

平成 21 年 5 月 26 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19760298

研究課題名 (和文) 同次微分器を用いた超小型分散コントローラの研究

研究課題名 (英文) Study of micro distributed controller using homogeneous differentiator

研究代表者

西田 豪 (NISHIDA GOU)

独立行政法人理化学研究所・ロボット動作研究チーム・基幹研究所研究員

研究者番号：80435669

研究成果の概要：本研究は、閉ループ系の減衰を増加させ等価的に系の応答速度を上げることができる微分フィードバック制御に用いる、同次微分器の FPGA 実装およびアナログ回路実装を行う。また、その特性を検証し、従来用いられてきた近似微分器との統合設計手法を開発する。そして、この手法の有効性を示すために、センサ統合型アクチュエータであり人工筋肉として利用されているイオン導電性高分子・貴金属接合体 (IPMC) に適用し、同次微分器より検出した速度信号を用いて、分布定数系に対する受動性に基づく制御手法を実現する。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,400,000	0	2,400,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	270,000	3,570,000

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：制御システム

1. 研究開始当初の背景

制御系の閉ループに補償器を挿入することにより系の特性を改善するフィードバック補償の手法の1つに、微分フィードバックがある。この微分フィードバックの効果は、閉ループ系の減衰を増加させ、等価的に系の応答速度を上げることができる。微分フィードバックを実現するための微分信号を与える補償器を微分器と呼ぶ。理想的な微分器より得られる信号は、ノイズの影響を受けやすく、高周波域で非常に大きな値となる。よって、

実際には、制御系の位相特性を改善することで安定度を増すフィルタと等価な近似微分器や、もしくは、離散信号に対してはサンプル間隔が十分に小さいという仮定の下で差分によって微分を近似するなど、近似的に微分器を構成することが一般的であった。

近年、同次スライディングモードと呼ばれるある非線形構造を利用した同次微分器が提案された。同次微分器は、有限時間整定制御問題や非ホロノミック系などを効果的に表現できる、線形系より広く、また、一般の非

線形系よりは線形系に近い性質を持つ同次系の表現を利用しており、有限時間内に微分器として動作することが証明されている。

一方、実用的なシステム制御において、制御対象から観測される信号の時間微分をリアルタイムに求めることは、もう1つの重要な意味を持っている。それは、受動性と呼ばれる性質に基づいた制御手法においてである。入力と出力の積がエネルギーの時間変化であるパワーを与える様な入出力対を考えることで、様々の異なる物理変数が、エネルギーという物理量に換算して統一的に評価できる。そのため、例えば、入力を力と考えた場合、観測量として速度を検出することが必要になる。受動性を用いれば、比較的シンプルな表現にもかかわらず、ロバストかつ汎用性の高い、非常に強力な制御設計論が展開できることが知られており、現在ロボットの動的制御の根幹をなしている。

この受動性という概念の一般的なシステム表現は、ポートハミルトン系と呼ばれる正準型を用いて表現できる。近年、この研究が分布定数系の表現に拡張された。その表現における入出力変数となるポートは、空間に分布している系のある境界として定義され、系全体の全エネルギー変化がその境界上のみで評価できるという新たな性質を記述できる。申請者らは、この分布定数ポートハミルトン系の理論構造の拡張を行ってきた。この拡張により、エネルギー平衡の境界検出が可能な構造の分類、および、多くの変分原理によって定められる系に対する一般的なポート表現が与えられた。

同次微分器の考案者であるロシア人研究者 Levant は、イスラエル空軍においてミサイル軌道追従制御の状態観測器として応用していることを招待講演にて述べていた。最終的に我々はこの技術を、環境適応型介護支援ロボット“RI-MAN”に結実させる。

同次微分器の具体的な適用例として、マニピュレータの関節角度推定において良好な結果が得られているが、同次微分器の性能自体に未知である部分が多いこともあり、かつ、知名度が低く、発表されている適用例は極めて少ないといえる。また、同次微分器の基礎理論である同次系は、多くの有用な適用例が示されているものの、その安定性や安定化については多くの部分に研究の余地が残されている。本研究を進めるにあたり、同次微分

