

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05861

研究課題名(和文) ロボット制御のための最適制御多点境界値問題の実時間解法に関する研究

研究課題名(英文) Real-time Method of Solving Optimal Control with Multi-boundary Values for Robots

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：福祉・介護や家庭など、人間の普段の生活の中でロボットが活躍するためには、ロボットが外部環境を実時間で認識できるとともに、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。このようなロボットの制御問題は、非線形ダイナミクスに支配される制御対象に対し、複数の目標位置・姿勢・速度をそれぞれ指定された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、非線形システムの最適制御多点境界値問題の実時間解法を開発し、その解法を垂直多関節型マニピュレータの高機能動作制御に適用して、その有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：In order for robots to be active in the ordinary life of human beings, such as welfare, nursing care and family life, robots must recognize the external environment in real time to do safe operation that is adapted to the changing environment every moment. Such a control problem of the robot is formulated as an optimal control multi-boundary values problem, where it is required to control nonlinear dynamic plants to achieve a plurality of target positions, attitudes, and velocities at specified times, respectively,

In this study, we developed a real-time solution of optimal control multi-boundary values problem of nonlinear system and applied its solution to advanced function motion control of manipulator to confirm its effectiveness.

研究分野：制御工学

キーワード：最適制御 多点境界値問題 ロボット制御

1. 研究開始当初の背景

ロボットの動作に合わせて外部環境を調整できる生産現場でのロボット目標時間軌道(たとえば、手先の位置・姿勢や速度)は、PTP 制御法や CP 制御法に代表されるように、最初に作業空間内の目標点列あるいは目標空間軌道を決定し、その後ロボットの運動に適した目標時間軌道を作成する。その際、必要があれば、外部環境の方をロボットに適するように調整することが行われる。他方、人間の普段の生活の中で時々刻々変化する外部環境に適した動作が求められる本研究のロボットでは、作業空間ととも時刻軸が極めて重要であり、

1) 目標値は、与えられる当初から、“作業空間内の点列と時刻の組”あるいは“作業時空間(作業空間と時刻の直和空間)内の軌道”である。

2) 目標値は、外部環境の変化に伴い、時々刻々変化する。

という特徴を持つ。

このような目標値に関する“時刻と変化”の特徴を陽に意識することになったのは、多指ハンド付き双腕ロボットの高機能作業、介護ロボット RIBA の開発、二足歩行ロボットや卓球ロボットの実現に関する研究を通じてである。そして、1) のような特徴の目標値を実現する制御問題は最適制御多点境界値問題として定式化できることに思い至った。

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り、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(A),(B),(C))。本研究では、ロボットマニピュレータを対象とした最適制御多点境界値問題の実時間解法の開発を目的としており、常微分方程式のクラスが限られていること、境界条件の与えられ方をグループ化することなどから、従来法に比べ、より高効率、高精度な解法の開発を狙った。また、開発した解法に予測制御の手法を融合し、目標値の 2) の特徴に対応することを考えた。

【参考文献】

(A) Stephen R. Bernfeld and V. Lakshmikantham; An Introduction to Nonlinear Boundary Value Problems, 1974, Academic Press, Inc.

(B) Uri M. Ascher, Robert M.M. Mattheij, and Robert D. Russell; Numerical Solution of Boundary Value Problems for Ordinary Differential Equations, 1995, SIAM

(C) I. Stakgold and M. Holst; Green's Functions and Boundary Value Problems, Third Edition, 2011, Wiley

2. 研究の目的

福祉・介護や家庭など、人間の普段の生活の中でロボットが活躍するためには、ロボットが外部環境を実時間で認識できるとともに、時々刻々変化する外部環境に適した安全な動作が求められる。このようなロボットの制御問題は、非線形ダイナミクスに支配される制御対象に対し、複数の目標位置・姿勢・速度をそれぞれ指定された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、線形システムで知られている最適制御 2 点境界値問題の解法を非線形システムの最適制御多点境界値問題の解法に発展させ、ロボットの非線形ダイナミクスの性質を活かした高効率な反復解法を提案する。また、得られる最適解が時々刻々変化する外部環境に適するように、予測制御の手法と融合させた最適解の実時間解法も開発する。

