

# 効率的なメッシュ形状変形のための3次元ユーザインタフェースシステム

北海道大学 ○古川 比呂武, 伊達 宏昭, 小野里 雅彦  
要 旨

本研究では効率的なメッシュ形状変形を目的とした, 立体視, 触力覚提示, 両手操作を組み合わせた新たな3次元ユーザインタフェースシステム, ならびに変形後形状に対して高速な触力覚提示を可能にする探索木構造を提案し, 評価実験によってその有効性を示す。

## 1 はじめに

三角形メッシュモデルの形状変形技術は CG 用キャラクターやアニメーションの生成から, 工業製品設計などの幅広い分野において有用な技術である. その中でも制御点操作による自由形状変形手法<sup>1)</sup>は, 直感的な変形が可能であり, ユーザが望む形状へ容易に変形を行える. しかし, 現状広く用いられている 2D マウスと 2D ディスプレイによって構成されるインタフェースは, この手法による変形を行う際に, モデルの位置・姿勢変更と制御点の操作を複数回, 交互に行うことが多く, 効率的に変形操作が行えているとは言い難い. そこで本研究では効率的なメッシュ形状変形のための立体視と触力覚提示, 両手操作を組み合わせた新たなユーザインタフェースシステムを提案する. 更に, 変形後形状の局所領域を高速に探索可能な新しい探索木を提案する. これを用いることで効率的な触力覚提示が可能になり, 即座に形状に触って変形の結果を確認することが可能となる.

## 2 メッシュ形状変形のためのユーザインタフェースシステム

### 2.1 提案インタフェースシステムの概要

制御点操作によるメッシュ形状変形において, インタフェースに要求されるものとして以下が挙げられる.

- (1)変形したいモデルの部分の提示や変形結果の確認のため, モデルの位置・姿勢制御をすばやく行えること
- (2)制御点の指定・移動を容易に行えること
- (3)変形中や変形後の形状を容易に認識できること

本システムのハードウェア構成を図 1 に示す. 本システムは, 6 自由度入力と 3 自由度力覚提示が可能な触力覚提示デバイス (PHANTOM Omni) 2 台と裸眼立体視ディスプレイ (LL-151D) によって構成されている. 本システムでは一方の PHANTOM で 3 次元形状モデルの位置・姿勢制御を行い, もう一方でモデルに触れることと制御点の指定・移動を行う. ユーザはこれらの操作を, 立体視を行いながらの両手 6 自由度入力で容易に, かつ同時に行える. また, 提案する探索木を用いることによって効率的な触力覚提示が行え, 変形後形状に即座に触って変形の結果を確認できる.

### 2.2 立体視の実現方法

本システムが使用する立体視ディスプレイは視差バリア方式を用いている. この方式では, ディスプレイのバックライトと液晶の間にスイッチ液晶による視差バリアを設けることにより, 光がサブピクセル単位で分離され, 左右の眼には異なる光が届き裸眼立体視が可能となる. 立体視用の画像は片目用の RB 成分と G 成分をピクセル列ごとに分けて描く必要がある. 本システムでは OpenGL のカラーマスクとポリゴンの点描処理を組み合わせることで, このサブピクセル単位の描画を行った.

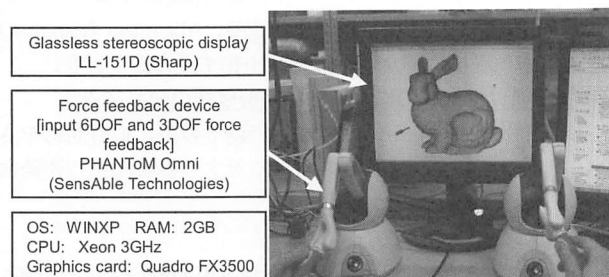


図 1 提案システムのハードウェア構成

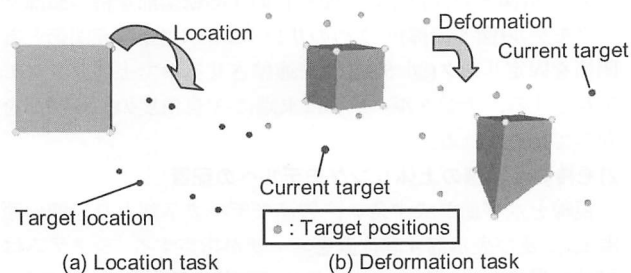


図 2 実験を行った 2 つのタスク

### 2.3 触力覚提示の実現方法

本研究では触力覚提示のために SensAble Technologies が提供する Haptic Library API (HLAPI)<sup>2)</sup>を利用した. HLAPI では触るためのモデル提示を OpenGL のコマンドで行う. 本論文ではこのモデル提示をハプティックレンダリングと呼ぶ. デバイスに提示する力は HLAPI が自動的に計算を行い, 力の更新もハイレート (約 1kHz) に自動で行う.

### 2.4 提案システムの有効性評価

2.1 節で述べたメッシュ形状変形に対する要求事項のうち(1)(2)に対応する, 位置・姿勢制御タスクと変形タスクの 2 つのタスク(図 2)の操作完了時間を計測することで提案システムの有効性の評価を行った.

位置・姿勢制御タスクでは, 目的の位置・姿勢が 8 つの球によって指定され, そこに立方体の頂点を合わせる操作を行う(図 2(a)). また変形タスクでは立方体の各頂点に対する目的の位置が球で表示され, その中でランダムに選ばれた 1 つが現在のターゲットとして異なる色で強調され表示される(図 2(b)). 立方体の頂点を現在のターゲットに移動させるとターゲットが消え, 新たなターゲットが残りの中からランダムに選ばれる. この操作を繰り返し全てのターゲットが消えると変形タスクが完了となる.

本研究では 20 代前半の男性 7 人を被験者として, 表

1に示した4つのインタフェースデバイス構成で実験を行った。表2にそれぞれのタスクの平均操作完了時間を示す。今回の実験では本システム（Case4）を使用した立体視を行いながらの両手6自由度入力により、現在広く使用されているインタフェースデバイス構成（Case1）に比べて、操作完了時間の合計を約60%短縮できた。結果として本システムがメッシュ形状変形に必要な操作を効率的に行うことが可能であるといえる。

### 3 BBKD木を用いた効率的な触力覚提示

#### 3.1 局所ハプティックレンダリングによる効率化

ハプティックレンダリングはモデルの三角形数が膨大になると、レンダリングにかかる時間が増加してしまう問題がある。そこで本研究では変形後形状の局所領域を高速に探索可能な探索木であるBBKD木（Bounding-Box based K-D tree）を提案する。BBKD木を用いてデバイス先端近傍の局所領域を探索することによりハプティックレンダリングに必要な三角形数を減らすことができ、効率的なハプティックレンダリングが可能になる。

#### 3.2 BBKD木

BBKD木はk-d木とバウンディングボックスを組み合わせたものであり、2分探索木である。図3に2次元のBBKD木の構造とBBKD木構築時の三角形集合の分割例を示す。BBKD木の構築は与えられた三角形集合を、2つの部分集合に分割する操作を繰り返すことにより行われる。分割は分割軸に沿って三角形の重心と分割値を比較することにより行われ、分割値は三角形の重心集合の中央値が用いられる。また、分割軸はx, y, z, x...の順番に選ぶ。分割操作の繰り返しの結果としてBBKD木の葉ノードは三角形集合とそのバウンディングボックスを持つ。また各ノードはその子孫の葉ノードが保持するバウンディングボックスの分割軸に対する最大値と最小値を持つ。

BBKD木を用いることで、ハプティックレンダリングに必要なデバイス先端近傍の範囲が与えられたとき、ノードの持つ最大値と最小値によって定義される範囲がその範囲と重複しているノードのみ探索を行うことにより、その範囲内の三角形を見つけ出すことができる。

