

複雑加工形状に対するリバースエンジニアリングシステムの開発

Development of Reverse Engineering System for Machined Parts with Complex Shape

80816079 佐藤めぐみ (Megumi Sato)

Supervisor: 青山英樹 (Hideki Aoyama)

1. 緒言

消費者のニーズの多様化に伴い、工業製品の意匠デザインは、製品の価値判断において最も重要視される要素の1つになってきている。工業製品の意匠デザイン性を向上させるために、自由曲面を含む複雑な形状を用いたデザインが採用されてきているが、現状のCADシステムは自由曲面形状のモデリング機能が十分ではないため、意匠形状の設計では、クレイモデルや木型などの物理モデルを造形し、その測定データからCADモデルを構築するリバースエンジニアリング¹⁾が採用されている。

また、自動車のエンジン部品のような機能部品に対しては、設計時に構築されたCADデータと加工された部品の測定データから構築された数値モデルとを比較することにより加工誤差を分析し、製造プロセスへフィードバックするためにリバースエンジニアリングが採用され始めている。

リバースエンジニアリングは、CADモデル(数式モデル)を構築する際に、測定データから物理モデルを構成している曲面を識別し、それぞれの曲面を数式で表現(定義)する。従来、このプロセスにおいてオペレータによるマニュアル操作が必要であり、多大な労力・時間・コストを要しており、その解決が望まれている。

本研究では、自動車のボディのような意匠デザイン形状のみならず、クランクシャフトのような複雑な加工形状に対しても適用可能なリバースエンジニアリングシステムを開発することを目的として、次の4つの独自方法を提案する。

- (1) 測定点群に含まれる測定誤差を平均化する方法
- (2) 測定点群を基にした3次元格子データの構築方法
- (3) 3次元格子データから物理モデルの構成面を識別する方法
- (4) 識別された格子データごとに数式モデルを構築する方法

さらに、提案に基づいてシステムを構築し、実験によりその有用性を検証する。

2. 提案する方法

2.1 概要

本研究で提案するシステムでは、非接触三次元測定器より得られた高密度測定点データに対して誤差の平均化処理を施し、測定点データから3次元格子データを構築する。次に、最大曲率と微小領域の主方向判定に基づく3次元格子データの分割(セグメンテーション)を行い、各セグメントにNURBS曲面を定義し数式モデルを構築する。以下に、誤差の平均化方法、3次元格子データ構築方法、3次元格子データの分割(セグメンテーション)方法、数式モデル構築方法について述べる。

2.2 誤差の平均化方法

形状の微小領域は楕円曲面形状として近似できるという仮説に基づいて、以下に述べる手法で測定誤差を平均化する。

(1) 微小領域のローカル座標系の設定

測定点群中の任意点に注目したとき、その点を中心とする微

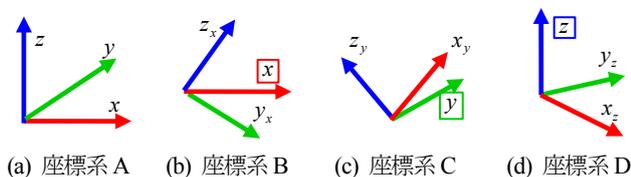


図1 分散を求める座標系

小球空間に存在する測定点を抽出する。抽出された点群に関して、図1に示す $x-y-z$ 座標系Aおよび x 軸を中心に 45° 回転した $x_1-y_1-z_1$ 座標系B、 y 軸を中心に 45° 回転した $x_2-y_2-z_2$ 座標系C、 z 軸を中心に 45° 回転した $x_3-y_3-z_3$ 座標系Dにおいて、測定点座標値 (x, y, z) のそれぞれの分散 σ^2 を求める。その結果として、座標系A~Dの各軸に対する測定点座標値 (x, y, z) の分散 σ^2 が9個導出される。

導出された9個の分散 σ^2 の中で最小値をもつ座標系を注目点を中心とする微小領域のローカル座標系とし、最小の分散 σ^2 を示す座標値成分をそのローカル座標系の w 軸とし、他の2軸を u 軸、 v 軸として設定する。

(2) 測定点近傍微小形状の楕円曲面形状への近似

上記の手順により、各測定点に設定されたローカル座標系 (u, v, w) において、最小自乗法を用いて、式(1)²⁾における係数 a, b, c, d, e, f を決定する。

$$w = au^2 + bv^2 + cuv + du + ev + f \quad (1)$$

これにより求められた2次式は楕円曲面を表しており、本研究では、注目点近傍の微小形状を近似していると仮定している。ここで、注目点近傍(近傍とする閾値は別途定める)に存在する測定点の楕円曲面上の最近点までの移動ベクトルを求める。

(3) 誤差の平均化

上記(1), (2)の処理を測定点の全てについて適用することにより各測定点には複数の移動ベクトルが求められている。各点について複数の移動ベクトルの平均ベクトルを求め、その点の測定座標値に付加することにより得られた点の座標値を求める。この座標値は、測定誤差および形状誤差を平均化した結果となる。

2.3 3次元格子データ構築方法

測定で得られた測定点の分布は不均一であるとともに、測定点間の隣接関係が明確でないため、曲面の境界線抽出や測定点のセグメンテーション処理において効率的処理が難しいといった問題がある。これらの問題に対して、以下の処理を行う。

測定点の存在する全空間において、 x, y, z の各軸方向に等間隔に区切られた3次元格子を設置し、各格子点に初期値としてフラグ値0を与える。図2(a)は、注目点を中心とする微小空間に存在する測定点群を示している。この微小空間に、図2(b)に示すように、前述の2.2で述べた注目点に関する誤差の平均化処理で求められたローカル座標系 (u, v, w) を設定し、近似楕円曲面を求める。図2(c)に示すように、誤差の平均化処理がなされた各測定点に関して最も近い格子点にフラグ値1を与えるとともに、近似楕円曲面情報を付与する。

上記の処理後、測定点群が当てはめられた1つの格子点に注

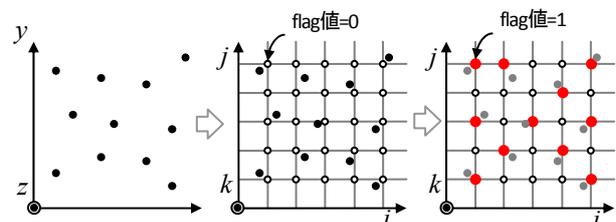


図2 測定データの3次元格子への当てはめ手順

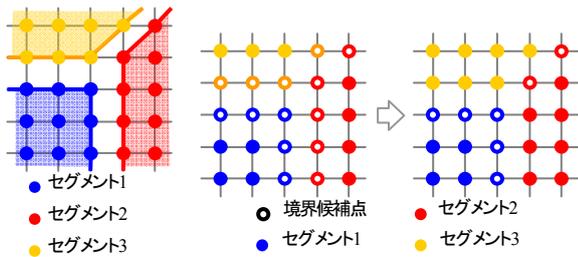


図3 隙間発生問題

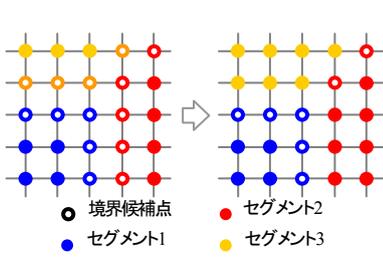


図4 境界候補点処理

目し、付与された近似楕円曲面をその格子点を中心にした微小領域で定義する。この楕円曲面の近傍に位置する格子点群に対し、フラグ値1を与える。同時にその格子点には、楕円曲面のw軸方向の情報を付与する。この処理を測定点群が当てはめられた全ての格子点に対して行う。

近似楕円曲面形状の相違により、フラグ値1を持つ複数の格子点があり、それらのw軸方向に分布することがある。この格子点群のw軸方向における平均位置を算出し、最も近い格子点のみフラグ値を1とし、他の格子点群はフラグ値を0にする。

2.4 3次元格子データの分割(セグメンテーション)方法

以下の処理により曲面境界線を抽出し、格子点群を分割する。

(1) 最大曲率によるフィレット部のセグメンテーション

2.3で述べた方法により構築された3次元格子データに対して、2.2(2)で述べた方法により、各格子点に関して、各格子点とその近傍格子点から近似楕円曲面式を求め、同曲面式から式(2)、(3)、(4)を用いて平均曲率H、ガウス曲率Kを算出し、最大曲率を求める。

$$p = \frac{\partial k}{\partial i}, q = \frac{\partial k}{\partial j}, r = \frac{\partial^2 k}{\partial i^2}, s = \frac{\partial^2 k}{\partial i \partial j}, t = \frac{\partial^2 k}{\partial j^2} \quad (2)$$

$$H = \frac{r(1+q^2) - 2pqs + t(1+p^2)}{2(1+p^2+q^2)^{3/2}} \quad (3)$$

$$K = \frac{rt - s^2}{(1+p^2+q^2)^2} \quad (4)$$

このとき、ローカル座標系(u, v, w)は2.3で与えられた情報に基づいて設定される。この方法により全ての格子点について最大曲率を算出し、閾値以上の最大曲率をもつ格子点をフィレット部に存在する点として認識する。

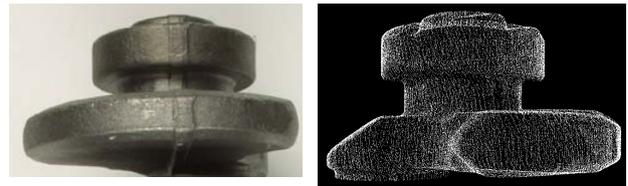
(2) 格子位置番号によるセグメンテーション

前述の2.2(1)と同様の方法で、各格子点について、近傍格子点データから*i*-*j*-*k*格子座標系および*i*軸を中心に45°回転した*i*-*j*-*k*格子座標系、*j*軸を中心に45°回転した*i*-*j*-*k*格子座標系、*k*軸を中心に45°回転した*i*-*j*-*k*格子座標系における格子位置番号*i, j, k*のそれぞれの分散を求める。導出される9個の分散の中で最小値となる格子座標系の軸方向は、その点の法線方向に最も近い方向を表していると考えられる。各格子点について、隣接する格子点の法線方向を表す格子座標系の方向が同じである場合、同一のセグメント(格子点グループ)と分類する。この処理により、各格子点を9方向に分けてセグメンテーションすることができる。各セグメントには固有の番号を割り付ける。

2.5 数式モデル構築方法

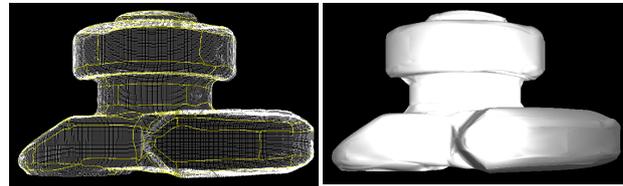
2.4の処理により得られたセグメントに存在する格子点から自由曲面を構築すると、図3に示すように境界部分で隙間が生じる。このため、境界線上の格子点を隣接するセグメントで共有させる処理を行う。

各セグメントにおいて、他のセグメントと隣接する格子点を境界候補点とする。このとき、隣接しているセグメント番号を記録する。全てのセグメントにおいて境界候補点を抽出し、境



(a)対象モデル

(b)測定データ



(c)境界線

(d)数式モデル

図5 システム実行結果

界候補点の1点に注目するとき、図4に示すように、その点が属するセグメントの番号が隣接するセグメントの番号よりも大きい場合、注目点を境界候補点から外し、注目点のセグメント番号が隣接するセグメント番号よりも小さい場合、注目点は境界候補点として残す。この処理を全ての境界候補点に対して行う。結果として残った境界候補点からNURBS曲線を求め、曲線の近傍に位置する格子点を境界線上に位置する格子点とし、隣接するセグメントにも所属させる。この処理により、隙間を発生することなくセグメントごとに曲面を構築できる。

3. 最小自乗法によるNURBS曲面の構築

測定データには誤差が含まれるため、誤差の平均化を施したとしても、データ位置を通過する曲面を定義した場合、その形状は大域的に滑らかな曲面にならない。本研究では、1つのセグメントに属するデータに対して最小自乗法を適用してNURBS曲面を定義³⁾し、さらに隣接する曲面との接線連続の条件を加えてNURBS曲面を再構築し、数式モデルを構築した。

4. 数式モデル構築実験および結果

提案した方法の有用性を検証するため、図5(a)に示すクランクシャフトの一部に対して提案した方法を適用した。図5(b)は、非接触型形状測定器FaroArm Gold8, Model Maker V70(3D SCANNERS製)により得られた測定データを示している。同データは、日産自動車(株)の協力により獲得した。図5(c)は、3次元格子データを構築し、セグメンテーションを行った後に、境界線を抽出した結果を示している。図5(d)は、曲面間で接線連続の条件を満足するように構築した数式モデル(NURBS曲面)を示している。

5. 結言

複雑形状を有する機能部品に対しても適用が可能であるリバースエンジニアリングシステムを開発するため、微小領域を楕円曲面として近似する誤差の平均化法、合理的・効率的なデータ処理を可能とする3D格子データの構築法、測定点の分散および曲率変化に基づく曲面境界線の抽出法、および、曲面ごとに最小自乗法によりNURBS曲面を導出し数式モデルを構築する方法を提案した。さらに、クランクシャフト形状に対して提案手法を適用し、提案した手法の有用性を確認した。

参考文献

- 1) 竹中健一：リバースエンジニアリングのための自由曲面生成，設計工学，32，12，(1997)，454.
- 2) 小林昭七：曲線と曲面の微分幾何，裳華房，(1977)，60.
- 3) 三浦曜：CAD・CG技術者のための実線NURBS，工業調査会，(2001)，142-144.