

令和 3 年 5 月 14 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01354

研究課題名(和文) 産業用X線CTを用いたアセンブリ品の部品間隙間の評価・検査手法に関する研究

研究課題名(英文) Gap Analysis and Diagnosis for Mechanical Assembly using X-rays CT Scanning

研究代表者

鈴木 宏正 (Suzuki, Hiromasa)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：40187761

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,800,000円

研究成果の概要(和文)：機械のアセンブリ品を産業用X線CT装置によりスキャンした3次元CT画像を用いて、部品間の隙間を評価・検査する手法を開発した。部品隙間を求めるためのマルチフェーズ陰関数表現を理論的な基盤とし異部品間の隙間の中立面を計算して隙間の大きさを算出するアルゴリズムを開発してプロトタイププログラムにより評価を行った。3次元CTデータにおいて、隙間が数ボクセル程度の領域で隙間量を正しく計算できることを確認し、また隙間量がサブボクセルレベルでも一定の精度で計算できた。これによって機械部品の組立時に発生する隙間を、組立品全体で計測し可視化できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

機械製品は部品を組み立てることによって構成されるが、特にスイッチなどの可動部品を含む場合は、組立状態における部品の隙間を正確に計測することが難しかった。X線CTは非破壊で内部も含めて画像化できるので、本研究ではそのようなCT画像を用いて、隙間量を計測する手法を開発した。隙間量は、例えばスイッチの寿命に影響し、また触覚などの感性品質にも影響するために重要な品質ファクターであったが、これまで計測する手段が限られていた。本研究による手法によって、このような課題に対する一つの評価方法を提案することができた。

研究成果の概要(英文)：We have developed an evaluation method that computes gap between parts in an assembly using the 3D CT image taken by scanning the whole assembly. The method is theoretically based on a multi-phase implicit function and computes the amount of the gap using its medial axes. We also developed a prototype software to evaluate this algorithm and showed that a large gap more than a few voxels can be measured precisely while those under the voxel size can be also estimated. Using this algorithm, the distribution of the gap between the parts in an assembly can be measured.

研究分野：計算機援用工学

キーワード：産業用X線CT装置 リバースエンジニアリング アセンブリ解析 画像処理

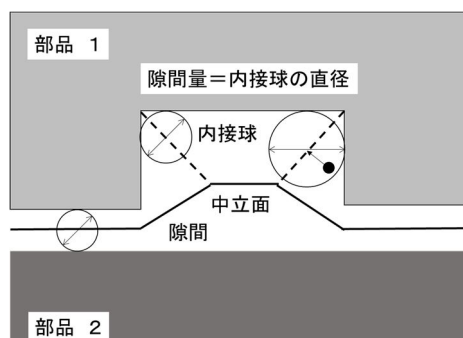
様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

多数の部品で構成されるアセンブリ品の組立状態は、アセンブリ品の信頼性や寿命に大きな影響を持つため、その検査が重要である。近年、産業用 X 線 CT の性能向上により、従来は不可能であった組立状態の解析を、産業用 X 線 CT によりアセンブリ品を丸ごとスキャンによって行う要求が高まっている。そのような解析の一つに、部品間の隙間評価があり、部品間の隙間が設計値を満たしているかどうかをチェックする。隙間量は、可動部品の劣化や、例えばスイッチなどでは触覚に影響する。このような要求に対して、CT 画像を用いた従来法では、数画素以上の大きな隙間を計測することはできるが、それ以下については計測精度が劣化したり、あるいは 1 画素以下の隙間の場合には計測ができなかった。本研究では、これらの問題を解決する隙間量の画像計測手法について研究開発を行った。

2. 研究の目的

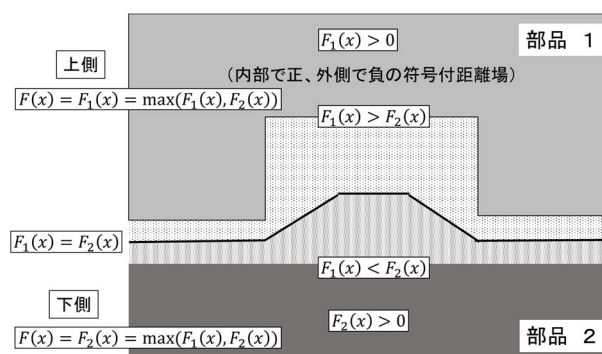
まず問題を設定する。アセンブリ品の産業用 X 線 CT の画像は、グレースケールの 3 次元画像であり、隙間に相当する部分は空気であるために画素値が小さく、背景領域として黒く撮影される。この背景領域に対して隙間量の分布を計算する。右の模式図は、部品 1 と部品 2 の隙間を計算している様子を示す。まず、2 部品間の隙間領域に対して、中立面を計算する。中立面は、計算幾何学の代表的な概念の一つで、図のように物体の表面の 2 点以上で内接する球の中心の軌跡として定義される。隙間の大きさ、つまり隙間量は、この内接球の直径として計算される。そして、隙間領域の任意の点の隙間量は、その点から最も近い中立面上の点の直径として定義する。以上が隙間量を計測する基本となる。



しかし、中立面は、CT 画像を 2 値化した 2 値画像の上で計算するので、隙間量は画素サイズ (ボクセルサイズ) の精度となってしまふ。本研究で扱う典型的な画像では、ボクセルサイズは $50\ \mu\text{m}$ から $100\ \mu\text{m}$ 程度であるが、精密組立品の隙間評価ではとしては大きすぎるという問題がある。そこで、本研究ではサブボクセルレベルでの評価を行うための手法を開発する。

3. 研究の方法

○アルゴリズムの開発 上記の目的を実現する理論として、アセンブリ品を、マルチフェーズ陰関数という表現法によって表し、さらに 2 部品間の隙間に対する中立面を等値面として算出した。部品は 3 次元空間の閉じた部分集合であるので、部品の表面からの符号付距離によって陰関数表現できる。符号は物体の外部で負の値をとるようにする。上の模式図では、部品 1、2 の陰関数 $F_1(x)$ と $F_2(x)$ が示されている。この二つを使って、 $F(x) = \max(F_1(x), F_2(x))$



という関数を作ると、模式図の

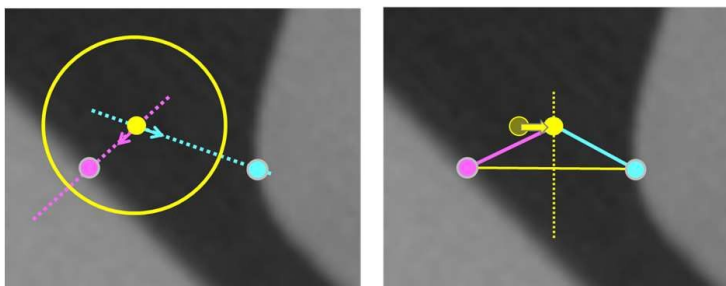
上側では $F(x) = F_1(x)$

下側では $F(x) = F_2(x)$

となる。これをマルチフェーズ陰関数という。これによって、空間が二つの領域に分割される。そして、その境界面は、 $F_1(x) = F_2(x)$ で与えられ、これは 2 部品間の中立面となる。この境界面は、 $F_1(x) - F_2(x) = 0$ なる等値面であるので、マーチングキューブ法のようにして、線形補間によりボクセルとボクセルの間に 2 多様体の境界面を発生することができる。この中立面は生成元を部品とするボロノイ面 [1] に相当する。また、個々の部品を区別せずに一体形状とみなして得られる通常の中立面 (スケルトン) [2] と異なるものである。

この考え方を CT 画像に適用する。つまり CT 画像は部品表面近傍では CT 値に勾配ができるため、これを上記の陰関数とみなすことができる。しかし、実際の画像では、特に隙間が小さい部分ではノイズの影響もあり、この方法を直接適用することが難しかった。そこで、部品の設計データである 3 次元 CAD モデルを利用した。本研究は設計されたアセンブリ品を検査するとい

う状況を考えているので、CADモデルが存在すると仮定し、CADモデルを用いて中立面を計算した。CADモデル上では、設計値として隙間が確保されており、中立面が存在する。計算は、CT画像のボクセルサイズに応じた格子点上で部品表面からの距離を算出することによって距離場を求めることによって行った。そして中立面は三角形メッシュとして生成する。



次に右図のように、この中立面からその法線方向にCT値（CT画像の画素値）をプロービングして、隙間量を算出する。隙間量は、中立面から部品表面での距離の2倍となるが、部品表面付近ではCT値が増加するために、その変化量のピークとなるエッジ点を検出することなどによってもとめることができる。これを中立面全体で行うことにより、隙間量の分布を計算する。なお、エッジ点がない場合は部品が接触しているものとする。

○プロトタイプソフトウェアの開発 以上のアルゴリズムを評価するために、プロトタイプソフトを作成した。そしてプラスチック部品で構成されたアセンブリ品を産業用X線CTで計測することによってデータを取得し、このソフトウェアで解析を行った。なお、CADモデルから算出した中立面は、CT画像とは異なる座標系にあるために、これらを位置合わせする必要があり、位置合わせ後、このソフトを実行する。

4. 研究成果

いくつかのサンプル部品に対して本手法を適用し実験を行った。まず、全体の外寸が200mmで、プラスチックを主とする21部品から成るアセンブリ品を対象とした。計測精度を評価するために、CADモデルにおいても隙間量を計算し、それとCT画像から本手法によって計算された隙間量と比較した。このアセンブリ品は非常に精度が高いもので、それを裏付けるように、両社の隙間量には大きな差はなく、つまりほぼ設計通りになっていることが分かった。また、いくつかの箇所では隙間が設計値よりも目立って小さくなっていることが検出された。この原因については、本手法の問題ではなく、実際の部品が部分的に誤差をもっていたか、あるいはCT撮像において画像にノイズやアーチファクトが発生したためと考えられる。他にもいくつかの実製品に適用し、同等の結果が得られた。

設計者の観点からすると、本手法は、これまでできていなかった、アセンブリ品全体において部品間の隙間量を一括して計算し可視化できる手法であり、例えば試作品の評価などの場面でも有効であるとの見解を得た。

<引用文献>

- [1] F. Aurenhammer, R. Klein, D. Lee, Voronoi Diagrams and Delaunay Triangulations, World Scientific, (2013).
- [2] 永沼, 乾, 梅津, 立体のスケルトンに基づく逆距離場とその厚み評価への応用, 精密工学会秋季講演会, (2018).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yukie Nagai, Yutaka Ohtake and Hiromasa Suzuki |
| 2. 発表標題 Accurate surface extraction on CT volume using gradients obtained by differentiating FDK formula |
| 3. 学会等名 iCT 2019 Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 高橋諒、鈴木宏正、大竹豊他 |
| 2. 発表標題 X線CT画像を用いたアセンブリ品の部品位置同定に関する研究 |
| 3. 学会等名 2018年度精密工学会秋季大会講演論文集 |
| 4. 発表年 2018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 |
|---------|---------|
|---------|---------|