

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

青山英樹*

1. はじめに

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描く。
- (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曲面を定義する。このプロセスにおいて、曲面を曲率連続として滑らかに接続することが容易ではないため、エンジニアが多くの時間を要してその作業を行っており、リードタイム短縮の障害になっているばかりでなく、コスト増加の原因となっている。

本研究では、筆者らがこれまで開発してきた測定センサにより獲得される位置および法線ベクトルを用いて、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、①形状を構成している曲面の識別認識が容易でない、②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、③デザイナーが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。

これら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 Bézier 曲面を基礎としている。本研究では、双 3 次 Bézier 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 Bézier 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、同点に関する 24 の制御点要素 $Q_{ie1}, Q_{iw1}, Q_{in1}, Q_{is1}, Q_{ie2}, Q_{iw2}, Q_{in2}, Q_{is2}, Q_{ine1}, Q_{inw1}, Q_{ise1}, Q_{isw1}, Q_{iene}, Q_{inne}, Q_{iwnw}, Q_{innw}, Q_{iese}, Q_{isse}, Q_{iws}, Q_{isw}, Q_{issw}, Q_{ine2}, Q_{inw2}, Q_{ise2}, Q_{isw2}$ が定義される。それぞれの制御点要素の位置ベクトルは、 $Q_{ie1}, Q_{iw1}, Q_{in1}, Q_{is1}, Q_{ie2}, Q_{iw2}, Q_{in2}, Q_{is2}, Q_{ine1}, Q_{inw1}, Q_{ise1}, Q_{isw1}, Q_{iene}, Q_{inne}, Q_{iwnw}, Q_{innw}, Q_{iese}, Q_{isse}, Q_{iws}, Q_{isw}, Q_{issw}, Q_{ine2}, Q_{inw2}, Q_{ise}, Q_{isw2}$ 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_{in} 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 $Q_{iw2}, Q_{iwnw}, Q_{inw2}, Q_{iws}, Q_{isw2}$ 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 $Siew$ 上に存在する.
- 点 $Q_{in1}, Q_{ine1}, Q_{iene}, Q_{inw1}, Q_{iwnw}$ は, 平面 $Sin1$ 上に存在する.
- 点 $Q_{is1}, Q_{ise1}, Q_{iese}, Q_{isw1}, Q_{iwsw}$ は, 平面 $Sis1$ 上に存在する.
- 点 $Q_{in2}, Q_{inne}, Q_{ine2}, Q_{innw}, Q_{inw2}$ は, 平面 $Sin2$ 上に存在する.
- 点 $Q_{is2}, Q_{isse}, Q_{ise2}, Q_{issw}, Q_{isw2}$ は, 平面 $Sis2$ 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 $Sitp$ 上に存在する.
- 点 $Q_{in2}, Q_{inne}, Q_{innw}$ は, 平面 $Sitp$ に平行な平面 $Sins1$ 上に存在する.
- 点 $Q_{is2}, Q_{isse}, Q_{issw}$ は, 平面 $Sitp$ に平行な平面 $Sins2$ 上に存在する.
- 点 $Q_{ie2}, Q_{iene}, Q_{iese}$ は, 平面 $Sitp$ に平行な平面 $Siew1$ 上に存在する.
- 点 $Q_{iw2}, Q_{iwnw}, Q_{iwsw}$ は, 平面 $Sitp$ に平行な平面 $Siew2$ 上に存在する.
- 平面 $Sin2, Sin1, Siew, Sis1, Sis2$ は, それぞれ平行であり, 任意の距離 Dns の間隔がある.
- 平面 $Sie2, Sie1, Sins, Siw1, Siw2$ は, それぞれ平行であり, 任意の距離 Dew の間隔がある.
- 平面 $Sitp$ と平面 $Sins1$ の間隔と平面 $Sitp$ と平面 $Sins2$ の間隔は, 任意の距離 Hns である.
- 平面 $Sitp$ と平面 $Siew1$ の間隔と平面 $Sitp$ と平面 $Siew2$ の間隔は, 任意の距離 Hew 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.

$$Q_{isw2} = Q_{issw} + Q_{iwsw} - Q_{isw1} \quad (4)$$

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 $Q_1, Q_{1n}, Q_{1e}, Q_{1ne}, Q_2, Q_{2s}, Q_{2e},$

