The Virtual Reality Society of Japan

TVRSJ Vol.20 No.2 pp.115-121, 2015

基礎論文

光透過性を利用した薄い布の伸縮の計測とその応用

杉浦 裕太[*1]　五十嵐 健夫[*2]　稲見 昌彦[*3]

Detecting Stretch on Fabric Using photo Transmissivity Change

Yuta Sugiura[*1] Takeo Igarashi [*2] and Masahiko Inami [*3]

Abstract --- We have proposed a method to detect stretch of elastic fabric such as stocking and rubber membrane using photo reflector that consist of an IR LED and a phototransistor. The sensing method used is based on our observation that photoreflectors can be used to measure the ratio of expansion and contraction of a stocking using the changes in transmissivity of IR light passing through the stocking. Then, we have developed a simple stretchable sensor that can be easily attached to curved as well as flat surfaces and used to measure tangential force generated by pinching and dragging interactions. Since a stocking is thin, stretchable, and nearly transparent, it can be easily attached to various types of objects such as mobile devices, robots, and different parts of the body as well as to various types of conventional pressure sensors without altering the original shape of the object. It can also present natural haptic feedback in accordance with the amount of force exerted. A system using several such sensors can determine the direction of a two-dimensional force. A variety of example applications illustrated the utility of this sensing system.

Keywords: Photo Transmissivity Change, Tangential Force Input, Soft User Interface, Multiple Sensors

1 はじめに

人間は生まれながらに皮膚を持ち，頬をつねる，頭を撫ででるなどのインタラクションを通して他者に感情を伝達している．本研究は，この皮膚との間に生じる特徴的なインタラクションスタイルを人と情報環境やロボット，さらには遠隔にいる他者とのコミュニケーションに取り入れることで，円滑で自然な情報のやり取りを実現することを目指している．

これまで人工の皮膚を構築する手法は特にロボティクスの分野において提案されてきた[13]．提案されている多くの手法は，皮膚に対する一次元方向の力とその接触位置の計測にとどまっている．一方，皮膚に対して人間は引っ張ったり，撫でたり，捻ったり，つまんだりといった，水平方向に力が生じるようなインタラクションも頻繁に行うため，人工の皮膚もこのような操作を取得できることが重要である．

そこで本研究では，人間の皮膚のように伸縮可能な素材に対して，これに加わる水平方向の力の取得を試みる．素材としては繊維が編み込まれているストッキング・タイツ素材（以下，伸縮布）を利用し，これを引き延ばしたときに，編み目の密度が変化する特徴を利用する．この伸縮する布に光を照射すると，編み目の密度変化に伴う光の透過率変化に応じて反射率も変化する．この反射光強度を光センサで捉えることで，どのぐらい布が伸縮しているかを計測することが可能となる．センサとしては，フォトリフレクタを利用する．本手法は，伸縮にフォトリフレクタを接近させるだけで実現できるため，(1)センサと伸縮布を接着する必要がなく，ファブリケーションが容易であり，また布の柔軟性を阻害しない，(2)貼付ける対象に合わせて容易にセンサの個数や伸縮布の面積を変更できる，(3)センサが小型なため，薄さ

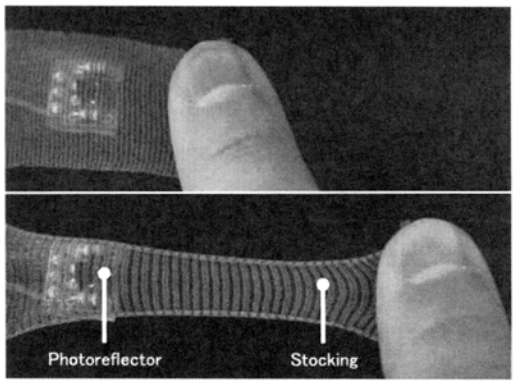

図1　布の伸縮を計測するセンサ

Fig.1 Photoreflector measures stretch of elastic fabric

*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 東京大学大学院理工学系研究科
*2 Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo
*3 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
*3 Graduate School of Media Design, Keio University

