

## 基礎論文

# FuwaFuwa: 複数のフトリフレクタモジュールを用いた 柔軟物への接触検知手法

杉浦 裕太\*<sup>1</sup> 笥 豪太\*<sup>2</sup> ウィタナ アヌーシャ\*<sup>3</sup> 坂本 大介\*<sup>4</sup>

杉本 麻樹\*<sup>5</sup> 五十嵐 健夫\*<sup>4</sup> 稲見 昌彦\*<sup>6</sup>

**FuwaFuwa: Detecting Touch Interaction Applied to Soft Objects  
Using Photoreflective Sensor Modules**

Yuta Sugiura\*<sup>1</sup> Gota Kakehi\*<sup>2</sup> Anusha Whitana\*<sup>3</sup> Daisuke Sakamoto\*<sup>4</sup>  
Maki Sugimoto\*<sup>5</sup> Takeo Igarashi\*<sup>4</sup> and Masahiko Inami\*<sup>6</sup>

**Abstract ---** We present the FuwaFuwa sensor module, a round, hand-size, wireless device for measuring the shape deformations of soft objects such as cushions and plush toys. It can be embedded in typical soft objects in the household without complex installation procedures and without spoiling the softness of the object because it requires no physical connection. Six LEDs in the module emit IR light in six orthogonal directions, and six corresponding photosensors measure the reflected light energy. One can easily convert almost any soft object into a touch-input device that can detect both touch position and surface displacement by embedding multiple FuwaFuwa sensor modules in the object. A variety of example applications illustrate the utility of the FuwaFuwa sensor module. An evaluation of the proposed deformation measurement technique confirms its effectiveness.

**Keywords:** Soft User Interface, Density Measurement, Photoreflectivity, Multiple Sensors

## 1 はじめに

家庭はクッションやぬいぐるみ、枕や布団といった綿が内包された柔らかいもの（柔軟物）であふれている。人間はこれらと意識下または無意識下で様々なインタラクションをしている。例えば、クッションに対しては抱擁をしたり、ぬいぐるみに対しては撫でたりする。このように硬い入力装置では起こりえなかったインタラクションスタイルを情報家電やゲームの操作に取り入れることや、人間の無意識な行動の中から状態や感情を抽出し、それに適したサービスを提供するような取り組みがヒューマン・コンピュータ・インタラクション（HCI）の分野で盛んに研究されている[3][4]。

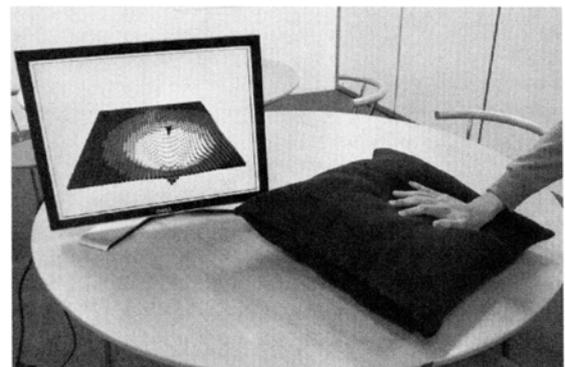


図1 フトリフレクタによる柔軟物の密度計測

Fig.1 Detecting shape deformation of soft object using directional photoreflectivity measurement

柔軟物とのインタラクションを行う方法は主に三つに分類できる。一つめは、外部カメラなどの環境センサを用いた計測手法である[9]。これは、環境にセンサを配置するだけで計測可能なため、電源供給問題などを解決できる一方で、遮蔽の問題が生じるため、限定された環境では動作するが、我々が対象とする居住空間においては導入の敷居が高い。二つめは、人側にセンサを装着して、インタラクションを計測する方法である[5]。これは、人側にセン

\*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 チームラボ株式会社

\*2 Team Lab Inc.

\*3 SUTD Singapore University of Technology and Design

\*4 東京大学大学院理工学系研究科

\*4 Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

\*5 慶應義塾大学理工学部情報工学科

\*5 Department of Information and Computer Science, Keio University

\*6 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

\*6 Graduate School of Media Design, Keio University

サを取り付ける必要性があるため、毎日着脱するという手間がかかる。三つめは、柔軟物側にセンサを組み込んで計測する方法である。

三つめの柔軟物側にセンサを埋め込むアプローチは様々な手法が提案されている。一つは表面にセンサを貼付けて計測する手法である[12]。これは、柔軟物に簡単に取り付けることができる一方で、柔軟物本来のやわらかさを損なってしまう恐れがある。もう一つは、内部にセンサ、特に圧力センサを埋め込みインタラクションを計測する方法が考えられるが、綿の内部の圧力変化は微小で、これを既存の圧力センサで捉えることは難しい。また、綿素材の代わりに、センサで捉えやすい素材や構造を専用に構築して、その変化特性を計測するという方法もあるが、これを既存の柔軟物に組み込んでいくことは難しい。そこで、我々は人が柔軟物に触れる際に生じる綿の変形、特に密度の変化をセンサで計測することで柔軟物をインタラクティブなシステムに利用する。

