

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 23 日現在

機関番号：37111

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760191

研究課題名(和文) 柔軟マルチボディシステムの汎用的な最適制御計算法の開発とそのソフトウェアへの展開

研究課題名(英文) Development of General Purpose Algorithm and Software for Optimal Control of Flexible Multibody Systems

研究代表者

岩村 誠人 (IWAMURA, Makoto)

福岡大学・工学部・教授

研究者番号：90341411

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,000,000円、(間接経費) 300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、柔軟マニピュレータや柔軟宇宙構造物のように機構中に弾性体を含む複雑な機械システム(柔軟マルチボディシステム)に統一的に適用することができる最適制御計算法(最適軌道計画アルゴリズム)を開発した。提案計算法は、新たに開発したリカーシブ動力学計算法と感度解析法、および先に提案していた階層勾配法というロバストな最適制御計算法とを組み合わせることによって構築されている。柔軟マニピュレータの数値シミュレーションおよび実機実験を通して提案計算法の妥当性や有用性を確認した。さらに、提案計算法に基づくソフトウェアの開発も行った。

研究成果の概要(英文)：In this investigation, a general purpose optimal control algorithm (optimal trajectory planning algorithm) for flexible multibody systems that consist of interconnected elastic bodies, such as flexible link manipulators and flexible space structures, is developed. The proposed algorithm is built by combining the newly developed recursive dynamics algorithms, sensitivity analysis algorithm, and previously developed robust optimal control algorithm called a hierarchical gradient method. The proposed algorithm is verified through both numerical simulation and experiment of a flexible link manipulator. Furthermore, general purpose software is developed based on the proposed optimal control algorithm.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械力学・制御

キーワード：マルチボディダイナミクス 弾性体 最適制御 リカーシブ法

1. 研究開始当初の背景

機械システムの最適制御問題、すなわち指定された初期状態と目標状態を結びあせる評価関数を最小にする軌道(あるいは対応する制御入力)を見出す問題は、特にロボット工学や宇宙工学の分野では古くから重要な問題として認識され活発に研究が行われてきた。しかし、従来の研究では、マニピュレータや宇宙ロボット、二足歩行ロボットなどの個々のマルチボディシステムについて検討しているものが多く、それらに共通に適用できる汎用的な最適制御計算法は確立されていなかった。そのため、問題ごとに運動方程式や最適化に必要な感度関数を筆算や数式処理によって求める必要があり、多大な労力が必要であるのみならず、自由度が増加すると計算不可能となることも多かった。そこで、研究代表者は先の研究において、まず対象を剛体マルチボディシステムに限定し、ロボットのリカーシブ順・逆動力学計算法を利用して、自由度や関節配置によらず任意の構造の剛体マルチボディシステムに統一的に適用することができる最適制御計算法を提案した。そして、様々な機械システムに適用して、その有効性や利便性を示すとともに、いくつかのシステムにおいて従来よりも大幅にその性能を向上させられる場合があることを具体的に示してきた。

しかし、近年タスクの高速化およびエネルギー消費量の削減を図るために機構部材の軽量化の要求が高まっており、剛性低下による弾性変形が無視できない柔軟ボディがシステム内に含まれる場合も多くなってきた。そのため、剛体マルチボディシステムのみならず、図1に示すような機構中に弾性体を含む柔軟マルチボディシステムにも適用できるように提案計算法を拡張する必要性を感じた。また、研究成果を機械システムの高性能化に容易に利用できるようにするために、提案計算法に基づく汎用ソフトウェアを開発したいと考えた。

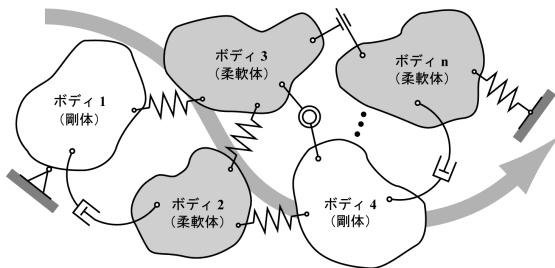


図1. 柔軟マルチボディシステム

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者が先に提案していた剛体マルチボディシステムの最適制御計算法を拡張し、任意の柔軟マルチボディシステムに適用できる汎用的な最適制御計算法を確立することを目的とする。また、提案計算法に基づくソフトウェアの開発を目指す。

