

計測点群データの再標本化に基づく3次元形状モデリング

王 生 進 蔡 奕 佐 藤 誠

東京工業大学 精密工学研究所
〒227 横浜市緑区長津田町4259

あらまし 本報告では、計測点群データの再標本化に基づく3次元形状モデリングする手法を提案する。計測点群データを対象とし形状再構成を行う場合、そのデータの量が膨大になりすぎ、CGにおいては取り扱いにくい。従来提案されてきた手法では、平面三角補間で形状を再構成するため、滑らかな自由曲面を表現することができなかつたり、抽出されたデータの数が十分多くないと、物体表面は不自然になる。この問題を解決するため、本手法では、まず、キューブ分割手法を用いて計測された3次元点群データを再標本化し、近似的に等価な格子状の再標本化点を生成する。次に、再標本化点を用いて双3次 Bézier 自由曲面式により3次元形状モデリングを行なう。これにより、計測点群データから3次元形状モデルを自動に生成することができ、CGのための3次元形状モデリング作業を大幅に軽減することが可能となる。最後に、具体例を用いた実験により提案する手法の有効性を明らかにした。

キーワード：3次元画像処理、キューブ分割、データ再標本化、Bézier 曲面表現、3次元形状モデリング。

Modeling of 3-D Objects by Re-sampling Range Data

Shengjin WANG, Yi CAI, Makoto SATO

*Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology,
4259 Nagatsuta - cho, Midori - ku, Yokohama - shi, 227 Japan,*

Abstract An efficient method on modeling of 3-D objects by re-sampling range data is proposed. When reconstructing an 3-D object with dispersed range data it is difficult for processing in CG because of the massive data. The traditional methods proposed before are to reconstruct surface with plane triangle. So that the surface can not be represented smoothly. Moreover if the extracted data is not great in number, the surface of object can not be represented naturally. In this report the range data is re-sampled firstly by using cube-based segmentation. As a result the patches of surface are generated. In the second step the object is modeled in surface with generated patches by employing bicubic Bezier surface equations. By using the proposed method 3-D object model can be reconstructed automatically from measured range data, and the working load of 3-D shape modeling in CG can be lightened greatly. The experimental results are given in the final of the report.

Key words: 3-D image processing, cube-based segmentation, data re-sampling, Bezier surface representation, 3-D modeling.

1 まえがき

3次元コンピュータグラフィックス (CG) 画像,あるいは仮想現実感 (VR) 立体環境などを作成するには,個々の物体の形状・テクスチャ等を構築する必要がある。現在,実際の3次元物体形状をモデリングするには,そのほとんどの作業が人間の手によって行なわれているのが一般的であり,多大な時間・労力を要しているのが実情である。従って,こうした物体形状の構成作業の自動化が強く望まれている。

一方,物体の3次元情報の獲得においては,非接触な手法で距離情報を計測するさまざまな方法が開発されている [1] [2] [3] [4]。しかし,これにより取り込まれる計測点群データは,その量が膨大になりすぎ,CGにおいては取り扱いにくい。3次元自由曲面の生成,リアルタイムな立体演算は困難である。従来提案されてきた手法では,平面三角補間 [6] [7]あるいは双一次曲面式 [8]で物体形状を再構成するため,滑らかな自由曲面を表現することができなかつたり,抽出されたデータの数が十分多くないと,物体表面は不自然になる。長島ら [9]は3次元形状モデルの個々の基準点を入力することにより,3次 Bézier 曲面パッチの生成を行なう手法を提案しているが,この方法では,形状モデルの基準点を手作業で選択する必要があるため,曲面パッチの自動生成は不可能である。

本報告では,計測点群データの再標準化に基づく3次元物体形状をモデリングする手法を提案する。まず,キューブ分割手法を用いて計測された3次元形状モデルの離散点群データを再標準化し,近似的に等価な格子状の再標準化点を生成する。次に,得られた再標準化点を用いて双3次 Bézier 自由曲面式により3次元形状をモデリングすることを行なう。これにより,計測点群データから3次元形状モデルを自動生成することができ,CGのための3次元形状モデリング作業を大幅に軽減することが可能となる。最後に,具体例を用いた実験により提案する手法の有効性を報告する。

