

博士論文要旨

論文題名：ヘビ型ロボットのためのベイズ推定に基づく制御方法

立命館大学大学院理工学研究科
機械システム専攻博士課程後期課程

ジア ユアンユアン
JIA Yuanyuan

ヘビ型ロボットの複雑環境下における制御は、レスキュー、パイプライン点検、医療手術、消防、偵察などの分野で広く応用できる可能性を秘めており、大きな注目を集めている。しかし、超冗長構造、超自由度、オクルージョン、環境の複雑性などの理由により、ヘビ型ロボットのロバストかつ効率的な制御は未だ困難な課題であった。例えば、環境への接近や衝突を伴う場合、従来の決定論的なヘビ型ロボットの制御方法は理想的でない。このような状況では、ロボットモジュール間やロボットと環境との間における相互作用のモデル化、モジュールと観測データとの対応関係の確立、計算量の削減によるリアルタイム制御の実現などが重要となる。

本論文では、これらの問題の解決方法を検討し、具体的に5つの基本的な成果について述べている。1つ目は、集中型ベイズ制御法である。この方法では、形状に基づくコンプライアンス制御を拡張し、複雑環境下でのロバストなヘビ型ロボット制御を実現した。2つ目は、ロボットモジュールと障害物間の相互作用に関する動的デカップリングベイズモデルである。本モデルでは、複雑な全結合相互作用解析を応用せず、困難な共同データの関連付けを避けた。また、刺激関数の観点から相互作用をモデル化することで、ベイジアン制御の枠組みを拡張した。3つ目は、複数のロボットモジュールが周囲の複雑な環境と重要かつ持続的な相互作用を行う際の完全な分散型フレームワークである。モジュール間の尤度とモジュールベースの仮想外力確率密度によって、モジュール間および環境との相互作用をモデル化した。4つ目は、ヘビ型ロボットのための集中型コーチに基づくベイズロボット制御方法である。本手法では、確率密度伝播解析をコントローラ的设计に直接適用せず、強化学習の訓練プロセスの高速化のために応用した。実験結果から、2つの研究領域の結合が有益であることを示した。最後に、この分散ベイズ制御をコーチとして、ヘビ型ロボットの強化学習の訓練プロセスに応用した。集中的なフレームワークと比較して、並列コンピューティングを利用することで、訓練速度をさらに速めることができた。

この5つのバイズ制御器をシミュレーションと実機実験によって検証し、非構造的なシナリオでヘビ型ロボットのリアルタイムロバスト運動を実現した。しかし、これらのシステムは全て効果的に機能する一方で、状況による安定性と効率性には差があった。そこで、アーキテクチャの特徴、複雑性の分析、パフォーマンスの比較などを徹底的に調査し、それぞれの長所と短所を明らかにした。この調査によって、集中型フレームワークは、ロボットのリンク数が限られた小型システムに適している一方、非結合型や分散型構造は、より多くのリンクを持つ複雑なヘビ型ロボットに向いていることが明らかとなった。この2つのコーチベースのアプローチは、他のフレームワークにも応用ができるため、強化学習と確率的バイズ制御を結合する新しい手法となった。

Abstract of Doctoral Dissertation

Title: A Bayes Estimation Based Control Method for Snake Robots

Doctoral Program in Advance Mechanical Engineering and Robotics
Graduate School of Science and Engineering
Ritsumeikan University

ジア ユアンユアン
JIA Yuanyuan

Snake robot control in a cluttered environment has received tremendous attention because of its wide practical applications such as survival rescue, pipeline inspection, medical surgery, firefighting, and surveillance. Because of the complexity associated with a highly redundant structure, many degrees of freedom, occlusions, and environmental clutters, robust and efficient control of snake robots remains a challenging task. To date, conventional deterministic snake robot control does not perform well when obstacles are in close proximity or present collisions. In such circumstances, modeling the interactions among robot modules and the interactions between the robot and the environment, establishing a correspondence between modules and observations, and decreasing the computational complexity to achieve real-time implementation are critical problems.

In this dissertation, we investigate issues towards solving these problems. Specifically, the thesis comprises five fundamental contributions. The first is a centralized Bayesian control method, which extends the shape-based compliant control and achieves the robust performance of snake robot control in a complicated environment. Secondly, a dynamically decoupled Bayesian formulation is proposed for snake robot control with respect to robot modules and interacted obstacles. The characteristics of this formulation are that it avoids the common practice of using complex fully coupled interaction analysis and performing difficult joint data association. It extends the Bayesian control framework by modeling interactions in terms of stimulus functions. The third contribution is a fully distributed framework using multiple collaborative agents for multiple robot modules with significant and persistent interactions with clutter surroundings. In this framework, we propose modeling the interactions among modules and the environment by an inter-module likelihood and a module-based virtual external force density. Fourthly, we have proposed a centralized coach-based Bayesian method for snake robot control. Instead of applying density propagation analysis directly for controller design, we use it to expedite the training process of a reinforcement learning process. Experimental results show that it is a very promising direction in combining the advantages of two research areas for snake robot control. Finally, we apply the distributed Bayesian control as a coach to the training process of reinforcement learning for the snake

robot. Compared with the centralized framework, it further expedites the training speed due to exploiting parallel computing.

The five Bayesian controllers have been demonstrated on both simulation and real-world data to verify the proposed methods. As a result, they can achieve robust real-time locomotion for snake robots in an unstructured environment. While all these systems can function effectively, some are more stable and efficient than others in various situations. To reveal their advantages and disadvantages, thorough investigations in terms of characteristics of architecture, complexity analysis, and performance comparison have been studied. Among these methods, the centralized framework is more suitable for a small system with a limited number of robot links, while decoupled and distributed structures are better for more complicated snake robots with more body links. Meanwhile, the two coach-based approaches stand on the shoulders of other frameworks and provide an innovative way to bridge the reinforcement learning with stochastic Bayesian control together.