NII-Electronic Library Service

The Virtual Reality Society of Japan

を保つこともできる，といった柔軟な特徴を提供する．

本研究では，まず，フォトリフレクタを用いて伸縮の計測が可能であることを確認した．次に，選定した伸縮布とセンサ値の関係性を調べる実験をした．そして，センサをモジュール化して，容易に着脱や組み替えができるようにした．さらに，複数センサを用いて水平方向入力を可能とする布インタフェースを開発した．最後にこれを利用してアプリケーションを提案した．なお，本稿は[16][18]の内容をまとめたものである．

2 関連研究

2.1 水平方向の力を計測する手法

一次元方向の圧力だけでなく物体にかかる水平方向力を取得する手法としては歪みゲージ使うのが一般的である．このセンサを利用して取得したせん断方向に対する入力を用いてコンピュータとインタラクションする手法が提案されている[7]．また，圧力センサをスマートフォンの周囲に工夫して配置することで，ディスプレイ上におけるせん断力を計測する手法も提案されている[6]．歪みゲージはそれ自体の伸縮性が乏しいため，柔軟素材に貼付けて利用することが難しい．

そこで，多軸に力を与えたときの柔軟素材の変形特性を利用した計測手法が提案されている．例えば山根らは，円筒形の突起のような触覚子を平面上に配置して，この変形をCCDカメラによって計測することで触覚子に加わった外力を計算することに成功している[20]．Hoshinoらは，薄くて柔らかい弾性体に平行に2種類の光を照射して形状変化を抽出し，2次元カメラ情報から3次元力情報（物体の接触位置，力の大きさ，力の入射角度，接触点が固定されたままでの傾き）を推定できる圧力センサを開発している[8]．Kamiyamaらが開発したGelforceでは弾性体に分布されたカラーマーカーの変形をカメラで計測することで，6次元での計測を実現している[10]．Kadowakiらは，シリコン弾性体の表面に複数個の赤外LEDと反対の面にはフォトディテクタを複数個配置し，それらの強度分布を計測することで多自由度の変形を計測することができる触覚センサを開発した[9]．

一方でこれらの研究は，変形を取得するためにカメラが必要であったり，触覚センサ自体が厚みを必要とするため，既存の日用品や人の衣類に取り付けた場合，その本来の機能を著しく低下させてしまう恐れがある．これらの計測手法は，柔軟素材自体を新規に構成するものであるが，本論文で提案する手法は，実際の衣類に使われている薄い伸縮性のある素材の変形特性をそのまま利用した計測であるため，センサ素子を取り付けるだけで衣類の伸縮を計測でき，さらに人の動作や筋肉の膨張などの推定が可能となる．

素材に特殊な加工をせずに，これらの変形を取得する方法も考案されている．Baudishらは，光学式マウスに利用されている小型のイメージセンサを用いて，柔軟な布地の素材との相対的な平面移動量を取得する手法を提案し，布地で覆い手に保持可能なサイズのデバイスにすることで，大画面に対するポインティングやゲームの操作インタフェースとして提案している[1]．Dunneらは，Baudishと同じようにイメージセンサを伸縮布の移動量を計測するセンサとして利用している[3]．

これらは，素材のずれを相対的に計測するため，誤差が蓄積しやすいといった課題がある．本論文の提案手法は，薄い素材のある点における「密度」を複数計測することで力を算出するため，素材の絶対的な状態をシステムが把握することが可能である．

2.2 伸縮を伴うセンサやディスプレイ

伸縮率を計測することができるセンサを紹介する．導電性の素材が伸縮することで抵抗値が変化する特性を活かした伸縮センサが販売されている[4]．また，筒状の歪みセンサを利用した呼吸センサが提案されている[12]．Grilletらは，光ファイバーを布に編み込むことで布の伸縮を計測する手法を提案し，これを呼吸センサとして活用している[5]．Cassinelliが提案するKhronos Projectorは，柔らかいスクリーンに対してユーザが押し込むなどのインタラクションをすると表示される映像がスクリーンの変形に対してリアルタイムに歪むなどの視覚的変化を提示するメディアート作品である[2]．

