Loop 細分割曲面を用いた点群からのリバースエンジニアリング
―Quasi-interpolation に基づく制御メッシュ導出法の検証―

北海道大学大学院工学研究科　○名知 数馬　金井 理　岸浪 建史

要旨

本研究では，測定点群から Loop 細分割曲面をリバースエンジニアリングで生成する手法を提案する．本手法は，Loop 細分割曲面用の準補間スキームを導入し，これにより点群に対し局所的な演算を繰り返すのみで，与えられた点群にフィットする細分割曲面の初期制御メッシュを導出できる。

1．はじめに

非接触型測定器の性能向上により，物理モデルの全周に対する高密度点群が高速に測定可能となり，その測定点群を意匠設計等に用いる要求が高まっている．このため，従来のパラメトリック曲面に比べ，任意位相の多面体上に単一の滑らかな曲面を容易に定義できるという特徴を持つ細分割曲面を用いたリバースエンジニアリング技術が必要とされている[1]．そこで本研究では，Loop 細分割曲面を対象としたリバースエンジニアリング手法を quasi-interpolation に基づき提案する．

細分割曲面に対する quasi-interpolation を用いた関連研究には[2][3]がある．しかし，いずれも目標曲面に対するフィッティングを目的としており，リバースエンジニアリングに必要な目標点群に対するフィッティング手法は議論していない．これに対し，本研究では，Loop 細分割曲面の細分割極限で目標点群にフィットする制御メッシュを，quasi-interpolation(準補間)に基づき，効率的かつ安定に導出できるのが特徴である．

2．Quasi-interpolation に基づく制御メッシュ導出法

2.1 Loop 細分割用 Quasi-interpolation オペレーター

quasi-interpolation[4]とは，少数の局所的なサンプル点群から，補間関数を近似的に構成する(制御点を導出する)手法である．得られた補間関数は，最小 2 乗近似に漸近的に匹敵するような近似精度を持つが，最小 2 乗近似とは違い，大規模な線形システムの解を必要とせず，局所的に解を導出することができるため，高速かつ安定であることを特徴とする手法である．

Loop 細分割曲面用 quasi-interpolation は，[2]で提案されており，フィッティングの目標曲面が与えられていれば，その曲面を細分割極限曲面で近似できる制御メッシュの頂点位置を目標曲面上の局所的な点群から容易に逆算できる手法である．今，図 1 に示す．ここで，p^j を細分割レベル j の制御メッシュ頂点集合，$p^j(v)$を p^j 内の頂点 v の座標，s^j を p^j から得られる細分割極限曲面，

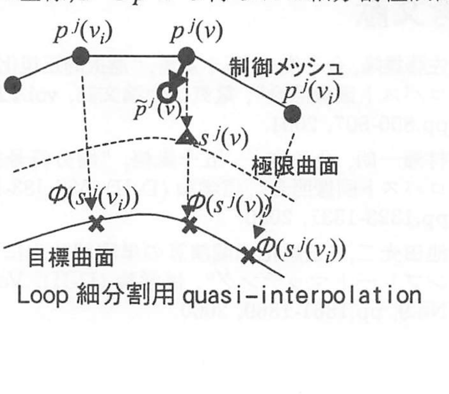


図 1　Loop 細分割用 quasi-interpolation

$s^j(v)$を $p^j(v)$の細分割極限点，$\phi(s^j(v))$ を $s^j(v)$に対応する目標曲面上の目標点，$\tilde{p}^j(v)$ を quasi-interpolation で導出された制御メッシュの頂点とする．

このとき，図 1 の $\phi(s^j(v))$ を細分割極限で通過する制御メッシュの修正頂点位置 $\tilde{p}^j(v)$ は，対応する $\phi(s^j(v))$ と隣接している $\phi(s^j(v_i))$ から式(1) で導出される．

$$\tilde{p}^j(v) = (1-k\gamma)\phi(s^j(v)) + \gamma \sum_{v_i \in V(v)} \phi(s^j(v_i)) \equiv Q(\phi(s^j(v_i))) \quad (1)$$

ここで，$V(v)$は頂点 v の隣接頂点集合であり，$\gamma = -1/(2k)$，k は頂点 v の次数である．また Q を Loop 細分割用 quasi-interpolation オペレーターと呼ぶ．

本研究では，目標曲面上の点 $\phi(s^j(v))$ と制御メッシュの細分割極限点 $s^j(v)$との差 $\phi(s^j(v)-s^j(v))$ に対し，quasi-interpolation オペレーター Q を適用することにより，制御メッシュの頂点の修正量を導出し，$p^j(v)$の頂点位置を $\tilde{p}^j(v)$ に変更する方法を用いる．

この Loop 細分割用 quasi-interpolation オペレーターでは，制御メッシュの頂点に対応する目標曲面上の点 $\phi(s^j(v))$ を見つけることが必要となる．本研究では，フィッティングの目標が点群であるため，その対応付けはさらに複雑になる．この対応付けの問題を[5]で提案した球面 projection アルゴリズムを用いることで解決する．以下では，その対応付けを含めた手法を提案する．

2.2 Quasi-interpolation に基づく制御メッシュ生成アルゴリズム

本研究で，提案するアルゴリズムの概要を図 2 に示す．

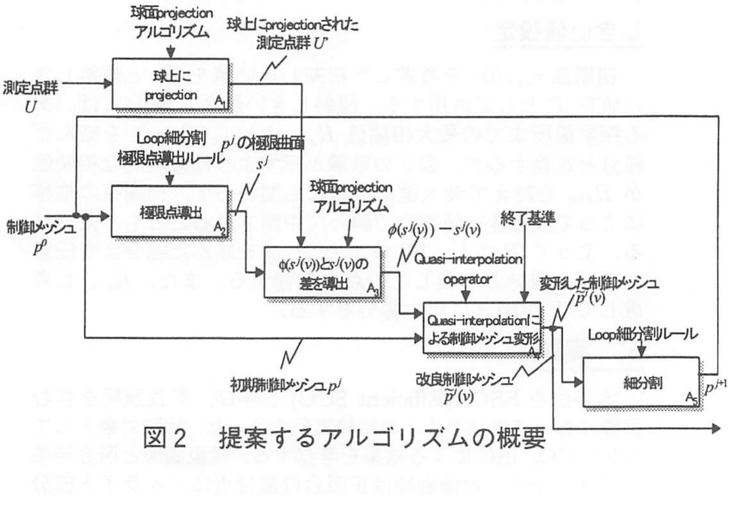


図 2　提案するアルゴリズムの概要

点群 U と初期制御メッシュ p^0 を入力とし，制御メッシュの位置を Loop 細分割用 quasi-interpolation に基づき改良してゆくことで，点群にフィットする Loop 細分割曲面を生成できる初期制御メッシュを導出する．以下に，提案するアルゴリズムを対応付けのための球面 projection アルゴリズムを含めて述べる．

1） 測定点群 U と初期制御メッシュ p^0 を用意する．ここで，p^0 は，適当な形状の閉多面体を用いる．$p^j \leftarrow p^0$ とする．

2） 測定点群 U を[4]で提案した手法により，単位球上へ写像し，U' とする．

3） $p^j(v)$ の細分割極限点 $s^j(v)$ を求める．

4） 2)と同様の手法で，$s^j(v)$ を単位球上へ写像し，$s^j(v)'$ とする．

5） 単位球上で $s^j(v)'$ を含み，かつ最小面積の三角形を構成する U' 内の 3 点を見つけ，この三角形における重心座標を求める．

6） 5)の 3 点に対応する U 内の 3 点と，5)の重心座標を用いた重心補間により，$s^j(v)$ に対応する目標点 $\phi(s^j(v))$ を求める．

7） 式(2)で示される，極限点 $s^j(v)$ と目標点 $\phi(s^j(v))$ の差に Loop 細分割用 quasi-interpolation オペレーター Q を適用し，制御メッシュの頂点を $\tilde{p}^j(v)$ へ変更する．

$$\tilde{p}^j(v) = p^j(v) + Q(\phi(s^j(v)) - s^j(v)) \qquad (2)$$

8） 全ての頂点 v において $\tau > \varepsilon = \left\| \phi(s^j(v)) - s^j(v) \right\|$ (τ：誤差トレランス)を満たす場合，p^j を初期制御メッシュとして出力し終了する．満たさない場合，Loop 細分割を実行する．

9） $j \leftarrow j+1$ として手順 3)〜8)を繰り返す．

図 3 にこのアルゴリズムの結果を示す．(a)がフィッティングの目標とした点群(点数 11442)，(b)は制御メッシュとして入力した 20 面体，(c)は(b)の 20 面体にアルゴリズムを 2 回繰り返して得られる制御メッシュ，(d)はさらに 2 回繰り返して得られる制御メッシュである．さらに(c),(d)の細分割極限曲面を(e),(f)に示す．

図 4 に図 2 の例に対するフィッティング誤差を示す．縦軸は(a)の点群の包括球の直径で正規化した誤差，横軸はアルゴリズムの反復回数である．最大誤差は，制御メッシュの頂点数がある程度多くなるまでは増加するが，その後は減少している．平均誤差は，制御メッシュを細分割するごとに，一様に減少し，点群に対するフィッティング精度の向上が確認できた．なお(f)を得るまでの時間は 0.25sec(PⅢ800MHz)である．

3．おわりに

本研究では，quasi-interpolation に基づく制御メッシュ導出法の提案と実装を行い，その有効性を確認した．今後，フィッティング精度の向上及び，大規模点群に対する適用を行う予定である．

[参考文献]

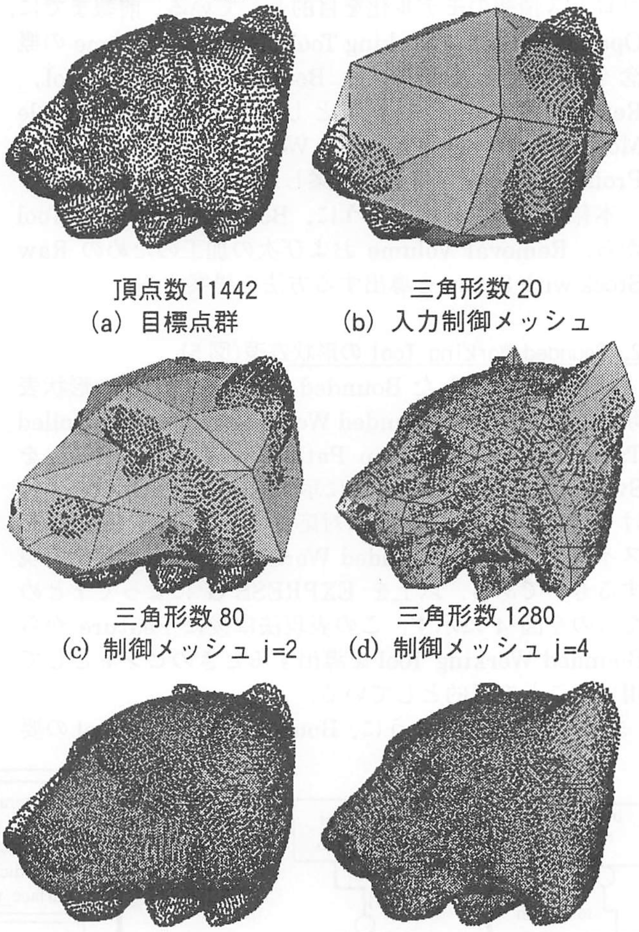
[1] 竹内真悟 他:点群および多面体データに基づく細分割曲面の生成手法，日本機械学会学論文誌 C 編，67 巻，653 号，pp284-289，(2001)

[2] A.Levin, N.Litke, P.schroder: Trimming for subdivision surfaces, proc. of CAGD2001, 18(5), pp463-481, (2001)

[3] A.Levin, N.Litke, P.schroder: Fitting Subdivision Surfaces, proc. of IEEE Visualization 2001 Oct, pp319-324, (2001)

[4] チュウイ:マルチスプライン，東京電機大学出版部，pp117-132，(1991)

[5] 名知数馬，金井理，岸浪建史: Loop 細分割曲面を用いたリバースエンジニアリング -改良 shrink wrapping を用いた点群からの semi-regular mesh 生成-，2002 年度精密工学会春季大会講演論文集，pp269，(2002)



頂点数 11442
(a) 目標点群

三角形数 20
(b) 入力制御メッシュ

三角形数 80
(c) 制御メッシュ j=2

三角形数 1280
(d) 制御メッシュ j=4

(e) 極限曲面 j=2

(f) 極限曲面 j=4

図 3　提案アルゴリズム実行結果

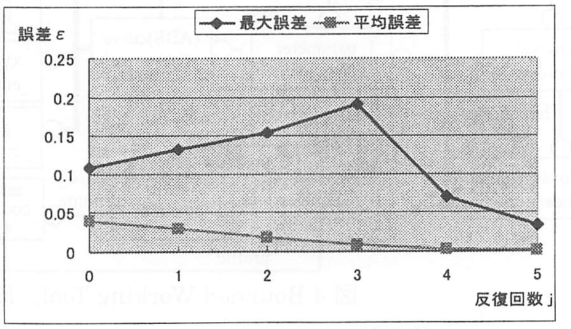


図 4　フィッティング誤差