

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：25503

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04225

研究課題名（和文）非理想モデルを用いた公差解析の開発と総合的品质設計への展開

研究課題名（英文）Development of tolerance analysis using non-ideal models and application to comprehensive quality design

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・准教授

研究者番号：90611848

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：機械加工痕を有する疑似的な非理想のサーフェスモデルのランダム生成法の実験的検証を行った。その結果、様々な加工条件において、それらの特徴が疑似表面にも反映できていることを確認できた。歪みを最小にする疑似表面の繋ぎ合わせ法を開発し、3次元の非理想モデルを生成する手法を開発した。このモデルをCAEに適用すれば、加工誤差による製品特性への影響を分析できる。このモデルを利用して簡単な光学系に対して特性を計算し、そのばらつきをシミュレーションすることができた。これにより、非理想モデルを用いることで加工条件と機能特性を同時に検討できることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、製品設計において製品特性と同時に加工条件の選択も検討できることがあげられる。

研究成果の概要（英文）：A random generation method for pseudo-nonideal surface models with machining marks were experimentally verified. As a result, it was confirmed that these characteristics were reflected in the pseudo surface under various processing conditions. A method to connect pseudo-surfaces that minimizes distortion were developed to generate a three-dimensional non-ideal model. By applying this model to CAE, it is possible to analyze the impact of machining errors on product characteristics. Using the models, we were able to calculate the characteristics of a simple optical system and simulate its variations. This result suggests that both machining conditions and functional characteristics can be designed simultaneously by using the non-ideal models.

研究分野：設計工学

キーワード：幾何偏差 モデリング シミュレーション ランダム生成 ウェーブレット変換 最適化

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

デジタル化するものづくりの現場において、設計工程と製造工程の両方に関連する公差はさらに重要となっている。設計工程では機械特性を満足するように設計されており、製造工程では図面の指示により加工と計測がなされている。より確実に製品品質を担保する製品設計には、機械特性と同時に加工条件ならびに計測条件を考慮できる手段が必要である(図1)。ISO 17450では、幾何学的に理想な完全形体として Nominal model が定義されている。実際に機械加工された形状は、表面粗さ・うねり・幾何偏差など様々な空間周波数スケールの凹凸を有する。同規格では、凹凸を有するサーフェスモデルの概念として Skin model (Non-Ideal Model : 非理想形体) も定義されている(図1)。この非理想形体の概念に基づいた製品モデルを設計に用いることで、機械特性のばらつきと加工条件などの製造工程が同時に考慮できる。

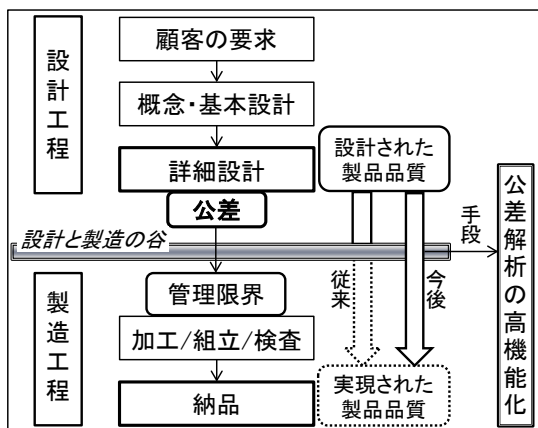


図1 設計の流れと本研究の狙い

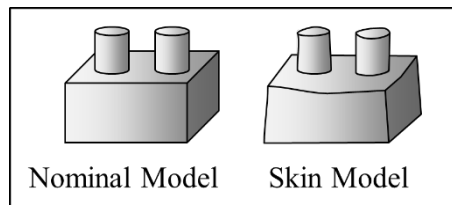


図2 Nominal model と Skin model

2. 研究の目的

- (1) 実加工面を有する非理想モデルの作製法を確立し、そのモデルの妥当性を種々の加工条件のもとで生成できることを確認する。
- (2) 非理想モデルを用いて機械特性の解析の計算に適用し、ばらつきの解析への展開可能性を検証する。

3. 研究の方法

(1) ウェーブレット変換を利用した機械加工の形状の特徴を反映した非理想サーフェスのランダム生成法を現在まで開発してきた。このサーフェスを複数枚接続し立体モデルを作成する必要がある。サーフェス同士を繋ぎ合わせる際には接続部の凹凸により隙間と干渉が生じてしまう(図3)。そして一般的な接続法で各面を逐次接続した場合、最後に接続する面同士で最も大きな隙間と干渉が生じてしまう。これを最小化するための大局的最適化を利用した手法を開発する(図4)。

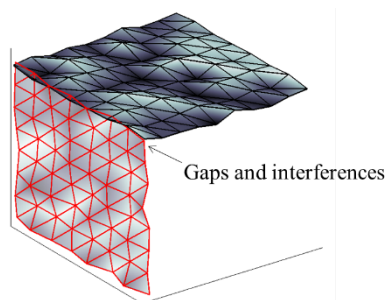


図3 接続部の隙間と干渉

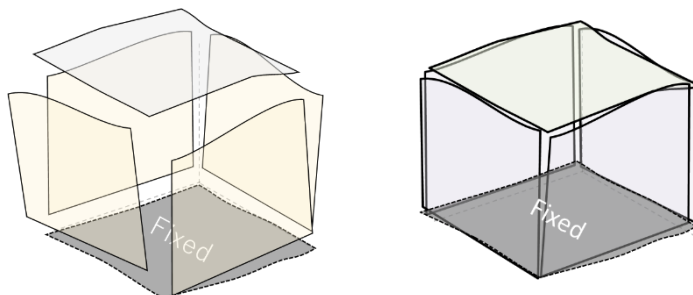


図4 立体モデルの最適化前と最適化後のイメージ

(2) 複数の立体モデルを組み立てるとアセンブリモデルを構成できる。立体モデルの接触面は凹凸があるため、組み立てた際にその影響により位置と姿勢の偏差が生じ、最終的には機械特性も変動する。この姿勢の変化を計算する手法を開発し、さらに機械特性として光学解析を行った。

図5にこの計算の概要を示す。基礎的な解析として単レンズとトリプレットレンズの光学系に対して計算を行う。光学製品は複数のレンズ-マウント群からなるため、各レンズの姿勢変化を予め計算しておく。レンズとレンズマウントの接触面は細いリング形状とし、レンズの微小な傾き角度を接触シミュレーションにより計算する。計算した各レンズの姿勢変化角を光学シミュレーションソフトに反映し、焦点位置を算出する。この手順を繰り返し、いわゆるモンテカルロ法を用いた計算により焦点位置のばらつきを分析する。

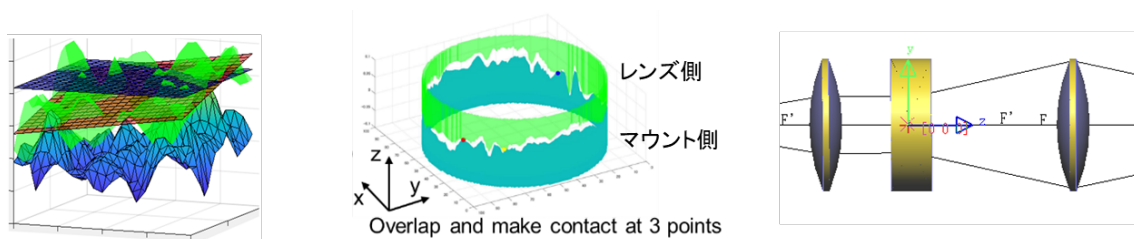


図5 (a)接触姿勢の計算例 (b)円環対の接触姿勢の計算例 (c)分析対象の光学系の例

4. 研究成果

(1) Dual-tree complex wavelet transform を用いたサーフェスモデルの作製法を開発し、本研究期間の間、継続して改良してきた。特にこの手法に含まれる設定パラメータを調整することで、様々な加工条件（加工パスの種類、工具半径、加工条件）で生成されたサーフェスモデルを擬似的に作成できるようになった。生成された疑似モデルは実物の表面性状と若干異なることも観察され、いまだ不完全であることは今後の検討課題でもある。

複数枚生成したサーフェス同士を接続する際、各サーフェスの位置と姿勢の6自由度の微調整を行うことで最低限の歪みで接続できるようになる手法を開発した。この微調整は、例えば6面体の場合は30個の設計変数（実数）を持つ最適化問題となるため、実数値型遺伝的アルゴリズムを用いて解決した。これにより、さらに現実の形状に近い非理想の立体モデルを作成する手法を確立できた。この立体モデルを組み合わせることで、アセンブリモデルの作製ができるようになった（図6）。

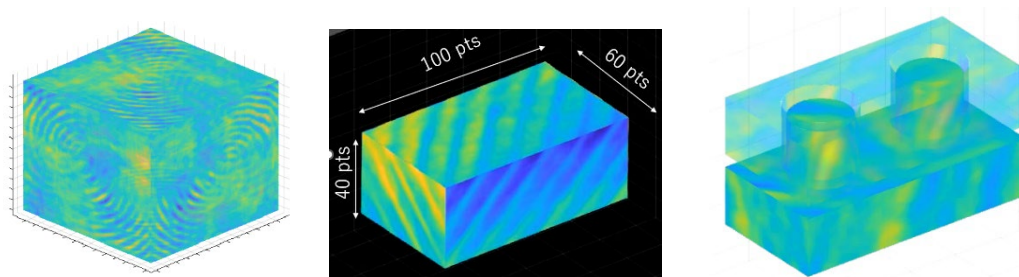


図6 作成した立体モデルの例（立方体と直方体）とアセンブリモデル例

(2) 図7に、非理想モデルを用いた姿勢変化の結果を光学シミュレーションに反映した結果を示す。非理想モデルの影響を確認しやすさを優先するために、光学系としては単レンズとトリプレットレンズを対象にしている。理想的な形状モデルを用いて姿勢変化がゼロとなる場合、焦点位置は変化しないが、つまりグラフの中心に集中するが、非理想形状モデルの結果は形状の凹凸による影響がばらつきとなって算出された。

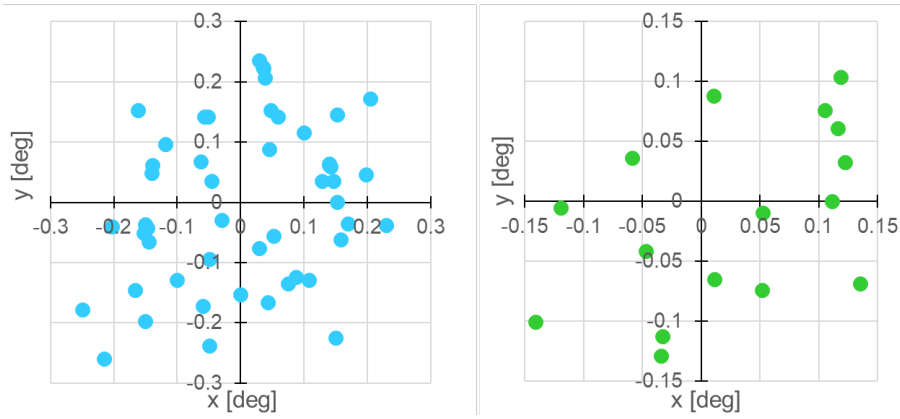


図7 焦点のばらつき（角度ベース）の計算結果（左：単レンズ、右：トリプレットレンズ）

以上より、非理想モデルを用いることで特性のばらつきに反映されることが結論づけられた。(1)の結果より非理想モデルは加工条件と関連づけて生成可能であることを考えると、非理想モデルを用いることで、製品特性のばらつきと加工条件を同時に考慮する詳細設計の可能性が、本研究結果により示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5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 大塚 章正 | 4. 巻 56 |
| 2. 論文標題 公差解析と公差設計に関する研究紹介 | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 設計工学 | 6. 最初と最後の頁 208-212 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 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, Komei Muramatsu, Fusaomi Nagata | 4. 巻 150 |
| 2. 論文標題 Data-driven generation of random skin model shapes by using wavelet transformation | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Computers & Industrial Engineering | 6. 最初と最後の頁 106860 ~ 106860 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cie.2020.106860 | 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, Naoto Miyoshi, Fusaomi Nagata | 4. 巻 92 |
| 2. 論文標題 Generation method of skin model shapes with features of machining marks using dual-tree complex wavelet transform | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Procedia CIRP | 6. 最初と最後の頁 224 ~ 229 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.procir.2020.05.176 | 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, Ryoga Hama, Fusaomi Nagata | 4. 巻 28 |
| 2. 論文標題 Experimental verification of the wavelet-based surface modeling method considering wear progression process | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics | 6. 最初と最後の頁 618-624 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10015-023-00876-w | 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, Takumi Kitadani, Fusaomi Nagata | 4. 巻 114 |
| 2. 論文標題 Global localization of non-ideal surface for generating skin model shapes | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Procedia CIRP | 6. 最初と最後の頁 183~188 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.procir.2022.10.025 | 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11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 Akimasa Otsuka, Fusaomi Nagata |
| 2. 発表標題 Effect analysis of the resolution of non-ideal surface models for mechanical contact simulations |
| 3. 学会等名 The 9th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Akimasa Otsuka, Yusei Miyake, Fusaomi Nagata |
| 2. 発表標題 Proposal of an additional convergence condition in topology optimization to ensure robustness to machining errors |
| 3. 学会等名 The 19th International Conference on Precision Engineering (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 大塚 章正, 木原 大輔, 永田 寅臣 |
| 2. 発表標題 画像処理を用いた切削加工面のスパイラルパスに起因する同心円状のピックフィードの検出法 |
| 3. 学会等名 第23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 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 大塚 章正、永田 寅臣 |
| 2. 発表標題 スキンモデルシェイプ生成に向けたGAを用いた凹凸を有するシェル要素の最適接続 |
| 3. 学会等名 第22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 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Akimasa Otsuka, Kazuya Hayashi, Fusaomi Nagata |
| 2. 発表標題 Proposal and verification of quality control method by adjusting process mean in post-process |
| 3. 学会等名 International Conference on Production Research 2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Akimasa Otsuka, Fusaomi Nagata |
| 2. 発表標題 Multi-scale modeling method of worn surfaces using wavelet transformation |
| 3. 学会等名 27th International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shogo Miyazaki, Akimasa Otsuka, Fusaomi Nagata |
| 2. 発表標題 Effect analysis of skin model shapes for a simple optic device in optical simulation |
| 3. 学会等名 The 23rd Asia Pacific Industrial Engineering and Management Society Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 宮崎将吾, 大塚章正, 永田寅臣 |
| 2. 発表標題 機構設計のための疑似サーフェスモデルの生成法の実験的検証 |
| 3. 学会等名 ロボット・メカトロニクス講演会2023 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shogo Miyazaki, Yuma Hino, Akimasa Otsuka, Fusaomi Nagata |
| 2. 発表標題 Verification of a random generation method for virtual machined surface models using DTCWT |
| 3. 学会等名 28th International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会) |
| 4. 発表年 2024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 |
|---------|---------|
|---------|---------|