2.3 布をインタフェース化する技術

衣類を入力インタフェースとして利用する研究を紹介する．Karrerらは，布に対する「つまみ量」を計測するために，布に等間隔で複数本の導電性の糸を編み込んで，つまんだときにそれらの糸が接触して導通することによって計測する手法を提案している[11]．また，Perner-Wilsonらは，布の伸縮に従って，編み込まれた導電性糸の抵抗値が変化する特性を利用して，布の伸縮を計測する方法を提案している[14]．

3 フォトリフレクタを用いた布の伸縮率の計測

本論文では，フォトリフレクタを用いて伸縮性のある薄い布の伸縮率を計測する手法を提案する．伸縮布は一般的に編み目構造になっており，伸縮によってこの編み目の大きさが変化する．マテリアルの伸縮に応じて赤外LEDから照射された赤外光の透過率が変化し，その結果反射率も変化するため，フォトリフレクタでの計測が可能となる（図 2）．布以外にも薄いゴム膜のものなど伸縮に応じて透過率が変化するものを計測することが可能である．

今回は，数種類サンプルを用意し，実験的に下記の条件の布に対して本手法を適用できることを確認している．

NII-Electronic Library Service

The Virtual Reality Society of Japan

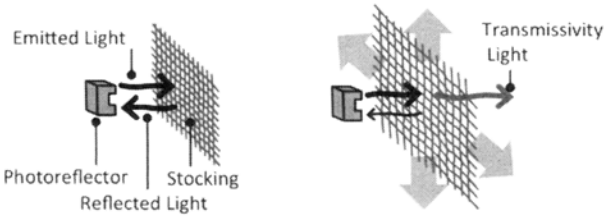

図2　布の伸縮率に応じた赤外光の透過率の変化による計測

Fig.2 Photoreflector detects ratio of expansion and contraction of stocking on basis of transmissivity changes of IR light passing through the stocking

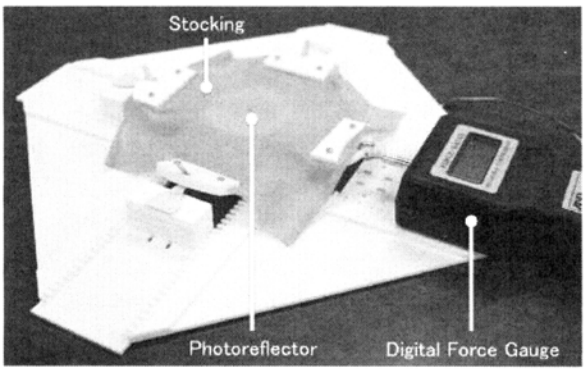

図3　段階に応じて布を伸縮可能な実験装置

Fig.3 Experimental tool for pulling stocking in a step-by-step manner. Digital force gauge measures pulling force

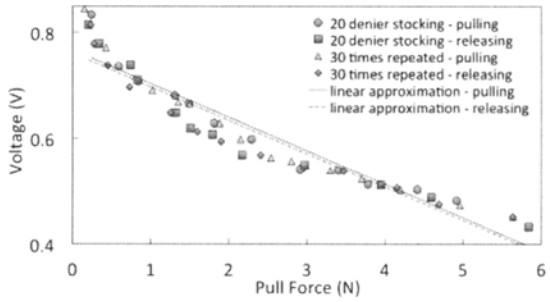

図4　20 デニールの布の伸縮に応じたセンサの電圧値

Fig.4 Average measured voltage against pulling force for 20 denier stocking

デニール：20〜200 デニールの布
ストッキングの色：ベージュ，黒色が適用可能であることを確認
素材：ナイロンやポリウレタンなどの弾性素材
編み方：交互編やゾッキ編などストッキングやタイツに使われる伸縮する編み方

