

令和 3 年 4 月 15 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04032

研究課題名(和文)劣駆動系のための最適制御多点境界値問題に関する研究

研究課題名(英文)Optimal Control with Multi-boundary Values for Underactuated Systems

研究代表者

早川 義一 (Hayakawa, Yoshikazu)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：60126894

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：劣駆動系の最適制御多点境界値問題とその実時間解法を開発すべく、クアッドローターの運動制御や卓球ロボットの打ち返し制球制御を具体的な例として、その一般化・普遍化を図った。問題の数学的定式化に加え、最適解の反復解法とその実時間処理アルゴリズムの開発を行った。具体例に対する成果として、ローターの配置と運動制約、境界値制約との関係を明確にできたこと、ラケットの打ち返し速度・姿勢と目標点での位置・速度の関係を明らかにできたこと、などを挙げることができる。実験は概ね成功したが、ハードウェアに関する改良が今後の課題となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

福祉・介護や家庭など、人間の普通の生活の中で知能機械が活躍するためには、知能機械が外部環境を実時間で認識できるとともに、絶対時刻の流れの中で、時刻時々刻々変化する外部環境に適合した安全な動作が求められる。この絶対時刻制御は、非線形ダイナミクスに支配される制御対象に対して、複数の目標位置・姿勢・速度をそれぞれ指定された絶対時刻に達成する最適制御多点境界値問題として定式化される。本研究では、申請者が明らかにしてきた全駆動系の最適制御多点境界値問題とその実時間解法を劣駆動系の問題と実時間解法に発展させることを目的としたものである。

研究成果の概要(英文)：This research aims to develop optimal control problems for underactuated systems with multi-point boundary values and their real-time solver algorithms. In order to do that, the motion control of the quadcopter is considered as well as the return ball control of the table tennis robot, then their formulations are generalized to more general control problems. The obtained results are that (a) two kinds of formulations are derived for optimal control problems for underactuated systems with multi-point boundary values have been introduced, (b) as their solvers, real-time processing algorithms have been introduced, (c) some relationship between the rotor arrangement of the quadcopter and its motion constraints have been clarified, (d) in the table tennis robot, it has been clarified how the racket's return speed and posture influence the ball's position and speed at the opponent court. d. The experiments were generally successful, however hardware improvements remained the future issues.

研究分野：制御工学

キーワード：劣駆動系 最適制御多点境界値問題 クアッドロータ 卓球ロボット

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

工場などの生産ラインで用いられているロボットの動作は事象駆動的に制御されている場合が多い。すなわち、一連の動作・作業は事前に定められており、しかも一連の動作・作業の開始時刻は知能機械側が自由に決定できる。つまり、時刻の流れは絶対的なものではなく、相対的なものとして考慮すればよい(相対時間制御と呼ぶ)。

他方、福祉・介護や家庭など、人間の普通の生活の中でロボットが活躍するためには、時々刻々変化する未知の外部環境に適合した動作や作業が求められる。ここでは作業空間の制約のみならず、絶対的な時刻の流れに基づく制約が極めて重要であり、制御対象に対する目標値は

- ・絶対時刻と作業空間の直和空間における“点列”あるいは“連続軌道”
- ・外部環境の変化に伴い、時々刻々変化する時変の“点列”あるいは“連続軌道”

という特徴をもつ(絶対時刻制御と呼ぶ)。加えて、日常の人間社会の中で活動するロボットでは、メンテナンスの容易さや対故障性への配慮から、可能な限り簡潔な機構が要求され、劣駆動系となる場合が多々生じている。

### 2. 研究の目的

本研究では、非線形動特性を有する劣駆動系の知能機械を対象に、絶対時刻制御を最適制御多点境界値問題として定式化し、その実時間解法を考える。

最適制御多点境界値問題は、数学的には、常微分方程式の多点境界値問題である。線形システムの有限時間区間最適制御問題は最適制御 2 点境界値問題と捉えることができ、関数空間の線形写像および随伴写像の性質を利用して、最適解の直接解法が知られている(参考文献(A))。また、非線形境界値問題に関しては、2点境界値問題を中心に、解の存在性や唯一性、数値解法などがよく知られている(参考文献(B), (C), (D))。

本研究の制御対象は非線形動特性を有する劣駆動系である。したがって、全駆動系(アクチュエータ数と運動自由度数が等しい系)で多用される「非線形フィードバックによる線形化」は困難であり、非線形動特性の制御を直接、取り扱う必要がある。しかも、劣駆動系では、一般に、独立に制御できる運動自由度の組合せは複数存在する。このようなことを背景として、本研究の学術的に興味深い課題は

- 1) 絶対時刻制御を最適制御多点境界値問題として定式化した際のアクチュエータ配置と境界値制約との関係
- 2) 多点境界値組合せ時系列と反復解法における計算負荷との関係
- 3) 予測制御(参考文献(E))の手法と融合した最適制御多点境界値問題の実時間解法などである。

### 【参考文献】

- (A) R.W. Brockett : “Finite Dimensional Linear Systems”, John Wiley and Sons, Inc., 1970
- (B) Stephen R. Bernfeld and V. Lakshmikantham : “An Introduction to Nonlinear Boundary Value Problems”, Academic Press, Inc., 1974
- (C) Uri M. Ascer, Robert M.M. Mattheij, and Robert D. Russell : “Numerical Solution of Boundary Value Problems for Ordinary Differential Equations”, SIAM, 1995
- (D) I. Stakgold and M. Holst : “Green’s Functions and Boundary Value Problems”,

Third Edition, Wiley, 2011

(E) L. Grune and J. Pannek : “Nonlinear Model Predictive Control- Theory and Algorithm” , Springer, 2011

