ClaytricSurface: 硬度可変ディスプレイの提案とアプリケーションの開発

Jefferson Pardomuan　佐藤 俊樹　的場 やすし　小池 英樹*

概要. 本研究では，インタラクティブサーフェイスにおけるサーフェイスの「軟らかさ」に着目し，従来は固定的であった軟らかさのパラメータを動的に変化させることが可能な新しいディスプレイの提案を行った．本稿では細かなパーティクルと気圧制御による硬さ制御技術に着目し，硬度可変ディスプレイのプロトタイプシステムの実装を行った．さらに，モデリング作業に最適な硬さコントロール範囲を調べ，エンターテイメント用の「立体形状モデリング」アプリケーションの開発に必要な直感的な硬さ制御が可能な GUI やジェスチャ入力などを用いた硬度制御インタフェースの検討を行った．

1 はじめに

インタラクティブサーフェスにおいて，ディスプレイの「軟らかさ」は重要な要素である．ディスプレイが柔らかい場合，ユーザによるサーフェス形状の変形が可能になる．また，ディスプレイの柔軟度に応じてユーザの指先への触覚フィードバックも変化する．実際に，布，砂，粘土，弾性体といった軟らかい素材をディスプレイとして用いられる研究は，近年多くなされている [5]， [7]．しかし，従来のインタラクティブサーフェイスにおいて，この「軟らかさ」の要素は固定的なパラメータを持つ要素であると考えられてきた．そのため，硬いサーフェイス，軟らかいサーフェイスは個別に存在したが，それぞれのサーフェイス上で可能なインタラクションは異なり，アプリケーションも制限されてしまっていた．そこで本研究では，ディスプレイの軟らかさのパラメータを動的に変化させることが可能な新しいディスプレイを提案し，その可能性を探る．

2 ClaytricSurface

本研究が実現を目指すシステムの要件を以下に述べる．まず，軟らかい状態から硬い状態まで，ディスプレイの硬さを動的に変化させられる必要がある．次に，ユーザの手により形状が変化可能であり，また固定可能である必要がある．これらの要件を満たすディスプレイを実現するために，本研究は細かい粒子素材を密閉し，内部を減圧することでパーティクルを硬化させる技術に着目した．発泡ポリスチレンビーズのような軽く細かい粒子素材の集合は軽いため摩擦が少なく，液体に近い滑らかな性質を示す (図 1(左))．しかしこれらの粒子を気密性のある袋に密閉し，袋内部の空気を取り除いていくと粒子は大気圧で圧縮され，粒子の密度が高まり袋は徐々に硬くなっていく (図 1(中央))．さらに内部を真空状態に近づけることで，粒子同士が密着し完全に硬化した状態になる (図 1(右))．

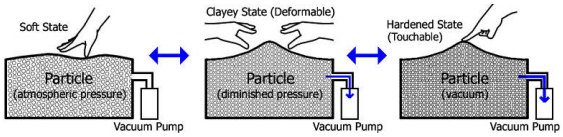

図 1. 負圧による硬さの制御

本研究ではこの技術を応用し，軟らかい状態から硬化までの動的な圧力制御技術を開発することで，軟らい状態から硬い状態まで硬度が滑らかに変化可能な視触覚ディスプレイを実現した．このディスプレイは，通常の大気圧下では表面は布のような軟らかい状態を保ち，ユーザは手や道具を用いることで自由に形を変えることが可能である．しかし，ディスプレイ内部を減圧していくと，ディスプレイは徐々に硬くなっていく．このとき，ユーザは「粘土」のようにディスプレイを手で変形させることが可能である．さらに内部が真空に近い状態になると，ディスプレイは硬化し，表面形状はそのときの形状のまま保たれるようになる．

以下，本稿ではこのディスプレイのプロトタイプシステムの開発について述べる． さらにプロトタイプアプリケーションとして「立体形状モデリングツール」に焦点を当て，このアプリケーションのための直感的な硬度制御インタフェースの実現についての考察を行う．

3 実装

まず，本研究で開発したプロトタイプシステムについて述べる．

Copyright is held by the author(s).