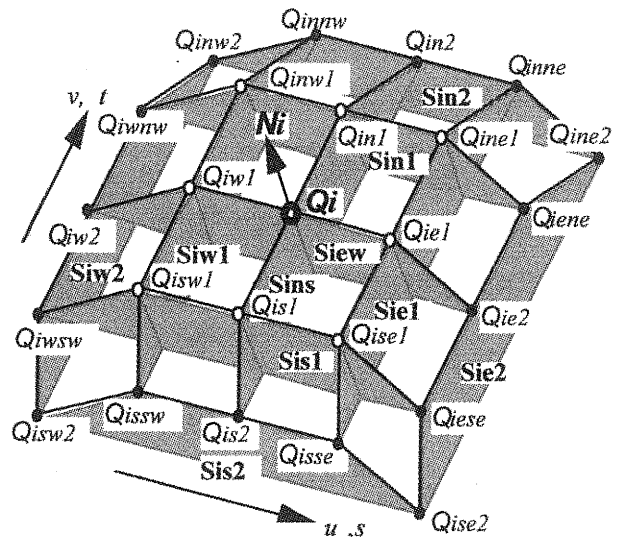


図 1 制御点要素

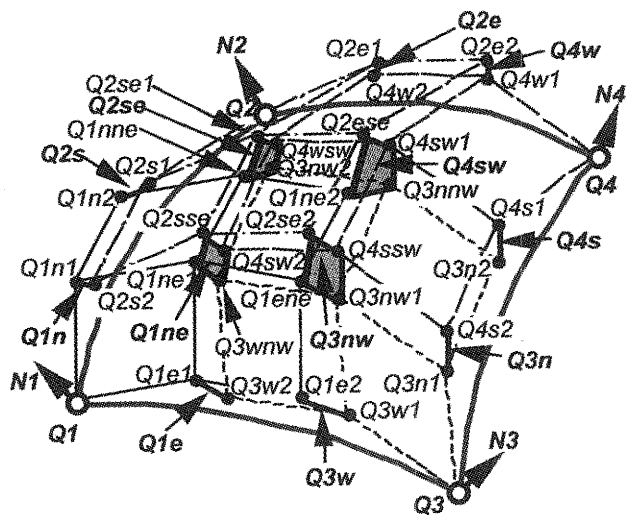


図 2 制御点要素と制御点

$Q_{2se}, Q_3, Q_{3n}, Q_{3w}, Q_{3nw}, Q_4, Q_{4s}, Q_{4w}, Q_{4sw}$ は, パラメータ s, t を用いて式(5)~(8)により求められる.

$$\left. \begin{aligned} Q_1 \\ Q_{1n} &= (1-t) \cdot Q_{1n1} + t \cdot Q_{2s2} \\ Q_{1e} &= (1-s) \cdot Q_{1e1} + s \cdot Q_{3w2} \\ Q_{1ne} &= \begin{bmatrix} 1-s & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{1ne1} & Q_{2sse} \\ Q_{3wnw} & Q_{4sw2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1-t \\ t \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} (5)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_2 \\ Q_{2s} &= (1-t) \cdot Q_{1n2} + t \cdot Q_{2s1} \\ Q_{2e} &= (1-s) \cdot Q_{2e1} + s \cdot Q_{4w2} \\ Q_{2se} &= \begin{bmatrix} 1-s & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{1nne} & Q_{2se1} \\ Q_{3nw2} & Q_{4wsw} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1-t \\ t \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} (6)$$

$$\left. \begin{aligned}
 &Q3 \\
 &Q3n = (1-t) \cdot Q3n1 + t \cdot Q4s2 \\
 &Q3w = (1-s) \cdot Q1e2 + s \cdot Q3w1 \\
 &Q3nw = \begin{bmatrix} 1-s & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q1ene & Q2se2 \\ Q3nw1 & Q4ssw \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1-t \\ t \end{bmatrix}
 \end{aligned} \right\} (7)$$

$$\left. \begin{aligned}
 &Q4 \\
 &Q4s = (1-t) \cdot Q3n2 + t \cdot Q4s1 \\
 &Q4w = (1-s) \cdot Q2e2 + s \cdot Q4w1 \\
 &Q4sw = \begin{bmatrix} 1-s & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q1ne2 & Q2ese \\ Q3nnw & Q4sw1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1-t \\ t \end{bmatrix}
 \end{aligned} \right\} (8)$$

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。

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

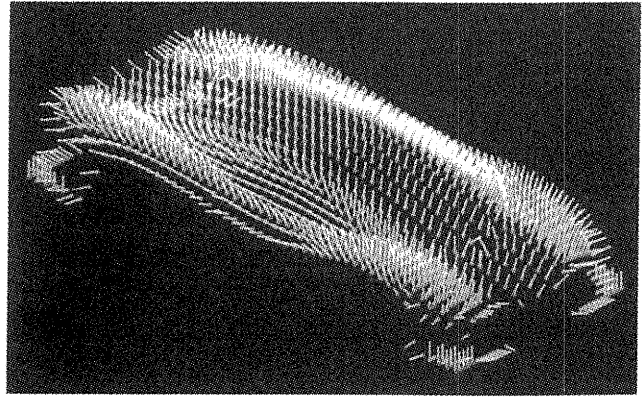


図3 測定データ

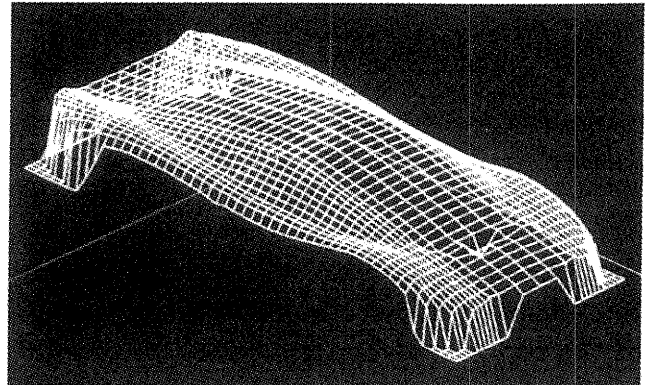


図4 コンピュータモデル

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。

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 κ は式(10)より得られる。

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

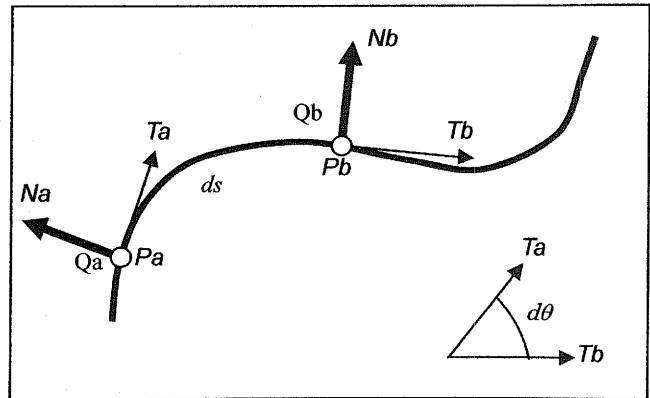
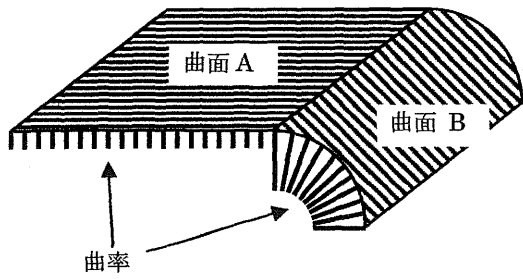


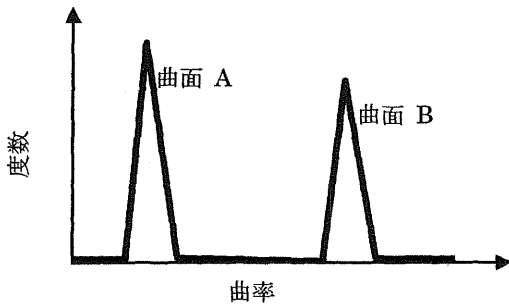
図5 曲率の算出

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。

曲率に関する度数分布から実モデルを構成している曲面を識別する。例えば、図6(a)に示されるような曲面Aと曲面Bで構成される形状の測定データから測定点における曲率を導出した場合、図6(b)に示すような曲率に関する度数分布を得ることができる。度数分布から曲面ごとの曲率の範囲を指定し、指定された範囲における曲率をもつ点群を同一面上の点として識別分類する。同一の面上の点として識別された点群データから曲面を定義し、コンピュータモデルを構築する。



(a) 曲面と曲率



(b) 曲率度数分布

図6 曲率度数分布による曲面に認識

図7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 $\pm 10\mu\text{m}$ 、単位法線ベクトルに関して最大 $\pm 0.1^\circ$ 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8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8に併せて示している。

3. 3 ラフ実モデルによるモデリングシステム

実空間においてクレイ、木塊、発砲スチロールなどでアイデア形状を表現することは、視覚のみならず触覚による評価も得られるため、デザイナーにとって有効な方法である。しかし、その形状を精確に製作する従来のリバースエンジニアリングでは、製作時間の観点から効果的な方法とはいえない。そこで、実空間での造形・評価の作業を形状の概略特徴を表現する程度のラフなモデルの製作までとし、その測定データからコンピュータで高品位な形状へ再構築するシステムが意匠設計のツールとして有効であると考えられる。

図9(a)は、ラフな実モデルの測定データから直接構築されたラフコンピュータモデルである。このモデルの微小領域を2次曲面へ近似する測定データの平滑処理を繰り返し、同図(b)に示すように曲面を自動識別した後、個々の曲面に対して微小領域を2次曲面へ近似する平滑処理を再度繰り返すことにより、同図(c)に示すような高品位なモデルを構

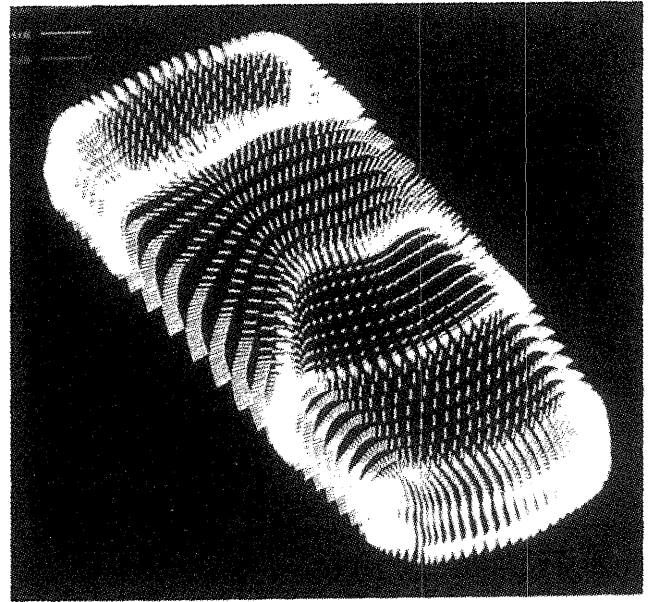


図7 測定データ

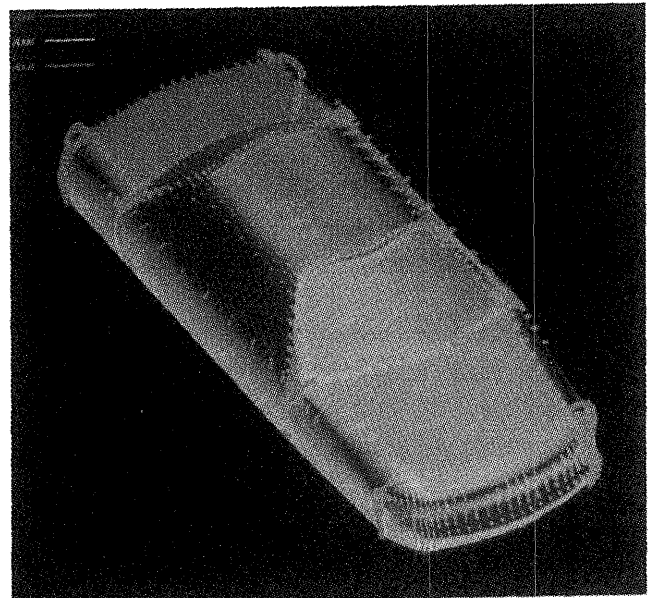


図8 抽出された境界と構築されたモデル

築することができる。

4. まとめ

本研究は以下のとおりにまとめられる。

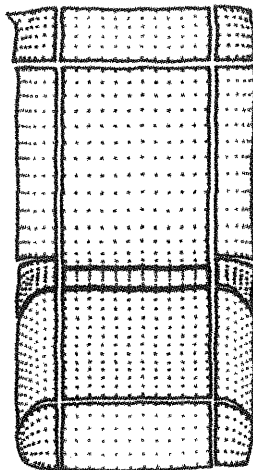
- (1) 物理モデル上の離散点の位置・法線ベクトルデータから2次微分を連続とする高品位な曲面モデルを構築する方法を提案した。
- (2) 提案された方法を基にして、高品位曲面モデルを構築するシステムを開発した。

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



(a) ラフモデル



(b) 曲面の認識・分類



(c) 高品位モデル

図9 ラフ形状の高品位化処理

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.