3. 研究の方法

本研究で想定しているロボットはサーボモータで駆動される多リンク機構であり、その運動方程式は各関節角度を変数とする 2 階の非線形常微分連立方程式である。よく知られているように、モータ軸とリンク軸とのギヤ比が小さく、要求される時間軌道が高速の場合には、重力項以外の非線形特性(姿勢による慣性行列の変化、コリオリ・遠心力など)を陽に考慮した制御法が必要である。本研究の目的を達成するために、具体的な課題として以下のものを設定する。

課題(a): 線形システムに対する最適制御多点境界値問題の実時間解法

制御対象を 2 階の線形常微分方程式で表現されるものと仮定し、最適制御 2 点境界値問題の従来成果を最適制御多点境界値問題に拡張する。非線形常微分方程式の 2 点境界値問題の数値解法として知られている初期値法や差分法(参考文献(B))のような反復法のみではなく、線形性と随伴写像の特性をうまく用いた直接法も考察する。また、解の存在性・唯一性と制御対象の可制御性・最適評価関数との関係に関する理論的考察も行う。

課題(b): 最適制御多点境界値問題と予測制御の融合

課題(a)で得られた実時間解法を予測制御の手法と融合させ、時々刻々変化する目標値への対応を考える。この場合、予測制御の利点をさらに活かす目的で、状態変数(関節角度と関節各速度)と制御入力に関する線形不等式制約のある最適制御多点境界値問題への拡張も考える。

課題(c): 非線形ロボットに対する最適制御多点境界値問題の実時間解法と予測制御との融合

課題(a),(b)で得られた成果を、2 階の非線形常微分方程式で記述される非線形ロボットに適応すべく、拡張を図る。具体的には、最適制御多点境界値問題の実時間解法とし

ては反復法を用いることになるが、非線形ロボットの動特性を活かした反復法の提案、線形化の手法と課題(a),(b)で得られた知見の活用などを考えている。また、解の存在性・唯一性と制御対象の可制御性・最適評価関数との関係も理論的に考察したい。

課題(d)：実ロボット制御への適用と評価

得られた研究成果を多指ハンド付き双腕アームロボットや卓球ロボット、介護用ロボットに適用し、その有効性と問題点を確認する。本研究の特色および独創性は以下の通りである。

- 1) 時々刻々変化する外部環境に適合した動作が求められるロボットでは、作業空間ととも時刻軸が極めて重要であり、目標値の捉え方と制御問題としての定式化(最適制御多点境界値問題)は独創的であり、予測制御の手法との融合で新規な成果が期待できる。
- 2) 解の存在性・唯一性といった理論的な考察に加え、実時間解法に重点をおいた研究であり、一般的な数値解法に留まることなく、ロボットが従う運動方程式の特性や境界条件のグループ化などによって、より高い効率の数値解法を提案し、制御法の実用化を目指している点が特徴である。

また、予想される結果と意義は以下の通りである。

- 3) 本研究は、時々刻々変化する外部環境に適合して動作するロボット制御の課題に、新規な枠組みと視点から挑戦するものであり、従来のロボット制御法とは異なった学術的にも新しい制御法が確立されることを期待する。
- 4) 本研究で得られる制御法は家庭内ロボット、介護ロボット、宇宙ロボットなどに限らず、広範な機械の知能化に繋がると確信している。

4. 研究成果

研究の方法に記載した4つの課題を3年間で実施した。具体的には、平成27年度は課題(a),(b)を、平成28年度は課題(c),(d)を、平成29年度は全体の成果評価と改良を行った。研究成果を課題ごとにまとめると以下のようになる。

課題(a)：

始時刻と終時刻の状態変数拘束を持つ有限時間区間の2次形式評価関数最適制御問題の最適解が、直接解法として、関数空間の線形写像および随伴写像を用いて、容易に得られることを利用し、2階の線形状微分方程式で表現された制御対象に対する最適制御多点境界値問題の直接解法を導出し、最適解の存在性・唯一性と制御対象のシステム論的性質、評価関数、状態変数の拘束条件などとの関係を理論的に明らかにした。また、直接解法と反復解法の長所と短所も考察した。