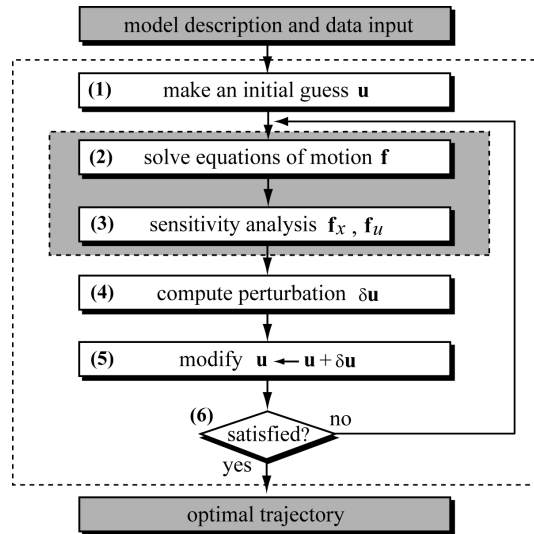


図2. 提案計算法の全体構成

3. 研究の方法

提案する最適制御計算法の全体構成、計算の流れは概略以下のようなになる(図2参照)。(1)制御入力 u を仮定する。(2)状態方程式 $\dot{x} = f(x, u)$ を解いて動力学シミュレーションを行い、軌道 x を求める。(3)得られた軌道に沿って感度解析を行う。(4)評価関数を減少させる制御入力の修正量 δu を計算する。(5)制御入力を $u \leftarrow u + \delta u$ のように修正する。(6)収束判定条件が満たされるまで(2)に戻る。

すなわち、提案計算法は、動力学シミュレーションと感度解析を繰り返して最初に仮定した制御入力を少しずつ改善していき、その収束を持って解とするものである。(1)~(6)のすべてのステップを一般的に記述することにより、機構パラメータ等を入力するだけで任意の柔軟マルチボディシステムの最適軌道を計算し、出力できるようにする。そのような計算法を実現するためには、シミュレーションのための汎用的かつ高速な動力学計算法、および厳密かつ計算効率の良い感度解析法が必要である。そこで、まずそれらの要素技術の開発を行った。そして、研究代表者が先に提案していた階層勾配法を利用して全体のアルゴリズムを定式化した。提案計算法を柔軟マニピュレータに適用してその妥当性や有用性を検証した。さらに提案計算法に基づくソフトウェアの開発も試みた。

4. 研究成果

(1)柔軟マルチボディシステムの汎用的かつ高速な動力学計算法の開発

最適制御問題を解くためには、まず状態方程式を初期値から数値積分し、動力学シミュレーションを行わなければならない。繰り返し動力学シミュレーションを実行するため計算効率の良い動力学計算法が必要である。大規模自由度系の動力学計算法理論の研究

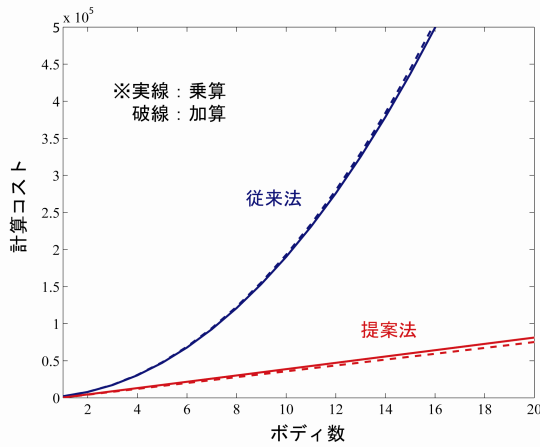


図3．従来法と提案法の計算量の比較

には二つの大きな流れがある．マルチボディダイナミクスの分野では，機構解析ソフトウェアの開発を目的として，高速性よりも汎用性を重視した動力学計算法の研究が行われている．この分野では運動を記述する座標として絶対座標が用いられ，運動方程式は微分代数方程式で記述される．一方，ロボティクスの分野では，実時間制御等への応用を目的として，汎用性よりも高速性を重視した動力学計算法が開発されている．この分野では運動を記述する座標として相対座標が採用され，運動方程式は漸化形式の常微分方程式で記述される．本研究では，両分野の手法を融合し，各々の長所である汎用性と高速性を併せ持つ柔軟マルチボディシステムの動力学計算法を構築することを目指した．

