

## 第3回ナノスケールサーボのための 新しい制御技術協同研究委員会議事録(案)

### 1. 日時・場所

日時:平成18年7月11日(火) 13:00~

場所:東京工業大学 すずかけ台キャンパス すずかけホール(H2棟) 2階 集会室2  
神奈川県横浜市緑区長津田町 4259 東京工業大学 精密工学研究所

### 2. 出席者

委員長 藤本(横浜国立大)

幹事 川福(名工大), 佐渡(東芝)

委員 石本(ソニー), 伊藤博仁(キヤノン), 浦川(ソニー), 奥山(日立), 小出(NHK),  
高倉(東芝), 原進(豊田工大), 原武生(富士通), 板東(JAXA), 平田(宇都宮大),  
堀(東大), 牧野内(ニコン), 山浦(東工大), 山口高司(日立), 楊(ニコン), 涌井(農工大)

幹事補佐 呉(東大)

オブザーバ 中村(東大)

(計 21名)

### 3. 資料

- NSS 3-0 第3回ナノスケールサーボのための新しい制御技術協同研究委員会開催案内
- NSS 3-1 第2回ナノスケールサーボのための新しい制御技術協同研究委員会議事録(案)
- NSS 3-2 産業計測制御研究会
- NSS 3-3 産業応用部門大会用のポスター
- NSS 3-4 講演のお知らせ
- NSS 3-5 RBF 補間を用いた速度・加速度推定

### 4. 議事

#### 4.1 第2回委員会議事録の確認

呉幹事補佐より第2回委員会議事録(案)の概要が朗読された(資料 NSS 3-1). 資料の番号付けを修正して, メーリングリストに流して承認を得ることにした. 第1回目の議事録もメーリングリストに流し出席事項を確かめてもらい, それを持って承認とすることにした.

#### 4.2 産業計測制御研究会に関して

川福幹事より, 9月8日開催予定の研究会に関する説明(資料 NSS 3-2)があり, 一般研究発表には25分, ベンチマーク問題に関する発表は15分の持ち時間が与えられているという注意事項を述べた. また, 藤本委員長より研究会の聴講は無料であるので, ぜひ聴講してもらいたいとの呼びかけがあった. また次回第4回目の委員会はこの研究会の昼休みを利用して開かれることを再確認した.

#### 4.3 産業応用部門大会用のポスターに関して(資料 NSS 3-3)

呉幹事補佐より, 8月開催予定の産業応用部門大会にて展示される予定のポスターに関する連絡があった. NSS 委員会の親委員会である産業計測制御技術委員会が作るポスターの一部として提出するポスターの草案を紹介した. ポスターに載せる写真は藤本委員長と伊藤博二委員に提供してもらっているとのことであった. 最終版が完成したらメーリングリストに流す予定なので, そこでまたコメントなどをもらいたいとのことであった.

#### 4.4 産業計測制御技術委員会の連絡事項

呉幹事補佐より6月28日に開かれた親委員会で議論された内容、特に産業計測制御技術委員会に制御の教科書を書いてもらいたい、との要望が電気学会の本部からあったことの報告があった。産業計測制御技術委員会では特に新しく教科書を作ることにはしないという結論になったが、もしこれに関する意見などがある場合には、藤本委員長や呉幹事補佐の方に連絡してもらうことにした。

#### 4.5 産業応用部門大会のシンポジウムに関して

川福幹事より、NSS委員会のシンポジウムが夏の産業応用部門大会の2日目の午前中に開かれることの連絡があり、ぜひご聴講をという呼びかけがあった。

#### 4.6 George T-C Chiu の講演に関して(資料 NSS 3-4)

藤本委員長より7月13日、横浜国立大学開催予定のGeorge T-C Chiu教授の講演会知らせがあった。位置決め制御に用いられている繰り返し制御の講演であるので、多くの人がこられるようにという呼びかけがあった。

#### 4.7 次回以降研究会の計画に関して

佐渡幹事補佐から次回以降の研究会計画に関する説明があり、今回は研究会の昼休みを利用して研究会を開催すること、それ以降の5.6回目委員会での話題提供に関しては春に集計したアンケート結果に基づいて、開催が近くなってきたらお願いするとの連絡があった。

#### 4.8 HDD ベンチマーク Ver.2 に関して

平田委員より6月8日に公開された新しいHDDベンチマーク問題に関する説明があった。

- 1)メカモデルを実システムに基づいたものにした。
- 2)外乱の周期を外乱ごとに設定できるようにした。
- 3)外乱ごとの外乱生成コマンドを作成した。
- 4)低域を変えることでシーク制御にも対応できるようにした。

ことが新しいバージョンで変更された事項であるとの説明があった。また以下のような議論が行われた。

- 1)  $\pm 0.1\text{track}$  を終了判定としているが残留振動が評価されないのではないか。  
→ 速度なども見た方がよいが、まずは目標トラックの  $\pm 0.1\text{track}$  以内に収まった時間をシーク時間とする。
- 2) limit を設けていないのはよいか  
→ ショートシークの時はなくてもよいのではないか
- 3) シーク中の外乱を入れるかどうか  
→ 定常外乱よりはゲイン変動を入れた方がよい。その変動幅は5%程度でよい。
- 4) 移動トラックは  $10\text{track}$  だけでよいか  
→ オーバシュート特性と高周波振動特性が両方現れるように  $1\text{track}$  シークの方も評価するようにする。
- 5) default のフィードバック制御器も必要ではないか。  
→ 今後の課題としたい

#### 4.9 その他

委員会に始めた参加した山浦委員、高倉委員、坂東委員の事項紹介があった。また、原進委員から7月22日豊田工業大学で開かれるHDD tutorialの宣伝があった。また佐渡幹事が見学先へのお土産を会費から支出することに関して、参加した委員全員の許可を得た。

## 5. 講演会

### 山浦 弘（東京工業大学）

「RBFを用いた速度・加速度推定」(資料NSS 3-5)

制御や同定によく用いられる変位・速度・加速度の状態量を、加速度計やエンコーダなど限られたセンサから精度よく推定するための新しい推定法を提案している。数学モデルを必要とする従来のオブザーバ設計を利用した推定とは違う、モデルを利用しない変位データのみを用いた推定である。

一定のサンプリング周期で得られた変位のデータを Radial Basis Function(RBF)の線形結合で補完して連続関数を求める。その関数を解析的に微分することで速度・加速度の推定値を得る手法である。ここでは補間関数の基底をガウス関数、非補間関数をサンプルデータとして適切な結合計数を求めている。また、最新の変位データを5~10個のみ用いたオンライン推定法も提案している。

被補間関数を単一周波数の調和関数とし、その周波数と推定精度の関係を示す周波数特性を持ってオンライン・オフライン時の推定精度を検証している。また、複数周波数波形を含む被補間関数に提案手法を適用して有効性と限界性を確かめた。

Q1: RBF の特徴が低周波で低くなるのはなぜ？

A1: まだはっきりした原因はわからない。

Q2: ガウス関数を基底にした理由は？

A2: RBF ネットワークを従来から利用してきたため。その他に良い関数があればそれを使っても良い。

Q3: 元の信号にサンプリング周波数より高い周波数が含まれていればどうなるのか。不連続な加速度などに対してはどうなるのか。

A3: 基底をどう選ぶかの話。不連続信号、高周波にはやはり制約がある。

Q4: 計算時間はどれほどなのか？

A4: 結構かかる。

Q5: FIR の周波数特性は何を入力としたものであるか、位相は遅れていないか？

A5: 真の速度との比較した特性である。また位相も実は遅れている。

Q6: 積分する RBF はないか？

A6: 特に問題にならないので、ない。微分は補間が必要だが、積分はそのまま積分すればよい。

Q7: オンライン推定は状態を持たせて行うのか？

A7: 誤差がたまるので、毎回計算を行うようにしている。

### 佐藤 海二（東京工業大学）

「精密テーブル機構とその制御」

制御知識やパラメータ同定が必要なアドバンス制御は、実際の現場ではまだそれほど受け入れられていない。そこで、PID より良い制御性能を示しながらも同定など、アドバンス制御のハードルになっていた難点を克服した制御法を提案した。オープンループ制御で得られた結果だけによるモデリングでシステム同定の必要性をなくし、非線形特性までも考慮できる NCTF(Nominal Characteristic Trajectory Following)制御を提案する。

矩形派を入力として入れたときの減速域での出力速度と位置の誤差を位相平面上に書き、それを規範軌跡としてそれに追従する制御器を設計する。提案手法の性能を、同じ周波数帯域をもつ PID 制御器の性能と比較したところ、摩擦や慣性を変えても制御性能が落ちないロバスト性を示した。

Q1: 目標速度のモデルとしてみてよいのか

A1: そうである。

Q2: 位相平面を速度と位置制御に分離できないのか？

A2: 位置軌道は持っていないのでできない。

Q3: オープンループで得た結果をそのまま trajectory とするのか？

A3: オープンループ制御時の制御入力をうまく工夫して必要な trajectory を作る。実際のプラントから得られた trajectory なので安定性がより保証される。

Q4: PTP 以外の軌道追従制御には適用できないか？

A4: 軌道追従制御に適用しても従来の PID よりよい結果が得られる。

Q5: 構造は簡単に見えるが性能を向上させている。その理由は何に起因するのか？

A5: 実システムに基づいた trajectory を利用しているのがロバスト性の原因になっているのではないかと思う。

## 進士 忠彦（東京工業大学）

### 「精密スピンドルとその制御」

まず、コンパクトな超精密3次元加工機を実現した。提案する加工機は電磁アクチュエータで主軸を直接駆動、またZ方向の案内として静圧空気軸受けを利用することで小型化を図り、フルクローズドループで超精密化を実現した。さらに外乱オブザーバ機構を利用して接触力を推定している。この加工機を利用して 10nm の加工分解能を持つ超精密加工を実現している。

また、形状放電加工機に用いる磁気軸受スピンドルを提案している。高応答・大ストロークを持つ 5 自由度制御型コンパクト磁気軸受スピンドルを、永久磁石・VCM型スラスト駆動を利用して試作している。その性能としてZ軸方向には 250Hz、並進方向と傾き方向にはそれぞれ 160Hz と 145Hz の応答速度を実現している。また精度として、ラジアル方向には半径 10  $\mu\text{m}$  の円運動を、傾き方向には 0.1mrad のすりこぎ運動を実現している。

Q1: VCM は一方向なのか？

A1: そうである。Z軸方向のみの運動を制御している。

Q2: 加工時のスピンドルの剛性は必要でないか？

A2: マイクロ加工のため大きな切削力は働かないが、剛性は重要である。非制御方向（ラジアル方向）は、多孔質セラミックを用いた静圧空気軸受で、軸方向は、ボイスコイルモータをハイゲインでフィードバック制御することで、できるだけ高い剛性、振動減衰性を実現しようと試みている。

Q3: 工具の取付金具（チャック）

A3: ダイヤモンド工具は、焼きばめリングを用いて、スピンドルヘッドに取り付けている。

Q4: ハイブリッドの応答帯域

A4: 現状で、Z軸方向は200Hz程度。

Q5: 2000rpm動作でジャイロモーメントは？

A5: 出ていない。

Q6: 放電加工器の電気絶縁は？

A6: している。

Q7: すると、Z軸方向はVCMに電流を流す？

A7: 最終的には永久磁石を用いた重力補償によりバイアス成分を除去する。

Q8: バイアス電流と熱の関係

A8: バイアス電流を大きく与えると当然、発熱、スピンドルの温度上昇が発生する。但し、スピンドルを回転するためのエアタービンの冷却作用により、ある程度温度上昇は抑えられている。

Q9: ナノ位置決めピコ位置決めでの知見について、

A9: ピコ位置決めについては、フィルタを多用することで実現できるが、これは定常状態での話。移動制御となるとナノ位置決め精度しか出ない。それは、センサによる要因が大きいと考えている。

## 6. 見学会

最後に場所を提供してもらった精密工学研究所の見学を行った。

- 1) 新野研究室 超精密加工機用XYテーブルなど
- 2) 佐藤(海)研究室 超高速リニアモータなど
- 3) 香川・川嶋研 空気サーボ式除振台など
- 4) 下河辺・進士研 超精密スピンドルなど