

# 位置・単位法線ベクトルを基にした 高品位曲面金型モデル構築システムの開発

慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科  
助教授 青山英樹

(平成6年度研究開発助成 AF-94013)

キーワード：曲面モデル，CAD モデル，意匠形状，位置・法線ベクトル，リバースエンジニアリング

## 1. 研究の目的と背景

自動車のボディー加工に用いられているようなプレス曲面金型は，次のプロセスを経て製作されている。

- (1) 意匠デザイナーがアイデアスケッチを制作する。
- (2) アイデアスケッチに基づき，クレイモデルや木型などの物理モデルを製作する。
- (3) 物理モデルによる意匠承認の後，同モデルの測定を行う。
- (4) 測定データを基に CAD モデルを構築する。
- (5) CAD モデルを基に加工工程を決定するとともに，加工データ (NC データ) を生成する。
- (6) NC データを用いて加工作業を行う。

上記のプロセスにおいて，離散点の測定データから CAD モデルを構築する技術，すなわちリバースエンジニアリングにおいて，測定データである離散点位置ベクトルから CAD モデルを構成している曲面を定義し，滑らかに接続することが容易ではなく，エンジニアが多くの時間を要してその作業を行っている。

本研究では，筆者らがこれまで開発してきた位置および法線ベクトル検出センサを用いて，すなわち，測定データとして離散点の位置および法線ベクトルを獲得することを前提として，次の二つの項目を達成することを目的としている。

- (1) 離散点の位置・法線ベクトルデータから 2 次微分を連続とする高品位な曲面モデルを構築する方法を提案する。
- (2) 上記 (1) で提案された方法を基に，高品位曲面モデルを構築するシステムを開発する。

## 2. 曲面モデル構築方法の提案

### 2.1 従来の問題点

本研究では，物理モデルから CAD モデルを構築するリバースエンジニアリングの新しい技術の確立を目指している。従来のリバースエンジニアリングでは，物理モデルの離散点の位置ベクトルを測定データとして獲得し，同データを基にして CAD モデルを構築する。この場合，

形状を構成している曲面の識別認識が容易でない，滑らかな接続条件を満足しつつ曲面を構築することが容易でない，デザイナーの要求する曲面の構築が容易でないなどの問題が指摘されていた。

この問題の原因の一つは，測定データである離散点群の位置ベクトルが形状を拘束する情報として十分でないこと，また，もう一つの原因として，曲面を定義するためのデータを測定データから直接導出できないことが挙げられる。

これらの問題を解決するため，筆者らは，測定データとして離散点群の位置ベクトルと法線ベクトルを獲得することを可能にしている。そこで本章では，離散点群の位置・法線ベクトルから自動的に曲率を連続とする曲面を構築するための曲面式を提案する。

### 2.2 制御点要素の提案

提案する曲面式は，双 3 次 Bezier 曲面を基礎としている。本研究では，双 3 次 Bezier 曲面を定義する制御点を導出するための制御点要素を提案する。制御点要素は，筆者が独自に提案するものであり，離散点群の位置ベクトルと法線ベクトルから容易に求めることができ，これにより定義された双 3 次 Bezier 曲面は，自動的に 2 次微分連続の品質を保証される。以下において，制御点要素の求め方を説明する。

図 1 に示されているように，点  $Q_i$  が与えられたとき，同点に関して 24 の制御点要素  $Q_{ie1}, Q_{iw1}, Q_{in1}, Q_{is1}, Q_{ie2}, Q_{iw2}, Q_{in2}, Q_{is2}, Q_{ine1}, Q_{inw1}, Q_{ise1}, Q_{isw1}, Q_{iene}, Q_{inne}, Q_{iwnw}, Q_{innw}, Q_{iese}, Q_{isse}, Q_{iws}, Q_{issw}, Q_{ine2}, Q_{inw2}, Q_{ise2}, Q_{isw2}$  が定義される。それぞれの制御点要素の位置ベクトルは， $Q_{ie1}, Q_{iw1}, Q_{in1}, Q_{is1}, Q_{ie2}, Q_{iw2}, Q_{in2}, Q_{is2}, Q_{ine1}, Q_{inw1}, Q_{ise1}, Q_{isw1}, Q_{iene}, Q_{inne}, Q_{iwnw}, Q_{innw}, Q_{iese}, Q_{isse}, Q_{iws}, Q_{issw}, Q_{ine2}, Q_{inw2}, Q_{ise}, Q_{isw2}$  として与えられる。点  $Q_i$  の位置ベクトル  $Q_i$  と単位法線ベクトル  $N_i$  が測定データとして与えられているとき，点  $Q_i$  に関する 24 の制御点要素は以下の条件を満足するものとして与える。

