

点群面張り

Surface Creation from Dense Point Cloud

土 江 庄 一

要 約 自動車のスタイリングは、モデルが重要な位置付けにある。モデルはデザイナーやモデラの感性により微妙な曲面の変化を表現している。しかし、現状のCADシステムではその微妙な曲面変化のデータを作るのに苦労している。また、型レベルの高品質な曲面データを作るのは困難である。

最近の非接触3次元測定機の普及で、モデルの高密度測定点群データが簡単に得られるようになってきており、この測定点群データから曲面を創成する取組みが数多くなされている。その中で著者らは、この高密度測定点群データを忠実に利用することでモデルの微妙な曲面変化を表現でき、さらに、高品質な曲面データが得られると考え、独自の方法を検討してシステムを実装し評価してきた。

本稿では、これまでの成果、現状および課題への取組みについて報告する。

Abstract We are developing geometric modeling system using high dense point sets (measured by 3D digitizer) to reconstruct high quality freeform surfaces from clay model, chemical wood model and so on. In this paper, we present a procedure for reconstructing and some trials until today. As the result of these trials we believe that this system could be used for the styling process.

1. はじめに

自動車のスタイリングは、モデルが重要な位置付けにある。モデルはデザイナーやモデラの感性により微妙な曲面を表現している。しかし、現状のCADシステムではその曲面変化のあるデータを作り上げるため非常に時間がかかっている。また、型レベルの高品質な曲面データを作るのは困難である。

最近、非接触3次元測定機が普及し高密度測定点群データが簡単に得られるようになってきており、測定点群データから曲面データを創成する取組みがなされている。

高密度点群を忠実に利用することでモデルの微妙な曲面変化を表現し、市販CADシステムの機能を利用して作業効率を上げるため、プラグイン化することにした。

本稿では、これまでの成果、現状の適用レベルおよび課題への対応について報告する。

2. 曲面の創成

2.1 曲面（意匠面）の要件

高品質曲面の要件は次のようになる。

- 1) モデルに表現するデザイナーの意図が表現されること。
 - ① 曲面が滑らかなこと
 - ② 特徴形状が正確に復元されること。
- 2) 型加工用の曲面として使用できること。

2.2 目 標

高密度測定点群から、上記要件を満たす曲面創成システムを構築するにあたり、次のような目標を立てた。

1) 誤差評価最小

高密度点群はモデルから高品質な曲面を創成するための重要な要素と考えた。モデルに表現された微妙な面変化を反映した点群と、創成された曲面との間の誤差があると、デザイナーの意図が曲面データに表現されていないことになる。理想点群での実験と経験から、点群と創成された曲面との誤差が±0.05 mm で収まれば、創成された曲面の傾向が高密度点群の傾向とほぼ一致することを確認した。曲面の「へたりに」を少なくするため、さらに、+0.05 と -0.05 を選択できる改善を行った。

2) 面 質

曲面が滑らかであることがデザイナーの感覚にも対応している。滑らかさはハイライト線に乱れがないことであり、数学的に表現すると、曲面内のどの位置でも一階微分、二階微分可能で連続であることである。そこで曲面式を高次Bスプライン曲面とすることにより、広い領域で連続性を確保した。創成方法を検討することにあたり、この連続性を確保するため、基底面を組合せて作ることも加えた。

2.3 創 成 方 法

点群から曲面を創成する方法として、エネルギー最小化法を選択した。これは点群と曲面との間がバネで結ばれ、さらに曲面が曲げ剛性を持つ弾性板と仮定した物理モデルにおいて、バネエネルギーと曲げエネルギーの合計値が最小となる形状を最適解とする考え方である。具体的には関数値 E_{total} を曲面 $S(u, v)$ の制御点 P_{ij} で微分した式をゼロとおいた連立方程式を解く(図1) 一般に曲面は点群の中間位置におかれることになる。

Surface Reconstruction Algorithm

Minimize the total energy

$$E_{total} = \sum E_{dist} + \lambda \sum E_{fair}$$

Thin plate energy function $E_{fair} = \iint_{\Omega} \{ (Su)^2 + 2(Suv)^2 + (Sv)^2 \} dudv$

The distance function $E_{dist} = K \sum \{ Q - S(u,v) \}^2$

λ : the fairness weight (平滑化係数) $S(u,v)$: the position on B-Spline surface (曲面)
 K : the spring coefficient (バネ係数) Ω : the thin patch (矩形領域)
 Q : the measure point(測定点)

図1 面創成アルゴリズム

本方法を選択した理由は次の通りである。

1) 形状復元性が高い

点群データを全て計算に反映させるため、微細な形状を的確にとらえることが可能となり形状の復元性が高い。

2) 面品質

曲線群から曲面を創成する方法に比べて、曲線による拘束がないので、面品質の確保は困難と思われていた。これについては、後述するテンプレートを用いることにより、この問題を克服して品質を部分的に確保できた。この結果、曲線群から創成する方法に比べると微妙な形状をより正確に反映することができる。しかし車のセンターラインなど設計上重要な曲線は入力指示する必要がある、そのための改善を行った。

3) 安定性が高い

点群データから直接曲面を創成するため、中間処理でポリゴン化や曲線化する必要がない。曲線化した場合は曲線制御で、滑らかな曲線に修正ができる改善を行った。

4) ノイズ除去

本方法そのものが円滑化の処理を含むため、ノイズ除去の処理をする必要がない。

5) 高密度点群に対応

計算時間が点数に影響されないため、高密度点群が直接処理できる。

2.4 モデリング

従来のシステムでは、基準点列から曲線群を作成し、それらをガイドとして曲面を作成する方法が採られていた。高密度点群をベースに曲面を創成するという観点から、ブロック面創成とテンプレート当てはめ法による独自のモデリング手法を考えた。ブロック面創成は点群を複数のブロックに分割することにより、複雑な形状を単純な形状の組み合わせに置き換えて曲面を創成する方法で、大量の点群を効率よく処理することができる。

テンプレート当てはめ法は、プリミティブ形状（平面、円柱、球など）をテンプレートとして準備しておき（図2）、ブロック分けした点群に最適な形状を当てはめる方法である。システムはテンプレート（図3）を参照しながら点群上にBスプライン曲面を創成する。高密度点群に対して早く高品質な曲面を創成することができる利点がある。

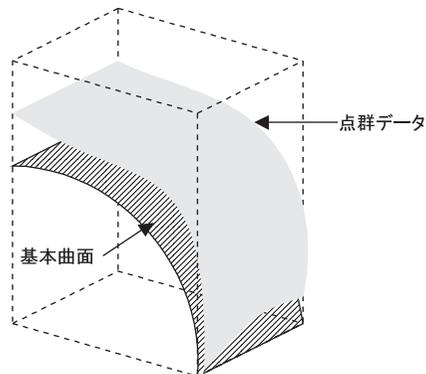


図2 円柱テンプレートの例

テンプレート	曲面
基本テンプレート	基本曲面 (平面・円柱面・球面・楕円面・円錐面・トーラス面・双曲面・楕円錐面・楕円放物面など)
可変テンプレート	自由曲面

図3 テンプレートの種類

2.5 システムの主要機能

高密度点群から高品質な曲面を創成するために、以下のような機能を備えた。

1) 分散処理

測定点群は、大量の点群量（数億点～数十億点）になる。これを複数にブロック分けして、小さな単位で独立して曲面を創成できるようにした。また、ネットワークに接続された複数のコンピュータが使用できる場合には、ブロック単位に面創成処理を分散させることにより、短時間に処理ができるようにした。台数に制限はない。

2) 面間接続

ブロックで分割した曲面間を滑らかに接続させる機能である。曲面の境界近傍に、測定点群とは別に曲面間接続のための点群を用意し、境界近傍の点群密度を高めて、曲面を滑らかに接続させる方法である。CAD 機能で接続もできる。

3) 曲率に基づいた曲面創成

点群形状に起伏がある場合、起伏の示す曲率で曲面を創成することにより、誤差および面質がよくなる。起伏を曲率の変化ととらえ、次の二つの機能に曲率データを利用した。

① パッチ間隔自動計算

点群の曲率変化から最適な面パッチ間隔を自動計算する。これにより、波打ちの少ない曲面の創成を可能とした。

② 特徴線沿い曲面創成

点群の曲率変化から特徴線を抽出し、その特徴線に沿った面パッチを創成する。特徴線は CAD 機能で制御可能である。これにより、特徴形状をより滑らかに復元することが可能になった。

3. 評価方法

筆者らは、システム実証のため、下記のような手順で評価を行った。

1) データの準備

① 解析面上の点群データ（点数：3万5千点）

円柱面上に発生させた点群を使用（図4）。

② 樹脂モデルの測定（点数：520万点）

樹脂モデルから測定機にて点群を測定（図5）。

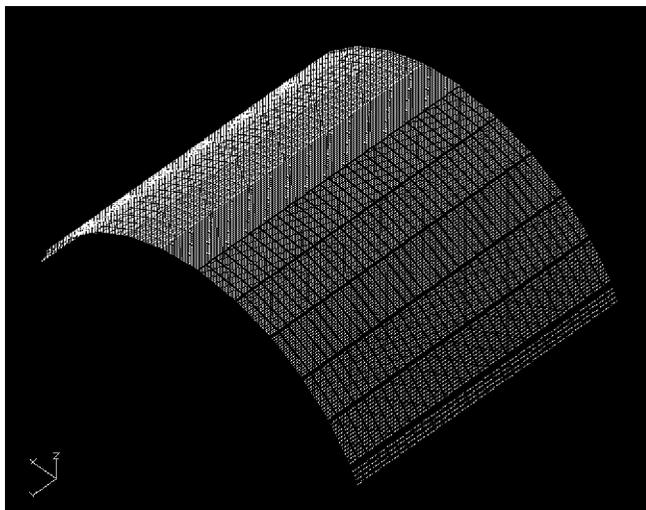


図4 解析面（円柱）上の点群

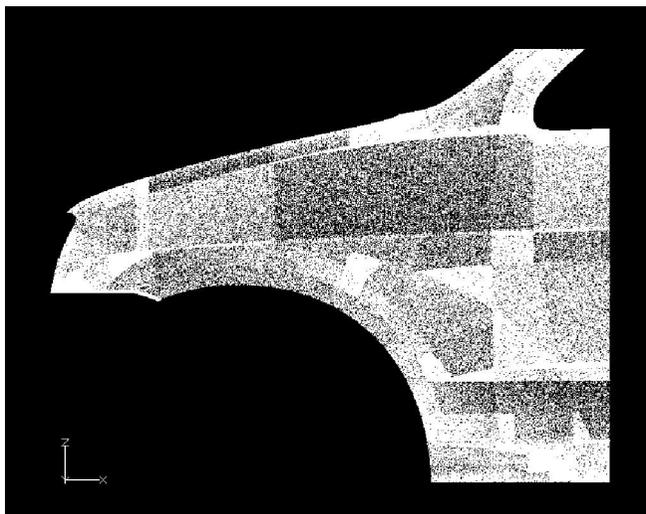


図5 樹脂モデルの測定点群

2) 点群曲面創成

本システムを用いて、点群のブロック化、テンプレート当てはめを行った後に曲面を創成。測定点群は間引かずに全てを使用した。また樹脂モデルに対しては、複数のコンピュータを用いて分散処理を行った。

3) 面質評価

創成した曲面を評価するために、次のような評価項目を実施した。

① 誤差評価

点群と創成された曲面との間の誤差の割合と分布を評価。誤差は ± 0.05 , $+0.05$, -0.05 で評価した。

② 面質評価

ハイライト評価 (ゼブラマッピング), シェーディング評価, 曲率グラフ評価

4. 結果

評価の結果, 下記の結果を得た.

4.1 誤差評価

点群と創成された曲面間の誤差が ± 0.05 mm 範囲内にある割合が, 全体に対して 95% 以上確保された. 残りは点群の疎密度部分 (図6) や特徴形状付近 (図7) に集中していることが分かった. なお特徴形状だけについて見ると, 誤差が ± 0.05 mm 範囲内にある領域はかなりある.

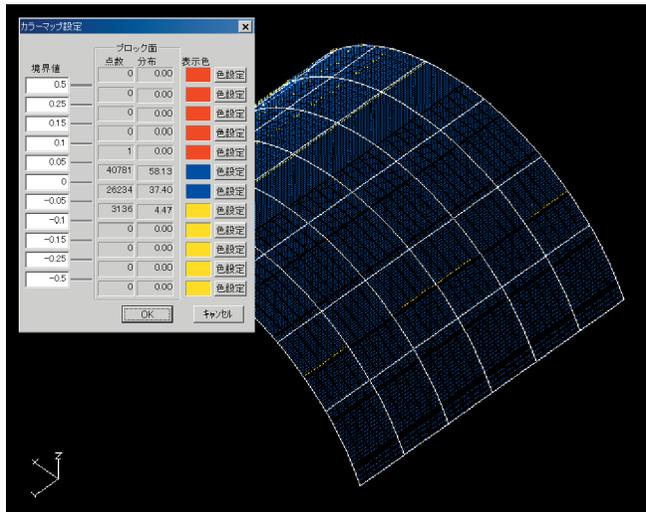


図6 解析面 (円柱) に対する誤差分布図

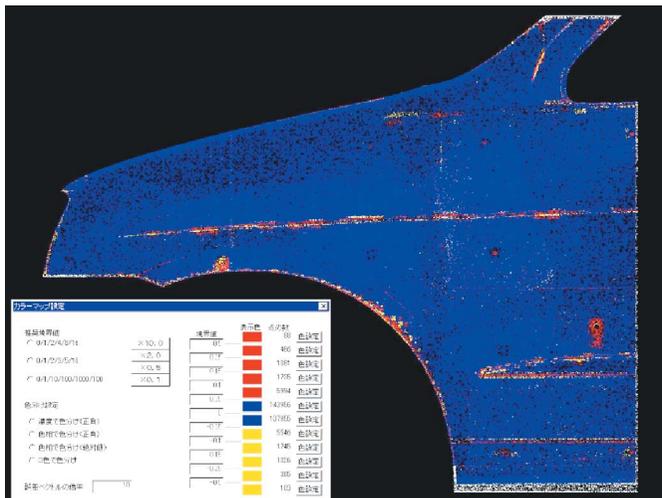


図7 樹脂モデルに対する誤差分布図

4.2 面質評価

ゼブラマッピングにより曲率のよたり・曲面間接続の不具合・特徴形状の不具合を検出できる(図8, 図9). 作成された曲面は元の形状の全体の傾向をよくとらえていることが分かった. またCADのように品質の高い曲面を作成する方法による改善を行った.

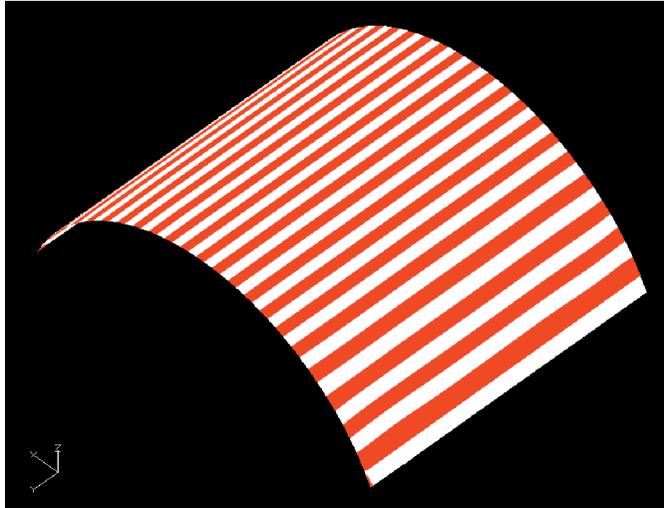


図8 解析面(円柱)に対するゼブラマップ

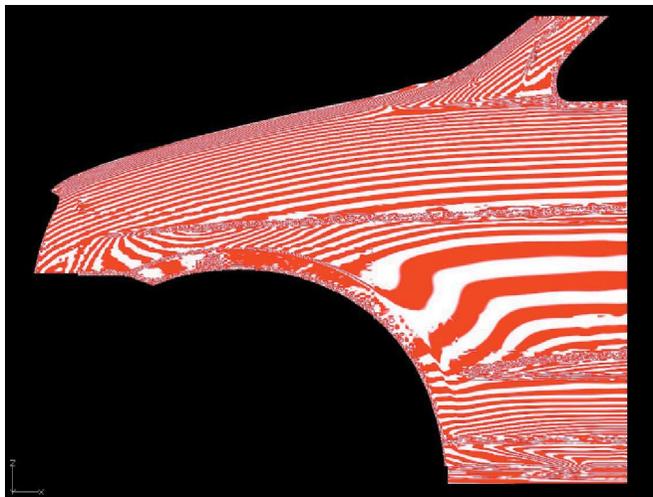


図9 樹脂モデルに対するゼブラマップ

シェーディング図では全体の形状が表現されており,十分に形状の確認ができる(図10). 設計検討段階や, CAE 解析等にも使用可能であることがわかった.

4.3 考察

1) 誤差について

目標値 ± 0.05 mm は95%以上の範囲で確保できた. 残りについては次の二つの要因が



図 10 樹脂モデルに対するシェーディング

考えられる。

① 特徴形状などの影響

特徴形状付近では曲面との誤差が大きく、周辺部分もその影響で曲面の波打ち現象がみられるケースもあった。これは、特徴形状付近の曲率の急激な変化に曲面が追従できていないことに原因がある。誤差評価に $+0.05$ 、 -0.05 を加える理由となった。

② 測定等の誤差

点群にはノイズが含まれている。このため、一部の測定ノイズが ± 0.05 mm の範囲を超えたものと解釈できる。最小二乗法を利用しているため、ノイズなどは平均化されるが、測定機の仕様に示される限界精度が面創成結果にも現れている。測定誤差を多く含んでいるにも関わらず、曲面次数・連続性・パッチ間隔等のパラメータを調整することにより、高品質な曲面が創成できることが確認された。測定誤差のリスクを避けるため、 $+0.05$ 、 -0.05 、 ± 0.05 と 3 種指定できるようにした。

2) 測定運用上の問題

今回、測定したモデルの形状面に位置合わせ用の基準穴があったため、その周辺の曲面創成に影響がでた。また、測定機では、一度に測定できる面積が決まっているため、複数ショットに分割して測定し、それらを後で接合する手法を使っている。接合具合によっては創成曲面に影響が出る。また、誤差の影響が大きくなる。さらに、その位置合わせの為に、測定面にシールを貼っているが、その部分に関しても創成する曲面に影響を与える。高品質な曲面を創成するためには、測定機の精度や測定方法および測定環境など、面品質に重要な影響を与える。

4.4 課 題

特徴形状付近で点群と曲面との距離が大きくなってしまい点群に忠実な曲面生成ができにくく、特徴形状付近の創成方法に改善（課題 1）が必要であり、また特徴形状付近の曲面が滑らかになり過ぎる傾向があり、曲面のへたりの改善（課題 2）も必要なことがわかった。現段階でも各種パラメータをチューニングすることにより、高品質な曲面データを創成することも可

線を使って面をトリムする (図 13 (d)).

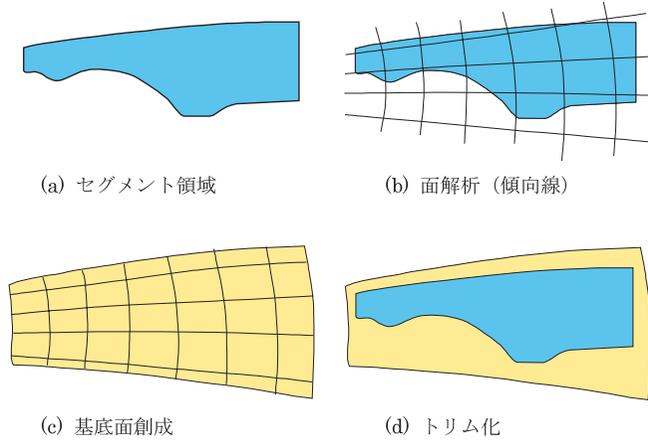


図 13 特徴形状を反映した曲面創成方法

5.2 特徴形状付近の曲面へたりの改善

最小二乗法に基づくエネルギー最小化法を利用すると、プラスとマイナスを相殺するような平均的な解が導出される。これにより、特徴形状付近の曲面がへたる。現在、プラス方向とマイナス方向の個別指定を可能にし、曲面へたりの問題を改善している。

5.3 CAD 機能の強化

自社開発による点群面張り専用システムから面創成モジュールだけを切り出して、市販 CAD ソフトのプラグインで動作する様に改良中である (図 14)。

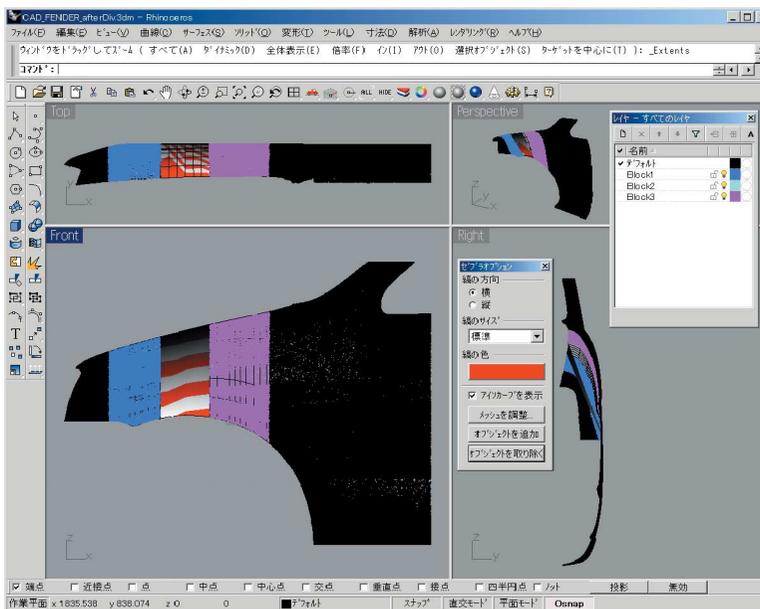


図 14 市販 CAD へのプラグイン (プロトタイプ)

プラグイン開発では、本体側からの機能制限を受け自由に開発できないという欠点もあるが、本体側のCAD機能をそのまま利用でき、エンドユーザーの作業効率が向上する。

6. おわりに

高密度測定点群にエネルギー最小化法を用いて曲面を創成したところ、あるレベル（点群誤差レベル ± 0.05 mm内95%以上）の品質の曲面データを得ることが可能になった。また、エネルギー最小化法は高密度点群に適した方法であることも分かった。本報で掲げた課題を克服し、適用範囲を広げ、実サイズモデルや内装モデルでのトライ等を実施する予定である。

-
- 参考文献** [1] 中倉 清, 中井進彌, 松崎幸一, 点群データに基づく面創生, 社団法人 自動車技術会学術講演会前刷集 No. 24, 2001, pp. 13-17
[2] V. Weiss, L. Andor, G. Renner and T. Varady, Advanced surface fitting techniques, Computer Aided Geometric Design, vol. 19, 2002, pp. 19-42

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、自動車産業事業部トヨタ統括部CGシステム開発室に所属。