本研究では、クッションやぬいぐるみなどの綿が内包された柔軟な日用品に組み込むことができ、柔軟物の柔らかさを損なわずインタラクションを計測可能な FuwaFuwa (ふわふわ) というセンサモジュールを開発した(図1)。本モジュールは、発光素子(赤外LED)と受光素子(フォトトランジスタ)が組み合わさったフォトリフレクタと計算機、無線素子がパッケージされたものである。綿の密度を計測するためにフォトリフレクタを用いた手法を提案する。これは、綿に赤外光を照射したときに散乱を引き起こす現象を利用して、この光量を検出することで、綿の密度計測を実現する。この手法の特徴として、(1)綿素材とフォトリフレクタを接着剤等で付ける必要がないため、容易に柔軟物への埋め込みができる(2)フォトリフレクタから照射された赤外光が綿の深い場所まで到達するため、広い範囲での密度変化をダイナミックに計測できる(3)歪みゲージのように増幅回路が必要なくモジュールの構成が単純、(4)綿の奥深くに埋め込むことができ、柔軟物の表面に設置するセンサと比較して、柔軟物の柔らかさを保つことができる、といったことがあげられる。本研究では、さらにモジュールを複数個協調させることで、二次元平面における接触位置と密度を同時に計測できるマルチセンサシステムを構築した。さらに、機械学習による複数センサでソファ上でのユーザの状態を最後に、この FuwaFuwa センサが組み込まれた柔軟物を利用して複数のアプリケーションを提案した。なお、本稿は、[11][15][16]をまとめたものである。

## 2 関連研究

### 2.1 柔軟なセンサ

柔軟な計測システムとして、Ohmuraらは、フォトリフレクタを用いてウレタンの変形を計測する手法を提案し、これをロボットの皮膚として応用している[8]。柔軟物で空気を閉じ込め、この気圧の変化を計測することで、インタラクションを取得する試みもある[7]。Hiramatsuらは、エアバックに空気圧センサを取り付けたユニットを放射状に複数配置することで、ボール状の物体に対する変形位置及び圧力の計測が可能な手法を提案している[2]。導電性のウレタンフォームの変形による抵抗値の変化を使用した柔軟センサとして、Smithらは、導電性の布と導電性のウレタンフォームを放射状に配置した柔らかい3D入力デバイスを提案している[10]。Murakamiらは、非導電性のウレタンフォームを立方体の形状に作り、合計90個の導電性のウレタンフォームを取り付けることで3Dのオブジェクトを直感的に操作できるデバイスを開発している[6]。

本論文で提案するFuwaFuwaは、特に綿が充填されている柔軟物に対するインタラクションを取得することを目的としており、光センサを用いているため綿の密度変化を計測する。これによりセンサは小型になり、ダイナミックな密度変化を計測することが可能である。

### 2.2 フォトリフレクタを用いた計測

本節では、フォトリフレクタを利用した計測方法を紹介する。フォトリフレクタは、赤外LEDとフォトトランジスタがセットになったセンサである。センサが照射した赤外光の反射量をフォトトランジスタで計測することで、物体との距離だけでなく、空間中の物質の密度を計測することができるセンサである。

フォトリフレクタは汎用性が高く安価であるため、様々な目的で利用されている。Hiroseらは、1987年頃から光源と光センサのユニットが、物体の変形を取得する方法として有効であると考え、これらの組み合わせにより様々な物理量を計測する手法を考案した[18]。またこれを応用してロボットシステムの試作をした。

また、フォトリフレクタは、光の反射率の違いから物体の色の判別をすることもできる。この特徴を利用すればラインをトレースして移動するロボットを構築することができる。加えて、指の腹を押さえたときの爪の色の変化を読み取ることで、与えた力の大きさや、指の曲げ角度を検出する方法が提案されている[5]。

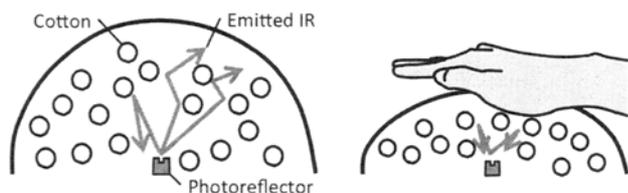


図2 綿の密度に応じた反射光の変化

Fig.2 Reflected light is lower at low density (left) than at high density (right)

