

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	受動性に基づくロボット制御と分散最適化の構造的類似性に関する研究
Title(English)	On Architectural Analogy between Passivity-based Robot Control and Distributed Optimization
著者(和文)	宮野 竜也
Author(English)	Tatsuya Miyano
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12360号, 授与年月日:2023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,山北 昌毅,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12360号, Conferred date:2023/3/26, 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	宮野 竜也		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	畑中 健志	
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)		

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文は「On Architectural Analogy between Passivity-based Robot Control and Distributed Optimization」と題し、全6章から構成されている。

第1章「Introduction」では、本論文の研究背景、動機および目的について述べている。まず、物理空間で発展してきたロボット制御と仮想空間で発展してきた分散最適化を受動性の視点から並列に解析し、相互に補完し合うことで、ロボット制御と分散最適化の両分野に対して新たな手法を提案することが本論文の主題であることを示している。つぎに、協調搬送問題、代表的な分散最適化手法である交互方向乗数法、および通信遅延下での分散最適化に関する既存研究を紹介し、それらの課題について述べている。最後に、ロボット制御と分散最適化の各分野に対する本論文の貢献を示している。

第2章「Foundations: Convexity, Stability of Dynamical Systems, Passivity and Scattering Transformation」では、本論文で使用する数学的概念と基盤理論を説明している。はじめに、凸関数の定義と諸性質を与えている。つぎに、動的システムの安定性および受動性を定義し、安定性を示すための基盤理論を導入するとともに、安定性解析において受動性が重要な役割を果たすことを示している。さらに、受動性に基づく通信遅延ロバスト化手法である散乱変換を紹介している。

第3章「Primal-dual Dynamics for Collective Unknown Object Transport」では、未知の物体を複数のロボットで搬送する問題を考えている。はじめに、各ロボットはエージェントとして物体に力を加え、物体はそのダイナミクスによりコーディネータの役割を担い、局所的な速度情報を各ロボットにフィードバックするという協調搬送システムならではの構造を明らかにしている。つぎに、本協調搬送システムと分散最適化アルゴリズムの一種である主双対ダイナミクスの構造的類似性を明らかにしている。この構造的類似性の恩恵として、ロボット同士の通信を一切必要としない完全に分散化されたPI (Proportional-Integral)制御器を提案している。また、受動性に基づき、提案アルゴリズムの局所的な収束性を証明している。最後に、数値シミュレーションおよびロボット実験により、提案制御則の有効性を示している。

第4章「Continuous-time ADMM」では、コーディネータとエージェントによって分散的に求解される分散最適化問題を考えている。はじめに、交互方向乗数法に基づき対象問題を再定式化している。つぎに、交互方向乗数法の動的システムとしての性質を明確にするため、連続時間交互方向乗数法を提案している。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ている。さらに、連続時間交互方向乗数法は、不等式制約条件に起因する切り替えを含むハイブリッドシステムであることを示している。そこで、連続時間システムに対して用いられるラ・サールの不変原理に代わり、カラテオドリシステムの不変原理を用いて最適解への収束性を証明している。最後に、把持力最適化問題および複数ロボットによるターゲット割当問題に対して、提案アルゴリズムの有効性を数値シミュレーションにより検証している。

第5章「Passivity-based Robustification against Delays」では、第3章および第4章で扱った最適化問題において、通信遅延が発生する状況を考えている。はじめに、協調搬送システム全体の受動性に着目し、受動性に基づく通信遅延のロバスト化手法である散乱変換を導入することで、新たな分散制御アルゴリズムを提案している。つぎに、通信遅延下における、提案アルゴリズムの最適解への局所的な収束性を証明している。また、連続時間交互方向乗数法と双方向遠隔ロボット制御の構造的類似性を示し、散乱変換に基づく連続時間交互方向乗数法の再設計を提案している。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収束することを証明している。最後に、協調搬送問題および把持力最適化問題に提案手法を適用し、理論結果の妥当性を数値シミュレーションにより確認している。

第6章「Conclusion」では、本論文の研究成果についてまとめ、今後の研究の方向性について議論している。

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).

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース：	システム制御	系
Department of, Graduate major in	システム制御	コース
学生氏名：	宮野 竜也	
Student's Name		

申請学位 (専攻分野)：	博士	(工学)
Academic Degree Requested	Doctor of	
指導教員 (主)：	畑中 健志	
Academic Supervisor(main)		
指導教員 (副)：		
Academic Supervisor(sub)		

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

This dissertation investigates architectural analogies between continuous-time optimization dynamics and robot control based on passivity.

We first reveal a suitable architectural analogy between a continuous-time distributed optimization algorithm, called primal-dual dynamics, and collective object transport systems. Based on their similar network structure, which consists of a central collector and subsystems, and passivity property, we present a completely distributed solution to the force optimization problem of transporting an object by multiple robots that does not depend on any a priori knowledge of the object, does not require any communication between the robots, and consists of implementing one relatively simple set of dynamics with no unknown parameters. We prove that the present optimization dynamics converge locally, and provide both numerical simulations and real robotics experiments that demonstrate the algorithm's performance.

We next propose a continuous-time version of alternating direction method of multipliers (ADMM), which can be regarded as a variant of the primal-dual dynamics. The continuous-time ADMM has an architectural analogy with bilateral teleoperation systems. In addition to convergence speed, problem decomposability, i.e., network structure of a central collector and subsystems, and passivity property inherent in the primal-dual dynamics, the ADMM has another suitable property such that it can solve non-strictly convex problems. The simple primal-dual dynamics cannot solve them. By virtue of the passivity-based perspective, we prove convergence of the continuous-time ADMM. The effectiveness of the continuous-time ADMM is demonstrated through numerical simulations of a grasping force optimization problem and a multi-robot surveillance problem.

Finally, we apply a passivity-based robustification technique, namely scattering transformation, against communication delays for the primal-dual dynamics and continuous-time ADMM. From the perspective of passivity, we prove the convergence of these optimization algorithms with the scattering transformation. The robustness of the present algorithms against delays is

demonstrated through numerical simulations of the collective object transportation problem and the grasping force optimization problem.

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).