these algorithms and traditional networked control systems, bilateral teleoperation and output synchronization. A mechanism termed scattering transformation has been employed to robustify these networked systems against delays. Due to the architectural similarity, the mechanism is shown to be integrated with distributed optimization algorithms and asymptotic optimality is proved even in the presence of communication delays, wherein the strict convexity assumption is also eliminated by the aforementioned generalized algorithm. The robustness of the presented algorithms against delays is demonstrated through simulations.

We finally analyze biased population dynamics and design behavior modification mechanisms. We formulate two types of population dynamics with conformity biases. The models are then analyzed based on so-called  $\delta$ -passivity, where it is revealed that the conformity biases work to break passivity of decision makers. Based on the passivity perspective, we propose mechanisms so as to lead decision makers to a desired population state. Furthermore, we analyze convergence properties of the designed mechanisms while revealing conditions for guaranteeing stable inducements.

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、東工大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 Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).