まずマルチボディダイナミクスの分野で提案されている柔軟ボディの高い記述能力を有するフローティングフレーム法に着目した．通常のフローティングフレーム法は，絶対座標系によって記述されるが，計算高速化の準備としてそれをすべて相対座標系に記述しなおした．その後，ロボティクスの流儀に従ってボディ間の運動学関係式や運動方程式を漸化形式で表現し，さらにそれらを組み合わせることによって計算効率のよいリカーシブ動力学計算法を定式化した．提案計算法ではフローティングフレーム法の高い汎用性を保ちながら，図3に示すように従来法（標準的なフローティングフレーム法）よりも大幅に計算量を低減することに成功した．

(2) 柔軟マルチボディシステムの厳密かつ効率的な感度解析法の開発

最適制御計算を行うためには，動力学シミュレーションを行った後，得られた軌道に沿って感度解析を行う必要がある．すなわち，状態方程式 $\dot{x} = f(x, u)$ の状態 x に関する偏導関数 $\partial f / \partial x$ を計算しなければならない．従来この感度関数の計算には数値微分が用いられることが多かった．すなわち， x の全要素に順次微小な変動を与えて，各々の場合について再度シミュレーションを行い， $\partial f / \partial x$

を近似的に計算する手法である．しかし，この方法は自由度が増加するにつれて計算量が膨大になり，また微小変動の大きさをどの程度に選べば妥当な近似となるかが事前に不明であることが多く，一般に誤差の制御が難しいという問題があった．

そこで，本研究では(1)で開発したリカーシブ動力学計算法を利用して感度関数を厳密かつ効率的に求めることが可能な計算法を新たに開発した．まず，運動学関係式および運動方程式をすべて x について偏微分し，新たな漸化式を導出した．そして，それを解くことによって駆動力 τ の状態 x に関する感度関数 $\partial \tau / \partial x$ を計算できるようにした．次に $\partial \tau / \partial x$ と一般化加速度 \dot{q} の感度関数 $\partial \dot{q} / \partial x$ との関係を見出し，さらに $\partial \dot{q} / \partial x$ から $\partial f / \partial x$ を計算するための手法を考案した．以上の計算法によれば自由度が増加しても全く同一の手順によって感度関数を厳密かつ効率的に計算することが可能である．

(3) 柔軟マルチボディシステムの汎用的な最適制御計算法の定式化

(1)の動力学計算法，(2)の感度解析法，および研究代表者が先に開発していた階層勾配法という最適制御計算法（ δu の計算法）を組み合わせることで全体のアルゴリズムを定式化した．階層勾配法は，非線形性の強いシステムの拘束条件付き最適制御問題を数値的に安定して解けるように工夫をした特殊な勾配法である．最終的に構築したアルゴリズムによれば，機構パラメータ，評価関数，および境界条件を入力するだけで任意の柔軟マルチボディシステムの最適制御計算を実行することが可能である．

(4) 提案計算法の妥当性の検証

すでに保有していた2自由度柔軟マニピュレータ（図4）を利用した実機実験，および数値計算ソフトウェアによるシミュレーション（図5）によって提案計算法の妥当性や有用性を確認した．例として，残留振動抑制制御問題に適用した結果を示す．図6は最適化前の各リンク先端の横方向変形量を示しており，大きな残留振動が生じている．一方，図7は終端時刻（1s）において残留エネルギーが最小になるように提案計算法を適用して最適化した結果であり，残留振動が大幅に低減されていることが確認できる．

(5) 提案計算法に基づくソフトウェアの開発

提案計算法を容易に利用できるようにするために汎用ソフトウェアの開発を行った．しかし，現状ではボディが直列に結合された開ループ系に対するコーディングとなっている．そこで，今後は木構造系や閉ループ系に対しても適用できるように拡張し，実際に柔軟要素を含む様々な機械システムの高性能化に役立てられるソフトウェアに発展させていく必要がある．