3.1 実験概要

フォトリフレクタと布の伸縮率の関係を示す．この実験では，伸縮布を四方から段階的に牽引することが可能な実験器具を用いる（図 3）．この実験器具の中央にはフォトリフレクタが取り付けられており，その上を伸縮性素材で覆う．この伸縮性のある布の四方をアクリルで構築した素材で挟み，これを段階的に牽引することが可能な可動式の器具に取り付ける．この牽引器具の一つにはデジタルフォースゲージが取り付けられており，牽引と同時に伸縮布に加わる牽引力を計測することができる．本実験では伸縮性のある布として，20 デニールのストッキングを利用した．

3.2 実験手順

1. 実験装置上に 20 デニールのストッキングを配置する
2. フォースゲージを 0.2N になるまで調整する
3. センサ値を 10Hz で 10 回記録する
4. 2mm ずつ伸縮布を牽引する
5. 6N になるまで 2 と 3 を繰り返す
6. 2mm ずつ伸縮布を戻す
7. センサ値を 10Hz で 10 回記録する
8. 天板が初期位置に戻るまで 6 と 7 を繰り返す

3.3 実験結果

図 4 に結果を示す．縦軸はフォトリフレクタの出力電圧で，横軸は布に対する牽引力である．伸縮布が牽引されることにより，フォトリフレクタの電圧値が低下していることがわかる．またグラフから 1.3N から 2.6N 周辺でヒステリシスが生じていることがわかる．また，布の耐久性を示すために，30 回布を伸縮させた後に，同じ手順で計測したグラフも図 4 に示す．30 回伸縮された後でもセンサの値の変化はなかった．

4 実装

4.1 ユーザインタラクション

人は皮膚のように伸縮性のある表面に対して様々なインタラクションを行う．今回提案するシステムは，現在 3 つの基本操作を布の周囲に取り付けられた複数のフォトリフレクタによって取得する（図 5）．まずはせん断方向にドラッグする操作であり，平面状のどの方向に加わる力とその強さを計測することができる．次に取得できるのは，ピンチインとピンチアウト操作であり，これは，布の表面に複数の指を付けて，これを開閉することで入力を行う．この基本的な入力の時間的変化を考慮することで，フリック操作や，ダブルフリックのようなジェスチャも取得することができる．

4.2 センサモジュール

本モジュールはフォトリフレクタ，Bluetooth，バッテリー（50mA），マイクロコントローラがパッケージされたものである（図 6）．3.5cm×2.0cm，厚さが 4mm と小型であるため、容易に衣類の内部に組み込むことが可能である．モジュールは連続で 1 時間利用することが可能である．フォトリフレクタはマイコンの 10bit の A/D 変換によって 0 から 1023 までの値で出力される．

NII-Electronic Library Service

The Virtual Reality Society of Japan

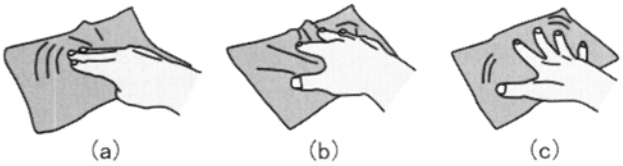

図5　布インタフェースで取得できるインタラクション，引っぱり(a)，ピンチイン(b)，ピンチアウト(c)

Fig.5 Basic interactions with stretchable surface: (a) dragging, (b) pinch-in, (c) pinch-out

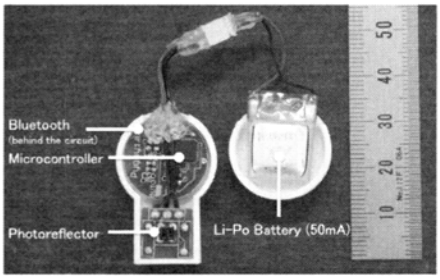

図6　センサモジュールの基本構成

Fig.6 Main components of sensor module

図7　布インタフェースと圧力センサとの組み合わせ(左)，FuwaFuwa センサとの組み合わせ(右)

Fig.7 Application to commercial pressure sensor array (left) and FuwaFuwa sensor (right)

