

令和元年6月3日現在

機関番号：13903
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2016～2018
課題番号：16K06413
研究課題名(和文) 減速機を内在する位置決め機構に対する負荷状態量フィードバックによる高速高精度化

研究課題名(英文) Fast and Precision Control by Load-State Feedback for Positioning Devices with Reducers

研究代表者
岩崎 誠 (Iwasaki, Makoto)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10232662
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、減速機を内在する位置決め機構に対する高速・高精度位置決め制御系設計に関する以下の項目を、負荷状態量(速度・位置・加速度)センサによるフルクロード2自由度制御構築を前提に、位置決め精度や振動抑制に関する所望の制御仕様を満足する負荷状態量フィードバック制御系の方法論・設計論を、産業界と連携しながら学理に即して展開した。
1) 減速機の出力(負荷)側に状態量センサを設置する機構設計を具現化し、併せてセンサの高分解能信号処理法を提示した、2) フルクロード2自由度制御系の設計論を実機検証しながら展開し、さらにフィードフォワードとフィードバック補償器の連成設計への応用を拓いた

研究成果の学術的意義や社会的意義
フルクロード補償器設計は既に各種手法が提案されているが、本研究の機構・補償器設計は、実システムで考慮すべき非線形性や要求仕様に基づいて具現化するという【実践性】を有し、フルクロード制御系が持つ課題を学問的かつシステムティックに扱うという【特色】を有するものである。この極めて実践的かつ学理に即したアプローチは、産業用ロボットのティーチング工程を劇的に低減でき、メカトロニクス機器の精密位置決め制御分野の進展に大きく貢献し、その波及効果は極めて大であり、本研究が諸外国に対する日本の産業界の差別化・地位向上へ貢献できる。

研究成果の概要(英文)：The research has strongly developed the following themes on the fast and precision control for positioning devices with reducers in various mechatronic systems, on the basis of introducing the 2-degree-of-freedom control with the full-closed feedback compensation using the load-state sensors (velocity, position, and acceleration):
1) the mechanical design has developed to realize the full-closed feedback control by load-side sensors, as well as the sensor signal processing approach for the sensors,
2) the proposed full-closed 2-degree-of-freedom control design has been implemented and verified by a series of experiments and, in addition, the cooperative design between feedback and feedforward compensations in the positioning.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：高速高精度位置決め フルクロードフィードバック 2自由度制御

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高精度位置決めは、様々な精密加工や組立を支えるメカトロニクスの要素技術の一つに挙げられるが、その精度は加工機の機械的運動精度のみならず、位置決め機構の制御性能にも大きく依存する。国内外で競争力を発揮し、高付加価値で差別化が可能、かつ製造コストの削減や製品の低価格化も可能な精密加工機械の実現には、**所望の制御特性を満足することのみならず**、設計・調整の工数を抑え、機械設置環境にも適応可能な位置決め制御の実践的技術が必要不可欠である。

図1は、高速高精度位置決め制御を実現する2自由度制御系の基本構造・設計概念と、実現すべき制御目的を纏めた一例である。2自由度制御系は元来、目標値追従性を規定するフィードフォワード(以降、FF)補償器と、システムの安定性を規定するフィードバック(以降、FB)補償器を、それぞれ独立に設計可能な特徴を有し、機構やセ

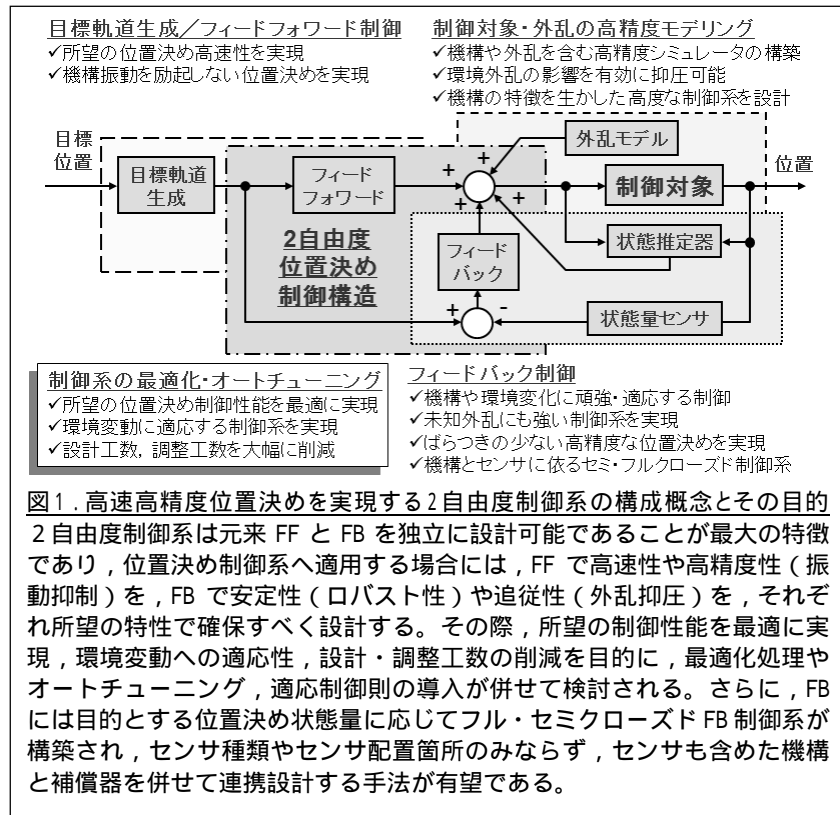


図1. 高速高精度位置決めを実現する2自由度制御系の構成概念とその目的
2自由度制御系は元来 FF と FB を独立に設計可能であることが最大の特徴であり、位置決め制御系へ適用する場合には、FF で高速性や高精度性(振動抑制)を、FB で安定性(ロバスト性)や追従性(外乱抑圧)を、それぞれ所望の特性で確保すべく設計する。その際、所望の制御性能を最適に実現、環境変動への適応性、設計・調整工数の削減を目的に、最適化処理やオートチューニング、適応制御則の導入が併せて検討される。さらに、FB には目的とする位置決め状態量に応じてフル・セミクロード FB 制御系が構築され、センサ種類やセンサ配置箇所のみならず、センサも含めた機構と補償器を併せて連携設計する手法が有望である。

ンサ設置によって、セミクロード(アクチュエータ状態量のみ FB)またはフルクロード(負荷側状態量も併せて FB)制御系が用いられる。その制御系構築に際しては、実際のメカトロニクス機器に多用される減速機やガイド機構などに内在する摩擦、ヒステリシス、角度伝達誤差といった非線形特性による制御性能劣化に対しても、**所望の制御性能を満足させるシステムティックな位置決め制御系設計の具現化が望まれる**。

2. 研究の目的

申請者は、科学研究費として平成 23~25 年度基盤研究 C (課題番号: 23560288) の補助を受け、2 自由度制御による高速高精度位置決めに関する設計論の検討と、提案設計手法の実機検証を行った。そこでは、位置決め制御系に関わる制約条件や制御仕様を LMI によって最適評価指標として定式化し、その最適化による制御系設計法を導き、セミクロード制御による供試位置決め装置(ボールねじ駆動直動テーブル装置)として実機検証を行い、その有効性を示した。しかし、負荷側に摩擦に代表される非線形要素が存在する場合や、角度伝達誤差やヒステリシス特性を有する減速機を内在する位置決め機構へ適用するには、その最適化指標が非線形関数となったり、アクチュエータおよび負荷の状態量に対する複数の制御条件が与えなければならないため、フルフィードバック制御系の構築も視野に入れた設計論としての更なる弾力的な拡張展開が今後の課題として残されている。併せて、アクチュエータ、センサ、機構系も含めた統合化設計を具現化し、これまでの位置決め制御特性を凌駕するアプローチの確立と、産学連携共同研究を通じた実フィールドへの高度化実践展開が期待されている。

3. 研究の方法

前述の研究背景の下、様々なメカトロニクス機器応用の中でも、本研究では特に減速機を内在する位置決め機構に対する高速・高精度位置決め制御系設計に焦点を絞り、負荷状態量センサの設置を前提としたフルフィードバック2自由度位置決め制御系のFFおよびFB補償器設計を実施する。ここでは、減速機出力（負荷）側の状態量をフィードバックすることで位置決め静的精度や振動抑制に関する所望の制御仕様を満足する方法・設計論を整備し、所望の制御特性を満足させる負荷状態量FB制御系の提示を目的とする。具体的には、

