

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	時相論理を用いたタスク表現に対するロボットシステムの軌道最適化と制御
Title(English)	Trajectory Optimization and Control of Robot Systems with Temporal Logic Tasks
著者(和文)	徳田俊平
Author(English)	Shumpei Tokuda
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12692号, 授与年月日:2024年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:山北 昌毅,三平 満司,倉林 大輔,田中 正行,畑中 健志
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12692号, Conferred date:2024/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	徳田俊平	
論文審査 審査員		氏名	職名	氏名	職名
	主査	山北昌毅	准教授	畑中健志	准教授
	審査員	三平満司	教授		
		倉林大輔	教授		
田中正行		教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「時相論理を用いたタスク表現に対するロボットシステムの軌道最適化と制御」と題し、全7章よりなっている。

第1章「序論」では、論文の全体としての研究背景と目的について、先行研究との対比を行いながら述べている。具体的には、ロボットの社会における役割は大きくなっており、工業的な現場のみならずサービス業などの現場でも活躍している。ロボットの普及に伴い、非専門家がロボットを操作し現場に導入する機会が増加している。しかし、ロボットに安全性を考慮して望みのタスクを実行するように教示することは難しく、そのことがロボットの導入に対する障害の一つとなっている。特に、ロボットにタスクを教示する際の難しさの理由の一つが、タスクの論理的な整合性とロボットの動的特性を考慮した実現性を同時に考慮する必要がある点であると述べている。その上で、本論文ではタスクを論理的に表現する方法として時相論理を対象とし、本論文の目的が時相論理を用いたタスク表現に対するロボットシステムの軌道最適化と制御の新しい手法を提案し、その有効性を示すことであるとしている。

第2章「事前知識」では、本研究に関する事前知識として、まず時相論理の基礎的な内容について説明している。続いて、時相論理に基づくロボットシステムの制御に関する基礎として、ロボットシステムでの時相論理の表現について説明している。その後、線形時相論理を拡張した信号時相論理について説明している。

第3章「混合整数計画問題による軌道最適化」では、線形時相論理で表現されたタスクに関する軌道最適化を混合整数計画問題として定式化し、ハイブリッドシステムまたは非線形ダイナミクスをもつシステムに適用している。非線形ダイナミクスをもつシステムに適用する際、混合整数凸計画やKoopman作用素を用いた拡大システムを導入することで、混合整数線形計画問題として定式化している。最後に、数値シミュレーションにて、いくつかのロボットシステムに提案手法を適用し、各ロボットシステム上で与えられた時相論理で表されたタスクが達成されることを示している。

第4章「不確かな外的事象に関する命題への軌道最適化」では、発生時刻が不確かな外的事象に関する命題を達成するための軌道最適化手法を提案している。提案手法では、複数の発生時刻を想定して与えられた命題を達成する行動を生成するために、外的事象はロボットの状態に依存せず発生し、発生時刻に関する分布が既知であると仮定し、その分布に基づき与えられた命題を達成するための軌道の最適化を非線形計画問題として定式化している。最後に、不確かな外的事象に関する命題が与えられた移動ロボットに対する数値シミュレーションにて、提案手法の有効性を示している。

第5章「時間制約をもつ信号時相論理に対する制御」では、時間制約をもつ様相作用素を含む信号時相論理を達成するための制御バリア関数を用いた制御手法を提案している。与えられた時相論理命題に対応する時間オートマトンと、3、4章で述べている軌道最適化等の手法によって生成された軌道に対応するオートマトン上でのパスを考え、そのパスに含まれる時間オートマトン上の各ロケーション間の遷移に対応する命題を達成するために、仮想時間を用いた有限時間で状態を目的の集合に遷移させる拡張した制御バリア関数を提案し、それを用いた制御器によってロケーション間の遷移を逐次達成することで与えられた本来の命題が達成されることを示している。最後に、移動ロボットに対する数値シミュレーションにて、提案手法の有効性を示している。

第6章「信号時相論理に対する確率的動作プリミティブの再配合」では、複数のロボットシステムがタスクを行う際に、他のロボットの行動に合わせて自身の行動を変更するための軌道最適化手法を提案している。まず、確率的動作プリミティブを用いてロボットの行動に関する軌道の分布を

表現している．生成された確率的動作プリミティブを用いて，観測情報からシステムの状態が属している確率的動作プリミティブをカルマンフィルタにて推定し，推定された確率的動作プリミティブを基に，自身の動作プリミティブを更新することで，他のシステムの行動を考慮して与えられた命題を達成する軌道を生成する手法を提案している．最後に，移動ロボットに対する数値シミュレーションにて，提案手法の有効性を示している．

第7章「結論」では，本研究で得られた成果の総括と，研究の今後の発展と課題などについて述べている．

以上を要するに，本論文は，時相論理を用いたタスク表現に対するロボットシステムの軌道最適化と制御の新しい手法を提案し，その有効性を数値シミュレーションによって示したもので，工学上・工業上寄与するところ大である．よって本論文は，博士（工学）論文として十分価値あるものと認められる．

注意：「論文審査の要旨及び審査員」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。