器の性質が明らかになるとともに、同次系自身への理論的な理解が深まる事が期待される。すでに、申請者は研究協力者と共に同次系の数理解造に関する研究を進めてきている。

2. 研究の目的

本研究では、同次微分器より検出した速度信号を用いて、申請者によって得られた分布定数系に対する受動性に基づく制御手法を実現する。

(1) 最初に、この同次微分器を、所属研究所が開発した超小型分散コントローラ“C-CHIP”のFPGAバージョンに対して実装する。そして、周波数特性、時間応答などの基本的な性能について検証を行う。

(2) 次の段階として、同次微分器のアナログ回路実装を行う。そして、現実実装可能で安定動作可能な最大発振周波数、および、基礎的な性能について計測を行う。この結果より、前段階で得られたFPGA型の性能と比較検討を行う。

(3) 上記の結果を踏まえて、従来の近似微分器、および、新しく得られたFPGA型とアナログ実装型の同次微分器に関して、制御対象に応じて再構成可能な効果的な微分器の統合的設計手法を確立する。

(4) 得られた統合微分器を、現在RI-MANの開発要素となっており、環境に対してバックドライバビリティを有するセンサ統合型アクチュエータであり人工筋肉として期待されているイオン導電性高分子・貴金属接合体に対して適用し検証を行う。実際には、検出された微分信号を用いて動作する受動性を利用した小型の制御器を、IPMCの境界上に多数分布して配置する。

3. 研究の方法

(1)平成19年度

①第1段階として、同次微分器を、所属研究所が開発した超小型分散コントローラC-CHIPのFPGAバージョンに対して実装を試みる。この段階で、従来型の近似微分器との比較より、同次微分器の基本的性能を評価する。まず、数値解析ソフトウェア MATLABを用いて作成された制御アルゴリズムのシミュレーションを行う。そして、その拡張パッケージを用いることで、そのアルゴリズムをC-CHIPのFPGAにアップロードすることができる。本段階で

は、数値シミュレーションとFPGA実装型同次微分器との間の再現性が高い設定であることを見込んでいる。また、次段階で開発するアナログ回路実装型において、実用上の利点が得られない最悪の場合を想定し、FPGA実装型を完成させておく。これは第3段階における従来の近似微分器との統合化以降の研究全体の流れを円滑するために重要と思われる。

②第2段階として、アナログ回路実装型同次微分器に対し基礎的な検証、考察を行う。申請者が共同研究において調査した結果、同次微分器の制御実装においては次のような問題が経験的に得られている。それは、パラメータ調整の難しさ、数値演算アルゴリズムと計算精度の大きな依存性、そして、初期応答の不安定性である。数値計算にかかわる問題点は、本研究の主題であるアナログ回路実装によって解決を試みる。次にパラメータ調整に関する問題に関する対処法として精密な測定と、高周波回路実装をできる限り洗練させることが挙げられる。同次微分器の動作原理より、高周波のスウィッチング信号により同次スライディングモードを発生させるため、波形測定には高精度な計測機器が要求される。また、得られた観測データから、実装技術の問題から生じるノイズの影響か、同次微分器のパラメータ調整の不備によるものか切り分けが困難であると予想される。これは、アナログ回路実装により同次微分器の本来の性能が発揮されると予想されるので避けられない問題となる。本段階は、本研究の中心的な部分を担っており、工学的な洞察と慎重な対応が要求される。

③第3段階として、これまでに得られた、従来の近似微分器、および、新しく得られたFPGA型とアナログ実装型の同次微分器に関する結果を整理する。そして、新たな設計論として微分器の統合的設計手法を確立する。本段階では、必要に応じて理論的な視点に立ち戻り、同次微分器の基本的な枠組みを拡張する可能性がある。

(2)平成20年度

①前年度に得られた同次微分器を用いて、アクチュエータとセンサとして同時に用いられるIPMCを制御対象とする。また検出された微分信号を利用して、受動性を利用した分布定数ポートハミルトン系に基づく制御戦略を適用する。この段階で重要となる要素は、IPMCに関する取り扱いのノウハウ、および、実験

