

平成 21 年 6 月 8 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2008

課題番号：18560437

研究課題名（和文）周期運動のための制御理論の体系化－遅延フィードバックと繰り返し制御

研究課題名（英文） Research of unified control theory for periodic motions
- Delayed Feedback and Repetitive Control -

研究代表者

平田 健太郎 (HIRATA KENTARO)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号 00293902

研究成果の概要：

安定化制御器の既約分解表現に基づき、自由パラメータの補間によって特定の極零点構造を制御器に後天的に埋め込む方法を確認し、Lagrange 型補間、および H_∞ 型補間に対応する手法を得た。遅延フィードバックの応用としてネットワーク制御系の機能分散実験、繰り返し制御の応用として電動自転車の高効率パワーアシスト制御実験をおこなった。さらに、周期現象と関連の深いむだ時間系のモデリングと制御、視覚フィードバックへの応用、受動歩行現象の理論解析等に関しても、各種の成果が得られた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	2,000,000	0	2,000,000
2007 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	450,000	3,950,000

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：むだ時間、遅延フィードバック、繰り返し制御

1. 研究開始当初の背景

遅延フィードバック制御 (Delayed Feedback Control; DFC) および繰り返し制御 (Repetitive Control; RC) はむだ時間を積極的に活用した特長ある制御手法として知られていたが、両者の間の関係については全く注目されていなかった。さらにこれらを含む微分差分系の安定解析、安定化手法に関して統一的な枠組みは得られていなかった。

これに対して、両者の間の極零構造に双対的な性質が存在することを見出し、これに基づいて統一的な枠組みから制御系設計をおこなうという着想を得た。

2. 研究の目的

DFC, RC に共通して適用可能な、統一的観点からの制御系の解析・設計手法の構築と、それらの特性を生かした制御実験による有効性の検証が当初からの研究目的である。

また研究の進展に伴って、DFC, RC を含む、むだ時間系の作用素論な取り扱いのための基礎理論の構築が必要となった。さらに周期運動の具体例である受動歩行現象を扱ううえで、その本質的理解のための理論的検討の必要性が派生した。これらの周期運動および無限次元系に関するシステム理論的な広がりを探求するということが研究目的に含まれることとなった。

3. 研究の方法

設計法の構築にあたっては、規約分解法、補間理論等の数学的手法を援用して、設計アルゴリズムを導いた。またむだ時間系のモデリングにあたっては、関数解析的手法を駆使し、従来とは異なる視点からの定式化に臨んだ。

また、理論研究だけでなく、実機実験による有用性の検証にも積極的に取り組んだ。ネットワーク制御や視覚フィードバック、パワーアシストなどの新たな応用分野を開拓すべく、指導学生と一丸となった取り組みを展開した。

4. 研究成果

安定化制御器の既約分解表現を用いると、安定性以外の要求仕様を、自由パラメータに関する何らかの制約条件として与えることが可能である。DFC, RC は制御器に特定の極零点構造を付与することによって実現されるため、これらは結局自由パラメータに対する補間条件に帰着される。雑誌論文 5) では、Lagrange 型補間による設計法を、学会発表 25), 27) では SISO 系に対する H^∞ 型補間による設計法を提案した。さらに学会発表 26), 雑誌論文 4) では SIMO 系に対する拡張をおこなっている。これらは、各種補間法に基づいた統一的な設計の枠組みを与えるものである。ただし、制御対象が SISO でない場合の制御器の分母側の補間 (RC) では、tangential interpolation 呼ばれる determinant 型の補間が必要となるため、今後の理論拡張が望まれる。

作用素論的な無限次元系のモデリングと解析は、DFC の受動歩行系への適用 (その他 3) [解説]) に端を発するものであるが、歩行現象に固有の脚衝突による不連続な瞬間的状態遷移を除くと、これは通常のむだ時間系に対する新たなモデル化に対応する (雑誌論文 3))。これは無限次元システムのひとつであるサンプル値制御分野の研究者の興味を触発し、今日の共同研究 (学会発表 2), 3)) に至っている。むだ時間系のモデリングという大きなスコープをもつ基礎研究であるため、今後も幅広い発展が期待できる。

また、本研究と関連の深い受動歩行の安

定化原理の解明についても、大きな進展が見られた。(学会発表 7), 10), 12), 14), 24)) 受動歩行は力学系自身が安定なハイブリッド周期軌道を実現している例であり、ASIMO の動作に代表される ZMP 法が静的なつりあい条件を起点としていることとは好対照をなす。アクチュエータおよび能動的制御を有しないため、エネルギー効率に優れる。「なぜこのような最適性を兼ね備えた安定な現象が存在するか」は当該分野の研究者にとって本質的な問いである。これに対して我々はその安定化メカニズムが最適制御理論のひとつである cheap optimal control に他ならないことを明らかにした。これは当該分野の第一線の研究者たちに大きなインパクトを与え、ロボティクス分野の研究者との交流 (学会発表 6)) の基盤となった。

