

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560437

研究課題名（和文） ナノスケールサーボ制御のためのオンライン制振軌道生成

研究課題名（英文） Online Trajectory Generation for Nanoscale Servo Control

研究代表者

平田 光男（HIRATA MITSUO）

宇都宮大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50282447

研究成果の概要（和文）：

ハードディスク装置や光ディスク装置、ガルバノスキャナなど、高速高精度な位置決め制御が要求されるシステムでは、機械共振を励振しないフィードフォワード入力的设计が重要となる。本研究では、そのような軌道を多項式を用いてオンラインで生成する手法を提案した。そして、提案手法ハードディスク装置の位置決め制御系やガルバノスキャナの位置決め制御系へ適用し、その有効性を示した。

研究成果の概要（英文）：

For nanoscale servo system such as hard disk drives, optical disk drives, and galvano scanner, it is important to design a feedforward input that does not excite mechanical resonance modes. In this study, we proposed methods to generate such feedforward input in real-time by a polynomial in time. The effectiveness of the proposed method has been verified by applying the method to hard disk and galvano scanner control systems.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
22 年度	900,000	270,000	1,170,000
23 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
24 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：フィードフォワード制御，制振軌道設計，ナノスケールサーボ制御

## 1. 研究開始当初の背景

ハードディスクドライブや次世代光ディスクドライブ，半導体露光装置における位置決め制御系のように，位置決め精度がナノスケールの領域にあるサーボ制御はナノスケールサーボ制御と呼ばれている。ナノスケールサーボ制御において高速性を追求する場合，フィードフォワード入力（以下 FF 入力）の

設計が非常に重要となる。研究代表者はこれまで機械共振を励振しない制振軌道設計法として周波数整形型終端状態制御（以下，FFSC）を提案してきた。しかし，この手法は FF 入力が時系列データとして求まるため，実装のためには，それを保存するための大量のメモリが必要であった。結果として，制御装置のコスト上昇を招くため，実機実装の障

壁となる。そのような理由から、制振軌道のオンライン生成に対するニーズが高まっており、有用性の高い研究課題となっていた。

## 2. 研究の目的

制振軌道をオンライン生成する手法として、多項式に基づく手法を提案する。多項式は、基本的に積和演算で済むため、制御演算装置としてよく用いられる DSP との親和性が高い。入力のスラカさと、入力の周波数成分を評価関数とし、それを最小とする FF 入力の時間多項式を求める手法を導出する。

次に、多項式を実システムへリアルタイム実装する際の問題点について検討する。たとえば、高次の多項式を用いた場合、変数の有効桁数の制約から計算誤差が生じる。このような問題が生じた場合の解決方法について検討する。

最後に、さまざまな制御対象へ提案手法を適用し、その有効性及び問題点を明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1) 制振軌道のオンライン生成に関する理論的研究を行う。具体的には、FFSC の設計理論を入力が多項式になる場合に拡張する。また、最適な多項式の次数についても検討する。

(2) 提案アルゴリズムを実システムへリアルタイム実装する際の問題点を明らかにし、解決を図る。具体的には、DSP などへの実装を想定し、オンライン生成のアルゴリズムを C 言語で記述する。そして、有効桁数などの制約により、設計通りの解が得られるかどうか、について検証する。

(3) 高速かつ高精度な制御が要求されるシステムに対して提案手法を適用し、その有効性を検証する。具体的には、ハードディスク装置やガルバノスキャナ等へ適用し、シミュレーション及び実験の両面から有効性について多角的に検証する。さらには、鉄鋼プラントの各種機器や、自動車の制御系等、その他のメカトロ機器への適用検討も行う。

(4) 得られた成果を総括し、論文などにまとめて公表する。

## 4. 研究成果

(1) 制振軌道を時間多項式で生成する手法を提案した。FFSC を多項式入力へ拡張したことで、FFSC の計算公式とほぼ同様の計算公式を得た。この公式を使えば、多項式の係数を、逆行列を含む比較的簡単な行列演算によっ

て求めることができる。また、最適な多項式の次数についても考察を行い、評価関数値に基づく選択指針を示した。その結果、制御性能と、多項式の次数の間にあるトレードオフを考えた設計を行うことができるようになった。

(2) 時間多項式を実システムに実装する際、有効桁数の制約から、数値的誤差が生じることが多い。特に高次多項式はこの問題が顕著になる。そこでまず、入力の時間対称性に基づく手法を提案した。この手法は、制御対象が摩擦の無い剛体システムの場合、制御入力時間が時間に対して対称になるという性質を利用した手法である。多項式を用いて位置決め時間の半分の入力を計算し、残りはそれを時間に対して反転させて使用する。これにより、時間が進むにつれて、多項式の計算精度が低下するという問題が回避できる。

次に、多項式入力の場合、ある行列のフルランク性が常に保障されないという問題があることが明らかとなった。その行列がフルランクでなくなると、逆行列が計算できず、解が求まらなくなってしまう。そこで、この問題を解決するため、多項式と時系列データを組み合わせた手法を提案した。制御対象の次数以上の長さを持つ時系列データを導入することで、逆行列の存在を常に保証できるようになった。そして、その有効性をシミュレーションで検証した。