- (1) 減速機やそれを内蔵するアクチュエータは、それらの機構・構成の制約から、出力（負荷）側に状態量センサを設置することは一般に困難である。そこで、**従来実用化が困難であった負荷側にセンサを設置する機構設計を、産学連携共同研究先企業と連携して減速機内蔵型供試アクチュエータとして具現化する。**一方、減速機を有する位置決め機構では、アクチュエータのセンサ分解能が等価的に減速比倍されるため、負荷側センサには高分解能化が必須である。そこで、センサ設置機構設計と併せて、**センサの高分解能信号処理法を検討し、実用的な処理回路を提示する。**
- (2) 負荷側状態量センサのフィードバックを前提としたフルクロード2自由度制御系の、FFおよびFB補償器設計論の有効性を実機検証する。ここでは、産業機器への実応用やコントローラ実装を強く意識して、**減速機や負荷に内在する各種非線形要素の位置決め精度への影響抑制、機構振動を所望の振幅に抑圧する高精度位置決め、プラントパラメータ変動に対するロバスト性能の具備など、具体的な要求仕様を陽に満足可能な設計論を展開する。**さらに、筆者らが既に提案してきた線形行列不等式（LMI）による評価指標の定式化とその最適化手法を適用して、FFとFB補償器の連成設計や、非線形問題を扱う同時最適化へと応用展開を拓く。

をそれぞれ実施し、**負荷状態量フィードバック制御系の方法論・設計論を、産業界と連携しながら学理に即して展開する。**

4. 研究成果

前述した本研究の目的である、負荷状態量FBに基づくフルクロード2自由度位置決め制御系の設計論確立とその実践展開を、産学連携により供試機を設計・試作し、実機実験によってその有効性を検証する具体的な研究計画とその方法は、以下のように纏められる。

(1) 減速機負荷側センサ設置および2自由度位置決め制御系の設計と実機検証

駆動用電動モータと減速機を一体化したアクチュエータに対して、減速機負荷側の位置センサ（光学エンコーダ）設置およびその信号ケーブル配線を含めた機構設計を行う。さらに、センサの高分解能化を実現する信号処理回路を設計した。そして、**減速機内蔵型アクチュエータを試作し、フルクロード2自由度位置決め制御系を構築した。**ここでは、

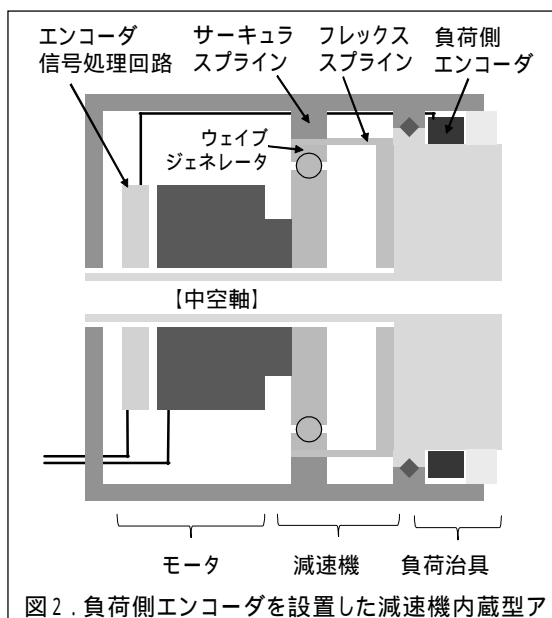


図2. 負荷側エンコーダを設置した減速機内蔵型アクチュエータの概念図 減速機の出力軸に直接設置されたエンコーダスケールと筐体を通した信号ラインによって、中空軸にシャフトや信号ラインを通すことなく、従来の減速機内蔵型アクチュエータと同等の機械寸法と中空軸を実現できている。さらに、エンコーダ信号処理回路も内蔵することで、位置センサとしての高分解能化も同時に実現できる。

特に減速機角度伝達誤差に起因する機構振動の抑制を評価指標とし、提案手法の有効性を実機検証により示した。

(2) 実機による応用検証と2自由度制御系設計論の応用展開

機構系の非線形要素や温度変化によるパラメータ変動に対するロボスト位置決め制御性能検証を、2自由度系のFF/FB補償器の連成設計と共に設計論の応用として実施した。そこでは、LMIによる弾力的な評価指標の定式化と非線形最適化手法を扱うことで、**連携設計による統合化設計への応用展開**とした。

