曲線メッシュをベースにした細分割曲面の局所変形

徳山 喜政 $*_1$ 今野 晃市 $*_2$ 曽根 順治 $*_1$ R.P.C. Janaka Rajapakse$*_1$

$*_1$ 東京工芸大学工学部 $*_2$ 岩手大学工学部

Local Modification of Subdivision Surfaces Based on Curved Mesh

Yoshimasa Tokuyama$*_1$ Kouichi Konno$*_2$ Junji Sone$*_1$ R.P.C. Janaka Rajapakse$*_1$

$*_1$Tokyo Polytechnic University $*_2$Iwate University

E-mail: tokuyama@mega.t-kougei.ac.jp

アブストラクト

CG アニメーションでは，人物や動物などのキャラクターの形状モデルが重要である．これらの形状を複数枚の Bezier，B-spline や NURBS などのパラメトリック曲面で表現する場合，曲面同士を滑らかに接続するのは困難であり，複雑な処理を必要とする．この問題を解決するために，近年細分割曲面 (Subdivision Surfaces) がよく利用されている．しかし，デザイナーが直観的にモデリングすることができる効率的なモデリング手法の確立は依然として大きな課題である．一方，複雑な自由曲面形状を設計するための手法として，曲面の境界曲線を入力して曲面メッシュを生成し，境界で囲まれた領域を Gregory パッチで内挿する手法がある．このような手法は，曲線メッシュを直接修正することで，意図する形状を得ることができるため，細分割曲面を利用する方法と比較して，直観的な形状変形を行うことができるという利点がある．本研究では，Catmull-Clark 細分割曲面と Gregory パッチ両方の特徴を生かすために，ポリゴンメッシュから同一位相をもつ曲線メッシュを Catmull-Clark 細分割法則に基づいて生成し，生成された曲線メッシュを直接変形し，変形された曲線メッシュ形状をポリゴンメッシュへ反映させるような局所変形手法を提案する．本手法は，曲線メッシュ上の頂点や稜線に変形を施した場合，その頂点や稜線につながっている曲面形状しか変形されないのが特徴である．また，曲線メッシュ上の任意の範囲を指定し，指定した範囲外の曲面との連続性を保ちつつ，範囲内の曲面を自由に変形することも可能である．曲線メッシュ上の変形をポリゴンメッシュへ反映させることで，ポリゴンメッシュで行いにくい局所変形や直観的な変形が実現できる．

Abstract

In CG animation, the method for modeling of CG characters such as humans or animals is important. If these shapes are represented by parametric surfaces, such as Bezier, B-spline, or NURBS surfaces, complex procedures are required to make adjacent surfaces connect smoothly. To solve this problem, instead of parametric surfaces, subdivision surfaces are often used to represent shapes. However, how best to fulfill efficient modeling intended by designers is still problematic. Another method is proposed to model complex freeform surface shape, with which the boundary curves of a surface are specified to create a curved mesh and the mesh area within the boundary is interpolated with Gregory patches. This kind of modeling method enables to modify a curved mesh directly with intuition so as to achieve a desired shape. In this paper, to take an advantage of the features of both Catmull-Clark subdivision surface and Gregory patch, we propose a local modification method that generates a curved mesh from a polygon mesh with the same topology using a Catmull-Clark subdivision surface, modifies the generated curved mesh directly and applies the modified curved mesh shape to the polygon mesh. One of the characteristics of our method is that modification of some vertices or edges affects only their adjacent surfaces. Also, the surfaces within a specified range can be modified freely with maintaining the continuity between the surfaces and their adjacent surfaces outside the specified area. Applying modification of a curved mesh to a polygon mesh enables local modification or intuitive modification that are rather difficult to perform for a polygon mesh.

キーワード：細分割曲面，局所変形，曲線メッシュ，Gregory パッチ, モデリング

Keywords : Subdivision Surface, Local Modification, Curved Mesh, Gregory Patch, Modeling

1 はじめに

CG アニメーションでは，人物や動物などのキャラクターの形状モデルが重要である．従来，これらの形状を複数枚の Bezier，B-spline や NURBS などのパラメトリック曲面で表現されてきたが，曲面同士を滑らかに接続するのは困難であり，複雑な処理を必要とする．また，滑らかに接続するように曲面を生成した後，一部の曲面を変形すると，曲面同士の連続性が崩れてしまうため，再度調整する必要がある．この問題を解決するために，近年細分割曲面 (Subdivision Surfaces) がよく利用されている．細分割曲面とは，ポリゴンメッシュに分割と重み付けの操作を繰り返し適用することで，滑らかな曲面形状を生成する手法のことである．Doo ら [1] および Catmull ら [2] によって基礎理論が構築され，Loop[3] が三角メッシュを対象とした手法を提案した．Loop 細分割曲面はすべての面が三角形のポリゴンに適用されるのに対して，Catmull-Clark 細分割曲面ではこのような制限がない．そのため，多くの３次元 CG システムは Catmull-Clark 細分割曲面を採用している．

細分割曲面は，任意の位相をもつポリゴンメッシュに適用することが可能であるため汎用性が高い．しかし，細分割曲面手法を用いたモデリングの過程において，デザイナーは表示されたレンダリングイメージと分割後のメッシュの両方を，目視により確認しながら，頂点，稜線，面の追加，削除，移動などの形状変形操作を，ポリゴンに対して行う．このとき，意図する形状を獲得するためには，ポリゴンに対して試行錯誤的に変形することが必要である．しかし，システム側が任意の位相のメッシュから滑らかな曲面を自動的に生成するために，デザイナーが直接曲面形状をモデリングできない．すなわち，意図する曲面形状を，容易にかつ直観的に得ることは困難である．また，ポリゴンメッシュ上の１個の頂点を動かすと，その頂点のまわりの形状のみではなく，広範囲にわたって形状が変更される [4]．変形される範囲は自動的に決まってしまうので，変形範囲を任意に指定するのは困難である．

従来，細分割曲面における局所変形手法がいくつか提案されている．Khodakovsky ら [5] は，Loop 細分割曲面上の任意位置における特徴曲線を対話的に作成し，特徴曲線の近傍に変形を加えることで特徴曲線にそった特徴形状を生成する方法を提案している．Biermann ら [6] は，多重解像度細分割曲面上の任意位置における特徴曲線を対話的に作成し，特徴曲線に沿って尖った形状を生成する方法を提案している．Sederberg ら [7] は，Catmull-Clark 細分割曲面の一様ノット挿入に対して，非一様ノット挿入を可能とした非一様細分割曲面 NURSS を提案している．頂点や稜線に対応してノット間隔を変えることで尖った部分をもつ極限細分割曲面形状を生成できることが特徴である．Zorin ら [8] は，Loop 細分割曲面における多重解像度編集アルゴリズムを提案している．形状の局所変形は，３角メッシュ上の頂点グループを選択して動かすことで実現される．これらの局所変形手法では，デザイナーが位相を意識せずに柔軟な形状変形が可能であるが, 曲面形状を直接変形できない．また，変形範囲を制御するのは困難である．

一方，複雑な自由曲面形状を設計するための手法として，曲面の境界曲線を入力して曲面メッシュを生成し，境界で囲まれた領域を内挿する手法がある．設計者は内挿された曲面を評価し，メッシュに曲線を追加したり，変形，削除をしながら，形状を作りこんでいく [9]．このような手法は，曲線メッシュを直接修正することで，意図する形状を得ることができるため，細分割曲面を利用する方法と比較して，直観的な形状変形を行うことができるという利点がある．Chiyokura らは， 不規則な曲線メッシュを滑らかに内挿するための曲面表現として Gregory パッチ [10]，有理境界 Gregory パッチ [11] を提案した．Gregory パッチや有理境界 Gregory パッチは，曲面の境界横断導関数 (Cross Boundary Derivative) を u，v 各パラメータ方向で独立に定義できる特徴をもつ．境界横断導関数とは，境界曲線を横切る方向の１階または２階偏微分ベクトル関数のことである．この特徴により， 輪郭曲線列さえ確定すれば, 不規則な曲線メッシュを与えたとしても，曲面間を G^1 連続に内挿できる．

本研究では，Catmull-Clark 細分割曲面と Gregory パッチによる曲線メッシュの変形手法の両方の長所を融合した局所変形手法を提案する．具体的には，Catmull-Clark 細分割規則に基づいて，ポリゴンメッシュから曲線メッシュを生成する手法と，曲線メッシュからポリゴンメッシュを再生成する手法を提案する．これによって，曲線メッシュを直接変形し，変形された曲線メッシュ形状をポリゴンメッシュへ反映させることが可能である．

本手法は，曲線メッシュ上の頂点や稜線に変形を施した場合，その頂点や稜線につながっている曲面形状しか変形されないのが特徴である．また，曲線メッシュ上の任意の範囲を指定し，指定した範囲外の曲面との連続性を保ちつつ，範囲内の曲面を自由に変形することも可能である．また，曲線メッシュ上の変形をポリゴンメッシュへ反映させることで，ポリゴンメッシュで行いにくい局所変形や直観的な変形が実現できる．

2 曲線メッシュの生成方法

本研究における細分割曲面の曲線メッシュ生成方法は次に示す複数のステップにより構成される．

1. 稜線ごとに初期メッシュを２回細分割して得られた５つの頂点を求める (図 1).
2. ５つの頂点の極限点をフィッティングするような３次の Bezier 曲線を生成する [12].
3. 極限点での法線ベクトルを利用してフィッティング曲線の制御点を修正し，再フィッティングを行う [13].

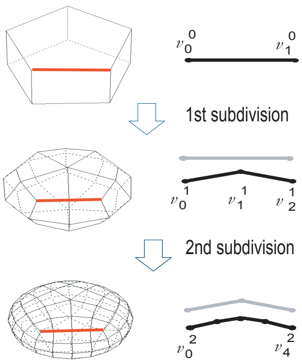


図 1: 初期メッシュの細分割

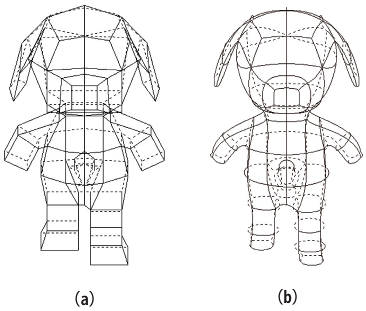


図 2: (a) 犬キャラクタの初期メッシュ (b) 初期メッシュに対応する曲線メッシュ

曲線メッシュ生成法の詳細は，文献 [14] を参照されたい．図 2(a) は CG キャラクタの初期メッシュ(横 65，高さ 100，奥行き 50) を示す．図 2(b) は本研究の手法を用いて生成した同一位相をもつ曲線メッシュを示す．

3 制御ベクトルに基づいた Gregory パッチ内挿

曲線メッシュは細分割曲面の境界を表すものであり，各領域は 3 次 Bezier 曲線により囲まれている．この領域に Chiyokura ら [10] の手法を用いて双 3 次の Gregory パッチでメッシュを内挿すると，境界横断導関数 (Cross Boundary Derivative) を u, v のパラメータごとに独立に定義できるため，隣接する曲面間の連続性が，G^1 連続性を保つように曲面を生成することができる．

しかし，図 3(a) に示すように，耳付近の三角形領域の曲面形状は，領域の中心付近に凹凸が見られる．また，図 3(b) に示すように，首近傍の四辺形曲面の形状がしわがよったように，うねっている．前者は，N 辺形領域を内挿するときに，面の中心と各辺の中点との間に内部曲線を生成し，N 角形領域を複数の四辺形領域に分割した後で，各 四辺形領域を Gregory パッチで内挿している．しかし，内部曲線を生成するときの面の中心位置は，境界線の中点における境界横断ベクトルから決定されるため，境界曲線の形状に依存して内挿面が凹凸になりやすいと考えられる．後者は，四辺形の各稜線に近い Gregory パッチの内部制御点を決めるとき，各稜線の両端点につながっている稜線の接線方向に強く依存しているからと考えられる．前者の問題を解決するために，我々は細分割で得られた頂点の極限点情報を利用して N 辺形領域の内部曲線を生成する．後者の問題を解決するために，我々は細分割で得られた頂点の極限点情報を利用して稜線に制御ベクトルを付加する．

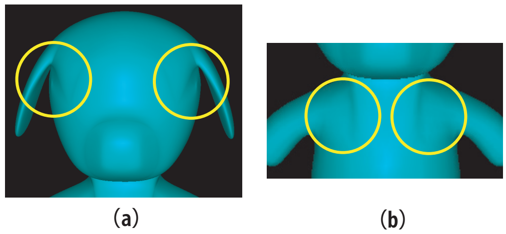


図 3: (a) 耳近傍 (b) 首近傍

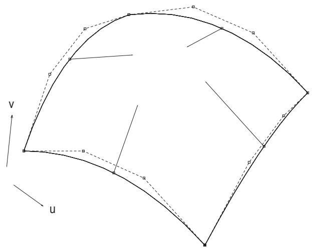


図 4: 1 階偏微分ベクトルに基づく制御ベクトル

今野らは曲面内挿法における制御ベクトルの概念を提案している [15]．図 4 に示すように稜線に制御ベクトルを付加すれば，曲面の偏微分ベクトルが制御ベクトルと一致するように Gregory パッチの制御点が計算される．従って，制御ベクトルは内挿曲面の形状に大いに影響する．なお，制御ベクトルが付加された場合，内挿曲面は式 (1) に示す双 4 次 Gregory パッチにより表現される (図 5)．

$$\mathbf{G}(u,v) = \sum_{i=0}^{4}\sum_{j=0}^{4} B_i^4(u)B_j^4(v)\mathbf{P}_{ij}(u,v) \qquad (1)$$

ここで，

$$\begin{aligned}
\mathbf{P}_{11} &= \frac{u\mathbf{P}_{110} + v\mathbf{P}_{111}}{u+v}, \\
\mathbf{P}_{13} &= \frac{u\mathbf{P}_{130} + (1-v)\mathbf{P}_{131}}{u+(1-v)}, \\
\mathbf{P}_{31} &= \frac{(1-u)\mathbf{P}_{310} + v\mathbf{P}_{311}}{(1-u)+v}, \\
\mathbf{P}_{33} &= \frac{(1-u)\mathbf{P}_{330} + (1-v)\mathbf{P}_{331}}{(1-u)+(1-v)}.
\end{aligned}$$

$B_i^4(u), B_j^4(v)$ は 4 次の Bernstein 多項式である．

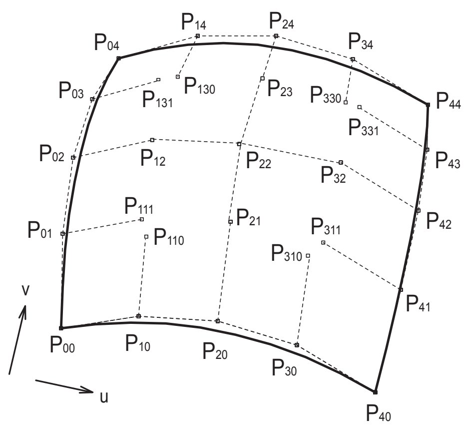


図 5: 双 4 次 Gregory パッチ

3.1 非四辺形の内部曲線の生成

初期ポリゴンメッシュに非四辺形領域 (N 辺形領域) が含まれる場合には，各 N 辺形領域の内部に曲線を生成し，N 個の四辺形領域に分割した後で，個々の領域を Gregory パッチで内挿する必要がある．本研究では，N 辺形領域の内部曲線を次のように生成する．

1. 内部曲線の始点は初期メッシュにおける N 辺形領域の中心点の極限点とする [14][16]．内部曲線の終点は曲線メッシュにおける N 辺形領域の各稜線の中点とする．中間の 3 つのサンプリング点は，初期メッシュを 3 回細分割して得られた極限点とする．
2. 2 章のステップ 2 の手法を利用して 5 点から 1 本の 3 次の Bezier 曲線を生成する．
3. 初期メッシュにおける N 辺形領域の中心点の極限点と極限点での単位法線ベクトルから平面を定義し，始点における Bezier 曲線の接線ベクトルをその平面上にのるように射影する．内部曲線の終点についても同様な処理で Bezier 曲線の接線ベクトルを修正する．そして，2 章のステップ 3 の手法を利用して Bezier 曲線を再生成する．図 6 は生成した 3 角形領域の内部曲線とそれに基づいて内挿した 3 個の双 3 次 Gregory パッチの制御点を示す．

3.2 四辺形の制御ベクトルの生成

四辺形領域の各稜線上の両側に Gregory パッチで内挿するときに利用される 1 階制御ベクトルを付加する．本研究では，1 階制御ベクトルを付加する稜線上のパラメータを 0.5 とする．制御ベクトルの生成方法は次に示すステップより構成される．

1. 四辺形領域を表す稜線の両側に，次の手順で単位接線ベクトルを生成する．

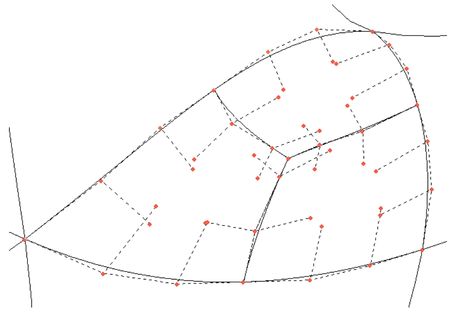


図 6: 内部曲線と Gregory Patch 制御点

   (a) 3 次の Bezier 曲線を生成する．Bezier 曲線の始点と終点は相対する 2 本の稜線におけるパラメータ 0.5 の位置である (図 7 の q_{10}, q_{14})．中間の 3 つのサンプリング点は，四辺形を 2 回細分割して得られた 3 つの内部点 (図 7 の q_{11}, q_{12}, q_{13}) の極限点とする．
   (b) 2 章のステップ 2 の手法を利用して 5 点から 1 本の 3 次の Bezier 曲線を生成する．
   (c) 稜線におけるパラメータ 0.5 の極限点と極限点での単位法線ベクトルから平面を定義し，始点と終点における Bezier 曲線の単位接線ベクトルをその平面上にのるように射影する．
2. 四辺形の各稜線の両側に生成された単位接線ベクトルが G^1 連続とは限らない．ここで，滑らかな曲面を得るために両側の単位接線ベクトルを G^1 連続に修正する．具体的には，両側の単位接線ベクトルの差分ベクトルを求め，それぞれの単位接線ベクトルを差分ベクトルの線上に射影する．
3. 2 章のステップ 3 の手法を利用して各領域の相対する稜線間に，ステップ 2 で生成された単位接線ベクトルに基づいて 3 次の Bezier 曲線を再生成する [14]．
4. 3 次の Bezier 曲線の両端点の 1 階微分ベクトルを Gregory パッチで内挿するときに利用される 1 階制御ベクトルとする．

3.3 双 4 次 Gregory パッチの中間制御点の決定

四辺形領域は 1 枚の双 4 次 Gregory パッチで内挿されているが，G^1 連続の条件より，真ん中の制御点 (図 5 の $\mathbf{P}_{22}$) を除いて，その他の制御点が決定されている．真ん中の制御点は，曲面形状を定義する上での自由度として残されており，本研究では，次のように真ん中の制御点を決定する．

1. 曲面における u=0.5 方向の曲線を 3 次 Bezier 曲線として生成する．3 次 Bezier 曲線の両端点は両

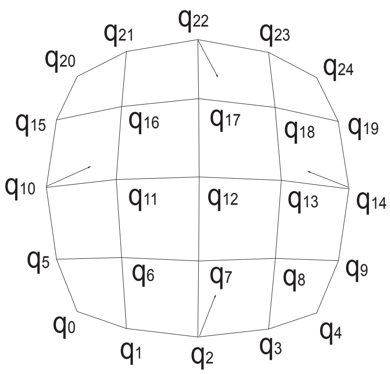


図 7: 制御ベクトル生成用サンプル点

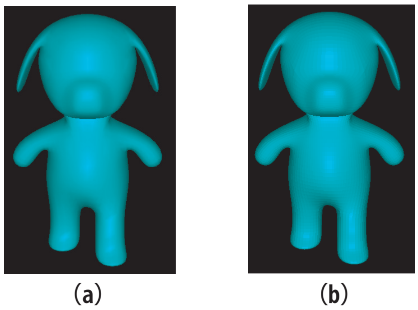


図 8: (a) 曲線メッシュ曲面のシェーディング表示 (b) 細分割曲面のシェーディング表示

側の境界曲線におけるパラメーター 0.5 の点である．また，内部制御点は，境界横断導関数 (Cross Boundary Derivativ) から計算されたパラメーター 0.5 における 1 階偏微分ベクトルを 3 次 Bezier 曲線の 1 階微分ベクトルとすることで決定される．

2. 3 次 Bezier 曲線を 4 次に次数上げする．5 つ制御点のうち，真ん中の制御点を A とする．

3. ステップ 1 と 2 の手法を用いて，曲面における v=0.5 方向の曲線を 3 次 Bezier 曲線として生成し，4 次に次数上げする．5 つ制御点のうち，真ん中の制御点を B とする．

4. 制御点 A と B の中点を双 4 次 Gregory パッチの真ん中の制御点 (図 5 の $\mathbf{P}_{22}$) とする．

4 曲線メッシュの評価

図 8(a) は Gregory パッチによる内挿後のシェーディング表示である．初期メッシュを 3 回細分割したときの形状が極限細分割曲面の形状に非常に近いので，ここで， 3 回細分割したときのイメージを図 8(b) に示す．図 8(a) と図 8(b) を比べると，曲線メッシュを Gregory パッチで内挿したときの形状と Catmull-Clark 細分割曲面の形状が外観的に非常によく似ていることがわかる．

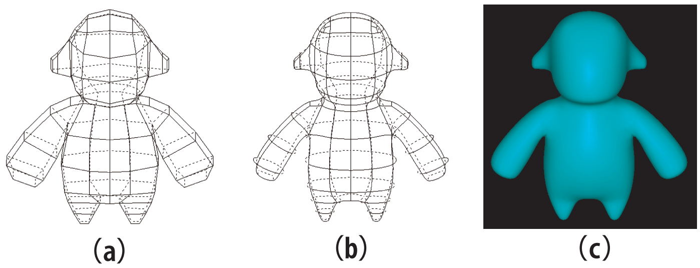


図 9: (a) ポリゴンメッシュ (b) 曲線メッシュ (c) シェーディング表示

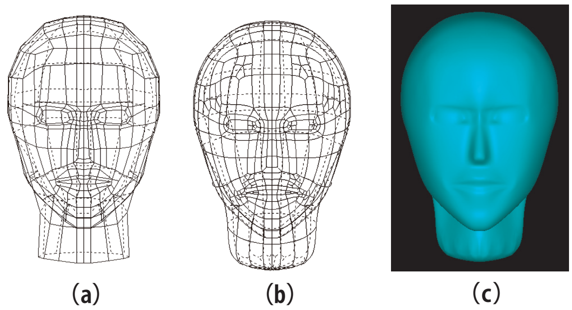


図 10: (a) ポリゴンメッシュ (b) 曲線メッシュ (c) シェーディング表示

また，距離を評価した結果，Bezier 曲線とフィッティング用極限点との最大距離 (以降は近似誤差 1 と呼ぶ) は 0.324 である．ポリゴンメッシュの各四辺形面に属する 2 回細分割後の 9 個の内部頂点の極限点と各面に対応する Gregory パッチとの最大距離 (以降は近似誤差 2 と呼ぶ) が 0.167 である．従って，図 8(a) と図 8(b) の形状は距離的にも非常に近いことがわかる．

我々は多くのケースを試した結果，提案手法は近似精度がよいことがわかった．ここでいくつかの近似例および近似誤差を示す．図 9，図 10，図 11 にはそれぞれキャラクタ，人間の頭，ゴリラの近似例を示す．各図において非四辺形の内部曲線も表示される．各形状の大きさ，近似誤差 1 および近似誤差 2 を表 1 に示す．

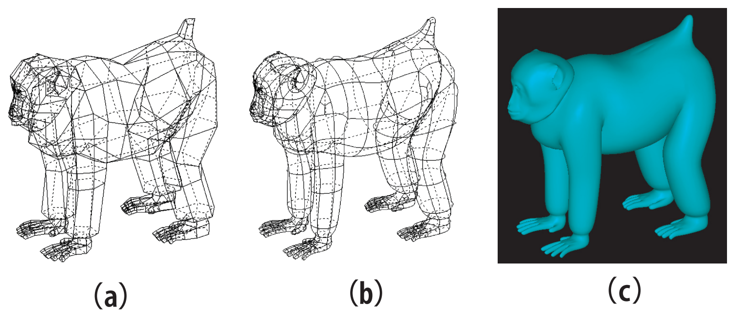


図 11: (a) ポリゴンメッシュ (b) 曲線メッシュ (c) シェーディング表示

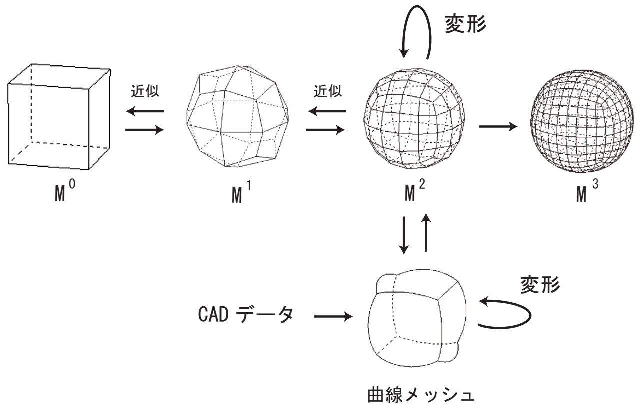


図 12: 本手法の概要

表 1 実験対象形状の近似誤差

形状名	大きさ	近似誤差 1	近似誤差 2
キャラクタ	65×100×50	0.231	0.191
人間の頭	75×100×60	0.442	0.361
ゴリラ	60×60×30	0.197	0.207

5　曲線メッシュをベースにした変形

曲線メッシュの場合，直観的に形状変形を行うことができるという利点がある．この利点を活かすために，曲線メッシュを変形した結果の形状に基づいて，ポリゴンメッシュを再構成する手法を提案する．図 12 に本手法の概要を示す．本手法の手順を以下に示す．

1. 初期ポリゴンメッシュM^0 を 1 回細分割し，ポリゴンメッシュM^1 を得る．
2. ポリゴンメッシュM^1 を 1 回細分割し，ポリゴンメッシュM^2 を得る．
3. M^2 の各頂点の極限点を利用して，初期ポリゴンメッシュM^0 に対応する曲線メッシュを生成する．
4. 曲線メッシュを直接変形する．
5. 曲線メッシュの変形結果をポリゴンメッシュ M^2 に反映する．
6. ポリゴンメッシュM^2 を 1 回細分割し，ポリゴンメッシュM^3 を得る．

ここで，立方体を用いて変形の手順を詳しく説明する．

1. 図 12 のポリゴンメッシュM^2 の各頂点の極限点を利用して，初期ポリゴンメッシュに対応する曲線メッシュを生成する．また，曲線メッシュの各曲面と M^2 の各頂点の極限点との対応をとる．このとき，N 辺形領域から生成された各曲面は 9 個の極限点と対応し，その他の曲面は 25 個の極限点と対応する．さらに各曲面の Gregory Patch 曲面情報における対応する極限点の (u, v) パラメーターを計算し保存する．

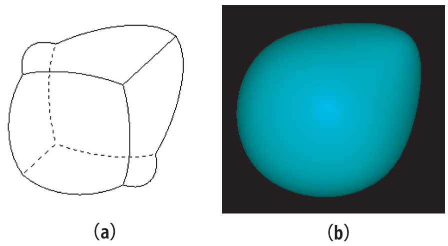


図 13: (a) 曲線メッシュの頂点移動 (b) シェーディング表示

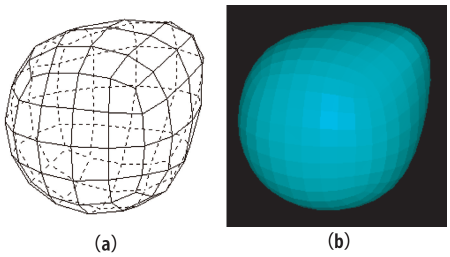


図 14: (a) 再構成された M^2 メッシュ (b)M^3 のシェーディング表示

2. 曲線メッシュの頂点，稜線，稜線についている制御ベクトルなどの変形を行う．頂点移動の場合には，頂点につながっている稜線と曲面も変形される．また，稜線や制御ベクトル変形の場合には，稜線の左右の曲面も変形される．図 13(a) は曲線メッシュの頂点を移動した後の曲線メッシュである．図 13(b) はそのシェーディング表示である．変形された曲面を新たに双 3 次 Gregory パッチで内挿する．
3. 各曲面の Gregory Patch 曲面情報における対応する極限点の (u, v) パラメーターを利用して新しい極限点の座標を計算する．
4. M^2 の頂点座標と極限点座標との関係は次の式で表現される．

$$Ax = b \tag{2}$$

x は M^2 の頂点座標，b は極限点の座標，A は正方行列である [16]．式 (3) を使用し，極限点座標から頂点座標を求めることができる．A は疎な行列なので，本研究では共役勾配法 (Conjugate Gradient Method)[17] を用いて式 (3) を解いている．

$$x = A^{-1}b \tag{3}$$

以上のような方法で，曲線メッシュの変形結果はポリゴンメッシュ M^2 に反映される．図 14(a) は再構成されたポリゴンメッシュ M^2 である．図 14(b) は M^2 を 1 回細分割した後 (M^3) のシェーディング表示である．最小二乗法を用いれば，M^2 から M^1 や M^0 の頂点座標を求められる [16]．しかし，

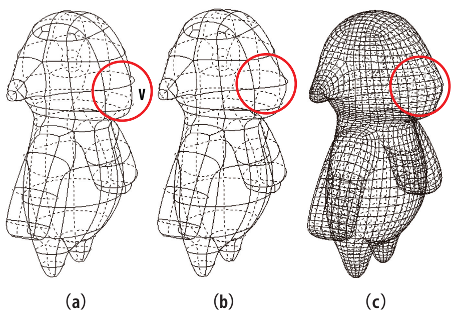


図 15: (a) 頂点移動前 (b) 頂点移動後 (c) 再構成されたポリゴンメッシュ M^2

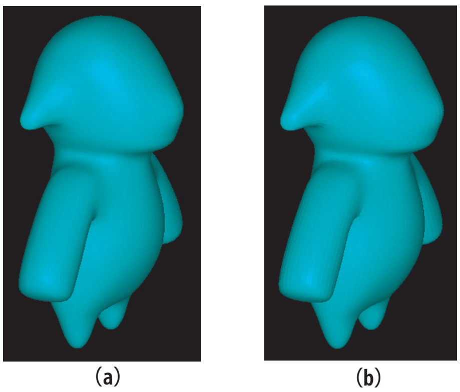


図 16: (a) 曲線メッシュのシェーディング表示 (b)M^3 のシェーディング表示

M^2 から M^1，M^0 にすると，局所変形した形状が近似されることになり，M^1，M^0 になるにしたがって，その形状の変化が，全体に影響するようになるので，局所変形の効果が薄れてしまう．そこで，本研究では M^2 をベースにした局所変形の効果を評価する．なお，評価結果を次章に示す．

6 実用例と考察

図 15(b) は図 15(a) における口付近の頂点 V を直観的に動かした後の図である．その頂点につながっている 4 つの曲面パッチしか変形されていないのが特徴である．図 15(c) は再構成されたポリゴンメッシュ M^2 である．比較のため，変形後の曲線メッシュと M^2 のポリゴンメッシュを 1 回細分割 (初期メッシュからは 3 回細分割したメッシュ M^3) したときのイメージをそれぞれ図 16(a) と図 16(b) に示す．図 15(b) の変形部分が図 15(c) に反映されていることがわかる．

図 17(b) は図 17(a) の左手の形状を直観的に変形した後の図である．図 17(c) は再構成されたポリゴンメッシュ M^2 である．比較のため，変形後の曲線メッシュと図 17(c) M^2 のポリゴンメッシュを 1 回細分割 (初期メッシュからは 3 回細分割したメッシュ M^3) したときのイメージをそれぞれ図 18(a) と図 18(b) に示す．図 17(b) の変形部分が図 17(c) に反映されていることがわかる．また，変形部分以外の形状は元のままである．従って，本研究の手法より，曲面メッシュにおける直観的かつ局所的な変形を行った後，変形部分をポリゴンメッシュに反映させることができる．なお，本研究における形状データの入出力は，一般的に利用されている OBJ 形式を利用している．従って，変形後のポリゴンメッシュを他システムへ渡すことができる．

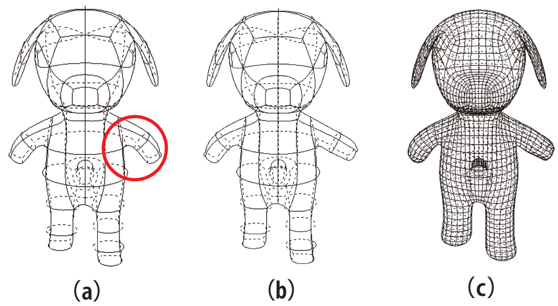


図 17: (a) 変形前の曲線メッシュ (b) 変形後の曲線メッシュ (c) 再構成されたポリゴンメッシュ M^2

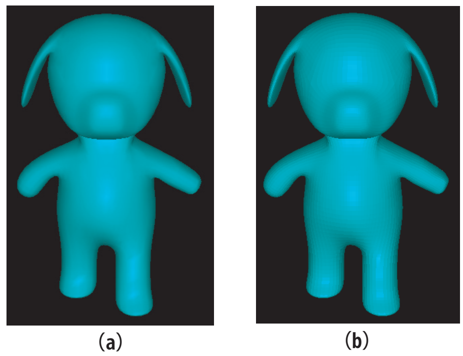


図 18: (a) 曲線メッシュのシェーディング表示 (b)M^3 のシェーディング表示

7 まとめ

本研究では，曲線メッシュをベースにした細分割曲面の局所変形の一手法を提案した．本手法により，曲線メッシュ上の変形をポリゴンメッシュへ反映させることで，ポリゴンメッシュで行いにくい局所変形や直観的な変形が実現できる．今後の課題として，CAD のような曲面モデルを細分割面のポリゴンメッシュへの変換によって，より柔軟なモデリング手法へと発展させることである．

なお，提案手法の基本的概念は，すでに NICOGRAPH International 2009 で発表されている [18]．本論文はその実装等を詳細化したものである．

参考文献

[1] D. Doo and M. Sabin, Analysis of the behaviour of recursive division surface near extraordinary points, Computer aided Design, Vol.10, No.6, pp.356-360, 1978.

[2] E. Catmull and J. Clark, Recursiverly generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes, Computer aided Design, Vol.10, No.6, pp.350-355, 1978.

[3] C. T. Loop, Smooth subdivision surfaces based on triangles, Master's thesis Department of Mathmatics, University of Utash, August 1987.

[4] J. Feng, J. Shao, X. Jin, Q. Peng, A. R. Forrest, Multiresolution free-form deformation with subdivision surface of arbitrary topology, The Visual Computer, Vol.22, pp.28-42, 2006.

[5] A. Khodakovsky and P. Schröder, Fine level feature editing for subdivision surfaces, Proceedings of the fifth ACM symposium on Solid modeling and applications, pp.203-211, 1999.

[6] H. Biermann, I. Martin, D. Zorin, F. Bernardini, Sharp features on multiresolution subdivision surfaces, Graph Models, Vol.64, No.2, pp.61-77, 2002.

[7] T. W. Sederberg, J. Zheng, D. Sewell, M. Sabin, Non-uniform recursive subdivision surfaces, Proceedings of SIGGRAPH 1998, pp.387-394, 1998.

[8] D. Zorin, P. Schröder, W. Sweldens, Interactive multiresolution mesh editing, Proceedings of SIGGRAPH 1997, pp.259-268, 1997.

[9] K. Konno, Y. Tokuyama, and H. Chiyokura, A G^1 connection around complicated curve meshes using C^1 NURBS Boundary Gregory Patches, Computer Aided Design, Vol. 33, No.4, pp. 293-306, 2001.

[10] H. Chiyokura and F. Kimura, Design of solids with free-form surfaces, Computer Graphics, Vol.17, pp.289-298, 1983.

[11] H. Chiyokura, T. Takamura, K. Konno, T. Harada, G^1 surface interpolation over irregular meshes with rational curves, In: Farin, G. (ed) *NURBS for Curve and Surface Design*. SIAM, Philadelphia, pp.15-34, 1991.

[12] L. Piegl and W. Tiller, *The NURBS Book*, Springer-Verlag, 1995.

[13] J. Hoschek, Approximate conversion of spline curves. Computer Aided Design, Vol.4, pp.59-66, 1987.

[14] Y. Tokuyama, Y. Yoshii, K. Konno, J. Sone, Curved Mesh Generation Based on Limit Subdivision and Gregory Patch Interpolation, The Journal of the Institute of Image Electronics Engineers of Japan, Vol.35, No.6, pp.878-887, 2007.

[15] K. Konno, T. Takamura, and H. Chiyokura, A New Control Method for Free-Form Surfaces with Tangent Continuity and its Applications, Scientific Visualizations of Physical Phenomena, N.M. PatriKalakis ed., Springer-Verlag, Heidelberg, pp.435-456, 1991.

[16] M. Halstead, M. Kass, T. DeRose, Efficient, Fair Interpolation using Catmull-Clark Surfaces, Proceedings of SIGGRAPH 1993, pp.35-44, 1993.

[17] W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling and B.P. Flannery, *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press, 1992.

[18] Y. Tokuyama, K. Konno, J. Sone, R.P.C Janaka Rajapakse, Local Modification of Subdivision Surfaces Based on Curved Mesh, Proc. NICOGRAPH INTERNATIONAL 2009, s7-1, 2009.

徳山 喜政

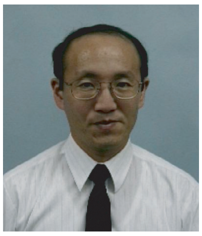
1986 年，東京大学工学部産業機械工学科修士課程修了, (株) リコーを経て，現在，東京工芸大学教授．CG, CAD, VR, モデリング手法，ハプティック インターフェイス等の研究に従事．博士 (工学)．情報処理学会，映像情報メディア学会, 画像電子学会, 芸術科学会会員．

今野 晃市

1985 年，筑波大学第三学群情報学類卒業．(株) リコーソフトウエア研究所，ラティス・テクノロジー (株) を経て，現在，岩手大学工学部准教授．CG, CAD, VR, 自由曲面の内挿法，レンダリングアルゴリズム，並列処理アルゴリズムなどの研究に従事．著書に「3 次元形状処理入門」がある．博士 (工学)．映像情報メディア学会，

情報処理学会，芸術科学会，日本情報考古学会, IEEE 会員.

曽根 順治



1985 年，豊橋技術科学大学大学院修士課程修了.（株）東芝，慶應義塾大学 SFC 研究所訪問所員を経て，現在，東京工芸大学准教授．CAD, CG における自由曲面生成手法，形状制御手法の研究に従事．博士 (工学)，情報処理学会，映像情報メディア学会，精密工学会会員.

R.P.C Janaka Rajapakse

2008 年，北陸先端科学技術大学院大学 博士 (知識科学)．現在，東京工芸大学ハイパーメディア研究センター特別研究員．CG, VR, ハプティック インターフェイス，感性工学などの研究に従事．電子情報通信学会，IEEE 会員，DCSIG 会員.