- 点  $Q_i, Q_{in1}, Q_{in2}, Q_{is1}, Q_{is2}$  は, 平面  $S_{ins}$  上に存在する.
- 点  $Q_{ie1}, Q_{ine1}, Q_{inne}, Q_{ise1}, Q_{isse}$  は, 平面  $S_{ie1}$  上に存在する.
- 点  $Q_{iw1}, Q_{inw1}, Q_{innw}, Q_{isw1}, Q_{issw}$  は, 平面  $S_{iw1}$  上に存在する.
- 点  $Q_{ie2}, Q_{iene}, Q_{ine2}, Q_{iese}, Q_{ise2}$  は, 平面  $S_{ie2}$  上に存在する.
- 点  $Q_{iw2}, Q_{iwnw}, Q_{inw2}, Q_{iws1}, Q_{isw2}$  は, 平面  $S_{iw2}$  上に存在する.
- 点  $Q_i, Q_{ie1}, Q_{ie2}, Q_{iw1}, Q_{iw2}$  は, 平面  $S_{iew}$  上に存在する.
- 点  $Q_{in1}, Q_{ine1}, Q_{iene}, Q_{inw1}, Q_{iwnw}$  は, 平面  $S_{in1}$  上に存在する.
- 点  $Q_{is1}, Q_{ise1}, Q_{iese}, Q_{isw1}, Q_{iws1}$  は, 平面  $S_{is1}$  上に存在する.
- 点  $Q_{in2}, Q_{inne}, Q_{ine2}, Q_{innw}, Q_{inw2}$  は, 平面  $S_{in2}$  上に存在する.
- 点  $Q_{is2}, Q_{isse}, Q_{ise2}, Q_{issw}, Q_{isw2}$  は, 平面  $S_{is2}$  上に存在する.
- 点  $Q_i, Q_{in1}, Q_{is1}, Q_{ie1}, Q_{iw1}, Q_{ine1}, Q_{inw1}, Q_{ise1}, Q_{isw1}$  は, 位置ベクトル  $Q_i$  と単位法線ベクトル  $N_i$  により定義される平面  $S_{itp}$  上に存在する.
- 点  $Q_{in2}, Q_{inne}, Q_{innw}$  は, 平面  $S_{itp}$  に平行な平面  $S_{ins1}$  上に存在する.
- 点  $Q_{is2}, Q_{isse}, Q_{issw}$  は, 平面  $S_{itp}$  に平行な平面  $S_{ins2}$  上に存在する.
- 点  $Q_{ie2}, Q_{iene}, Q_{iese}$  は, 平面  $S_{itp}$  に平行な平面  $S_{iew1}$  上に存在する.
- 点  $Q_{iw2}, Q_{iwnw}, Q_{iws1}$  は, 平面  $S_{itp}$  に平行な平面  $S_{iew2}$  上に存在する.
- 平面  $S_{in2}, S_{in1}, S_{iew}, S_{is1}, S_{is2}$  は, それぞれ平行であり, 任意の距離  $D_{ns}$  の間隔がある.
- 平面  $S_{ie2}, S_{ie1}, S_{ins}, S_{iw1}, S_{iw2}$  は, それぞれ平行であり, 任意の距離  $D_{ew}$  の間隔がある.
- 平面  $S_{itp}$  と平面  $S_{ins1}$  の間隔と平面  $S_{itp}$  と平面  $S_{ins2}$  の間隔は, 任意の距離  $H_{ns}$  である.
- 平面  $S_{itp}$  と平面  $S_{iew1}$  の間隔と平面  $S_{itp}$  と平面  $S_{iew2}$  の間隔は, 任意の距離  $H_{ew}$  である.
- 位置ベクトル  $Q_{ine2}$  は次式より得られる.
 