### 3 . 研究の方法

本研究では、非線形動特性を有する劣駆動の知能機械を対象に、絶対時刻制御を最適制御多点境界値問題として定式化し、システム制御論的な観点から生じる諸課題を理論と実機検証によって明らかにする。2つの具体的な問題である「クアッドローターの運動制御」と「卓球ラケットの打ち返しによる制球制御」を念頭に置きつつ、以下の研究課題を設定する。

課題(a) : クアッドローター (運動自由度 6、制御入力 (プロペラ推進力) 4) 、空中を飛翔する卓球 (運動自由度 6、制御入力 (ラケットインパクト) 5) 、これらはともに劣駆動系であるが、クアッドローターの運動制御と卓球ラケットの打ち返しによる制球制御では本質的な違いがある。前者は関心のある運動期間中、常に制御入力を印加することができるのに対し、後者での入力印加はボールの打ち返し時の瞬間のみである。これら2種類の軌道制御問題を絶対時刻制御、最適制御多点境界値問題、予測制御との融合問題として定式化し、それら2種類の問題の一般化を試みる。

課題(b) : 2種類の具体的な軌道制御問題に対する効率的な反復実時間解法を開発する。クアッドローターの運動制御では位置と姿勢に関する運動方程式の特徴を、また卓球ラケットの打ち返しによる制球制御では空気抵抗による抗力とスピンによる揚力を考慮した空力モデルの特徴を、それぞれ活かした解法を開発する。これらの実時間解法は課題(a)の一般化に基づき、運動を支配する常微分方程式の特徴を活かした汎用解法に拡張される。

課題(c) : クアッドローターの運動制御では位置 (3変数) と姿勢 (3変数) の計6変数の内、4変数のみが独立に制御可能である。しかも、その4変数の組合せは複数存在する。同様に、卓球ラケットの打ち返しによる制球制御では、ラケット打ち返し直後のボールの速度 (並進とスピン) 6変数の内、5変数のみが制御可能であり、その組み合わせは複数である。途中の通過点を複数もつ軌道制御問題において、独立に制御可能な変数の組合せ時系列と反復解法の計算負荷との関係を検討する。可能であれば、検討結果の普遍化を図る。

課題(d) : モーションキャプチャによるクアッドローターの位置姿勢オンライン計測およびその計測フィードバックを用いたミニドロンのフォーメーション制御などを実施する。また、卓球ロボット、ボール自動打ち出し機、ステレオカメラシステムを用いて、打ち返し実験を行い、ボールの相手コート到達位置・速度 (並進・スピン) の制御を試みる。これらの実機実験によって、上記(a) ~ (c)の有効性と問題点を検証する。

### 4 . 研究成果

研究成果は以下の通りである。

課題(a) : クアッドローターの運動制御と卓球ロボットの制球制御との本質的な違いを明確にしつつ、2種類の劣駆動系に対する最適制御多点境界値問題を予測制御との融合問題として定式化し、その有用性をMATLABによるシミュレーションで確認した。

課題(b) : 課題(a)で得られた2種類の最適制御多点境界問題に対する効率的な反復実時間解法を開発した。クアッドローターの運動制御では位置と姿勢に関する運動方程式の特徴を活かした線形近似の活用を行った。また、卓球ラケットの打ち返しによる制球制御では、空気抵抗による抗力とスピンによる揚力を無視した解析解に基づく逐次最小二乗法を用いた。今後は抗力と揚力を考慮した微分方程式のオンライン近似解法を用いることを考えている。

課題(c)：与えられる境界値の組合せと時系列が最適解反復法の計算負荷に及ぼす影響を理論的に考察した。具体的には以下の通りである。

クアッドローターの運動制御では垂直方向の位置制御、姿勢（3軸周りの姿勢角）制御を独立な制御量として、クワッドローターの各モータの角速度制御を行った。また、卓球ラケットの打ち返しによる制球制御では相手コートの返球目標位置、ネット上の通過高さや制御可能な5変数との関係、そしてラケットの打ち返し速度、姿勢の関係を明らかにした。

課題(d)クアッドローターおよび卓球ロボットによる実機検証を行った。具体的には以下の通りである。

クアッドローターの製作および劣駆動系の最適制御多点境界値問題を実装するプログラミングをC++で行った。クアッドローターの運動を計測するセンサー（加速度計、ジャイロなど）と制御実装にはRaspberryPiとNavio2を用いた。また、クアッドローターの3次元位置と姿勢に認識にはモーションキャプチャを用いるシステムを構築した。ただし、クアッドローターに関してはモーションキャプチャの計測周期が10msecであったことに加え、ミニドローン本体との通信遅れが大きく災いし、ミニドローン4機以上を用いた複雑なフォーメーション制御は達成できなかった。

卓球ロボット、ボール自動打ち出し機、ステレオカメラシステムを用いて、打ち返し実験を行い、ボールの相手コート到達位置・速度（並進・スピン）の制御を試みた。ただし、アームロボットの先端速度が毎秒2m以下というハードウェア上の制約があったため、相手コート到達位置・速度に大きな制約が課されることになってしまった。

実験を通じ、昨年度までに開発してきた反復実時間解法とそれに基づく制御アルゴリズムが有効に機能することを確認できたが、ハードウェアの課題が顕著化した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鈴木克弥、早川義一
2. 発表標題 手本文字を模倣する書道ロボットの実現
3. 学会等名 日本機械学会東海支部2019総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高木良浩、早川義一
2. 発表標題 卓球ロボットの外乱にロバストなリフティング制御
3. 学会等名 日本機械学会東海支部2019総会・講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------