また周期運動と関連の深い広義のむだ時間系のモデリング、制御に関しても各種の成果が得られている。ひとつ目の結果は、二乗和多項式 (Sum Of Squares) を用いた状態依存むだ時間系のモデリングと安定解析法である (雑誌論文 2), 学会発表 17))。ある種の制御対象では変動するむだ時間が状態の関数として与えられる場合がある。このような状況下で、モデルの不確かさによってこれを記述しようとするとき、保守性が生じる。拡大状態空間における非線形ゲインを用いたフィードバック構造を用いてシステムを記述し、SoS 解析を適用することで保守性の低い解析条件を導いている。ふたつ目の成果は、不規則遅延を伴う系に対する状態推定問題を切替型オブザーバによって解くというものである (雑誌論文 1), 学会発表 8), 13), 15), 19))。特に、同手法を Ethernet 上で実装し、ネットワーク接続された複数機器の連動に適用してその有効性を実験的に検証した研究 (学会発表 8)) は高い評価を受け、Finalist of SICE Annual Conference 2008 Young Author's Award ならびに計測自動制御学会産業応用部門 奨励賞を受けた。ネットワーク制御時の不規則なデータ損失に関する研究 (学会発表 11), 16)) もおこなっている。

改良型 RC や H^∞ 制御による電動自転車のパワーアシスト制御に関しても、実際の自転車を用いた実験をおこなってきた (学会発表 5), 22))。学会発表 5) に対しては、計測自動制御学会関西支部若手研究発表会優秀発表賞を受けた。またむだ時間を含む系に対するロバスト設計理論の視覚フィードバックへの応用に関する一連の研究 (学会発表 1), 4), 9), 18), 20), 21), 23)) に対しても高い評価をいただいた。学会発表 4) は計測自動制御学会関西支部支部長賞奨励賞、学会発表 9) はシステム制御情報学会奨励賞受賞の栄誉に浴した。

さらに関連する内容で、期間中2件の招待講演(その他1),2))を歴史あるCambridge大学およびPadova大学でおこなうことができたのは望外の喜びであった。

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 5 件)

1. 中村幸紀, 平田健太郎, 杉本謙二, タイムスタンプを用いた切替え型オブザーバによるネットワーク上の複数機器の連動, システム制御情報学会論文誌, 21 巻, 211-218, 2008, 査読有

2. 加藤健一, 平田健太郎, 杉本謙二, 状態依存むだ時間系の非線形モデル表現とSOS解析, システム制御情報学会論文誌, 21 巻, 103-110, 2008, 査読有

3. 平田健太郎, 時間遅れシステムに関連したある種のたみ込み積分作用素のスペクトルの数値計算について, システム制御情報学会誌, 21 巻, 82-88, 2008, 査読有

4. 平田健太郎, サンプル値 H_∞ 遅延フィードバック制御器の一設計法, 計測自動制御学会論文誌, 44 巻, 164-173, 2007, 査読有

5. 平田健太郎, 補間を用いたサンプル値遅延フィードバック制御器の一設計法, システム制御情報学会誌, 20 巻, 376-383, 2007, 査読有

[学会発表] (計 27 件)

1. 平田健太郎, 水野貴志, 倒立振り系のカメラ設置誤差に対してロバストなビジュアルフィードバック制御, 第9回計測自動制御学会制御部門大会, 2009.3.4, 東広島

2. 平田健太郎, 糸数 篤, 萩原朋道, 非因果的ホールドによる積分作用素のスペクトル計算について, 第9回計測自動制御学会制御部門大会, 2009.3.5, 東広島

3. 糸数 篤, 平田健太郎, 遅れ型むだ時間系の状態遷移作用素のスペクトル計算について, SICE 関西支部若手研究発表会, 2009.1.16, 大阪

4. 水野 貴志, 平田健太郎, 倒立振り系のカメラ設置誤差に対してロバストなビジュアルフィードバック制御, SICE 関西支部若手研

究発表会, 2009.1.16, 大阪

5. 山田 晃平, 平田健太郎, FIR フィルタ型繰返し制御を用いた周期運動に対するパワーアシスト, SICE 関西支部若手研究発表会, 2009.1.16, 大阪

6. 平田健太郎, Notes on Cheap Optimal Control & Passive Dynamic Walking, 歩行のシンポジウム, 2009.1.6, 淡路島

7. 平田健太郎, On Internal Stabilizing Mechanism of Passive Dynamic Walking, 第9回計測自動制御学会, システムインテグレーション部門講演会, 2008.12.5, 岐阜

8. Y. Nakamura, K. Hirata, and K. Sugimoto, Synchronization of Multiple Plants over Networks via Switching Observer with Time-stamp Information, SICE Annual Conference, 2008.8.20, Tokyo, Japan