$$Q_{ine2} = Q_{inne} + Q_{iene} - Q_{ine1} \quad (1)$$
- 位置ベクトル  $Q_{inw2}$  は次式より得られる.
 
$$Q_{inw2} = Q_{innw} + Q_{iwnw} - Q_{inw1} \quad (2)$$
- 位置ベクトル  $Q_{ise2}$  は次式より得られる.
 
$$Q_{ise2} = Q_{isse} + Q_{iese} - Q_{ise1} \quad (3)$$
- 位置ベクトル  $Q_{isw2}$  は次式より得られる.
 
$$Q_{isw2} = Q_{issw} + Q_{iws1} - Q_{isw1} \quad (4)$$

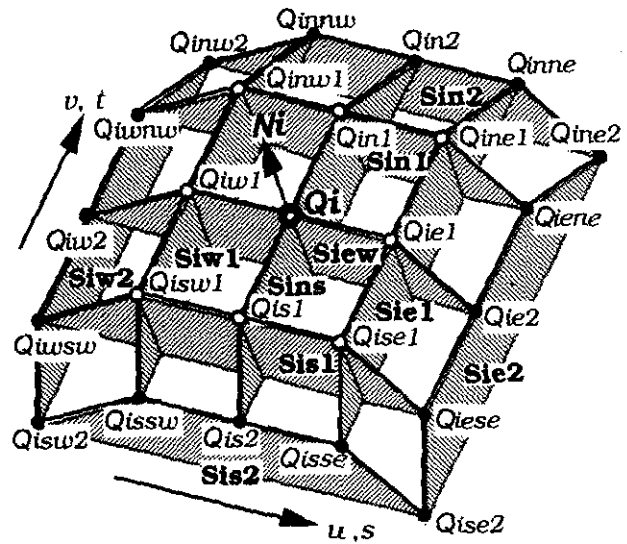


Fig. 1 Control elements

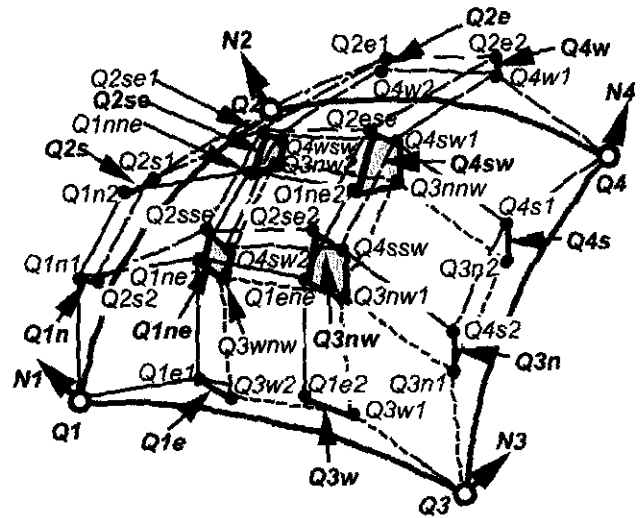


Fig. 2 Control elements and control points

### 2. 3 曲面式の提案

本研究で最終的に構築する曲面は3次 Bézier 曲面であり, ここでは, 提案した制御点要素により3次 Bézier 曲面を定義する制御点を導出する方法について提案する. 提案する方法で定義される3次 Bézier 曲面は, その接続において, 2次微分値までの連続性を保証している.

