

# ClayMore: 粘土を用いた造形の支援

若園 祐作<sup>1,a)</sup> 暦本 純<sup>1,2,b)</sup>

**概要:** 粘土は任意の形状を形成できる自由度の高い素材であり、幼児の創造力の向上のため知育玩具として用いられている。しかし、造形技術の訓練はあまりなされていないために粘土造形はさほど上達せず、多くの人々は成長するに従い作りたいものと粘土で作れるもののギャップに悩み粘土離れを引き起こしている。本論文では、粘土による造形行為を支援するシステム“ClayMore”を提案する。ClayMoreは粘土の形状を深度センサによりリアルタイムで認識し、その形状に応じた画像をプロジェクタにより粘土表面に投影することで、粘土を入出力装置とするインタラクションを可能にする。さらにClayMoreを用いた応用例のひとつとして、目標形状と粘土の形状との差分を粘土表面に表示して粘土による模倣行為を支援するアプリケーションについても述べる。

## ClayMore: Clay Modeling Support System

YUSAKU WAKAZONO<sup>1,a)</sup> JUN REKIMOTO<sup>1,2,b)</sup>

**Abstract:** Clay is plastic, adhesive material that can form any shape. It is often used as an educational toy for children to make their creativity higher. However, many people cannot make things as they want with clay because they haven't brushed up on their technical modeling skills and don't have any chance to do it. In this paper, we propose a system “ClayMore” to support acts of modeling clay. In this system, the shape of clay is monitored by a depth sensor and system-generated images or movies are shown on the skin by laser projectors, to make clay into I/O device. I also described one of the applications using ClayMore, supporting acts of imitation with clay. This application shows the difference between the shape of the clay and one of the target.

### 1. はじめに

粘土には可塑性、粘着性があり、これらの性質により粘土は任意の形状を形成することができる。その造形の自由度が人の創造性を刺激するとして、粘土は幼児の知育玩具としてしばしば用いられる。また、老人の認知症防止のためのリハビリ玩具として導入されることもある。

このように多くの人々は幼児期に粘土遊びに慣れ親しんでいたにもかかわらず、粘土を趣味や仕事としている者を除いて、日常的に粘土で造形行為を行う人々は非常に少ない。その原因のひとつが、粘土を創造性を刺激するものと

して重宝するあまり、美しい造形の実現や目標物の正確な模倣といった造形技術の向上を目的とした訓練が行われていないことにある。幼児は成長するに従い、より精密で完成された作品を造形しようと努力するようになるが、彼らは技術的な訓練を受けていないため、次第に粘土で作りたいと思う形状と実際に自分の手によって実現可能な形状との差異が広がってしまい、造形することによる満足感が低下する。そして最後には、粘土による造形の楽しみや喜びを実感できなくなり、粘土遊びをやめてしまう。

粘土による造形が多くの人々にとって幼児の遊びに過ぎない一方で、クレイアニメの制作者や、製品の試作に粘土を導入している技術者は、粘土を用いて精密な造形を行っている。彼らは特定の物体を粘土で再現することを仕事としているため、高い造形技術を持っている。粘土を仕事としない人たちの造形技術を高めることができれば、日常的に粘土に触れる人口が増加するだけでなく、人々の創造性

<sup>1</sup> 東京大学  
The University of Tokyo

<sup>2</sup> 株式会社ソニーコンピュータサイエンス研究所  
Sony Computer Science Laboratories, Inc.

a) qq116414@iii.u-tokyo.ac.jp

b) rekimoto@acm.org

の更なる向上, 優れた美的感覚, 模倣のための観察眼の獲得などが期待できる.

粘土を用いた造形技術を向上させるには, これまでは地道に努力をするか粘土造形が得意な人に教を請う以外に方法がなく, コンピュータにより支援をする例がほとんどなかった. 本論文では, 粘土を入出力インタフェースとする造形支援システムを提案し, 目標物の正確な模倣を支援するためのアプリケーションを構築することで人々の粘土を用いた造形技術を向上させ, 思い通りの造形ができる楽しさ, 喜びを実感させることを目的とする.

