

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560442

研究課題名（和文） 非線形RH制御の計算効率向上とチューニング手法に関する研究

研究課題名（英文） Improvement of Computational Efficiency and Tuning Methods for Nonlinear RH Control

研究代表者

大塚 敏之 (OHTSUKA TOSHIYUKI)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授

研究者番号：40272174

研究成果の概要：

実時間で非線形最適制御問題を解いてフィードバック制御を行う非線形 Receding Horizon 制御（RH 制御）に関して、計算効率の向上、体系的な調整手法、そして応用を進めた。まず、最適性条件と離散近似の関係に注意した差分近似により計算量をほとんど増やさず精度を向上させた。また、出力応答の望ましさと制御入力の大きさとの兼ね合いを一つのパラメータで調整する手法を検討し有効性を確認した。応用に関しては、自動車の衝突回避問題と鉄鋼の冷間圧延プロセスにおける板厚・張力制御を扱いシミュレーションによって有効性を確かめた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：制御工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：非線形システム，最適制御，計算時間，チューニング

1. 研究開始当初の背景

非線形性や拘束条件など従来の制御理論で扱いづらい性質を持つシステムに対して、Receding Horizon制御（RH制御）またはモデル予測制御と呼ばれる制御手法の有効性が注目されている。RH制御は、各時刻で有限時間未来までの評価関数を最小化する最適制御を求め、その初期値のみを実際の制御入力として用いる制御手法である。各時刻の状態を初期状態とする最適制御問題を解いて制御入力

を決定するので、一種の状態フィードバック制御になっている。また、最適制御問題において状態や入力に対する拘束条件を陽に考慮することができる。しかし、サンプリング周期ごとに非線形最適制御問題を解くのは多大な計算量を要するため、ミリ秒単位のサンプリング周期を有する非線形系にRH制御を実装するのは困難だとされてきた。計算効率の向上に関する研究はいくつかあるものの、依然として比較的応答の遅いシステムへの適用に

限定されていた。

その困難を解決するため、研究代表者は、非線形RH制御の高速アルゴリズムを研究してきた。そして、反復解法無しに最適解の微小変化を求めてオンラインで最適解の更新を行うアルゴリズムのアイデアに行き着いた。これは一種の連続変形法（ホモトピー法）と見なせるが、実時間の経過とともに解を追跡するのが特徴である。同様のアイデアにより非線形状態推定のアルゴリズムも導出している。さらに、劣駆動ホバークラフトモデルの制御実験での実装にも成功している。これらの成果は産業界等で応用されており、たとえば、自動操船システムや飛行実験機への実装がある。

2. 研究の目的

以上のような状況のもと、現在は、非線形RH制御のアルゴリズムにおける計算効率のさらなる向上と、評価関数の体系的なチューニング手法確立とが学術的にも産業的にも重要な課題となっている。そこで、本研究では、それらの課題を解決することを目的とする。そして、さらに非線形RH制御の応用を進めることも目指す。以下では、各課題について述べる。

(1) 計算効率の向上　ここでいう計算効率の向上とは、同じ精度の解を得るために必要な計算量の低減、または、同じ計算量で精度を高めることを意味する。一般に、計算量と精度はトレードオフの関係にあり、計算量が減っても精度が悪化するのであれば、必ずしも計算効率が上がったとはいえない。逆に言えば、同じ計算量で精度を上げることができれば、より有用なアルゴリズムといえる。実時間で実行可能な計算量と必要な精度とに応じて適切なアルゴリズムを選択すべきである。

研究代表者が開発した実時間最適化アルゴリズムは、各サンプリング時刻で連立1次方程式を1回解くのみで解の更新を行うことができ、その基本的な枠組みをさらに変えて計算効率を向上させることは考えづらいが、依然として改良を検討すべき点がある。

本研究では、最適制御問題を離散化して非線形方程式を導出する際に、どのような差分手法が適しているのかを明らかにし、計算効率の向上に役立てる。

(2) チューニング手法の確立　非線形RH制御の応答は評価関数に大きく依存し、非現実的な挙動を示す場合もある。また、複数

の制御量を同時に考慮して最善のトレードオフを達成するには、どのように評価関数を選べばよいか明らかではない。実用上は、実際の応答を見ながら評価関数をチューニングする体系的な手法が必要である。

