多視点画像を用いたバーチャルクレイモデリングシステム

Virtual Clay Modeling System using Multi-viewpoint Images

上田悦子[†], 藪上勝宏^{††}, 松本吉央[†], 小笠原司[†]Etsuko Ueda[†], Katsuhiro Yabugami^{††}, Yoshio Matsumoto[†] and Tsukasa Ogasawara[†]

Abstract This paper proposes a “non-contact virtual clay modeling system.” We developed a prototype of a three-dimensional modeling system that allows users to shape “virtual clay” with their hand movements. In our proposed method, the users hand movements are observed with multiple cameras to estimate their positions. The human hand surface and the virtual clay are modeled by using subdivision surface. Using the estimated hand positions, the virtual clay is shaped based on a direct free-form deformation technique. To achieve faster processing speed, we implemented the proposed system on a PC cluster. This implemented system proves the feasibility of an intuitive virtual clay modeling system.

キーワード：バーチャルクレイ，多視点画像，サブディビジョンサーフェス，FFD，手形状推定

1. はじめに

近年のコンピュータシステムの発展に伴って，コンピュータ上での形状表現は2次元から3次元へと移ってきたが，マウスやトラックボールなどの従来のポインティングデバイスでは，ディスプレイ上での2次元的な動きしか入力できないため，3次元形状を直感的に操作することが困難であった．そのため，3次元形状操作を直感的に行うことができるインタフェースの一つとして，仮想空間にモデル化された粘土をユーザの手動作で変形する，バーチャルクレイモデリングに関する研究が数多くされている．

従来のバーチャルクレイモデリングシステムでは，3次元入力装置としてデータグローブやポジションセンサ，フォースフィードバックデバイス（PHANTOM など）を利用しているものが多い．松宮らの開発した3次元モデリングシステムは，バーチャルクレイをデータグローブで計測された手形状により変形している¹⁾．McDonnellらはPHANTOMを用いた，リアルタイム仮想彫刻システムを開発した²⁾．DebunneらもまたPHANTOMを用いて塑性体の変形を行うシステムを開発している³⁾．しかし，これらの3次元入力装置は，いずれもユーザの手に装着して，指先位置や指

の関節角度を計測する“接触型”の計測装置であり，ユーザの動作に制限を与え，拘束感を感じさせやすいという欠点を持っている．さらに，データグローブやフォースフィードバックデバイスは，高価な上に使用目的も限定されてしまう．

我々は，設計の実務環境で用いられる3次元形状操作システムのインタフェースは，非接触であることが望ましいと考えている．本論文では，非接触型計測装置による3次元位置入力方法として“手の3次元形状推定”を用いたバーチャルクレイモデリングシステムの提案を行う．従来の3次元入力手法との大きな違いは，代表的な非接触センサであるカメラを複数台用いて，3次元位置入力を行うことであり，ユーザの拘束感が少ないシステム構築が期待できる．さらに，一般的なCCDカメラを使用しており，3次元位置入力のためだけのデバイスに比べて，比較的安価にインタフェースを構築できるというアドバンテージがある．

2. システムの概要

2.1 システムの要件

Quekらは，ヒューマンコンピュータインタラクションの観点から意識的な手動作を，把持や形状作成などの操作的な手動作と，手話などの対話的な手動作に分類している⁴⁾．Quekの分類方法に従って図1に示す実際の人間の手動作例を分類すると，“じゃんけん”が対話的な手動作に，“物体把持”，“粘土細工”，“ろくろによる形状作成”が操作的な手動作に分類される．このように手動作の分類を行った上で，それぞれ30秒程度の手動作時における右手の関節角度の変化を，データグローブを用いて10人分計測した．

サンプリング周波数の違いによる，すべての動作の種類

2004年11月4日受付，2004年7月20日再受付，2004年10月14日採録

[†]奈良先端科学技術大学院大学 ロボティクス講座

(〒629-0192 奈良県生駒市高山町 8916-1, TEL 0743-72-5373)

^{††}株式会社 島津製作所

(〒604-8511 京都市中京区西ノ京桑原町 1 番地)

[†]Nara Institute of Science and Technology, Robotics Laboratory (8916-1, Takayama-cho, Ikoma-shi, Nara 639-0192, Japan)

^{††}Shimadzu Corporation

(1, Nishinokyo-Kuwabara, Nakagyo-ku, Kyoto 604-8511, Japan)

じゃんけん

物体把持

粘土細工

ろくろによる形状生成

図 1 手動作の例

Examples of human hand movement.

