

平成21年 4月30日現在

研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18560429
 研究課題名(和文) 新しい数値最適化手法による最適制御と応用に関する研究
 研究課題名(英文) Studies of recent numerical optimization methods for optimal control problems and their applications

研究代表者
 田地 宏一 (TAJI KOUICHI)
 名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：00252833

研究成果の概要：

本研究では、主に20世紀最後の10年に開発された新しい数値最適化手法を用いて、最適制御問題の高速な数値解法の開発を行った。とくに、従来、化学プラントなどのサンプリング時間の長い制御対象に用いられていたモデル予測制御を、自動車やロボットなどへ応用することを目的とした高速化を取り扱った。微分不可能な関数に拡張したセミスムーズニュートン法や二段階法を用いた高速な計算手法、および、非線形相補システムに対する制御アルゴリズムを開発した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	600,000	0	600,000
2007年度	500,000	150,000	650,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
総計	1,600,000	300,000	1,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：システム理論，非線形最適化，モデル予測制御，相補システム，セミスムーズニュートン法，特異摂動システム，ロボティクス

1. 研究開始当初の背景

制御理論における数値最適化の重要性が再び高まっていた。これは、モデル予測制御などの、最適化手法を利用した新しい制御手法が広まってきたことに加え、コンピュータの高速化と低価格化、さらに、使いやすい最適化ソフトウェアが増えてきたことなどにより、従来は専門的知識が必要と思われていた最適化手法が比較的身近になってきたこと、また、生産システムや構造物の設計など

の実際の場合で、最適化手法の利用とその有効性が認められてきたことなどによる。そのなかで、数値最適化を用いたハイブリッドシステムのモデル予測制御や、理論的な解析は特に重要な課題の一つである。

ハイブリッドシステムとは、連続システムに離散事象が組み込まれたダイナミカルシステムであり、状態方程式の切り替えが起こるようなシステムを表現することができる。ギアの切り替えを伴う自動車、衝突を伴うバネ・マス・ダンパ系、クーロン摩擦を伴うロ

ロボットアームによる物体の把持など、身の回りで見られる多くのシステムがハイブリッドシステムの例である。

ハイブリッドシステムを表現する数学モデルとしては、混合論理ダイナミカルシステム (Mixed Logical Dynamical system, MLD)、区分的アフィンシステム (Piecewise Affine system, PWA)、相補システム (Complementarity System, CS) などがあるが、いずれに対しても効率的な数値解法は提案されていなかった。一方、数理計画法の分野においては、1990年代以降、相補性問題を中心として均衡問題、および、半正定値計画問題や二次錐計画問題に対する研究が盛んに行われており、効率的な数値最適化アルゴリズムが多く開発されていた。これらに基づいて、モデル予測制御問題、とくにハイブリッドシステムに対するモデル予測制御の高速な数値解法の開発に取り組んだ。

以上が本研究の当初の背景である。

2. 研究の目的

本研究では上記の背景に基づいて、数値最適化手法に基づいた相補システムの解析や、モデル予測制御のアルゴリズムの開発を目的とした。まず、一般化ニュートン法や、二次錐計画問題といった、新しい数値最適化手法を用いたモデル予測制御の高速な数値解法を開発し、これらの新しい数値最適化手法の有効性を明らかにする。次に、そこで得られた結果に基づいてハイブリッドシステムのモデル予測制御問題に対するアルゴリズムの開発や解析を通して、数値最適化手法のさらなる有効性を明らかにすること、およびロボティクスへの応用を通してそれらの実用性を明らかにすることが目的である。

3. 研究の方法

アルゴリズムを提案し、その収束性や収束率などの理論的な性質を明らかにする。つぎに、提案したアルゴリズムを計算機上でシミュレーション問題に対し数値実験を行い、アルゴリズムが理論通り働いているか、また、計算時間の評価を行う。そこで得られた結果に基づいて、ロボットアームなどの実機への実験を行い、提案したアルゴリズムの実用性を検証する。

