

平成21年 2 月 17 日現在

研究種目：特定領域研究  
 研究期間：2004～2008  
 課題番号：16078201  
 研究課題名（和文） 周波数領域設計での入力外乱推定オブザーバによるアクチュエータのロバスト制御  
 研究課題名（英文） Robust Control of Actuator based on Input Disturbance Estimation Observer designed in Frequency Domain  
 研究代表者  
 白石 昌武 (SHIRAI SHI MASATAKE)  
 茨城大学・理事・副学長（教育）  
 研究者番号：10091860

## 研究成果の概要：

精密三軸位置決め系（三次元測定機）の縦軸に焦点を絞り、その軸先端の振動抑制を主目的とした。具体的には、提案した周波数領域設計でのオブザーバ（推定器）が振動外乱に対しその抑制にどれだけロバスト推定が可能かを、部分空間法モデルを用いたシミュレーションと実機による検証を行った。その結果、オブザーバ設計の3ステップにおけるパラメータの適宜設定により、振動抑制に十分なロバスト性が得られることが確認された。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成16年度	6,200,000	0	6,200,000
平成17年度	5,800,000	0	5,800,000
平成18年度	6,200,000	0	6,200,000
平成19年度	2,100,000	0	2,100,000
平成20年度	2,200,000	0	2,200,000
総計	22,500,000	0	22,500,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：周波数領域設計、ロバスト性、入力外乱推定オブザーバ、軸の振れ、モデル位置決め、アクチュエータ

## 1. 研究開始当初の背景

2003年に、精密工学会超精密位置決め専門委員会が実施した位置決めに関するアンケート調査によると、位置決め系への外乱の影響は極めて大きく、位置決め精度を劣化させる主要因となっている。特に振動と摩擦の影響が全体の8割以上を占めている。また多軸の位置決めでは軸間の干渉によって生じ

る位置誤差も問題となっている。このような外乱を稼動中に精度よく推定または検出する有効な方法は未だない。それらを精度よく推定できれば、高精度の位置決めが達成される。このような背景を踏まえ研究を具体的に進めるため、三軸の精密位置決めシステムについて、申請者等が提案した周波数領域でのロバストな外乱推定オブザーバを用いて入

力振動外乱を推定し、それによる高精度位置決めを達成するためのロバストなアクチュエータ制御法を構築することを提案した。

## 2. 研究の目的

超精密位置決めは今後最も期待される重要な技術の一つであり、その高精度と高速化への要求は年を追うごとに高まりつつある。種々のアクチュエータが用いられる中で、いかにアクチュエータの優れた特徴を生かし、かつ種々の外乱の影響下で、ロバストな制御系を構成するかが高性能位置決めの成功のカギである。

そこで位置決めの頂点であるナノテクでの位置決め技術を目指し、本研究では以下のことを最終目的とした。

(1) 三軸の位置決め装置の特に縦軸（実用においてはこの軸が作業の中心となっている）を対象に、外乱の影響として最も大きい縦軸振動について、すでに提案した周波数領域におけるロバストな入力外乱推定オブザーバを用いて外乱推定を行う。

(2) 推定結果を用い、オブザーバを併用したアクチュエータの高精度・高速位置決め制御を構築し、振動を抑制する

## 3. 研究の方法

(1) **予備考察**：提案した周波数領域でのロバストな入力外乱推定オブザーバに関し、精度をキーポイントとした二つの制御対象を当初設定した。① 超精密を目指した三軸位置決め系、② 精密を目指した脳波信号によるロボットマニピュレータの制御系。①では、特に縦軸先端の位置決めの際の振動が問題となった。高精度化かつ高速化のためには振動をいかに抑制するかがキーポイントとなる。②では、感情に対応した脳波信号によるマニピュレータの制御を行う場合、ノイズに埋もれた $\alpha$ 波信号をいかに正確に抽出するかが鍵となる。精度の異なる①、②の二つの制御対象を設定した狙いは、本オブザーバが対象の要求精度に関係なく、いかなる対象についても有効であることを追求するためである。

(2) **予備考察の結果**：まず設定対象の②については現象そのものが高速でないため、本オブザーバが精度的にも問題ないことが確認された。一方①の精密を目指した三軸位置決め系の縦軸については、高速駆動時の振動が位置決め精度に大きく影響し、PID制御では限界があることが判明した。

