

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14622

研究課題名（和文）運動学的冗長性を持つ多自由度システムの運動最適化による高速高精度な軌跡制御

研究課題名（英文）Trajectory control of multi-degree-of-freedom systems with kinematic redundancy by motion optimization for high-speed and high-precision machining

研究代表者

田島 真吾 (Tajima, Shingo)

東京工業大学・科学技術創成研究院・助教

研究者番号：70862308

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、運動学的冗長性を持つ多自由度システムによる機械加工の高速高精度化を実現するため、新たに2軸直交ステージと6軸産業用ロボットによる8軸制御システムを構築し、機械加工に必要となる関節軌跡指令の制御法を構築した。提案した軌跡生成法により、ロボット手先の正確な位置指令軌跡の補間を可能とした。また、冗長関節の最適化制御により、位置決め精度の静的および動的成分の制御を実現し、姿勢により変化する固有振動数を考慮した速度プロファイル生成法を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、産業用ロボットを機械加工へ応用するために重要となる工具軌跡と関節角度、そして速度計画について同時に考慮した高速高精度な冗長システムの軌跡生成手法を構築した。課題の一つであったシステムの剛性を高く保つことができるため、産業用ロボットを用いた機械加工の精度向上が実現できる。その結果、従来は複雑形状の部品加工に必要であった同時5軸制御工作機械を産業用ロボットに置き換えることが可能になり、生産性の向上が期待できる。

研究成果の概要（英文）：To realize high-speed and high-precision machining by a multi-degree-of-freedom system with kinematic redundancy, this study newly constructed an 8-axis control system using a 2-axis Cartesian orthogonal stage and a 6-axis industrial robot, and developed a trajectory control method for joint command profiles required for machining. The proposed trajectory generation method enables accurate interpolation of the position and orientation command trajectories of the robot motion in the work coordinate system. In addition, the static and dynamic components of positioning accuracy are controlled by optimized trajectory of redundant joints, and a novel velocity profile generation method is developed by considering the natural frequencies that vary depending on the robot's posture.

研究分野：加工学および生産工学関連

キーワード：軌跡制御 冗長システム 産業用ロボット 機械加工

1. 研究開始当初の背景

6軸垂直多関節の産業用ロボットは、多軸制御工作機械に比べて作業領域が広く、設置が容易で安価などの利点がある。そのため、切削加工を含めた様々な用途に適用が試みられている。しかしながら、産業用ロボットは多軸制御工作機械と比べて剛性位置決め精度が低いため、部品加工に必要なロボット手先位置姿勢の保持が難しく、加工精度が低下するという問題がある。

産業用ロボットの運動学的冗長性に注目した解決法として、剛性を高く維持可能な関節角度の範囲内でロボット手先の位置姿勢を制御する手法が検討されている。しかし、機械加工における6軸産業用ロボットの冗長自由度は1軸のみであり、剛性ととも重要な特異姿勢の回避、つまり可操作性を付与するには不十分という問題があった。そのため、産業用ロボットに冗長軸を追加し冗長自由度を上げることで、目標の軌跡制御を実現する対策が考えられている。しかしながら、その方法では冗長自由度の増加に伴って運動学的解析が複雑化するという問題がある。

産業用ロボットによる機械加工を行うために重要な課題として、「工具経路の誤差」「剛性・可操作性の維持」「機体の振動」などがある。これらの課題を解決するためには、(1)工具軌跡、(2)関節角度、(3)速度計画を同時に最適化する必要がある。ただし、これらの要素は互いに干渉しており、独立で扱うことが出来ない。加えて、冗長システムの運動力学が複雑であることもあり、機械加工を目的とした産業用ロボットの最適な軌跡制御問題は解決できていない。

このような背景の下、申請者は産業用ロボットの剛性と可操作性を高く保ちながらロボット手先の位置姿勢を正確に高速制御するためには、工具軌跡、関節角度、速度計画の関係を明らかにし、これらを同時に最適化しなければならないと考えた。そのため、産業用ロボットに冗長運動軸を追加し、システムの冗長自由度を高める必要がある。しかしながら、冗長システムの高速度高精度な軌跡制御を実現するためには、複雑で非線形性を持つ運動力学を考慮しながら、関節軌跡を最適化しなければならないという課題がある。

2. 研究の目的

本研究では2軸直交ステージと6軸産業用ロボットによる8軸制御システムを構築し、その運動学的冗長性を活かすことにより、機械加工に必要な各関節軌跡指令の最適化を目的とする。とくに高速高精度な軌跡制御を実現するために、(1)所要の作業空間における位置姿勢誤差を考慮した工具軌跡の補間、(2)機械加工に必要な高い剛性および可操作性を維持する関節角度の選択、ならびに(3)機体振動を低減する速度プロファイルの生成を行い、これら3項目の同時最適化を実現する。

3. 研究の方法

本研究では、2軸直交ステージと6軸垂直多関節の産業用ロボットを用いることで8軸冗長システムを提案し、工具軌跡、関節角度、速度計画の相互関係を明らかにして、冗長運動自由度を活かした高剛性および可操作性を具備した高速高精度な軌跡生成アルゴリズムの構築を目標とする。

(1) 図1に示すDecoupled Approachを用いて、手先位置を直交座標系で手先姿勢を球面座標系でそれぞれ離散指令補間することによる、作業領域での正確な軌跡生成を実現する。

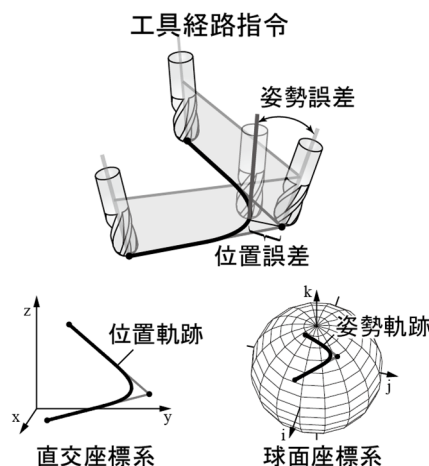


図1 Decoupled Approachによる軌跡補間

(2) ロボットの持つ冗長関節角度とシステムの剛性との関係を明らかにし、最適なロボット関節姿勢の選択方法を提案する。

(3) 産業用ロボットは、その姿勢により振動に影響する重心や周波数が変化する。そこで、ロボットの関節姿勢と振動の関係を明らかにし、FIR (Finite Impulse Response) フィルタによる速度プロファイル法 (図2参照) を応用して、機体振動の抑制を行う。

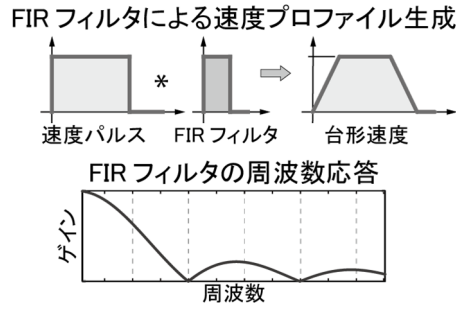


図2 FIRフィルタを用いた速度計画と周波数応答

4. 研究成果

(1) 工具の位置姿勢指令を直交座標系と球面座標系とに分けて補間する Decoupled Approach と、速度プロファイルの連続性に注目した躍度制御による Kinematic Smoothing とを用いた 6 軸産業用ロボットの軌跡生成法を提案した。図3に提案手法によるコーナリング軌跡と速度プロファイル生成法を示す。3分割したコーナリング期間に対して躍度軌跡を制御することで、離散指令補間時に生じる内回り誤差の制御が可能にした。

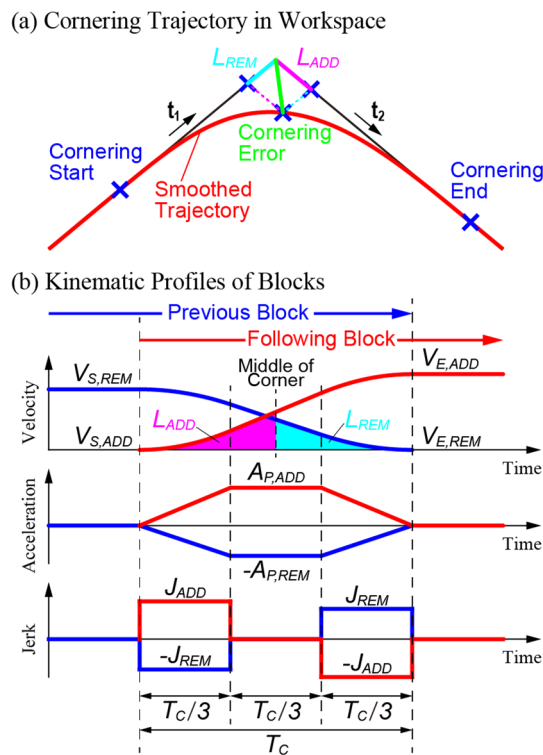


図3 躍度制御による台形加速度プロファイルを用いた内回り誤差制御

図4に提案する産業用ロボットの位置姿勢軌跡生成法による離散指令の補間結果を示す。提案した軌跡生成法により、作業領域において離散指令で与えられた位置姿勢指令から加速度が連続した補間軌跡が生成できることを確認した。

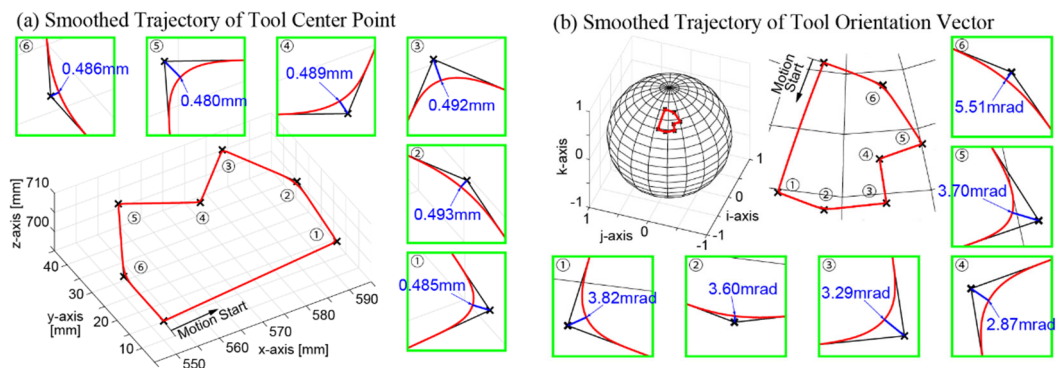
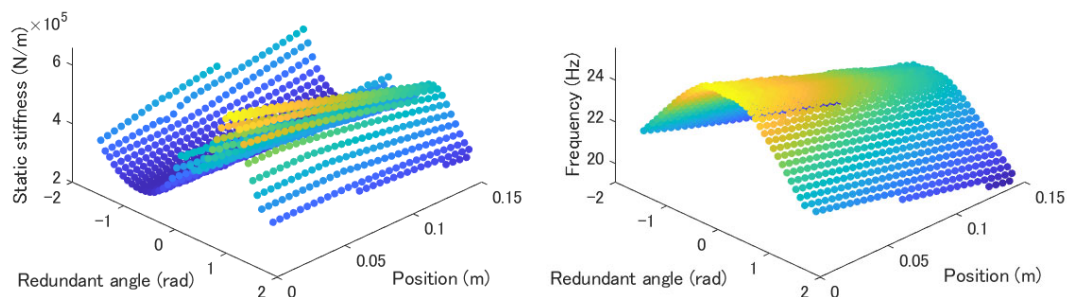


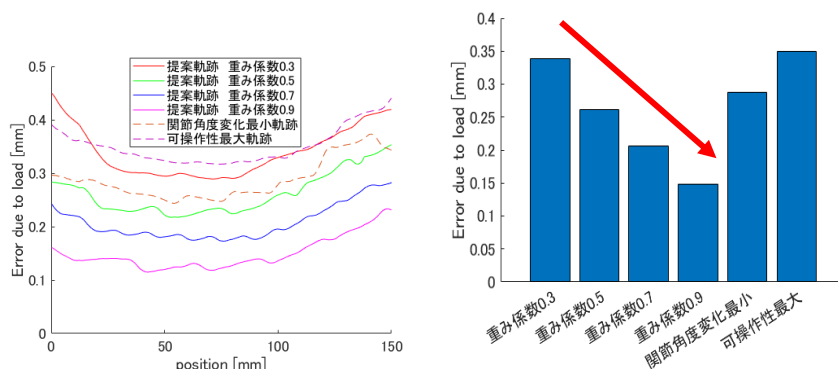
図4 提案法による工具軌跡補間

(2) 6軸産業用ロボットの有する運動学的冗長性に注目して、位置決め精度の静的および動的成分の制御法を提案した。図5に冗長関節角度の変化が静剛性および固有振動数へ与える影響の様子を示す。算出した静剛性マップおよび固有振動数マップから、産業用ロボットの姿勢により、どのように静剛性および固有振動数が変化するかを確認した。また、2つのマップの関係を示す重み係数を用いて、静荷重および加振力に対する位置決め精度を制御可能な軌跡生成法を提案した。

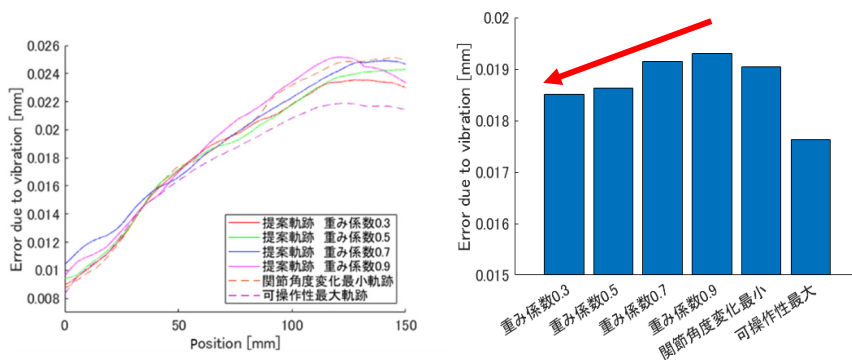


(a) 静剛性マップ (b) 固有振動数マップ
図5 冗長関節角度の変化と静剛性および固有振動数との関係

実機による比較試験の結果を図6に示す。提案法により生成した軌跡は従来軌跡と比較して、静的な位置決め誤差もしくは振動の振幅を低減させることが可能であること、また重み係数を用いて所望の特性を持つ軌跡が生成できることを確認した。



(a) 静的位置決め誤差



(b) 振動による動的位置決め誤差

図6 生成軌跡による位置決め精度の計測値

(3) 産業用ロボットが有す姿勢により固有振動数が変化の特徴を考慮した、振動抑制を目的とした速度プロファイル生成法を提案した。従来のFIRフィルタによる速度プロファイルでは、加速時と減速時とに除去できる周波数成分は同じであるため、姿勢により固有振動数が変化するロボットへの適用には課題が確認できた。そこで、加速時と減速時に異なる任意の周波数を除去した速度プロファイルを生成するため、躍度制御による軌跡生成法を提案した(図7参照)。

