

ガラス細工メタファーによる自由形状モデリング手法の提案

櫛田 英功 石井 雅博 小池 康晴 佐藤 誠

東京工業大学 精密工学研究所

本研究では、直感的な操作により初心者にも容易に扱うことのできる自由形状モデリングのためのシステムを実現する。現実世界での形状生成法としてガラス細工に着目し、これをメタファーとして導入した変形法を新たに提案する。本手法では、加熱モードと変形モードの二つのモードで作業を行う。加熱モードではバーナーの炎をメタファーとする「加熱立体」を用い、ポリゴンメッシュの頂点にガラスの温度に対応する「加熱度」を与える。変形モードでは、7自由度の入力デバイスを用い、各頂点をデバイスからの入力に加熱度を乗算した分だけ移動させることで変形を実現する。評価実験により提案手法の有効性を示す。

A Suggestion of Free Form Modeling Method Metaphorically Based on Glasswork

Hidenori Kushida Masahiro Ishii Yasuharu Koike Makoto Sato

Precision & Intelligence Laboratory
Tokyo Institute of Technology

It is not easy for novice at computers to design 3D objects that have curved surfaces, as it is not intuitive to transform 3D objects with keyboard, 2D mouse, and 2D figures on the computer display. This thesis describes a virtual work environment to design 3D objects using a 3D mouse. A virtual material and a virtual tool, inspired by glasswork, are proposed. In the proposed environment, user designs 3D objects in 2 modes. In the 1st 'heating mode', user assigns 'heating values' using 'heating objects' as properties of vertices that compose a polygon mesh. In the 2nd 'deformation mode', vertices are moved by 3D mouse depend on those 'heating values'. I show effectiveness of the suggestion by experimental

1 はじめに

1.1 研究の背景

コンピュータの処理能力の向上により、計算機上で容易にグラフィックスを扱うことができるようになった。特に近年では、人間や動物などの形状を計算機上の3次元モデルとして構築し、映像として表現することが必要とされている。

従来そのようなモデルの製作は、3面図で表現された画面上で、頂点や面を操作して行うものが一般的であった。しかし、操作の対象が3次元空間であるにもかかわらず、2次元的な操作しかできないマウスを用いているためユーザーインタフェースとして不十分である。自由度の少なさは多数のメニューからの選択による機能の切り替え等によって補われているが、故に操作の習熟のためには多くの時間を要する。また、その操作体系を習熟したものでなくては、意図した作業を行うことが難しく、初心者が自分のイメージした通りの形状を作ることは困難であるという問題がある。

より多くの自由度をもった入力デバイスは既に存在するが、従来のモデラはユーザーインタフェースや変形の手法などがマウスによる2次元的操作を想定したものとなっているため、そのまま利用しただけでは、デバイスの利点を生かしきれない。したがって、初心者が扱うことができる程度にまで直感性の高いモデリング環境を構築するためには、それに適したユーザーインタフェースや変形の手法そのものを考えなくてはならない。

現実の世界において、意図した形状を何らかの手段を使って作ることは個人差はあるにせよそれほど難しいことではない。我々は普段の生活の中で、形状生成のために必要な技術を自然と身につけている。したがってコンピュータを利用したモデリングの場合にも現実の世界における作業を意識した方法を用いることによって、初心者にも扱うことのできるモデリング環境の構築が可能であると期待できる。

1.2 研究の目的

本研究では、初心者でも扱うことができる3次元自由形状モデリング環境の実現を目的とする。現実世界における形状生成法としてガラス細工に着目する。ガラス細工は3次元自由形状の生成手段として非常に優れた特徴をもっているため、これをメタファーとした新たな変形手法を提案する。7自由度のデバイスを入力として用いる試作システムにより提案手法の有効性を検証する。

1.3 関連研究

従来の3面図を用いた手法によるモデリングは、操作が複雑であるため習熟に時間がかかり初心者が思い通りの形を作ることは困難であった。そこでこれまでに、より簡単で直感的な操作によってモデリングを行うための試みがいくつかなされている。

Zelezik らによる SKETCH[1]では、平面上にあらかじめ決められた一定のルールにしたがって図形を書くことにより、それを自動的に3次元化してモデリングを行う手法実現している。また同様の試みとして五十嵐らによる Teddy[2]では平面にかかれた曲線をもとに、その曲線を輪郭とする閉曲面を作りモデリングを行う方法を実現している。これらのシステムは、特定の形状生成に対しては非常に直感的な操作性を実現しているが、従来のマウスやタブレットのような2次元入力デバイスを使用しているため、ひねって曲げるというような実際に3次元的な操作が必要となるような場面においては3面図による手法と同様の不便さが残っている。

入力に多自由度のデバイスを用いることによってモデルの移動や編集などの操作性を大きく向上させたシステムとしては Liang らによる JDCAD[3]や Sachs らによる 3-Draw[4]などが挙げられる。HMD や CAVE のような没入型ディスプレイを用いることによって、立体形状の把握を容易にさせるシステムも提案され

ている[5][6][7]。

また自由度を増やすだけではなく状況に応じて自由度を制限することによって操作性を向上させる試みも成されている[6][7]。

しかしこれらのシステムはあらかじめ用意された、球、立方体、円錐などの基本図形を組み合わせる方式のものであり、作成可能な形状に制限があるため、人体や動物などの複雑な曲線を持った形状のモデリングに適したものではない

2 モデラの基本設計

コンピュータ上でCADの扱いに慣れていないものが思い通りの形状を生成するのは難しいが、実世界においては人により上手下手はあるにせよ、何らかの手段で意図した形状を作ることが著しく困難であることはない。したがって、コンピュータ上での作業においても、実世界における形状生成の仕方を再現することにより、直感的に意図した形状の生成ができると思われる。

現実世界には木工や粘土細工など様々な特徴をもった手法が存在するが、本研究では上記の条件を満たす形状生成法としてガラス細工に着目する。ガラス細工には次のような特徴がある。

- ・バーナーによる加熱により、変形領域がさまざまに指定できる
- ・加熱の程度により変形の程度を制御できる
- ・加熱により表面が着色されることにより、上記2点が明示的に表現される
- ・ガラスの母体と変形部を巧みに操ることにより変形部分を6自由度操作できる
- ・加熱部に息を吹き込むことで局所的に膨らますことができる
- ・強く加熱することにより、表面形状を滑らかにすることができる
- ・加熱、冷却の繰り返しにより上記操作が反復的に可能

これらの特徴は、上記の条件を満たし、形状生成の手段として非常に優れているため、これら

をメタファーとしたモデリング手法を提案する。ガラス細工での作業は大きく分けて、

- ・変形させたい部分を熱し可塑性を増す
- ・熱した部分を曲げる・引っ張る

という2つの行程からなる。本手法では、これらを2つのモードに対応させ、それぞれを『加熱モード』、『変形モード』とする。

加熱モードではガラスの温度をメタファーとする『加熱度』とバーナーの炎をメタファーとした『加熱立体』を用いて作業を行う。

変形モードでは入力に7自由度+2ボタンのデバイスを用い、加熱された部分に対して並進・回転・拡大縮小・スムージングの変形を行う。ここで7自由度のデバイスとは並進3、回転3の6自由度に連続値入力のための1自由度を加えたものを指す。

3 ガラス細工メタファーによるモデラの構築

3.1 加熱モード

このモードでは変形対象にバーナーの炎をメタファーとした『加熱立体』を用い、『加熱度』の分布を与えることで、変形させたい領域とその量を指定する。

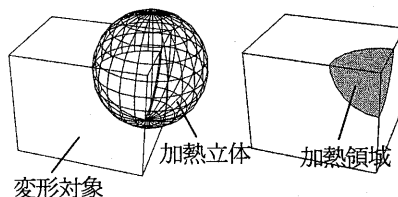


図1 加熱立体と加熱領域

3.1.1 加熱立体

本手法ではバーナーでの加熱に対応した操作として、大きさ・形状を有する『加熱立体』を導入して加熱操作を行う。デバイスのボタンを押している間だけ加熱が行われ、加熱される個所は加熱立体と変形対象とが干渉する領域によって決定される(図1)。またボタン操作による切り替えにより、同様の方法で冷却することも可能である。

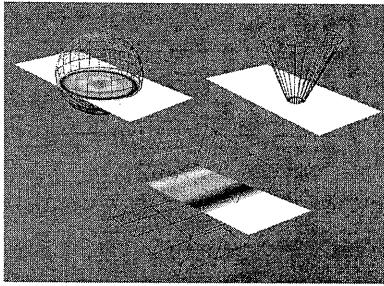


図 2 加熱立体の形状と加熱領域

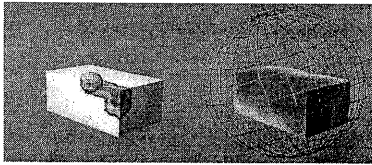


図 3 加熱立体の大きさと加熱領域

本研究では変形の対象をポリゴンメッシュとするので、加熱の対象はポリゴンを形成する頂点となる。したがって加熱立体の中に含まれる頂点が加熱の対象となる。

加熱立体の形状によって変形対象との重なり方が変わるため、より自由な領域指定をするためには加熱立体の形状にいくつかのバリエーションを持たせる必要がある。試作システムでは球・円錐・立方体の三種類の形状を用意した(図2)。また、デバイスの7自由度目の入力に対応して立体の大きさを変化させるため(図3)、加熱しようとする領域の形状に応じて適切な大きさ・形状の加熱立体を選択することが可能である。

3.1.2 加熱立体の表示法

加熱立体表示には次のような条件が必要である。

- ・変形対象との干渉の様子がわかること
- ・加熱個所が直接見えること
- ・道具として変形対象と区別できること

表示の方法は図4に示すような四種類の方法が考えられるが、この条件を満たすのはcのワイヤーフレームとdの隠面消去をしないアルファブレンディングによる方法である。cに比べdのほうが境界をはっきりと示されるが、

ハードウェア構成によってはアルファブレンディングが利用できない場合があることや、加熱立体の色が加熱領域を示す色とブレンディングされて見にくくなる場合があるため、試作システムではこの2つの表示方法を切り替えて使用できるように設計されている。

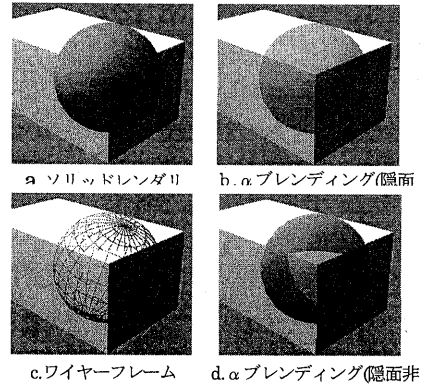


図 4 加熱立体の表示法

3.1.3 加熱度

実際のガラス細工では加熱によるガラスの温度の変化により変形の程度を制御することができるが、この特徴を取り入れるための手段として、加熱の度合いを示す『加熱度』を変形対象の頂点の属性として導入する。この加熱度の大きさにより変形量を制御する。

加熱立体の内部にはあらかじめ温度の分布が定義されているため、同じ加熱立体に含まれる頂点でも重なって部分に定義されている温度によって与えられる加熱度は変化する。

加熱度の大きさはその頂点自身の色として表現される。実際のガラスを加熱した場合には、赤の成分や明るさが単調に増加する。しかし単色グラデーションによる視覚化は微妙な加熱度の変化を認識することが困難であるため、本手法では図5に示すように色相の変化により加熱度の大きさを表現する。

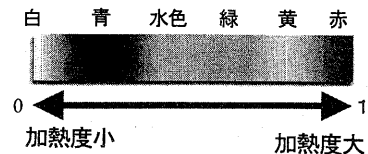


図 5 加熱度の色相による表現

3.2 変形モード

このモードでは加熱モードで決められた加熱度の分布に対し、7自由度の入力デバイスを用いて変形を行う。

3.2.1 並進変形

並進変形は入力デバイスの並進成分が反映される変形である。入力デバイスの並進成分に加熱度を乗算した距離が各頂点の移動距離となる(図6)。変形対象の頂点座標を $V_1 \sim V_n$ 、各頂点に与えられた加熱度を $h_1 \sim h_n$ とするとき、入力デバイスの並進変化成分を x とすると変形後の頂点座標 $V_1' \sim V_n'$ は以下の式で表される。

$$V_k' = V_k + h_k x \quad (k=1 \sim n) \quad (1)$$

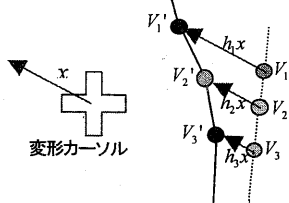


図6 並進変形

3.2.2 回転変形

回転変形は入力デバイスの回転成分が反映される変形である。各頂点は変形カーソルの位置を中心として、入力デバイスの回転成分に加熱度を乗算した角度だけ回転する(図7)。変形カーソルの中心座標を C とするとき、入力デバイスの回転変化成分を θ とすると変形後の頂点座標 $V_1' \sim V_n'$ は以下の式で表される。

$$V_k' = C + R_k (V_k - C) \quad (k=1 \sim n) \quad (2)$$

$$R_k = R(h_k \theta) \quad R(\theta) \text{は回転行列}$$

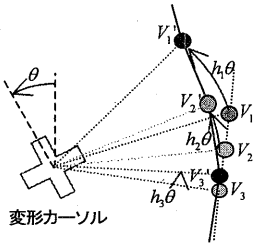


図7 回転変形

3.2.3 拡大縮小変形

拡大縮小変形は入力デバイスの7自由度目の成分が反映される変形である。各頂点は変形カーソルの位置を中心として、変化量 a に加熱度乗算した割合だけ拡大(移動)する(図8)。 a が正の時は拡大、負の時に縮小である。入力デバイスの変化成分を a とすると変形後の頂点座標 $V_1' \sim V_n'$ は以下の式で表される。

$$V_k' = V_k + h_k a (V_k - C) \quad (k=1 \sim n) \quad (3)$$

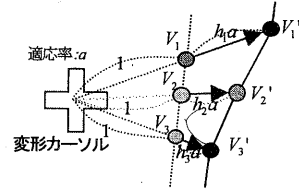


図8 拡大縮小変形

なお、並進・回転・拡大縮小は説明の便宜上分けて述べたが、実際にはこれらの変形へ入力デバイスの姿勢として1度に入力可能で、操作者は個々の変形を意識せずとも入力デバイスを操作することで直感的に扱うことが可能である。

3.2.4 スムージング

この変形は局所的な凹凸を滑らかにする変形である(図9)。ある頂点 V_k に隣接する頂点の平均座標を $Vave_k$ 、スムージングの強度をあらわす定数を S とするとき、スムージング適応後の頂点座標 $V_1' \sim V_n'$ は以下の式であらわされる。

$$V_k' = Vave_k + h_k S (Vave_k - V_k) \quad (4)$$

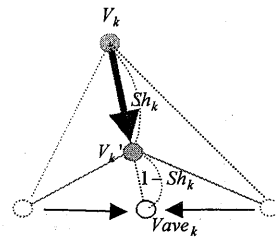


図9 スムージング

4 評価実験

提案手法の有効性を検証するため図10に示すような形状のモデリングを提案手法と従来手法（3面図方式）とについて表1に示す4人の被験者に行ってもらいデータを取った。

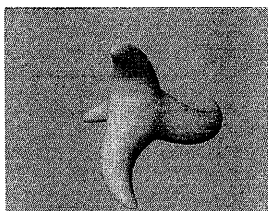


図 10 実験の課題

被験者	三面図での作業経験
A	なし
B	なし
C	あり (習熟度低)
D	あり (習熟度高)

表 1 被験者リスト

各被験者の平均作業時間を図11に示す。どの被験者も従来法に比べ提案手法での作業時間が短くなっている。特に3面図方式の熟練者である被験者Dにおいても作業時間が半分程度になっており、提案手法による作業の効率性が示されている。

またこの実験は両手法による使い方を説明した後に行ったが、被験者が理解に要した時間は3面図方式では約30分程度であったのに対し、提案手法では5分ほどであった。理解に要する時間にこれだけ差があるにもかかわらず、提案手法による作業時間が短くなっていることは、提案手法が初心者でも扱うことができる直感的な手法であることを示している。

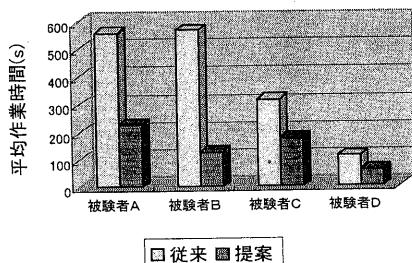


図 11 各被験者の平均作業時間

5 まとめ

直感的なモデラの構築のため、現実世界の形状生成法であるガラス細工に注目し、これをメタファーとする新たなモデリング手法を提案した。評価実験により提案手法の効率性・直感性を示した。

本報告では7自由度の入力デバイスを用いたが、さらに力覚の提示を行うことで、より操作性が向上すると考えられるため、力覚を用いたシステムの構築を今後の課題としたい。

参考文献

- [1] Robert C.Zelenik, Kenneth P.Herndon, John F.Hughes, "SKETCH:An Interface for Sketching 3D Scenes", Proc.SIGGRAPH'96, pp.163-170
- [2] Takeo Igarashi, Satoshi Matsuoka, Hidehiko Tanaka, "A Sketching Interface for 3D Freefrom Design", Proc.SIGGRAPH '99
- [3] Liang J, Green M., "JDCAD: A Highly Interactive 3D Modeling System," 3rd International Conference on CAD and Computer Graphics, Beijing, China, Aug. 1993, pp. 217-222
- [4] Sachs, E., Roberts, A., Stoops, D., "3-Draw: A Tool for Designing 3D Shapes," IEEE Computer Graphics & Applications, Nov. 1991, pp. 18-26.
- [5] Butterworth, J., Davidson, A., Hench, S., Olano, T. M., "3DM: A Three Dimensional Modeler Using a Head-mounted Display,"
- [6] 清川, 竹村, 片山, 岩佐, 横矢, "両手操作を用いた仮想物体モデラ VLEGO" 電子情報通信学会論文誌, 分冊 A, Vol.J80-A, No.9, pp.1517-1526
- [7] 橋本, 高橋, 中嶋, "CAVEを用いた3次元形状モデラ", 信学技報 MVE99-46(1999-7), pp.9-16