そこで本研究では、評価関数の修正と応答の変化との関係ができるだけ見通しやすいチューニング方法を構築する。たとえば、線形制御理論における逆最適性に基づくチューニング手法（ILQ設計法）等も参考にしつつ、チューニングしやすい評価関数の形、評価関数と応答との関係、そして、できるだけ少ないパラメータによる合理的なチューニング方法を開発する。

(3) 応用　計算効率の向上した非線形RH制御のアルゴリズムとチューニング手法とは、実験室レベルでの検証に止まらず実際的な問題へも応用し、さらなる理論的改善点の発見と産業界への貢献を目指す。たとえば、鉄鋼プロセスにおける熱延ないし冷延工程の非線形性を考慮した制御による高品質化と歩留まり向上や、自動車の最適経路生成による運転支援などを応用事例として検討する。

本研究で扱う非線形RH制御のアルゴリズムは、非線形性を近似することなくオンラインで解くアルゴリズムとしては世界トップクラスの計算効率を持っており、その改良と応用は学術的にも産業応用上にも意義がある。本研究により計算効率が向上すれば、より大規模かつ複雑なシステムへの適用や、より安価な計算機による実装などが可能になる。そして、鉄鋼プロセスや自動車などへの応用は、日本の基幹産業の国際競争力向上へ貢献する。

また、非線形制御のチューニングは、「見通しのよさ」という性質が数学的な定式化になじまないため、実用上の必要性にもかかわらず従来あまり研究されてこなかった。本研究は、実時間最適化という非線形RH制御の特色を生かすことによって、チューニングを体系化する新しい方向性を提示しうるものである。

3. 研究の方法

(1) 計算効率の向上　計算効率の向上に関しては、最適化問題の差分手法として何が適しているかを検討する。これは、さまざまな手法を実際に試して一般的な傾向を明らかにし、その結果を踏まえて解析的結果を導出したり、非線形RH制御に適した差分手法を導出したりすることを目指す。

(2) チューニング手法の確立 もう一つの課題である非線形RH制御のチューニング手法に関しては、たとえば、フィードバックによる入出力線形化を用いて理想の出力応答を達成する状態フィードバック制御則を設計し、制御出力の規範モデルからのずれ、制御入力大きさ、そして内部安定性を達成するための状態に関するペナルティ等のトレードオフを少ないパラメータからなる評価関数で行うことを考えている。ゼロダイナミクスが安定な場合は、出力の規範モデルからのずれと制御入力大きさとでトレードオフを行えばよいが、問題は不安定なゼロダイナミクスが存在する場合である。そのような場合における非線形RH制御の安定性に関しては理論が十分確立されていないが、ゼロダイナミクスの状態に関するペナルティ項を評価関数に加えるとともに評価区間を十分長く取ることで安定化できるケースが多いと考えられる。非線形最適制御問題を陽に解くことはできないので、数値計算を適宜援用して見通しの良いチューニング手法を構築する。

(3) 応用 開発したアルゴリズムとチューニング手法の実際問題への応用として、鉄鋼プロセスの冷間圧延における板圧と張力の制御や、自動車の最適経路生成などへの適用を行う。それぞれの問題に適した非線形モデルと評価関数を構築し、数値シミュレーションによって制御性能と計算量を評価する。

4. 研究成果

(1) 計算効率の向上 計算効率向上に関しては、最適制御問題に現れる微分方程式に中心差分近似を導入することにより、計算量をほとんど増やさずに精度が向上できた。図1と図2は、支点到トルク入力を持つ振子を制御対象とした非線形RH制御の数値シミュレーションにおいて、各種アルゴリズムの精度と計算時間を比較した結果である。図中の略号は、前進差分（オイラー法）を用いた従来のアルゴリズムをEuler、元の連続時間最適制御問題に対する停留条件を中心差分近似で離散化したアルゴリズムをMid-A1、最適制御問題自体を最初に中心差分で近似してから得られた停留条件を用いるアルゴリズムをMid-B1、さらに評価関数の積分を台形公式で近似したアルゴリズムをMid-B2としている。図1と図2より、中心差分と台形公式を用いたMid-B2はオイラー法より高精度であるにも関わらず計算時間はほぼ同じであり、計算効率が高いと言える。このようなアルゴリズム間の差異は、変分と差分近似の適用順によって生じる。