図2に示されているように, 点  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  に関する位置ベクトル  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  と単位法線ベクトル  $N_1, N_2, N_3, N_4$  が与えられているとき, それらの点に関する制御点要素を上述した手順に従って導出する. そこで, 3次 Bézier 曲面を定義する制御点  $Q_1, Q_{1n}, Q_{1e}, Q_{1ne}, Q_2, Q_{2s}, Q_{2e}, Q_{2se}, Q_3, Q_{3n}, Q_{3w}, Q_{3nw}, Q_4, Q_{4s}, Q_{4w}, Q_{4sw}$  の位置ベクトル  $Q_1, Q_{1n}, Q_{1e}, Q_{1ne}, Q_2, Q_{2s}, Q_{2e}, Q_{2se}, Q_3, Q_{3n}, Q_{3w}, Q_{3nw}, Q_4, Q_{4s},$

$Q4w, Q4sw$ は、パラメータ  $s, t$ を用いて式(5)~(8)により求められる。

$$\left. \begin{aligned} Q1 \\ Q1n &= (1-t) \cdot Q1n1 + t \cdot Q2s2 \\ Q1e &= (1-s) \cdot Q1e1 + s \cdot Q3w2 \end{aligned} \right\} (5)$$

$$Q1ne = \begin{bmatrix} 1-s & s \\ 1-t & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q1ne1 & Q2sse \\ Q3wnw & Q4sw2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1-t \\ t \end{bmatrix}$$

$$\left. \begin{aligned} Q2 \\ Q2s &= (1-t) \cdot Q1n2 + t \cdot Q2s1 \\ Q2e &= (1-s) \cdot Q2e1 + s \cdot Q4w2 \end{aligned} \right\} (6)$$

$$Q2se = \begin{bmatrix} 1-s & s \\ 1-t & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q1nne & Q2se1 \\ Q3nw2 & Q4wsw \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1-t \\ t \end{bmatrix}$$

$$\left. \begin{aligned} Q3 \\ Q3n &= (1-t) \cdot Q3n1 + t \cdot Q4s2 \\ Q3w &= (1-s) \cdot Q1e2 + s \cdot Q3w1 \end{aligned} \right\} (7)$$

$$Q3nw = \begin{bmatrix} 1-s & s \\ 1-t & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q1ene & Q2se2 \\ Q3nw1 & Q4ssw \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1-t \\ t \end{bmatrix}$$

$$\left. \begin{aligned} Q4 \\ Q4s &= (1-t) \cdot Q3n2 + t \cdot Q4s1 \\ Q4w &= (1-s) \cdot Q2e2 + s \cdot Q4w1 \end{aligned} \right\} (8)$$

$$Q4sw = \begin{bmatrix} 1-s & s \\ 1-t & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q1ne2 & Q2ese \\ Q3nnw & Q4sw1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1-t \\ t \end{bmatrix}$$

最終的に提案される曲面  $B(u, v)$ は、パラメータ  $u, v$ を用いて式(9)により表される。

$$\left. \begin{aligned} M &= \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ W &= \begin{bmatrix} Q1 & Q1n & Q2s & Q2 \\ Q1e & Q1ne & Q2se & Q2e \\ Q3w & Q3nw & Q4sw & Q4w \\ Q3 & Q3n & Q4s & Q4 \end{bmatrix} \\ B(u, v) &= \begin{bmatrix} u^3 & u^2 & u & 1 \end{bmatrix} M W M^T \begin{bmatrix} v^3 & v^2 & v & 1 \end{bmatrix}^T \end{aligned} \right\} (9)$$