環境である。IPMCに関しては、所属研究所の生物型感覚統合センサ研究チームが主導で開発しており技術的な情報に関して援助が得られる。また、将来的に、制御対象を面状触覚センサまで視野に入れた場合、申請者が取り組んできた分布定数系に関する研究成果を十分に発揮できる領域であり、将来的にも、独創的かつ有用な研究を創出するために重要な段階と考えることができる。

4. 研究成果

理想的に動作する近似微分器は、信号の定数倍を与える比例補償器と合わせて考えることで、無限大の極をもつPID制御のPD動作に等価となる。また、同次微分器は、スラディングモードにおけるスウィッチングが無制限小時間に行われることを仮定しており、計算の刻み幅が小さい方がより精度が上がる。計算がある程度収束するまでに時間がかかるため、予期しない外乱に対して不安定となる。よって、状態観測機として用いる場合、計算値と実測値が大幅にずれた場合、従来の近似微分器動作を切り替えるなどの工夫が必要である。

なお、現象を実験により確かめることも重要であるが、基礎理論が未成熟なこともあり、設計論の充実を図る必要性がある判断し、当初の予定より大幅に理論研究に重みを置いた。また、IPMCのような非常に柔軟な構造で、原理的に複数の物理系からなる系に対して、上記の微分器の適用を踏まえたモデル化の議論を行った。

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2件)

① 西田 豪, Bernhard Maschke, “無限次元ハミルトンおよびラグランジュ系におけるディラック構造”, システム/制御/情報: 大域非線形制御理論とその展望特集号, 第52巻, 第3号, pp. 96-102, 2008, 査読有。

② G. Nishida, T. Tsuzuki, H. Nakamura and Y. Yamashita, “Stabilization of Nonlinear Systems using Weak-Lyapunov Functions”, SICE J. of Control Measurement, and System

Integration, Vol. 2, No. 1, Jan., pp.43-49, 2009, 査読有.

[学会発表] (計 18 件)

- ① G. Nishida, M. Yamakita, Z. W. Luo, "Time-Varying Port-Representation of Dissipative Structures with Gauge Transformations", Proceedings of the European Control Conference 2007, pp.4819-4824, 4/July 2007, Kos, Greece.
- ② H. Nakamura, G. Nishida, H. Nishitani, "Asymptotic Stability of Gradient Homogeneous Systems", Proceedings of the European Control Conference 2007, pp.3657-3663, 3/July 2007, Kos, Greece.
- ③ G. Nishida, R. Enomoto, M. Yamakita, Z. W. Luo, "Port-based Energy Balance on Compact Manifolds", Reprint of the 7th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, pp.491-496, 23/Aug. 2007, Pretoria, South Africa.
- ④ G. Nishida, M. Yamakita, Z. W. Luo, "Field Port-Lagrangian Systems with Degenerate Lagrangian and External Forces", Proc. of the 46th IEEE Conf. Decision and Control, 14/Dec. 2007, New Orleans.
- ⑤ G. Nishida, M. Yamakita, Z. W. Luo, "Port-Representation of Bi-Hamiltonian Structure for Infinite-Dimensional Symmetry", Proc. of the 46th IEEE Conf. Decision and Control, 14/Dec. 2007, New Orleans.
- ⑥ G. Nishida, B. Maschke and M. Yamakita, "Topological Geometry and Control for Distributed Port-Hamiltonian Systems with Non-integrable Structures", Proc. of the 47th IEEE Conf. on Decision and Control, pp. 1291-1297, 9/Dec. 2008, Cancun, Mexico.
- ⑦ G. Nishida, K. Takagi, B. Maschke, "Multi-Scale Distributed Port-Hamiltonian Representation of Ionic Polymer-Metal Composite", Proc. of the 17th IFAC World Congress, pp. 2300-2305, 6/July, 2008, Seoul, Korea.