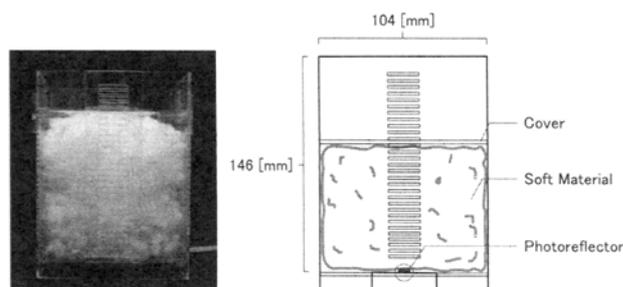


図3 綿の密度を段階的に変える実験装置

Fig.3 Experimental sensor apparatus



図4 実験で利用した素材: 綿状のポリエステル, 羽毛, 自然の綿

Fig.4 Soft materials: polyester cotton (left), small feathers (center), and natural cotton (right)

さらにフトリフレクタは、空間中の物質の密度を計測するセンサとしても利用されている。例えば、水の濁り具合を計測する濁度計でも特に散乱光式濁度計は、水に光を照射させて水中の粒子にぶつかったときの散乱光をフォトトランジスタで受光することで、どのくらい濁っているかを計測する[17]。煙探知機も同様に、煙に光が照射されたときに散乱する特性を利用して、それを受光素子で計測するという仕組みで動作している。また、光源が近赤外線を放出するフトリフレクタを利用すれば、脈波を計測することもできる。これは、血中のヘモグロビンが赤外光を吸収する特性を利用する[1]。これは脈波により血管の動脈血流量の容積が変化し、それに伴い赤血球に含まれるヘモグロビンの量が変化するので、光路に動脈があるのと、吸光度の変化として、検出することができる。本研究では、綿の密度変化時に内部で散乱する赤外光の変化を捉えることで力を算出する。

### 3 フトリフレクタを用いた綿に加わる力の計測

綿の密度変化を計測する手法として、フトリフレクタを用いる。これにより、柔軟物体の表面に機械的に接触するセンサを取り付けることなく、綿の密度変化を高速で計測することができる。フトリフレクタは発光素子（赤外 LED）と受光素子（フォトトランジスタ）が一つのケースにパッケージされているものである。フトリフレクタは照射した光の反射量によって出力値が変化するもので主に距離計測に用いるものだが、これを綿の内部に入れることでその綿の密度変化の計測に応用できることを発見した。これは内部の密度によって綿と綿の間隔が変化することに伴い、照射した光の反射量変化を利用している（図2）。

#### 3.1 実験概要

綿の密度とフトリフレクタの電圧値の関係を示すために実験をした。フトリフレクタは、市販品のこの実験では、図3の亚克力ボックスの中に綿を充填し、底にフトリフレクタを張り付け、段階的に箱の内部の密度を変化させたときのセンサの電圧値をプロットしていくものである。素材として、ポリエステル製の綿と、羽毛、さらに自然にとれる綿を用意した（図4）。綿のヒステリシスの影響が考えられるため、実験では綿の密度を増加させたときと減少させたときの両方を計測した。実験の手順は次の通りである。

#### 3.2 実験手順

1. 箱に 10g の綿を投入する
2. 2mm ずつ箱の天板を下げる
3. センサ値を 10Hz で 10 回記録する
4. これ以上力を加えられないと判断するまで 2 と 3 を繰り返す
5. 2mm ずつ天板を戻す
6. センサ値を 10Hz で 10 回記録する
7. 天板が初期位置に戻るまで 5 と 6 を繰り返す

#### 3.3 実験結果

図5に綿状のポリエステルの密度とフトリフレクタのセンサ値の平均の関係を示すグラフを示す。センサ値は、密度の増減に従って単調増加、減少していくことがわかる。センサ値は、 $0.0257\text{g/cm}^3$  のところで振り切れてしまった。また、密度が低い  $0.0077\text{g/cm}^3$  から  $0.0092\text{g/cm}^3$  の範囲の数値に着目すると、ヒステリシスの影響が出ていることがわかる。

羽毛とセンサ値の関係は図6に示す。これは計測を開始してまもなく値が振り切れてしまった。自然の綿は、箱に素材を組み込んだとたんに振り切れて

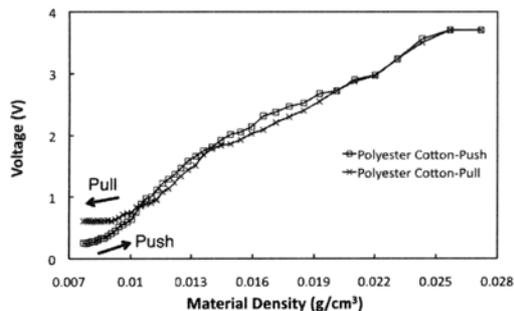


図5 綿状のポリエステル密度とセンサ値の関係

Fig.5 Average measured voltage against material density polyester cotton

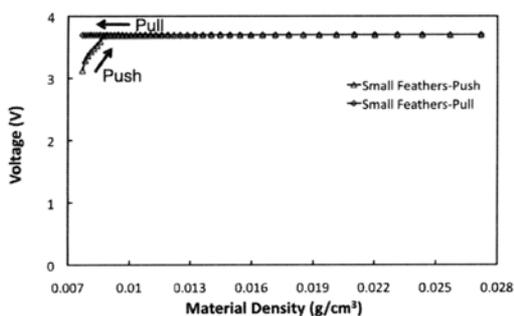


図6 羽毛とセンサ値の関係

Fig.6 Average measured voltage against material density small feathers

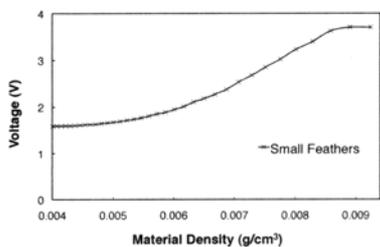


図7 羽毛の密度とセンサ値の関係

Fig.7 Average measured voltage against low-level density of small feathers (left) and natural cotton (right)

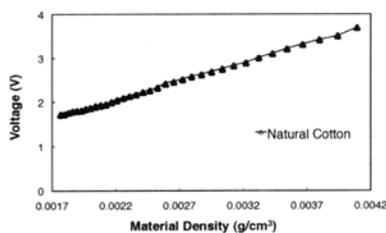


図8 自然の綿の密度とセンサ値の関係

Fig.8 Average measured voltage against low-level density of small feathers (left) and natural cotton (right)

しまった。投入する素材の量を変更して再度計測した時のグラフを図7と図8に示す。

上記の三つの素材以外にも、本手法で、ビーズ素材などの密度変化を計測可能か実験した。この実

験で利用した直径 2mm のビーズは構造自体の変化が少ないため、本手法で計測することが困難であった。その他の柔軟物は、例えばオガクズなどがあげられるがこれに関しては今後検討する。

本センサ周辺の綿の密度変化が生じれば計測することが可能である。伸縮しない素材に内包されている綿の密度は力を加えていくことで一様に変化すると仮定できる。一方で体積が大きい対象物の場合、内部の密度を変化させるために、大きく変形させる必要がある。1m×1m×1m のダンボール箱に綿を 5kg 敷き詰めて、底にセンサモジュールを埋めた状態で計測できるか検証した。結果は、図5と同様な密度とセンサ出力の関係になった。

## 4 実装

### 4.1 センサモジュール

既存の柔軟物体に容易に投入することができるセンサモジュールを実装した。前章で示したフォトリフレクタを放射状に 6 つ配置し、無線通信機器 (ZigBee) , 計算処理を行うためのマイクロコントローラ、バッテリーをパッケージ化することによって単独で動作するセンサモジュールを開発した (図9)。本モジュールは直径 64mm と掌に収まる大きさで、一回の充電で約 3 時間使用することができる。

図 10 はセンサモジュールを綿の内部に入れて密度変化させたときの各々のフォトリフレクタの値である。モジュールの S1 の方向から力を加えたため、このセンサと反対側に取り付けられているセンサの

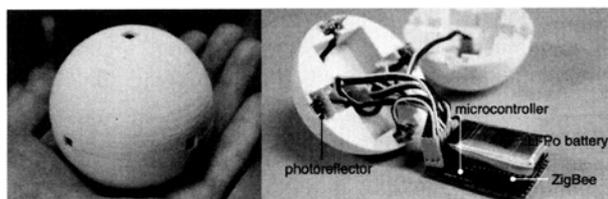


図9 センサモジュールの外観(左), 構成(右)

Fig.9 Photograph of FuwaFuwa sensor module (Left), Components (Right)

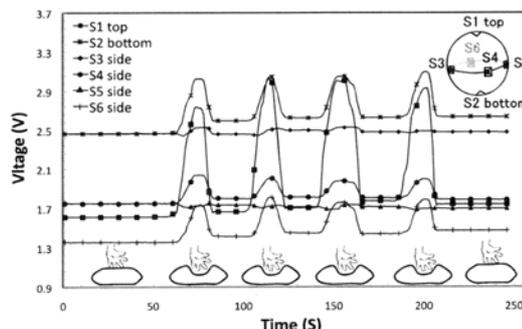


図10 各々のフォトリフレクタの値

Fig.10 Each sensor values in the module

値が他のセンサと比較して大きく変化していることがわかる。図 10 では特に S2 のセンサ値は、手で押しつぶして離れた際に、センサの値が元に戻りきらない状態となっていることがわかる。S2 はセンサモジュールの底面に配置したフォトリフレクタであり、センサの重量によりこの状態になったと考える。つまり、一度押しつぶした後にセンサが初期位置に戻りきらず、S2 付近の綿がセンサに接近し続けている状態になっていると考察する。これはセンサの重量を軽量化することで解決できると考える。

#### 4.2 マルチセンサシステムによる接触検出

センサモジュールには無線通信機器が取り付けられており、複数のモジュール同士でデータをやり取りすることが可能である。これを用いて柔軟物にかかる二次元平面上における密度変化と重心を算出する。接触位置は質点系の重心の計算式を応用して算出される。 $n$  はセンサモジュールの数、 $p_i$  は  $i$  番目のモジュールにおけるフォトリフレクタの合計値、 $x_i$  と  $y_i$  は  $i$  番目のモジュールにおける座標値、 $M$  は全てのモジュールのセンサの合計値を足し合わせたものである。また  $M$  の値は密度としても用いる。センサ値から密度の計算には、図 5 のグラフを線形に補完して、推定した。

$$x = 1/M \sum_{i=1}^n p_i x_i \quad \dots (1)$$

$$y = 1/M \sum_{i=1}^n p_i y_i \quad \dots (2)$$

$$M = \sum_{i=1}^n p_i \quad \dots (3)$$

柔軟物に投入された複数のセンサモジュールは ZigBee によってセンサ値をサーバー (MacBook Pro) に送る。サーバから各アプリケーションには、TCP/IP 経由で通信を行いクライアントは、各々の目的でデータを処理し、その結果を表示する。

赤外線透過カメラを用いて、綿や布を透過して放出されているフォトリフレクタの赤外光を捉えることでセンサの位置を初期化する (図 11)。現段階では、センサの ID の関連づけはユーザ自身の手で入力する必要があるが、将来的には、キャリブレーション時に点滅パターンを変化させることで自動的に ID を割り振るような仕組みを実装していく予定である。上述の式で算出された接触位置を可視化するためのソフトウェアを開発した (図 12)。色と形状は接触位置とその密度によって変化する。

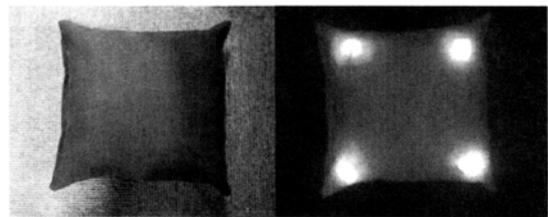


図11 センサ位置の初期化

Fig.11 Detecting locations of FuwaFuwa sensor modules: image with normal camera (left) and IR camera (right)

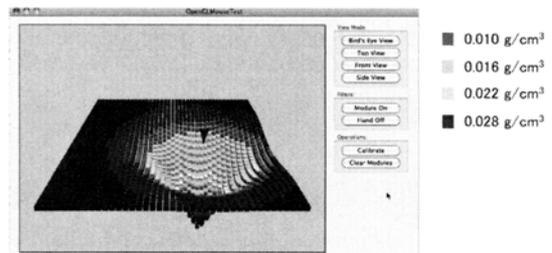


図12 センサデータの可視化

Fig.12 Visualized sensor data

現状のセンサモジュールの場合は 30cm 程度離して配置すると良い。それよりもセンサ同士を近づけると、現在の席外光の発光量の場合には、互いに干渉してしまう恐れがあるからである。

#### 4.3 機械学習による姿勢認識

フォトリフレクタが複数組み込まれた柔軟物において、人間の姿勢状態を推定可能なシステムを構築した。柔軟物として様々な姿勢を取りやすいソファを選択し、フォトリフレクタをアレイ状に並べて広範囲での密度の分布の取得した。まず座面に 12 個×2 領域、背もたれ部分に 4 個×2 領域の合計 32 個のフォトリフレクタを並べ、組み込んだものを開発した。

取得する人間の姿勢として、ソファ上に誰も着座していない、一人が左右どちらの座面に着座して背もたれに寄りかかっている／寄りかかっていない、一人が横たわっている、二人が着座している、という状態を考えた。

姿勢の分類方法として、機械学習を導入した。機械学習の手法として Support Vector Machine (SVM) を用いた。SVM の実装には、PSVM: Support Vector Machines for Processing (PSVM)<sup>1</sup> ライブラリを用いた。事前学習では、人間がソファの上で実際に取得したい姿勢を取り、それぞれの姿勢でデータを 20 回蓄積した。学習後に人間が同様の姿勢をとり、全ての姿勢において、70%以上の確率で姿勢を分類できることを確認した。今回は機械学習が本センサシステムに適用できるかどうかの試験的実装である

<sup>1</sup> <http://makemetics.com/code/psvm/>



図13 ロボットの眼の向きが変化

Fig.13 Eyes move toward touch position

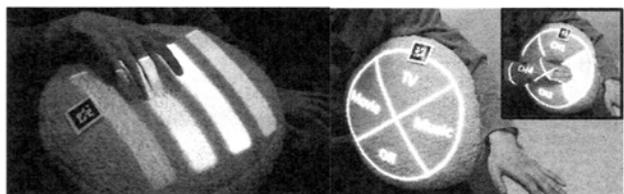


図14 クッション型インタフェース

Fig.14 Music instrument

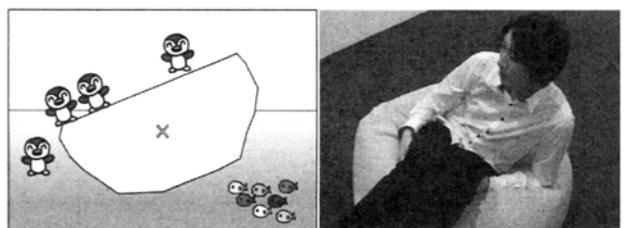


図15 ソファを利用したバランスゲーム

Fig.15 Balancing game display (left); beanbag chair as game controller (right)



図16 枕に頭をのせると自動で消灯する照明

Fig.16 Electric light is turned off when user put his/her head on the pillow

ため、現状の実装における認識精度は十分ではないが、これのさらなる精度向上に向けて、センサ値を正規化したり、フィルターをかけたり、次元数を変えて学習させることで、その認識率は向上すると考えている。また認識結果をある程度蓄積してその平均をとることで認識率の向上を期待できる。

## 5 アプリケーション

### 5.1 柔らかいロボットイ

FuwaFuwa センサは柔軟物内部に埋め込んでも計測できるため、この特徴を応用して芯まで柔らかいインタラクティブなロボットを制作した。ロボットが柔らかい外観を保持することで、人とロボットの間の身体的な障壁を軽減することができるため、セラピーやエンタテインメント目的で数多くのやわらかいロボットが提案されている[14]。一方で、これ

らのロボットは、人が押しつぶしていくとすぐ構造物の感触が把握できてしまい、実際の柔らかさを実現できているのは表面部分だけであった。FuwaFuwa センサは、柔軟物の奥深くに埋め込んでもインタラクティブを計測することができるため、芯まで柔らかいロボットを作成することができる。このロボットはサーボモータによって目が回転し、あたかも呼吸をしているかのように胴体が動くロボットを簡単に実装することができるようになった。本ロボットでは、ユーザが触れた方向に目を向け、押しつぶす加減によって鳴き声の強弱が変化するようにインタラクティブを設計した(図13)。

### 5.2 クッション型のインタフェース

クッションは、人間に快適な姿勢を提供する機能により我々の生活空間にすでに溶け込んでいる。我々はこれに本来の機能を障害しないまま新たな機能を付加することを考える。まず我々は、クッションを利用して家庭内のメディアを操作するアプリケーションを開発した。このクッションには4つのFuwaFuwa センサモジュールが内部に組み込まれており、これらを協調させることでユーザの接触位置を計測することができる。操作メニューはプロジェクタによってクッションに照射されており、ユーザはいくつかの区画になった場所を叩くことでそれを選択し、撫でたりすることで動画の早送りのコマンドを入力することが可能となる。これによって、生活空間に溶け込む操作インタフェースを実現できた。

柔軟物に対して人間は身体全身を使ってインタラクティブをするため、この人間の身体性を反映する楽器を提案する。具体的には、押す強さによって音のボリュームが変化し、触った場所によって異なる音程の音を鳴らすことができる。また、複数の枕にセンサモジュールを投入することで、複数人で操作を楽しむことができたり、枕の種類によって音色を変化させたりするような実装をした。

### 5.3 ソファを利用したバランスゲーム

ソファにセンサモジュールを投入することで、人が座っているときの重心を計測することが可能であり、これを利用したバランスゲームを開発した。内容は、時間内にできる限り氷山を重心で制御しながら上から落ちてくるペンギンを保つというものである(図15)。任天堂のWii fitのように体を動かすことを第一の目的としたゲームが登場しているが、柔軟物体に対しては、硬いハードウェアでは起こりえなかった身体的なインタラクティブが起こりうるため、このような目的にも本研究を応用することが可能である。また、ゲームだけでなくユーザの姿勢を計測して最適な姿勢を促すサービスを提供できる。

## 5.4 照明の制御

人の日常的な行動を計測して、環境がそれに合わせて自然に変化していくような例として、我々は、人が寝るために布団に入り、枕に頭をのせると自動的に消灯するアプリケーションを作成した(図16)。これは、枕に組み込まれた FuwaFuwa センサが、ユーザが枕に頭をのせたかどうかを計測して、段階的に照明の光を小さくしていくようにプログラムされている。

## 6 議論

### 6.1 既存の日常用品を扱う意義

コンピュータが埋め込まれた日用品や環境が連携して最適なサービスを提供するような取り組みがユビキタスコンピューティングの文脈において盛んに行われている。一方で、現在の研究の多くは、コンピュータを新たに埋め込むことを想定して、対象物の日用品や環境が設計されていることが多い。この場合、新規に専用の日用品を購入する必要があるため、コストがかかってしまうという課題や、導入によって部屋の外観を変更する必要がある恐れがあり、敷居が高い。この理由で、既に家庭にある物体にコンピュータを埋め込む技術が今後重要になると考える。我々が提案するセンサモジュールは、それ専用で作られた日用品を購入することなく、一般的に市販されているものに組み込むことができるという特徴がある。また、その日用品の本質的な機能(今回は柔軟物であるため、その触感など)を失わずにコンピュータを埋め込むということも必要な要件であろう。

### 6.2 システムの適用範囲と今後の課題

今回は本稿で提案したコンセプトの検証(Proof of Concept)のための試作であり、このため試作したセンサモジュールのハードウェアの問題として、バッテリーの持続性に課題がある。現在使用しているバッテリーでは3時間程度しか動作させることができないため、ユーザはその都度センサを取り出してバッテリー交換・充電作業を行わないといけない。これは特にソファなど深い位置にセンサモジュールを配置したときに大変な作業となる。また、現状のモジュールのサイズは64mmであり、例えば衣服やラグ、小さなぬいぐるみのような柔軟物体に組み込むことはできない。バッテリーの持続性とセンサモジュールのサイズはトレードオフな問題であり、これらは使用用途に合わせて選択できるようにすべきであると考えている。また、例えばソファのような一度センサを入れたらその後動かすことの無いようなものに対しては有線で供給できるような仕組みを

提供する必要がある。また、クッションのように無線給電が有効に機能すると考えるものに対しては、外部から給電できるような仕組みを検討したい。その他にも、ユーザが利用していないときには複数あるフォトトリフレクタのうちのいくつかの電源を切ることで省電力化が期待できる。現在は、一般的に市販されているマイクロコントローラや ZigBee モジュールを用いているため、これを本モジュール専用のもので作成することで、モジュールを小型化できるだろう。

また柔軟物の時間応答におけるヒステリシスの考慮も非常に重要な点であり、この制約を超えたアプリケーションやサービスの提供は難しい。本研究で頻繁に利用している40cm×40cm×20cmのクッションに密度が0.020g/cm<sup>3</sup>になるようにポリエステル製の綿を充填し、どの程度の速度で従来の形状に復元するか検討をした。手で押せる限界まで押しつぶして離れた後は、約500ms以内で復元した。つまりこの時間内にユーザの操作を要求することは困難である。

また今回は実験的にフォトトリフレクタと綿の密度の関係性を示したが、今後はこの関係をモデル化することで、様々な種類の綿に適用していく予定である。

## 7 おわりに

本稿では、一般に市販されている柔軟物をインタラクティブシステムとして活用するための計測技術を提案した。具体的には、フォトトリフレクタを用いて綿の内部密度を計測する手法を提案した。また、フォトトリフレクタで構成されたセンサモジュールを柔軟物に複数組み込み、それらを連動させることで柔軟物上の二次元平面上の接触位置や密度を計測することが可能なマルチセンサシステムを構築した。本システムを利用したアプリケーションを複数制作し、本システムの利点や限界点を議論した。

本論文においては、エンタテインメントのためのアプリケーションを数種類提案したが、センサモジュールを小型化することで、ダウンジャケットや布団などの薄い素材にも入れることが可能であり、ウェアラブルコンピューティングや家庭内の人の行動を認識するためのセンサプラットフォームとしての応用が期待できる。

## 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。

## 参考文献

- [1] Asada, H., Shaltis, P., Reisner, A., Rhee, S. and Hutchinson, R. (2003) Mobile monitoring with wearable photoplethysmographic biosensors. *IEEE Eng Med Biol Mag*, May-June, pp. 28-40.
- [2] Hiramatsu, R. Puyo-con. In *ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Art Gallery & Emerging Technologies*, ACM, pp. 81-81.
- [3] Johnson, M. P., Wilson, A., Blumberg, B., Kline, C. and Bobick, A. Sympathetic interfaces: using a plush toy to direct synthetic characters. In *Proc. CHI '99*, ACM (1999), pp. 152-158.
- [4] Marti, S. and Schmandt, C. Physical embodiments for mobile communication agents. In *Proc. UIST '05*, ACM (2005), pp. 231-240.
- [5] Mascaro, S. and Asada, H. Photoplethysmograph Fingernail Sensors for Measuring Finger Forces Without Haptic Obstruction, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 5, pp. 698-708, 2001.
- [6] Murakami, T. and Nakajima, N. Direct and intuitive input device for 3-D shape deformation. In *Proc. CHI '94*, ACM, pp. 233-236.
- [7] Nakajima, K., Itoh, Y., Hayashi, Y., Ikeda, K., Fujita, K. and Onoye, T. Emoballoon. In *Proc. APCHI '12*, pp. 681-682.
- [8] Ohmura, Y., Nagakubo, A. and Kuniyoshi, Y. Conformable and scalable tactile sensor skin for curved surfaces. In *Proc. ICRA '06*, IEEE, pp. 1348-1353.
- [9] Sato, T., Mamiya, H., Koike, H. and Fukuchi, K. Photoelastic touch: transparent rubbery tangible interface using an lcd and photoelasticity. In *Proc. UIST '09*, ACM, pp. 43-50.
- [10] Smith, R. T., Thomas, B. H. and Piekarski, W. Digital foam interaction techniques for 3D modeling. In *Proc. VRST '08*, ACM, pp. 61-68.
- [11] 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.
- [12] Yagi, I., Kobayashi, S., Kashiwagi, R., Uriu, D. and Okude, N. Media cushion: soft interface to control living environment using human natural behavior. In *ACM SIGGRAPH 2011 Posters*, ACM, Article 46, 1 pages.
- [13] Yasumoto, M. Balance ball interface. In *ACM SIGGRAPH ASIA 2008 artgallery & emerging technologies*, ACM (2008), pp. 41-41.
- [14] Wada, K. and Shibata, T. Social effects of robot therapy in a care house - change of social network of the residents for two months. In *Proc. ICRA '07*, IEEE, pp. 1250-1255.
- [15] 笥豪太, 杉浦裕太, 杉本麻樹, 稲見昌彦, 綿を内包した柔物体を用いた日常生活に溶け込むインタフェース, 第18回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS2010), 2010年12月.
- [16] 杉浦裕太, 笥豪太, ウィタナアヌーシャ, リーカリスト, 坂本大介, 杉本麻樹, 稲見昌彦, 五十嵐健夫, FuwaFuwa: 反射型光センサによる柔軟物体への接触位

置および圧力の計測手法の提案とその応用, エンタテインメントコンピューティング 2011, 東京, 2011年10月.

[17] 濁度計, <http://www.dentan.co.jp/technology/index.html>

[18] 広瀬茂男, 米田完; 光学式変位センサと力センサ, 日本ロボット学会誌, 9, 7, pp.910-911 (1992).

(2014年12月16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。生活インタフェースに関する研究に従事。

## 笥 豪太 (非会員)



2011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、チームラボ株式会社。

## ウィタナアヌーシャ (非会員)



2014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)。現在 SUTD Singapore University of Technology and Design 研究員。ハプティックインタフェースやヒューマンロボットコラボレーション, 実世界指向インタフェースに関する研究に従事。ACM 会員。

## 坂本 大介 (非会員)



2008年, 公立はこだて未来大学大学院システム情報科学研究科 博士(後期)課程修了。博士(システム情報科学) 東京大学にて日本学術振興会 特別研究員 PD, JST ERATO 五十嵐デザインインタフェースプロジェクト 研究員を経て, 現在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 特任講師。ACM/IEEE HRI2007 Best Paper Award, 情報処理学会論文賞, Laval Virtual 2010 Grand Prix du Jury など受賞多数。人

杉浦・寛・ウイタナ・坂本・杉本・五十嵐・稲見: FuwaFuwa: 複数のフトリフレクタモジュールを用いた柔軟物への接触検知手法

とロボットを含む情報環境とのインタラクションデザインに関する研究に従事。

#### 杉本 麻樹 (正会員)



2006年 電気通信大学大学院電気通信学研究科博士後期課程機械制御工学専攻修了。博士(工学)。電気通信大学電気通信学部知能機械工学科特任助教、慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科特別研究講師などを経て、現在、慶應義塾大学理工学部情報工学科准教授。複合現実環境における画像提示装置を用いた移動体の位置・姿勢計測と制御等の研究に従事。

#### 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系研究科講師就任、2005年8月に同准教授、2011年に同教授。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。