4.3 布インタフェースによる水平方向の入力の算出

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．これを用いて伸縮布に加わる接線方向の力を算出可能な布インタフェースを構築した．接線方向の力は質点系の重心の計算式を応用して算出される．センサ上にストッキングを乗せたときのセンサ値のオフセットは，初期段階でキャリブレーションされる．a は接線方向の力のベクトル，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値，x_i と y_i は i 番目のモジュールにおける座標値，x_d ，y_d は複数モジュールの中点座標である．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，ピンチインとピンチアウトのジェスチャを計測するときにも利用される．またドラッグとピンチイン/アウトの識別は，a の値が閾値を超えたかどうかで行われる．この計算式には素材特性などが考慮されていないため，厳密には正確なものではない．表面の中央付近における操作と，それ以外の場所における操作では，同じ力を加えた場合でも算出結果が異なる．一方で，正確な入力よりも，大まかなインタラクションを取得するためには，このアルゴリズムは単純で高速であるためこれを採用した．期待している操作を行っている時に，センサが接地する布部が緩んで張力が 0N の状態になった場合，それは以上計測できなくなってしまう．従って常に力がかかるように布を引き伸ばし，センサに接地させた．

$$\mathbf{a} = \left(\left(\sum_{i=1}^{n} p_i x_i\right) / M - x_d, \left(\sum_{i=1}^{n} p_i y_i\right) / M - y_d\right) \quad \cdots (1)$$

$$M = \sum_{i=1}^{n} p_i \quad \cdots (2)$$

4.4 布インタフェースと圧力センサと組み合わせた例

我々の提案する手法で構築された伸縮布インタフェースは，それ自体が薄く，また状況に応じて面積やセンサ配置などの組換が可能なため，容易に既存のセンサと組み合わせて様々なインタラクションを拡張することが可能である．我々は，今回二つの圧力センサ布インタフェースを組み合わせた．一つめは，格子状に配置した圧力センサの上に布インタフェースを取り付けることで，一次元方向の力だけでなく，接線方向の力も同時に計測することが入力システムを構築した(図.7 左)．二つめは，FuwaFuwa センサ[15]と組み合わせたシステムであり，柔軟な三次元入力装置を実現している(図 7 右)．布インタフェースはそれ自体が柔軟であるため，FuwaFuwa に利用されている綿の柔軟性を損なうことなく，取得できるインタラクションの種類を拡張することができる．

5 アプリケーション

本手法を利用して複数のアプリケーションを作成した．これらは，大きくわけて 2 つに分類できる．1 つは，人間が着用する衣類にセンサを組み込んだアプリケーションである．もう 1 つは，これまで伸縮性がないような硬いオブジェクトや環境に柔らかい素材を取り付けることによるインタラクションの拡張である．以下で詳しく示す．

5.1 身体形状・動作計測

簡易的な呼吸センサを試作した．これは，伸縮性のある布を人の胸囲に巻き付け，呼吸時の伸縮を計測することで，呼吸の深さと周期を計測することができる．これは，素材自体に伸縮性があるので，特に人の生活を阻害することなく呼吸を取得することが可能である．

上述以外の応用可能性として，例えば，ストッキングに本センサを忍ばせることで浮腫みを計測することが可能であり，これから疲労の蓄積度を算出しユーザにフィードバックするようなアプリケーション等を開発できる．浮腫みはこれまで一般女性にとって実感はできるものではあったが，実際にどの程度膨張しているかは感覚に頼っていた．浮腫みを計測するには，カメラによる三次元計

NII-Electronic Library Service

The Virtual Reality Society of Japan

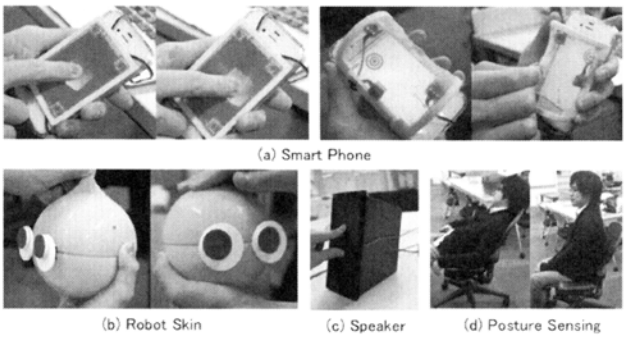

図8 アプリケーション

Fig.8 Several Applications

測が主流であるが[19]，計測できる環境が限定されるという問題があった．本ベルトセンサにより長期的かつ連続的に計測することが可能であり，浮腫みを解消する衣類やマッサージ方法を取捨選択するための指針を提示できる他，衣類業界，特にストッキングを製造する企業等に有益なデータを提供することが可能となる．