* Jefferson Pardomuan, Toshiki Sato, Yasushi Matoba, Hideaki Koike, Graduate School of Information Systems, The Univ. of Electro-Communications

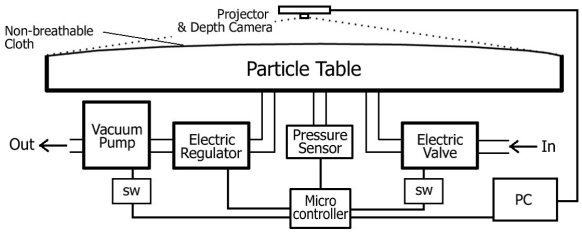

図 2. System Hardware

3.1 ハードウェア構成

プロトタイプシステムのハードウェアを図 2 に示す．本システムはパーティクルディスプレイ，圧力制御ユニット，及び後述するアプリケーションのためのカメラ・プロジェクタユニットから構成される．パーティクルディスプレイは直径 1mm のポリスチレン発泡ビーズで満たされた 655mm × 455mm × 35mm の木製フレームと表面を覆う柔軟性の高い布素材から成る．布は縦横方向に対して伸縮性があり，さらに気密性を高めるために裏地にゴム素材が貼られている．

また，ディスプレイには減圧用と加圧用，さらにセンサ接続用の 3 ポートの出入り口を設け，減圧用ポートは電磁弁を通し真空ポンプに，加圧用ポートは電磁弁を通し外気に接続されている．次に，圧力制御ユニットはディスプレイを減圧するための真空ポンプと上記減圧・加圧用の 2 個の 3 ポート電磁弁 (CKD 3PB2),，デジタル電気レギュレータ（CKD EV2100V），ディスプレイ内圧力を一定に保つための圧力センサ (Fujikura XFPN-03PGVR)，さらにそれらを制御するマイクロコントローラ (Arduino Uno) からなる．真空ポンプ (Medo VP0625) は排気量 40L/min，最大真空到達度-33.3kPa である．また圧力センサは大気圧を 0 として-24.5kPa までの差圧を測定可能である．

3.2 硬さの制御

本システムでは，気圧センサによるディスプレイ内圧力の測定と同時に，真空ポンプによる減圧，もしくは外気に通じる電磁弁の開放による加圧を行い，ディスプレイ内の圧力を目的の圧力値まで変動させる．さらに，ディスプレイ内の気圧を目的の圧力まで変化させた後，2 つの電磁弁を全て閉じることでディスプレイ内部を隔離し圧力を維持することが可能である．しかし，実際は減圧した際にディスプレイ内部の圧力に応じた量の空気漏れが発生するため，圧力センサによりディスプレイ内の気圧を常に監視し，圧力が設定圧の-0.03kPa 以上高まったことを検出するとポンプを再稼動させ，再び目的圧まで減圧させる．気圧制御の応答性について，完全に柔らかい状態 (0 kPa) から 2 秒以内に完全に硬化したの状態 (-18kPa) まで減圧することが可能であり，硬化状態から 3 秒以内に外気圧まで加圧することが可能である．

3.3 気圧と硬さの関係性

ここで本研究では，気圧と硬さの関係性を調べるために，ディスプレイ内の圧力とディスプレイ表面の外力に対する変形量との関係を調べる実験を行った．この実験では，ディスプレイ内の圧力を最も硬い状態 (本システムのテーブル内部が到達可能な真空圧は最大-18kPa である) から大気圧まで徐々に変化させつつ，ディスプレイ表面に対し指先での接触を再現した一定の力を加え，その際の表面の変移量をそれぞれの圧力毎に計測した．

実際の計測では，指先の接触面に見立てたアクリル製の楕円形プレートを用い，これを上下に抵抗なくスライドする棒の先端に固定してディスプレイに押し付けた．この時の荷重は,「指による軽い押下」と「強く押し込むような押下」の 2 種類の押下方法を想定し，それぞれに見立てた 1.5kg と 4.5kg の異なる加重をそれぞれ 5 秒間加え，棒の変移量を各硬さ毎に計測した．ディスプレイ内の圧力は到達可能な最大の真空圧-18kPa から大気圧まで，圧力センサの分解能 5 単位分 (0.12kPa) ずつ徐々に減圧していった．なお，ディスプレイの深さは約 3.5cm で，毎回の測定前にパーティクルを 3.5cm の高さで平らに均す作業を行い，その上で実験を行った．実験結果を図 3 のグラフ示す．

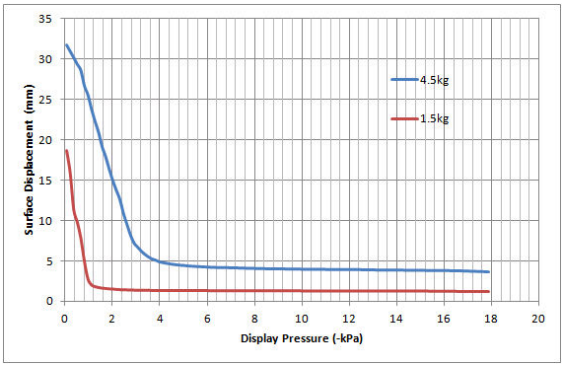

図 3. 各硬さでのディスプレイの変移量

この結果から，次のような特徴が分かった．まず，弱い押下の場合は-2kPa，強く押下した場合は-4kPa を下回ると，変移が急激に小さくなることが分かった．一方で，ポンプを限界まで減圧し続けた場合にも，数ミリ程度の変位は必ず発生することがわかった．この変位量は本システムがある程度減圧されれば，本システムの限界である-18kPa に到達するまでほとんど変化がないことから，パーティクルや表面を覆う布の素材の特性が影響していることが考えられる．これは本システムの硬度の限界を表しており，ディスプレイを硬化させるために真空ポンプを

稼動し続けてもある一定以下になると殆ど硬化がないことを意味している．これを改善するためには，パーティクルや布の素材を再検討する必要があると思われる．

4 アプリケーション

本研究では，本システムを使用したアプリケーションとして「立体形状のモデリングを可能とする形状デザインツール」に着目した．このアプリケーションは，ディスプレイ表面を粘土をこねる様に直接手で変形させて簡単な立体形状をデザインすることができ，さらにタッチ検出技術等と組み合わせることで，テクスチャの描画も可能にする新しい立体形状デザインツールである．以下では，このモデリングツールのプロトタイプシステムの実装について述べる．さらに開発した 2 つの異なる硬度制御用手法について述べる．なお，今回開発したシステムはエンタテインメント向けプロトタイプシステムとした．そのため作成可能な形状も簡単なものを想定し，高度な編集機能や形状の書き出し機能等は設けないことにした．

4.1 パーティクルディスプレイ上でのモデリング作業

本ディスプレイは弾性を有する布で覆われた細かいパーティクル素材から成り，ディスプレイの物理的な挙動は表面素材の布を引き伸ばした際の弾性力と，減圧した際のパーティクルの摩擦力との相互関係から次のような性質を示す．まずディスプレイ内が大気圧の場合，パーティクルはディスプレイ内を滑らかに動くためディスプレイは軟らかい性質を示し，ユーザは砂を扱うように，布の上からパーティクルを容易に移動させたり両手でかき集めたりすることで大雑把な形状の編集が可能である．ただし，ユーザが高さや細かいディテールを有する形状を作った場合，ユーザが形状から手を離すと布の復元力により形状は崩れてしまう．

次に，ディスプレイ内部を減圧していくと，パーティクルの摩擦力が徐々に強くなる．最終的に布の復元力よりパーティクルの摩擦力が勝るようになり，と形状は保たれるようになる．しかし，細かいディテールや高さを有する形状を作り，布が大きく引き伸ばされるような場合，形状を維持するためにはより強い減圧が必要になる．また強く減圧した場合，ユーザがディスプレイを大きく変形させることは困難になってしまう．

以上を考慮すると，本システムでモデルリングを行う場合，まずディスプレイが軟らかい状態で大まかな形状を作成し，その後ディスプレイを硬い状態に遷移させ，大まかな形状の上に徐々にディテールを有する形状を作成するスタイルになると考える．これは実際の粘土のように「切り貼り」により形状を形作る方法とは異なり，大まかな形状から徐々に細部を形作る彫刻に近いモデリングスタイルである．