### 3. モデル構築システム

離散点の位置ベクトルと単位法線ベクトルから、提案された曲面に基づきモデルを構築するシステムを開発した。

#### 3.1 モデル構築基本システム

測定データとしてモデル上の離散点の位置ベクトルと単位法線ベクトルを直接用いて、CADモデルの構築を行った。物理モデルの測定により、離散点の位置ベクトル

と単位法線ベクトルとしてを獲得した。図3は、その測定データを示している。

同データから、提案された方法に基づき制御点要素を導出し、さらに制御点を求めて曲面パッチを構築した。図4は、構築されたCADモデルを示している。

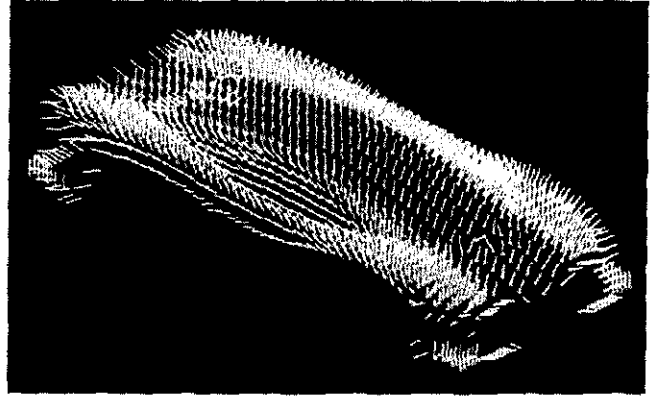


Fig. 3 Measurement data

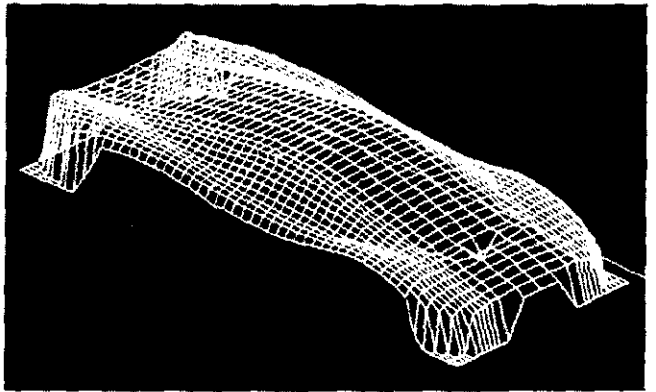


Fig. 4 Constructed computer model

#### 3.2 曲面の識別に基づくモデル構築

モデル上の離散点の位置ベクトルと単位法線ベクトルが得られているとき、簡便に離散点上の曲率を求めることが可能となる。曲率分布を基にモデル形状を構成している曲面を識別認識し、曲面ごとに測定データの平滑化処理を施し、CADモデルを構築するシステムを開発した。

図5に示されるように、点  $Qa, Qb$ に関する位置ベクトル  $Pa, Pb$  および単位法線ベクトル  $Na, Nb$  が与えられているとき、それぞれの点における接線ベクトル  $Ta, Tb$  が求められ、同時に曲率  $\kappa$  は式(10)より得られる。

$$\kappa = d\theta / ds \quad (10)$$

ここで、 $d\theta$ は接線ベクトル  $Ta, Tb$  の差であり、 $ds$  は点  $Qa$  と点  $Qb$  の距離を表している。隣り合う点の間の曲率の変化がある閾値を越えたとき、その点を曲面の境界上

の点として認識することにより、曲面の識別認識を行った。

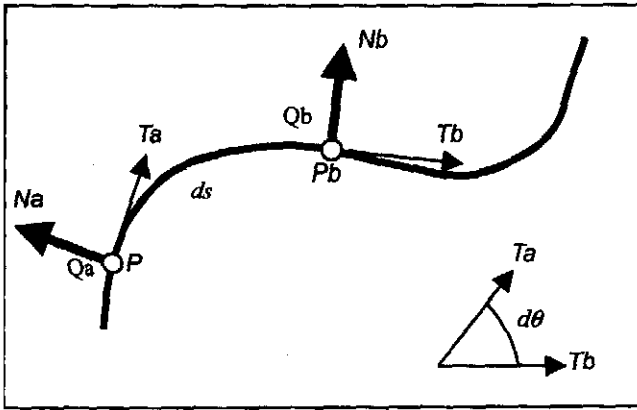


Fig. 5 Estimation of approximate curvature

図6は、測定データを示している。同データは、位置ベクトルに関して最大±10μm、単位法線ベクトルに関して最大±0.1°の測定誤差を含んでいる。同データを基に、上述した方法により測定離散点の曲率が算出され、曲面が識別分類された。図7は、識別された曲面境界上の点を示している。境界を認識した後、コーナー点の位置ベクトルおよび単位法線ベクトルを用いて識別された曲面を1つの曲面式で定義する。それにより構築されたCADモデルを図7に併せて示している。

#### 4. まとめ

本研究は以下のとおりにまとめられる。

- (1) 物理モデル上の離散点の位置・法線ベクトルデータから2次微分を連続とする高品位な曲面モデルを構築する方法を提案した。
- (2) 提案された方法を基にして、高品位曲面モデルを構築するシステムを開発した。

#### 謝辞

本研究は、天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成金の補助を受けて行われたものであり、ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- [1] N. V. Puntambekar, A. G. Jablokow, and H. J. Sommer III: Unified review of 3D model generation for reverse engineering, Computer Integrated Manufacturing Systems, Vol.7 (1994), No.4, 259-268.
- [2] H. AOYAMA, M. KAWAI, T. KISHINAMIA: New Method for Detecting the Contact Point between a

Touch Probe and a Surface, Annals of the CIRP, Vol.38/1(1989), 517-520.

- [3] K. YAMAZAKI, H. AOYAMA, K.S. LEE, M. SAWABE: Non-Contact Probe for Continuous Measurement of Surface Inclination and Position using Dynamic Irradiation of Light Beam, Annals of the CIRP, Vol.42/1(1993), 585-588
- [4] H. Aoyama and I. Inasaki: Surface classification and model construction based on processing position vectors and unit normal vectors, Transactions of NAMRI/SME, Vol. XXIV (1996), 211.

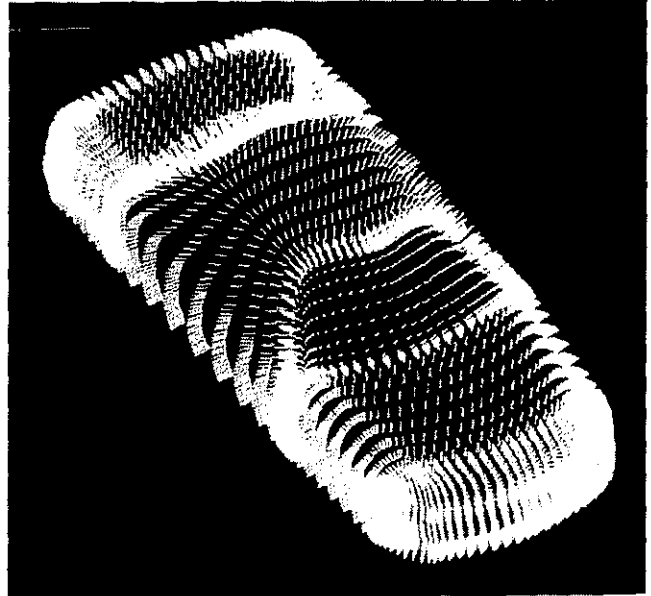


Fig. 6 Measurement data

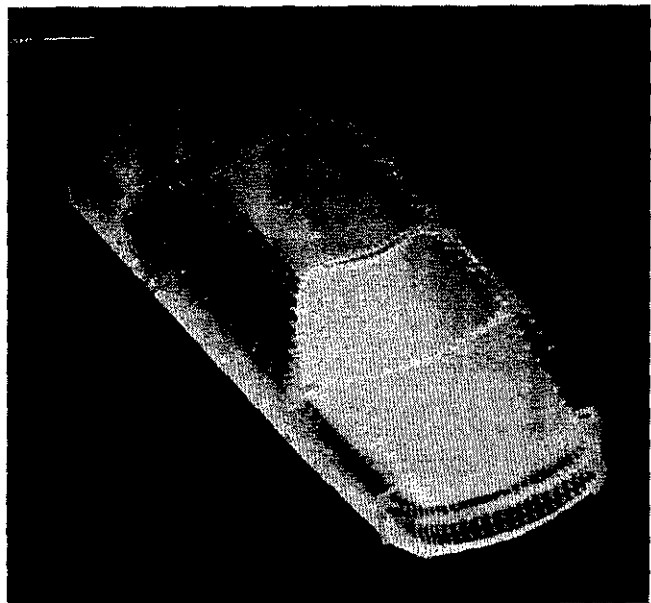


Fig. 7 Extracted points on boundary lines