

# pSurface: 自由曲面モデリングとアニメーションのための 布製入出力デバイス

脇田 玲<sup>†</sup>      上野 道彦<sup>‡</sup>      中野 亜希人<sup>†</sup>

本論文では自由曲面モデリングとアニメーションのための布製入出力デバイス pSurface (programmable surface)のデザインと実装, 及びアプリケーションについて述べる. pSurface はあたかも CAD における自由曲面のように形状モデリングができるテキスタイルである. 過去に提案されてきたキネティックテキスタイルと異なり, pSurface は入力と出力の双方の機能を有するため, 曲面形状がマイコンにフィードバックされる. これにより, 直接的に手で布を変形すると, その形状を維持するようにアクチュエータが働き, あたかも自由曲面を捏ねている感覚で立体造形をすることができる. さらに, 一定時間の変形操作を記録し, アニメーションとして再生することも可能である.

## pSurface: A Programmable I/O Surface for Modeling and Animation

AKIRA WAKITA<sup>†</sup>      MICHHIKO UENO<sup>‡</sup>      AKITO NAKANO<sup>†</sup>

This paper presents pSurface, a flexible surface that changes its shape like a free-form surface. Unlike previous kinetic textiles used as input devices, pSurface is an input and output device that can provide feedback loop of the current shape information to micro-controllers. During the modeling process, users can handle the fabric with a feeling of free-form surface manipulation, because the attached actuators maintain the current surface shape. Moreover, pSurface supports kinetic memory, the ability to record and play back physical motions.

### 1. はじめに

近年, 柔らかな物質を用いたデバイスが大きな注目を集めている. これらは紙や布の物理特性を擬態することで, 人間の直接的な手操作を介した自然なアクションをアフォードしている. 例えば, E-ink や有機 EL の進歩により紙に近いスタイルのインタラクションを提案する Paper-like UI [7,10] は電子書籍の需要に伴ってその重要性が高まる一方である. また, 素材の特性を利用しながら生物や自然の形状と振る舞いを利用している Organic User Interface (OUI)は今後の TUI の主流になっていくと考えられている [9].

デザイン支援環境に着目すると, タンジブルデバイスを用いて曲面形状をデザインする手法が多く提案されている [1,8]. これらの手法の主要な目的は, CAD と連携しながら, 直感的に曲面形状を入力することであり, デバイスは入力インターフェイスとして利用される. しかし, 直感的で身体化したインタラクションを目的とした場合, デバイス自身が変形性を有

することで出力としても機能することが望ましい. 出力デバイスとして機能するキネティックテキスタイルも提案されているが [5], 逆にこれらは入力を受け付けることができない. このように, 入力と出力の双方を保持した TUI として機能するスマート素材が求められている.

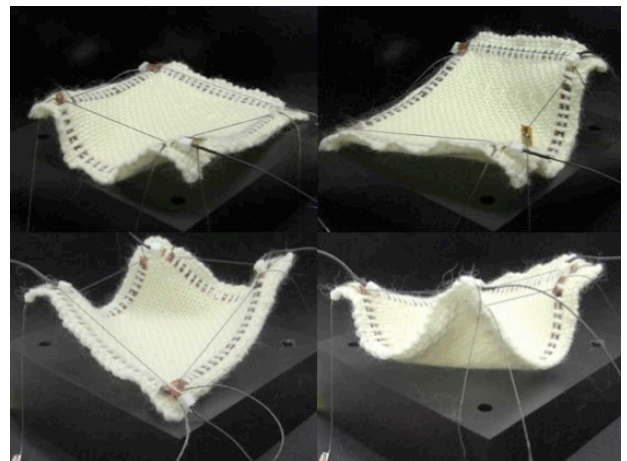


図1 pSurface の変形例. 上: 一辺を変形したもの. 下: 複数辺を変形したもの.

<sup>†</sup> 慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科  
Graduate School of Media and Governance, Keio University  
<sup>‡</sup> 慶應義塾大学 SFC 研究所  
Keio Research Institute at SFC

そこで, 本論文では, 入力と出力の双方の機能を有するキネティックテキスタイル pSurface (programmable surface) を提案する. pSurface は, 糸糸

を編み上げた柔らかな布，繊維状の形状記憶合金 (Shape Memory Alloy, 以下 SMA)，曲げセンサ，導電性繊維から構成されるスマートテキスタイルと，その制御ソフトウェア及びハードウェアから構成される。このスマートテキスタイルは SMA による形状変形機能（出力）と，曲げセンサによる形状検知機能（入力）を有しているため，入出力を有する物質化した自由曲面 [6] デバイスとして用いることができる。一般に SMA を用いたキネティックテキスタイルは，布の回復力が強いために，任意形状を長時間維持することは困難であった。一方で pSurface では，曲げセンサにより曲げ具合を常にフィードバックしながら SMA への通電量を制御することで，任意形状の維持が可能である。これにより，布の変形を維持しながらダイレクトに形状をモデリングすることや，変形操作の記録と再生を通じたキネティックメモリー [12] を実現することができる。