## 2. コンピュータによる支援方法

コンピュータによる支援下にあるユーザのモチベーションを維持するためには, 作業の進行, 上達過程をユーザが知覚でき, なおかつユーザの造形作業をコンピュータが妨げないことが重要である.

作業の進行を実感するためには, 粘土に対する作業に対するリアルタイムのフィードバックが有効であるといえる. 作業に対してリアルタイムのフィードバックが返ってくる場合, その作業によってどれだけ完成に近づくのか, もしくはその作業が完成に近づくものなのか遠ざかるものなのかを判断する材料にもなる.

粘土による造形中は通常粘土を注視するため, 別途ディスプレイを用意して提示して視線を分散させるよりも粘土周辺に提示することが望ましい. 粘土に直接プロジェクションする方法は, 粘土本体に直接指示を提示することができるため直感的であり, 粘土自体にセンサやアクチュエータを組み込む必要もないため, 造形作業をさほど妨害せず情報提示ができる.

そこで, 本論文での支援システムは

- 粘土の変形に対するリアルタイムフィードバック
- 粘土は入出力一体のインタフェース

という特徴を持たせることとする. また, 対象を通常の市販の粘土とするため, 粘土の形状認識は粘土の外部から行う必要がある.

アプリケーションで支援する作業対象は目標物の正確な模倣とする. 目標物の模倣の支援は, ユーザが支援なしで模倣を行った場合には気づきにくい粘土表面のずれや歪みを指摘し, さらにユーザ自身の造形の癖を理解させるために有用である. 例えば, 模倣の練習を何度も繰り返し, 粘土の右面が凹んでいるという指摘が毎回あった場合, そのユーザは造形を行うとき右面を必要以上に凹ませてしまう癖があると容易に推測ができ, それ以後はその癖をなくすよう練習をすることができる. また, 支援を得て目標物の模倣を完成させるとユーザの本来の造形技術より高度なものが生まれるため, ユーザは満足感を得られモチベーションの維持につながる. さらに, コンピュータによる支援で判定を行う場合, 粘土が美しいか否かという判定より



図 1 提案システム (ClayMore) の動作風景

Fig. 1 Using ClayMore System

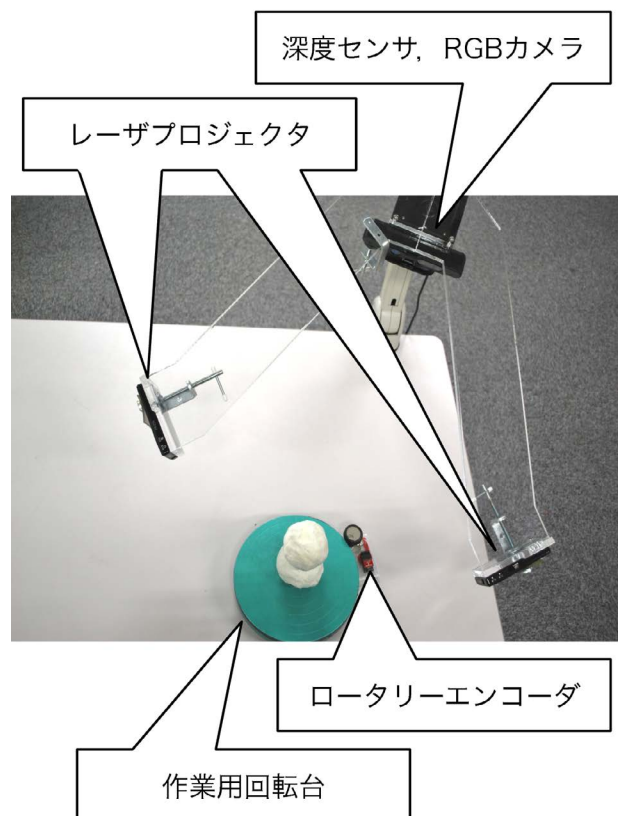


図 2 提案システム (ClayMore) の構成

Fig. 2 ClayMore System

も目標物と粘土の形状が一致しているか否かの判定のほうが容易であるため実現性がある.

