

研究論文

精密測定における形状偏差グラフィック表現方法の開発

斉藤昭雄*¹

Development of a Graphic Representation Method for Shape Deviation in Precision Measurement

Akio SAITO*¹Industrial Research Center*¹

精密測定結果の形状偏差を表現する際にカラーマップがよく用いられるが、凹凸を一目で判断することは難しい。そこで、有限要素法解析結果のポスト処理に用いられる洗練されたグラフィックを精密測定結果表示に応用することを検討した。さらに、接触式三次元測定機の測定結果や、ベベルギアの形状偏差、光コム測定機等の非接触三次元測定結果の表現に適用を試み、わかりやすいグラフィック表現ができるマクロを開発した。

1. はじめに

世の中の工業製品の高性能、高機能化に伴い、構成部品は複雑となり、高い寸法精度が求められている。それに伴い精密測定も重要性を増しつつあり、従来のように長さや穴、シャフトの直径、位置の測定だけでなく、3次元CADを利用した3次元曲面の測定や、測定結果の詳細な分析が必要とされる場合が多くなっている。

工業製品の精密測定の中でも3次元曲面データなどのCADと実物形状の比較測定を行う場合、測定点が多いため、カラーマップなどで測定結果の詳細な分析をすることが多いが、CADと実物の寸法差すなわち形状偏差は色だけで表現されているため、凹凸を一目で判断することが難しい。工業製品のうちベベルギアについても歯面の精密測定が行われるが、これも形状偏差の表示については凹凸を一目で判断するのが難しく、さらに、歯面だけでなく歯の厚みも併記されているため、形状の把握が一層難しい。そのため、形状偏差をどのように一目で明確に理解できるように表現するかが課題であった。

そこで、本研究ではこのような課題に対し、よりわかりやすい形状偏差の立体表現方法を開発した。

形状偏差は数 μm 程度であることも多く、単にプロットしただけでは見えないため、拡大して表示することが必要である。そこで、小さな変位を拡大して表現することに共通点があり、エンジニアであれば見慣れている有限要素法(Finite Element Method, 以下FEMと記す)解析結果の洗練されたグラフィックに着目した。FEM解析結果は色と誇張された変位で解析結果を表現できる。この解析結果の表現技術を精密測定結果の表現に応用で

きるか検証した。さらに、3次元曲面形状であり、なおかつ測定結果から形状偏差を把握することが難しいと思われるベベルギアの形状偏差表現などに適用を試みた。

2. 実験方法

本研究では、形状偏差のグラフィック表現をするソフトとして3次元CADソフトのFreeCAD0.21.1およびデータ可視化ソフトParaview5.11.2を使用した。理由は、カスタマイズが可能であること、オープンソースで誰でも気軽に費用をかけずに使用できること、FEM解析結果のポスト処理機能があること、測定結果を読み込んで処理する部分を自動化できる機能があることである。さらにメリットとして、FreeCADは測定点の点群とCADから偏差を計算可能であり、Paraviewはカラーマップ、凹凸拡大表示だけでなく、矢印表示、アニメーション等も可能である。よって、これらのソフトのFEMでポスト処理を行う際のグラフィック表現を精密測定結果のグラフィック表現へ応用することを試みた。具体的には以下のように開発を進めた。

2.1 測定結果からFEMポスト処理が可能なデータへの変換

以下のデータ処理が可能か確認した。

- FEM解析結果に含まれる変位ベクトルを、三次元測定機が出力した形状偏差ベクトル(法線ベクトルの方向と形状偏差の大きさをもつベクトル)に書き換えること
- 節点座標を設計点座標に書き換えること
- 応力データなどの形状偏差のグラフィック表現で使用

*1 産業技術センター 自動車・機械技術室

しないデータを空欄もしくは0にすること

- ・各節点にカラーマップで表現できる任意のデータ(測定した順番を表す点番号等)を書き加えること

つぎに、簡単な形状偏差データから FEM ポスト処理可能なデータを作成し、FreeCAD と Paraview で表示できることを確認した^{1),2)}。

2.2 ベベルギア測定結果の表示

FEM ポスト処理でのグラフィック表現機能を、接触式三次元測定機でのベベルギア測定結果の表現に応用できるようにするためのマクロを FreeCAD と Paraview で開発した。具体的には接触式三次元測定機のカールツァイス製ベベルギア測定ソフト Gear pro bevel が出力する測定結果のテキストデータを読み込み、設計点座標と法線ベクトルデータ、偏差データから FEM ポスト処理可能な形式のデータを作成し、ポスト処理にかけられるようにした。その際、**図 1** のように Gear pro bevel が出力する形状偏差のグラフは 4 角形のメッシュで書かれているので、これに倣い 4 角形のメッシュを使用して形状偏差を表示させた。さらに、歯先、歯底を 4 角シェル要素でつなぐようにメッシュを追加し、立体表示させたとき、どこが歯底でどこが歯先か判別できるようによりわかりやすく表示した(単に歯面の端をつないだけなので、実際の歯先、歯底の座標や形状偏差データではない)。

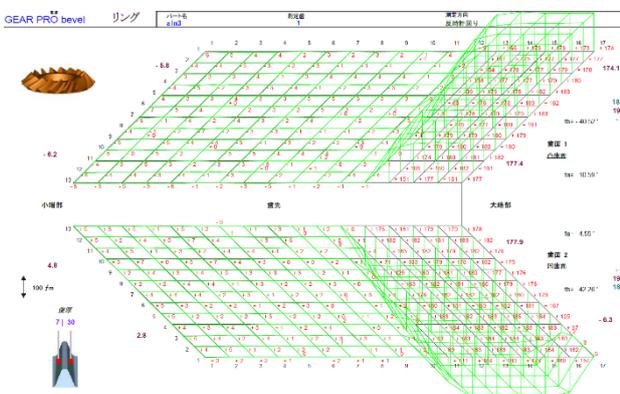


図 1 Gear pro bevel の形状偏差グラフ

2.3 接触式三次元測定機の自由曲面測定結果の表示

FEM ポスト処理のグラフィック表現を接触式三次元測定機の自由曲面測定の結果表現に応用できるようにした。具体的には、設計点座標と形状偏差ベクトルから FEM ポスト処理可能なデータを作成して表示するマクロを開発した。その際に接触式三次元測定機が出力する形状偏差をそのまま表示する機能だけでなく、FreeCAD 上で点群データをもとにして 3 次元 CAD データと照合して偏差を計算して表示できるようにした。

また、ベベルギアの処理と同様に使用者が FreeCAD

と Paraview の両方でマクロを 1 回~2 回程度実行するだけで表示可能にした。2023 年時点の FreeCAD0.21.1 と Paraview5.11.2 の両方で扱える解析結果データ形式に VTK データがあるため、マクロでもなるべく VTK データを扱うようにし、Paraview 用マクロで 3 割程度コードを流用可能にした。また、立体表示するにはメッシュも必要なため、同じ VTK のライブラリを使用することで、使用者が追加モジュールをインストールすることなくメッシュを作成できるようにした。

2.4 非接触式三次元測定機の自由曲面測定結果の表示

光コム測定機などの非接触測定機が出力する点群データでも同様に処理できるようにし、接触式の三次元測定機以外の測定でも使用可能にした。同様に FreeCAD 上で点群データを元にして 3 次元 CAD データと照合して偏差を計算し表示可能にした。さらに、3 次元デジタル等で使用される GOM 社製解析ソフト GOM Inspect で 3 次元 CAD データと照合してメッシュを作成し、偏差を計算した結果を表示できるようにした。具体的には、ポリゴンの ply 形式ファイルと偏差の asc ファイルを GOM Inspect で作成して、これらを読み込んで表示できるマクロを開発した。

本研究で開発したマクロ処理の概要を **図 2** に示す。

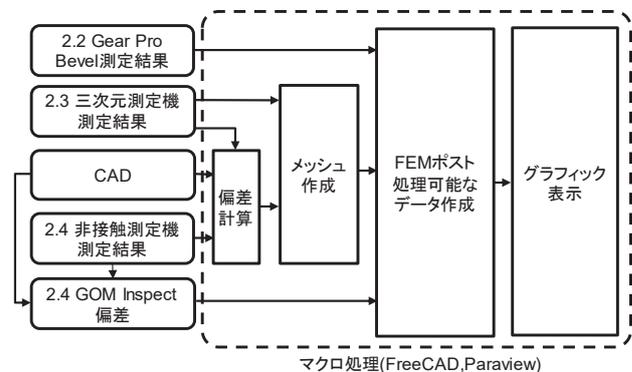


図 2 マクロ処理の概要

3. 実験結果及び考察

3.1 測定結果から FEM ポスト処理可能なデータへの変換

測定結果のうち、形状偏差ベクトルデータと設計値の 3 次元ベクトルデータ、点番号から FreeCAD では FEM 解析結果、Paraview では VTK データとして実際に FEM 解析結果データを作成した。その結果、変形表示、変位の矢印表示、アニメーションなどグラフィック処理が可能であることが確認できた。12 点の格子点を持つ平面内で、意図的に点番号 11 番のみ法線方向に 1mm の偏差を作った簡単な形状偏差測定データを作成し FEM 解析結果として変形表示させた例を **図 3** に示す。ここでは 10 倍の倍率で形状偏差を立体表示させて、色

で点番号を表現した。この図で形状偏差と同時に測定した順番も色で判断できる。

このように、FEM 解析結果のポスト処理を利用すると、形状偏差を立体表示できるので、精密測定結果の表現において、従来は色で形状偏差を表現するのみだったのに対して、形状偏差を拡大立体表示し、形状偏差以外の情報を色で重ねて表現できる利点があることが分かった。

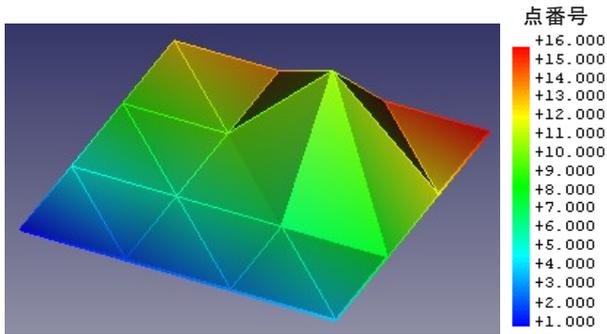


図3 簡単な形状偏差測定データの変形表示テスト (FreeCAD)

3.2 ベベルギア測定結果の表示

実際に Gear pro bevel で歯数 30 枚のベベルギアを測定して FreeCAD と Paraview の両方で処理を行った。

図4のように1歯のみ意図的に150~190 μ m程度の段差をつけた状態で、この歯だけ歯面測定した測定結果の表示を行った。測定していない歯は形状偏差を0にしている。ここでは5倍の倍率で形状偏差を立体表示させて、色で歯の番号を表現した。

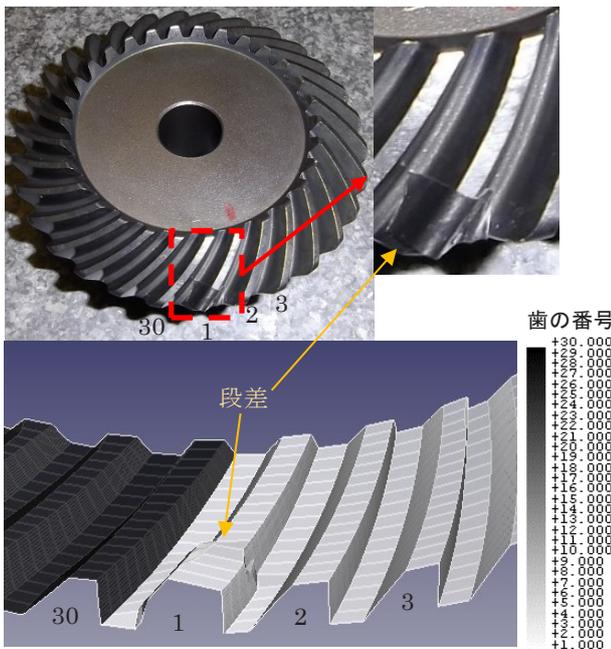


図4 ベベルギア測定結果の FEM 解析結果ポスト処理(FreeCAD)

白い歯が 1 番で黒い歯が 30 番の歯であり、1,2...29,30 番の順に少しずつ黒くなっており測定した順番が色で判断できる。このように、FEM 解析結果のポスト処理を利用すると、形状偏差を立体表示できるので、精密測定結果の表現において、従来は色で形状偏差を表現するのみだったが、形状偏差を拡大立体表示し、色で形状偏差以外の情報を重ねて表現できる利点があることがわかった。

図1のグラフのような形状偏差の平面的な表示に対して、本研究の方法を用いれば、実物の形状から法線ベクトル方向に偏差の表示をさせているため、実物をイメージしやすく、よりわかりやすく凹凸を表示できていることがわかった。一方、本研究の方法を用いる際の留意点としては、歯車測定をした後で FreeCAD と Paraview を使用する必要があるため、手間の増大が考えられる。

3.3 接触式三次元測定機の自由曲面測定結果の表示

図5のように意図的に200 μ m程度の段差をつけた自由曲面を接触式三次元測定機で実際に測定し、FreeCAD と Paraview の両方で処理を行った。Paraview で偏差ベクトルを矢印表示したものを図6に示す。Paraview はカラーマップ、凹凸拡大表示だけでなく、矢印表示、アニメーションも表示可能である。カラーマップのみの表示よりもよりわかりやすく、自由曲面上の凹凸を表示できていることがわかった。このように、精密測定結果に対して FEM 解析結果のように洗練されたグラフィックが使用可能である。

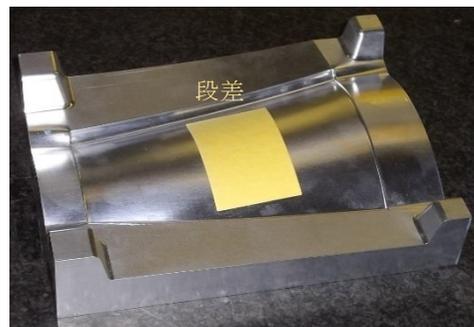


図5 自由曲面サンプル

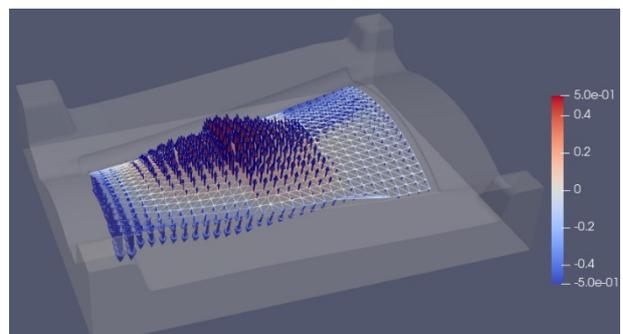


図6 接触式三次元測定機自由曲面測定結果の FEM 解析結果ポスト処理(Paraview)

図 7 は測定機の出力した形状偏差データではなく、FreeCAD 上で点群データをもとにして設計値 CAD データ(段差なし)と照合して偏差を計算し表示したものである。FreeCAD は CAD からの偏差を計算することが可能なため、測定点の点群のみから今回のような処理が可能であることが確認できた。

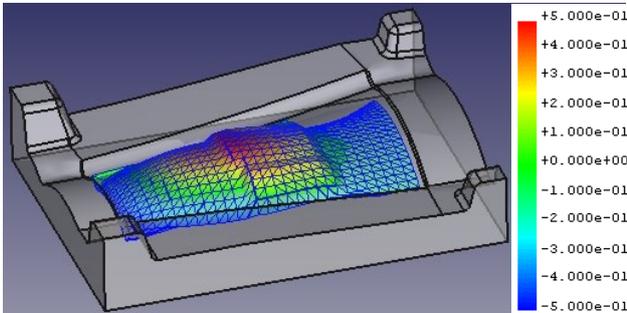


図 7 接触式三次元測定機自由曲面測定結果の FEM 解析結果ポスト処理(FreeCAD)

3.4 非接触式測定機の自由曲面測定結果の表示

光コム測定機などの非接触式測定機が出力する点群データを設計値 CAD データと照合して形状偏差を計算、FEM ポスト処理可能なデータを作成して表示するマクロを FreeCAD で作成した。

光コム測定機で点群データを取得し、Gom Inspect 上で 3 次元 CAD データとの照合による形状偏差を計算してその結果をファイルに出力し、当該ファイルから FEM 解析結果データを作成・表示するマクロを FreeCAD、Paraview で作成した。図 5 のサンプルに対する Gom Inspect の結果を図 8 に示す。

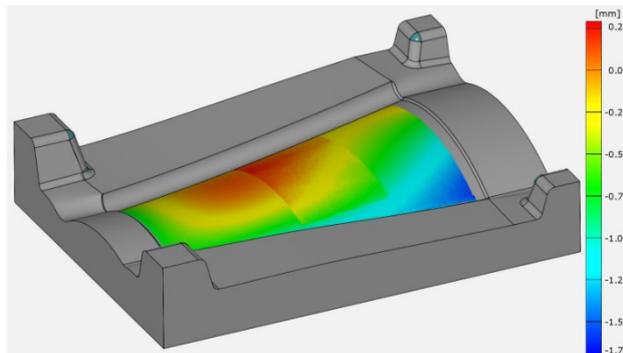


図 8 非接触式測定機自由曲面測定結果 (Gom Inspect)

図 9 は Gom Inspect で作成したポリゴンの ply 形式ファイルと偏差の asc ファイルを Paraview 上でマクロで処理を行ったものである。カラーマップの表示よりもよりわかりやすく自由曲面上の凹凸を表示できていることがわかった。

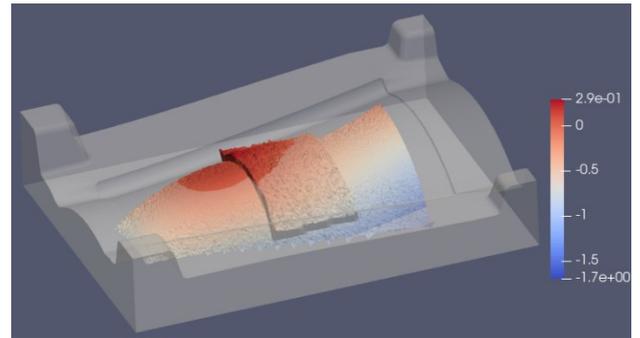


図 9 非接触式測定機自由曲面測定結果(Paraview)

4. 結び

本研究の結果は、以下のとおりである。

- (1) 精密測定結果から FEM 解析結果のポスト処理が利用できるデータを作成し、グラフィック表現できることを示した。
- (2) 形状偏差の立体表示は形状偏差以外の情報を色で重ねて表現できる利点があることが分かった。
- (3) 測定結果をイメージしにくいベルギア測定結果を FEM 解析結果のポスト処理で表現し、形状偏差の凹凸をわかりやすく表現できることを確認した。
- (4) 接触式三次元測定機のみでなく、光コム測定機など非接触測定結果に対しても形状偏差を同様に表現し、凹凸をわかりやすく表現できることを確認した。
- (5) FreeCAD、Paraview についてこれらの処理を行うマクロを開発した。

今回、主に曲面を測定して測定結果を 3 角形や 4 角形の面要素で表示したが、線要素の使用も可能だと考えられるため、今後、断面の測定結果など線の測定結果への応用を確認していきたい。

付記

本研究は、公益財団法人内藤科学技術振興財団の 2023 年度研究助成を受けて実施した。

文献

- 1) 林真: はじめての ParaView 三訂版, 180(2022), 工学社
- 2) 株式会社計算力学研究センター: VTK で作成したオブジェクトを ParaView に渡す, <https://www.rccm.co.jp/icem/pukiwiki/index.php?VTK%E3%81%A7%E4%BD%9C%E6%88%90%E3%81%97%E3%81%9F%E3%82%AA%E3%83%96%E3%82%B8%E3%82%A7%E3%82%AF%E3%83%88%E3%82%92ParaView%E3%81%AB%E6%B8%A1%E3%81%99>, (2024/1/19)