

令和 5 年 5 月 18 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02160

研究課題名（和文）人と協働する産業用ロボットの安全と高速高精度を両立する位置決め制御系の開発

研究課題名（英文）Research and Development of Positioning Controller for Collaborative Robots Considering Safety and Fast/Precise Performances

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） 12,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、「人と協働する産業用ロボットに特化した高速高精度位置決め制御系設計」に関する以下の2項目を、負荷状態量のセンシングによるフルクローズド2自由度制御系を前提に、「安全と高性能」を両立する制御系の方法論・設計論を、産業界と連携しながら学理に即して開発・実証した。

- 1) 従来実用化が困難であったロボットアクチュエータ減速機の出力（負荷）側に状態量センサを設置する機構設計を具現化し、フルクローズド2自由度制御系の方法論を確立した。
- 2) 所望の安全性と高性能制御性の指針・仕様を満足する設計論を実験検証しながら展開し、実機試作も併せて人との協働に資するロボットの更なる性能向上を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、1) 負荷軸角度センサによるフルフィードバック2自由度位置決め制御系の設計、2) 負荷軸角度・トルクセンサフィードバック制御の多関節ロボット制御への拡張に基づき、従来のロボット制御では困難であった「安全性と高性能性の両立」という、相反する制御目標の達成に挑戦したものであり、学術的にも独自性の高い研究である。その結果、人協働ロボットの要求仕様策定とそれを実現するセンサの開発と制御系設計の提示がなされ、ロボット制御系の格段の発展、他のメカトロ制御系への展開に繋ぐことができた。本研究の成果は、産業界のみならず医療・社会分野への波及効果も非常に高く、世界に新たな学問的進展を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：The research has strongly developed and verified methodologies and theoretical approaches for a control system that achieves both safety and high performance in human collaborative industrial robots, on the basis of introducing a 2-degree-of-freedom control with full-closed feedback compensation using load-state sensors of angular and torque:

- 1) a mechanical structure design has developed to realize the full-closed feedback-based 2-degree-of-freedom control by load-state sensors,
- 2) the proposed full-closed controller design has been implemented and verified by a series of numerical simulations and experiments for a prototype of robot, considering the achievements in both the safety and high performance capabilities.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：モーションコントロール フルクローズドフィードバック制御 2自由度制御

1. 研究開始当初の背景

【人と協働する産業用ロボットとは？そこに求められる課題】

現在のものづくり生産現場で多用されている産業用ロボットは、安全性と生産効率の確保を優先に、安全柵などに囲まれた環境下で現場作業者と隔離され、“高剛性で大出力なロボット”を高速高精度な運動によって高品質・高効率に作業させることが主流である。それに対して、近年では生産現場のグローバル化や製品の多様化・複雑化に伴い、“低剛性・低出力で安全なロボット”が作業者と協働する作業も要求されるようになってきている。その場合、安全確保のための柵で囲う必要をなくするため、人と接触しても危害を加えることなく安全に停止しなければならないが、一方で例えば図1の実製品のように、協働型のロボットは小型で狭い場所に設置可能、軽量の生産作業の段取り代えや移設が容易などの特徴を有し、専用のインターフェイスによる簡単な操作性を持ってティーチングを容易とする。その需要は拡大し、世界市場は2025年には16年比で8.7倍の2700億円を予測するとの報道もある^[1]。協働型ロボットでは安全性を第一に優先することは当然ながら、一方で作業・生産効率の観点からは、従来の産業用ロボットと同程度の高速・高精度な制御性能も要求されるようになってきている。それは、作業運転前のティーチングや制御パラメータ調整の段でも、人が直接ロボットに触れて操作する場面では共通の課題となる。



図1. 人協働ロボットの一例
(株)デンソーウェーブ COBOTTA)
safety design, portable body, easy to use, open platform をコンセプトに、本体重量が約 4kg と軽量化を実現し、年 1,000 台の生産を予定している。