本論文では以上の方針に沿い, 支援システムを提案しアプリケーションを開発した.

## 3. 提案システム (ClayMore)

ClayMore は粘土の形状を監視し続け, アプリケーションにより設定された投影画像を粘土にプロジェクションすることができるシステムである (図 1). 粘土を入出力一体のインタフェースとし, 粘土の形状変化に対してリアルタイムなフィードバックを提示できる. ClayMore のハー

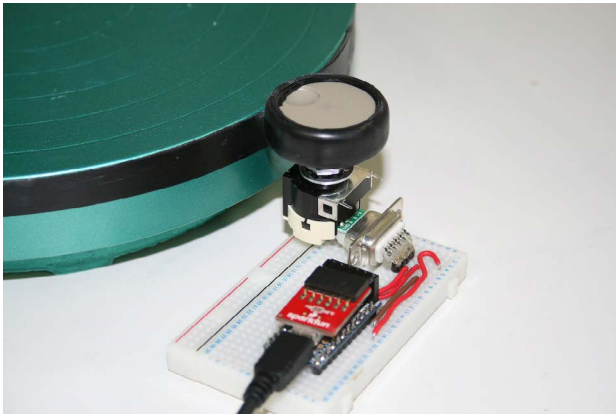


図 3 回転台と接触させたロータリーエンコーダ, Arduino  
 Fig. 3 A rotary encoder and Arduino, touching with the rotation stage

ドウェア基本構成は図 2 の通りである。粘土はシステム中心に置かれた回転する作業台（陶芸用の手回しろくろ）の上に置かれ、その粘土は一方向から深度センサによって形状を読み取られる。プロジェクトは粘土と深度センサの軸から左右に  $45^\circ$  ずつ離れた位置に固定され、深度センサの横から粘土を覗いても投影画像が見えるように配慮されている。

ClayMore のソフトウェア処理部では, Izadi らの Kinect-Fusion[1] のオープンソース実装である kinfu を一部利用している。KinectFusion および kinfu は深度センサの Microsoft Kinect を用い, GPU を積極的に活用して静的な物体や背景をリアルタイムで読み込み時間的に統合するシステムである。kinfu では Iterative Closest Point アルゴリズム [2] を用い, 深度センサの現入力データと過去のデータを比較して類似度を判定することで深度センサと物体との位置関係の推定を行っているが, ClayMore では物体が変形する粘土であることから位置関係の推定が正しく行われない可能性があるため, Iterative Closest Point アルゴリズムを用いずに実際に位置関係を測定している。

### 3.1 リアルタイム認識のためのハードウェア

提案システムでは粘土の形状を読み取り続けるために, 深度センサと RGB カメラを内蔵した Xtion Pro Live を 1 台用いる。粘土は回転台の上に置かれ, 回転台と深度センサ, RGB カメラの距離を固定する。図 3 のように回転台にはロータリーエンコーダと制御用のマイコン (Arduino) を接触させ, 回転角を常に監視する。

1 度の読み取りで粘土の形状全体を読み込むことはできないため, 粘土と深度センサとの距離を保ったまま回転角を変化させて読み取りを継続する。そうして読み込まれた深度データ群を時間的に統合することで粘土全体の形状を認識する (図 4)。この方法は, 粘土の形状のうち深度センサの死角にあたる面が変形しても認識済みデータが更新さ



図 4 複数の深度データの統合  
 Fig. 4 Integration depth images

れないという欠点があるが, ユーザが粘土を回転させることで死角であった面を即座に更新することが可能である。

### 3.2 データの前処理

深度センサからの入力データに含まれるノイズを除去するために, モルフォロジー演算とバイラテラルフィルタを適用する。不要な情報としては映り込んだユーザの腕, 背景の 2 つを考慮する。ユーザの腕に対しては Xtion Pro Live に内蔵された RGB カメラからのデータを参照して色情報を HSV に変換後, 肌色領域を特定して深度データからの除去を行う。背景除去は事前に背景を取り込み深度データに対して常に減算を行うことで実現する。

### 3.3 データ統合処理

深度データを回転台の回転角だけ回転し, 過去の深度データと統合する。各深度データは点群データであり, これらを統合するために TSDF Volume[3] 形式を用いる。深度データを統合するための処理は GPU 上で並列で行い, 処理時間を短縮する。また, 保存データは GPU メモリ上に保持する。

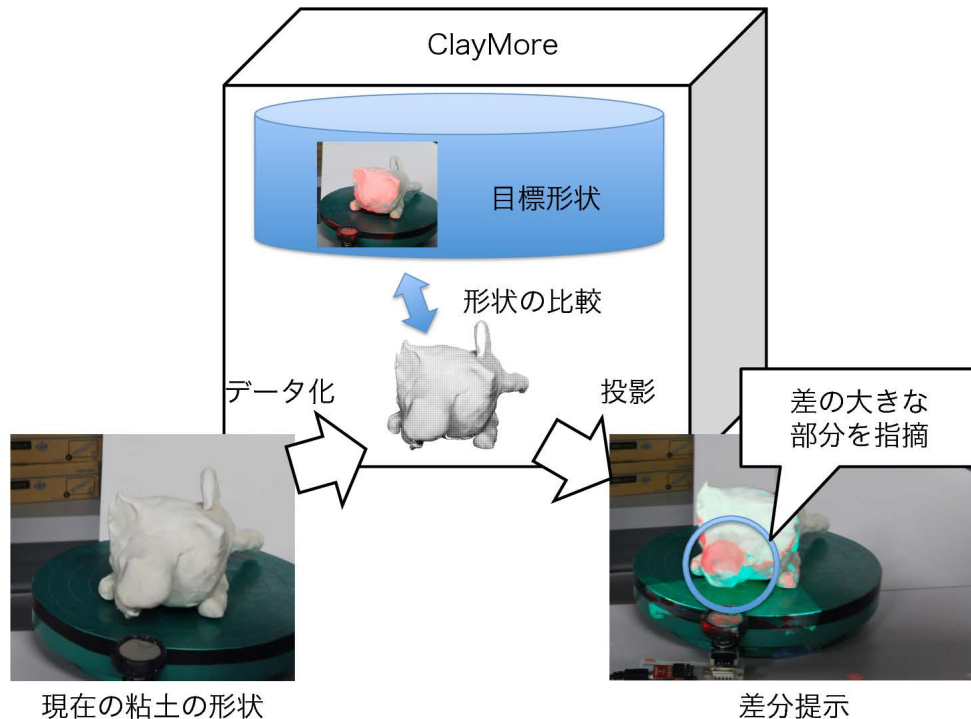


図 5 アプリケーションの動作イメージ  
Fig. 5 Working image of the application

### 3.4 画像投影のためのハードウェア

粘土に対して画像を投影するために MicroVision Laser Pico Projector を 2 台用いる。各プロジェクタは深度センサとの位置関係を固定しており、粘土とプロジェクタとの位置関係は深度センサの位置より特定できる。

## 4. アプリケーション

目標物の正確な模倣をする上で、目標物と現在の粘土の形状がどれだけ離れているか、どの部分をどのぐらい変形させれば目標物と一致するのかといった情報は有用である。そのため、ClayMore を用いて目標物と現在の粘土の形状の差分をユーザに直感的に知らせて編集作業を支援するアプリケーションを開発した(図 5)。

本アプリケーションではあらかじめ手本となる目標物の形状を読み込み、保存する。目標物は深度センサが読み取れるものならば粘土以外の素材でもかまわない。その保存された形状データと現在の粘土を基に生成された形状データとの差分を色で指摘し、実際の粘土の表面に投影する。編集前より該当箇所が膨らんでいるか凹んでいるか、それがどの程度なのかに応じて投影する色を変化させることにより、ユーザは粘土の変形度合いを瞬時に理解することができる。また、その色が投影された面を直接凹ませたり、あるいは粘土を継ぎ足すことで膨らませたりして、粘土によって目標物を模倣する行為を支援することができる。このアプリケーションを利用するために造形作業中にコン

ピュータの画面を覗いたり他の入力デバイス进行操作する必要がないため、ユーザは目の前の粘土に集中して作業を行うことができる。

### 4.1 アプリケーションの実装

本アプリケーションは ClayMore に対して 3 次元形状データの一時保存機能を加え、2 つの形状データの差分を計算して描画色を決定するプロセスを追加することにより実現する。また、目標物の 3 次元形状データをコンピュータ上にあらかじめ保存されたものに変更することも可能である。

### 4.2 デモ展示と実際のユーザによる体験

2012 年 8 月 4 日および 5 日に東京で開催された「第 18 回未踏事業」成果報告会において本アプリケーションを展示し、大学生から大学教員まで 10 人程度の情報学関係者に粘土を触らせ自由に感想を述べさせた。

いずれの被験者も粘土による造形以上に興味を持つことができ、特に投影画像に注目をした、本アプリケーションを展示した時点では粘土の実際の形状と投影画像に 5mm から 10mm 程度の誤差が見られ、もっと正確に提示してほしいという声が非常に多かった。また、ろくろの上に乗るような大きさの粘土の変形よりも、一目で全体を見渡すことが困難な大きさの物体で本アプリケーションを使用したという意見、お菓子の生地のような粘土以外の特殊な

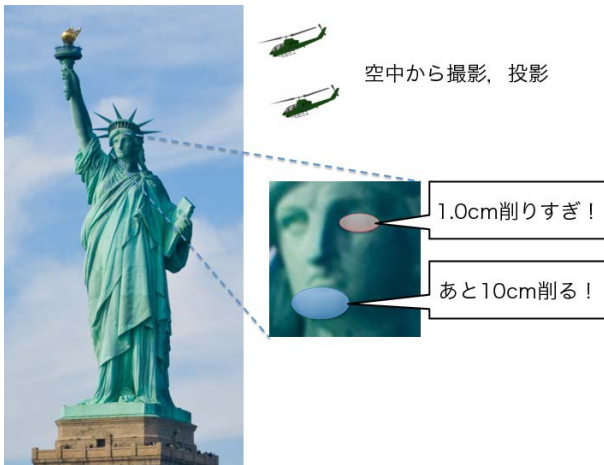


図 6 アプリケーションの更なる応用例：巨像作成支援システム  
Fig. 6 Another application: Statue-Making Support System

性質を持つ素材にも投影を行いたいという意見があった。また、あらかじめフィギュアの3次元形状データをダウンロードしてパーツを好きに組み合わせ、このシステムを用いてオリジナルのフィギュアを作りたいといった具体的な使用方法を挙げた被験者もいた。

## 5. 議論

実際に10人程度のユーザに体験させたことで浮き彫りになったのは、提案システムおよびアプリケーションには投影画像を粘土に対して一致させる精度を高くする必要があるのである。展示では直径23cmのろくろとその上に乗る量の粘土を使用した。この環境下で5mm程度の誤差がある場合、システムの粘土に対する提示で遊ぶことは可能であるものの、粘土の造形技術を高めるほどの精度には至らなかった。この問題を解決するためには、現在手動で行っている画像投影位置調整を自動化し精度を高める方法、使用している深度センサをより高性能なものに変える方法などが存在する。

提案システムは本論文で挙げた以外にも様々な用途に転用できるよう、ある程度の汎用性を持っている。本論文で使用している粘土は市販の白色モデリング粘土であるが素材に制約はないため、ユーザからの意見として述べられた粘土以外の素材でも本アプリケーションを使いたいという要求には十分対応できる。深度センサを遠距離に対応できるものと交換することで、単なる遊びや教育だけではなく、数mの巨大な像や建築物を複数人数で作り上げるような状況の支援にも応用が可能である(図6)。また、任意の物体の形状を取り込むことができ、任意の場所に画像を投影することが可能なため、差分表示のアプリケーション以外にも次に行うべき操作と操作位置を順番にユーザに提示するアプリケーションなども実現可能である。このアプリケーションが実現すれば粘土による模倣行為以外の支援も可能となるため、さらに応用範囲が広がることが考えられる。

## 6. 関連研究

粘土を用いた造形行為の支援以外の目的で、粘土によるコンピュータとのインタラクションの例は既に存在している。

PiperらのIlluminating Clay[4]は景観デザインなどを目的としたタンジブル・ユーザ・インタフェースの研究で、深度センサで粘土の形状をセンシングして情報をプロジェクションするという点で提案システムと共通している。しかし、Illuminating Clayは粘土の積み上がった高さをそのままプロジェクションすべき情報と対応づけているため、上部よりも下部がくびれている、横に凹んでいるような形状には対応できない。

須永らの3Dモデリングシステム[5]は提案システムと同様に任意形状の粘土を対象としており、それをコンピュータに取り込んで3Dモデル化することが目的で、専用のペンを用いてその3Dモデルに対してペインティングすることも可能である。提案システムとは深度センサの死角に対するアプローチも異なり、須永らの3Dモデリングシステムでは鏡を置くことにより深度センサから死角であった面も鏡を通して撮影することができるようにしているのに対し、提案システムでは過去に記録した死角の形状を保持し続け、死角から外れたときに形状を更新することでこの問題に対処している。

山岡らのNeonDough[6]はコンピュータを粘土に組み込み粘土同士の着脱に応じて発光させることで、粘土そのものの表現を拡張し、創作活動を促す研究である。

VerlindenらのAugmented Prototyping[7]の研究は、あらかじめ自動車型に加工した白色物体に自動車の色やドアの形状をプロジェクションし、自動車の外見デザインを容易に変更できるようにすることで試作品開発の拡張を行ったものである。この研究では自動車形状の変形は考慮されず、表面の投影画像を変更することで実際の形状を変更することなく見た目の形状を変更することができる。

## 7. おわりに

本論文では、人の粘土を用いた造形技術を高め創造力の向上を図るため、粘土の形状をリアルタイムで取得し粘土表面に情報を投影するシステムClayMoreの提案をし、目標物と粘土の現在の形状とを比較し差分表示を行うアプリケーションを開発した。

今後の課題として、開発した機器の投影精度向上をすることで粘土造形技術の向上に役立つシステムを目指し、その後実際に粘土に日常的に触れている幼児に対してこのシステムを与えたときの反応・影響について調査する。特に自身の理想と粘土による造形に大きなギャップが生じはじめている人々がこのシステムを利用したとき、粘土離れが止まるのか調査する必要がある。

## 8. 謝辞

本論文における研究は, IPA2011 年度未踏 IT 人材発掘・育成事業の支援のもと行われている。

### 参考文献

- [1] Shahram Izadi, David Kim, Otmar Hilliges, David Molyneaux, Richard Newcombe, Pushmeet Kohli, Jamie Shotton, Steve Hodges, Dustin Freeman, Andrew Davison, and Andrew Fitzgibbon, KinectFusion: Real-time 3D Reconstruction and Interaction Using a Moving Depth Camera, ACM Symposium on User Interface Software and Technology, October 2011.
- [2] Zhang, Z. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. International Journal of Computer Vision 13, 2, 119-152,1992.
- [3] Curless, B., Levoy, M. A volumetric method for building complex models from range images. In Proceedings of SIGGRAPH 1996, ACM Press / ACM SIGGRAPH, 303-312, 1996.
- [4] Ben Piper, Carlo Ratti, Hiroshi Ishii, Illuminating clay: a 3-D tangible interface for landscape analysis, Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems: Changing our world, changing ourselves, April 20-25, 2002.
- [5] 須永 知樹, 橋本 直己, 粘土を用いた直感的 3D モデリングシステムの構築, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.36, No.8, pp.33-36, 2012.
- [6] 山岡 潤一, 箕 康明, NeonDough: 光る粘土を用いた粘土細工の提案, 情報処理学会シンポジウム論文集, Vol.2012, No.3, 2012.
- [7] Verlinden, J., Horvath, I., A Critical Systems Position on Augmented Prototyping Systems for Industrial Design, ASME CIE'07, DETC2007-35642, pp 1-9, 2007.