減速機負荷側センサ設置と信号処理回路の設計および供試アクチュエータ試作

本研究では、**図2**に示す減速機（ここでは波動歯車装置）と駆動用モータを一体化したアクチュエータに、**負荷側エンコーダおよびエンコーダ信号回路を内蔵した供試装置を設計・試作**した。減速機出力軸に加速ピックアップ、歪ゲージを設置した負荷側状態量センシングの例は既に各種報告されており、文献では負荷軸回転角を中空軸にシャフトを通してモータ側に伝達し、モータ側に負荷側エンコーダを設置した試みも紹介されている。しかし、シャフトが中空軸を占有したり、そのねじれ剛性によるセンサ信号への共振特性重畳といった影響が、高速・高精度位置決め制御性能を劣化させることも懸念される。一方、**図2**の提案設計では、負荷治具に直接エンコーダスケールを設置し、その信号ラインをアクチュエータ筐体を通してモータ側に接続することで、従来構造と同様に**中空軸を占有せず信号への共振影響も排除可能**となった。さらに、エンコーダ信号処理回路には、レゾルバの逡倍回路を応用した高分解能化回路を設計し、FPGAによるロジック回路として実現した。これらの設計・試作に際しては、申請者が従来より産学共同研究を推進している波動歯車装置メーカーと協同するため、**実用化に向けての展開研究として極めて有望**である。

フルクロード2自由度制御系の設計と実機検証

前述で試作した供試アクチュエータに産業用ロボットのアーム軸を想定したアーム負荷を設置し、**図3**に示す**負荷状態量を含めた状態FB併用型フルクロード2自由度位置決め制御系を設計**した。ここでは、機構共振振動および減速機に内在する角

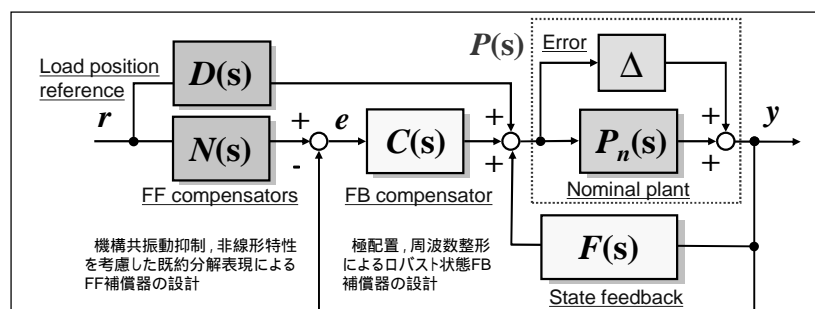


図3.フルクロード2自由度制御系のブロック線図 加法摂動 Δ を持つ制御対象 $P(s)$ に対して、FF補償器 $N(s)$ 、 $D(s)$ 、FB補償器 $C(s)$ 、状態FB器 $F(s)$ によるフルクロード2自由度制御系を、負荷側状態量を含む出力 y により実現する。FF補償は、主に機構共振振動を抑制しつつ位置決め追従特性を規定し、状態FBを含むFB補償は摂動に対するロボスト制御性能を規定する。

度伝達誤差に起因する振動抑制を目的に、1) **共振振動抑制と負荷位置追従特性に着目した既約分解表現に基づくFF補償器**と、2) **角度伝達誤差による機構振動抑制とパラメータ変動に対するロボスト性能に着目した状態FBおよびFB補償器**を、それぞれ設計した。状態FBの設計では、FBループ感度に着目し、所望の振動抑制を陽に満足する極配置および周波数整形を行った。

そして、提案2自由度制御による高速・高精度位置決め制御系の実機有効性検証と共に、次年度以降の課題抽出として、プラントパラメータ変動に対する影響や、減速機に内在する摩擦やヒステリシス特性に代表される非線形要素に対する制御性能劣化を評価した。

パラメータ変動に対するロボスト位置決め制御系の実機検証

2自由度制御系設計手法のロバスト制御性能検証として、供試位置決め装置を図4に示す研究室現有の恒温恒湿ルーム（平成16～17年度基盤研究A，課題番号：16206043で整備）に設置し，ルーム内の温度設定を可変することで**実機パラメータを直接変動させ，ロバスト位置決め制御性能評価を実施した**。ここでは，図3のプラント摂動から出力までの感度特性を最適化指標としてLMIで制約条件として定式化し，最適化問題を解くことで状態FB補償器設計とし，所望の位置決め精度を満足するロバスト制御性能を実現した。