この結果が本研究遂行の出発点となった。

### (3) 研究の具体的方法

①振動制御を実機にて遂行するため三軸位置決め系の縦軸に超小型の加速度センサを装着し、同時に軸の振動状態を測定するため高精度レーザ変位センサを用いた。

②縦軸のダイナミクスとしてARXモデルを適用して解析を行い、実験との比較を行うことで本モデルの精度的妥当性を追求した。

③実機の三軸位置決め系は高速駆動の場合もあることから、その場合の制振制御を想定し、モデル同定からの予測速度と逆位相の動きについて、微小駆動により制振効果をもたらす制御法を提案した。これは一種の予見制御法で、まずオフラインでプローブ先端位置までの振動特性を離散有理関数モデルによりモデル化する。このモデル化の妥当性を比較確認するためARX法を用いると共に、新たに部分空間法を適用した。

④これに関する予備実験によると、低次元モデルによる同定性能に関しては、ARXモデルより部分空間法が有理であることが確かめられた。そこで本手法により得られる低次離散有理関数モデルと、予備実験で得たむだ時間解析結果を基に、制御信号から駆動系の駆動時刻と、その時点における縦軸先端位置の速度を推定し、逆位相の駆動量を微小駆動として与えることで制振を試みた。

⑤最終的には提案した周波数領域設計におけるオブザーバが、入力外乱つまり縦軸振動に対しその抑制にどれだけロバスト推定が可能かについて、部分空間法モデルを用いてシミュレーションを行った。と同時に実機による実験結果との比較を行い、オブザーバ設計の3ステップにおけるパラメータの適宜設定により、十分なロバスト性が得られるかどうかを検証した。

⑥提案した入力外乱推定オブザーバを設計する際の最大の課題は、パラメータをいかに最適化するかである。最適化のための評価関数として、シミュレーションを元に出力波形の二乗誤差を導入し、それを最小化することに注目した。

## 4. 研究成果

以下の四項目について成果が得られた。

### (1) 軸間の干渉について：

研究開始当初の背景で言及したように、多軸の位置決めでは軸間の干渉によって生じる位置誤差も問題となるので、それに関し成果を述べる。二軸以上の位置決め系ではいかに駆動部の剛性を大きくしても、それぞれの

軸の運動に対するお互いの干渉を避けることはできず、特に高速時にはその影響が位置決め精度に大きく影響する。そのためには軸間の干渉を取り除く非干渉化 (Decoupling) を行わなければならない。つまり位置決めの高精度化と高速化のためには、

- ① まず駆動軸間の運動に対して非干渉化。
- ② 非干渉化された系に対して (各軸が独立に制御できる)、測定が困難な摩擦や振動などの外乱をオブザーバで推定し、それらの影響を極力抑えるための制御を施す。

これが本研究での本質的振動抑制の解決法と考えた。

この干渉問題に対し二次遅れ系で近似した位置決め系を基本に、外乱補償機能をインプリットに状態(速度)オブザーバに組み込んだ。これによって駆動系に入力する指令と送り系の位置出力のみから、少ない制御器次数 (つまり最小の演算量) でロバスト性を保ちつつ非干渉化を簡単に図ることができた。この場合、制御目的は駆動系の非干渉化と、各駆動軸の希望伝達関数に対する極配置となる。すなわち単に制御器次数が少ないだけでなく、モデル自体にも外乱補償機能を含ませている極めてシンプルな設計法と制御アルゴリズムを設計し、まず非干渉化が達成された。このような簡単な方法でロバスト性を維持しつつ非干渉化が可能となることは大きな成果の一つであり、他の制御系への普及効果も大きい。

## (2) 入力外乱推定オブザーバについて：

Luenberger に代表されるオブザーバは、線形システムの時間領域表現である状態方程式をもとに、入出力信号からシステムの内部状態を推定する方法で、その低次元構成法としてゴピナス法が良く知られており、超精密位置決めを始め広く一般に使用されている。アルゴリズムステップ数が多く煩雑な所が欠点である。これはシステムの内部状態を推定する方法で、外乱を推定する方法ではない。その発展形として多用されてきた外乱オブザーバ (時間領域での設計) は、外乱をも推定し得るロバストな方法として活用されている。しかしその性質上高速位置決めのような高速なシステムへの適用には限界があり、アクチュエータ本来の機能が発揮できず、かつ推定精度的にも問題がある。またこれら従