本論文の主要な貢献は，これまで PC と LCD の中で行われてきた形状モデリング及びアニメーションを，入出力機能を有するタンジブルデバイス上で実現する手法を提案することである。本論文の着眼点は，入出力の精度を向上させることではなく，入出力を有する曲面デバイスが実現するデザインプロセスの可能性を示すことである。また，一般的に入手可能で安価な部品でデバイスが構築できるように注意も払っている。更に布という素材に注目した PC の操作 UI としての可能性も提案する。布の風合いは様々な操作言語をユーザにアフォードする。例えば，つぶしてグニャグニャにする，のぼす，ねじる，などの操作である。

## 2. 関連研究

E-Textile はフレキシブルなインターフェイスを実現する一般的な手法となりつつある [11]。発展研究には，導電性繊維とマイコンを融合した開発環境 [3]，変色機能をもった布 [13]，繊維状の形状記憶合金を用いたキネティックテキスタイル [2, 4, 5] などがある。特に Surfex [5] は柔らかなフォーム素材と SMA を組み合わせて曲面形状を出力する形状ディスプレイであり，本研究と類似している。

直感的なデザイン支援ツールとしては，入力デバイスのダイレクトマニピュレーションによる自由曲面のデザイン支援環境が多く提案されている。形状モデリングを目的としたものとしては，曲げセンサと捻りセンサを用いて曲線・曲面をモデリングする研究 [8] や，グラスパブル UI を用いて等身大の NURBS を編集する環境 [1] がある。

本研究は E-Textile を用いて直感的なデザイン支援環境を提供するものである。先行事例である Surfex [5] に着目し，より直感的なデザイン支援環境を実現するため，フィードバックループを介して任意形状の維持と記録／再生が可能な改良を加えている。

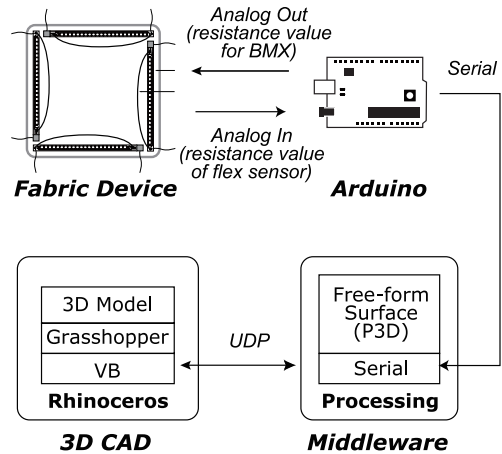


図2 システム構成。布型デバイス，Arduino，processing によるミドルウェア，3D CAD の4つから構成される。

## 3. システム構成

図2に示すように，本システムは，布型デバイス，Arduino，Processing によるミドルウェア，Rhinoceros から構成されている。布型デバイスからデジタルデータを生成するには以下の流れをとる。布型デバイスの曲面形状は編み込まれた曲げセンサの抵抗値として取得される。この値は，Arduino の Analog Input 端子を通してデジタル信号化され，processing で実装された設定用ミドルウェアに Serial 通信で送られる。ミドルウェアでは曲げセンサの抵抗値をもとに，processing の P3D 機能で生成された自由曲面の形状を変形させる。変形した曲面情報は，UDP(User Datagram Protocol)により processing から Rhinoceros に送られる。この値を Grasshopper の VB モジュールでポーリングし，得られた値を曲面生成ルーチンに渡し，Rhinoceros のステージに自由曲面を生成，描画する。

CAD データから布型デバイスを変形するには，これと逆の流れになる。Rhinoceros で変形された曲面情報はミドルウェアに渡される。ここで，変形前と変形後の制御点座標値の変位を求め，その値に応じて SMA に流す電圧を変化させる。以上の作業により，布型デバイスの SMA が緊張（もしくは弛緩）し，布の形状がデジタルデータに沿ったものに変更される。Arduino と Grasshopper を連動させるためにはフリーソフトウェアの Firefly が用いられる場合が多いが，

我々は Rhinoceros 以外の 3 次元 CAD とも連動可能な汎用性を与えるために独自のミドルウェアを作成した。processing は多様なプロトコルをカバーしており、プラグインも豊富であるため、多くの 3 次元 CAD と連動させることができる。

