

平成 30 年 6 月 17 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420055

研究課題名(和文)形状創成運動の確率的偏差に基づく多軸工作機械の最適構造設計に関する研究

研究課題名(英文)A study on optimal structure design for multi-axis machine tools based on statistical deviation of shape generation motions

研究代表者

杉村 延広 (SUGIMURA, Nobuhiro)

大阪府立大学・人間社会システム科学研究科・教授

研究者番号：80135813

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、多軸工作機械の直線テーブルおよび回転テーブルの案内面における幾何公差に基づいて、工具と工作物間の形状創成運動の偏差を統計的に解析するモデルを提案する。次に、このモデルを用いて、工作物に対する工具の形状創成運動の標準偏差について許容範囲が指定される場合に、幾何公差の公差値を適切に設計する手法を提案し、構造の異なる3種類の5軸工作機械の公差設計に適用する。また、提案手法をパラレルリンクロボットの運動偏差のモデルに拡張するとともに、ロボットを構成するリンクおよびジョイントの公差設計に適用する。

研究成果の概要(英文)：The objective of the present research is to establish a computer-aided design system for specifying a suitable set of the geometric tolerances of the guide-ways considering the trade-off between the requirements on the kinematic motion deviations and the ease of the manufacturing processes. A mathematical model is proposed to represent the standard deviations of the shape generation motions, based on the tolerance values of the guide-ways of the machining centers. A systematic method is proposed here, by applying an optimization method, to determine a suitable set of the tolerance values of the guide-ways under the constraints on the kinematic motion deviations. The method is applied to some design problems of the geometric tolerances of the guide-ways included in the five-axis machining centers. The same method is expanded and applied to the tolerance design for the parallel link robots used for the precise and small product assemblies.

研究分野：機械生産工学

キーワード：工作機械 パラレルリンクロボット 運動偏差 幾何公差 公差設計

1. 研究開始当初の背景

工作機械の基本機能は、工具と工作物の間に必要な相対運動(これを形状創成運動と呼ぶ)を実現することである。工作機械に要求される最も重要な性能のひとつは形状創成運動の精度であり、各種の要因から定まる運動の偏差を設計仕様の範囲内に収めることが要求される。そのために、工作機械における加工プロセスを形状創成理論に基づいてモデル化し、主軸および送り運動軸間の組立誤差が形状創成運動の偏差に与える影響の解析が行われてきている。また、国際規格に基づいて、工作機械がもつ運動偏差を評価する手法の開発が進められている。

従来の研究および開発は、工作機械の運動軸の組合せ、すなわち多軸工作機械の構造が既知の状態では形状創成運動の偏差に与える影響を理論的に解析することが主目的であった。しかし、今後要求される金型やタービンインペラーなどの超高精度加工を実現するには、加工対象曲面に最適な工作機械の構造を設計することが求められる。すなわち、顧客の要求する形状精度を実現するために最適な運動軸の組合せを設計する手法が要求される。また、工作機械の組立誤差に起因する形状創成運動の偏差は、運動軸全体の直角度および平行度などを表す系統的偏差と、案内面のうねりなどに起因する非系統的偏差があり、非系統的偏差については確率的な取り扱いが不可欠となるため、統計的な確率分布に基づく解析と評価手法が必要である。

2. 研究の目的

近年、多軸制御工作機械が、金型やタービンインペラーなどの複雑な曲面形状加工に広く適用されるようになってきている。そこで解決すべき重要な問題として制御軸数が増えることによる加工精度の低下があげられる。加工精度が低下する要因のひとつとして、運動軸間の相対位置および姿勢の偏差(これを組立誤差と呼ぶ)があり、高精度の曲面形状の創成を行うには、加工曲面形状に適した工作機械の構造、すなわち運動軸の構成を設計することが必要である。本研究では、加工精度の観点から工作機械の最適構造設計を行う方法論の確立を目的として、運動偏差を統計学的に評価する手法を適用し、最適な工作機械の構造を創出する手法を検討する。

また、近年、小型製品の組立などに利用されている小型パラレルリンクロボットについても、リンクとその接続部の組立誤差による影響が大きいため、パラレルリンクロボットの運動偏差解析と精度設計も検討する。

3. 研究の方法

3.1 形状創成運動偏差の定式化

多軸工作機械の運動軸は直線運動軸と回転運動軸から構成されており、形状創成理論ではこれらの運動軸による形状創成運動を

4×4 同次座標変換行列で表現している。ここでは、多軸工作機械の形状創成運動の偏差を表すモデルを定式化する。

3.2 運動偏差の確率分布の定式化

形状創成運動偏差のうち非系統的な偏差は、工作機械の案内面の製造時における幾何学的な偏差に起因するものと考えられる。すなわち、製造公差内における案内面のばらつきが形状創成運動の非系統的な偏差として表れると考える。これに基づいて、案内面の幾何学的偏差のばらつきを標準偏差で表すことができると仮定し、案内面の幾何学的偏差の標準偏差と運動偏差の標準偏差の関係を表す式を求める。

3.3 形状創成運動偏差の推定

具体的な工作機械の形状創成運動の偏差の推定を行う。すなわち、 x 、 y 、 z 軸の相対的な直角度に関する偏差(系統的偏差)およびそれ以外の偏差(非系統的偏差)を 3.2 のモデル式をもとに、最小自乗近似により推定する。また、各運動軸の非系統的偏差に基づいて、各運動軸案内面の幾何学的な偏差を推定する。

3.4 形状創成運動偏差のシミュレーションとモデルの評価

多軸制御工作機械について、タービンブレードなどの解析曲面および金型などの自由曲面の加工を想定した運動を行い、そのときの工具と工作物間の距離の偏差を DBB 法により計測する。この計測結果と 3.3 の形状創成運動偏差の推定値に基づくシミュレーションにより求めた計算結果を比較し、3.1 で求めたモデルの妥当性の検証を行う。

3.5 パラレルリンクロボットのモデル化

リンクと回転および球面ジョイントを組合せたパラレルリンクロボットについて、リンクおよび接続部の幾何学的偏差とハンド部の運動偏差の関係を、形状創成理論に基づいてモデル化し、運動偏差の解析を行う。また、運動偏差の解析結果と DBB 法による運動偏差の計測結果と比較し、モデルの妥当性を検証する。

3.6 工作機械構造の設計基準の策定

3.4 および 3.5 の結果に基づいて、多軸制御工作機械を用いて各種の加工面の形状を創成する場合を考え、形状創成運動の偏差に最も大きな影響を与える案内面の幾何学的偏差をもとめる。また、パラレルリンクロボットについても、ハンド部の運動偏差に与える影響が大きなリンクおよびジョイント部の幾何学的偏差を求める。これらにより、多軸工作機械およびパラレルリンクロボットの運動偏差を所定の範囲内に規定するために重要となる案内面、リンクまたはジョイントを明確にする。

4. 研究成果

4.1 モデル化とシミュレーション

本研究では、多軸工作機械およびパラレルリンクロボットを対象に、構成要素の幾何学的偏差に起因する形状創成の偏差を表現するためのモデルを提案し、このモデルに基づいて運動偏差を解析した。また、運動偏差を所定の範囲内に規定することを目的として、構成要素の幾何公差を設計する手法を提案し、具体的な工作機械およびパラレルリンクロボットの公差設計に適用し、その有効性を検証した。

図1はDBBを適用してパラレルリンクロボットのハンド部の運動偏差を計測した例を示す。また、ロボットの運動偏差を解析するためのモデルを用いて運動偏差を解析し、その結果と計測した結果を比較した例を図2に示す。同図から、DBB法による計測結果とシミュレーション結果がよく一致していることがわかる。

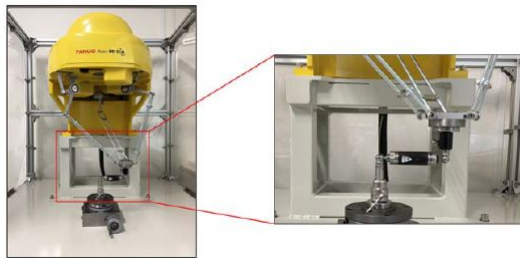
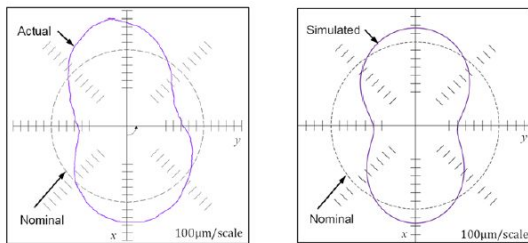


図1 DBBによる運動偏差の計測例



(a)DBBによる計測 (b)シミュレーション

図2 運動偏差の計測とシミュレーション

4.2 多軸工作機械の公差設計例

機械構造が異なる3種類の5軸制御工作機械について、構成要素の幾何公差と形状創成運動の偏差との関係を表現するモデルを提案した。また、このモデルを用いて形状創成運動の偏差が要求値の範囲内に規定するために必要な構成要素の幾何公差の公差域を設計する手法を提案した。この手法を用いて、幾何公差の公差域の最適設計を行った結果を図3に示す。同図において、横軸の設計パラメータ(Design Parameter)が公差域の種類を、縦軸が設計された公差域の値を示す。この図から、5軸制御工作機械における回転案内面に関連する公差域の値が小さく設計されており、回転運動に関係する案内面が形状

創成運動の偏差に重要であることがわかる。

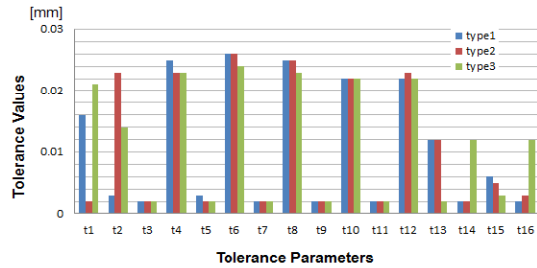


図3 多軸工作機械における運動偏差と幾何学的偏差

4.3 パラレルリンクロボットの公差設計

図1で計測したパラレルリンクロボットを対象として、構成要素の幾何公差と形状創成運動の偏差との関係を表現するモデルを提案した。また、このモデルを用いてハンド部の運動偏差が要求値の範囲内に規定するために必要な構成要素の幾何公差の公差域を設計する手法を提案した。この手法を用いて、幾何公差の公差域の最適設計を行った結果を図4に示す。同図において、横軸の設計パラメータ(Design Parameter)が公差域の種類を、縦軸が設計された公差域の値を示す。この図から、パラレルリンクロボットの回転案内面に関連する公差域の値が小さく設計されており、回転運動に関係する案内面が形状創成運動の偏差に重要であることがわかる。

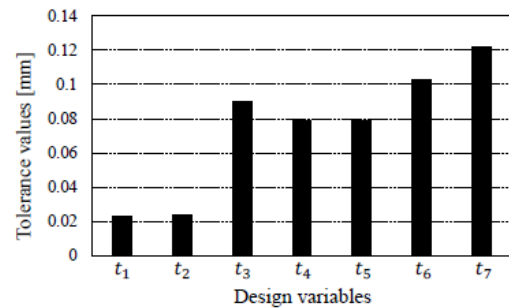


図4 パラレルリンクロボットの幾何学的設計例

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6件)

Wiroj Thasana, Nobuhiro Sugimura, Koji Iwamura, Yoshitaka Tanimizu, A study on Estimation of 3-Dimensional Surface Roughness of Boring Processes Including Kinematic Motion Deviations, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, JSME, Vol. 8, No. 4, Paper No.14-00096, Total 12 page (2014)

Atsushi Takahashi, Arata Yoshida, Wiroj Thasana, Nobuhiro Sugimura, Koji Iwamura, Yoshitaka Tanimizu, Analysis of Kinematic

Motion Deviations of Machining Centers Based on Geometric Tolerances, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, JSME, Vol. 8, No. 4, Paper No.14-00142, Total 12 page (2014)

Wiroj Thasana, Nobuhiro Sugimura, Koji Iwamura, Yoshitaka Tanimizu, A Study on Estimation of Three-dimensional Tolerances Based on Simulation of Virtual Machining in Turning Processes Including Kinematic Motion Deviations, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, JSME, Vol. 9, No. 1, Paper No.14-00507, Total 13 page (2014)

竹松良, 里中直樹, 吉田新, 杉村延広, 岩村幸治, 谷水義隆, 工作機械の形状創成運動モデルに基づく構成要素の公差設計に関する研究, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.834, pp.1-12 (2015)

里中直樹, 竹松良, 杉村延広, 岩村幸治, 谷水義隆, 工作機械の形状創成運動モデルに基づく構成要素の公差設計に関する研究(テーブルの位置を考慮した理論的解析), 日本機械学会論文集 [DOI: 10.1299/transjsme.16-00561], Vol.83, No.848, pp.1-17(2017)

Ryo TAKEMATSU, Naoki SATONAKA, Wiroj THASANA, Koji IWAMURA and Nobuhiro SUGIMURA, A study on tolerances design of parallel link robots based on mathematical models, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Bulletin of the JSME [DOI: 10.1299/jamdsm.2018jamdsm0015], Vol.12, No.1, pp.1-14(2018)

[学会発表](計4件)

Wiroj Thasana, Nobuhiro Sugimura, Arata Yoshida, Koji Iwamura, Atsushi Takahashi, Yoshitaka Tanimizu, A Study on Estimation of 3-Dimensional Tolerance of Simulation in Boring Processes Including Kinematic Motion Deviations, Proc. of ISCIE / ASME International Symposium on Flexible Automation 2014, CD-ROM, Total 8 page, 2014

Ryo TAKEMATSU, Nobuhiro SUGIMURA, Arata YOSHIDA, Wiroj THASANA, Yoshitaka TANIMIZU and Koji IWAMURA, A Study on Tolerance Design for Machine Tools based on Shape Generation Functions, Proc. of the 6th TSME International Conference on Mechanical Engineering, CD-ROM, Total 6 pages, 2015.

Ryo Takematsu, Naoki Satonaka, Nobuhiro Sugimura, Koji Iwamura, Thinh Nguyen Quang, Yoshitaka Tanimizu, A Study on Tolerance Design of Five-Axis Machining Centers, Proc. of International Symposium on Flexible Automation 2016, pp.356-359, 2016.

Nobuhiro Sugimura, Tomotaka Yamada, Naoki Satonaka, Koji Iwamura, Wiroj Thasana, Ryo Takematsu, A Study on Tolerance Design of Parallel Link Robots, Proc. of the International Conference on Design and Concurrent Engineering 2017 & Manufacturing Systems Conference 2017, CD-ROM, Total 8 pages, 2017.

6. 研究組織

(1)研究代表者

杉村延広 (SUGIMURA, Nobuhiro)
大阪府立大学・人間社会システム科学研究科・教授
研究者番号: 80135813

(2)研究分担者

岩村幸治 (IWAMURA, Koji)
大阪府立大学・人間社会システム科学研究科・教授
研究者番号: 40332001

(3)研究分担者

谷水義隆 (TANIMIZU, Yoshitaka)
大阪府立大学・工学研究科・教授
研究者番号: 60275279