2 キューブ分割手法の提案

2.1 キューブの生成

3次元計測点群データを取得する3次元測定機は形状モデルの表面の多数の点の3次元座標値を計測する。ここで,計測された点群データの羅列を計測点群データと呼び,再標準化された点列を再標準化点と呼ぶことにする。対象と

する自由形状物体上の稠密な N 個の3次元計測点群データ $\{D_i(x_i, y_i, z_i) | i = 1, \dots, N\}$ が与えられているとする。

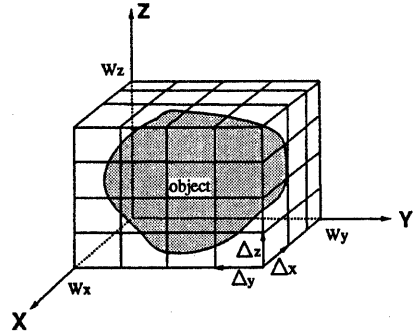


Fig. 1 The cube segmentation of a 3-D object

3次元形状モデルの計測点群データから,モデル全体を囲む外郭直方体の位置が次のように求められる。

$$\begin{cases} x_{min} = \min\{x_i\} - \Delta_0 \\ x_{max} = \max\{x_i\} + \Delta_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} y_{min} = \min\{y_i\} - \Delta_0 \\ y_{max} = \max\{y_i\} + \Delta_0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} z_{min} = \min\{z_i\} - \Delta_0 \\ z_{max} = \max\{z_i\} + \Delta_0 \end{cases} \quad (3)$$

ここで, Δ_0 は外郭直方体とモデル境界間のゆとりを与えるパラメータである。そして,外郭直方体の大きさが次式で得られる。

$$\begin{cases} W_x = x_{max} - x_{min} \\ W_y = y_{max} - y_{min} \\ W_z = z_{max} - z_{min} \end{cases} \quad (4)$$

ここで, W_x, W_y, W_z はそれぞれ形状モデルを囲う直方体の X, Y, Z 軸の方向の長さである。

得られた外郭直方体を, X, Y, Z 軸の三つの方向に沿って,適当なしきい値により分割する。すると,図1に示すように3次元形状モデルの空間でキューブを生成して,形状モデルの表面は各キューブの中に分割される。ここで,キューブの中に分割された部分は一つの曲面パッチと呼ばれる。各キューブの X, Y, Z 軸方向の長さは次式で決めら

れる。

$$\begin{cases} \Delta_x = \frac{W_x}{n_x} \\ \Delta_y = \frac{W_y}{n_y} \\ \Delta_z = \frac{W_z}{n_z} \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 n_x, n_y, n_z はそれぞれ X, Y, Z 軸、三つの軸方向のキューブの数である。

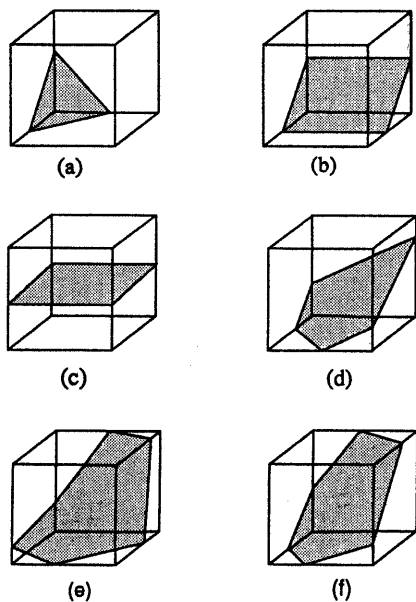


Fig. 2 The forms of segmented surface in cubes

2.2 キューブ中の曲面パッチ

各キューブの中に分割された3次元物体の表面は一つの多角形曲面パッチになっている。計測点群データの再標本化は各曲面パッチごとに行なう。また、計測点群データを再標本化するために、3次元形状モデルに対する分割は十分に細かな分割キューブにより各キューブ内では単一の曲面で構成すると前提する。後の再標本化に対しては、このような曲面パッチのみを対象とする。そして、キューブの中に分割された曲面パッチの形が図2の示すような6種類に限られる。図2(a)は三角形曲面パッチで、図2(b)

(c)は四角形曲面パッチである。図2(d)は五角形曲面パッチで、図2(e), (f)は六角形曲面パッチである。

2.3 曲面パッチの再分割

本手法の結果として、得られた曲面パッチは自由曲面表現式で表現できる四角形パッチと三角形パッチ^[9]を生成する。そして、各キューブの中に分割された曲面パッチは四角形と三角形の場合、直接に再標本化の処理を行ない、五角形あるいは六角形の場合、その曲面パッチをさらに四角形曲面と三角形パッチへ再分割する。

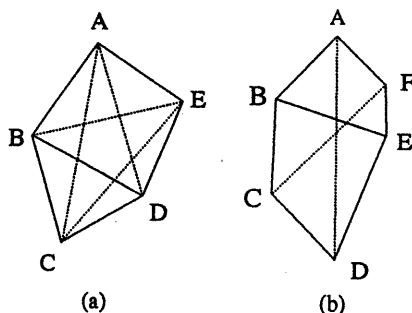


Fig. 3 Re-segmentation of polygonal patches

図3(a)に示すような五角形の場合には、その五角形曲面パッチを一つの四角形曲面パッチと一つの三角形曲面パッチに再分割する。再分割可能なパターンは図3(a)に示すような五つの可能性がある。再分割の基準として、各分割線の2端点間の距離を計算し、2点間の距離が最短の分割線を求め、五角形曲面パッチを二つの曲面パッチに分ける。図3(a)の例では、実線BDが分割線となる。

図3(b)に示すような六角形曲面パッチの場合には、その六角形曲面パッチを二つの四角形曲面パッチに再分割する。この場合、図3(b)に示すような三つの再分割の可能性がある。再分割の基準として、各分割線の2端点間の距離を計算し、2点間の距離が最短の分割線により六角形曲面パッチを二つ四角形曲面パッチに分割する。その結果はは図3(b)の実線BEに表される。得られた新たな曲面パッチに対して、四角形曲面パッチあるいは三角形曲面パッチの場合と同じように再標本化処理を行なう。

3 計測点群データの再標本化

3.1 再標本化点の基本計算

一般に、自由曲面上稠密な3次元計測点群データが図4に示すように分布している。 n はこの曲面パッチの単位法線ベクトルである。 O は曲面パッチ外の空間点である。一旦、 O と n を定めると、再標本化点を簡単に計算することができる。次節以降、この計算する方法に基づいて、キューブの中に曲面パッチの6種類パターンに対して、 O と n を求める手法を述べる。

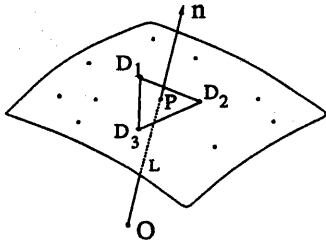


Fig. 4 The computation of a resampling point

ここで、ある曲面パッチの n と O はあらかじめ定めておくと、1本の半直線 L が次式で決められる。

$$P(t) = O + n \cdot t, t > 0 \quad (6)$$

そして、半直線 L は、この曲面パッチと交差して、一つの交差点が生じる。この交差点を求めるのは、まず、曲面上に分布している計測点群データから、半直線 L との最近距離の3点を選び出す。この3点を用いて一つの空間平面方程式が次式のように決められる。

$$(P(t) - D_1) \cdot [(D_2 - D_1) \times (D_3 - D_1)] = 0 \quad (7)$$

但し、点 D_1, D_2, D_3 は直線との最近距離の3点の計測点群データである。

次に、式(6)と式(7)を連立して、

$$(O + n \cdot t - D_1) \cdot [(D_2 - D_1) \times (D_3 - D_1)] = 0 \quad (8)$$

となる。式(8)を解くと、パラメータ t が求められる。得られた t を式(7)に代入すると、一つの再標本化点 P が求められる。更に、式(6)で決定される O が n の直交方向に比例的に替えると、曲面パッチ内で整列的な再標本化点が生成される。

3.2 曲面パッチ境界上の再標本化点の生成

形状モデルの3次元自由曲面を再構成する際に、各隣接する曲面パッチ間を連続に接続するために、隣接する各曲面パッチ間の境界線を共有することが必要である。

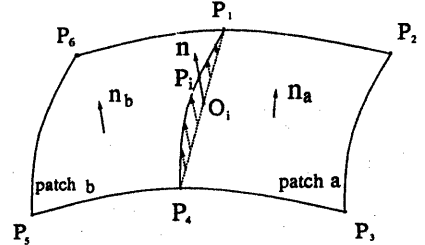


Fig. 5 The generation of resampling point on boundary

図5に示すような隣接している二つ曲面パッチの頂点を $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$ (P_1, P_4 を共有する)とする。これらの頂点は3.1節で定めた再標本化点である。

ここで、曲面パッチ上に $M \times M$ 個の再標本化点を生成することを設定すると、曲面パッチ境界線上の再標本化点の数が M 個であることが決まる。曲面パッチ境界線上 M 個再標本化点を生成するために、まず、キューブの同一面上にある二つの曲面パッチ頂点 P_1, P_4 を用いて、その二つの頂点で決められた線分 P_1P_4 上に M 個の点列を次式のように計算する。

$$O_i = P_1 + (i-1) \times \frac{P_4 - P_1}{M-1} \quad (9)$$

$$i = 1, 2, \dots, M$$

ここで、 O_i は線分 P_1P_4 上の点である。

次に、隣接している二つ曲面パッチのそれぞれの方向法線ベクトルを確定する。図5に示すような曲面パッチa, bの単位法線ベクトル n_a と n_b が次式のように求められる。

$$n_a = \frac{(P_3 - P_1) \times (P_2 - P_4)}{\|(P_3 - P_1) \times (P_2 - P_4)\|} \quad (10)$$

$$n_b = \frac{(P_4 - P_6) \times (P_1 - P_5)}{\|(P_4 - P_6) \times (P_1 - P_5)\|} \quad (11)$$

得られた n_a と n_b を用いて、

$$n = \frac{n_a + n_b}{\|n_a + n_b\|} \quad (12)$$

によって、曲面パッチ境界線上の再標本化点における単位法線ベクトル n が得られる。

つづいて、すでに求めた線分 P_1P_4 上にある M 個点列 O_i とこの単位法線ベクトル n を用いて、式(6)によって、 M 本の空間直線が作成される。各空間直線に対して、直線に最近距離の3点を計測点群データから選択する。式(7)、(8)を用いて、この M 本の直線がそれぞれ3次元形状モデルの表面との交差点が求められる。求められた M 個の交差点がこの曲面パッチ境界線上の M 個の再標本化点にすることにする。これらの M 個再標本化点がこの曲面パッチの1本の境界線を構成する。

キューブの中の曲面パッチが図2(a)に示すような三角形の場合に、この三角形曲面パッチが1本の境界線を頂点に縮退した四角形曲面パッチと見なして、この特殊な頂点を縮退点と呼ぶ。三角形曲面パッチの再標本化においては、その3本の境界線上の再標本化点が上述の四角形曲面パッチの場合と同じように生成される。また、次節で曲面パッチ内の再標本化点を生成するために、その縮退点を決定しなければならない。この縮退点を決定するのは、以降の手順で行なう。まず、三角形曲面パッチの三つの頂点に対して、各2点で構成する線分の長さを計算し、その内、長さが最短の線分との相対する頂点が縮退点とすることにする。次に、得られた縮退点が境界線を縮退したものとするため、この縮退点が M 個の再標本化点に共有される。

3.3 曲面パッチ内の再標本化点の生成

3.2節で曲面パッチ境界線上生成された再標本化点を用いて、曲面パッチ内の再標本化点を生成することができる。

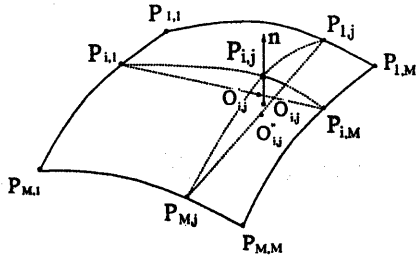


Fig. 6 The generation of resampling point on surface

ここで、図6に示す曲面パッチ内の再標本化点 $P_{i,j}$ に着目する。 $P_{i,j}$ に対応している境界線上の四つの再標本化点

$P_{i,1}, P_{i,M}$ と $P_{1,j}, P_{M,j}$ を選択する。この4点で決められた線分 $P_{i,1}P_{i,M}$ と $P_{1,j}P_{M,j}$ 上にそれぞれ M 個の点列を次のように生成される。

$$O'_{i,j} = P_{i,1} + (j-1) \times \frac{P_{i,M} - P_{i,1}}{M-1} \quad (13)$$

$$O''_{i,j} = P_{1,j} + (i-1) \times \frac{P_{M,j} - P_{1,j}}{M-1} \quad (14)$$

$i, j = 1, 2, \dots, M$

ここで、 $O'_{i,j}$ は線分 $P_{i,1}P_{i,M}$ 上にある点列であり、 $O''_{i,j}$ は線分 $P_{1,j}P_{M,j}$ 上にある点列である。得られた $O'_{i,j}$ と $O''_{i,j}$ を用いて、

$$O_{i,j} = \frac{O'_{i,j} + O''_{i,j}}{2} \quad (15)$$

によって、 $O_{i,j}$ が求められる。

次に、再標本化点 $P_{i,j}$ における単位法線ベクトル n を次式のように決定する。

$$n = \frac{(P_{i,M} - P_{i,1}) \times (P_{1,j} - P_{M,j})}{\|(P_{i,M} - P_{i,1}) \times (P_{1,j} - P_{M,j})\|} \quad (16)$$

得られた n と $O_{i,j}$ を用いて、式(7)によって空間直線 $P(t)$ が作成される。この直線に最近距離の3点を計測点群データから選択し、式(7)、(8)を用いて、空間直線が3次元形状モデル表面との交差点 $P_{i,j}$ が求められる。求められた交差点 $P_{i,j}$ が曲面パッチ内の再標本化点にすることにする。 $O_{i,j}$ が i, j によって替わると、整列的な交差点が求められて、曲面パッチ内に $M \times M$ 個の再標本化点が生成される。

曲面パッチは三角形パッチの場合、前節で述べたように、三角形パッチの一つの頂点は四角形曲面パッチの1本の辺を縮退したものと同じように、四角形曲面パッチの場合と同じように曲面パッチ内の再標本化点を生成する。

4 形状モデリング

4.1 双3次 Bézier 曲面

Bézier 曲面は、制御点と呼ばれる位置ベクトルで自由曲面形状を定義する。 $n \times m$ 次の Bézier 曲面の曲面表現式は次のようになる。

$$P(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_i^n(u) B_j^m(v) Q_{ij} \quad (17)$$

ただし、 $0 \leq u, v \leq 1$ である。ここで、 Q_{ij} は Bézier 曲面の制御点を表す。制御点は u 方向に $n+1$ 個、 v 方向に $m+1$

個, 合計 $(n+1) \times (m+1)$ 個である。また, $B_i^n(u)$ と $B_j^m(v)$ は Bernstein 基底関数と呼ばれる関数で, 以下のように表される。

$$B_i^n(u) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i} \quad (18)$$

ここで,

$$\binom{n}{i} = \frac{n!}{(n-i)!i!}$$

は, 2 項係数である。

双 3 次の Bézier 曲面は, 図 7 に示すように 16 個の制御点 Q_{ij} ($i = 0, \dots, 3; j = 0, \dots, 3$) で表現される。

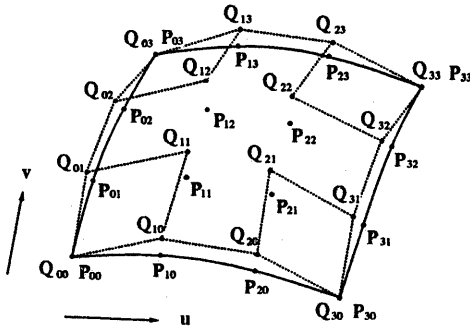


Fig. 7 Bicubic Bézier surface

4.2 曲面制御点の決定

前述のとおり, 双 3 次の Bézier 曲面の形状を決定するためには, u 方向に 4 個, v 方向に 4 個の制御点が必要である。本手法では, 3 のように得られた再標本化点を用いて, 曲面パッチの制御点を決定する。

式 (17) に示した Bézier の曲面式において制御点 Q_{00} , Q_{03} , Q_{30} , Q_{33} は, 曲面パッチの四隅の位置ベクトルと一致し, 与えられる格子状の再標本化点である。Bézier 曲面の境界線 $P(u, 0)$ 上の他の 2 個の制御点 Q_{10} , Q_{20} は, 点 Q_{00} , Q_{30} , P_{10} , P_{20} を式 (17) に代入して, 次式のように計算される。

$$Q_{10} = \frac{1}{18}(54P_{10} - 27P_{20} - 15P_{00} + 6P_{30}) \quad (19)$$

$$Q_{20} = \frac{1}{18}(54P_{20} - 27P_{10} - 15P_{30} + 6P_{00}) \quad (20)$$

同理, 残りの 6 個の境界線上の制御点は式 (17) により求められる。

曲面パッチ内の 4 個の制御点 Q_{11} , Q_{12} , Q_{21} , Q_{22} は曲面パッチ内の 4 個の再標本化点と境界線上の 12 個の制御点を用いて, 式 (17) により次式で定められる。

$$Q_{11} = \frac{1}{36} \left(\begin{aligned} &324P_{11} - 162P_{21} - 162P_{12} + 81P_{22} \\ &- 25Q_{00} - 30Q_{01} + 10Q_{03} - 30Q_{10} \\ &+ 12Q_{13} + 10Q_{30} + 12Q_{31} - 4Q_{33} \end{aligned} \right) \quad (21)$$

$$Q_{12} = \frac{1}{36} \left(\begin{aligned} &324P_{12} - 162P_{22} - 162P_{11} + 81P_{21} \\ &+ 10Q_{00} - 30Q_{02} - 25Q_{03} + 12Q_{10} \\ &- 30Q_{13} - 4Q_{30} + 12Q_{32} + 10Q_{33} \end{aligned} \right) \quad (22)$$

$$Q_{21} = \frac{1}{36} \left(\begin{aligned} &324P_{21} - 162P_{11} - 162P_{22} + 81P_{12} \\ &+ 10Q_{00} + 12Q_{01} - 4Q_{03} - 30Q_{20} \\ &+ 12Q_{23} - 25Q_{30} - 30Q_{31} + 10Q_{33} \end{aligned} \right) \quad (23)$$

$$Q_{22} = \frac{1}{36} \left(\begin{aligned} &324P_{22} - 162P_{12} - 162P_{21} + 81P_{11} \\ &- 4Q_{00} + 12Q_{02} + 10Q_{03} + 12Q_{20} \\ &- 30Q_{23} + 10Q_{30} - 30Q_{32} - 25Q_{33} \end{aligned} \right) \quad (24)$$

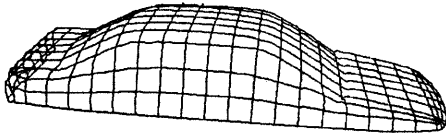
5 実験

5.1 実験結果

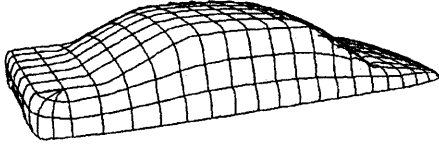
提案する手法により, 3 次元形状モデルの計測点群データを用いて, 再標本化する実験を行なう。得られた実験結果により, 提案する方法の有効性を検証した。



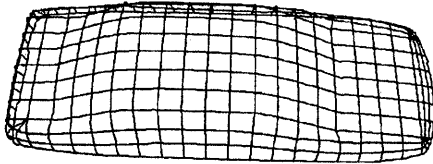
Fig. 9 The measurement data of a car model



(a)



(b)



(c)

Fig. 10 The resampling result of the car model

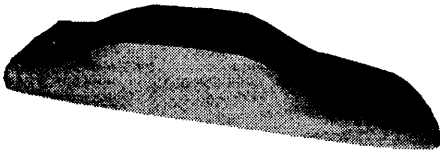


Fig. 11 The shading of car model

図9では、大きさは実物の1/4である一つの車モデルにおける3次元計測点群データを示している。モデルの大き

さは110.1×42.6×29.4(単位: cm)で、計測された点群データの数は70421個点がある。再標本化の結果を図10に示す。図10(a), (b), (c)は再標本化点により、再構成された車の形状を三つの方向からみたメッシュ図である。その再標本化点はメッシュの交差点で示されている。この車のモデルに対して、分割された曲面パッチの数は32個で、一つの曲面パッチは4×4個の再標本化点がある。すなわち、図10に示す車モデルはそれぞれ512個の再標本化点で構成されたものである。図11は、車モデル形状に対するシェーディング表示の結果である。

5.2 誤差評価

提案手法により、再標本化した3次元形状モデルを用いて、誤差の客観評価を行なう。評価基準としてRMSE(Root Mean Square Error)を用いる。ここで、 k 番目の曲面パッチにおける誤差平方の平均値は次式で表される。

$$R_k^2 = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \|P_{k,i,j}(x_h, y_h) - D_h\|^2 \quad (25)$$

ここで、 D_h は

$$x_i < x_h < x_{i+1}, y_j < y_h < y_{j+1}$$

となる形状モデル表面上の1個の3次元計測点群データを表す。補間点 $P_{k,i,j}$ は再標本化点によって、3次Bézier自由曲面式で求められた点である。 $x_i, x_{i+1}, y_j, y_{j+1}$ は、再標本化点を曲面パッチの法線ベクトル方向に座標変換した値で、 x_h, y_h は計測点群データを曲面パッチの法線ベクトル方向に座標変換した値である。式(25)で表される R_k を全体の曲面パッチについて加算すれば、形状モデルの表面全体のRMSEを求めることができる。

$$R = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N R_k^2} \quad (26)$$

車モデルのRMSE誤差評価の結果を図12に示す。曲面パッチ内の再標本化点の数を変わらず、4×4そのままにして、曲面パッチの数を横軸に示すように変わる。その結果、曲面パッチの数が多くしていくと、再構成されたモデルの3次元自由曲面の誤差は小さくすることが明らかになる。

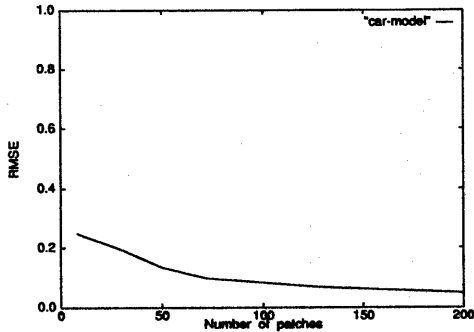


Fig. 12 The RMSE evaluation of the resampling result

6 結論

キューブ分割による3次元形状モデル計測点群データの再標本化する手法を提案し、計測点群データを再標本化した実験結果により、提案手法の有効性を確かめた。提案手法により、計測された3次元離散点群データを自動的に再標本化することができるようになる。更に、レンジ画像から3次元形状モデルを自動生成できる。また形状モデルを詳細に自由曲面表現式で再現することにより、形状モデル上の任意の位置の幾何学的情報の抽出、3次元コンピュータグラフィックスにおける形状モデリングなど操作が実現することができる。

提案するアルゴリズムの汎用性を高めることは可能だが、ここで、3次元形状モデルを各キューブに分割する際に、2.2節で設けた仮定を満足しなければならない。複雑な形状モデルの場合、その仮定を満たすために、形状モデルを分割するキューブの数が増えることは必要である。また、各キューブを生成するのは座標系のX, Y, Z軸に沿ってクロスセクションを行なうため、3次元形状モデルの主軸を座標軸に変換すれば、その仮定を最大限度に満足できる。現在、我々は座標変換のため形状モデルの主軸の確定における研究を進めている。

参考文献

- [1] Yamamoto, H., Tamune, M., Tamura, H.: "Range Finding and Range Data Processing : A Survey", PRU86-129, pp. 49-59, (1986)
- [2] 荒木, 田中, 藤野, 佐藤: "高速3次元形状計測装置の試作", 信学論, vol.J71-D, no. 10, pp. 2059-2068, (1988)
- [3] Takasaki, H.: "Moire topography," *Appl. Opt.*, vol. 9, no. 6, pp. 1467-1472, (1970)
- [4] Jarvis, R. A.: "A laser time-of-flight range scanner for robot vision," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-5, no. 5, pp. 505-512, (1983)
- [5] 塩谷: "3次元CAD/CAMにおける形状処理技術," 日刊工業新聞社, (Jan. 1989)
- [6] 鄭, 原島: "不変特徴に基づく三次元曲面の表現" 信学技報, IE93-123, pp. 31-38. (1994)
- [7] 西野, 秋山, 小林: "光切断法による3次元立体形状計測と形状再構成," 信学論, vol.J72-D-II, no. 11, pp. 1778-1787, (1989)
- [8] 天野, 坂口, 美濃, 池田: "3D model generation from a range image by regularization," 信学技報, PRU92-58, pp. 1-8. (1992)
- [9] 長島, 鈴木, 永野: "生体計測用自由形状処理システム", グラフィクスとCAD 38-3, (May 1989)
- [10] 鳥谷, 千代: "3次元CADの基礎と応用", 共立出版株式会社, (Feb. 1991)