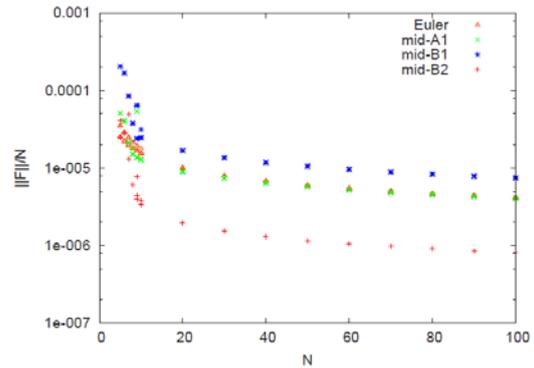


図1 評価区間の分割数 N と最適性条件における誤差のノルム $\|F\|/N$

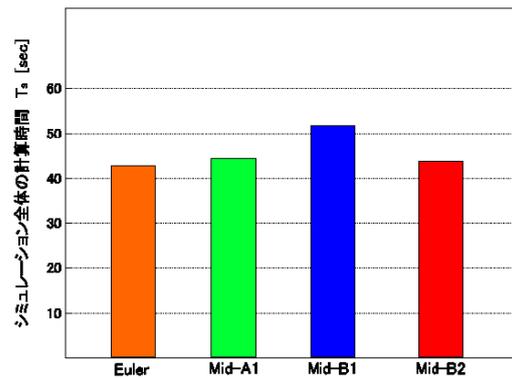


図2 各離散化手法の計算時間

(2) チューニング手法の確立 チューニング手法に関しては、評価関数と閉ループ系の応答との関係を見通し良くするため、まず出力と入力との関係を線形システムに変換する入出力線形化と呼ばれるフィードバック制御手法を適用し、実際の制御入力大きさと入出力線形化のための制御入力からのずれとのトレードオフを一つのパラメータで調整する手法を検討した。RH制御の評価関数は、

$$J := \int_t^{t+T} [\gamma(u - u_{\text{ref}}(x))^2 + (1 - \gamma)u^2] dt'$$

となる。ここで、 $u_{\text{ref}}(x)$ は入出力線形化によって理想的な出力応答を達成する状態フィードバック制御則である。第1項は、実際の制御入力 u が理想的な出力応答を達成する制御入力 $u_{\text{ref}}(x)$ からどれだけずれているかを表しており、第2項は実際の制御入力 u の大きさを表している。そして、それぞれに対する重みをスカラーのパラメータ γ によって調整する。入出力線形化において不安定なゼロダイナミクスが存在する場合、ゼロダイナミクスに対するペナルティも評価関数に加える。

3次元の非線形系に対して提案手法を適用したシミュレーション例が図3であり、状態

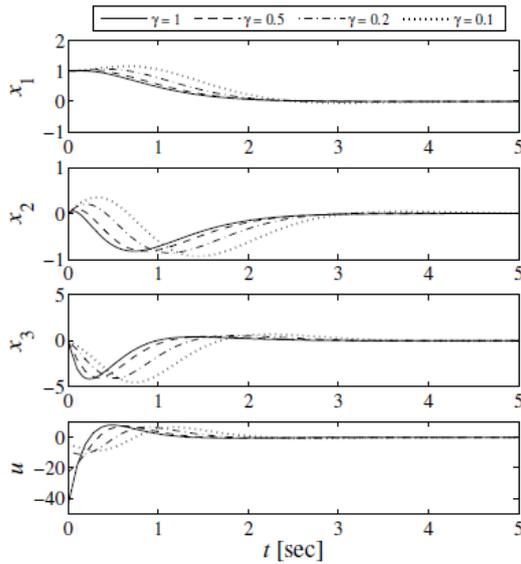


図3 パラメータ γ による応答の変化

x_1 を制御出力としている．パラメータ γ を小さくしていくと状態 x_1 の応答がわずかに変化するとともに入力 u の振幅は小さくなる．評価関数の形をあえて限定することにより，一つのパラメータで出力応答と制御入力振幅のトレードオフが行えることが確認できた．

(3) 応用 非線形RH制御の応用に関しては，自動車の衝突回避問題と鉄鋼の冷間圧延プロセスにおける板厚・張力制御を扱った．従来の線形モデルに比べて複雑だが物理現象をより正確に考慮した非線形モデルを構築し，非線形RH制御の数値シミュレーションを行った．その結果，実時間計算実現の見通しが立った．

図4は非線形四輪車両モデルの障害物回避問題に対して非線形RH制御を適用したシミュレーション結果である．XY平面における車両の軌跡（青線）が原点に置かれた障害物（赤線）を回避している．一方，図5は冷間圧延における板厚と張力の非線形モデルに対して非線形RH制御を適用したシミュレーション結果である．板速を大きく変化させて非線形性の影響を見ている．参照軌道回りで線形近似したモデルを用いた制御の応答（赤線）と比べて，非線形モデルをそのまま用いた制御の応答（緑線）では張力 σ_{R0} （目標値20MPa）と板厚 h （目標値3.4mm）の偏差が小さくなっている．

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）

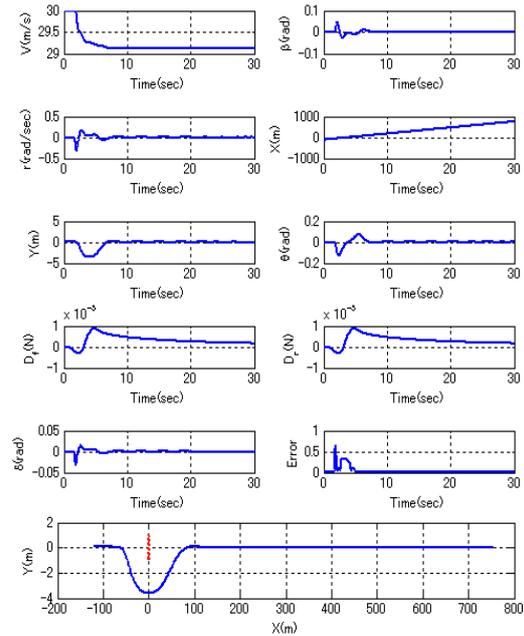


図4 四輪車両の障害物回避

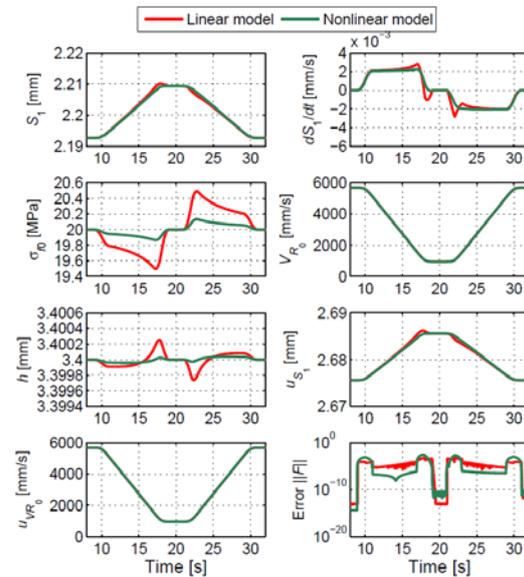


図5 冷間圧延の板厚・張力制御

〔雑誌論文〕（計3件）

- ① T. Ohtsuka, “Algebraic Structures in Nonlinear Systems over Rings Obtained by Immersion,” SIAM Journal on Control and Optimization, Vol. 47, 2008, pp. 1961-1976, 査読有．
- ② T. Ohtsuka, and S. Streif, “Commutativity of Immersion and Linearization,” Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control, Dec. 2007, pp. 5606-5611, 査読有．
- ③ M. P. Deisenroth, F. Weissel, T. Ohtsuka, and U. D. Hanebeck, “Online-Computation

Approach to Optimal Control of Noise-Affected Nonlinear Systems with Continuous State and Control Spaces,” Proceedings of the European Control Conference, July 2007, pp. 3664-3671, 査読有.