4.2 モデリング作業に用いられる圧力範囲の調査

次に本研究では，モデリング作業の際にユーザが使用する硬度制御用インタフェースを設計するため，以下の実験を行った．ここで，「大雑把な形状の編集」及び「細かい表面形状の編集」作業に注目し，ユーザがこの作業を行う際に実用する硬さ設定範囲を調べる実験を行った．この実験は，大雑把な形状編集で作成可能な「単純な形状 (三角形)」と，大雑把な形状の上に細かい凹凸を作る必要のある図形として，「細かい凹凸を有する形状 (顔)」，これに加えて「オーバーハングした面を持つ形状 (お皿)」の計 3 種類のサンプル形状 (図 4) を事前に被験者に提示し，実際にサンプルと同じ形状をディスプレイ上に作成してもらう実験を行った．そして，被験者が実際に形状を作成する際に使用した硬度 (圧力) の範囲を調べた．

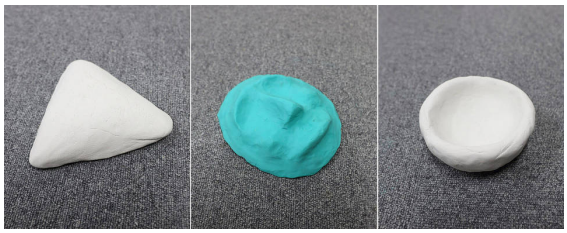

図 4. 使用したサンプル形状 (右から三角形，顔，お皿)

実験の被験者は本学の大学院生 9 人 (年齢 19 歳〜24 歳，男性 7:女性 2) で，被験者にはディスプレイを直接手で触りながら硬度を 1 単位高める「硬度+ボタン」，硬度を 1 単位低くする「硬度-ボタン」(やり直し用) の 2 つのボタンのみを操作してもらい，「手探り」で硬度を選択してもらった．なお，1 回のボタン操作で変化させることのできる硬度の範囲は圧力センサのレンジ幅の 1/1024 であり，約 0.024kPa 分である．また被験者には事前にボタン操作の説明を行い，1 分程度の練習時間を与えた後に三角形，顔，お皿のサンプルの順に作成してもらった．このとき，「できるだけ早く，できるだけ正確にサンプル形状をコピーする」ように伝え，また「モデリングに必要な範囲でのみ硬度を上下させる」ように伝えた．以上の実験でユーザが作成したモデルを図 5 に，また実験結果を図 6 のグラフに示す．

このグラフが示すのは，それぞれの異なる特徴を有する形状をモデリングする際にユーザが使用した圧力の最大値である．グラフから，シンプルな形状を有する三角形をモデリングする際には大気圧に近い比較的高い圧力，逆に複雑な形状や，高さを有する形状をモデリングする際は，より低い圧力が使われているのがわかる．

図 5. 被験者が作成したモデル

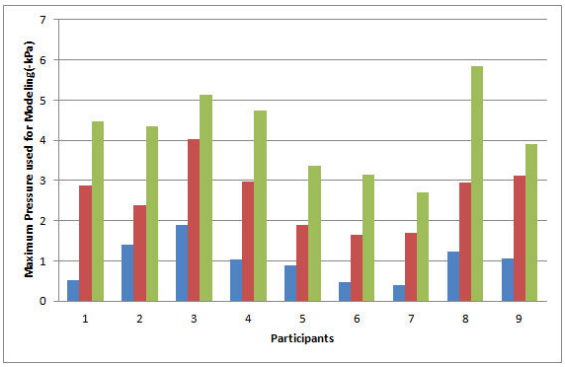

図 6. 被験者毎の各モデルを作る際に使用した圧力設定範囲

4.3 ボタンとスライダによる硬度制御インタフェース

これらの結果を基に，ユーザが直感的にディスプレイの硬度を制御可能なインタフェースとして，まず本研究ではボタンとスライダを用いた次のようなインタフェースを開発した (図 7)．本アプリケーションの用途はエンタテインメントであり，小さな子供が使用することも想定される．そこで，ユーザインタフェースはシンプルであり，ユーザが直感的に使用方法を理解でき，特別な練習無しに使うことができるものである必要がある．また，硬さの変化が分かりやすくするために，ユーザは指でディスプレイの硬度を確認しながら操作することが可能である必要がある．そこで本研究では，ディスプレイに投影され，直接タッチにより操作可能な「スライダ」と「ボタン」を組み合わせて用いることにした．

