

基礎論文

Graffiti Fur: 被毛を有する布をディスプレイ化する手法

杉浦 裕太^{*1} 戸田 光紀^{*2} 星 貴之^{*3}神山 洋一^{*4} 五十嵐 健夫^{*5} 稲見 昌彦^{*4}

Graffiti Fur: Turning Your Carpet into a Computer Display

Yuta Sugiura^{*1} Koki Toda^{*2} Takayuki Hoshi^{*3}Youichi Kamiyama^{*4} Takeo Igarashi^{*5} and Masahiko Inami^{*4}

Abstract – We present Graffiti Fur, a display technology that utilizes the phenomenon of the change in shading properties of fur as the fibers are raised or flattened. Users can erase drawings by first flattening the fur surface through sweeping by hand in the fiber's growth direction. Then, users can raise the fibers by moving fingers in the opposite direction, which create lines of drawing. These material properties are commonly found in various items such as carpets in our living environments. We demonstrate our concept by developing three different devices to draw patterns on a "fur display" utilizing this phenomenon: a roller device, a pen device, and a pressure projection device. Graffiti Fur can turn common objects in our environment into re-writable canvas without requiring or creating any non-reversible modifications. In addition, Graffiti Fur can present large-scale images without glare, and the created images require no maintenance costs.

Keywords: Fur Display, Living Environment, Carpet, Soft Objects

1 序論

ディスプレイは、情報技術と現実世界をつなぐ重要な役割を果たしている。ユビキタスコンピューティングの時代における住環境ディスプレイの在り方として、住環境の落ち着きを保ちつつ、居住者が生活の延長線上で自然にアクセスできることが重要である。一方で、現状の普及している液晶ディスプレイは住環境における広範囲での利用には適していない。なぜなら、このようなディスプレイは一定の空間を占拠し、情報を表示するために自発光する必要があるため眩しく、また長時間の使用には電力も消費するからである。

プロジェクタによる情報提示は、住環境のあらゆる面上に映像を投影できるため、ユビキタスコンピューティング環境の構築に適している[4][12][25]。加えて、既存の環境にそれほど大きく手を加えること



図1 カーペット上での大規模な模様の描画

Fig.1 The devices convert your carpet into a computer display.

なく設置でき、フルカラーの映像を素早く場所を切り替えながら投影することができる。一方で、プロジェクタによる映像も眩しく、また明るい場所では視認しづらいといった欠点がある。さらに、連続的な使用は電力の消費量も多くなる。

目に優しく住環境へと簡単に設置できる非発光ディスプレイの研究や開発は数多くあげられる。たとえばEインク¹や木板ディスプレイ[18]もその一つで、これらは再描画のときを除いて電力を消費しないが、情報を提示する画素単位ごとに制御機器を用意する

^{*1} 産業技術総合研究所人間情報研究部門

^{*1} Human Informatics Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

^{*2} 株式会社 ZMP

^{*2} ZMP Inc.

^{*3} 名古屋工業大学若手研究イノベータ養成センター

^{*3} Center for Innovative Young Researchers, Nagoya Institute of Technology

^{*4} 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

^{*4} Graduate School of Media Design, Keio University

^{*5} 東京大学大学院理工学系研究科

^{*5} Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

¹ <http://www.eink.com/>

必要があり、大画面のイメージを提示するためには相応に大規模な機材が必要となる。

ディスプレイ機器を取り付ける代わりに、インクによって物体や環境上に情報を提示する手法もある。従来のインクジェットプリンターは据え置き型であったが、現在は携帯型のプリンターも実現され、様々な物体や環境上に印刷するということが可能となった[7][16]。プロジェクタとサーモクロミックインクによって、直接物体に触れずとも書き換え可能な印刷も実現されている[19]。こうしたインクは電子的な素子を物体などの表面上に設置する必要がなく、システム自体を小型にすることが可能ではあるが、インクを表面に塗布する必要がある、元の状態に戻すことも不可能であるため、適用できる場所は限られている。

そこで本研究では被毛を有する布（以下、被毛布）の逆毛の部分とそうでない部分における光の反射特性がそれぞれ異なる現象を利用して被毛布を情報提示ディスプレイとして活用する技術を提案する（図1）。表面の毛は伸びている方向に指でならすと寝かされ、それと反対の方向になぞれば逆毛する。こうした特性を持つ布は住環境においてカーペットやぬいぐるみなどの様々な布製品に見られるため、環境を改変することなくこうした製品をディスプレイとして利用できる。加えて、コストをかけずに大画面のディスプレイの実装も可能となる。

本研究ではローラー型とペン型、遠隔力照射型の3種類の描画デバイスを開発した。一つ目のローラー型は底面に描画用のバーが列状に配置されたもので、ユーザがそれを布上で牽引すると一つ一つのバーが独立して昇降する。下降したバーは特定の毛を逆毛させるため、逆毛した部分がドット絵のように模様を形成する。二つ目のペン型は、フリーハンドで描画を行うためのデバイスで、ゴムタイヤを装備した小型の連続回転する車輪が先端に取り付けられており、布と接触することで逆毛を起こす。ペン型デバイスはジャイロセンサも備え、デバイスの向きに合わせて車輪の向きを調整する。三つ目の遠隔力照射型は超音波集束装置により、離れた場所から布への描画を実現する。

本研究の学術的貢献を以下にまとめる。

1. 被毛布の特性を利用したディスプレイの提案
2. 3種類の描画デバイスの開発
3. ディスプレイとしての可能性の評価

なお、本論文は、[22][23][27][28]の研究成果をまとめたものである。

2 関連研究

前章でも述べたように、住環境へと簡単に組み込める非発光ディスプレイに関する研究は数多く存在する。特に近年の研究は、住環境に組み込めるよう身近な素材の利用を試みたものも多い。脇田と渋谷は液晶インクを塗布した糸と導電糸を正方形の布に編み込んだモジュール型テキスタイルを提案した[24]。また、格子状に配置された毛皮を動かすことでアンビエントな情報提示をもたらす毛皮ディスプレイというべきシステムがいくつも提案されている[1][2][8][13][15]。古川らは、Fur Display という動物の毛皮に振動モーターを埋め込み、生物が毛を逆立てる現象を再現した柔軟な素材によるインタフェースを開発した[2]。しかし、上に述べた研究はどれもディスプレイの描画単位ごとに制御用の電子機器を必要とし、大画面の描画には大規模なシステムを組む必要がある。

インクによる印刷は様々な素材に模様をつけるのに有用な手法である。川名は印字面が電子的に制御可能なスタンプを開発した[7]。Pixelroller はノズルから発光インクを噴射して壁に文字や絵を描写できるパフォーマンスツールである[16]。Saakes らはサーモクロミックインクを物体の表面にレーザー光をその物体に当てることで書き換え可能な模様を形成する手法を発明した[19]。だがこうしたインクの塗布は、以前の状態への復元が不可能になるため住環境への適用は問題が生じる。

物体の見え方を機械的に制御する手法も存在する。Wooden Mirror というアート作品は、平面上に配列された複数の木板を動かして反射の変化により絵を描画する[18]。Hullin らは高速で波を生成することにより、ディスプレイ上に映る物体の見た目を変化させることのできる水面ディスプレイを提案した[6]。落合らは、振動させたシャボン膜にプロジェクタでイメージを投影する薄膜スクリーンを開発した[14]。本手法は、既存の住環境をそのまま利用できるところが上記の手法と比較して優位な点である。

形状や光の反射特性を操作することで情報提示を行うディスプレイの提案や手法がこれまでも提案されている。田んぼアートは長い月日をかけて大規模な絵を田んぼ一面に描画するため、様々な色に実る稲を計画的に植える手法である²。また、枯山水は庭上に小石を並べて幾何的な模様を描き出す日本の伝統文化である³。同様の手法で砂状に模様を自動的に描画する Lazy man Zen garden というロボットも存

² http://en.wikipedia.org/wiki/Rice_paddy_art

³ http://en.wikipedia.org/wiki/Japanese_rock_garden

在する[10]. 雪上を歩いて大規模な模様を作り出した作品もある⁴. Water Calligraphy device は自転車に装着することで、一列に並んだホースが水を垂らしていくことで走行した道に漢字を描く[3]. ミュージシャンの EMINEM は本人のプロモーションビデオの中で、路上の汚れのある場所だけを高圧洗浄機で取り除くことで自身のロゴを描いている⁵. 芝刈り機を使用して草を刈り取ることで模様を描くことも手法の一つとして考えられる.

本研究は、コンピュータを利用して住環境にある既存の柔らかい物の機能を拡張する研究に触発されている. 杉浦らはぬいぐるみの手足を動かすことができる外付けのリング型のデバイスを開発した[21]. また、クッションの中に埋め込み、ユーザがそのクッションに触れると圧力のかかる位置と変形した度合いを計測できるセンサである FuwaFuwa も提案している[20]. 本研究の目的は、加工を施すことなしに布のような柔らかい物を情報提示ディスプレイとして活用することである.

また、本研究で開発したデバイスは、人間と協調することで実世界での創造的な作業を補助する研究にも関連がある. Rivers らは人間の手によって移動させ機械によって補正することでワークスペースの制約を無くした平面加工機を提案した[17]. FreeD は電子制御による携帯型切削デバイスで、ユーザの手作業に応じた調節を自動で行うことにより、3D モデルを彫刻の技術なしに作成することを可能にする[26]. 本研究においては、逆毛をする作業をデバイスが自動的に補うことで、これに意識を捉われることなく主体的かつ創造的な活動が可能となる.

3 毛の方向の違いによる反射特性の変化

本研究は、逆毛した被毛がそうでない部分と比較して異なる色に見える現象を利用している. 被毛の伸びる方向は一定であるため、布表面を同じ方向にならせば毛は寝かされ、逆の方向にならせば逆立たせることができる. 逆毛した被毛とそうでないものは異なる光の反射特性を有するため、二者は一目で見分けがつく. 一般的に、寝かせた状態の被毛は光をより強く反射するため、逆毛した状態の被毛と比較してより明るく見える. 図2にその原理を示す.

予備実験により、数ミリ〜数センチ程度の毛足で、布地が見えない程度に毛が密に生えている布に対して本手法が適用可能であることがわかっている. このような布はぬいぐるみやカーペット生地に頻繁に利用されている. ボア生地、マイクロスエード生地



図2 描画原理. 毛並みの方向に合わせて撫でる. 毛並みと逆方向に毛をなぞる.

Fig.2 Principle of drawing on fur. Sweeping the fur surface in its growth direction flattens it, and sweeping it in the opposite direction raises it.

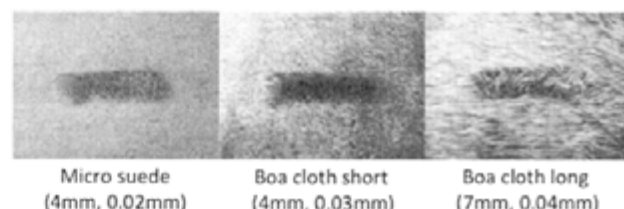


図3 実際に利用した素材.

Fig.3 Materials used in the experiment. Numbers indicate fiber length and diameter.

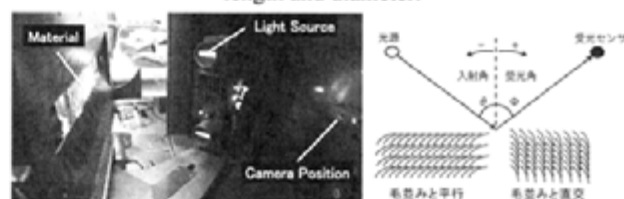


図4 実験環境と構成.

Fig.4 Experiment tool and construction.

などと呼ばれ、ポリエステル、ポリウレタン、ナイロンなどの素材でできており、広く流通している. 茶、黒、白、ピンク、灰色と多種多様な色について検討したところ全てにおいて、毛の方向が変化するとコントラストが生じることが確認されている.

3.1 実験

光の入射角と受光角に応じて受光エネルギーは大きく変化する. 本実験では光の入射角と受光角を操作し、それぞれどの角度で設置すれば最大のコントラストを得られるか確認した. 図3に示すように3種類の布(マイクロスエード, ボア短毛, ボア長毛)を対象にした. それぞれに対して、被毛を寝かせた状態と逆毛させた状態で、光の入射角と受光センサの受光角を変えて輝度の測定をした. 図4に実験器具の構成を表す. 光源と受光センサは布に対して垂直の時を0°として、毛並みと平行な方向に角度を変化させた条件と、毛並みと直交する方向に角度を変化させた条件を実施した. 光源と受光センサの仰角を-60°から60°の間、20°刻みで回転させている. 反射率の測定には商用の変角分光測色システムであるGCMS-4を使用した. 図5は代表例としてマイクロスエードの測定結果を表している. 他の素材も同様の特性、すなわち強い異方性を示していた. 被毛を逆毛させたか否かに関わらず、光源と受光センサの

⁴ <http://www.viralnova.com/simon-beck-snow-art/>

⁵ https://www.youtube.com/watch?v=o8_X67rSUT8

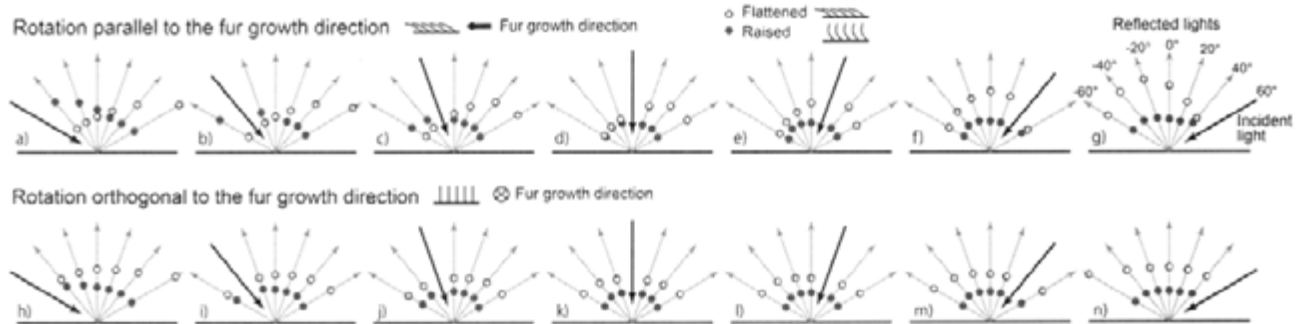


図5 マイクロスエード布の輝度測定: 上列は毛並みと平行な方向に、下列は毛並みと直交する方向に光源と受光角度を移動させる。入射光の角度を固定した上で受光部を動かし6方向における輝度を測定する。入射光の角度を動かし、同様の作業を行う(a-n)。なお測定装置の都合上、入射角と受光角を一致させることはできない。

Fig.5 Radial plot of the measured radiances of micro suede. The top row and bottom row respectively show the results of rotating the light and viewing position in planes parallel and orthogonal to the fur growth direction. Each graph (a-n) plots measured radiance values for six reflected light directions and a fixed incident light direction. The incident light direction and reflected light direction cannot be the same because we cannot put the measurement device and light at the same location.

角度を毛並みの方向と平行に変化させた条件は、はっきりと鏡面性を示した(a-g)。グラフから、被毛を寝かせた場合は 20° 付近、逆毛させた場合は -60° 付近に入射・反射の対称軸が現れることが読み取れる。一方、光源と受光センサの角度を毛並み方向と垂直方向に変化させた条件では、(h-n)で見られるように拡散性の方がより強く現れ、全体的に寝かせた場合の方が高い反射率を示した。被毛を寝かせた時の反射率を逆毛させた時の値で除算してコントラストを計算した。コントラストの最大値2.57は光源の入射角を -40° 、受光角を 60° に設定した場合に確認された。しかし、この特性は静的ではなく、同じ入射角でも受光角を 0° にするとコントラスト差は無くなり、模様が見えなくなることを意味する。また、受光角を -60° にすれば濃淡が反転して見える。観測位置を変更しても一定のコントラストを得るには、図5(g)のように毛の生え際から毛先の方に対して光源を当てるか、光線と毛並みの方向が垂直になるように布を回転させて設置することが推奨される(h-n)。なお、他の素材の最大コントラストは、ボアの短毛では8.21、長毛では34.72となった。

3.2 洗濯のりを利用した模様の定着

本手法における有用性の一つとして、描画した模様が満足できない、あるいは不要となった場合に布表面を軽くならすだけで即座に元の状態へと戻せるという特徴がある。しかし同時に、この特徴は模様を保存しておきたい場合に致命的な問題となる。その際は、洗濯のりと水を混合させて描画した模様に噴射することで布上に模様を定着させることができる。検証のため、200mlの水に100gの洗濯のりを溶かし、ローラー型デバイスで描画した模様に吹きか

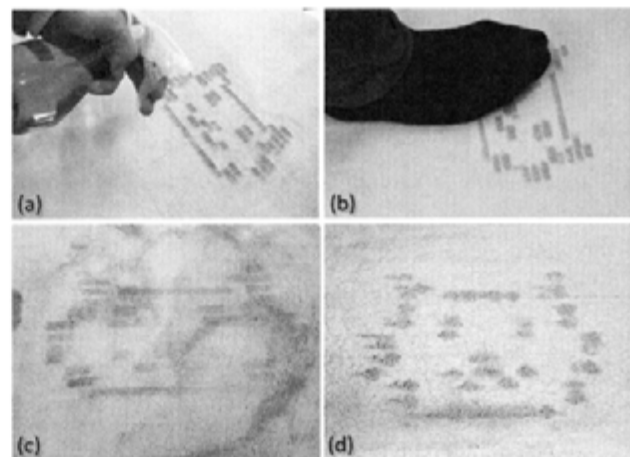


図6 洗濯のりによる模様の定着。洗濯のりを吹きかけることによる描画の固定(a)、パターンの上を10回歩行する(b)、洗濯のりをつけていない場合の結果(c)、洗濯のりをつけた場合の結果(d)。

Fig.6 Fixing a pattern with laundry starch, (a) Fixing a pattern on a carpet by spraying laundry starch, (b) walking on the pattern ten times, (c) result without laundry starch, and (d) result with laundry starch.

けた。そして、洗濯のりをかけた模様とそうでないものを足で踏む(図6(a-b))と、定着の処理を施していないものは模様が消失した(図6(c))が、施したものはいくら踏みつけても模様が消えることがなかった(図6(d))。洗濯のりを水で洗い流して元の状態に戻すことも可能である。なお毛足の長い素材では隣同士の毛が絡み合ってしまうため、洗濯のりを用いた定着は数ミリ程度の毛足の短い素材にのみ適用可能である。

4 ローラー型デバイス

ローラー型は、ユーザがデバイスを引く、もしくはロボットによって装置を引く動作に合わせて下部のロッドがデバイスの下部に取り付けられたロッドが布に設置することにより、実現する装置である。事前にユーザが入力もしくはダウンロードしてきたデータを自動で正確に描画することに優れている。

4.1 実装

図7で表す通り、本デバイスは逆毛を起こすための16個の部品を底面に有する。部品とは描画用のバーが備え付けられたサーボモータであり、それぞれが独立してバーを振り上げ、あるいは振り下げる。バーが下されたとき、ユーザの牽引に合わせてバーの当たる部分が逆毛する(図7上)。加えて、ロータリーエンコーダが片方の車輪の車軸に取り付けられており、水平方向の牽引方向と距離を測定する。ロータリーエンコーダとサーボモータはArduino Mega ADKによって制御されている。つまり、デバイスはある方向に一定の距離だけ牽引されたことを検知して、描画バーにより特定の部分にだけ逆毛を起こして模様を描画する。

本システムによる描画方法は以下のとおりである。ユーザは初めに布の大きさを測定して、図8に示したアプリケーション上で適切なサイズとなるように模様の作成ドット群を準備する。開発したアプリケーションは、(1) 指やタッチペンで自由に作成する、(2) 画像の二値化処理により絵や写真から模様を読み取る、(3) 接続したカメラデバイスからリアルタイムで画像処理をして模様を作成する、(4) 文字列をキーボードで打ち込む、といった4種類の方法で模様を作成できる。本アプリケーションは被毛の逆毛をシミュレーションすることにより、模様の布上での見え方も画面上で確認できる。

続いて、ユーザは作成した模様のドット群をデバイスへと送信し、被毛が逆毛する方向へデバイスを布上で牽引することで模様の描画を行える。布表面は模様を描画できるよう予め毛を寝かせておく必要がある。ユーザが赤いボタンを押すことでデバイスは描画を開始する。もし模様の縦列ドットが16個以内であれば、描画する模様は単列であるとみなされ、ユーザが牽引を続ける限り、同じ模様が繰り返し描画される。模様の縦列ドットが17個以上になると複数列であるとみなされ、縦のドットが16個単位の模様列が上から下へと順番に並べて描画されることで大画面の模様を形成する。模様の単位列を描画し終わったかどうかはデバイス上面に設置されたLEDによって提示され、LEDが消灯した後に赤いボタンを押すことで次の描画列に移行できる。描画の開始位

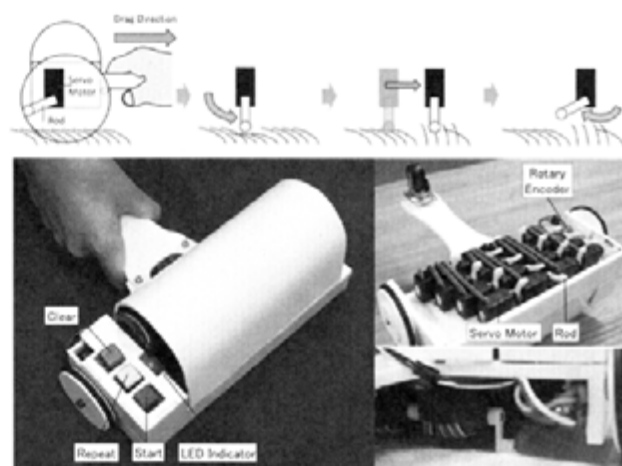


図7 ローラー型デバイス。描画原理(上)、デバイスの構成(下)

Fig.7 Roller device. Principle (top) and composition (bottom).

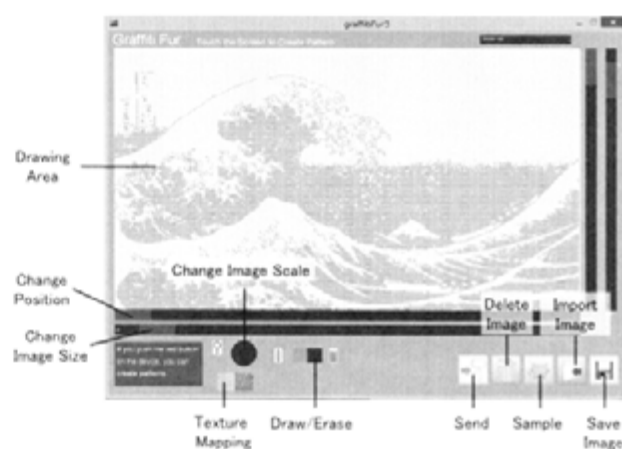


図8 アプリケーション画面

Fig.8 Application UI.

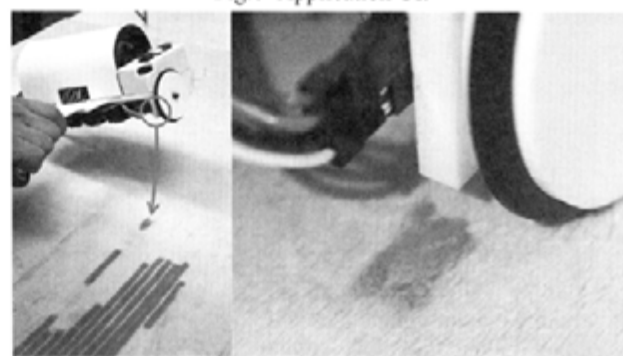


図9 複数列描画の基準となる目印

Fig.9 Marker for making multiple drawings.

置を揃えるため、デバイスは目印をそれぞれの単位列の左に残す。ユーザは、角がその目印に重なるようにデバイスを布上へと置き、赤いボタンを押して牽引することで各列を揃えて描画することができる(図9)。黄色いボタンを押すと同じ描画列をやり直すことができる。青いボタンを押すと描画を中断する。また、描画モードでないときは、デバイスを描

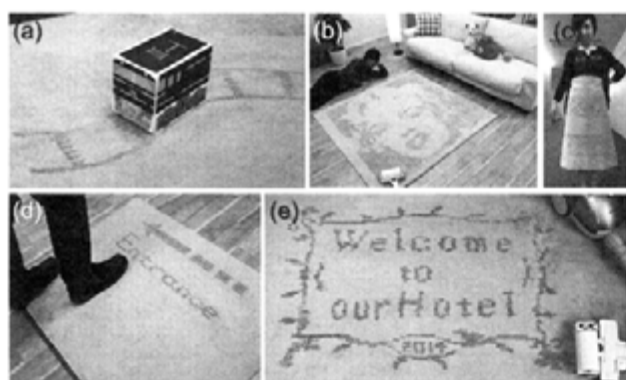


図10 応用例。カーペットに描いた線路を使ったごっこ遊び (a), アート作品の描画 (b), 服の描画の定着 (c), 来場者への案内 (d), 歓迎メッセージ (e)。

Fig.10 Application examples: (a) having a toy follow a drawn path, (b) drawing art on the floor, (c) temporary drawing on clothing, (d) visitor navigation guides, (e) greetings on a carpet.

画とは逆の方向へと牽引することで全てのバーを振り下ろして模様を消すことができる。

ローラー型デバイスの1つのロッドのサイズは6mm x 8mm である。ロータリーエンコーダの分解能と、それを装着しているタイヤの大きさから、タイヤのスリップが発生しないと仮定すると、3mm デバイスが水平移動するごとに、1 ステップとしてカウントできるようになっている。今回は、1 ドット 4 ステップとした結果、1 ドットのサイズは 12mm x 8mm となった。これは、本システムの解像度が約 2.12dpi であることを意味する。図 7 のように、解像度を高めるために斜めに密に配置したサーボモータも、このステップの読み込むタイミングを変えることにより、ズレを補完する。ドットの縦方向の精度をマイクロスエード上で測定したところ、それは 8 ± 1 mm となった。牽引速度もモーターの動作速度によって制限されている。現状では最速でも 15cm/sec が限度であり、それ以上速く牽引すると適切に模様を描画することができない。また、図 1 の長さ 2m、幅 1.2m の布へ模様を描画する場合、時間は 20 分ほど要する。

4.2 実施例

本技術は生活における様々な場面に利用できると考えられるが、本研究では特に床や壁のような大きな場所から、服といった嗜好品・日用品まで、日常生活で頻繁に見受けられるものに焦点を当てた。子供が自分の描いた模様の上でごっこ遊びなどを楽しむ (図 10 (a)) といった使い方が考えられる。ここでは、線路の模様を引いてその上で電車のおもちゃを動かすという遊びを想定しており、今楽しんでい

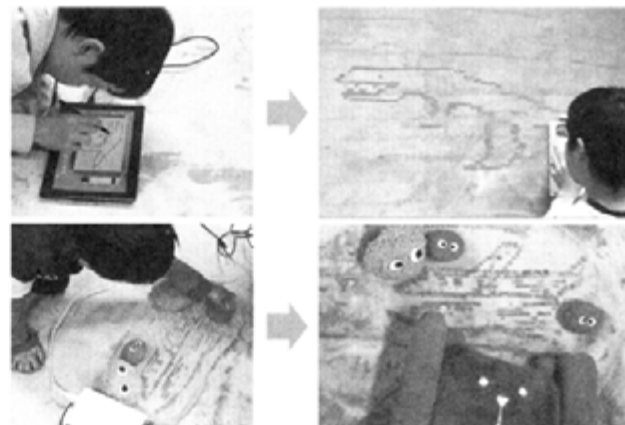


図11 複数レイヤーを描画して恐竜を描いている様子(上)、ぬいぐるみを組み合わせて物語を生成している様子(下)。

Fig.11 Drawing a dinosaur using the multiple layer function (top), Making up a story with common household objects (bottom).

分によってそれを変えることもできる (図 10 (b))。あるいは、ホテルのマットへ滞在客を迎えるためのメッセージを意味する模様を施すことも可能になる (図 10 (d))。また、部屋の掃除が完了したことを暗黙的に知らせることもできる。加えて、本システムは服の模様を変えておしゃれを楽しむことも可能にする。

4.3 ユーザフィードバック

本研究ではリビング空間を模した空間を用意して、本デバイスをどのように使用し、何を描画するかを簡略的に観察した。科学博物館のイベントに来場した 18 名を被験者とした。その内訳は子供 6 名と親子連れ 6 組である。描画する場所としてカーペット、タペストリー、ソファの 3 か所を設けたほか、クッションやぬいぐるみなども近くに配置している。タブレット PC に接続したローラー型を自由に動かしてもらった。

図 11 は実験中の様子を撮影した写真である。参加者はデバイスとアプリケーションの使用方法を 5 分程度の説明で理解し、独自の模様を作成して実験環境で描画していた。被験者の一人はデバイスと近くのぬいぐるみを用いてストーリー性のある絵を制作した。被験者はタブレットと実世界との使い分けを頻繁に行っていた。具体的には、タブレットを用いてデザインしたものを、デバイスで出力し、描画物に対して指で直接修正を加え、それをタブレットにデータとして反映させ、再度実世界に出力するようなシーンがあった。また、想定外の使用法として、一度全ての被毛を逆毛させたくて特定の部分だけ寝かせた模様、つまり色が反転した模様を描き出す被験者も見られた。参加者から本システムの問題点についてもいくつか言及があり、一つはデバイスが

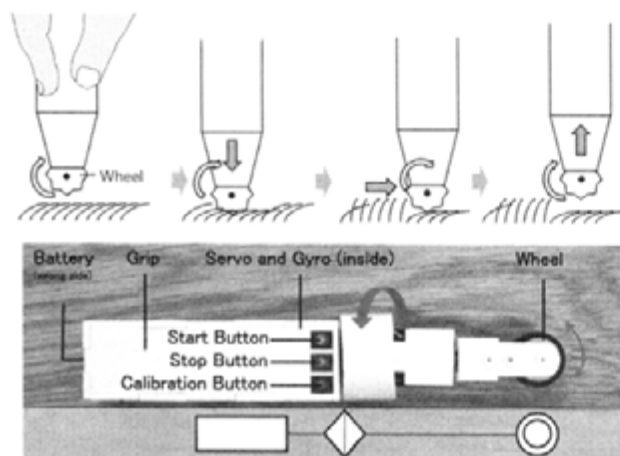


図12 ペン型デバイスの原理(上), デバイスの構成(下).

Fig.12 Pen device. Principle (top) and composition with kinematic diagram (bottom).

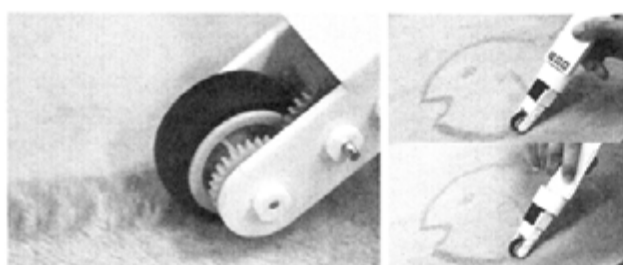


図13 ペン型デバイスの先端(左), ペン先の回転させることで手首の回転に関係なく, 常に一定の方向を向く(右).

Fig.13 Tip of the pen device (Left): the system always keeps the wheel orientation parallel to the fur growth direction and adjusts the direction of wheel rotation (Right).

持ち運びや壁上の布への描画をするには重いという点が挙げられた。また、ソファなどの圧力で深く沈むような物へは描きづらい、デバイスをまっすぐ牽引できるようにサポートする仕組みがほしいという意見もあった。

5 ペン型デバイス

ペン型は、ペンで絵を描くように自由に布に描画ができる装置である。指で同様のことをすると、毛並みに応じて描画が簡単な斜め方向とそうでない方向が生じる。本デバイスは、常に逆毛をするようにペンの先端にアクチュエータが装着しており、なぞる方向を気にすることなく描画が可能である。

5.1 実装

寝かせた被毛の特定の部分を指でならして逆毛させるだけでも任意の模様を描くことは可能である。しかし、毛が伸びる方向に逆らう方向へ線を描くのは簡単だが、のびる方向と同一や垂直の方向へ線を描くためには短い線を繰り返して布上に付ける必要がある、手間がかかる。その負担を軽減するべく、先端にゴムタイヤを装着し、常に一定の方向へ連続

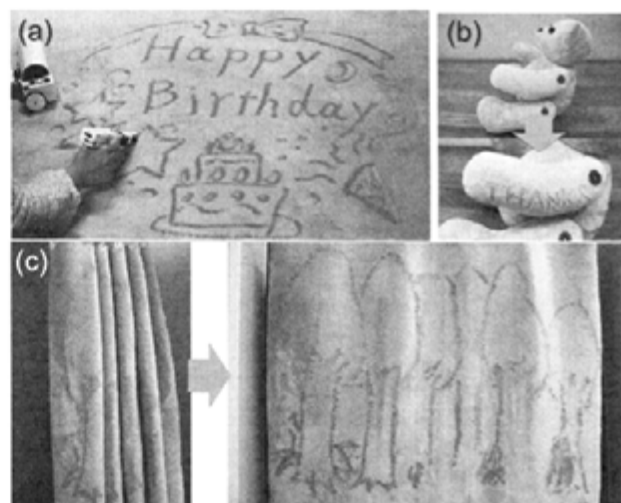


図14 応用例, 誕生日メッセージ(a), めいぐるみへの描画(b), 形状変化に合わせて変形する絵(c).

Fig.14 Application examples: (a) birthday party, (b) pattern on plush toy, (c) changing patterns.



図15 指(左)とペン型デバイス(右)それぞれの描画結果.

Fig.15 Difference between drawing with a finger and pen device: using own finger (left), using pen device (Right).

回転することで被毛をなぞるペン型のデバイスを開発した(図12)。

本デバイスはグリップ、制御ボタン、タイヤ、サーボモータ、ジャイロセンサで構成されている。地磁気を測定してデバイスの方位を求め、その方位に合わせてサーボモータを搭載した図12にあるペン先がひねるように回転する。ユーザはまず、布上の被毛の向きに対して正しい方向になぞるようにデバイスを向け、ボタンを押してデバイスに補正をかける。また、他のボタンはタイヤ回転の始動と中断を担う。そのあとは、ユーザがどのような方向でデバイスを保持しても先端のタイヤが被毛の伸びる方向と平行に回転するようになり、逆毛させることができる。

5.2 実施例

図14(a)から(c)にかけて、ペン型デバイスを日用品へ適用した一例を示す。図14(a)ではカーペットに友人への誕生日のメッセージを描画している例である。カーペットという広いキャンバスを使って創造的で大きな印象を与えるグラフィックを作ることができる。また、めいぐるみなどのおもちゃを個性的かつおしゃれに飾り付けたいと考える人も多

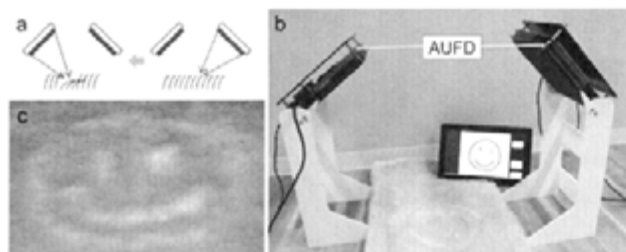


図16 遠隔力照射型デバイス、原理(a)、装置の構成(b)、描画結果(c)

Fig.16 Pressure projection device; (a) principle, (b) composition and (c) result.

いが、本デバイスを用いて、おもちゃを傷つけるような加工を施すことなく模様を簡単に施すことができる(図14(b))。柔らかく折りたたみやすい物であれば、たたんだ時と開いた時で絵柄が変わる模様を生成できる。たとえば、図14(b)のように開閉によって絵柄が変わるカーテンも実現できる。

5.3 ユーザフィードバック

本研究で、デバイスと指で直接なぞる場合の結果を比較した。図15にその結果を表す。指でなぞって描画した際は、なぞる方向によっては描かれていない線も見られたが、本デバイスでは動かす方向にかかわらず線を描画することができた。だが、搭載したモーターのトルクがあまり強力ではないため、強く布に当ててしまうとタイヤの回転が停止することもあり、描画に慣れるのに多少時間を要した。また「ペンを強く押し付けると意図しない方向へ引っ張られてしまう」という意見も得られた。改善策としては、ペン先と床の接触圧力を一定に保つためのローラーガイドを装着することを検討している。

6 遠距離力照射型デバイス

遠隔力照射型は、非接触で布に描画する装置である。本装置により、縦置きの場合にも自動描画が可能となる。なお描画対象は毛足が長い素材に限られる。

6.1 実装

非接触で物体に力を加えることのできるデバイスが開発されている[29]。これはアレイ状に並べた各振動子の位相を制御して任意の位置に超音波を集束させ、音響放射圧によって力を発生させるデバイスである。本稿ではこのデバイスを用いて毛の制御を実現する。

アレイ基板には超音波振動子(T4010A1, 日本セラミック株式会社製, 共振周波数40 kHz, 直径1 cm) 285個が $17 \times 17 \text{ cm}^2$ の矩形領域内に配列されている。アレイの辺と平行な方向のメインローブの幅(焦点

径) $w [\text{m}]$ は $w = 2\lambda R/D$ で与えられる。ここで $\lambda [\text{m}]$ は超音波の波長, $R [\text{m}]$ は焦点距離, $D [\text{m}]$ は正方形アレイの一辺の長さである。たとえば, アレイからの距離20 cmにおける焦点径は20 mmである。最大の発生力は16 mNである(実測)。また焦点位置の空間解像度は0.5 mmである。さらに, 焦点位置は1 kHzで更新できる。

本システムは、二台の超音波集束装置を用いて被毛布の毛の制御を実現する。これらは、図17のように布を中心として向かい合わせで設置されている。一方のデバイスで立っている毛を寝かせることで描画をし、もう一方で寝ている毛を立てせることで描画を消す。斜め方向から照射しているため、焦点距離は描画位置に合わせて変更している。描画はタブレットPCから制御する。ユーザが画面上で描画を行うと直ちに被毛布への描画が開始され、また画面上の消去ボタンにより被毛布上の描画が消される。

現実装システムにおけるディスプレイの解像度は1.2 dpiであった。描画スピードは、毛が立ち上がる時間や、発生力に影響がある。これを計測したところ、毛足の長さが18 mm, 直径0.02 mmのボア布に対しては30 cm/secで描画できた。現状の発生力で制御可能な被毛布は限られており、予備実験では18 mm以下の毛足の被毛布への描画は困難であった。すなわち超音波が照射されている間は毛が倒れるものの、その後すぐに起き上がって描画として残らなかった。図17(c)のような $20 \times 20 \text{ cm}^2$ の図は4秒程度で描画できた。この消す作業は、本稿においては、描画部位に力を入射するのではなく、平面全体に対して力を入射することで消去しており、描画よりも時間を要した。また、毛を癖がついている反対方向に毛を起き上がらせる必要があるため、時間は描画作業

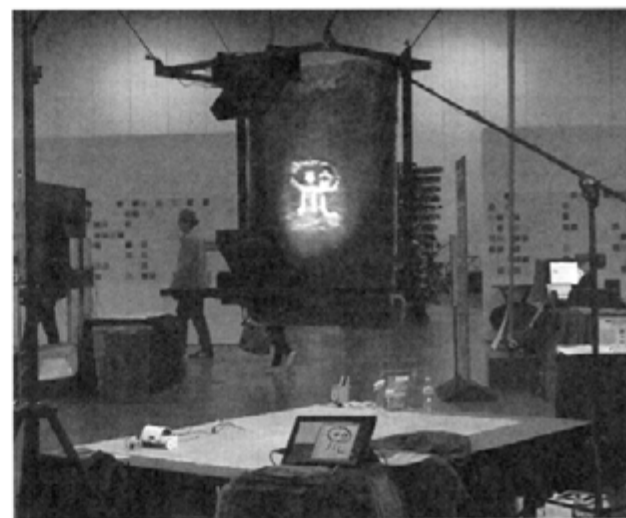


図17 遠距離力照射型デバイスのデモンストレーション。

Fig.17 Demonstration of pressure projection type device.

の約4倍以上の時間が必要であることが確認された。

超音波照射部が、既に描画を行った場所と比べて特に明るく見えることが分かった。描画後の毛は、その弾力によって逆方向に戻る作用があり、描画中の部分(超音波照射部)とは毛の角度が異なるため、このような現象が生じると考えられる。また、超音波に変調を加えると、毛が振動して高速に点滅して見える効果も確認できた。

6.2 実演展示

本システムを、SIGGRAPH2014の技術展示部門において、5日間で約4000人の前でシステムを披露し、また1000人程度の体験者を得た。遠隔力照射デバイスの展示では、布が空中に浮いているような展示イメージとなるように、天井から吊るす構成にした。超音波集束装置は図17のように布を吊るしているフレームに固定することで、展示中、風などによって布との位置関係が変わらないようにした。体験初期段階から体験者は描画の原理に興味を示し、布の裏側に移動して探索する体験者も現れた。

7 結論と今後の展開

本研究では、布の被毛が逆毛すると表面の反射特性が変化して色が異なって見える現象を利用したディスプレイ技術を提案し、ローラー型とペン型、遠隔力照射型の3種類の描画デバイスを開発した。また、本提案によるディスプレイの可能性を評価し、生活シーンにおける様々な応用例を示した。本技術は布で構成された日用品を、復旧不可能な修正や加工を施すことなくコンピュータのディスプレイとして活用することを可能にする。また、拡散反射にもとづくため眩しくなく、環境光を利用するためコストもかからない。このように、従来のディスプレイ技術と比較して様々な優位性が挙げられるが、現状ではいくつか制約が見られる。今のデバイスは描画する布上における自身の位置を計測するためのセンサを有しておらず、ユーザが慎重に開始位置を調整して牽引を行わなければならない。将来的には布上での絶対的な位置を計測できるセンサを装備し、デバイスをより自由に動かして模様を描画できるようにする。また、移動型ロボットにローラー型デバイスを設置して自動描画を実現していきたい。ペン型デバイスに関しては、ペン先を布に強く当ててしまうとタイヤの回転が停止することが問題にあげられる。遠隔照射型については、超音波の強度や照射時間の制御による毛の角度の操作を実現し、ON、OFFではない色の濃淡の制御に挑戦する。また、布自体の耐久性も課題となる。描画を繰り返すと少しずつ表面の被毛が抜け落ち、模様が見えづらくなってし

まう。そのため、布への損傷が少ないデバイスの開発を計画している。そして、現在の手法では多色表示が不可能であるため、逆毛した際に場所によって様々な色が現れるカーペットを製作し、選択的に被毛を逆毛させる事で多色表示を可能にしたいと考えている。

謝辞

本研究は JST ERATO および科研費若手研究 (A) (26700017) の支援を受けたものである。また計測実験に関しては、千葉大学 津村徳道准教授の協力による。記して謝意を表する。

参考文献

- [1] Coelho, M. and Maes, P. Sprout I/O: a texturally rich interface. In *Proc. TEI '08*. ACM, pp. 221-222.
- [2] Furukawa, M., Uema, Y., Sugimoto, M., and Inami, M. Fur interface with bristling effect induced by vibration. In *Proc. AH '10*. ACM, Article 17, 6 pages.
- [3] Hanna, N. Water Calligraphy Device. <http://www.nicholashanna.net/>.
- [4] Harrison, C., Benko, H., and Wilson, A.D. OmniTouch: wearable multitouch interaction everywhere. In *Proc. UIST '11*. ACM, pp. 441-450.
- [5] Hoshi, T. Compact ultrasound device for noncontact interaction. In *Proc. ACE '12*, ACM, pp. 502-505.
- [6] Hullin, M.B., Lensch, H., Raskar, R., Seidel, H., and Ihrke, I. Dynamic display of BRDFs. In *Computer Graphics Forum (Proc. EG)*. pp. 475-483.
- [7] Kawana, H. dotanco, <http://gekitetz.com/dotanco/>.
- [8] Kushiya, K., Ikei, R., and Sasada, S. Tactile grass landscape. In *ACM SIGGRAPH 2008 posters*. ACM, Article 39, 1 pages.
- [9] Malzbender, T., Samadani, R., Scher, S., Crume, A., Dunn, D., and Davis, J. Printing reflectance functions. *ACM Trans. Graph.* 31, 3, Article 20 (June 2012), 11 pages.
- [10] Master, B. Lazy man Zen garden, <http://youtu.be/rNGPERdIqZA>.
- [11] Matusik, W., Ajdin, B., Gu, J., Lawrence, J., Lensch, H. P. A, Pellacini, F., and Rusinkiewicz, S. Printing spatially-varying reflectance. *ACM Trans. Graph.* 28, 5, Article 128 (December 2009), 9 pages.
- [12] Mistry, P., Maes, P., and Chang, L. WUW - wear Ur world: a wearable gestural interface. In *Ext. Abst. CHI '09*. ACM, pp. 4111-4116.
- [13] Nojima, T., Ooide Y., and Kawaguchi, H. Hairlytop interface: An interactive surface display comprised of hair-like soft actuators, In *Proc. WHC '13*. IEEE, pp. 431 - 435.
- [14] Ochiai, Y., Oyama, A., Hoshi, T., and Rekimoto, J. Theory and Application of the Colloidal Display: Programmable Bubble Screen for Computer Entertainment. In *Proc. ACE '13*. Springer, pp. 198-214.

- [15] Raffle, H. Joachim, M.W., and Tichenor, J. Super cilia skin: an interactive membrane. In *Ext. Abst. CHI '03*. ACM, pp. 808-809.
- [16] rAndom International. PIXELROLLER.
<http://random-international.com/work/pixelroller/>.
- [17] Rivers, A., Moyer, I.E., and Durand, F. Position-correcting tools for 2D digital fabrication. *ACM Trans. Graph.* 31, 4, Article 88 (July 2012), 7 pages.
- [18] Rozin, D. Wooden Mirror.
<http://www.smoothware.com/danny/woodenmirror.html>
- [19] Saakes, D., Inami, M., Igarashi, T., Koziyumi, N., and Raskar, R. Shader printer. In *ACM SIGGRAPH 2012 Emerging Technologies*, ACM, Article 18, 1 pages.
- [20] Sugiura, Y., Kakehi, G., Withana, A., Lee, C., Sakamoto, D., Sugimoto, M., Inami, M., and Igarashi, T. Detecting shape deformation of soft objects using directional photorefectivity measurement. In *Proc. UIST '11*. ACM, pp. 509-516.
- [21] Sugiura, Y., Lee, C., Ogata, M., Withana, A., Makino, Y., Sakamoto, D., Inami, M., and Igarashi, T. PINOKY: a ring that animates your plush toys. In *Proc. CHI '12*. ACM, pp. 725-734.
- [22] Sugiura, Y., Toda, K., Hoshi, T., Inami, M. and Igarashi, T. Graffiti Fur: Turning Your Carpet Into a Computer Display. In *ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies*. ACM, 1 pages.
- [23] Sugiura, Y., Toda, K., Hoshi, T., Kamiyama, Y., Igarashi, T. and Inami, M. 2014. Graffiti fur: turning your carpet into a computer display. In *Proc. UIST '14*. ACM, New York, NY, USA, 149-156.
- [24] Wakita, A., and Shibutani, M. Mosaic Textile: Wearable Ambient Display with Non-emissive Color-changing Modules, In *Proc. ACE '06*. ACM, Article 48.
- [25] Xiao, R., Harrison, C., and Hudson, S. E. WorldKit: Rapid and Easy Creation of Ad-hoc Interactive Applications on Everyday Surfaces. In *Proc. CHI '13*. ACM, pp. 879-888.
- [26] Zoran, A., and Paradiso, J.A. FreeD: a freehand digital sculpting tool. In *Proc. CHI '13*. ACM, pp. 2613-2616.
- [27] 杉浦裕太, 星貴之, 神山洋一, 五十嵐健夫, 稲見昌彦, 超音波集束装置を用いた被毛布への描画手法, 第19回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 名古屋, 9月17-19日, 2014.
- [28] 戸田光紀, 杉浦裕太, 平場吉輝, 稲見昌彦, Graffiti Fur: 柔軟物の毛羽立ちを利用した描画手法, エンタテインメントコンピューティング2013, 香川, 2013年10月.
- [29] 星貴之, 非接触作用力を発生する小型超音波集束装置の開発, 計測自動制御学会論文集, vol. 50, no. 7, pp. 543-552, 2014.

(2015年1月14日受付)

[著者紹介]

杉浦 裕太 (正会員)

2013年慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科博士後期課程修了。博士(メディアデザイン学)。2012年より日本学術振興会特別研究員(DC2)。2013年より日



本学術振興会特別研究員(PD)。2014年慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科特任助教。2015年より、国立研究開発法人産業技術総合研究所人間情報研究部門デジタルヒューマン研究グループ産総研特別研究員。情報処理学会 山下記念研究賞受賞。柔軟物コンピューティングに関する研究に従事。

戸田 光紀 (非会員)



2013年慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科博士前期課程修了。現在、株式会社ZMP。

星 貴之 (会員)



2008年東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了。日本学術振興会特別研究員、熊本大学助教を経て、2011年名古屋工業大学若手研究イノベータ養成センター特任教員(テニュア・トラック助教)、現在に至る。触覚デバイスの研究と集束超音波の応用開拓に従事。文部科学省NISTEP「科学技術への顕著な貢献2014(ナイスステップな研究者)」選定。

神山 洋一 (正会員)



1980年生まれ。2001年東京都立工業高等専門学校電気工学科卒業。2004年山梨大学工学部電気電子システム工学科卒業。2007年同大学大学院医学工学総合教育部電気電子システム専攻修了。山梨大学非常勤講師・ロッタ有限会社、JST/ERATO 五十嵐デザインインタフェースプロジェクト技術員を経て、2013年より慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科研究員。

五十嵐 健夫 (非会員)



東京大学大学院情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻教授。2000年、東京大学大学院においてユーザインタフェースに関する研究により博士号(工学)取得。2002年3月に東京大学大学院情報理工学研究科講師就任、2005年8月より同助教授。IBM科学賞、学術振興会賞、ACM SIGGRAPH Significant New Researcher Award, Karayanagi Prize in Computer Science等受賞。ユーザインタフェース、特に、インタラクティブコンピュータグラフィクスに関する研究に取り組んでいる。

稲見 昌彦 (正会員)



1999 年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士（工学）。東京大学助手、科学技術振興機構さきがけ研究者、マサチューセッツ工科大学コンピュータ科学・人工知能研究所客員科学者、電気通信大学教授などを経て、2008 年 4 月より慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科教授。超人スポーツ協会共同代表。日本バーチャルリアリティ学会理事・評議員、情報処理学会エンターテインメントコンピューティティング研究会主査、コンピュータエンターテインメント協会理事等を歴任。IEEE Virtual Reality Best Paper Award, 米「TIME」誌 Coolest Inventions, 文化庁メディア芸術祭優秀賞, 文部科学大臣表彰若手科学者賞, 日本 VR 学会論文賞など各賞受賞。