(3) 実システムでは、許容される制御入力の大きさは有限である。そこで、入力飽和が存在する場合の軌道設計法について検討した。その際、単純な入力飽和问题ではなく、電源電圧制約に起因する飽和问题が取り扱える手法を提案した。このような飽和问题は、飽和要素がフィードバックループの中に存在することになり、単に FF 入力が上下限值に収まるように解くだけでは解決できない。本研究では、この問題を、終端状態制御を解く際の拡大系の構造に着目し、フィードバックループ内に存在する飽和要素を、ループ外に取り出して、近似的に解く手法を提案した。これにより設計の見通しがよくなった。また、本手法により、電源電圧の低電圧化も可能となるので、制御システムの低電力化にも貢献できるというメリットも生まれた。

(4) 高速・高精度な位置決めが要求される、ハードディスク装置及びガルバノスキャナへ提案手法を適用しその有効性を検証した。ガルバノスキャナに対しては、シミュレーションだけでなく、実機実験も行った。さらに、製鉄所で使用されるコイルカーの制振制御問題への適用も試みた。コイルカーは、パラメータ変動の範囲が非常に大きいので、パラ

メータ変動の範囲をいくつかの領域に分け、各範囲に対して複数の多項式入力を設計した。

(5) 本研究で得られた知見を図書にまとめた。

[1]  
Takashi Yamaguchi, Mitsuo Hirata, Chee Khiang Pang:  
High-Speed Precision Motion Control,  
CRC Press, 2011

[2]  
Takashi Yamaguchi, Mitsuo Hirata, Chee Khiang Pang:  
Advances in High-Performance Motion Control of Mechatronic Systems,  
CRC Press, 2013年8月発行予定

#### 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3件)

[1]  
Mitsuo Hirata and Fujimaru Ueno:  
Final-State Control Using Polynomial and Time-Series Data,  
IEEE Trans. Magnetics,  
Vol. 47, No. 7, pp.1944-1950, 2011,  
査読有

[2]  
Mitsuo Hirata and Fujimaru Ueno:  
Final-State Control Using a Time-Symmetric Polynomial Input,  
IEEE Trans. Control Systems Technology,  
Vol. 20, No. 2, pp. 395-401, 2012,  
査読有

[3]  
上田伸治, 黒木幸恵, 平田光男:  
電流アンプでの電圧飽和を考慮したガルバノスキャナの軌道設計法,  
電気学会論文誌D,  
Vol. 133, No. 1, pp. 10-19, 2013,  
査読有

[学会発表] (計8件)

[1]  
Mitsuo Hirata:  
Final-State Control Satisfying Jerk Continuity,  
Proc of SICE Annual Conference,  
pp. 18-21, 2010

[2]  
Mitsuo Hirata and Fujimaru Ueno:  
A Vibration Minimized Input Design Based on a Polynomial Input,  
Proc of IEEE International Conference on Control Applications,  
pp. 973-978, 2010

[3]  
Mitsuo Hirata and Fujimaru Ueno:  
Final-State Control Using a Polynomial and Time-Series Data,  
Digest of APMRC2010,  
CB-2, 2010 (Invited paper)

[4]  
上野藤丸, 平田光男:  
入力の飽和を考慮した多項式入力型終端状態制御,  
電気学会 産業計測制御研究会,  
IIC-10-164, pp. 25-30, 2010

[5]  
Mitsuo Hirata and Fujimaru Ueno:  
Polynomial-input-type final-state control taking account of input saturation  
Pripriprints of the 18th IFAC World Congress,  
pp. 4061-4066, 2011

[6]  
上田伸治, 平田光男:  
ミラーの応答を考慮したガルバノスキャナの位置決め制御,  
電気学会 産業計測制御研究会,  
IIC-11-166, pp. 61-66, 2011

[7]  
田邊弘樹, 平田光男, 塩谷政典, 大塚敏之:  
終端状態制御によるコイルカーの制振制御,  
日本鉄鋼協会第163回春期講演大会,  
材料とプロセス(CAMP-ISIJ),  
Vol. 25, No. 354, 2012-3

[8]  
田中 翼, 平田光男:  
終端誤差を許容した多項式入力型終端状態制御,  
IIP2013 情報知識精密機器部門講演会,  
pp. 69-74, 2013

[図書] (計2件)

[1]  
Takashi Yamaguchi, Mitsuo Hirata, and Chee Khiang Pang:  
High-Speed Precision Motion Control,  
CRC Press, 2011

[2]

Takashi Yamaguchi, Mitsuo Hirata, and Chee Khiong Pang:

Advances in High-Performance Motion Control of Mechatronic Systems,

CRC Press,

2013年8月31日出版予定

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平田 光男 (HIRATA MITSUO)

宇都宮大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50282447

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし