

3次元点群データに基づく自由曲面生成法  
 一曲率の積み上げによる knot 設定法

旭川高専 ○西尾元章 後藤孝行

要 旨

実体モデルの形状を3次元デジタルイザによって計測し獲得した3次元点群データは離散的であることから、この点群データに基づいて高品位な自由曲面を生成するための B-spline 曲面あてはめ手法を示し、複雑に変化する形状に対しても対応可能な曲率の積み上げによる knot 設定法を提案する。

1 結論

工業製品の付加価値を高めている意匠製品の形状を設計する場合、高機能なスタイルデザインシステムが開発されてきている状況にあってもデザイナーの意図する複雑な形状をコンピュータ内に定性的かつ定量的に生成することは依然として困難とされていることから、実体モデルを用いた形状設計が行われている。このとき、アナログ情報でしか表現されていない実体モデルの形状をデジタル化することによって CAD モデルを生成する、いわゆるリバースエンジニアリング (RE: Reverse Engineering) 技術が重要となる<sup>1)</sup>。

そこで本報では、実体モデルの形状を実際に測定して獲得した離散的な3次元点群データから、高品位な自由曲面を生成するため、B-spline 曲面をあてはめる手法を提案する。そして、本手法の有効性をシミュレーションおよび加工実験によって確認したことを報告する。

2 実体モデルをベースとする形状設計プロセス

図1は、実体モデルをベースとする形状設計プロセスである。実体モデルの形状を各種 (接触式, 非接触式) 3次元デジタルイザによって計測して3次元点群データを獲得する。点群データは離散的であるため、点群データへの曲面あてはめ処理によって CAD モデルを生成する。生成した CAD モデルに基づいて加工を行い、製品 (加工モデル) が完成する。加工モデルの評価は、定性的および定量的に行われ、評価が満たされると形状設計プロセスが終了する。

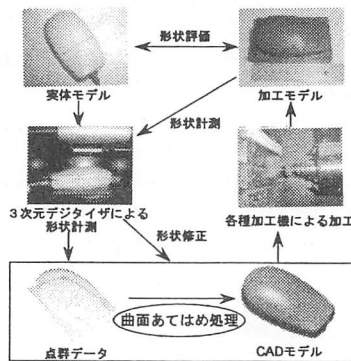


図1 実体モデルをベースとする形状設計プロセス

3 B-spline 曲面変換と逆変換

B-spline 曲面は、近似曲面の一種である。曲面のパラメータを  $u$  および  $v$  とする B-spline 曲面において、 $u$  方向の制御点数を  $(n+1)$ 、階数を  $k$ 、 $v$  方向の制御点数を  $(m+1)$ 、階数を  $l$ 、制御点を  $V_{ij}$  ( $i = 0, 1, \dots, n; j = 0, 1, \dots, m$ ) とすると、B-spline 曲面  $S(u, v)$  は次式で与えられる。

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,k}(u) M_{j,l}(v) V_{ij} \quad (1)$$

ここで、 $N_{i,k}(u)$ 、 $M_{j,l}(v)$  はそれぞれ  $u$  および  $v$  方向の B-spline 基底関数である。このとき、制御点および B-spline 基底関数から B-spline 曲面を生成することを B-spline 曲面変換という。

一方、離散的な点群データおよび B-spline 基底関数から制御点を算出する処理を B-spline 曲面逆変換という。

制御点マトリックスを  $[V]$ 、基底関数マトリックスを  $[NM]$ 、B-spline 曲面マトリックスを  $[S]$  とすると式(1)は次式のように表される。

$$[S] = [NM][V] \quad (2)$$

曲面あてはめは、点群データとそれに対応した曲面上の点が一致するように処理することである。したがって、点群データマトリックスを  $[P]$  とすると、B-spline 曲面の制御点は次式で求められる<sup>2)</sup>。

$$[V] = ([NM]^T [NM])^{-1} [NM]^T [P] \quad (3)$$

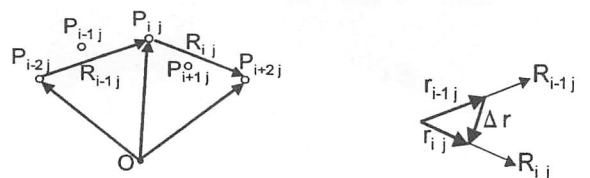
4 ノットベクトル決定法

4.1 符号付き曲率算出法

曲面あてはめにおいて、形状の変化に応じたノットを配置することが重要である。そこで離散的な点群データから形状の特徴を表す量の一つである曲率を算出し、ノットの配置に利用する。

従来の手法では、連続する3個の点群データからベクトル差を求めていた<sup>3)</sup>。しかし、複雑な形状である場合や、測定誤差が大きい場合には、曲率の符号が頻繁に変化するため、その後の処理が困難となる場合がある。

図2は、本報で提案する曲率の大きさの算出法である。曲率算出に用いる点群を連続する5個の点群データ  $P_{i-2j}$ 、 $P_{i-1j}$ 、 $P_{ij}$ 、 $P_{i+1j}$ 、 $P_{i+2j}$  とする (図2(a)参照)。ここで  $P_{i-2j}$  と  $P_{ij}$  および  $P_{ij}$  と  $P_{i+2j}$  のベクトル差をそれぞれ  $R_{i-1j}$  および  $R_{ij}$  とする。さらに、ベクトル差の単位ベクトルをそれぞれ  $r_{i-1j}$  および  $r_{ij}$  とし、そのベクトル差  $\Delta r$  を求め、 $\Delta r$  の向きを判定して  $P_{ij}$  における符号付曲率とする。なお、始点および終点における曲率は零



(a) 点群データのベクトル差 (b) 曲率の大きさ  
 図2 曲率の大きさの算出法

(0)とし、始点の次の点および終点の1点前の曲率においては、従来の手法である連続する3個の点群データを利用して求める。

#### 4.2 曲率を考慮したノットベクトル決定法

$u$ 方向を例にとり曲率を考慮したノンユニフォームノットベクトルを以下の方法で求める。なお、 $v$ 方向についても同方法で求める。

- (1)  $v$ 方向の点群データの数だけ切断面を考える。
- (2) 各切断面において各点群データにおける符号付き曲率を求める。
- (3) (2)で求めたすべての符号付き曲率をパラメータごとに加算し積み上げた曲率図(積み上げ曲率図)を求める。
- (4) (3)の関係図において積み上げ曲率が零となるパラメータ上にノットを配置する。
- (5) さらに、(3)の関係図に等曲率面積分割法<sup>4)</sup>を適用してノットを配置し、ノットベクトルを決定する。

### 5 検証実験結果および考察

#### 5.1 曲面あてはめ処理実験結果および考察

図3は、曲面あてはめ処理実験の結果である。(a)は検証実験に用いた実体モデルである。図中の○印で囲まれた目と角を含む領域を計測した。(b)は獲得した点群データである。点群データの $x$ および $y$ 軸方向のピッチはそれぞれ0.25mm、総点群データ数は $37 \times 81 = 2997$ 点である。(c)は本手法により生成したB-spline曲面である。曲面あてはめに用いた制御点数は $15 \times 15 = 225$ 点である。(d)は点群データと生成した曲面とのあてはめ具合を示す誤差(あてはめ誤差)の分布状況である。

図4は、本手法により求めた $u$ 方向における積み上げ曲率図とノットの配置である。ノットは、形状の変化に応じて配置されている。

図5は、あてはめ誤差標準偏差と制御点数の関係である。図中の■印はユニフォームノットベクトルの場合、□印はノンユニフォームノットベクトルの場合である。制御点が $9 \times 9$ 以上では常に本手法の方が良い結果が得られており、あてはめ誤差標準偏差は10%~30%の減少となった。以上のことから、本手法を用いることによりあてはめ誤差の小さい曲面を生成できることが確認できた。

#### 5.2 加工実験結果および考察

図6は、加工実験の結果である。加工実験は、以下に示す2種類について行った。

- (a) 加工I: 実体モデルの点群データからそのまま加工。
  - (b) 加工II: 制御点 $15 \times 15$ で生成した曲面を加工。
- なお、両加工実験の仕上げ加工にはR0.5mmのボールエンドミルを使用した。

加工Iでは、測定誤差による影響で加工面全体にわたりにしじ状の凹凸が見られた。これに対し、加工IIでは、このような凹凸がない滑らかな曲面が生成できた。また、目や角部のように形状変化が大きい部分においても比較的良好に曲面が生成できている。

### 6 結論

本研究は、離散的な3次元点群データへB-spline曲面を高品位にあてはめるための曲率の積み上げによるノット

ベクトル決定法を提案し、曲面あてはめ処理実験および加工実験により本手法の有効性を確認した。

#### 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作成, 設計工学, 32, 12(1997)454.
- 2) David F. Rogers and J. Alan Adams: Mathematical Elements for Computer Graphics(Second Edition), Mac Graw Hill(1990).
- 3) 西尾元章, 後藤孝行: 3次元点群データに基づく自由曲面生成法, 日本機械学会北海道支部第43回講演概要集, (2003)210.
- 4) 後藤孝行, 他3名: 曲率を考慮したB-スプライン曲線の点群データへのあてはめ, 精密工学会誌, 60, 7(1994)964.

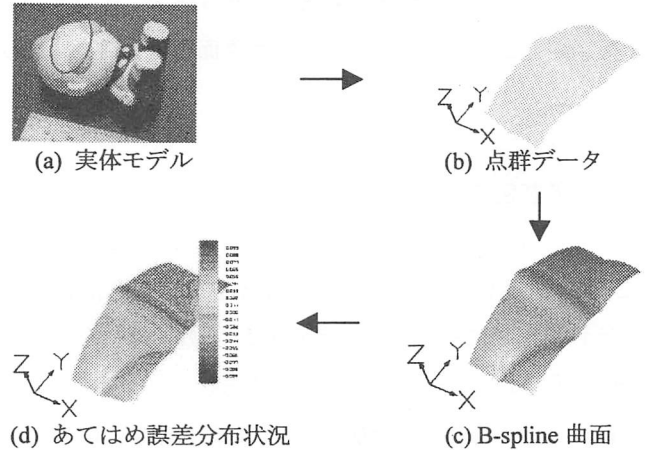


図3 あてはめ処理実験

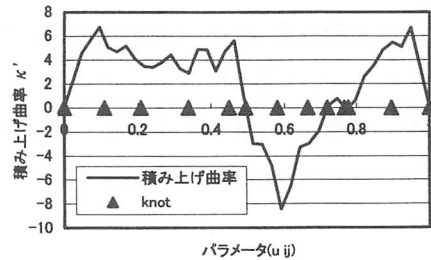


図4  $u$ 方向の積み上げ曲率図

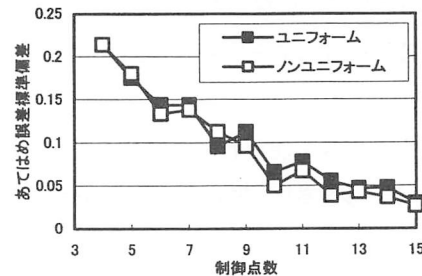
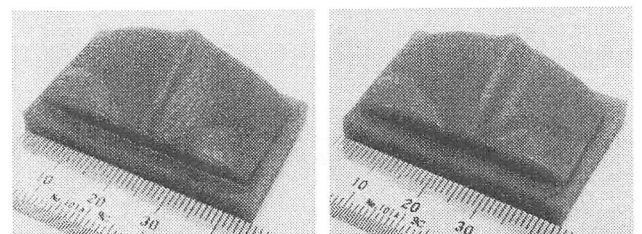


図5 あてはめ誤差標準偏差と制御点数の関係



(a)点群データからの加工モデル (b)生成曲面からの加工モデル(制御点 $15 \times 15$ )

図6 加工実験結果