来型のオブザーバを適用して状態フィードバックにより高精度化と高速化を図ろうとすると、前置補償器の機能が失われて制御性能が劣化してしまうという不都合が生じる。

一方、国内外を通じこれまで適用されたアクチュエータ系へのオブザーバについては、すべて時間領域に基づく設計であり、アクチュエータの特性と併合するオブザーバの特性が陽に把握し難く、かつ前述の欠点を持っている。従来の時間領域でのオブザーバとは異なり、本提案のロバストな入力外乱推定オブザーバは、アクチュエータ系とオブザーバの特性が陽に理解し得る周波数特性上での設計法である。超精密位置決めで重要な役割を果たすアクチュエータ本来の機能を発揮し、かつそのフィードバックにより高精度・高速化を図ろうとする方法は本研究が始めてで、この点に最大の特色と独創性がある。なお本提案法のオブザーバは位置決めに限らず、広く一般のシステムにも容易に適用し得る方法であり、そのような観点からも普及効果は極めて大きい。

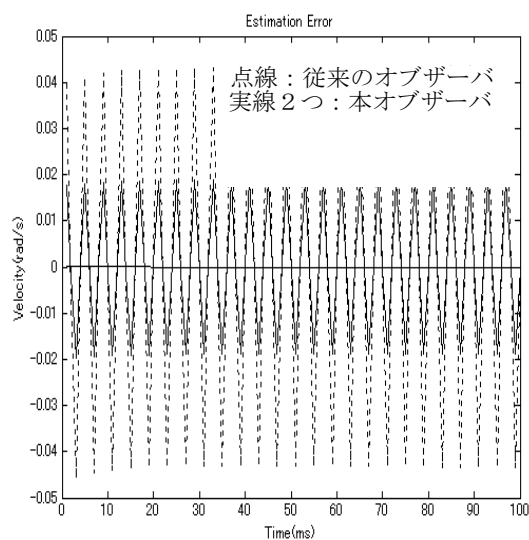


図1 位置推定誤差

図1は正弦波状の外乱に対して従来のオブザーバと本提案のオブザーバを比較して例で、設計のパラメータを適宜選ぶことにより、位置の推定誤差がほぼ0レベルに収束している。

## (3) ロボットマニピュレータの制御について：

国内外を通じて初めての試みとなった脳波信号の $\alpha$ 波によるロボットマニピュレータの制御では、まずオブザーバを併用せず、マニピュレータ各関節の角度位置決め用のPID追従制御を行った。マニピュレータを比

較的低速で駆動させた場合は、 $\alpha$ 波に含まれるノイズのため運動に若干乱れ（細かい振動状態）が現れたが、その状態で一応の追従は達成された。しかしそれを高速駆動するとノイズ外乱のためマニピュレータに発振現象を生じ、追従は殆ど不可能であった。そこで $\alpha$ 波信号の測定に本提案の入力外乱推定オブザーバを適用し、測定を試みた。その結果ノイズを含まない忠実な $\alpha$ 信号が再現され（図2）、マニピュレータのスムーズな動作が確認された。つまりノイズが含まれるような測定においても、本提案のオブザーバの有効性が確認された。

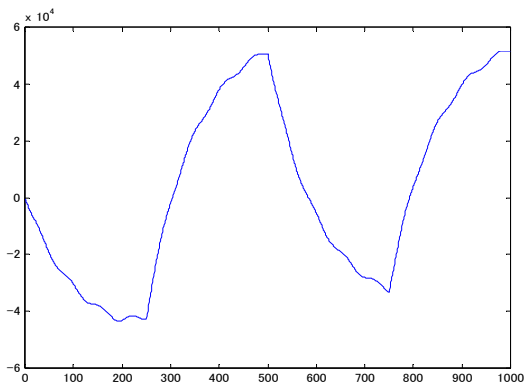


図2 ノイズが除去された $\alpha$ 波信号

#### (4) 三軸位置決め系について：

##### ① ダイナミクスのモデル化

縦軸のダイナミクスとして比較的良好とされるARXモデルを適用して運動解析を行い、実験との比較を行うことでARXモデルの精度追求を行った。それによるとある程度の精度向上の妥当性は得られたが、高周波の振動に対しては精度的に十分でないことが判明した。そこで研究方法の項で述べた部分空間法を適用した結果、低次元モデルによる同定性能に関し、ARXモデルより部分空間法が有理であることが確かめられた。本方法によるモデル化は、特に低次元を必要とする場合は有効であると思われる。

##### ② 振動抑制

最終的には部分空間法モデルを用いてシミュレーションと実機による実験結果との比較を行い、本提案のオブザーバの適用によりロバスト性の高い振動抑制効果が得られた。なお本オブザーバは、対象システムの伝達関数と、有理多項式とフーリエ級数で表された入力外乱の周波数特性を基に直接構成する方法である。この場合、近似した入力外乱の