4. 研究成果

(1) 剛体との接触を伴うロボットアームによる対象物の位置制御問題において、接触点での接触モード (滑り・転がり接触) とその切り替わりを考慮した、ハイブリッドシステムのモデル予測制御問題を取り扱った。この

問題は、そのままでは非線形相補条件を制約条件とする、非常に難しい非線形の均衡制約付き最適化問題となる。しかし、各時点での接触モードを固定すれば、制御入力を求める問題は二次計画問題であり、接触力と相対加速度および接触モードを求める問題は線形相補性問題であるということを利用し、まず適当な制御入力を与え、求める制御入力が収束するまで線形相補性問題と二次計画問題を交互に繰り返し解くという方法を提案した。さらに、それぞれの解法としてセミスミーズニュートン法を用い、部分問題の数値解法の高速化を行った。提案手法は、剛体との接触モードの切り替えを有する、このような問題に対する数値解法としては世界で初めての試みである。アルゴリズムの理論的な収束性は今後の課題であるが、シミュレーション実験の結果、非常に短い時間で制御入力を求めることができた。

(2) 特異摂動系に対するモデル予測制御問題を取り扱った。特異摂動系は速いダイナミクスと遅いダイナミクスを併せ持つシステムであり、ロボットアームのように、電動モータと機械系を融合したシステムなど、実社会において非常に多くみられるシステムである。このようなシステムに対しモデル予測制御を行う場合、最適制御問題の評価区間は遅いダイナミクスにあわせ長く、またステップサイズは速いダイナミクスにあわせ短くしなければならず、最適制御問題の次元が非常に大きくなる。本研究では、特異摂動法の考え方を適用し、二段階法に基づくモデル予測制御の解法を提案した。提案した手法の収束性と誤差評価は今後の課題であるが、シミュレーションにより高速に精度良く制御入力を決定できることを示した。これも、世界初の試みであり、モデル予測制御の応用を広げる意味でインパクトがある。

(3) モデル予測制御問題に対する解法を実システムに応用するための準備として、パラメータ励振を用いた膝関節駆動二足歩行ロボットの歩容生成を行った。まず単純なパラメータ探索を用いて、平均歩行速度やエネルギー効率などの歩容の準最適化を行った。さらに、これらを通常歩行と鳥脚歩行に対し適用し、またそれらの比較を行うことにより、鳥脚歩行の方が通常歩行よりも歩行速度、エネルギー効率の点で優れていることをシミュレーション実験により明らかにした。さらに、組み合わせ最適化問題でよく用いられている局所探索法の手法に基づいた参照軌道を最適化する手法を開発し、これを膝関節駆動二足歩行ロボットの歩容生成に適用した。その結果、歩行速度を最大化する歩容、最大入力トルクを最小化する歩容など、さまざま

な評価基準に対する最適な歩容生成に成功し、理論的にも興味深い結果を得た。ここで取り扱っているシステムは、3自由度に対し一つの制御入力しか持たない劣駆動システムである。制御入力がシステムの自由度より一つ少ないシステムに対する最適化手法は従来提案されているが、本システムのように入力の次元が2つ少ないシステムに対する参照軌道を改善するような最適制御の手法はこれまで提案されておらず、実システムへの応用を考える上でインパクトは大きい。

(4) その他、関連する研究として、ロボットの運動の解析や制御などにも用いられる準変分不等式に対するメリット関数を提案した。変分不等式や相補性問題に対するメリット関数はさまざま提案されているが、準変分不等式に対するものはほとんど無く、工学のみならず、経済学や社会学でのゲームや均衡問題での応用が期待される。また、ロボスタ制御手法の一つであるスライディングモードについて、フィードバック補償を用いて偏差を少なくする改良案を提案し、シミュレーションでその有効性を検証した。さらに、ハイブリッドシステムのモデル化や、ロボットの運動の解析や制御などにも用いられる変分不等式に対するニュートン法のアルゴリズムの改良を行った。具体的には、直線探索の簡略化と凸多面体制約の制限の解除、および不等式制約を持つ問題に対する超一次収束するアルゴリズムの開発である。