〔学会発表〕(計18件)

- ① 大塚敏之, “非線形Receding Horizon制御を用いた冷延タンデムミルの板厚制御,” 日本鉄鋼協会第157回春季講演大会, 東京, 2009年3月29日.
- ② 青木純, “C/GMRES法による非線形モデル予測制御のためのオフセット補償法,” 第9回計測自動制御学会制御部門大会, 東広島, 2009年3月4日.
- ③ 大塚敏之, “オンライン計算によるモデルベース制御,” 計測自動制御学会SICEセミナー「実践的な制御系設計—自動車制御技術の現在と未来—」, 大阪, 2009年1月15日.
- ④ 朴達, “C/GMRESアルゴリズムによる非線形モデル予測制御を用いた四輪車両の衝突回避,” 第51回自動制御連合講演会, 米沢, 2008年11月23日.
- ⑤ 青木純, “Continuation/GMRES法による非線形モデル予測制御におけるオフセット補償法,” 第51回自動制御連合講演会, 米沢, 2008年11月23日.
- ⑥ 大塚敏之, “変分法に基づく最適制御: 基礎からモデル予測制御まで,” 計測自動制御学会制御部門 多様な非線形ダイナミクスを生かした次世代制御調査研究会 非線形ダイナミクス制御ワークショップ2008, 名古屋, 2008年11月5日.
- ⑦ 大塚敏之, “代数的勾配解を持つ次元非線形最適レギュレータ問題,” 第37回計測自動制御学会制御理論シンポジウム, 霧島, 2008年9月19日.
- ⑧ T. Ohtsuka, “Practical Issues in Nonlinear Model Predictive Control: Real-Time Optimization and Systematic Tuning,” Invited Talk, International Workshop on Assessment and Future Directions of NMPC, Pavia, Italy, Sept. 8, 2008.
- ⑨ 大塚敏之, “非線形Receding Horizon制御におけるチューニングしやすい評価関数の提案,” 日本鉄鋼協会第155回春季講演大会, 東京, 2008年3月27日.
- ⑩ 藤本健治, “非線形制御のための冷間圧延タンデムミルのモデル化について,” 日本鉄鋼協会第155回春季講演大会, 東京, 2008年3月27日.
- ⑪ 宮武直希, “システムはめ込みに付随する代数多様体の安定化,” 第8回計測自動制御学会制御部門大会, 京都, 2008年3月7日.

- ⑫ 的場俊亮, “高次の数値積分法を用いた非線形Receding Horizon制御,” 第8回計測自動制御学会制御部門大会, 京都, 2008年3月7日.
- ⑬ 大塚敏之, “ハミルトン・ヤコビ方程式の解法への代数的アプローチ,” 第8回計測自動制御学会制御部門大会, 京都, 2008年3月7日.
- ⑭ 津村幸治, “大規模シミュレーションおよび複雑ネットワークにおける多分解能マルチスケールシステム,” 第8回計測自動制御学会制御部門大会, 京都, 2008年3月5日.
- ⑮ 尾崎昂平, “非線形Receding Horizon制御における評価関数の設定法,” 第50回自動制御連合講演会, 横浜, 2007年11月24日.
- ⑯ 大塚敏之, “実時間最適化による機械システムの非線形モデル予測制御,” 日本ロボット学会ロボット工学セミナー第42回シンポジウム「スマート・モーション・コントロール」, 東京, 2007年10月22日.
- ⑰ T. Ohtsuka, and S. Streif, “On Linearization before and after Immersion,” 第36回計測自動制御学会制御理論シンポジウム, 札幌, 2007年9月5日.
- ⑱ T. Ohtsuka, “A Continuation/GMRES Method for Real-Time Algorithm of Constrained Nonlinear Model Predictive Control,” The 6th International Congress on Industrial and Applied Mathematics, Zurich, Switzerland, July 20, 2007.

〔その他〕

ホームページ等

http://www-sc.sys.es.osaka-u.ac.jp/~ohtsuka/research_j.htm

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大塚 敏之 (OHTSUKA TOSHIYUKI)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授

研究者番号: 40272174

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし