

令和 2 年 7 月 1 日現在

機関番号：25503

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18029

研究課題名(和文)幾何公差設計に応用可能な疑似表面モデルの生成

研究課題名(英文)Generation of pseudo surface model applicable for geometrical tolerancing

研究代表者

大塚 章正(Otsuka, Akimasa)

山陽小野田市立山口東京理科大学・工学部・講師

研究者番号：90611848

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):ウェーブレット分解を利用して加工痕の特徴を有する表面モデルのランダム生成法を開発した。提案した形状モデルと従来モデルを用いて接触状態のばらつきをシミュレーション上で定量的に比較した。その結果、形状モデルの凹凸の特徴により結果が統計的に異なることを示した。ここまで、当初の研究計画通りに進められた。今後は、実験を通して検証していく必要がある。付随的な成果として、凹凸を有する円筒モデルの作成、Dual-Tree複素ウェーブレット変換を用いた曲線の加工痕を含む表面生成法も開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、加工痕の特徴を有する表面モデルのランダム生成法を開発した。このモデルを公差解析シミュレーションに用いることで、より実際に近い組み立て状態を計算できる。また、ランダムに生成されるためモンテカルロシミュレーションによるばらつき解析にも応用できる。機械設計においては、これらの計算結果を元に幾何公差を定量的に設計できるようになる。

研究成果の概要(英文): In this study, a random generation method of a surface model with features of machining marks using wavelet decomposition was proposed. Variations of contact state was quantitatively compared on the simulation using the proposed models and the conventional models. The results were statistically different depending on the features of the machining marks. In the future, it will be necessary to verify the results through experiments. As ancillary results, a cylindrical model with irregularities was developed. Furthermore, more advanced surface generation method that includes curved machining marks using the Dual-Tree complex wavelet transform was developed.

研究分野：設計工学

キーワード：公差解析 幾何公差 Skin model shapes ウェーブレット変換 ランダム生成 ばらつき解析 工程能力指数 シミュレーション

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 機械製品は概念設計から始まり、基本設計、詳細設計の流れで仕様が決定されていく。詳細設計では、機能、性能、製造コスト、組み立て性などを考慮して公差設計が行われる。この公差設計において、昨今まで主に基本設計で活用されてきた CAE が公差設計支援ツールとして使用され始めた。例えば、CAE 内部の製品モデルの基準寸法に公差域内で乱数を与え、加工誤差と製品性能のばらつきを統計的に解析し、最適な公差を決定する設計法などが挙げられる。価格、性能、品質、信頼性などに対する顧客の要求が高まりつつある現在、このような統計的な公差設計法が今後の主流になると考えられる。また、近年の幾何公差の普及率の高さを顧みると、CAE の計算において寸法のみならず形状・位置・姿勢のばらつきも考慮されるべきである。形状のばらつきは、理想形体モデルでは表現できないため、幾何偏差を有する形状モデルが必要とされている。

(2) 形状モデルの生成に関する先行研究を以下にまとめる。一般的に、表面を離散的な三次元空間データと捉え、点もしくは面の集合として生成する手法が主流である。表面粗さのモデルを生成する手法として、逆フーリエ変換、自己相関関数等を用いたものがあり、ソフトゲージ(校正用標準データ)として応用されている。これは表面粗さスケールを対象としているため、幾何偏差スケールの表面モデルの生成には適さない。幾何偏差スケールの表面をモデル化する手法として、各種補間法を用いた研究がある。これらの手法は理論的に厳密ではあるが、実際の機械加工面の特徴との整合性(尤もらしさ)に疑問が残る。表面モデルの生成に近い研究には切削シミュレーションがある。これは力学的なシミュレーションであり、一つのモデル生成に相応の時間がかかる。統計的な公差解析には、多数の形状モデルが必要とされるため不向きであると考えられる。以上より、機械加工面の特徴を有した疑似表面モデル(点群データ)のランダム生成法の確立が必要とされている[図 1 参照]。

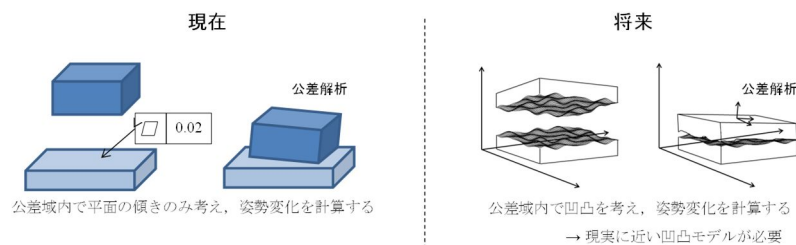


図 1 本研究課題の背景の概要図

2. 研究の目的

機械製品の開発ならびに設計においては、コンピュータ上で様々な製品性能を予測する CAE(Computer Aided Engineering)が必要不可欠となってきた。CAE 内部では、解析対象となる製品形状は幾何学的理想形体(平面、円筒、球など)の集合としてモデル化される。しかし、実際の製品は理想形体とは異なり、幾何偏差(理想形体からの偏差)・うねり・表面粗さなど、様々なスケールの凹凸を有している。これらの凹凸は、CAE を用いた製品性能の予測結果と実際の製品が発揮する性能との誤差、すなわちモデル化誤差を引き起こす。本研究課題では、幾何公差設計に応用可能な形状モデルのランダム生成法を開発する。これは、設計における幾何偏差スケールの凹凸による予測性能のモデル化誤差の低減につながる。

3. 研究の方法

まず、研削加工面を製作し、形状測定器ならびに表面粗さ測定器を用いて実測データを取得する。そして、ウェーブレット変換を用いて階層化し、ウェーブレット係数を得る。ここでの条件(階層化の数、マザーウェーブレット、乱数)の探索が必要となる。その後、ウェーブレット係数として階層化したデータに機械加工痕の特徴があるかないかを判断する。特徴の強い階層にはそれを継承させるために循環シフトを行うのみとし、特徴が弱い階層には正規乱数で更新する。その更新したデータを逆ウェーブレット変換し、高さデータとして戻す。これにより疑似表面モデルが得られる。生成した疑似表面モデル群と実測データ群の特徴を比較し、階層化条件の妥当性を検証する。最適な階層化条件で生成したモデルを用いて組み立て解析と CAE による構造解析を行い、提案手法と従来手法(ランダムフィールド法)の差を確認した。

(1) 機械加工面の製作と形状計測

機械加工は様々な工作機械や工具があるが、まずは一般的なスクエアエンドミルにより旋削加工された平面を対象とし、それに近い疑似平面モデルを作成することを目標とした。機械加工面は、縦型 NC フライス、卓上フライスなどを用いて複数制作した。加工後の高さデータを、形状計測装置を用いて計測した。また、表面粗さ測定器を用いて断面曲線のデータも取得した。

(2) 疑似表面生成アルゴリズムの検討とプログラムの実装

1つの計測データから、複数の疑似平面をランダムに作るアルゴリズムを検討し、これを MATLAB にて実装した。提案したアルゴリズムの概要を次に示す。

まず、取得したデータに対してウェーブレット分解を行い、各スケール(波長成分)に分解する。加工痕の位置と空間周波数に応じて、ウェーブレット係数の様子は変化する。また、ウェーブレット変換には様々なマザーウェーブレットが選択でき、その選択によって抽出される特徴が異なってくる。本研究では、モデルと実際の表面の特徴が最も合致するものを最適な条件として採用した。特徴があると判断されたウェーブレット係数は循環シフトを行い、特徴が無いと判断したのものには正規乱数を与える。その後、逆ウェーブレット変換を用いることで疑似表面モデルを生成する。

(3) 生成された疑似表面モデルの検証

提案手法の疑似表面モデルと従来手法の疑似表面モデルを用いて、組み立て解析の計算を行った。組み立て解析では表面モデル同士の接触状態を計算し、姿勢の変化量を計算した。この計算を繰り返し行い、両モデルにおける姿勢変化量の平均値と分散を比較した。同様に、構造解析では直方体モデルの上面に疑似表面モデルを張り付け、引張荷重をかけた時の最大主応力と最大ミーゼス応力を調査した。

4. 研究成果

(1) ウェーブレット分解を利用して加工痕の特徴を有する表面のランダム生成手順を開発した。この手法の特徴として、1つの加工後の表面形状データから、その形状の特徴を保ちつつランダムに複数の疑似表面を生成できるという点である。これは例えば、所有する工作機械の個体差を反映できるという点で優れている。これに関係する研究成果として、2017年11月第27回インテリジェント・システム・シンポジウムにおいて提案手法の概要を発表、国際雑誌 Artificial Life and Robotics において手法の具体的内容を検討し発表、国際会議 The 48th International Conference on Computers and Industrial Engineering において最適なマザーウェーブレットの選択の発表を行った。

(2) 形状スケールの測定データと表面粗さスケールの測定データを融合して疑似表面モデルを作成する手法を提案した。これにより、広範囲かつ高分解能な疑似表面モデルの作成が可能となった。この研究成果は、25th International Symposium on Artificial Life and Robotics において発表された。

(3) 組み立て解析における疑似表面モデルの検証

まず、組み立て解析を行うために凹凸を持つ表面モデルの組み立て姿勢を計算するソフトウェアを独自に開発した。次に、提案手法で生成した疑似表面モデルと従来手法で生成した疑似表面モデルを用いて組み立て姿勢を計算し、姿勢変化のばらつき解析を行った。モンテカルロシミュレーションのように、ランダムに生成した表面モデルを両モデルとも150枚準備し、2枚1組みにして接触面と見立てて姿勢変化を計算した。その結果、姿勢変化の平均値の差には有意差は確認されなかったが、分散には有意差があることが確認できた。従来モデルを利用する場合、組み立て姿勢の変化量を小さく見積もってしまうことも示された。この研究成果は国際論文誌 Computers & Industrial Engineering に投稿中である。

(4) 構造解析における疑似表面モデルの検証

有限要素法解析ソフト COMSOL を用いて梁の構造解析をおこなった。解析対象は、直方体モデルの側面に力を付加した時の最大ミーゼス応力と最大主応力である。比較のために、4.3.と同じように提案手法と従来手法により得られる疑似表面を用意し、直方体モデルの上面にのみこれを張り付けて100回の解析をそれぞれ行った。その結果、最大主応力ではモデル間に差が出る事が確認された。また、引っ張る方向により結果が変化することも確認された。どちらのモデルが本当に良いかは、実際に実験をして検証する必要があるが、それは今回の研究計画には含まれておらず今後の課題である。この研究成果は、第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会において発表された。

(5) 研究計画には無かった本課題に関連する研究成果

円筒形体のモデルの作成法の提案：

機械製品には円筒形体がよく見受けられるため、凹凸を持つ円筒モデルの作成を行った。円筒の側面、上面、下面を別々に計測後、データ処理を行い、これらのデータの接続を行うことで円筒モデルを作成する。この研究成果は、2019年9月、国際会議 SICE 2019 において口頭発表された。これにより穴とピンのモデリングが可能となり、モデリングの対象範囲が広がった。

加工痕に曲線が含まれるモデルの作成法の提案：

計画当初は予定していなかったが、曲線を含む加工痕をランダムに再現する手法を提案した。こ

れは、上述のウェーブレット分解の代わりに Dual-Tree Complex Wavelet Transform を用いる。さらに、この手法では表面粗さパラメータ Str に倣って各サブバンドのウェーブレット係数の特徴の有無の判断を定量的に行っている。本手法により、等高線パスやスパイラルパスで加工された後に生じる曲線の加工痕を含む疑似表面を生成できるようになった[図 2 参照]。この研究成果は、2020 年 6 月、CIRP 主催の国際会議 Computer Aided Tolerancing (CIRP CAT 2020, オンライン会議)において発表された。

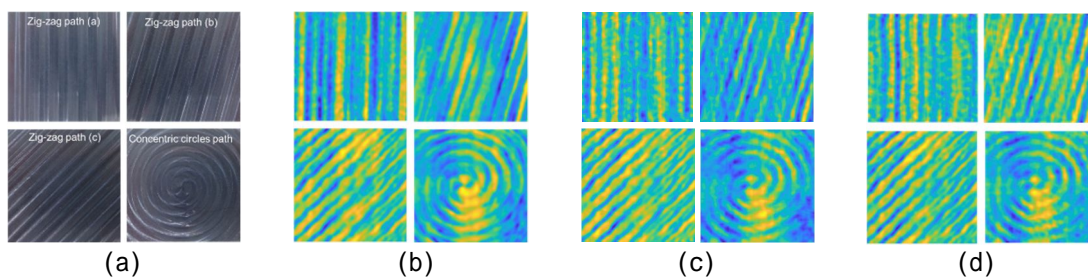


図 2 (a)フライス加工(4種類の加工パス)されたアルミニウムブロックの写真
(b)測定データ (c)提案手法によりランダムに生成された疑似表面 1 (d)同疑似表面 2

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 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Akimasa Otsuka, Koumei Muramatsu, Mizuha Sugi, Fusaomi Nagata | 4. 巻 23 |
| 2. 論文標題 Characteristic extraction of machined surface using wavelet transformation | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics | 6. 最初と最後の頁 316-320 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1007/s10015-018-0443-0 | 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 Akimasa Otsuka, Fusaomi Nagata | 4. 巻 204 |
| 2. 論文標題 Quality Design Method using Process Capability Index based on Monte-Carlo Method and Real-Encoded Genetic Algorithms | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 International Journal of Production Economics | 6. 最初と最後の頁 358-364 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.016 | 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15件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Akimasa Otsuka, Koumei Muramatsu, Fusaomi, Nagata |
| 2. 発表標題 OPTIMAL SELECTION OF MOTHER WAVELET FOR GENERATING SKIN MODEL SHAPES |
| 3. 学会等名 The 48th International Conference on Computers and Industrial Engineering（国際学会） |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Akimasa Otsuka, Fusaomi Nagata |
| 2. 発表標題 Random Generation of Skin Model Shape using Wavelet Decomposition and Reconstruction |
| 3. 学会等名 The SICE Annual Conference 2018（国際学会） |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 大塚章正, 國田健太郎, 村松幸明, 永田寅臣 |
| 2. 発表標題 機械加工面の特徴を有するスキンモデルシェイプの生成法 -ポストプロセスにおけるローパスフィルタの検討- |
| 3. 学会等名 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 村松幸明、大塚章正、永田寅臣 |
| 2. 発表標題 ウェーブレット変換による機械加工面の特徴抽出 ~ フライス加工面に対するマザーウェーブレットの比較 ~ |
| 3. 学会等名 第27回インテリジェント・システム・シンポジウム |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Koumei Muramatsu, Akimasa Otsuka, Mizuha Sugi, Fusaomi Nagata |
| 2. 発表標題 Characteristic extraction of machined surface used wavelet transformation |
| 3. 学会等名 24th International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Akimasa Otsuka, Naoto Miyoshi, Fusaomi Nagata |
| 2. 発表標題 Generation method of skin model shapes with features of machining marks using dual-tree complex wavelet transform |
| 3. 学会等名 CIRP Computer Aided Tolerancing 2020 (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 三好脩斗、大塚章正、永田寅臣 |
| 2. 発表標題 マルチスケーリング形状モデリングに向けた スティッチング法の検討 |
| 3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2019 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Akimasa Otsuka, Fusaomi Nagata |
| 2. 発表標題 Generation of Skin Model Shapes for Cylindrical Surface |
| 3. 学会等名 The SICE Annual Conference 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Akimasa Otsuka, Fusaomi Nagata |
| 2. 発表標題 Confidence Interval of Process Capability Index Caused by Sample Inspection in Mass Production |
| 3. 学会等名 49th International Conference of Computers & Industrial Engineering (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Akimasa Otsuka, Fusaomi Nagata |
| 2. 発表標題 Stack-up Problem of Cpk Index for Non Normal Distributions |
| 3. 学会等名 The 20th Asia Pacific Industrial Engineering And Management Systems (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Naoto Miyoshi, Akimasa Otsuka, Fusaomi Nagata |
| 2. 発表標題 Stitching surface data measured in different scales using wavelet transformation |
| 3. 学会等名 25th International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 三好脩斗、大塚章正、永田寅臣 |
| 2. 発表標題 マルチスケル特性を有するスキンモデルシェイプ生成法の提案 |
| 3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 武藤陸、大塚章正 |
| 2. 発表標題 スキンモデルシェイプを用いた組み立て誤差解析の計算手法の提案 |
| 3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 越智洋斗、大塚章正 |
| 2. 発表標題 構造力学シミュレーションの計算結果に対するスキンモデルシェイプの影響 |
| 3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 |
| 4. 発表年 2019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 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|