図 2 右手示指 MP 関節平均屈曲角度変化

Mean flexion angle of MP-joint at index finger.

図 3 右手示指 MP 関節最大屈曲角度変化

Max flexion angle of MP-joint at index finger.

における示指 MP 関節屈曲角度の変化の平均値 (5[deg] 以下の変化は変化 0[deg] とする) を図 2 に示す。対話的な手動作の一種であるじゃんけんについては、どのサンプリング周波数においても、関節角度の変化が飛びぬけて大きいことが分かる。これは、操作的な手動作時に比べて、対話的な手動作時における右手示指 MP 関節角度は、早くかつ大きく変化することを示している。次に図 3 に、じゃんけん以外の手動作時における示指 MP 関節屈曲角度変化の最大値を示す。関節角度変化は、サンプリング間隔が 33[Hz] であれば最大 15[deg]、20[Hz] では最大 20[deg] 程度、また 5[Hz] 以下の場合は最大 35[deg] 以上になることがわかる。

これらの計測結果は、粘土細工動作（特にろくろを用いた形状生成）であれば、5[Hz] 以上の推定速度（処理サイクル）で、35[deg] の関節角度変化を推定できれば、入力センサとしてカメラを用いたシステム構築が可能であることを示している。

図 4 カメラシステム

Camera system.

2.2 システム構成

手形状観測領域は、図 4 に示すような 600mm 四方の空間であり、手領域を安定して抽出するために周囲にブルーのボードを設置している。フレームには撮影カメラとして SONY 社の CCB-EX37 を 4 台マウントしてある。処理用 PC は 1 台であり、CPU は PentiumIII 1GHz Dual プロセッサ、メモリーは 1GByte である。B878 を搭載したビデオキャプチャボードを 4 枚用いて、四つのカメラ画像をそれぞれキャプチャしている。

2.3 処理の流れ

本バーチャルクレイモデリングシステムでの処理の流れは以下の通りである。

- Step1:** 多視点カメラシステム (4 台の CCD カメラ) により、観測空間内の手形状をキャプチャする。得られた画像を 2 値化し、ボクセルモデルを高速に作成するための片側距離変換マップ⁵⁾を作成する。
- Step2:** 視体積交差法によりボクセルモデルを作成する。
- Step3:** 3 次元モデルフィッティングにより手形状を推定する。
- Step4:** 前フレームの画像により推定した手形状と、現フレームの画像により推定した手形状の位置・形状の違いを基にして、手とバーチャルクレイとの干渉チェックを行う。
- Step5:** direct FFD (Free Form Deformation) を用いてバーチャルクレイの表面形状全体を滑らかに変形する。

図 5 骨格モデル
Skeletal model.

図 6 ボクセルモデル
Voxel model.

3. 多視点カメラシステムを用いた手形状推定

筆者らは、これまでに多視点シルエット画像を用いた手形状推定手法を提案し、画像キャプチャ間で約 50[deg] の関節角度変化が生じてても手形状の推定が可能であることを示した⁶⁾。本章では、提案アルゴリズムの概要とバーチャルクレイモデリングに応用するための改良点について述べる。

3.1 基本アルゴリズム

手形状推定の基本アプローチは、手を表現する 2 種類の 3 次元モデルを用いたフィッティングである。2 種類のモデルのうちの一つは、あらかじめシステム内部に記述される手のモデルである。このモデルは“骨格モデル”と呼ばれ、図 5 に示すように、手の骨格構造を表す 31 自由度のリンクと皮膚表面形状を表すポリゴンから構成される。もう一方のモデルは、各視点から得られた手形状のシルエット画像を統合して、図 6 のように 3 次元化された観測データであり、3 次元空間における手の占有領域を示す。このモデルは“ボクセルモデル”と呼ばれ、モデルフィッティング時のターゲットデータとなる。