- ⑧ G. Nishida, T. Tsuzuki, H. Nakamura, Y. Yamashita, "Stabilization of Nonlinear Systems Using Weak-Control-Lyapunov Functions", Proc. of the 17th IFAC World Congress, pp. 6190-6195, 7/July, 2008, Seoul, Korea.
- ⑨ K. Takagi, K. Asaka, G. Nishida, Y. Nakabo and Z. W. Luo, "Distributed Impedance Model of Ionic Polymer-Metal Composite Actuators", 3rd Int. Conf. of Smart Materials, structures and systems, 12/June 2008, Sicily, Italy.
- ⑩ 西田 豪, 榎本 隆二, 羅 志偉, "偏微分制御理論とその応用", 第 7 回制御部門大会, pp.81-2-5-1-81-2-5-6, 8/March 2007, 東京.
- ⑪ 中村 文一, 西田 豪, "準勾配同次系の漸近安定性", 第 7 回制御部門大会, pp.81-2-3-1-81-2-3-4, 8/March 2007, 東京.
- ⑫ 西田 豪, 高木 賢太郎, B. Maschke, "Multi-Scale Distributed Port-Hamiltonian Systems - Application to Ionic Polymer-Metal Composite (IPMC)", 第 36 回制御理論シンポジウム資料, pp.325-328, 6/Sep. 2007, 北海道.
- ⑬ 中村 文一, 中村 奈美, 西田 豪, 山下 裕, "被覆写像を用いた非線形システムの連続安定化", 第 36 回制御理論シンポジウム資料, pp.61-66, 5/Sep. 2007, 北海道.
- ⑭ 西田 豪, 都築 卓有規, 中村 文一, 山下 裕, "弱制御Lyapunov関数を用いた非線形系の安定化", 第 36 回制御理論シンポジウム資料, pp.55-60, 5/Sep., 2007, 北海道.
- ⑮ 西田 豪, 中村 文一, "無限次元同次系の変分構造", 第 37 回制御理論シンポジウム資料, pp.369-374, 19/Sep. 2008, 鹿児島.
- ⑯ 西田 豪, Bernhard Maschke, 山北 昌毅, "非可積分構造を持つ分布定数 port-Hamilton系の境界制御", 第 37 回制御理論シンポジウム資料, pp.393-404, 19/Sep. 2008, 鹿児島.
- ⑰ 西田 豪, 山北 昌毅, 羅 志偉, "変分問題における Stokes-Dirac 構造とポート表現", 第 8 回制御部門大会, 5/Mar. 2008, 京都.

⑱ K. Takagi, B. Maschke, G. Nishida and K. Asaka, “Numerical Study on the Hamiltonian Discretization of the Transmission Line: Toward the Modeling for the Fractal-Like Rough Electrodes of Ionic Polymer Actuators”, 9th SICE System Integration Division Conference, 6/Dec., 2008, Gifu.

〔図書〕(計1件)

① G. Nishida, M. Yamakita, and Z. Luo, “Virtual Lagrangian Construction Method for Infinite-Dimensional Systems with Homotopy Operators”, in Lagrangian and Hamiltonian Methods for Nonlinear Control 2006, Lecture Notes in Control and Information Sciences, F. Bullo and K. Jujimoto (Eds.), 2007, pp75-86.

〔産業財産権〕

○取得状況(計3件)

① 名称:放射線のエネルギー分布調整機構、並びに、これを用いた放射線の照射装置
発明者: 西田, 谷崎
権利者: 住友重機械工業株式会社
種類: 特許
番号: 4142230
取得年月日: 平成20年9月3日
国内外の別: 国内

② 名称:放射線のエネルギー分布調整機構、並びに、これを用いた放射線の照射装置
発明者: 西田, 谷崎
権利者: 住友重機械工業株式会社
種類: 特許
番号: 4159229
取得年月日: 平成20年10月1日
国内外の別: 国内

③ 名称:放射線のエネルギー分布調整機構、並びに、これを用いた放射線の照射装置
発明者: 西田, 谷崎
権利者: 住友重機械工業株式会社
種類: 特許
番号: 4203208
取得年月日: 平成20年12月24日

国内外の別: 国内

〔その他〕
ホームページ

<http://rtc.nagoya.riken.jp/human/nishida/>

6. 研究組織

(1)研究代表者
西田 豪 (NISHIDA GOU)
独立行政法人理化学研究所・ロボット動作研究チーム・基幹研究所研究員
研究者番号: 80435669