測定ノイズを許容した点群面張り

Surface Reconstruction from Noisy Point Cloud Data

土　江　庄　一

要　約　近年のデジタル計測技術の急速な進歩と，パーソナル・コンピュータの高性能化に伴い，実物を高密度の 3 次元データとして測定し，それを元に CAD モデル（曲面）を再現する技術が注目されている．

測定データには多くのノイズが含まれており，通常の薄板ばねモデルによるエネルギー最小化法では，作成する曲面の品質を保証することは困難である．

本稿では，ノイズを許容した点群から滑らかな曲面を作成する技術と実例を紹介し，今後の展望を述べる．

Abstract　Today 's progress in 3 D digitizer and personal computer enables us to treat the huge amount of point cloud measured for a complicated model, and its reconstruction techniques into free-form surface have been discussed by many people. In this area, the method of least squares fitting is widely known, but it fails for noisy data.

This paper focuses on the problem about noise, and shows some results and future works.

1.　は　じ　め　に

近年のデジタル計測技術の急速な進歩と，パーソナル・コンピュータの高性能化に伴い，実物を高密度の 3 次元データとして測定し，それを元に CAD モデルを再現する技術が注目されている．高精度の測定器を利用すれば，表面の素材の凹凸まで表現することも可能である．このような状況の中，測定データから，素早く，高品質の CAD データを作成したいというニーズが高まり，それを支援するシステムの必要性が急速に増えてきた．

測定器の精度向上についは目をみはるものがあるが，その一方で，実際の使用環境/測定物の形状/測定者の技術によっては，測定データに多くのノイズが混入しまうことも多い．また，CAD データを作成する市販ソフトは，測定データから STL と称される 3 角形ポリゴンの近似データを作成し，全体を小さな部分領域に分けて CAD モデルを作成するものが多い．STL 変換時に測定データ中のノイズは適度にフィルタリングされる．しかし，STL は測定データの近似データであるため，元データの大事な情報が欠落してしまう可能性もある．

本稿では，ノイズを許容した測定データから，領域分割せずに，滑らかな自由曲面でモデルを再現する技術に主眼を置き，開発した点群面張りシステムの工夫や課題などについて実例を交えて説明する．

2.　問題の定義と課題

実物を 3 次元測定器（ここでは一度に大量の座標値を採取できる非接触型を想定している）によってデジタル化し，得られる 3 次元の点集合（以下，測定点群あるいは単に点群と記）から，どうすれば実物に忠実な自由曲面（以下，単に曲面と略）を作成できるかという問題を考

えたいのだが，測定点群には必ずノイズが存在するため，点群に忠実な曲面を作成することが，必ずしも実物を正確に表現することにはならない．

また，システム開発者は，実物（図 1）を見ることができるのは稀で，多くの場合は，測定点群（図 2）だけから，実物に忠実な曲面（図 3）を作成/評価することが求められる．

従って，本稿では，ノイズを許容した測定点群から実物に忠実な曲面を作成するためにはどうしたらよいかを考える．

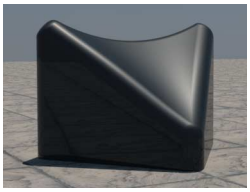

図 1　実　物

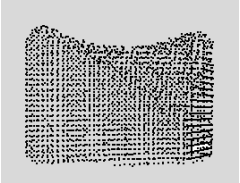

図 2　測定点群

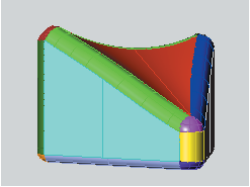

図 3　CAD 曲面

2.1　測定データ

1/1 クレイモデルと呼ばれる粘土で作られた車両の測定風景を図 4 に示す．本モデルはデザインの最終確認を行なうために，実際に製造する車両と同スケールで作成される[1]．場合によっては，表面にフィルムを張って，外観をより本物に似せることもある．

図 4 の測定で得られた点群の中から，比較的平坦な形状からなる後部ウィンドウ中央（図 5）の拡大図（図 6）を見ると，ノイズが多く含まれていることが分かる．

図 4　測定風景

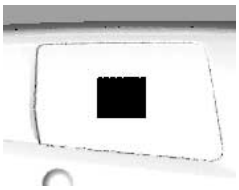

図 5　後部ウィンドウ

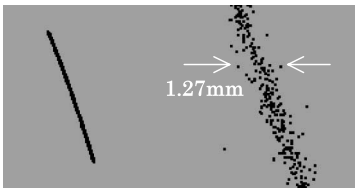

図 6　測定図およびその拡大図

ノイズの原因については色々と考えられるが，主なものとして以下のことが考えられる；

1)　測定器のノイズ

　精度上の限界，位置およびデータ重ね合せのズレ（一方向からでは全体を測定できない場合，測定器/被写体の位置を移動して複数ショット測定し，後にデータをマージする），形状の複雑さ（凹部は複雑な光反射のため測定自体が困難）

2)　被写体（＝実物）上のノイズ

　ハレーション防止剤などの塗料ムラ，素材の凹凸，マーカ取付け/破損/欠落部による凹凸

3)　人的ミス

このように 3 次元測定器の一般的な使用状況において，カタログスペック値のような精度で実物を測定できるケースは稀で，出力される点群にはノイズがあることを前提にして処理する必要がある．

2.2　特徴線による部分面創成

点群から曲面を作成する一般的な手順を以下に示す．

1）　点群から近似ポリゴン（STL）を作成し

2）　特徴線の抽出により対象領域を分割し，あるいは，対象領域を分割して特徴線を作成し（図 7, 8）

3）　特徴線をフェアリングされた自由曲線に変換し

4）　得られた曲線を作成する曲面の境界線に利用して，隣合う曲面との接続を考慮しながら領域毎に曲面を作成する

領域分割は幾何学的な特徴を考慮して行なうため，通常，同一領域内で曲率が極端に変化する部分はない．この特徴を，曲面を作成する拘束条件にすることで，ノイズの影響を抑えることができる．ルーフやウィンドウ部などは，その代表的な例である．

ここでの課題は対象領域の抽出方法である．点群や STL などの離散データからフィレット/コーナ部の R 始まり位置を検出するためには，ある程度の推定が必要になる．

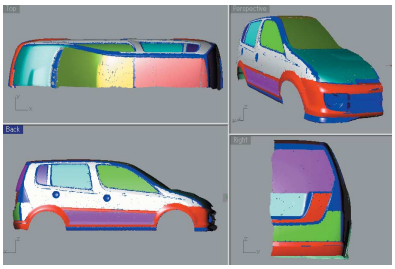

図 7　STL の領域分割

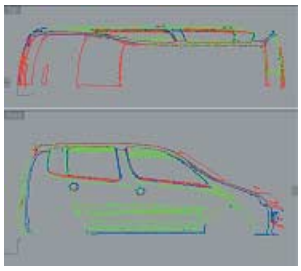

図 8　STL の特徴線抽出

2.3　基準面創成

点群から点列を抽出し（点群ではなく，別途，点列を測定することも多い），スライドライン/ガイドラインと称す基準線を作成して，曲率線のきれいな曲面（基準面と称す）を作成する．車両の外形において，詳細な作り込みが必要な部分を除くと，基準面は 20 個程度である．デザイナは思い通りのハイライト線や相貫線が表現されているかを厳しくチェックしながら基準面を作成する．

R 部は，基準面の相貫部にフィレットをかけて表現することで，後の形状変更への対応が容易になる．変更に伴って，基準面自体が変更されるケースは少ない．基準面の変更は，既に確定したデザインそもそもの変更を意味するからである．こうした点から，基準面の作成は大変重要な作業になる．作成手順そのものについては，既に確立されており，広く行なわれている．

点列データにも点群同様のノイズが含まれているが，画面上に断面線（図 9）の曲率線を表示（図 10）しながら，デザイナの理想とする基準線（図 11）を作成するという操作の中で，ノイズの影響は排除される．

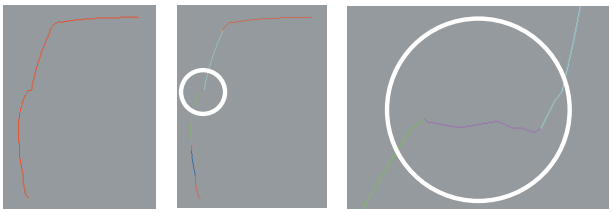

図 9　点群から断面線（ポリライン）抽出

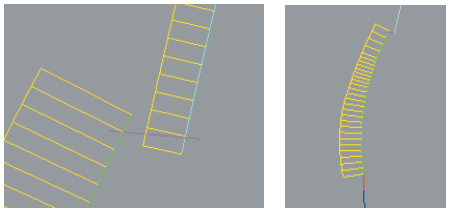

図 10　断面線の曲線化/延長/フェアリング

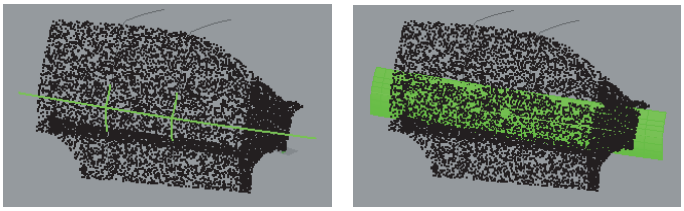

図 11　基準線（ガイドライン/スライドライン）からの基準面作成

2.4　薄板ばねモデルによるエネルギー最小化法

点群から曲面を作成するための要素技術として，薄板ばねモデルによるエネルギー最小化法が広く知られている[2]．取り扱う曲面を高次 B-Spline 曲面 S として，次式で定義する．

$$S(u,v)=\sum\sum N_{ip}(u)N_{jq}(v)P_{ij}$$

P_{ij} は制御点，p，q は UV 方向の次数，m，n は制御点数，$N_{ip}(u)$，$N_{jq}(v)$ は B-Spline 基底関数である．

R を実数体として，入力される点群を $Q=\{Q_s\in R\times R\times R \mid s=1, 2,\cdots,N\}$とし，制御点 $P=\{P_{ij}\in R\times R\times R \mid i=1, 2,\cdots,m, j=1, 2,\cdots,n\}$を未知数として，以下の諸量を定義する．

$$E1(P)=\sum \mid S(x_s,y_s)-Q_s \mid^2$$

$$E2(P)=\iint \{\mid S_{uu}\mid^2+2\mid S_{uv}\mid^2+\mid S_{vv}\mid^2\}dudv$$

E 1(P)，E 2(P) は，それぞれ入力点群と曲面の 2 乗誤差（＝ばねエネルギー），曲面平滑化の指標である．

求めるべき未知数 P は，次式で定式化される；

$$\min\{\beta_1 E1(P)+\beta_2 E2(P)\} \qquad (式 1)$$

上式は，P に関する微分を 0 と置くことで，よく知られた線形連立一次方程式を解く問題に還元される．以下，$\beta_1=1$ とする．

この手法により生成される曲面は，最小 2 乗法の意味で，概ね点群の中間を通るが，E 1(P) により点群のノイズの影響を大きく受けるため，対応策を講じる必要がある．

2.5 課　　題

2.4 節の手法は，部分領域に対して適用されることが多い．2.2 節で述べたように，部分領域は小さくするほど，作成すべき曲面の形状（曲率）変化は小さくなるので，少ない制御点で曲面を表現すれば，これが拘束条件となってノイズの影響を軽減できる．ウィンドウ部は通常，曲率単調な曲面で表現されることが多く，表現すべき形状に必要とされる自由度もそれほど必要ないので，点群のノイズが多少存在しても，ほぼ中間を通過する曲率単調な曲面を作成することができる（図 12）．

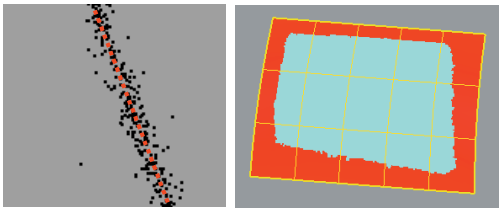

図 12　後部ウィンドウの面創成

しかし，より大きな領域に対して，例えば 1 車型全体を単一曲面で表現しようとすると，様々な問題が生ずる．

1）　そもそも実現可能か
2）　可能だとした場合その精度
3）　特に，ピン角/立て壁/コーナ部の精度
4）　形状（曲率）の傾向が極端に異なる部分の混在への対応

以下，薄板ばねモデルによるエネルギー最小化法を用いて，上記課題を克服すべく，入力点群から単一曲面で形状を表現する技術/適用結果を紹介し今後の課題を述べるが，その前に単一曲面処理について一言触れる．

既述の通り，複雑な形状を表現するためには，分割統治法の概念に倣い，大きな問題は部分問題に分けて考えるのが常識であるが，そもそもプレス成形品は平板一枚から作られるのだから，そのようなデータについては，単一曲面でも十分表現しうると考え，単一曲面による面創成処理に着目し，更なる精度向上を目指している．課題も多い反面，期待される効果も大きい．以下，記号（＋/－）は，現状のシステムにおける長所/短所を示す．

1）　品質について
　（＋）単一曲面処理技術により，面内のパッチ間の連続性が保証される．
　（－）現状，面内の至る所で微分可能性を保証しているため，正確なピン角を表現できない（図 13）．

図 13　ピン角の取扱い

2)　作業時間について

(＋) 単一曲面処理により，最適な領域分割の作業が不要になる．つまり，面張り作業の自動化が可能となる．現状のシステムでも，デフォルト設定のまま，曲面を作成できるケースも多い．

(＋) 自動化できれば，人手による品質のムラが無くなる．通常，曲面を作成するという作業は，オペレータの技量に応じて，作業時間および品質が異なる．

(＋) 頻繁に設計変更が生じる部品については，費用対効果が望める．ドア内側の内装部品などは，デフォルト設定のままで，精度の高い面が作成できる(図 23，図 24)．

(－) 基準面によって作成されたCADモデルと比べると，部分的な修正/変更が難しい．

3.　工夫やアイデア

3.1　曲　面　式

今回，(式 1) に曲率平滑化の指標 E 3(P) を追加した．

$$E3(P)=\iint \{|S_{uuu}|^2+3|S_{uuv}|^2+3|S_{uvv}|^2+|S_{vvv}|^2\}dudv$$

ノイズを多く含む点群に対して，E 2(P)による平滑化では全体がぼやけ，必要な特徴もなくなってしまうので，E 3(P)により必要な特徴は残しながらノイズの影響を排除することを考えた．

従って，求める式を (式 2) のように改良した；

$$\min\{E1(P)+\beta_2 E2(P)+\beta_3 E3(P)\} \qquad (式 2)$$

3.2　*UV* パラメトリゼーション

E 1(P)を計算するには，点群 Q の各点 Q_s ($s=1, 2, \cdots, N$) に対応する曲面 S 上のパラメタ値 u_s を計算する必要がある．つまり，$f:(Q, R\times R\times R)\rightarrow(u, R\times R)$ なる全単射写像が必要となる．(ここで $u=\{u_s\in R\times R \mid s=1, 2, \cdots, N\}$とし，曲面 S の周期的境界条件は考えない．) これを UV パラメトリゼーションと称す．通常，f として投影や最近点を使うことが多いが，図 14 のようなケースでは，多価問題になって所望の u が得られないので，適切なビュ方向を決定し，比較的低パッチ数の初期面へのパラメトリゼーションを行なって問題を回避した (図 15)．適切に行なわれた後は，後述する方法 (3.5) で逐次パラメタ値を更新する．

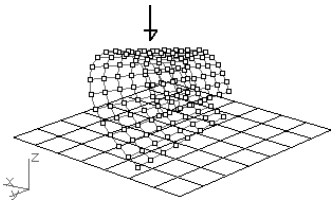

図 14　UV パラメトリゼーション

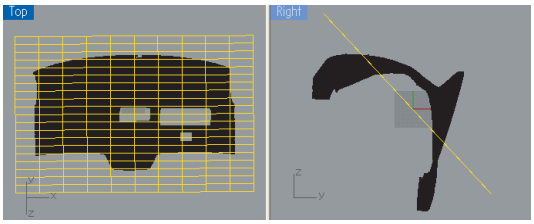

図 15　自動車内装部品 (正面図：左，側面図：右)

また，より複雑な形状に対応するために，ユーザ定義可能な初期面 S_B を利用して，各 Q_s から S_B への最近点を u_s に設定できるようにした．点群形状に近い S_B を用意することで，パラメトリゼーションが容易になる．本システムでは，制御点のドラッグ操作で，S_B モデリング

が簡単に行なえる（図 16）.

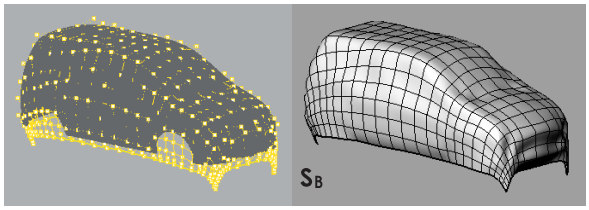

図 16　ユーザ定義の初期面 S_B（左：制御点表示，右：制御点非表示）

3.3　パッチ分割による曲面フィッティング

単純な部分と複雑な部分が混在した形状を単一曲面で表現するためには，データ量的な意味からも，複雑な形状部ほどパッチサイズを小さくする必要がある．自動面張りを実現するために，この機能を次節で説明する収束判定基準を使って，自動的に行なうようにした．

また，初期段階で十分な収束解が得られない場合，分割するパッチは極力誤差の大きなパッチから優先的に行なう工夫も施した（図 17）.

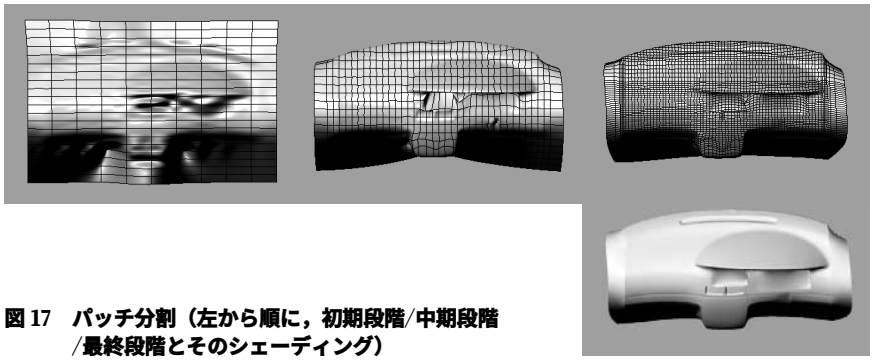

図 17　パッチ分割（左から順に，初期段階/中期段階/最終段階とそのシェーディング）

3.4　収　束　判　定

曲面のパッチ毎に点群との誤差 ERR_{ij}（$i \in [1,$（U 方向パッチ数）$]$，$j \in [1,$（V 方向パッチ数）$]$）を計算し，ユーザ指定のトレランス（TOL）を満たしていないパッチについては分割して，再度収束計算を行なう．これを各パッチがトレランスを満たすまで繰返す．

すなわち，

$$\forall ERR_{ij} \leqq TOL$$

が満たされるまで，収束計算を行なうが，途中，

$$\exists i^*,\ \exists j^* \text{s.t. } ERR_{i*,j*} > TOL$$

となる場合には，当該パッチ（i^*，j^*）を分割する．

TOL の判定条件は二つのオプションを用意した．一つは，点群に全くノイズがないことを想定したもので，パッチ（i, j）の誤差を

$$ERR_{ij} = \max\{dis(S(u_{\Lambda ij}),\ Q_{\Lambda ij})\}$$

Λ_{ij} はパッチ（i, j）に含まれる点群のインデックス集合

と定義した．

もう一つは，点群にノイズがあることを想定したもので，集合の要素数を Card（・）として

$$\exists K \subset \Lambda_{ij} \text{ s.t. } \{ \mid \mathrm{dis}(S(u_\kappa), Q_\kappa) \mid \leqq \mathrm{TOL}, \kappa \in K,\ \mathrm{Card}(K)/\mathrm{Card}(\Lambda_{ij}) > 0.95 \}$$

なら，パッチ（i, j）は分割しない．それ以外については，集合 $\{ \mid \mathrm{dis}(S(u_{\Lambda ij}), Q_{\Lambda ij}) \mid \}$ についての平均値 E，標準偏差 V を用いて，パッチ(i, j)の誤差を

$$ERR_{ij} = E + V^{1/2}$$

とした．

図 18 は，入力点群（上段左端）との誤差が大きいパッチが分割されて，曲面が作成されていく様子を示す．

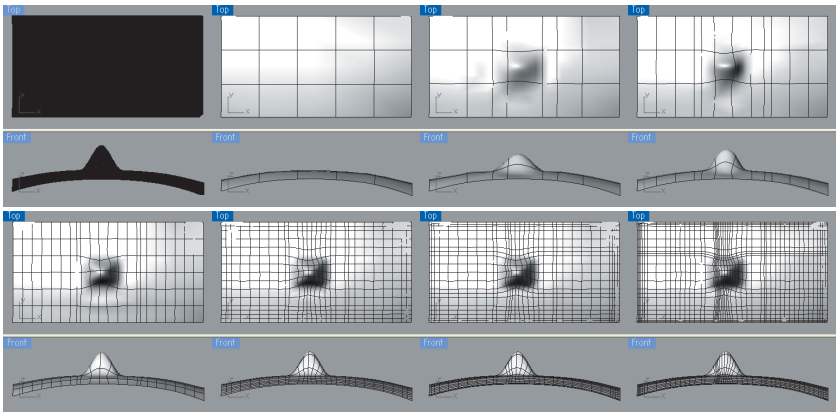

図 18　パッチ分割を繰返して曲面が点群に近づく様子

3.5　点群の対応する面上 *UV* パラメタの逐次更新

点群 Q に曲面 S を近づけるためには，Q_s（s＝1, 2, ･･･, N）に対して S 上のパラメタ値を対応付ける必要があることは 3.2 で述べたが，パッチ分割による収束計算中に曲面 S の変化に合わせて，対応するパラメタ値も逐次更新する（図 19）[3]．

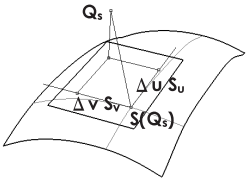

図 19　UV パラメタの更新

3.6　重み関数 β_2, β_3 の決定方法

作成する曲面 S のパッチ毎に，点群の充填率 ρ（＝$\rho_{ij}(Q_{\Lambda ij})$）を考慮して，次のようにした；

$$\beta_2 = c_1 * (1/\rho)$$

$$\beta_3 = c_2 * \rho$$

点群が十分存在するパッチ領域では β_3 を大きくし，曲率平滑化によってノイズによる曲面の凸凹を抑制する．逆に，点群があまり存在しない，あるいは全く存在しないパッチ領域では

β_2 を大きくし，曲面平滑化（＝スムージング）によって曲面の予期せぬ急激な変化を抑制している．

4. 結　　果

同じデータを利用しても曲面の作成方法は複数存在し（2.2 節，2.3 節，他），紙面の都合上，全てを紹介することはできないので，本稿では，3 種類の点群データに対して，単一曲面による自動面張り結果の 1 例を紹介する．データの詳細を表 1 に示す．

表 1　入力点群と作成する曲面の次数

	L×W×H［単位：mm］	点数	測定器メーカ	作成する曲面
データ1	440×300×50	24万点	A社	7次B-Spline
データ2	865×674×110	49万点	B社	5次B-Spline
データ3	3700×1600×1500	300万点	C社	5次B-Spline

4.1　形状復元の精度

表 1 のデータ 1 において，入力点群と本システムで作成した曲面との距離マップを図 20 に示す．青色は点群と曲面との距離が±0.1㎜以内であることを示し，入力点群の 94.7% にあたる 23 万点がそれに該当している．

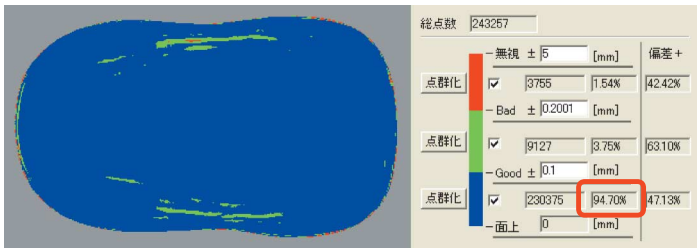

図 20　データ 1 の誤差マップ

ゼブラマップによる面質評価も，滑らかな縞模様を示しており（図 21），良好な面の必要条件を満たしている．点群が上下対称でないため，作成した曲面のゼブラマップは対称にならない．図 22 にシェーディング結果を示す．

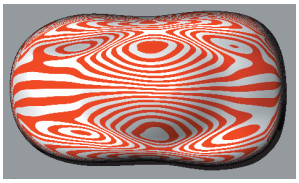

図 21　ゼブラマップ

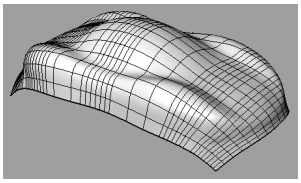

図 22　アイソカーブ表示したシェーディング結果

表 1 のデータ 2 においても，誤差レベルは表 1 のデータ 1 と同様，入力点群 49 万点に対して，±0.1㎜以内が 95% という結果（図 23）で，シェーディング結果（図 24）も良好である．

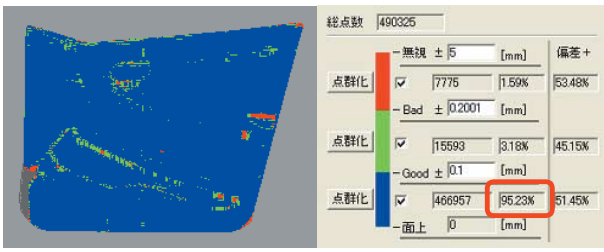

図 23　データ 2 の誤差マップ

図 24　シェーディング結果

表 1 のデータ 3 は，今回のデータの中で最もノイズが多く，単一曲面で作成するにはかなり複雑なものである．図 25 は，これまでのデータと同様，単一曲面の自動面張りで作成した結果であり，十分利用価値があるとの評価を得た．また後述する今後の課題もはっきり示せた点も良かったと判断している．

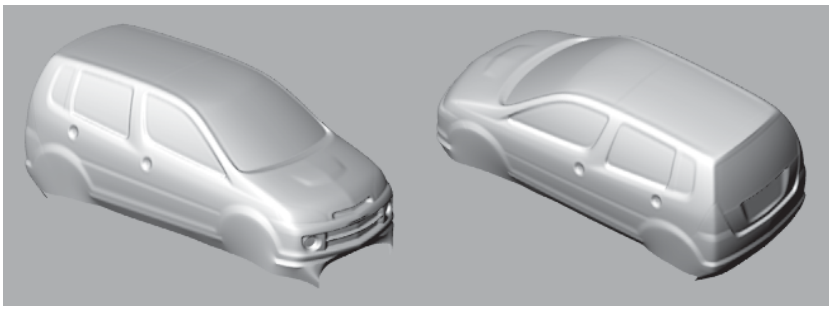

図 25　シェーディング結果

図 26 の誤差マップは，作成した曲面と点群との距離が，±0.2㎜以上なら赤，±0.2㎜以下なら青で表示されている．

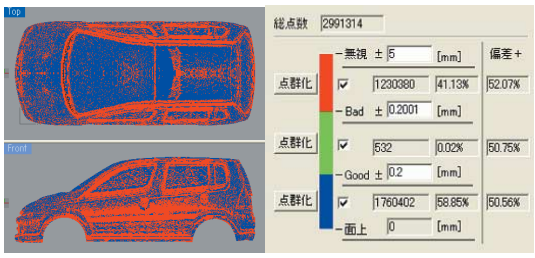

図 26　データ 3 の誤差マップ

図 27 は図 26 の部分拡大図であるが，パッチ内（黄色い矩形内）に，赤/青ほぼ均等分布している．また，大小の点は，面の法線方向/逆方向に点群が位置することを示すが，赤/青ほぼ均等に分布している．つまり該当パッチは，最小 2 乗法の意味で点群のほぼ中間を通っていることを意味し，赤点はノイズと考えられる．

図 28 は図 26 のサイド特徴部の拡大図である．図 27 と違って分布が偏っており，作成した曲面にヘタリが生じていることが分かる．

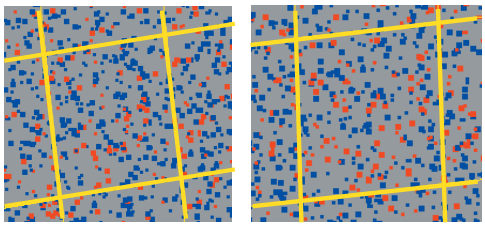

図 27　点群と曲面の誤差（後部ウィンドウ中央部：左サイド特徴部の上部：右）

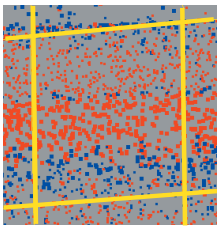

図 28　サイド特徴部の誤差

3.6 節に述べた方法により点群ノイズの影響を抑えることで，ゼブラマップは改善され綺麗な縞模様になった（図 29，図 30）．

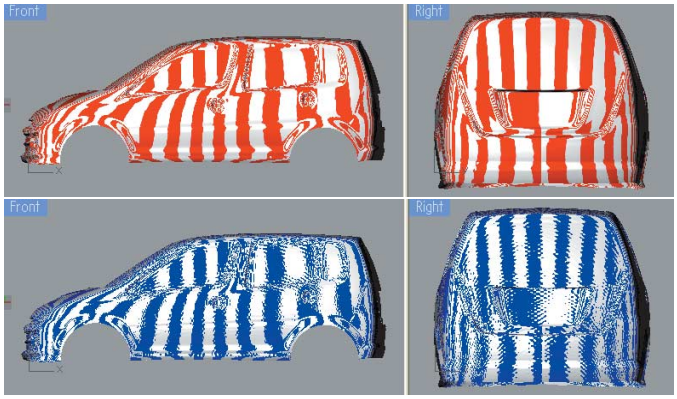

図 29　縦縞のゼブラマップ（β_3 あり：上段，β_3 なし：下段）

図 30　縦縞のゼブラマップ（β_3 あり）

図 31 は，単一曲面から窓部を抜き出して，レンダリングした結果である．

図 31　レンダリング結果（窓のレンダリングのため，当該部分を単一曲面から分離）

4.2　処　理　速　度

各データに対して，自動面張り計算に要した CPU 処理時間を表 2 に示す．OS は Windows XP Sp 2 を使用し，アプリケーションの LAA（＝LargeAddressAware）機能を使うため，OS 起動時にオプション（/3 GB）を追加した．使用マシンは CPU の異なる 2 種類を用意し，実メモリは共に 3 Gbyte 搭載した．

表 2　CPU 処理時間と出力情報

	処理時間[sec]		メモリ使用量のMAX値[MB]	備考	
	Intel	AMD		パッチ数	IGES出力[MB]
データ1	52	54	142	43×15	1
データ2	231	341	477	64×98	2.3
データ3	2271	1453	2021	196×90	6.7

Intel：Xeon **3.6GHz**, L2=2MB, mem=DDR2/400MHz

AMD：Athlon64 +3500(Socket939), **2.2GHz**, L2=512KB, mem=DDR/400MHz

大量のメモリを消費するデータ 3 について，Intel よりも AMD の方が短時間で処理されているのは，メモリ使用量が少ない場合は Intel の方が短時間で処理されていることを考慮すると，システムバスのアーキテクチャの性能による違いに起因していると思われる．

4.3　参　考　例

単一曲面でモデルが作成されていると，そもそも隣接する面がないために，FEM/CFD 用のメッシュの作成が容易である．本システムは，曲面からメッシュを作成する機能を有しており，図 32 と図 33 に例を示す．（出力オプションで，作成するメッシュのサイズを調整できる．）良質の 4 角形メッシュはシェルモデルにおける FEM 解析では特にニーズが高く，本システムでは，汎用の解析ソルバーのメッシュ出力を備えている．

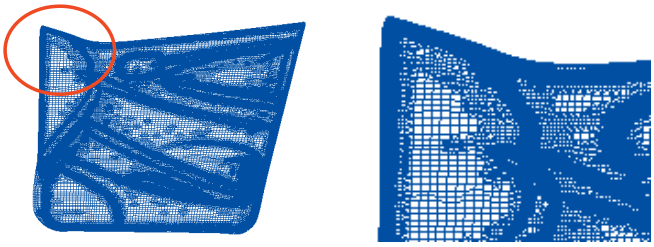

図 32　データ 2 の単一曲面のメッシュ分割例（計算時間 25 秒，39 万ポリゴン）

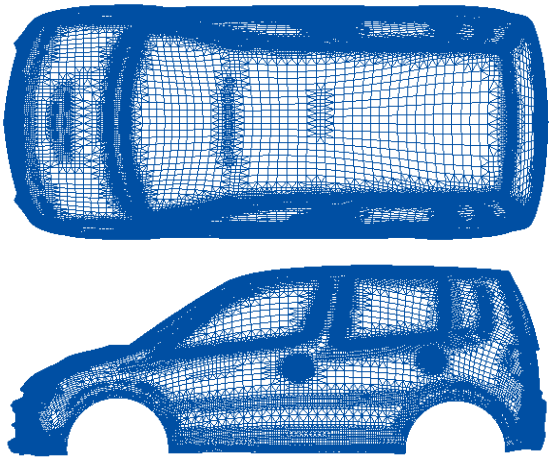

図 33　データ 3 の単一曲面のメッシュ分割例
（計算時間 45 秒，52 万ポリゴン）

5.　今後と残された課題

5.1　特徴部のヘタリ

3.6 節の重み関数 β_2 および β_3 の制御により，ノイズを多く含む点群からでも滑らかな曲面を作成するための技術的な可能性を見出した．β_2 による平滑化では，ノイズのレベルに応じて，強くすればするほど，形状全体を平坦化してしまい，図 25 のような結果は得られない．

しかし，当然 β_3 だけでは，ノイズを許容しながら特徴部/コーナ部の精度を保証することは難しく，図 28 は今後の課題を明確に示している．

現在，重み関数 β に点群の充填率だけでなく，形状変化に起因する要素を組込んで，ヘタリの改善を行なっている；

$$\beta = F(\rho) \Rightarrow \beta = G(\rho, S_u, S_v)$$

また，ヘタリがある程度推定される部分に対しては，ハードポイントを利用したヘタリの抑制機能を評価中であるが，その他，様々な側面から改善を行ない，単一曲面による面張りの精度を向上させていきたい．

5.2　輪 郭 処 理

点群の端は，対象外の測定物などの影響もあって，データが荒れていることが多い．システムとしては，点群端に対応するパッチにはスムージングを強くして曲面を滑らかにする機能を用意したが，これだけでは不十分なことを確認しているため，別途，点群の端を調整する機能を検討している．

5.3　相貫線の制御

2.3 節で述べた通り，曲面の作成の基本は基準面の作成にあるが，デザイナの意図する基準面が出来上がるまでには時間が掛かる．作業の反復を避けるため，基準面の交線で定義される相貫線を作成後（図 34），この相貫線を修正することで，元の基準面を自動的に修正されるよ

うな機能が望まれており，今後の検討課題である．

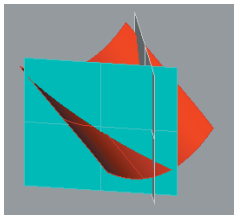

図 34　図 1 を相貫面でモデリングした例

5.4　鋳物への適用

測定条件にも依存するが，実物の表面状態が悪い鋳物の測定点群には，通常よりも多くのノイズが存在する（図 35）．

CAD モデリングは可能（図 36）だが，精度をある程度犠牲にしても，素早く自動で曲面を作成して欲しいという要求もあり，今後の検討課題としている．

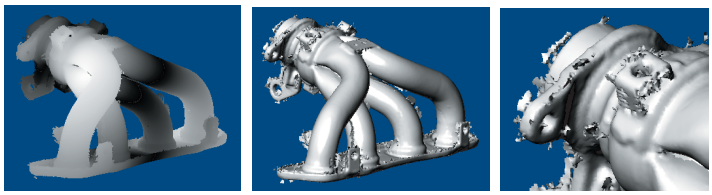

図 35　自動車エンジン部品（測定点群：左，STL 変換データ：中央，右）

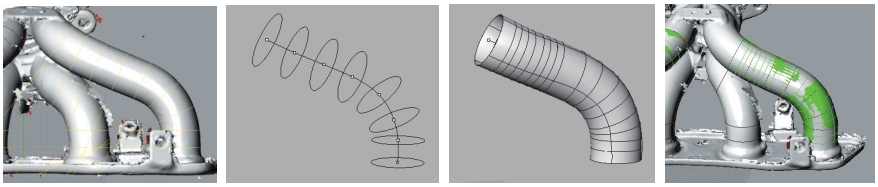

図 36　CAD モデリング例

6.　謝　　辞

本稿執筆にあたり，ダイハツ工業(株)様から，点群データおよび関連データの使用許可を頂いたこと，また同社デザイン部中倉清氏には，平素から多大なる御支援，御協力を頂き，合わせて謝意を表したい．

参考文献　［1］　山田泰里，「クレイモデリング/アイデアを立体化する技術」，CAR STYLING, vol.93 1/2，三栄書房，1997.

［2］　V.Weiss, L.Andor, G.Renner and T.Varady, Advanced surface fitting techniques, Computer Aided Geometric Design, vol.19, 2002, pp.19–42.

［3］　K.Hormann, Fitting Free Form Surfaces, www.in.tu-clausthal.de/hormann/papers/freeform.pdf, 2000.

執筆者紹介　土　江　庄　一（Shoichi Tsuchie）
2000年日本ユニシス(株)入社．CAD/CAM開発を経て，点群面張りシステム開発に従事．現在，日本ユニシス・ソリューション(株)へ出向中．