周波数特性に応じ、オブザーバの精度評価指標となる推定誤差のフィルタ構造をある幅を持って直接操作できるので、ロバスト性に優れ、かつ従来用いられてきた時間領域法に比較して非常に見通しよく外乱推定特性の設計が可能となる。ロバスト性が高いので、入力外乱を正確に表現できない場合でも効果が得られる点に本推定オブザーバの大きな特徴がある。そのような観点からも本オブザーバの波及効果は大きいと言える。

#### 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4件）

- ① M. Shiraishi, H. Sumiya and S. Aoshima; In-Process Diameter Measurement of Turned Workpiece with Curvatures by Using Sensor Positioning, Trans. ASME, Manufacturing Science and Engng., Vol. 128, 188-193, 2006 査読有.
- ② 伊藤彰啓、白石昌武；ロバストオブザーバを併合したサーボ系の外乱ロバスト性、日本機械学会論文集(C編)、Vol. 71, No. 702, 561-566, 2005, 査読有.
- ③ 菊池誠、白石昌武；小径ドリルにおける加工状態の推定制御、日本機械学会論文集(C編)、Vol. 70, No. 699, 3266-3270, 2004, 査読有.
- ④ T. Yamagiwa and M. Shiraishi；Control Structure and Relative Displacement Occurrence in Multi-inertia System, J. of JSPE, Vol. 70, No. 12, 895-899, 2004, 査読有.

##### 【学会発表】（計14件）

- ① M. Shiraishi；Advanced Graduate Course Lecture on Mechatronics, Technical University of Munhen, 2008, Lecture Note.
- ② M. Shiraishi；Seminar on Manipulator Control by Using Human Emotion, University of Canterbury, 2007, Lecture Note.
- ③ M. Shiraishi；Advanced Lecture on New Observer, Sydney Institute of Technology, 2006, Lecture Note.
- ④ M. Shiraishi；Is It Possible To Control Air Flow By Using Laser Photon, Proc. 4th ASME Int. Conf. on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, Ireland, 2006, CD-ROM. 査読有.
- ⑤ M. Shiraishi；Advanced Lecture on Mechatronics, IEEE, Canada, 2006, Lecture Note.

- ⑥ 川上太郎、住谷秀保、白石昌武；ヒトにやさしい感情成分導入ロボット制御法と誘発性視覚効果の検証、日本機械学会関東支部講演会、39-41, 2006.
- ⑦ 坂啓太、住谷秀保、白石昌武；脳波利用によるヒトにやさしい動作を考慮したマニピレータ駆動の心理的効果、日本機械学会関東支部講演会、41-42, 2006.
- ⑧ J. Matokowski, H. Sumiya, S. LABERGE and M. Shiraishi, Volitional Eye Movement Detection Using Wavelet Transform, 日本機械学会関東支部講演会、43-44, 2006.
- ⑨ M. Shiraishi; Sensory operation of robot manipulator by using brain-wave signals, Proc. IEEE Symp. On Computational Intelligence in Robotics and Automation, Finland, 2005, CD-ROM. 査読有.
- ⑩ M. Shiraishi; Robot Manipulator Operation by Using Brain-Wave Signal, Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robot and Systems, Canada, 2005, CD-ROM. 査読有.
- ⑪ M. Kikuchi and M. Shiraishi; Positioning Stability on Operative Force Feedback Micro-manipulator, Proc. Int. Conf. on Positioning Technology, CD-1, Hamamatsu, 153-157, 2004. 査読有.
- ⑫ A. Ito and M. Shiraishi; Robust Stability of Low-order Robust Pole Placement at Load Fluctuations in Mechtronics System, Proc. Int. Conf. on Positioning Technology, CD-2, Hamamatsu, 158-163, 2004. 査読有.
- ⑬ M. Shiraishi; Optical In-Process Prediction of Drill Breakage, Proc. Japan-USA Symp. On Flexible Automation, Denver, 2004. CD-ROM. 査読有.
- ⑭ T. Yamagiwa and M. Shiraishi; Control Structure and Method for Reducing Relative Displacement In a Scanning Mechanism, Proc. Int. Conf. on Positioning Technology, CD-4, Hamamatsu, 170-175, 2004. 査読有.

#### [図書] (計2件)

- ① 白石昌武、日刊工業新聞社、入門現代制御理論 (改訂版)、2006, 183 ページ、
- ② 白石昌武 (共著)、(株) 産業技術サービスセンター (精密工学会編)、実用精密位置決め技術辞典、2008, 355-359, 377-382.

[その他]

ホームページ等

<http://info.ibaraki.ac.jp/scripts/webse/arch/index.htm>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

白石 昌武 (SHIRAIISHI MASATAKE)

茨城大学・理事・副学長(教育)

研究者番号：10091860