【本研究の学術的背景】

通常の産業用ロボットのモータと減速機による関節駆動系では、モータ側の角度センサによってアームの軌跡・位置決め制御を行うセミクローズド制御系が一般である。その場合、減速機に内在する摩擦や非線形ばね要素に起因する、負荷からモータへの伝達低感度性や伝達遅れ(約 100 Hz 以降)により、作業者との衝突に際してモータ側で高速(数 100 Hz)に応答・停止する安全性の確保は本質的に難しい。一方で、作業者とロボットが干渉・衝突しにくい短ストローク動作では、特に高速高精度性が要求される。しかし、ロボットの各軸の機構主共振周波数は 10 Hz 程度であることが多く、例えばアーム先端を数十 mm のストロークで 0.1 s 程度の加減速時間により高速繰返し駆動する場合には、主共振周波数と加減速時間の逆数が一致して最も振動しやすい条件となり、ロボット先端で 0.1 mm 未満といった高精度な整定仕様を実現することは極めて困難となる。すなわち、「低剛性で低出力」な人協働ロボットでは、伝達低感度性や遅れを補償(モータに対する高感度化)、共振特性・軸間干渉力に起因する機構振動を抑制(制振)して、「安全性と高速高精度性」を両立させることが必須となる。

2. 研究の目的

【本研究の目的】

本研究では「人と協働する低剛性・低出力のロボット機構」に対する高速高精度位置決め制御系設計と実機評価・性能実証に焦点を絞り、次の3点を研究目的として設定した。

- 1) [モデル化とシミュレータ作成] 供試ロボットに対して、機構共振、摩擦、非線形ばねを考慮した Lagrange 方程式ベースの物理モデリングを行い、実機周波数特性および時間応答からモデルパラメータを同定し、精密モデルを構築する。併せて、精密モデルを組み込んだ数値シミュレータを構築し、提案する制御系の仕様策定と事前性能・限界性能評価を行う。
- 2) [制御系設計] 負荷側(アクチュエータの減速機出力側)状態量を検出するセンサを設置したフルフィードバック制御系の構築を前提に、人との接触・衝突に対してモータ側の高感度化フィードバック補償による「安全性」と、精密モデルベースの制振および軸間干渉補償を考慮した2自由度制御による「高速高精度制御性能」を両立して実現する。
- 3) [実機評価と改良試作] 供試ロボットに提案制御系を適用し、実機実験評価による性能実証を行う。さらに、性能向上を目指したシステム改良・試作を行う。

【学術的独自性】

本研究は、申請者が様々なメカトロニクス機器に対して実装・適用してきた、高速高精度位置決めを実現する2自由度制御技術を基に、従来のロボット制御では困難であった「安全性と高性能性の両立」という、相反する制御目標の達成に世界に先駆け挑戦するものであり、これまでの実績と成果からも、学術的に独自性の高い研究が期待できる。

【本研究の創造性】 上記研究目的が達成されれば、人協働ロボットの要求仕様策定とそれを実

現するセンサの提案と開発も含めた制御系設計の提示がなされ、ロボット制御系の格段の発展、他のメカトロ制御系への展開に繋がられる。産業界のみならず医療・社会分野への波及効果も非常に高く、世界に向けて本成果を示し、新たな学問的進展に寄与できる。

3. 研究の方法

【研究の方法と数値目標】

図2に、本研究で供試機とする「軽量で低剛性・低出力の2軸水平スカルロボット」の概観と、第2軸のモータトルクからモータ角度と減速機出力(負荷)角度までの周波数特性を示す。周波数特性より、アームの柔軟性に起因する同相の1次共振モード(約8 Hz)と、減速機の低剛性に起因する逆相の2次共振モード(約80 Hz)が顕著である。従って、上記研究目的の「モータの高感度化による安全性」は、2次モードに対応する100 Hz付近の伝達遅れ(位相遅れ)をフィードバック補償することで、「制振および軸間干渉補償による高速高精度性」は、1次モードに対応する10 Hz付近の機構共振を2自由度制御で制振することで、それぞれ所望の性能を満足させる。

具体的な数値目標としては、

・[安全性] 人との衝突を仮定したロボットへの外力を減速機出力軸外乱と考え、外乱からモータまでの感度特性を200 Hzの制御帯域で整形し、モータの高感度化を達成する

・[高速高精度性] 1次モードの共振励起が最も顕著となる加減速時間0.1 sの位置決めに対し、整定時間50 msと先端変位0.1 mmに対応する振動振幅の整定精度を目標仕様とする

をそれぞれ設定し、低剛性に対応する。さらに、低出力への対応としては、モータトルクの制限値を制御入力制約に設定し、状態量制約を課した設計手法を適用して解決する。

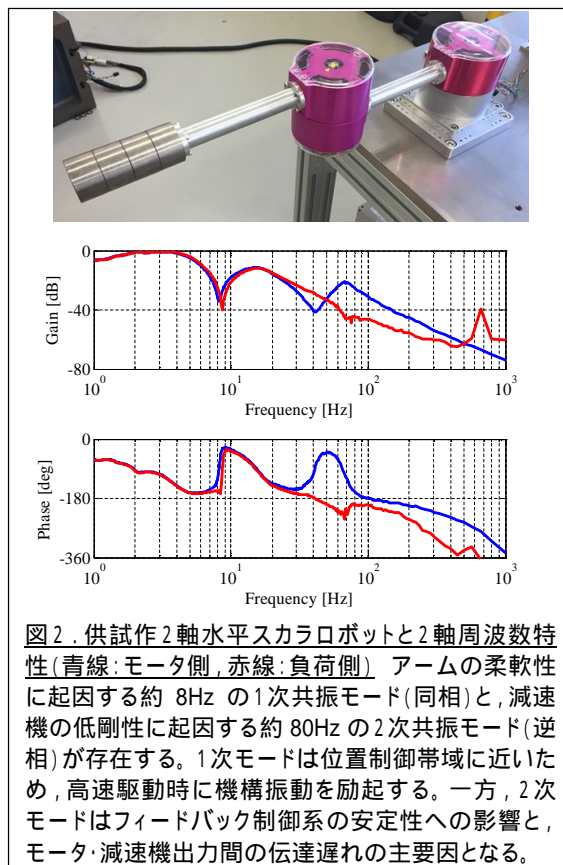


図2. 供試作2軸水平スカルロボットと2軸周波数特性(青線:モータ側,赤線:負荷側) アームの柔軟性に起因する約8Hzの1次共振モード(同相)と、減速機の低剛性に起因する約80Hzの2次共振モード(逆相)が存在する。1次モードは位置制御帯域に近いため、高速駆動時に機構振動を励起する。一方、2次モードはフィードバック制御系の安定性への影響と、モータ・減速機出力間の伝達遅れの主要因となる。

4. 研究成果

上記研究方法と数値目標に対して、本研究では以下の年次進行(2019年~2022年)による研究進捗および実績を得た。

【負荷軸角度センサによるフルフィードバック2自由度位置決め制御系の設計と実証実験】

2019年度には、本研究で用いる2軸水平スカルロボットとして、申請者らが科研費(基盤研究C:H28~30年度,課題番号16K06413)にて開発した負荷軸角度センサを設置した減速機内蔵型アクチュエータを導入した供試ロボット装置を用いて、従来のロボット制御では困難であったフルフィードバック制御系を構築した。この負荷側センサの併用によるフルフィードバック制御系を前提に、以下の制御系設計および対応する実証実験を実施した。

(1) 共振・摩擦・ばね要素を考慮したLagrange方程式ベースの物理モデルに対して、実機周波数特性と時間応答からモデルパラメータ同定を実施し、2つの機構共振モードを示す実機特性に対応した3慣性精密モデルを作成した。その場合、モデルパラメータ数が2軸で20個を超えるため、遺伝的アルゴリズムによる最適化^[2]を適用してパラメータ同定とした。

(2) 上記精密モデルに基づき、フルフィードバック2自由度制御系のフィードバック(FB)補償器とフィードフォワード(FF)補償器を、負荷外乱からモータ角度までの感度特性と目標値追従特性をH補償器設計の混合感度問題の枠組み^{[3][4]}により、モータ高感度化と応答周波数の数値目標を満足可能なFB補償器を設計し、実験実証した。その結果、所望の周波数特性を有する制御仕様を満足するFB補償器設計を実現できた。

(3) さらに、フルフィードバックを前提とした負荷側状態量を含めたインピーダンス制御も実現し、所望のバックドライバビリティ(負荷側からモータ側への感度低減も含む)の実現に至った。

2020年度では、19年度に引き続いて供試2軸水平スカルロボットに対するフルフィードバック2自由度位置決め制御系の設計と実機実験検証および特性解析を行い、21年度以降の課題である、センサ新規開発による制御性能の向上への展開を準備した。本研究で用いる2軸水平スカルロボットでは、申請者らが科研費(基盤研究C:H28~30年度,課題番号16K06413)にて開発し

た負荷軸角度センサを設置した減速機内蔵型アクチュエータを導入し、従来のロボット制御では困難であったフルフィードバック制御系を構成した。この負荷側センサの併用を前提に、以下を実施した。

(1) 対象ロボットに対する Lagrange 方程式ベースの物理モデルに対して、遺伝的アルゴリズムによる最適化^[2]を併用してモデルパラメータを同定し、精密モデリングとした。

(2) 上記精密モデルに基づき、フルフィードバック 2 自由度制御系を、負荷外乱からモータ角度までの感度特性と目標値追従特性を H 補償器設計の混合感度問題の枠組み^{[3][4]}により、感度仕様を満足可能なフィードバック補償器を設計した。

(3) 以上の制御系設計の枠組みに対して、モータ側と負荷側のセンサの組合せによる、セミクロード制御系(モータ側センサのみ使用)とフルクロード制御系(モータおよび負荷側センサを両方使用)の特性比較を、周波数領域(追従性、安定性、外乱抑圧性、ロバスト性)および時間領域(整定性、制振性)の各指標に着目して行い、センサ構成による特徴の明確化およびフルフィードバック制御の有効性をそれぞれ提示した^{[5][6]}。

(4) さらに、フルフィードバックを前提とした負荷側状態量を含めたインピーダンス制御を構築し、所望のバックドライバビリティを実現^[7]し、ロボット衝突時の衝撃力緩和の基礎検討^[8]を開始した。

【負荷軸角度・トルクセンサフィードバックによる制御性能の向上と垂直多関節ロボット制御への展開】

2021 年度では、20 年度から準備した負荷軸角度センサ(減速機出力にエンコーダスケールを設置)に対して、負荷軸トルクを検出するセンサを搭載してフルフィードバック制御に適用することで、負荷トルクの直接フィードバックによる高感度化と、高速高精度性のさらなる向上を、垂直 4 軸ロボットのシミュレータおよび実機によって以下を実施・検証した。

(1) ロボット制御系設計においては、20 年度に引き続き、安全性と拘束高精度を両立する運動制御として、「ロボットと人との衝突に対する、衝撃力モデル作成と緩和制御系の検証」を実施した。具体的には、ロボットと環境との接触および衝突に対する「安全性」を、ロボットアーム側からみたバックドライバビリティ性能の向上と関連付け、上記トルクセンサフィードバックと併せて外乱の推定と補償、さらにロボットアーム側のインピーダンス制御による衝撃力の緩和を目指した。

(2) 衝撃力の事前解析および評価に際しては、ヘルツの接触応力式に基づき、人のインピーダンスモデルを用いた衝撃力の定式化を試みた。そして、衝撃力の緩和制御により、センサおよび推定器による衝突時点の検出、衝突後のインピーダンス制御への切り替えとアーム食い込み動作の回避、安全な距離へのアーム離脱を、それぞれ検証した^[9]。

(3) 以上の制御アルゴリズム開発、数値シミュレーションによる特性解析、実機検証を、垂直 4 軸ロボットに展開しながらそれぞれ有機的に組み合わせ、22 年度も引き続いて実施した。

2022 年度では、21 年度に開発・解析した負荷軸角度およびトルクセンサフィードバックによる柔軟ロボットの「安全性と高速高精度を両立する運動制御アルゴリズム」を、供試ロボットに対する数値シミュレーションおよび実機実験によって以下のように検証した。

(1) ロボット制御系設計においては、21 年度に引き続き、安全性と高速高精度を両立する運動制御として、「ロボットと人との衝突に対する衝撃力モデル作成と緩和制御系の検証」を、ロボットと環境との接触および衝突に対する「安全性」をロボットアーム側からみたバックドライバビリティ性能の向上と関連付け、上記トルクセンサフィードバックと併せて外乱の推定と補償、さらにロボットアーム側のインピーダンス制御による衝撃力の緩和を数値シミュレーションと実機により検証し、提案制御アルゴリズムの有効性を実証した。

(2) 衝撃力の事前解析および評価に際しては、ヘルツの接触応力式に基づき、人のインピーダンスモデルを用いた衝撃力の定式化を行い、衝撃力の緩和制御により、センサおよび推定器による衝突時点の検出、衝突後のインピーダンス制御への切り替えとアーム食い込み動作の回避、安全な距離へのアーム離脱を、それぞれ数値シミュレーションおよび実機により検証し、提案制御アルゴリズムの有効性を実証した。

(3) 以上の実機実験検証に当たっては、研究室に現有および本補助金で整備した水平 2 軸および垂直 4 軸柔軟ロボットを対象に、CCD レーザ変位計を用いたロボット先端の位置決め性能評価(検出精度 50 μm)を実施した。

< 引用文献 >

[1] 日本経済新聞 2018/2/22 朝刊 7 面

[2] Masafumi Yamamoto, Yoshifumi Okitsu, and Makoto Iwasaki: “GA-Based Auto-Tuning of Vibration Suppression Controller for Positioning Devices with Strain Wave Gearing”, Proc. of IEEE International Conference on Mechatronics, pp.610-615, 2015

[3] Makoto Iwasaki: “Robust Full-Closed Control-Based Vibration Suppression for Positioning Devices with Strain Wave Gearing” (invited, plenary speech), Proc. of 12th France-Japan and 10th Europe-Asia Congress on Mechatronics, pp.5-11, 2018

- [4] Tran Vu Trung and Makoto Iwasaki: “Robust 2-DoF Controller Design using H_{∞} Synthesis for Flexible Robots”, IEEJ Journal of Industry Applications, Vol.8, No.4, pp.623-631, 2019
- [5] Tran Vu Trung and Makoto Iwasaki: “High-Performance Positioning using Decoupling Controllers for Flexible Two-Link Robots with Strain Wave Gears”, IEEJ Journal of Industry Applications, Vol.9, No.4, pp.408-417, 2020
- [6] Tran Vu Trung and Makoto Iwasaki: “Fast and Precise Positioning with Coupling Torque Compensation for a Flexible Lightweight Two-Link Manipulator with Elastic Joints”, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.28, No.2, pp.1025-1036, 2023
- [7] 石原幹規, 岩崎誠: 「減速機を内在する位置決め機構のバックドライバリティに関する基礎検討」, 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会, B5-1, 2019
- [8] 石原幹規, 岩崎誠: 「人協働ロボットの衝撃力モデル作成と緩和制御」, 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会, D2-4, 2020
- [9] 石原幹規, 伊澤遼, 岩崎誠: 「人協働ロボットの衝撃力モデル作成と緩和制御検証」, 電気学会産業応用部門大会, No.2-6, pp.11-79-82, 2021

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Wang Baofang, Iwasaki Makoto, Yu Jinpeng	4. 巻 19
2. 論文標題 Finite-Time Command-Filtered Backstepping Control for Dual-Motor Servo Systems With LuGre Friction	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industrial Informatics	6. 最初と最後の頁 6376 ~ 6386
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TII.2022.3182341	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Trung Tran Vu, Iwasaki Makoto	4. 巻 28
2. 論文標題 Fast and Precise Positioning With Coupling Torque Compensation for a Flexible Lightweight Two-Link Manipulator With Elastic Joints	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE/ASME Transactions on Mechatronics	6. 最初と最後の頁 1025 ~ 1036
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMECH.2022.3213538	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Maeda Yoshihiro, Iwasaki Makoto	4. 巻 70
2. 論文標題 Empirical Transfer Function Estimation With Differential Filtering and Its Application to Fine Positioning Control of Galvano Scanner	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industrial Electronics	6. 最初と最後の頁 10466 ~ 10475
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIE.2022.3217616	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zhou Yujian, She Jinhua, Wang Feng, Iwasaki Makoto	4. 巻 early access
2. 論文標題 Disturbance Rejection for Stewart Platform Based on Integration of Equivalent-Input-Disturbance and Sliding-Mode Control Methods	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE/ASME Transactions on Mechatronics	6. 最初と最後の頁 1 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMECH.2023.3237135	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kuroda Eitaro, Maeda Yoshihiro, Iwasaki Makoto	4. 巻 142
2. 論文標題 Efficient Autonomous Feedback Controller Parameter Design Considering Robust Stability for Galvanometer Scanner	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 290 ~ 298
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.142.290	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sakuragi Yuya, Seki Kenta, Iwasaki Makoto	4. 巻 11
2. 論文標題 Contact Force Estimation and Sensorless Force Control in Piezoelectric Bending Actuators	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 555 ~ 561
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.21006154	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zhao Bingqing, Ouyang Huimin, Iwasaki Makoto	4. 巻 27
2. 論文標題 Motion Trajectory Tracking and Sway Reduction for Double-Pendulum Overhead Cranes Using Improved Adaptive Control Without Velocity Feedback	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE/ASME Transactions on Mechatronics	6. 最初と最後の頁 3648 ~ 3659
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMECH.2021.3126665	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yang Tong, Zhang Xinlin, Fang Yongchun, Sun Ning, Iwasaki Makoto	4. 巻 27
2. 論文標題 Observer-Based Adaptive Fuzzy Event-Triggered Control for Mechatronic Systems With Inaccurate Signal Transmission and Motion Constraints	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE/ASME Transactions on Mechatronics	6. 最初と最後の頁 5208 ~ 5221
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMECH.2022.3175969	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Eitaro Kuroda, Yoshihiro Maeda, and Makoto Iwasaki	4. 巻 10
2. 論文標題 Autonomous Parameter Design for Cascade-Structure Feedback Controller Based on Cooperative Optimization Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 457-468
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.20011750	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Baofang Wang, Makoto Iwasaki, and Jinpeng Yu	4. 巻 69
2. 論文標題 Command filtered adaptive backstepping control for dual- motor servo systems with torque disturbance and uncertainties	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Trans. on Industrial Electronics	6. 最初と最後の頁 1773-1781
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIE.2021.3059540	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tran Vu Trung and Makoto Iwasaki	4. 巻 9
2. 論文標題 High-Performance Positioning using Decoupling Controllers for Flexible Two-Link Robots with Strain Wave Gears	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 408-417
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.9.408	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shuta Ano, Kenta Seki, Michael Ruderman, and Makoto Iwasaki	4. 巻 10
2. 論文標題 Estimating Sway Angle of Pendulum System Using Hybrid State Observer Incorporating Continuous and Discrete Sensing Signals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 69-75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.20004820	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Michael Ruderman, Makoto Iwasaki, and Wen-Hua Chen	4. 巻 14
2. 論文標題 Motion-Control Techniques of Today and Tomorrow -A Review and Discussion of the Challenges of Controlled Motion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Industrial Electronics Magazine	6. 最初と最後の頁 41-55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/MIE.2019.2956683	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tran Vu Trung and Makoto Iwasaki	4. 巻 8
2. 論文標題 Robust 2-DoF Controller Design using H _∞ Synthesis for Flexible Robots	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 623-631
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejia.8.623	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計63件 (うち招待講演 32件 / うち国際学会 49件)

1. 発表者名 Kenji Hayashi, Kenta Seki, Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Design and Verification of Full-Closed Control System for Testbed of Asteroid Flyby Observation System
3. 学会等名 IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kikuko Miyata, Ssumu Hara, Kenji Hayashi, Kenta Seki, Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Comparisons of Vision-Based Target Tracking Methods for Asteroid Flyby Problem
3. 学会等名 IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryohei Horiba, Kenta Seki, Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Detection and Control of Wrinkles During Web Transportation Based on Image Processing
3. 学会等名 IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Asuka Obusu, Yoshihiro Maeda, Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Comparisons of FRF Identification Methods Suitable for Linear Model-Based Feedforward Control of Galvano Scanner
3. 学会等名 IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Chihiro Mikuriya, Kenta Seki, Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Evaluation of Temperature Dependency for Displacement Estimation in Piezoelectric Stack Actuators
3. 学会等名 International Workshop on Advanced Motion Control (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 High Trajectory Tracking Performance of Industrial Robots by Iterative Learning Control
3. 学会等名 The 7th International Conference on Control and Robotics Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 GA-Based Practical System Identification and Auto-Tuning for Industrial Robots
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Information Technology and Education Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenji Hayashi, Kenta Seki, Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Design and Verification of Full-Closed Control System for Testbed of Asteroid Flyby Observation System
3. 学会等名 IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kikuko Miyata, Ssumu Hara, Kenji Hayashi, Kenta Seki, Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Comparisons of Vision-Based Target Tracking Methods for Asteroid Flyby Problem
3. 学会等名 IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryohei Horiba, Kenta Seki, Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Detection and Control of Wrinkles During Web Transportation Based on Image Processing
3. 学会等名 IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Asuka Obusu, Yoshihiro Maeda, Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Comparisons of FRF Identification Methods Suitable for Linear Model-Based Feedforward Control of Galvano Scanner
3. 学会等名 IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Chihiro Mikuriya, Kenta Seki, Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Evaluation of Temperature Dependency for Displacement Estimation in Piezoelectric Stack Actuators
3. 学会等名 International Workshop on Advanced Motion Control (AMC-2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 High Trajectory Tracking Performance of Industrial Robots by Iterative Learning Control (Keynote Speech)
3. 学会等名 The 7th International Conference on Control and Robotics Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 GA-Based Practical System Identification and Auto-Tuning for Industrial Robots (Keynote Speech)
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Information Technology and Education Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 High Trajectory Tracking of Multi-Axis Robot by Iterative Learning Control (Keynote Speech)
3. 学会等名 The IEEE 13th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 High Trajectory Tracking Performance of Industrial Robots by Iterative Learning Control (Keynote Speech)
3. 学会等名 The 7th Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Motion Control for Industrial Positioning Devices with Strain Wave Gearing: Basics, Applications, and Beyond (Keynote Speech)
3. 学会等名 The 34th Chinese Control and Decision Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 GA-Based Optimization in Mechatronic Systems: System Identification and Controller Design (Keynote Speech)
3. 学会等名 The 5th International Conference on Control and Computer Vision (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 GA-Based Practical System Identification and Auto-Tuning for Multi-Axis Industrial Robots (Keynote Speech)
3. 学会等名 The 1st International Electronic Conference on Machines and Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 GA-Based Optimization in Mechatronic Systems: System Identification and Controller Design (Keynote Speech)
3. 学会等名 2022 8th International Conference on Mechanical Engineering and Automation Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tran Vu Trung, Tomohiro Furuta, Koyo Akita, and Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Full State Feedback-based Vibration Suppression Control of Flexible-Link Flexible-Joint Robot
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE-2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoya Homan, Kenta Seki, and Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Tension Estimation and Control in Winding Process of Web Handling Systems
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE-2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Eitaro Kuroda, Yoshihiro Maeda, and Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Autonomous Parameter Design for Cascade Structure Feedback Controller Based on Time and Frequency Domain Optimization
3. 学会等名 the 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON-2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Chihiro Mikuriya, Kenta Seki, and Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Evaluation of Temperature Dependency for Displacement Estimation in Piezoelectric Stack Actuators
3. 学会等名 IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC-2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Rolling Friction Modeling and Compensation in Fast and Precision Positioning for Industrial Positioning Devices (Keynote Speech)
3. 学会等名 The 6th International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE'21) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Fast and Precision Motion Control for Industrial Positioning Devices: High Trajectory Tracking Performance by Iterative Learning Control (Keynote speech)
3. 学会等名 The 1st International Conference on Robotics and Control Engineering (RobCE'21) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Fast and Precision Motion Control for Industrial Positioning Devices: High Trajectory Tracking Performance by Iterative Learning Control (Keynote speech)
3. 学会等名 The 10th International Conference on Intelligent Computing and Applications (ICICA'21) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Feedback Vibration Suppression in Industrial Robots with Strain Wave Gearing in Joints (Keynote speech)
3. 学会等名 The 6th Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS'21) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 GA-Based Practical System Identification and Auto-Tuning for Multi-Axis Industrial Robots (Keynote speech)
3. 学会等名 The 3rd International Workshop on Artificial Intelligence and Education (WAIE'21) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 High Trajectory Tracking Performance of Industrial Robots by Iterative Learning Control (Keynote speech)
3. 学会等名 The IEEE 27th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP'21) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 High Trajectory Tracking Performance of Industrial Robots by Iterative Learning Control (Keynote speech)
3. 学会等名 The 2nd International Workshop on Motion Control Systems (IEEE Nanjing Chapter) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Practical Motion Control Approaches for Industrial Positioning Devices with Strain Wave Gearing (Plenary speech)
3. 学会等名 IEEE 17th International Conference on Advanced Motion Control (AMC'22) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Practical Modeling and Compensation of Angular Transmission Errors in Positioning Devices with Strain Wave Gearing
3. 学会等名 The 5th International Conference on Artificial Intelligence, Automation and Control Technologies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Friction Modeling and Compensation in Fast and Precision Positioning for Industrial Positioning Devices
3. 学会等名 The 5th International Conference on Mechanical, Aeronautical and Automotive Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Fast and Precise Motion Control for Industrial Positioning Devices with Strain Wave Gearing
3. 学会等名 IEEE Industrial Electronics Society, Webinar (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩崎誠
2. 発表標題 産学連携による産業用ロボットの高速・高精度制御系の研究開発 -減速機の特性を考慮したモデルベース2自由度制御
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部 技術フォーラム2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Fast and Precision Motion Control for Industrial Positioning Devices: LMI-Based Command Shaping with Robust Performance
3. 学会等名 The 7th International Conference on Mechatronics and Mechanical Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Application of Disturbance Observer to Model and Compensation for Nonlinear Friction in Industrial Machines
3. 学会等名 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Modeling and Identification of Strain Wave Gearing for Motion Control Applications to Precision Positioning Devices
3. 学会等名 The 13th China-Japan International Workshop on Information Technology and Control Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Feedback Vibration Suppression Using Variable Notch Filter for Positioning Devices with Strain Wave Gearing
3. 学会等名 The 4th International Conference on Artificial Intelligence Applications and Technologies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Fast and Precise Motion Control for Positioning Devices with Strain Wave Gearing in Industrial Application
3. 学会等名 The 12th International Conference on Computer Modeling and Simulation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Fast and Precision Motion Control for Industrial Positioning Devices Based on FF/FB Coordinate Design
3. 学会等名 The 5th International Conference on Control and Robotics Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tran Vu Trung and Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Double-Disturbance Compensation Design for Full-Closed Cascade Control of Flexible Robots
3. 学会等名 Proc. of IEEE International Conference on Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenji Hayashi, Kenta Seki, and Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Modeling and Control Performance Evaluation for Testbed of Asteroid Flyby Observation System
3. 学会等名 Proc. of IEEE International Conference on Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuaki Ito and Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Fast and Precise Position Control of Articulated Robot Using Estimated Load Acceleration
3. 学会等名 Proc. of IEEE International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青木大輔, 小松昂輝, 伊藤和晃, 岩崎誠
2. 発表標題 反復学習アルゴリズムによる多関節ロボットの高精度軌跡追従制御
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前田晃秀, 横田隼人, 伊藤和晃, 岩崎誠
2. 発表標題 加速度フィードバックによる多関節ロボットの振動抑制性能の改善
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 八谷昌幸, 岩崎誠
2. 発表標題 セミクローズド制御系に対する柔軟多関節ロボットアームの軸間干渉力ディカップラー設計
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石原幹規, 岩崎誠
2. 発表標題 人協働ロボットの衝撃力モデル作成と緩和制御
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tran Vu Trung, Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Disturbance Observer-based Compensation for Interaction Force in Flexible Two-Link Robots
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 下山勝大, 岩崎誠
2. 発表標題 柔軟多関節ロボットアームの先端位置を考慮したモデルパラメータ同定
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 秋田光養, 古田智大, 岩崎誠
2. 発表標題 状態フィードバックによる柔軟多関節ロボットアームの振動抑制制御
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tran Vu Trung and Makoto Iwasaki
2. 発表標題 A Decoupling 2-DoF Control Design for Lightweight Two-Link Robots
3. 学会等名 the 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuaki Ito, Koki Komatsu, and Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Improvement of Trajectory Tracking Performance of a Robot Manipulator using Iterative Learning Control
3. 学会等名 IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Fast and Precision Motion Control for Industrial Positioning Devices
3. 学会等名 The 4th International Conference on Control and Robotics Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Robust Vibration Suppression Control for Positioning Devices with Strain Wave Gearing
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Artificial Intelligence Applications and Technologies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Friction Modeling and Compensation in Fast and Precision Positioning for Industrial Positioning Devices
3. 学会等名 The 23rd International Conference on Mechatronics Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Robust Vibration Suppression Control for Positioning Devices with Strain Wave Gearing
3. 学会等名 The 11th International Conference on Mechatronics and Manufacturing (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小松昂輝, 伊藤和晃, 岩崎誠
2. 発表標題 反復学習制御によるロボットマニピュレータの軌跡追従性能の改善
3. 学会等名 電気学会メカトロニクス制御研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林知史, 古田智大, 岩崎誠
2. 発表標題 水平2軸ロボットの軸間干渉力補償を考慮した位置決め制御」
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石原幹規, 岩崎誠
2. 発表標題 減速機を内在する位置決め機構のバックドライバビリティに関する基礎検討
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tran Vu Trung, Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Decoupling Control of Flexible 2-Axis Robot Arm
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 八谷昌幸, 古田智大, 岩崎誠
2. 発表標題 GAを用いた2軸ロボットアームのモデルパラメータ同定
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Marina Indri, Roberto Oboe, Makoto Iwasaki, et al.	4. 発行年 2020年
2. 出版社 CRC Press, Taylor & Francis Group	5. 総ページ数 266
3. 書名 Mechatronics and Robotics -New Trends and Challenges	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	前田 佳弘 (Maeda Yoshihiro) (70769869)	名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授 (13903)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ノルウェー	University of Adger			
中国	Southeast University	China University of Geoscience	Qingdao University	