#### 4. 布型デバイスの実装

布型デバイスは白い毛糸（並太梳毛糸）で編まれた一枚の布である。四辺には曲げセンサ（浅草ギ研製）が編み込まれており、布の曲げ具合（つまり、曲面の輪郭線の形状変化）を検知し回路に送る。曲げセンサの両端には、Ti-Ni 系の SMA（Toki Corp. BMX 150）が弓状に張られている。SMA には導電性繊維（ナスロン）が接続されている。Arduino から通電することで、SMA が収縮し、曲げセンサの PCB 素材がしなり、結果として布が変形するという仕組みである。以上の組み合わせで、5V の電源を用いた場合、7~15 秒の間で全ての BMX は収縮を終えることができる。4 本の SMA の収縮具合を制御することで多様な曲面形状を実現することができる。SMA は収縮後の長さを維持し続ける特徴がある。しかし、その維持力は布の回復力に負けてしまうため、連続的な通電の制御なしで曲面形状を維持することは困難である。pSurface では、曲げセンサを曲面に埋め込み、曲率をフィードバックしながら通電量を制御することで、多様な形状の維持が可能にしている。また導線に導電性繊維を用いているため、配線部分を他の布に埋め込むことや刺繍として一体化することも可能である。

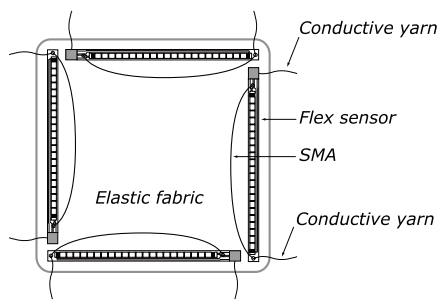


図3 pSurface の構造。梳毛糸による 4 辺形の布を下地として、4 つの辺に SMA と曲げセンサのユニットが付加される。電源は導電性繊維から供給される。

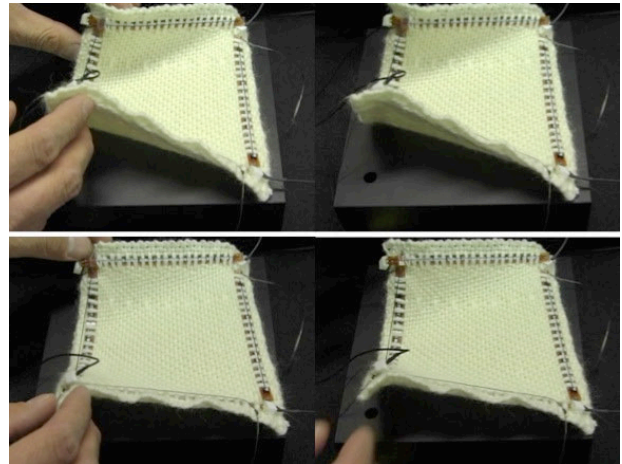


図4 ダイレクトな曲面操作の例。上：一边を曲げ、その形状を維持している状態。下：曲げられた一边を再び延ばし、延びた状態を維持している例。

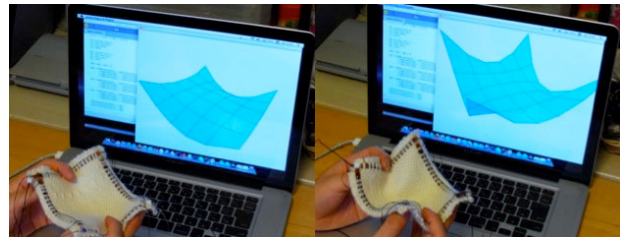


図5 3次元 CAD との連動。布型デバイスと CAD の自由曲面が同期している例。

#### 5. アプリケーション

##### 5.1 ダイレクトな曲面操作

pSurface の形状維持の特性を活かしたダイレクトな形状モデリングは最も重要なアプリケーションである。ダイレクトな布への操作は、片手のみならず両手を用いた自然なフィンガーアクションを可能にする。これにより、摘む、指の腹で押す、挟んで型取る、などの繊細な局所操作から、手のひらで丸める、捻る、巻く、二つ折りにする、などの大域な操作までを多様なインタラクションスタイルをカバーできる。前章で述べたメカニズムにより、pSurface への直接的な操作が終わったあとも、あたかも布の中に柔らかな針金が入っているかのようにその形状は維持され続ける。これにより、LCD の平面的な形状把握とは異なり、机の上（もしくは手のひらの上で）ユーザは多角的かつ直感的に形状を把握することができる。

一方、曲げセンサを通してその変形データはフィードバックされ続けるため、これらを保存しておくことで操作履歴を保存し、再生することが可能になる。これはモデリングにおける UNDO/REDO と同様の操作である。作業履歴を再生し続け、形状の創作過程を追

体験する機能も想定できる。

## 5.2 操作履歴の保存と再生

操作履歴の保存と再生は、キネティックメモリーに基づくモーショントデザイン [12] としても利用することができる。この作業は以下の2つのステップで実行される。最初のステップでは、pSurface をセンサとして用い、曲げセンサを通して pSurface へのダイレクトな操作を一定時間記録し続ける。次のステップでは、pSurface をアクチュエータとして用い、記録された動きを、同じ再生時間で SMA に反映する。このプロセスにより、あたかも子供が手で人形を歩かせて遊ぶのと同じように、布の動きを指定することができる。pSurface を用いてキャラクターをクラフトすることで、コマ撮りアニメーション、クレイアニメーション、アニメトロニクスなどと同様のフィジカルなアニメーション手法として位置づけることもできるだろう。

## 5.3 形状ディスプレイ

3D CAD のデジタルデータを物質化するには 3D プリンター等を用いて樹脂モデルを作成するのが一般的である。しかしこの方法は数時間から十数時間を要することが一般的であり、試行錯誤の過程を繰り返し行うことは困難である。pSurface は自由曲面データを反映することができるため、局所的な形状ディスプレイとして機能させることができる。

## 5.4 ユーザインターフェイス

前述したモデリングのためのインタラクシオンスタイルに加えて、布ならではの語彙を導入した汎用的な PC 操作 UI も実現可能である。例えば、握る、しぼる、グニャグニャにする、のぼす、ねじる等の布ならではの多様な語彙の操作が可能になる。また、布は物体を包んだり、物体に巻き付けたりすることもできるため、他のオブジェクトと組み合わせた語彙も支援することができるだろう。

## 6. まとめと今後の展望

本論文では、自由曲面のようにモデリングとアニメーションが可能なキネティックテキストスタイル pSurface を提案した。入力と出力の双方の機能を有することで、これまで PC と LCD で行われてきたモデリングを、タンジブルデバイス上で実現することを可能にした。またキネティックメモリー機能により、ダイレクトなアニメーションの記録と再生が可能なが示された。布の風合いは、様々な操作言語を想起させるものであり、PC 操作の新しい UI としての可能性も示された。今後は pSurface が実際の自由曲面を近似する精度を評価して行く予定である。図 1 と図 4 の曲面形状を見

る限り、次数の低い Bezier 曲面やエルミート曲面に近い形状だと想定される。どの種類の曲面をどの程度の精度で近似しているのかを明らかにして行きたい。また複数の pSurface を連携させ、より大きな面積をカバーすることも今後の課題の一つである。これにより実用的、具体的なプロダクトのデザインへの利用が期待できる。

## 参考文献

- 1) Bae, S., Kobayashi, T., Kijima, R., and Kim, W. Tangible NURBS-curve manipulation techniques using graspable handles on a large display. In Proc. UIST '04. pp.81-90.
- 2) Berzowska, J., Mainstone, D., Bromley, M., Coelho, M. et al. Skorpions: Kinetic Electronic Garments, Ubicomp '07.
- 3) Buechley, L. et.al. The LilyPad Arduino: using computational textiles to investigate engagement, aesthetics, and diversity in computer science education. In proc. CHI '08, pp.423-432.
- 4) Coelho, M. and Maes, P. Shutters: a permeable surface for environmental control and communication. In Proc. TEI '09. pp.13-18.
- 5) Coelho, M., Ishii, H., and Maes, P. Surfex: a programmable surface for the design of tangible interfaces. In CHI '08 Extended Abstracts, pp.3429-3434.
- 6) Farin, G. Curves and Surfaces for CAGD. Morgan Kaufmann, 2001.
- 7) Gallant, D. T., Seniuk, A. G., and Vertegaal, R. Towards more paper-like input: flexible input devices for foldable interaction styles. In Proc. UIST '08, pp.283-286.
- 8) Grossman, T., Balakrishnan, R. and Singh, K. An interface for creating and manipulating curves using a high degree-of-freedom curve input device. In Proceedings of CHI 2003, pp. 185-192.
- 9) Holman, D. and Vertegaal, R. Organic user interfaces: designing computers in any way, shape, or form. Commun. ACM 51, 6 (Jun. 2008), pp.48-55.
- 10) Holman, D., Vertegaal, R. and Altosaar, M. PaperWindows: Interaction Techniques for Digital Paper. In Proc. CHI 2005, ACM Press (2005), 591-599.
- 11) Post et al. E-broidery: Design and fabrication of textile-based computing. IBM Systems Journal. 39(3): (2000). , pp. 840-860.
- 12) Raffle, H. S., Parkes, A. J., and Ishii, H. Topobo: a constructive assembly system with kinetic memory. In Proc. CHI '04. pp.647-654.
- 13) Wakita, A. and Shibutani, M. Mosaic textile: wearable ambient display with non-emissive color-changing modules. In Proc. ACE '06, vol.266.