



Title	Control and Mechanism Design of Nonlinear Systems Controllable with First-order Lie Brackets
Author(s)	高木, 勇樹
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/95914
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論 文 内 容 の 要 旨

氏 名 (高木 勇樹)

論文題名

Control and Mechanism Design of Nonlinear Systems Controllable with First-order Lie Brackets

(1階のリー括弧積により可制御となる非線形システムの機械構造設計と制御)

論文内容の要旨

This thesis consists of five chapters.

In Chapter 1, I described the focus of this thesis and its motivation. I classified the symmetric affine systems from a viewpoint of the Lie bracket, an operation on vector fields that characterizes the structure of nonlinear controllability. Then I introduced the first-order Lie bracket systems, a class of nonholonomic systems.

Chapter 2 describes the Lie bracket and nonlinear control theory. The first-order systems are defined according to this background theory. This is also the basis of the following two contributions.

Chapter 3 describes the contributions to control theory. This chapter addresses an optimal path planning problem on the three-input six-dimensional Brockett's canonical system. By introducing the input quadratic norm as a Riemannian metric, I showed that the shortest paths connecting two points are parametrized as helix paths. In addition, I presented a quasi-analytical procedure to determine the optimal helix path for any given target point. The characteristic feature of this method is that the optimal paths are parametrized as an explicit function on the state space, which enables the solution paths to be derived without multi-dimensional iterations. The approach is validated by numerical computations in two aspects: matching for arbitrary target points and covering known optimal paths as special cases.

Chapter 4 describes the contributions to mechanism design. This chapter introduces the notion of a *kinematic-dual snake robot*, as contrasted with a *conventional* wheeled snake robot. The well-known snake robot consists of active joints and passive wheels corresponding side-slip constraints. The purpose of this study is to present a string-like mobile mechanism as a solution to the difficulty of manipulating the original snake. The key idea in devising the proposed snake is to reverse the mechanical elements of the original snake and then refine the reversed mechanism by the kinematics so that it is a dual system of the original snake. Thus, the proposed snake consists of passive joints and active omnidirectional wheels plus two ordinary wheels at the ends, associated with side-slip constraints. Here, I introduce the concept of the kinematic-dual snake and explain in what sense it is *kinematic-dual*. Then, through controllability analysis, motion planning, and experiments, I prove that the concept of the kinematic-dual snake is reliable as a mobile mechanism.

The proposed robot can improve its manipulability while maintaining the advantages of the string-like body. This idea is expected to contribute to tasks that require both joint angle manipulation and traveling, such as transportation with wrapping around an object.

Chapter 5 summarizes the contributions of this thesis and their significance.

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (高 木 勇 樹)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	石川 将人
	副 査	教授	東森 充
	副 査	教授	佐藤 訓志
	副 査	准教授	南 裕樹
論文審査の結果の要旨			
<p>本論文は、以下に述べる特定の可制御性構造をもつ非線形システムに対する制御理論に関するものである。非線形システムの可制御性は、システムを記述する入力ベクトル場の Lie bracket とよばれる演算によって判定されるが、本論文ではこのうち、複数の入力間の非可換性が顕著に現れる代表例として、可制御性構造が 1 階の Lie bracket によって特徴づけられるような対称アフィンシステムの制御について論じている。論文は全 5 章からなり、第 1 章と第 2 章では背景と基礎理論、第 3 章と第 4 章で二つの主要結果、第 5 章で結言を述べている。</p> <p>第一の主要結果である第 3 章は、おもに理論面での貢献に関するものである。前述の数学的構造を抽出した、Brockett の正準系とよばれる 3 入力 6 次元のシステムについて、最適経路計画問題を扱っている。入力 2 次ノルムをリーマン計量として導入することにより、2 点を結ぶ最短経路が螺旋経路としてパラメトリゼーションできることを示したうえで、任意の 2 点間を結ぶ最適な螺旋経路を求める準解析の手順を示している。本手法の特徴は、最適経路が状態空間上の陽関数としてパラメトリゼーションできることであり、反復アルゴリズムを要することなく解経路を導出することができる。</p> <p>第二の主要結果である第 4 章では、移動ロボットの機構設計への貢献に関するものである。車輪型のヘビ型移動ロボットは従来よく知られている。これは横滑りしない受動車輪と能動関節をもつ直列多リンク系で構成され、複雑な可制御性をもつ非線形システムとしてモデル化されるものである。本論文では、この制御の困難さに対する解決策のひとつとして、従来の移動機構における力学的要素の役割を反転させることにより、これと「運動学的に双対」となる独創的なヘビ型移動機構を提案している。提案機構は、能動関節を置き換えた受動関節、受動車輪を置き換えた能動全方向車輪に加え、横滑り拘束を追加し可制御性を担保するための二つの通常受動車輪を両端に持つ。本論文では、この着想の理論的説明に続いて、機構の非線形システムとしてのモデル化、非線形可制御性解析およびそれに基づく制御入力的设计、試験機の開発ならびに制御実験を通して、運動学的双対という概念が移動機構として実現可能なものであることを示している。提案機構は、索状体というヘビ型移動ロボットの利点を維持しつつ、関節角（身体形状）を含めた操作性が向上している。したがって、例えばロボットが床上の障害物に巻き付きながら移動するといった、関節角の制御とロコモーションの両方を必要とするタスクに貢献することが期待される。</p> <p>以上のように、本論文は、非線形システムの可制御性構造に関する深い洞察に基づき、最適制御入力の理論的な設計ならびに移動ロボットの機構設計について有用な結果を提示するものであり、博士論文として価値あるものと認める。</p>			