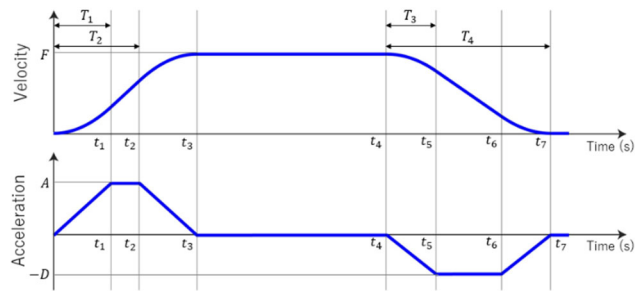


図7 システムの固有周波数変化に対応した速度プロファイル生成法

本研究では、「移動開始点および終了点参照法」と「振幅積分値最小法」による速度プロファイル生成法を提案した。提案法により、加速および減速時それぞれで除去したい周波数から速度プロファイルを算出することが可能になる。図8にシミュレーションによる2つの提案法の検証結果を示す。シミュレーション結果より、提案する2つの速度プロファイル生成法が産業用ロボットのような固有振動数が姿勢により変化するシステムに対する振動抑制に有用であることを確認した。

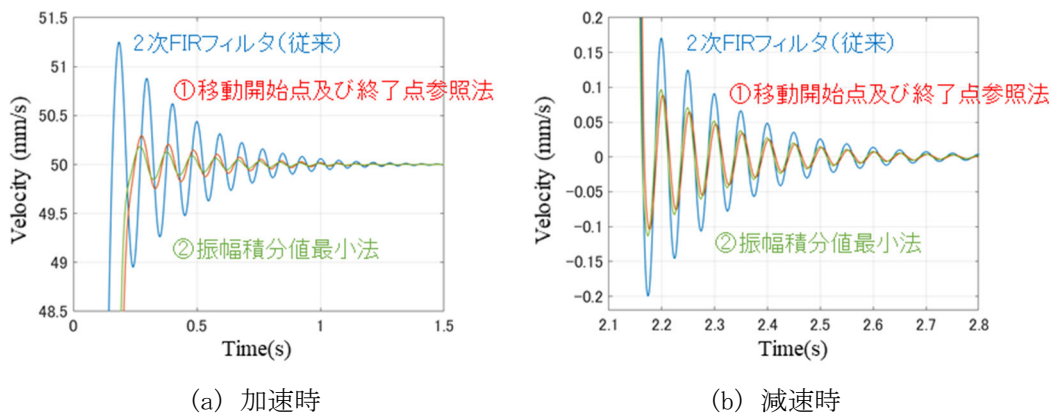


図8 提案手法と従来手法との振動の様子

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shingo Tajima, Satoshi Iwamoto, Hayato Yoshioka	4. 巻 15
2. 論文標題 Kinematic Tool-Path Smoothing for 6-Axis Industrial Machining Robots	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 621 ~ 630
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/ijat.2021.p0621	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 Shingo Tajima, Burak Sencer	4. 巻 175
2. 論文標題 Online interpolation of 5-axis machining toolpaths with global blending	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Machine Tools and Manufacture	6. 最初と最後の頁 103862 ~ 103862
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijmachtools.2022.103862	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

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Shingo Tajima, Burak Sencer, Hayato Yoshioka
2. 発表標題 Kinematic Smoothing for Singularity Avoidance in 5-axis Machining
3. 学会等名 18th International Conference on Precision Engineering（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Teruto Hifumi, Shingo Tajima, Hayato Yoshioka
2. 発表標題 Tool-path control for singularity avoidance of 5-axis machine tool by combining circular arc and cubic spline
3. 学会等名 International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21)（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮下和也, 吉岡勇人, 田島真吾
2. 発表標題 産業用ロボットの固有振動数変化を考慮した速度プロファイル生成法
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩本啓志, 田島真吾, 吉岡勇人
2. 発表標題 冗長性を持つ産業用ロボットの機械加工における位置決めの高精度化
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔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

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