図4．温度変化に対する位置決めロバスト性能評価に用いる恒温恒湿ルーム H16～17年度基盤研究Aで整備した恒温恒湿ルーム内で温度設定を可変して実機検証することで，温度変化による特性変動を実際に模擬可能であり，提案補償器設計のロバスト性能評価を直接実施できる。

減速機の非線形要素を考慮したFF/FB補償器連成設計への応用展開

上記ロバスト制御性能の更なる向上を目指し，減速機に内在する非線形特性をアクチュエータ出力に対する制約条件として不等式表現し，さらにFFおよびFB補償器の係数ベクトルに関する二次形式評価指標を併せて連立してAffine関数によるLMIで表現することで，**FF/FB補償器の連成設計に対する最適化評価指標の定式化**とした。その場合，従来法であるSchur ComplementによるLMIの変換と線形最適化手法の枠組みをそのまま適用できないため，非線形計画問題で用いられている逐次二次計画法を最適化アルゴリズムとして導入し，定式化された**非線形な評価関数を最小化するFF/FBフリーパラメータベクトルの算出へと設計論を拡張した**。

<引用文献>

M. Iwasaki, et al., IEEE IE Magazine, March (2012)

例えば，加藤他：「フィードフォワード・フィードバック補償器の連成設計による2自由度ロバスト制振位置決め制御系の設計」電学論，Vol.133-D，No.3（2013）

犬飼他：「負荷側エンコーダを用いたロボット用サーボモータの制振制御」電気学会研究会，MEC14-158（2014）

例えば，矢部他：「非線形計画法」朝倉書店（1999）

5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計4件）

Yoshihiro Maeda, Kazuya Harata, and Makoto Iwasaki: “A Friction Model-Based Frequency Response Analysis for Frictional Servo Systems”, IEEE Trans. on Industrial Informatics, 査読有り, Vol.14, No.11, pp.5146-5155, November 2018

DOI: 10.1109/TII.2018.2808461

Kenta Seki, Daisuke Noda, and Makoto Iwasaki: “Dual-loop Controller Design Considering Robust Vibration Suppression in Piezo-actuated Stage Systems”, IEEJ Journal of Industry Applications, 査読有り, Vol.7, No.6, pp.488-494, 2018-11

DOI: 10.1541/ieejia.7.488

Kenta Seki, Daisuke Noda, and Makoto Iwasaki: “High-precision positioning considering vibration and disturbance suppression in piezo-driven stage systems”,

Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, The Japan Society of Mechanical Engineerings, 査読有り, Vol.11, No.3, 10 pages, 2017-9

DOI: 10.1299/jamdsm.2017jamdsm0039

Michael Ruderman and Makoto Iwasaki: "Sensorless Torsion Control of Elastic Joint Robots with Hysteresis and Friction", IEEE Trans. on Industrial Electronics, 査読有り, Vol.63, No.3, pp.1889-1899, March 2016

DOI: 10.1109/TIE.2015.2453415

〔学会発表〕(計5件)

Makoto Iwasaki: "Robust Full-Closed Control-Based Vibration Suppression for Positioning Devices with Strain Wave Gearing" (Keynote Speech), The 12th France-Japan Congress, 10th Europe-Asia Congress on Mechatronics, 2018

Makoto Iwasaki: "Fast and Precision Motion Control for Industrial Positioning Devices", (Keynote Speech), 2018 2nd International Conference on Information Processing and Control Engineering

Makoto Iwasaki: "Fast and Precision Motion Controller Design: Application to Industrial Positioning Devices" (Keynote Speech), The 27th IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2018

Makoto Iwasaki: "Full-Closed Control-Based Vibration Suppression for Positioning Devices with Strain Wave Gearing" (Keynote Speech), The 3rd International Conference on Control and Robotics Engineering, 2018

Makoto Iwasaki: "Robust Full-Closed Control-Based Vibration Suppression for Positioning Devices with Strain Wave Gearings" (Keynote Speech), The 21st International Conference on Mechatronics Technology, 2017

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 関 健太

ローマ字氏名:(SEKI, kenta)

所属研究機関名: 名古屋工業大学

部局名: 工学(系)研究科(研究院)

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 70432292

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: なし

ローマ字氏名: (なし)