モデルフィッティングは、ボクセルモデルの外側に位置する骨格モデルの皮膚を表現するポリゴンに対して、図 7(a) に示すようにリンク方向に力ベクトルを発生させ、この力ベクトルによって求められる関節軸に関するトルクを方向を基に、少しずつ関節角度を変化させることを繰り返して実現される。各ジョイントの回転方向の決定方法を図 7(b) の場合を例にとって説明する。図では、頂点 P_1 , P_2 と P_3 はボクセルモデルの外側に位置している。これらの頂点について、Link-1 に対して垂直方向の力 (f_1, f_2, f_3) をそれ

図 7 モデルフィッティングの仕組み
Scheme of model fitting.

ぞれ発生させる。また、Joint-1 からこれらの頂点に向かう位置ベクトルを r_1, r_2, r_3 とすると、各頂点でのトルクは $t_i = r_i \times f_i$ で与えられる。これらのトルク t_i の総和 $T = \sum_i t_i$ を Joint-1 に関するトルクとする。Joint-1 の回転軸に対する回転角補正量 $\Delta\alpha$ を、このトルク T の方向を用いて式 (1) のように決定する。

$$\Delta\alpha = K \text{sgn}(e \cdot T) \quad (1)$$

ここで K は補正ゲイン、 e は Joint-1 の回転軸方向の単位ベクトルである。図 7(b) の場合、トルク T は Link-1 をボクセルモデルの方向に倒すような向きを持つことになり、結果として Link-1 は、回転軸に対して図 7(b) 内に示すように、反時計方向に $\Delta\alpha$ 度回転する。着目している関節とリンクに関連付けられている頂点のすべてが、ボクセルモデルの内側に位置しているとき、着目している関節の回転角度の推定ができたと判断する。また頂点すべてが完全にボクセルモデルの内側に位置できない場合は、関節角度を推定している間にトルクの向きに振動が発生する。この振動を検知したときは、式 (1) 中の補正ゲイン K を徐々に小さくし、包含関係をチェックし、最終的に補正ゲインが 2[deg] になったとき $\Delta\alpha$ の 1/2 (1[deg]) だけ回転させ、その時の関節角度を、誤差を含んだまま推定結果として取り扱い、次のジョイントの関節角度計算に移る。

3.2 サブディビジョンサーフェスによる皮膚形状表現

人間の手の皮膚表面は、骨格姿勢の変化に応じて滑らかに変形する。そのため、骨格モデルの表面形状データも骨格姿勢の変化に応じて滑らかに変形できなければならない。基本アルゴリズムでの手の表面形状データは、皮膚表面を多数の小さな 3 角形のポリゴンで表現し、各ポリゴンの形状が骨格姿勢の変化に対応して変形できるように、ポリゴンの各頂点がどのリンクに対応して、その位置を変更するかをデータとして与えていた。しかし頂点間の位置関係を考慮していないため、関節を大きく曲げるなどの姿勢をとったときには、皮膚表面の滑らかな変形が保持できず、実際の手形状と大きく違う表面形状になってしまう欠点を持っていた。そこで、バーチャルクレイモデリングシステムに

図 8 サブディビジョンサーフェスによる皮膚形状表現
Representation of hand surface using subdivision surface.

図 9 カメラの位置
Camera positions for evaluation.