図4 .柔軟マニピュレータ(実験装置)

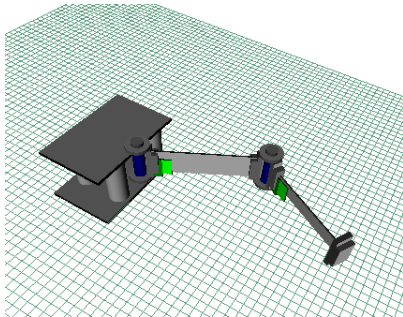


図5 .柔軟マニピュレータ(解析モデル)

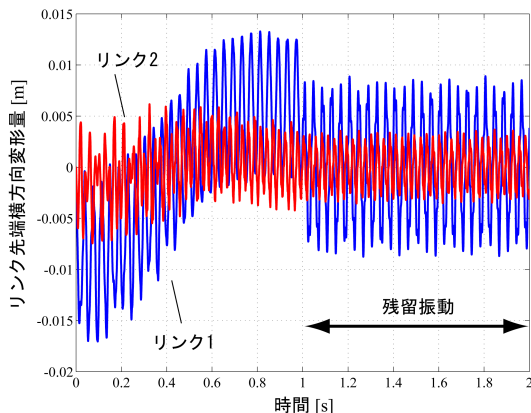


図6 .残留振動(最適化前)

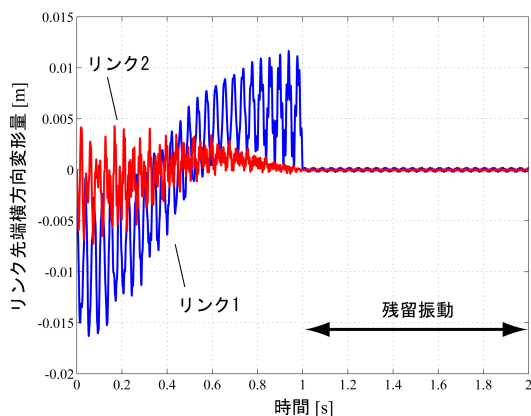


図7 .残留振動(最適化後)

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)

[学会発表](計7件)

Iwamura, M., Uchikawa, S. and Hanada, N.: "A General Purpose Trajectory Planning Algorithm for Planar Flexible Multibody Systems", Proceedings of the 3rd International Conference on Multibody System Dynamics/7th Asian Conference on Multibody Dynamics, 韓国・釜山, 2014年7月発表予定.

花田成輝, 内川真吾, 岩村誠人: "リカーシブ動力学計算法を利用した柔軟マルチボディシステムの最適軌道計画アルゴリズム", 日本機械学会九州支部第67期総会講演会, 福岡, 2014年3月13日発表.

Iwamura, M.: "An Optimal Trajectory Planning Method for Flexible Multibody Systems Based on Recursive Algorithms", India-Japan Mini-symposium on Multibody Dynamics 2013, 福岡, 2013年11月16日発表.

内川真吾, 岩村誠人: "柔軟マルチボディシステムの汎用的な最適軌道計画アルゴリズム(平面開ループ系の場合)", 日本機械学会機械力学・計測制御部門 Dynamics & Design Conference 2013, 福岡, 2013年8月26日発表.

内川真吾, 佐藤耕太郎, 岩村誠人: "柔軟マニピュレータの $O(N)$ 順動力学計算法", 日本機械学会九州支部第66期総会講演会, 福岡, 2013年3月13日発表.

岩村誠人, 杉山博之, 佐藤耕太郎, 上田貴博: "柔軟マニピュレータのリカーシブ動力学計算法", 日本機械学会機械力学・計測制御部門 Dynamics & Design Conference 2012, 福岡, 2012年9月20日発表.

Iwamura, M., Sugiyama, H. and Sato, K.: "Recursive Inverse and Forward Dynamics Algorithms for Flexible Manipulators", Proceedings of the 6th Asian Conference on Multibody Dynamics, 中国・上海, 2012年8月29日発表.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

岩村 誠人 (IWAMURA, Makoto)

福岡大学・工学部・教授

研究者番号: 9 0 3 4 1 4 1 1

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし