

## 第6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1月18日(水) 14:00~  
場所:〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1  
東京大学生産技術研究所 第4会議室

### 2. 出席者

委員長 藤本(横浜国立大)  
幹事 川福(名工大)  
委員 熱海(日立), 伊藤和晃(豊田高専), 伊藤博仁(キヤノン), 岩崎(名広大), 内田(日立),  
浦川(ソニー), 河辺(富士通), 中村(安川), 原武生(富士通), 坂東(JAXA),  
山口高司(日立), 楊(ニコン)  
幹事補佐 呉(東大)  
代理出席 薄井(日立, 奥山委員の代理出席)  
オブザーバ 高木清志(キヤノン) (計 17名)

### 3. 資料

NSS-6-0 第5回ナノスケールサーボのための新しい制御技術共同研究委員会議事次第  
NSS-6-1 第4回ナノスケールサーボのための新しい制御技術共同研究委員会議事録(案)  
NSS-6-2 第83回産業計測制御技術委員会議事次第  
NSS-6-3 Parameter Optimization for NC Machine Tool Based on Golden Section Search Driven PSO  
NSS-6-4 遺伝的アルゴリズムによる高速・高精度位置決め制御系設計

### 4. 議事

#### 4.1 前回の議事録確認(資料 NSS-6-1)

呉幹事補佐より第5回委員会の議事録が読まれた。原委員より資料番号の付け方に関する指摘があり、それを修正した後、正式な5回委員会の議事録とすることにし、承認された。

#### 4.2 産業計測制御技術委員会の報告(資料 NSS-6-2)

藤本委員長より、12月20日に開かれた親委員会の報告があり、とくにそこで開かれた優秀論文授賞式で、NSS委員会の委員が3名(伊藤和晃, 長谷川(平田), 呉)表彰されその中で二人(伊藤和晃, 長谷川(平田))は電気学会のA賞を受賞することになったことを報告した。また、委員の電気学会への加入をお願いした。

#### 4.3 ホームページの英語化について

呉幹事補佐から委員会のホームページの英語化に関する報告があった。国際学会などでベンチマーク問題が注目を浴びている中、まずホームページからベンチマーク問題がダウンロードできるように、英語の説明を追加しているとの報告があった。さらに英語で公開できる内容に関しては今後英語化していく予定であるという話があった。

#### 4.4 アンケート協力の願い

藤本委員長より、佐渡幹事が集計しているアンケートへの協力願いがあった。今後の委員会の活動指針としたいとのことであった。

#### 4.5 学会報告

岩崎委員から11月に開かれたIECONの超精密制御関係のスペシャルセッションの報告があり、狭い場所での発表であったが外部の人も多数聞きに来ていたとの報告があった。これからも2007年6月のISIE, 2007年11月のIECON, 2008年3月のAMCでスペシャルセッションを開いていく予定や参加の呼びかけの話があった。また、原武生より委員よりシンガポールで開かれたAPMRCの報告があり、Tomizuka, Horowitzの先生方やシンガポールのDSIなどの企業からの発表が多数あったとのことであった。

#### 4.6 その他

キヤノンからオブザーバで参加した高木さん、日立から奥山委員の代わりに代理参加した薄井さんの自己紹介があった。

### 5. 講演会

#### 呉 世訓（東京大学生産技術研究所）

##### 「GPSO(黄金分割法適用PSO)を利用したNCパラメータの最適化」

GA, PSOなどの世代更新に基づく非線形最適化が制御の各分野に応用されている中、納入後現場での調整を必要とするNCパラメータの調整をこの非線形最適化を適用して自動的に行う。

そのNCパラメータの自動調整は少ない試行回数、また実機に害を与えない範囲内での調整過程を必要とする。これに対してGAを利用したパラメータ自動チューニングの先行研究があったが、GAは最適パラメータに向かっていく特性がそれほど顕著でなく、また初期値依存性が高いためNCの自動調整に適しているとはいえない。そこで、同じPopulationという概念を利用するPSOを利用することにした。PSOは自分の前回の更新特徴をどれほど持ち続けるか、その量をパラメータとして設定、その値により全体の最適化特徴をグローバル探索にするかローカル探索にするか設定することができるが、やはりステップ幅の微調整に関して弱い特徴を持つ。そこで、黄金分割法を取り入れ、微調整ができるステップ幅が作れるように改善を行った。過去最もよかった最適値に対してもっとも急な傾斜を持つ方向を決め、世代の中の一つの個体を黄金分割法に基づき更新する。その結果、最適点の周りが急な傾きを持つ問題に対しては良い最適化を行えることが確認でき、適合度空間に指数関数フィルタをかけることですべての問題に対して最適化特性を向上できるようにした。

それを実機のNCマシン、モータを含んだHardware-in-the-loopシステムに適用して実験を行った。その結果、やはりGAによる最適化は最適化性能が悪く、チューニングが正しく行われていないが、PSO, GPSOを適用することでより確実に最適パラメータを探し、パラメータをチューニングしていることが確認できた。

Q1. PSOのひとつの世代の個体数は一般的にどうなるか？

A1. 最適化の対象となるパラメータ数の5倍程度にしている。

C1. さらに各個体に個性を持たせるのはどうだろうか。

C2. Evolutionary StrategyとPSOは共通点が多い。

Q2. 軌跡でなく制御パラメータの最適化は行えるか。

A2. 最終目的はできるだけ多くのパラメータを自動チューニングできるようにしたい。

Q3. 内部制御パラメータのオートチューニングを行うときの安定化問題は大丈夫なのか。

C3. 安定性の確認をオフラインで別に行い、安定性の確認が取れたパラメータだけを実機に投入して実験を行う研究もある。

C4. フォードフォワードの指令値調整問題などは解析的に解ける線形問題。解析的に解けない非線形問題の最適化などにこの手法を適用できたらより意義のある研究になると思う。

#### 伊藤 和晃（豊田高専）

##### 「遺伝的アルゴリズムによる高速・高精度位置決め制御系設計」

この研究で制御対象としているチップインサータでは、特に複数の負荷条件、ボールねじ固有の特性

による機構振動周波数の変動に対応できるロバストな制御が必要となっている。そこで GA(遺伝的アルゴリズム)を利用して単一の補償器で応答のバラツキを低減できるように制御器を設計した。GA は時間応答特性, ロバスト安定評価, 補償器次数など様々な項目を評価関数として持つことができ, ここではフィードフォワードと位置指令の同時設計, フィードバック  $H_{\infty}$ 制御器の重み関数の設計, リアルタイムのオンサイトパラメータチューニングに利用されている。

負荷の重量やテーブル位置により変化するチップインサータのボールねじ共振周波数に対応できるように 2 自由度制御器を設計している。フィードバック制御器は  $H_{\infty}$ 制御理論で設計し, モデル化誤差を覆いつつサーボ帯域も確保できる重みをひとつ選定, ロバスト安定化を実現した。そしてフィードフォワード制御器に関してはノッチフィルタ, サーボ帯域を決める規範モデル, 位置指令の加速度パターンなどを自由パラメータにし, すべての変動するパラメータに対して, オーバシュート, 整定時間, 機台振動が統合的によくなるように GA を持って最適化を行った結果, 実験でも所望の制御性能をあげることができた。

そして, フィードバック制御器設計においても,  $H_{\infty}$ 制御理論で設計する際の重み関数のパラメータを, GA を利用して最適化できた。ゲイン余裕, 位相余裕の周波数領域での特性, 残留振動や機台振動の時間領域での特性に  $H_{\infty}$ ノルム評価に関する項目までを評価関数に取り入れ最適化することができ, 実験を持って実証できている。

最後に GA により制御器の現場での調整も行っている。フィードフォワード制御器のサーボ帯域パラメータ, フィードバック補償器のゲイン, 外乱オブザーバのフィルタ部のパラメータをリアルタイムで最適化した。実機による実験を行いながらの最適化であるため, GA の過程に出てきたパラメータすべてを実装し実験を行うのではなく, ロバスト安定性をオフラインで検証, 安定だと評価されたパラメータだけを実装している。

Q1: フィードフォワード制御器の方に既約分解を利用してプラントの特徴を入れているが

A1: モータ位置までのプラントの振動特性と, フィーダー振動特性を, 逆モデルを利用して抑えている。

Q2:  $H_{\infty}$ 制御器の次数は?

A2: 重み 2 次, プラント 2 次のコントローラ。2 次フィルタの直列接続で構成している。

Q3:  $H_{\infty}$ 制御器の難しい高次のパラメータを最適化できないか?

A3: 重み関数の次数を増やすことで十分対応可能である。

Q4:  $H_{\infty}$ 制御器の GA による最適化のとき,  $\gamma$  が 0.95 より小さくなると帯域はどうなるのか?

A4: 現在の一般化プラントの構成では  $\gamma$  が小さくなりすぎると帯域が下がり応答性を確保できない。

C4: ここで使われている一般化プラントは平田先生が良くないとされているプラント構成となっており, この一般化プラントを工夫することで  $\gamma$  が小さくても帯域を下げることはなくなる。