実装する手形状推定では、手の表面形状表現のためのポリゴン定義にサブディビジョンサーフェス (細分割曲面)⁷⁾を採用した。サブディビジョンサーフェスは、任意のトポロジーを扱える滑らかな曲面の表現方法の一つであり、一つの曲面定義で物体表面全体の形状を定義できる。指の関節角度変化による皮膚形状の変形を容易に表現できる。さらに、手の表面形状の連続性を保持しながらの変形も可能である。

一般にサブディビジョンサーフェスは、以下のようにベクトル行列の積で表現することが出来る。

$$d = Ap \quad (2)$$

$p = [p_1, p_2, \dots, p_n]^T$ は初期多面体の頂点位置の集合、 $d = [d_1, d_2, \dots, d_m]^T$ は細分割された多面体の頂点位置の集合、常に $n < m$ である。 p は“コントロールポイント”、 d は“データポイント”と呼ばれる。 A は $m \times n$ の重み行列であり、細分割のルールを表している。

実装したシステムにおける手の表面形状用の初期多面体は、実際の手を完全に含んでしまうような粗い多面体 (ポリゴン数 120) で作成した。式 (2) を 2 回繰り返し、1920 個の四角形ポリゴンでより滑らかに表面形状を表現している。図 8 にサブディビジョンサーフェスを用いて表現した手の表面形状データを、初期多面体 (格子表現) とあわせて示す。図 5 に示した、手の表面形状データに比べて、滑らかな表面形状になっていることがわかる。

図 10 カメラの位置の違いによる平均推定誤差
Mean estimation errors for four hand poses.

3.3 カメラ位置の決定

2.2 節で示したシステム構成のとおり、本研究で用いるカメラ台数にはハードウェア構成上の制限より、現在は 4 台までという制限を持っている。そのため、4 台のカメラを用いる実カメラシステムにおける、最適なカメラ配置についてシミュレーションにより評価を行った。基本のカメラ配置を三面図を得るため正面、側面、上面の三つに決定し、もう 1 台の最適なカメラ配置を評価した。図 9 に示すように、極座標表現を用い、手形状が原点にあるとして 4 台目のカメラ位置を 1~12 の 12 種類設定する。設定したカメラ位置は、正面カメラを基準とし、x-z 平面に 90[deg], 45[deg], -45[deg], -90[deg] とその位置から y 軸方向へ 45[deg], -45[deg] それぞれ移動したカメラ位置である。手形状の中心からの距離は 400[mm] とし、カメラは原点に存在する手形状中心を向いている。

シミュレータを用いて 4 種類の手形状を作成した。基本のカメラ位置のシルエット画像 (3 枚) + それぞれのカメラ位置のシルエット画像 (1 枚) の合計四つのシルエット画像を用いて、作成した 4 種類の手形状のボクセルモデルを作成し手形状推定を行った場合の推定誤差の平均を図 10 に示す。ここで推定誤差は以下のように定義している。

$$error = \sum_i dist(epos_i, tpos_i) \quad (3)$$

$epos_i$ は推定された i 番目の関節の位置、 $tpos_i$ はシミュレータで設定した正しい i 番目の関節の位置、 $dist(epos_i, tpos_i)$ は $epos_i$ と $tpos_i$ の間のユークリッド距離である。

このグラフから、実験に使用した 4 種類の手形状においては、カメラ位置=5 (正面カメラと上面カメラの間 45[deg] にカメラを配置) した場合に、最も推定誤差が少なくなるという結果が得られた。この評価結果を用いて、4 台のカメラの配置は図 4 に示すように決定している。この多視点カメラシステムにより推定した手形状の例を図 11 に示す。正面カメラに正対する手姿勢の際の手形状推定において概ね正しい推定結果が得られていることが示されている。

(1) 0.0sec

(2) 8.0sec

(3) 16.0sec

図 11 手形状推定結果例

Example of hand pose estimation result using real images.

(1) 0.0sec

(2) 3.0sec

(3) 6.0sec

図 12 指先によるバーチャルクレイの変形

Deformation of virtual clay using fingertip.

4. バーチャルクレイモデリングシステムの実装

4.1 バーチャルクレイモデルの変形

本システムでは、仮想空間中の粘土もまた 3.2 節で示したサブディビジョンサーフェスによってモデル化している。式 (2) の d で表されるバーチャルクレイのデータポイントが、ユーザのオペレーションによって変形された場合には、その周辺も滑らかに変形するように形状全体を再計算する必要が生じる。我々は、滑らかな粘土形状変形をシミュレートするために、Hsu が提案した形状表面を直接操作する FFD による滑らかな形状変形の手法 “direct FFD”⁸⁾ を採用し、実装している。

多視点カメラシステムを用いた手形状推定と、サブディビジョンサーフェスを用いて表現したバーチャルクレイをベースとして実装した、バーチャルクレイモデリングシステムによるクレイの変形結果を示す。図 12 に、指先によるバーチャルクレイの変形例を示す。また、図 13 に、バーチャルクレイを 200[ms] 毎に 2[deg] の速度で y 軸回りに時計方向に回転させ、回転ごとに各時刻における推定手形状との接触判定を行い、バーチャルクレイのデータポイントの位置を変更させて、バーチャルクレイの滑らかな変形を行った例を示す。

現システムでの 1 回のキャプチャ画像によるクレイ変形の

処理時間は、約 370[ms](2.7Hz) である。内訳は画像キャプチャと前処理に約 100[ms]、ボクセルモデル生成に約 50[ms]、手形状推定に約 160[ms]、クレイの変形に約 60[ms] となっている。

4.2 PC クラスタを用いたビデオレート処理

提案してきたバーチャルクレイモデリングシステムの処理速度を向上させるための手法の一つとして、PC クラスタ上への実装を行う方法がある。従来研究での画像処理や動作計測のために PC クラスタを用いたリアルタイムシステムには、画像データベース探索の並列化による手形状推定⁹⁾ や、人体動作の 3 次元表現¹⁰⁾、モーションキャプチャ¹¹⁾ などの例がある。本研究では、Score5.4 を用いて 9 台の PC (Dual Xeon 2.4GHz, Memory 1GB, GigabitEthernet) より構成される PC クラスタシステムにこれまで提案してきたシステムを実装した。Xeon プロセッサの Hyper Threading 機能により、1 台のホストは四つの CPU を仮想的に持つ。また、撮影カメラには IEEE1394 カメラを用いている。

2.3 節で述べた手形状推定アルゴリズムを、Step1 のビデオキャプチャ・画像処理、Step2 のボクセルモデル作成、Step3-5 の手形状推定・クレイの変形、の三つの処理に分割し、ホストのパイプライン化を行う。また、画像処理およびボクセルモデル作成処理においては、それぞれ担当するホスト内で並列化を行うように、アルゴリズムを修正し

図 13 ろくろを用いたバーチャルクレイの変形
Deformation of virtual clay using potter's wheel.

図 14 PC クラスタへの並列化実装
Implementation to PC cluster.

た。図 14 に実装したシステムの概要図を示す。

ホスト 1, 2 はそれぞれが 2 台のカメラと接続されており、画像のキャプチャ・画像処理を行い、片側距離変換マップを作成する。画像処理は、各 CPU に各カメラの画像を 1 枚ずつ割当ててことで並列化する。片側距離変換マップはネットワークを通じてホスト 3, 4 で共有される。ホスト 3, 4 では、それぞれのホストが四つの CPU を用いて、手のボクセルモデルの作成を並列に行う。立方体のボクセル空間を八つに等分割し、それぞれを八つの CPU で分担する。ホスト 5 でフィッティング以降の処理をまとめて行う。図 15 に処理の流れとタイムチャートを示す。ボクセルモデルの転送が並列化による処理速度向上のボトルネックとなるが、前フレームのボクセルモデルとの差分を転送することで、転送に要する時間を 6[ms] に抑えている。これは、

ボクセルモデルを処理せず転送したときに比べて、1/20 の転送速度の向上となった。キャプチャから推定結果の表示まで約 54[ms] かかるが、各ホストでの処理が最大 26[ms] で終わっていることから、ビデオレート (33[ms] 周期) でバーチャルクレイモデル変形を行うことができているといえる。PC クラスタにより、ビデオレートの手形状推定が可能になり、粘土細工の際の手動作においては、ユーザにストレスを感じさせない変形速度をもたらすことが可能となった。

5. おわりに

本論文では、3 次元形状を直感的に操作するためのインタフェースを開発するために、人間の操作的な手動作を 3 次元入力装置として取り扱うインタフェースを提案した。提案システムは、非接触型計測装置として多視点カメラシステムを用いて、手形状を推定しバーチャルクレイを操作するシステムである。システムを実装し、ユーザの操作的な手動作で仮想空間中の粘土モデルを滑らかに変形できることを示した。また、PC クラスタを用いてビデオレートの粘土変形を可能にし、ユーザにストレスを与えないインタフェースとなり得た。今後は接触判定の高速化と、粘土のモデルをソリッドモデルにして、より実際に近い粘土変形を目指していく予定である。また、ハードウェアパワーに頼らずに、手形状推定手法の高速化を図るためのアルゴリズム改良を行っていく予定である。

図 15 処理タイムチャート
Time chart.

〔文 献〕

- 1) M. Matsumiya, H. Takemura, N. Yokoya. "An immersive modeling system for 3D free-form design using implicit surfaces". In *Proc. of Intn' Conf. on Virtual Reality Software and Technology*, pp. 67-74, 2000.
- 2) Kevin T. McDonnell, Hong Qin. "Dynamic Sculpting and Animation of Free-form Subdivision Solids". In *Proc. of Intn' Conf. Computer Animation 2000*, pp. 126-133, 2000.
- 3) Gilles Debunne, Mathieu Desbrun, Marie-Paule Cani, Alan H. Barr. "Dynamic Real-Time Deformations using Space & Time Adaptive Sampling". In *Proc. of Intn' Conf. Siggraph 2001*, pp. 31-36, 2001.
- 4) Francis K.H. Quek. "Eyes in the Interface". *International Journal of Image and Vision Computing*, Vol. 13, No. 6, pp. 511-525, 1995.
- 5) Richard Szeliski. "Rapid Octree Construction from Image Sequences". *CVGIP:Image Understanding*, Vol. 58, No. 1, pp. 23-32, 1993.
- 6) Etsuko Ueda, Yoshio Matsumoto, Masakazu Imai, Tsukasa Ogasawara. "Hand Pose Estimation for Vision-based Human Interface". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 50, No. 4, pp. 676-684, 2003.
- 7) Edward Catmull, James Clark. "Recursively Generated B-spline Surfaces on Arbitrary Topological Meshes". *Computer Aided Design*, Vol. 10, No. 6, pp. 350-355, 1978.
- 8) William M Hsu, John F. Hughes, Henry Kaufman. "Direct Manipulation of Free-Form Deformations". In *Proc. of Intn' Conf. Siggraph 1992*, pp. 177-184, 1992.
- 9) N. Shimada, K. Kimura, Y. Shirai. "Real-time 3-D Hand Posture Estimation based on 2-D Appearance Retrieval Using Monocular Camera". In *Proc. Int. Workshop on RATFG-RTS(satellite WS of ICCV2001)*, pp. 23-30, 2001.
- 10) ウ 小軍, 東海彰吾, 和田俊和, 松山隆司. "PC クラスタを用いた身体動作の実時間 3 次元映像化". 情報処理学会研究報告, Vol. 2000-CVIM-121, pp. 65-72, 2000.
- 11) 有田 大作, 濱田 義雄, 米元 聡, 谷口 倫一郎. "PC クラスタを利用した実時間並列画像処理環境 RPV". 電子情報通信学会論文誌, Vol. J84-D-II, No. 6, pp. 965-975, 2001.

うえだ えつこ
上田 悦子 2003 年, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。2004 年, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手。博士 (工学)。

やぶがみ かつひろ
藪上 勝宏 2004 年, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。2004 年, 株式会社島津製作所入社。

まつもと よしお
松本 吉央 1998 年, 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。1999 年, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手。2002 年, 同助教授。博士 (工学)。

おがさわら つかさ
小笠原 司 1983 年, 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。1983 年, 通商産業省工業技術院電子技術総合研究所入所。1993 年, カールスルーエ大学 (ドイツ) 客員研究員。1994 年, 電子技術総合研究所知能システム部行動知能研究室長。1998 年, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授。工学博士。