9. 水野貴志, 平田健太郎, 倒立振り系のカメラ設置誤差に対してロバストなビジュアルフィードバック制御, 第52回システム制御情報学会 研究発表講演会, 2008.5.17, 京都

10. 平田健太郎, 受動歩行に内在する安定化機構について, 第8回計測自動制御学会制御部門大会, 2008.3.5, 京都

11. 大堀彰大, 平田健太郎, 小木曾公尚, ランダムなデータ損失を伴う遠隔制御系の安定性について -サンプル値系の同時安定化との関係-, SICE 関西支部 若手研究発表会, 2008.1.16, 大阪

12. 野口慎, 平田健太郎, 円弧脚形状が歩行安定性に与える効果, SICE 関西支部 若手研究発表会, 2008.1.16, 大阪

13. 中村幸紀, 平田健太郎, 杉本謙二, 高負荷なネットワーク環境下における切替え型オブザーバによる複数機器の連動実験, SICE 関西支部 若手研究発表会, 2008.1.16, 大阪

14. 野口慎, 平田健太郎, 歩行安定性に対する円弧脚形状の効果 -線形化ポアンカレ写像に基づく検討-, 第8回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, 2007.12.20, 広島

15. 中村幸紀, 平田健太郎, 杉本謙二, 実ネットワークを用いた切替え型オブザーバによる複数機器連動の実証実験, 第8回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, 2007.12.21, 広島

16. 大堀彰大, 平田健太郎, 小木曾公尚, サンプル値系の同時安定化とネットワーク型制御系への応用, 平成19年電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2007.9.4, 大阪

17. 加藤健一, 平田健太郎, 杉本謙二, 状態依存むだ時間系の非線形モデル表現とSOS解析, 第51回 システム制御情報学会 研究発表講演会, 2007.5.18, 京都

18. K. Hirata, T. Mizuno, Robust Visual Feedback Control of Inverted Pendulum System against Camera Misalignment, The 10th IEEE AMC, 2008.3.26, Trento, Italy

19. Y. Nakamura, K. Hirata, K. Sugimoto, K. Kogiso, Cooperative Networked Control with Gain Switching Observer, IEEE MSC 2007 (the 16th IEEE Conference on Control Application), 2007.10.2, Singapore

20. K. Hirata, Y. Kimura, K. Sugimoto, Visual Feedback Control of Cart-Pendulum Systems with Webcam, IEEE ICM2007, 2007.5.9, Kumamoto, Japan

21. 木村祐己, 平田健太郎, 杉本謙二, Webカメラの遅れを考慮した倒立振り子のビジュアルフィードバック制御, 計測自動制御学会関西支部 若手研究発表会, 2007.1.17, 大阪

22. 大谷真司, 平田健太郎, 杉本謙二, 繰り返し制御のパワーアシスト機構への応用, 第7回 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2006.12.15, 札幌

23. 木村祐己, 平田健太郎, 杉本謙二, Webカメラを用いた倒立振り子のビジュアルフィードバック制御, 第49回 自動制御連合講演会, 2006.11.25, 神戸

24. 平田健太郎, 大須賀公一, むだ時間系の安定解析と受動歩行の遅延フィードバック制御, 第6回 計測自動制御学会 制御部門大会, 2006.6.1, 名古屋

25. 小笠原知義, 平田健太郎, 杉本謙二,

LFT 構造に着目したネットワーク制御とその倒立振り子系への適用, 第50回 システム制御情報学会 研究発表講演会, 2006.5.11, 京都

26. Kentaro Hirata, Tomoyoshi Ogasahara, Kenji Sugimoto, State Space Design of H infinity Delayed Feedback Controllers, SICE-ICCAS 2006, 2006.10.19, Busan, Korea

27. Kentaro Hirata, A Design Sampled-Data H-Infinity Delayed Feedback Controller, The 17th MTNS, 2006.6.25, Kyoto, Japan

[その他] (計 3 件)

1. Kentaro Hirata, Optimal Control behind the Passive Dynamic Walking?, Invited talk 2008.11.7, Cambridge University, United Kingdom

2. Kentaro Hirata, Stability Analysis of Passive Dynamic Walking, Invited talk, 2008.4.1, Padova University, Italy

3. 平田健太郎, 大須賀公一, 杉本靖博, むだ時間系の安定解析再訪 -受動歩行の遅延フィードバック制御まで- (2), 解説, 計測自動制御学会 計測と制御, 45 巻, 376-380, 2006

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平田 健太郎 (HIRATA KENTARO)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号 00293902

(2) 研究分担者

杉本 謙二 (SUGIMOTO KENJI)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・教授

研究者番号 20179154

小木曾 公尚 (KOGISO KIMINAO)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・助教

研究者番号 30379549

橋 拓至 (TACHIBANA TAKUJI)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・助教

研究者番号 20415847

(3) 連携研究者