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8件)

1. 原田祐志, 浅野文彦, 田地宏一, 宇野洋二, パラメータ励振に基づく鳥足歩容生成, 日本ロボット学会誌, 査読有, Vol. 27 (2009) Vol. 27, No. 5 (2009) pp. 575-582

2. Y. Harata, F. Asano, K. Taji, Biped Gait Generation based on Parametric Excitation by Knee-joint Actuation, *Robotica*, 査読有 (2009) 印刷中 (Published Online by Cambridge University Press 17 Mar 2009)

3. 田地宏一, 不等式制約を持つ変分不等式に対するニュートン法について, 最適化: モデリングとアルゴリズム 22 (統計数理研究所共同研究レポート), 査読無, Vol. 229 (2009), pp. 84-96

4. K. Taji, A Note on Globally Convergent Newton Method for Strongly Monotone Variational Inequalities, *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 査読有, Vol. 51 (2008) pp. 310-316

5. K. Taji, On Gap Functions for Quasi-Variational Inequalities, *Abstract and Applied Analysis*, 査読有, Volume 2008 (2008) Article ID 531361 <http://www.hindawi.com/journals/aaa/>

6. 木村元宣, 田地宏一, 細江繁幸, 特異摂動系に対するモデル予測制御, 数値最適化の理論と実際 (数理解析研究所講究録), 査読無, Vol. 1584 (2008) pp. 48-58

7. 田地宏一, モデル予測制御問題に対するいくつかの試み, 第19回 RAMP シンポジウム論文集, 査読無, (2007) pp. 177-191

8. 田地宏一, クーロン摩擦を伴うロボットアームの相補条件を用いた解析と制御, 最適化: モデリングとアルゴリズム 20 (統計数理研究所共同研究レポート), 査読無, Vol. 203 (2007) pp. 105-119

[学会発表] (計8件)

1. 伴智行, 原田祐志, 田地宏一, パラメータ励振に基づく二重振子の運動解析と歩行への応用, 第9回 SICE システムインテグレーション部門講演会 (SI2008), 2008年12月5日, 長良川国際会議場, 岐阜

2. Y. Harata, F. Asano, K. Taji, Parametric Excitation Based Gait Generation for Ornithoid Walking, 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, September 25, 2008, Nice, France

3. 尾関洋祐, 田地宏一, スライディングモード制御のロボスタ性向上と車両制御への適用, 第50回自動制御連合講演会, 2007年11月25日, 慶應義塾大学, 横浜市

4. Y. Harata, F. Asano, K. Taji, Biped Gait Generation based on Parametric Excitation by Knee-joint Actuation, 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent

Robotics and Systems, October 31, 2007,
San Diego CA, U.S.A.

5. 木村元宣, 田地宏一, 細江繁幸, 特異摂動系に対するモデル予測制御, 研究集会「数値最適化の理論と実際」(京都大学数理解析研究所), 2007年7月18日, 京都大学, 京都市

6. 原田祐志, 羅志偉, 浅野文彦, 田地宏一, 宇野洋二, 仮想拘束を用いた二足歩行ロボットの動的制御, 第49回自動制御連合講演会, 2006年11月26日, 神戸大学, 神戸市

7. 木村元宣, 細江繁幸, 田地宏一, 特異摂動系に対するリレーディングホライズン制御, 第49回自動制御連合講演会, 2006年11月25日, 神戸大学, 神戸市

8. 田地宏一, 三井俊明, クーロン摩擦を伴うロボットアームの相補条件を用いた解析と制御, SICE第6回制御部門大会, 2006年6月2日, ウィルあいち, 名古屋市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田地 宏一 (TAJI KOUICHI)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 00252833