4.3.1 映像のプロジェクション及びタッチ検出

投影及びタッチ検出は，ディスプレイ上部に設置したプロジェクタ及び深度カメラ (Kinect) を用いて行う．タッチ検出は，まずディスプレイ表面の深度画像を背景深度として取得する．次に，毎フレームの入力深度画像と背景深度画像を比較することで，背景深度から 5-15mm までの高さにある領域をディスプレイに接触したユーザの指とみなし，それぞれの位置を指によるタッチ位置として用いる (図 8(中央))．同時に，ディスプレイ表面から 40cm までの高

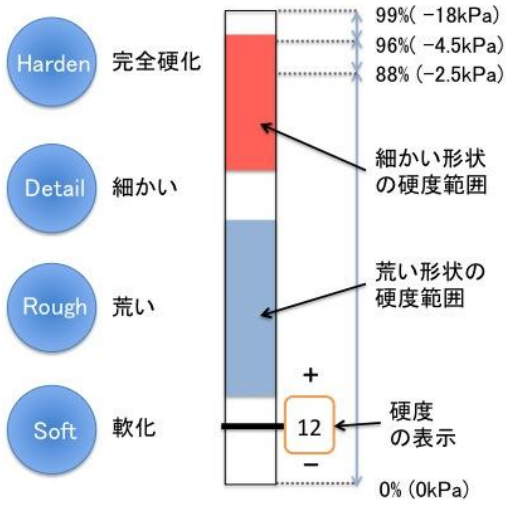

図 7. 硬度制御インターフェスの設計

さにある領域を全て抽出し，それらの中からディスプレイ外部から内部に対して伸びている領域をユーザの手領域とみなす (図 8(左))．この手領域を含む包含矩形をマスク (図 8(右)) とし，入力画像中の手領域以外の領域を用いて背景深度画像を毎フレーム更新する．以上の画像処理により，動的に変化するサーフェイス上でのマルチタッチ検出を可能にした．

図 8. 検出されたユーザの手領域 (左)，タッチ領域 (中央)，及びマスク画像 (左)

4.4 ボタン・スライダへの割当て

次に，スライダで操作可能な硬度は，軟らかい状態 (大気圧) から硬化させた状態 (-18kPa) までの全範囲とした．またこの際の変化量は，図 3 のグラフにおける-4.5kg の荷重をかけた場合の変形量を 3 つの直線で近似させる．得られた近似直線の値から，スライダの 0%〜88%，88%〜96%，96%〜99%までを，それぞれ大気圧 (0kPa) から-2.5kPa，-2.5kPa から-4.2kPa，-4.2kPa から-18kPa までに線形に割り当てた．また，ユーザがスライダでの硬度設定時に操作に適切な硬さを設定しやすくするために，スライダを用途に合わせて色分けをした．ここで，3.3

節の実験で得られた平均値と標準偏差から，大雑把な形状又は細かい形状が編集しやすくなおかつ形状が保たれる圧力の範囲を求め，色分けで提示する．

スライダのみではユーザに硬さが直感的に伝わらないため,「硬化」,「軟化」,「荒い」,「細かい」ボタンの 4 つのボタンを用意し，ボタンを押すことでそれぞれ次のような硬さが自動的に設定されるようにした．まず,「硬化」及び「軟化」ボタンは， それぞれ大気圧と硬化圧 (-18kPa) とした．次に「荒い」ボタンは，ユーザが大雑把な形状を作成する際に使用した最大圧である-1.5kPa とした．さらに「細かい」ボタンは，同実験でユーザが細かい形状を使用する際に使用した最大圧である-4kPa とした．

4.5 ユーザの動作に合わせた硬度の制御

以上に提案したスライダとボタンのインタフェースはシンプルかつ自由にディスプレイの硬さをコントロールすることができる．しかし，スライダやボタンを操作するためには少なくとも片手をボタンまで伸ばす必要があり，両手を使ってモデリングを行う際に問題になる．この問題を解決する手法としては，実際の粘土のような「時間が経つ毎に徐々に硬くなる」モードや,「カウントダウンを行い 10 秒後に硬化する」モードのような，硬度を時間で変化させるようなモードの追加が考えられるが，特別な機能を有するボタンを増やすことでインタフェースが複雑化する恐れもある．そこで本研究では，ボタンやスライダ操作等を用いずにフリーハンドで硬度の制御を可能とする機能の検討も行い，次のようなユーザの動作に応じて硬度を自動的に変化させる機能の開発を行った．

4.5.1 両手での初期成形時の硬化補助

ディスプレイが軟らかい場合，ユーザは砂をかき集めるようにパーティクルを集め，両手で形状を保持しつつ硬化させることで効率よく土台となる形状を作ることが可能である．しかし，両手を使って行う作業であり，作業中のボタン操作が困難であるという問題がある．そこで，軟らかい状態でのユーザの動作を検出し，自動的に硬度を高める機能を開発した．この機能は，まずディスプレイが最も軟らかい状態でユーザの両手がディスプレイと接触していることがで検出された状態で，手が 3 秒間以上動かず，かつ変形動作の際に生じるディスプレイ内部の気圧変化が検出されない場合に，自動的に大雑把な形状を維持可能な圧力 (-1.5kPa) に変化させるものである．

4.5.2 高さを有する形状の制御

より高い形状やオーバーハング形状を作る際，ディスプレイを平らな状態から徐々に引っ張り上げることで高さを高くしていく動作が行われる． しかし，高い形状を維持するためにはより高い硬度が必要であるため，形状を高くする毎に硬度を上げる操作が必要になる．そこで，深度カメラによりディスプレイ上に一定以上 (4cm 以上) の高さの形状が作られ，さらに引っ張り上げる動作により，気圧センサの測定でディスプレイ内部の圧力が 0.3kPa 以上低下したことが検出されると，ディスプレイ内部圧力をユーザが引っ張り上げた際のディスプレイ内部圧力と同等の圧力に変化させる機能を設けた．

図 9. 両手での成形 (左) と引っ張り上げる動作 (中央) 及びリセット動作 (右)

4.5.3 形状のリセット

ユーザはディスプレイの硬度を最も軟らかい状態にセットすることで，作成した形状をリセットすることができるが，現在のシステムでは硬度をリセットしただけでは直ちに形状が完全な平坦に戻ることはない．そのため，通常は軟化後にユーザが手で均す作業を行う必要があるが，ユーザ実験の際に，ある被験者がディスプレイ本体を手で保持し，手で左右に振動させることで素早く平らに戻す方法を発見した．そこで，本研究では，この振動させる動作を形状のリセット動作とみなし，振動を加速度センサで検出することで自動的にディスプレイを軟化させる機能を追加した．

5 考察

本システムで作成可能なモデルの高さは，表面の布素材の伸縮性とディスプレイ内部のビーズ量に依存する．プロトタイプシステムにおいては，ディスプレイ中心に周囲からパーティクルを集めることで，直径約 20cm，高さ 15cm の半球を作ることが可能であった．この高さの制限を拡張するためには，より柔軟性のある表面素材の導入が必要であると考える．また本稿では，気圧センサを用いてユーザによる変形を検出したが，これを行うことが可能なのはディスプレイの硬度が低い場合のみである．ディスプレイが硬くすることにつれ，ディスプレイの形状を変形しても気圧の変化は小さくなり，実際の測定では，気圧センサで押下動作が検出可能なのはディスプレイ内圧力が-1.7kPa までで，引っ張る動作に対しては-4kPa が限界であった．

本システムのモデリングアプリケーションでは，大きく形状を変形する時は軟らかく，また細かな形状を作る時は硬くすることで，それぞれの作業を行いやすくする．しかし，細かな形状を作ってから形状を大きく修正する場合，硬度を落とすと布の復元力により形状のディテールが失われると言った限界がある．このような操作の制限を解決するために，部分的の硬さ変化を可能にする技術が必要と考える．

本稿で提案したアプリケーションはエンターテイメント用という目的にしたが，将来，インダストリアルデザイン業界などにも実用的に使用されることが可能と考える．例えば，深度センサの深度情報を用いて本システムで作成したサーフェス形状を３Ｄモデルに生成し，CAD などの 3D データとして保存することで，直感的に 3D グラフィックスのモデルを作成することが可能と考える．

本システムのディスプレイを用いて，異なる硬さでサーフェスを変形させると異なる力学抵抗が得られる．そこで，本デバイスを用いて適切な運動行うと，リハビリ効果が得られると考える．一般的に退屈な作業と思われるリハビリ運動にインタラクティブ性を持たせることが可能と考える．

6 関連論文

近年，モーターや電磁石等を縦横に複数並べ，様々な触覚情報の提示を行う研究がなされている．LUMEN[6] や FEELEX[3] は，複数のピンを縦横に複数並べ，これらを個別に制御し上下に動かすことで立体的な形状を動的に形作ることが可能である．しかし，複雑なハードウェアのため高い解像度での形状表現が困難であり，またオーバーハング面を有する形状を表現することは困難である．

Haptic canvas[8] はディラタン流体と指先に装着したアクチュエータを応用し，ユーザの指先に異なる柔らかさ，粘着感などの触覚を提示可能にする．それに比べ，現システムは異なる部分に異なる硬度を提示することができないが，デバイスを装着手間なく，簡単に様々な硬度を提示するが可能である．

近年，本システムと同様の粒子と減圧機構を用いた粒子硬化技術は，ロボット工学や HCI の分野で応用し始めている．Brown らは形状を変化させることで様々な物体を把持可能な新しいロボットハンドを開発した [1]．また，HoverMesh[4] は同技術で表面のメッシュを硬化しながら内部にある空気層を膨張又は収縮することで，メッシュの形状を自動的に変形させる．これに対し，本研究は粒子の硬化のみはなく，軟らかい状態から硬い状態までの連続的な硬度変化の可能性に着目し，これを視触覚ディスプレイへの応用を行っている．Jamming user interfaces[2] は本研究と同じく硬さ制御技術を HCI の入出力のデバイスとして応用しているが，携帯用のアプリケーションを中心に開発を行っている．

7 まとめと今後の展望

本研究では，硬さを動的に変化させる新しいディスプレイを提案し，プロトタイプシステムの実装を行った．また圧力と硬さの関係を調べ，形状モデリングツールを想定した硬さ制御用インタフェースを検討するためユーザ実験によりモデリングに必要な圧力設定範囲を調べ，将来の実用的アプリケーション開発に必要な基礎的な知識をまとめた．今後は引き続き硬度制御インタフェースの実装を行い，加えて本システム上での実用的な入力技術と組み合わせることでより実用的な立体形状モデリングツールの開発及び評価を行いたい．同時に，応用的な機能として，軟らかさを瞬間的に変えることで異なる触覚を提示可能な技術やディスプレイを動的に動かすことで形状を変化させる技術等の開発を行っていく予定である．これには，より高い分解能での圧力制御の必要性や，高い応答性で硬度を変化させる技術が必要になることが考えられるためこれらを実現する手法について今後検討していきたい．

参考文献

[1] Brown, E., Rodenberg, N., Amend, J., Mozeika, A., Steltz, E., Zakin, M., Lipson, H., Jaeger, H. (2010) "Universal robotic gripper based on the jamming of granular material," in Proc of the National Academy of Sciences (PNAS), Vol. 107, no. 44, pp. 18809-18814.

[2] Follmer, S., Leithinger, D., Olwal, A., Cheng, N., and Ishii, H., Jamming user interfaces: programmable particle stiffness and sensing for malleable and shape-changing devices. In Proc of the UIST '12, pp. 519-528, 2012.

[3] Iwata,H., Yano,H., Nakaizumi,F., Kawamura,R. Project FEELEX: Adding Haptic Surface to Graphics, In Proc. of SIGGRAPH '01, pp.469-475, 2001.

[4] Andrea, M., Christian, S., and Andreas K., The HoverMesh: a deformable structure based on vacuum cells: new advances in the research of tangible user interfaces. In Proc of the ACE '04. pp 187-193, 2004

[5] Piper, B. and Ratti, C. and Ishii, H. Illuminating clay: a 3-D tangible interface for landscape analysis, In Proc. of SIGCHI'02, pp. 355-362, 2002.

[6] Poupyrev, I., T. Nashida, S. Maruyama, et al. Lumen: Interactive visual and shape display for calm computing. In Proc. of SIGGRAPH '04, 2004.

[7] Sato, T, Mamiya, H., Koike, H., Fukuchi, K., PhotoelasticTouch: transparent rubbery tangible interface using an LCD and photoelasticity, In Proc. of UIST'09, pp. 43-50, 2009.

[8] Yoshimoto, S., Hamada Y., Tokui, T., et al. Haptic canvas: dilatant fluid based haptic interaction. In Proc. of SIGGRAPH'10, pp. 13, 2010