

## 細分割曲面生成のためのスキニング手法

和泉敦\* 鈴木宏正\*

\* 東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻

E-mail: {izumi|suzuki}@cim.pe.u-tokyo.ac.jp

近年細分割曲面の使用が進んでいるが、CADへの応用に必要な解析・設計ツールはまだ揃っていない。本論文ではパラメトリック曲面で一般的であるスキニング手法を用いて、細分割曲面を直接生成する手法を提案する。本手法は滑らかさ重視と特徴重視という異なるアプローチによる2種類の曲面生成手法から構成される。本手法により、与えた断面曲線と軌道曲線から直感的に滑らかな細分割曲面を生成することが可能となる。

### Skinning for subdivision surfaces

ATSUSHI IZUMI\* HIROMASA SUZUKI\*

\*The University of Tokyo, Department of Precision Machinery Engineering

E-mail: {izumi|suzuki}@cim.pe.u-tokyo.ac.jp

Recently, subdivision surfaces are getting more attention. However in contrast to the case of parametric surfaces, there are not enough modeling tools for subdivision surfaces. In this paper, we propose a method for direct construction of subdivision surfaces with pupular skinning method. Our method consists of two different approaches. One focuses on smoothness of the resulting surface and the other on features of the given curves. With our method, intuitive construction of subdivision surface from given sectional curves and path curve is enabled.

## 1 はじめに

現在CADの分野では数学的解析が必要であるなどの理由から、パラメトリック曲面の使用が主流である。しかしパラメトリック曲面では、複雑なモデルは複数のパッチを接続して表現する必要があり、そのようなモデルは変形時に接続性を維持するのが困難である。このような理由から、特に変形が常に必要なアニメーション等の分野でそれに代わる形状表現として細分割曲面が注目されている [1]。細分割曲面は任意位相の滑らかな曲面を表現できるという大きな利点があるが、CADでの利用に必要な解析、設計ツールは発展途上で、まだ揃っていない [2][3]。

### 1.1 細分割曲面

細分割曲面では初期制御メッシュを細分していく極限として滑らかな曲面を定義する。数ある細分割曲面の中で、本手法では最も一般的な、四角形メッシュを用いる Catmull-Clark 細分割曲面 [4] を対象とする。

四角形メッシュの場合、制御メッシュの各頂点(制御点)に直接接続する稜線の数が4以外の頂点を特異点と呼ぶ。そこでは連続性の低下や歪みといった問題が生じるため、しばしば問題とされるが、これに対し本手法では特異点を曲面の流れの転換点として効果的に用いることを目標とする。

### 1.2 スキニング手法

スキニング手法は直感的で対話的処理に向いていることから、パラメトリック曲面の設計で頻繁に用いられてきた曲面生成手法である [5]。曲面の生成は断面曲線を軌道曲線に沿って補間することで行われる(図1参照)。スキニング手法は生成できる曲面の自由度が高く、生成される曲面をイメージしやすいため利用価値が高いが、これまでスキニング手法で細分割曲面を直接生成する手法は存在しなかった。

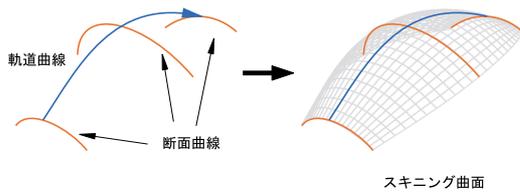


図 1: スキニングによる曲面生成

## 2 本手法の概要

本手法ではデザイナーが曲線を入力することによってイメージ通りの曲面を生成できることを目標に、スキニング手法を細分割曲面に応用した二つの曲面生成手法を提案する。一つは生成される曲面の滑らかさを重視したスムーズスキニング手法で、もう一つは特徴を重視したプリーツスキニング手法である。

どちらの手法においても入力曲線には細分割曲線を用い、細分割曲線の制御点を入力することで断面曲線、軌道曲線の入力を行う。必要に応じて前者では初期制御メッシュの行、列数の指定、後者では対応付けの修正等を行うことにより曲面の生成が完了する。次章からはそれぞれの手法について解説していく。

## 3 スムーススキニング手法

提案する手法の一つであるスムーズスキニング手法では、滑らかな曲面にフィッティングすることによって細分割曲面を生成する(図2参照)。フィッティングの目標形状としては入力される曲線群から仮想的に定義される仮想的な  $u-v$  曲面を使用し、これに柵目状の初期制御メッシュを  $u-v$  パラメータで対応付けてフィッティングする。

### 3.1 仮想 $u-v$ 曲面

フィッティングの目標形状として用いる仮想曲面は、各断面曲線の形状を滑らかに補間する必要がある。本手法では各断面曲線を軌道曲線に沿って移動することで仮想的に生成される複数のスイープ曲面を、重みをつけてブレンドして使用する。例えば断面曲線が2本与えられた場合には、2枚のスイープ曲面に軌道曲線方向のパラメータ  $v$  によって0から1の線形の重みをつけてブレンドすることで仮想  $u-v$  曲面を定義する。

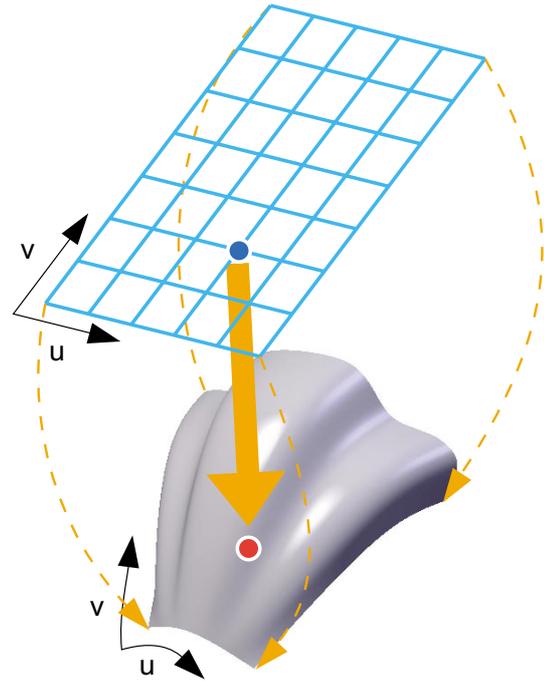


図 2: スムーススキニング手法のイメージ図

### 3.2 初期制御メッシュのパラメータの決定

生成される細分割曲面の初期制御メッシュは、柵目状に整ったものを作成し、これに  $u-v$  パラメータを与えて仮想曲面と対応付ける。パラメータは等間隔である方が生成される曲面は滑らかになるが、それでは仮想曲面の形状をうまく捕捉できないため、等間隔のものほかに柵目のパラメータを最適化したものを用意することにする。

パラメータの最適化は各断面で、どの断面曲線方向のパラメータ  $u$  を用いてフィッティングすれば元の断面曲線に近づけられるかを考えることによって行う。それによって柵目の各列に与えるパラメータ  $u$  が決定される。実装においてはまず各断面の制御点数だけ適当にパラメータを振った後、そのパラメータで断面曲線にフィッティングした曲線と、元の断面曲線とのエラーが小さくなる方向にパラメータを改善していくことで最適化を行った。曲線のフィッティングには次に説明するものを曲線に応用した。

### 3.3 フィッティング

柵目状に作成した初期制御メッシュの各制御点に対して、与えられた  $u-v$  パラメータから仮想  $u-v$  曲面上に目標極限位置が決定される。実際のフィッ

ティングは Halstead の手法 [6] によって行う。細分割曲面における各制御点の極限点は、周辺の頂点座標に極限マスクと呼ばれる重みをつけて平均することで計算することができる。Halstead の手法はこのマスク  $L$  と目標極限位置  $V_T$  から以下の連立方程式を解くことで、元の制御点位置  $V_0$  を逆計算することによりフィッティングを行う。

$$LV_0 = V_L \quad (1)$$

## 4 プリーススキニング手法

本論文で提案するもう一つの手法であるプリーススキニング手法では入力した断面曲線の特徴が重視される。細分割曲線で与えられた各断面曲線において、特徴にはそれぞれ対応する制御点が存在するはずである。実際には本手法では断面曲線の制御点を重視して曲面を生成する。全体の流れは以下ようになる (図 3 参照)。

1. 制御点間をパラメータによりデフォルトの対応付け
2. エディタによる対話的な対応付けの修正
3. 制御点の補間により初期制御メッシュの作成

本手法の大きな特徴として、はパラメトリック曲面では表現するのが困難な曲面内部での特徴の統合といった表現を行うことができる。

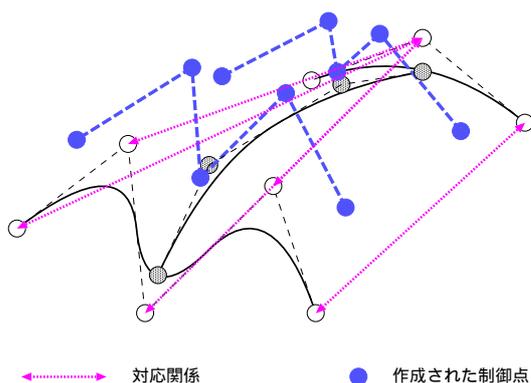


図 3: プリーススキニング手法のイメージ図

### 4.1 対応付けの作成

デフォルトの対応付けでは基本的にパラメータの一番近いもの同士を対応付ける。各制御点を隣接する断

面曲線の一つ以上の制御点に対応付けるが、これにより出来る面はできる限り四角形で、残りは三角形になるようにする。これは曲面の流れを軌道曲線方向にするためと、細分割曲面の特異点をなるべく減らすためである。

対応付けはエディタによってインタラクティブな修正が可能である。エディタには各断面曲線の制御多角形と各制御点の極限点、仮に生成した曲面、現在の対応付けが表示され、曲面上に指示線を入力することによって修正が行える。指示線としては図 4 に示した以下のようなものが入力可能である。

- 制御点同士を結ぶ直線
- 複数の制御点を囲む閉曲線
- 片方の断面の複数の制御点を囲み先端が内部にあるようなくさび形

はじめの二つは制御点同士の対応を指定し、最後の一つは本手法の特徴である、複数の特徴が曲面内部で統合される効果を指定する。

### 4.2 制御メッシュの作成

曲面内部の制御点の作成は、特徴の統合の有無によって多少異なる。まず最初に各断面曲線の制御点を、軌道曲線に乗せる基準点からの差分として計算し直しておく。それから軌道曲線の各制御点ごとに、それに対応する内部の制御点列を作成していく。作成する制御点位置は対応付けられた制御点の差分同士を、軌道曲線上のパラメータ  $v$  で補間し、それを軌道曲線上に付加することで計算される。

特徴の統合がある場合にはまず統合点を先に計算しておく。統合点は統合する制御点の重心位置と統合先の制御点を、統合する位置のパラメータ  $v$  で補間することで計算する。統合点を計算したら、その前後で別々に内部の制御点を計算していく。このとき統合位置のパラメータから計算した、統合前後でのローカルパラメータを用いる。

## 5 適用結果と考察

図 5 はスムーズスキニング手法で生成した細分割曲面の例である。図中段の等間隔のパラメータを使用した例では、各断面の制御点数がある程度ないとフィッ

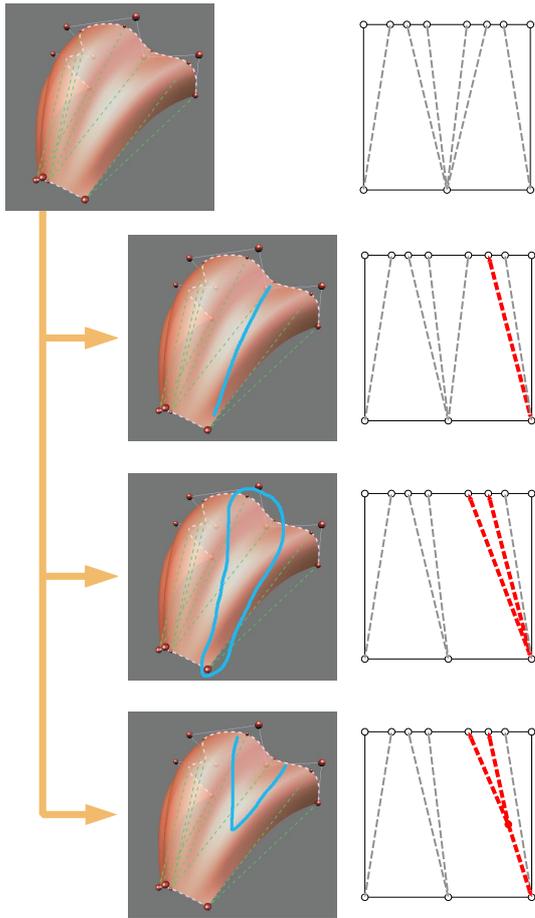


図 4: 対応付けの修正エディタ

ティング目標の仮想曲面に近づけられないことが明らかである。パラメータを最適化した図下段の例では比較的少ない制御点数にも関わらずフィッティング目標に近い曲面が得られている。

図 6 はプリーツスキニング手法で生成した細分割曲面の例である。同じ断面曲線と軌道曲線で、対応付けの違いのみから全く異なる曲面が生成されている。

このように、本手法では入力された曲線群からイメージされるものに近い、滑らかな曲面を用意に生成することが可能となる。提案した 2 種類の手法からは異なる性質の曲面が生成される。スムーズスキニング手法で生成される曲面は、断面曲線全体同士が均等に対応づけられ、柵目状の整った初期制御メッシュを持つ。生成される曲面は境界付近を除いて完全に  $C^2$  連続の B スプライン曲面となり、直接解析することも可能である。一方プリーツスキニング手法では、断面曲線の部分同士が自由に対応づけられ、より複雑な形状を表現することができる。

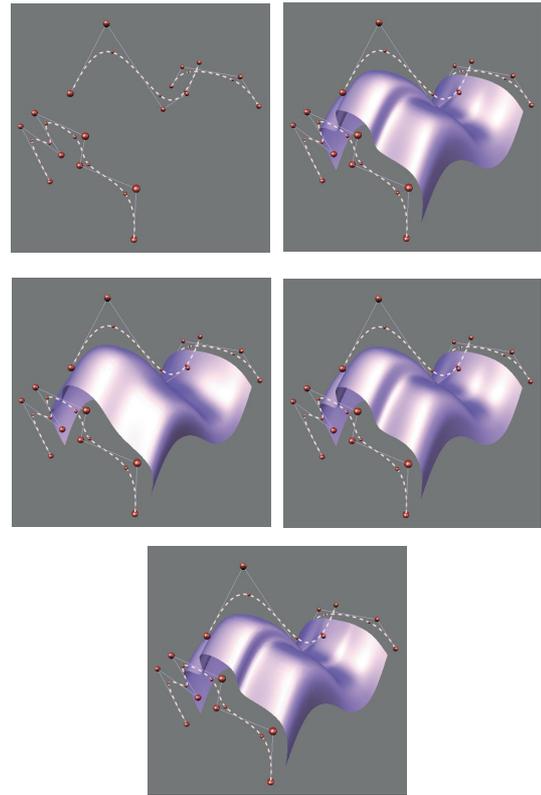


図 5: スムーススキニング手法の適用例 ( 上段左: 入力曲線群、上段右: 仮想  $u-v$  曲面、中段左: 等間隔・各断面 8 制御点、中段右: 等間隔・各断面 16 制御点、下段: 最適化・各断面 8 制御点)

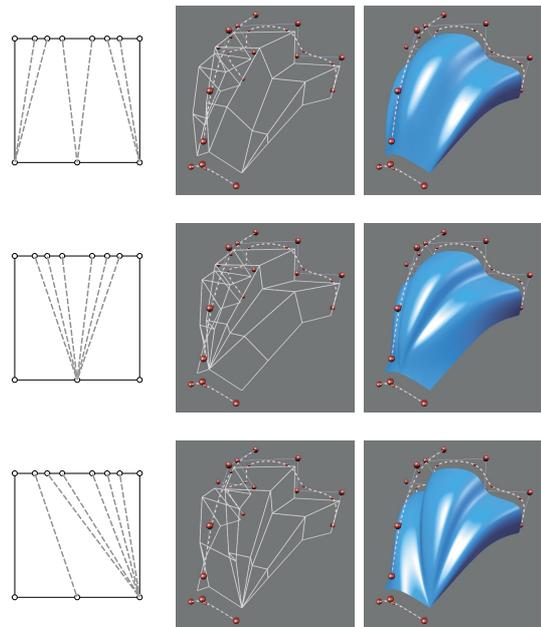


図 6: プリーツスキニング手法の適用例 (左列: 対応付け、中央列: 初期制御メッシュ、右列: 細分割曲面)

図7はプリーツスキニング手法を用いて車のボディ形状の設計を試みた例である。与えられた断面曲線の特徴同士の自由な対応付けが活かされ、複雑な形状が一枚の細分割曲面で表現できている。同じ入力曲線からスムーズスキニング手法で生成した曲面が図8であるが、こちらでは断面曲線全体が均一に対応づけられてしまうため、それぞれの特徴がぼやけてしまっている。

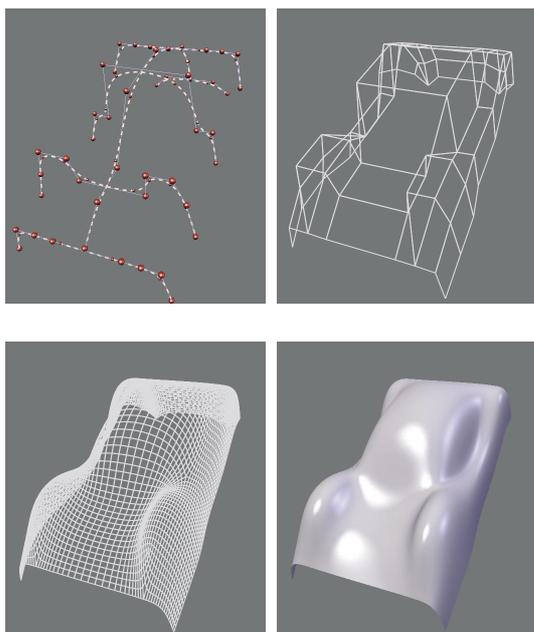


図 7: プリーツスキニング手法によるボディの設計 (左上: 入力曲線群、右上: 初期制御メッシュ、左下: 3回細分割後のメッシュ、右下: 細分割曲面)

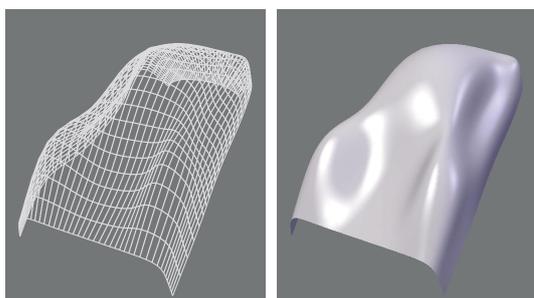


図 8: スムーズスキニング手法によるボディの設計 (左: 3回細分割後のメッシュ、右: 細分割曲面)

また、プリーツスキニング手法では、本手法の特徴となっている図9に示したような特徴の統合が可能である。これによりパラメトリック曲面では表現し

づらい複雑な形状を簡単に生成でき、本手法のパラメトリック曲面に対する大きなメリットとなる。

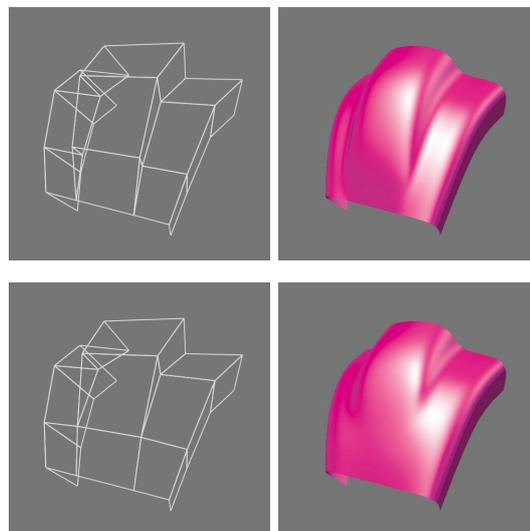


図 9: 2断面曲線から生成した曲面の特徴の統合の例 (上段: 断面曲線での統合、下段: 曲面内部での統合)

## 6 今後の課題および展望

本手法では均一な対応付けと部分同士の自由な対応付けの2種類を選択出来る。しかしこれらは言わば両極端であり、その間を補完するような、部分同士を均等に対応付ける方法が必要と考えられる。同時に、本手法では直感的に曲面生成を行えることを主眼としているため、対応付けの指定方法や、インターフェースも改善される必要がある。

本質的な問題としては、本手法では特異点を曲面の流れを転換する点として、有効に利用するというアプローチをとってきたが、厳密には特異点付近での連続性の低下を回避できていない。この問題に対する根本的な解決は現段階では存在しておらず、どうしても $C^2$ 連続が必要である等の場合には曲面全体を再構築するしか方法がない。

本手法で生成された曲面は、単一解像度のCatmull-Clark曲面であり、細分割曲面のプーリアン操作 [3] や、トリミング操作 [2] と組み合わせて使用することができる。さらに、これから出てくるであろう設計・解析ツールと組み合わせることができれば、細分割曲面のCAD分野での利用への一助になると考えられる。

## 参考文献

- [1] D. Zorin and P. Schröder. Using subdivision surfaces. In *Game Developer's Conference 2001 Course Notes*, 2001.
- [2] N. Litke, A. Levin, and P. Schröder. Trimming for subdivision surfaces. In *Technical report, Caltech*, 2000.
- [3] H. Biermann, D. Kristjansson, and D. Zorin. Approximate boolean operations on free-form solids. In *Proceedings of SIGGRAPH 2001*, 2001.
- [4] E. Catmull and J. Clark. Recursively generated b-spline surfaces on arbitrary topological meshes. In *computer-aided design, Vol.10, No.6*, pp. 350–355, 1978.
- [5] Y. Tokuyama. Skinning-surface generation based on spine-curve control. In *The Visual Computer Vol. 16, No. 2,*, pp. 134–140, 2000.
- [6] M. Halstead, M. Kass, and T. DeRose. Efficient, fair interpolation using catmull-clark surfaces. In *Proceedings of SIGGRAPH '93*, pp. 35–44, 1993.