課題(b)：

始時刻、終時刻や中間時刻が時々刻々変化する最適制御多点境界値問題を解決すべく、課題(a)の解と予測制御の融合を検討した。その際、予測制御の利点を活かす目的で、状態変数と入力変数に関する線形不等式制約のある最適制御多点境界値問題への拡張も検討し、卓球ロボットを題材として、数値シミュレーションによって、その有効性を確認した。

課題(c)：

非線形ロボット(6自由度あるいは7自由度の垂直多関節型マニピュレータ)に対しての最適制御多点境界値問題の実時間解法の開発と予測制御との融合を試みた。課題(a)で得られた知見に基づき、開発した実時間解法は、非線形ロボットの動特性モデルを現時刻の時空間近傍で線形化、逐次二次計画法を利用した、反復解法となっている。また、非線形システムに対する最適制御多点境界値問題の解のシステム論的性質として、解の存在性・唯一性、与えられた多点境界値と最適制御評価関数との関係も考察した。

課題(d)：

多指ハンド付き双腕アームロボット(6自由度垂直多関節型マニピュレータ×2、3本指ハンド×2、各指は3自由度)による折り紙(山折り)の実現、卓球ロボット(7自由度垂直多関節型マニピュレータ)によるラリーやサーブの実現を試み、目標の動作実現に成功した。前者では手首に装着した6軸力センサ、各指先端に装着した6軸力センサから得られる力・モーメントの情報を、後者では視覚センサ(ステレオカメラ、150fps)によるボール位置情報など、各種のセンサ情報をフィードバック制御に利用した。

これらの研究成果によって当初の研究目的はおおむね達成された。しかし、本研究によって、最適制御多点境界値問題の実時間解法における本質的な課題は、制御対象の非線形性より、むしろ制御対象の劣駆動性に顕著に現れることが判明した。これは今後の課題とした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

Y. Hayakawa, A. Nakashima, S. Itho, and Y. Nakai; Ball Trajectory Planning in Serving Task for Table Tennis Robot, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.9, 2016, 60-69.

[学会発表](計 7 件)

磯村優樹, 早川義一, 浅井徹, 有泉亮; スピンしながら飛翔する卓球ボールの空力モデルについて, 第59回自動制御連合講演会, 北九州, 2016, 621-624.

大和田水紀, 早川義一, 浅井徹, 有泉亮, 中島明; 実時間解法による卓球ロボットのサーブ動作計画, 第 59 回自動制御連合講演会, 神戸, 2016, 625-630.

A. Nakashima, Y. Iwanaga, and Y. Hayakawa; A Motion Planning of Dual Arm-Hand Manipulators for Origami-Folding on a Probabilistic Model of Constraint Transitions with Human Behavior, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Qingdao(China), 2016, 562-569.

岩永圭弘, 早川義一, 浅井徹; 双腕多指ハンドロボットによる折り紙のための軌道計画-人間の動作解析からのアプローチ, 第 58 回自動制御連合講演会, 神戸, 2015, 2J1-5(6 ページ).

大和田水紀, 早川義一, 浅井徹, 中島明; 卓球ロボットによるサーブ動作 - オンライン解法によるボールの軌道計画, 第 58 回自動制御連合講演会, 神戸, 2015, 2J1-6(6 ページ).

Y. Hayakawa, S. Itho, Y. Nakai, and A. Nakashima; Ball 's Trajectory Planning in Serving Task for Table Tennis Robot, SICE Annual Conference, Hangzhou(China), 2015, 1803-1808.

A. Nakashima, Y. Ooka, and Y. Hayakawa; Contact Transition Modeling on Planar Manipulation System with LuGre Friction Model, The 10th International Workshop on Robot Motion and Control, Poznan(Poland), 2015, 300-307.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:

番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

()