

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	球対偶を有するパラレルロボットの対偶すきまを考慮した動力学解析と駆動トルク測定に基づく対偶すきまの同定
Title(English)	Dynamic analysis of parallel robot with spherical joints considering joint clearances and clearance identification based on actuation torque measurement
著者(和文)	大野真澄
Author(English)	Masumi Ohno
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11916号, 授与年月日:2021年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:武田 行生,菅原 雄介,岩附 信行,山浦 弘,進士 忠彦,松浦 大輔
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11916号, Conferred date:2021/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

# 球対偶を有するパラレルロボットの対偶すきまを考慮した 動力学解析と駆動トルク測定に基づく対偶すきまの同定

東京工業大学 工学院機械系  
大野 真澄

## 論文要約

パラレルロボットの連続稼働によって発生する対偶のすきまは、ロボットの出力誤差および振動的挙動を引き起こすため、これを評価し、事故を未然に防ぐ方策が求められる。本論文では、多数の球対偶を有するパラレルロボットであるデルタロボットを対象として、対偶すきまに起因する出力誤差および振動的挙動の評価のための運動解析手法の開発、および、その解析結果を利用した、対偶素の衝突に起因する駆動トルクの変動の測定に基づく対偶すきまの同定手法の開発を目的としている。本論文は全8章より構成され、各章の概要は次の通りである。

第1章「緒論」では、本研究の社会的背景、関連研究、本論文の目的と構成、および本論文の貢献について述べている。

第2章「研究対象と問題設定」では、本研究の対象としてデルタロボットを紹介し、本研究で扱う対偶すきまを考慮した解析および対偶すきまの同定に関する問題を設定するためにモデル化の前提条件を述べている。

第3章「準静的モデルに基づく対偶すきまを考慮したパラレルロボットの誤差解析」では、対偶すきまに起因する振動的挙動を無視できる場合を考え、計算コストの小さい準静的モデルによる対偶すきまを考慮した出力誤差の解析手法を提案している。ロボットの加速度が変化する時刻前後の出力誤差を比較する実験により提案手法を検討し、対偶すきまに起因する出力誤差を定量的に評価できることを確認している。そして、誤差解析の精度性の指標として、振動的挙動の減衰に要する時間に着目し、その近似値を求める手法を提案している。出力節の加速度を測定する実験を行い、振動的挙動の減衰に要する時間の理論値と実験値の大きさを比較したところ、正の相関が見られ、指標の有効性を確認している。

第4章「任意の球対偶にすきまを設定可能なパラレルロボットの動力学解析」では、対偶すきまに起因する振動的挙動を評価するため、対偶すきまを考慮したパラレルロボットの動力学解析手法を提案している。提案手法は Baumgarte の拘束安定化を不要とし、すきまを設定する球対偶の組み合わせによらず、容易に運動方程式を導出可能とするため、対偶素間の相対変位を一般化座標として用いた運動方程式を利用している。ロボットの動き始めにおいて単一の球対偶でのみ衝突の生じやすい軌道によってロボットを動作させたときの出力節の加速度波形について、提案手法による数値解析結果と実機による測定結果を比較することで、手法の妥当性を検討した。数値解析結果から、すきまを考慮した対偶に

において、対偶素同士が接触して滑る挙動および分離して衝突する挙動が現れ、このときに出力節の加速度が大きく変動していることから、対偶素の分離・衝突挙動に起因して振動的挙動が生じていることを確認している。また、対偶すきまに起因する加速度変動の現れる条件が、数値解析結果と実験結果で一致し、対偶すきまに起因する振動的挙動を解析する手法としての提案手法の有効性を確認している。

第5章「すきまを有する球対偶の衝突挙動の評価指標の提案」では、すきまを有する対偶における対偶素の衝突が駆動トルク波形に与える影響の大きさを調べるため、すきまを有する球対偶における対偶素の衝突に起因する振動的挙動の大きさを評価する指標として、「対偶衝突指数」を提案している。本指標は、すきまを有する球対偶における対偶素の分離時の運動の解析に基づき、分離から衝突までの対偶素間に作用するとみなされる仮想的な相互力によってなされる仕事によって定義している。

第6章「パラレルロボットの対偶すきまの同定のための最適軌道の設計」では、第5章において提案した対偶衝突指数を用いて、対偶すきまの同定問題を低次元化するための軌道設計の手法を提案している。もし、一つの球対偶（検出対象対偶と呼称する）のみで衝突挙動を生じさせる軌道が存在すれば、その軌道を用いたときのトルク変動を検出することで、その対偶におけるすきまを同定することが可能となる。検出用軌道が全ての球対偶に対して個々に存在すれば、対偶すきまの同定問題を一次元の問題に低次元化することができる。この考えに基づき、対偶衝突指数を用いて検出用軌道に関する多目的最適化問題を定式化している。本手法はデルタロボットのモデルに対して適用され、設計した検出用軌道を用いた駆動トルク測定実験により検討された。実験結果から、出力節側の球対偶の検出用軌道については、検出対象対偶の過大なすきまに起因する駆動トルクの著しい変動が検出され、検出用軌道の利用による対偶すきまの同定問題の低次元化に成功したことを確認している。そして、駆動トルクの測定結果に対して、教師あり機械学習のモデルによる対偶すきまの検出性能評価を実施し、複数の球対偶に対して設計した検出用軌道を用いて、過大なすきまの検出が可能であることを確認している。

第7章「一般の軌道条件下でのパラレルロボットの対偶すきまの同定」では、対偶すきまを考慮した動力学解析の結果を利用することで、第6章で設計したような特定の軌道によらず、パラレルロボットの球対偶のすきまを同定する手法を提案している。本手法は動力学解析と実機測定の結果に対して、対偶すきまと対偶すきまに起因するトルク変動を関連づける数理モデルを構築し、実機測定で用いた球対偶のすきまについて解く手法である。実機実験と動力学解析の実施により、提案手法を検討し、すきまの存在する球対偶が高々2か所の場合は、すきまを有する球対偶で衝突の生じやすい加速度の大きさの軌道を用いて、過大なすきまを個別に検出可能であることを確認している。

第8章「結論」では、本論文で得られた成果、本論文で得られた課題、本研究の展望を述べている。

以上