BBKD木はモデルが変形されたときに、モデルの変形した領域に対応する部分木のノードの持つ最大値と最小値の更新を行うことで、探索木の再構築を行わずに変形後のモデルの局所領域探索を行うことができる。形状変形を行う部分が定義された際に、その部分に対応するノードの探索を行い、変形終了時にはそれらのノードのうち、葉ノードのバウンディングボックスの更新を最初に行う。その後、更新されたバウンディングボックスを参照することで木の下層から各ノードの持つ最大値と最小値の更新を行う。

#### 3.3 BBKD木の適用結果

本研究ではメッシュ形状変形手法として、水野ら<sup>1)</sup>の重心座標表現を用いた自由形状変形を用いた。この手法では、凸多面体をハンドルとしてモデルの変形したい部分に作成する。ハンドル頂点が制御点であり、ユーザは制御点を移動することによってモデルの変形を行うことができる。50万三角形のモデルに対して図4に示す変形を行った場合、BBKD木の更新が2.2msで行え、

ユーザは変形結果を直ちに触って確認できるようになった。

### 4 結論

本論文では、メッシュ形状変形のための立体視と2台の触力覚提示デバイスを組み合わせた新たな3次元ユーザインタフェースシステムを提案した。また、それに対して評価実験を行うことで、効率的なメッシュ形状変形操作を可能にすることを確かめた。更に、変形後形状に対して効率的な触力覚提示を可能にするBBKD木を提案し、変形後の形状に対してユーザが変形結果を直ちに触って確認することを可能にした。

#### [参考文献]

- 1) G. Mizuno, et al., A Parametric Deformation Method for Mesh Models based on Barycentric Coordinates, Proc. of Visualization, Imaging and Image Processing 2006, 319-324, 2006.
- 2) SensAble, OpenHaptics Toolkit - Programmer's Guide, 2005.

表1 実験で用いたインタフェースデバイス構成

	Display	The pointing and dragging device	The changing orientation and position device
Case1	Mono	Mouse*(2DOF)	
Case2	Mono	Mouse*(2DOF)	T rackball(2DOF)
Case3	Stereo	PHANToM Omni(6DOF)	T rackball(2DOF)
Case4 (our system)	Stereo	PHANToM Omni(6DOF)	PHANToM Omni(6DOF)

\* All translation was done in the plane parallel to the rendered screen

表2 被験者の平均操作完了時間

	Completion time of the location task [s]	Completion time of the deformation task [s]	Total [s]
Case 1	39.72	47.25	86.97
Case 2	58.50	52.81	111.31
Case 3	22.60	25.96	48.56
Case 4	5.09	27.88	32.97

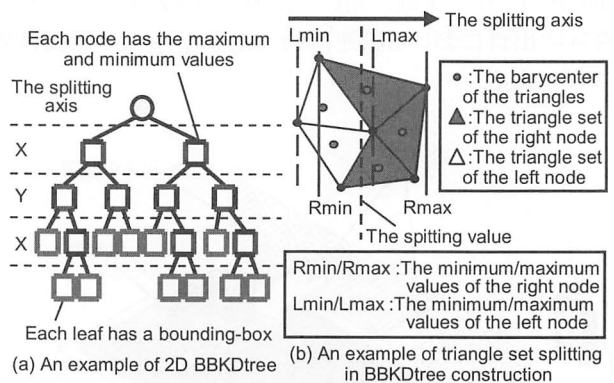


図3 2次元BBKD木の例と三角形集合の分割例

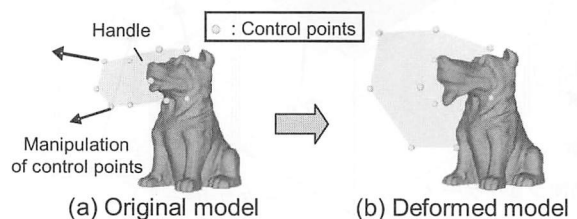


図4 提案システムを用いた変形例