5.2 スマートフォンに対する操作の拡張

我々は，開発した布インタフェースを既存のスマートフォンに貼付けることにより，インタラクションの拡張を試みた．今回はスマートフォンに容易に取り付けることができる2つのアタッチメントを開発した(図 8a)．

1つめのアタッチメントは平面のものであり，通常のタッチスクリーン入力と水平方向の入力を同時に指一本で行えるというものである．入力によって生じるセンサ値の変化が閾値を超えると，この入力を行えるようになる．これにより，通常のタッチスクリーン入力においては 3D オブジェクトの位置を指示して，水平方向の入力においてはオブジェクトの回転を指示するような入力を行うことができる．

2 つめのアタッチメントは湾曲したものであり，特につまむ操作を促すために開発したものである．この操作を利用したスマートフォンで行うエンタテイメントアプリケーションを開発した．これは，シューティングゲームであり，表面をつまんで左右に引っ張ることにより，弓の向きを操作することができ，さらに牽引してから離すことにより，矢を放つことができるものである．

5.3 ロボットの皮膚

ロボットはその身体が柔軟になっていることで，普段人と人，もしくは人とペットが行っているような自然なインタラクションをコミュニケーションスタイルに取り込むことが可能となる[17]．そこで，本論文でも，皮膚が付加されたロボットを開発した(図 8b)．このロボットには，二つのフォトリフレクタが取り付けられており，さらにその上から布で覆われているものである．皮膚を引っ張る方向によって目を向ける方向を変化させる．また，ロボットの上部をピンチインとピンチアウトを使って撫でる世な操作をすることで，ゆらゆらと揺れだすインタラクションデザインを行った．揺れる動作は，ロボットの内部に埋め込まれた重りをモータで揺らしたときの反動によって引き起こされる．

5.4 家電操作

我々は，日常生活で利用している家電に対する操作を行うために，センサを取り付けた．今回，具体的には，家電の中でもスピーカーに着目した．なぜならば，スピーカーの表面には柔軟な素材が利用されており，この素材を利用して入力が可能となるからである．今回の試作では，ユーザはスピーカーの表面をなぞることで音量や曲の選曲をすることができる(図 8c)．また，回転させることで，曲の早送り，または巻き戻しを指示することが可能である．

5.5 着座姿勢のフィードバック

我々は着座時の姿勢を視覚的にフィードバックすることで，姿勢制御を促すアプリケーションを開発した(図 8d)．悪い着座姿勢は人の集中力に影響を与えるため，これをフィードバックすることで適切な姿勢に正そうとするシステムが提案されている．一方で，これらは着座時の座面と人の間に生じるせん断力が考慮されていない．そこで我々のセンサと組み合わせることで，重心だけでなく，五自由度の姿勢を計測することが可能である．このようにせん断力は，指で生じるインタラクションだけでなく，それ以外の人の部位でも生じ，これを計測することで，人の状態を推測することができる．

6 適用範囲

フォトリフレクタは，太陽光や照明などの環境光に含まれる赤外線の影響を受けるため，屋外やスポットライトが照射されるステージの上で利用できない．我々は，特定の周波数の赤外光だけを抽出するようなフィルタリングシステムを実装することでこの問題を解決する予定である．

フォトリフレクタは，センサの真上に置かれたユーザの手や物体自体に反応してしまう恐れがある．これは，照射する赤外光の光量を弱めることで，よりセンサに近い場所の状態をとることができるため，利用シーンに合わせてこれを調整することで，回避することができると考えている．一方で，赤外線の光量を小さくするとセンサのダイナミックレンジが小さくなることが予想されるため，トレードオフである．また，照射部と受光部が対向しているフォトインタラプタ型にすればこの問題を回避することができるが，一方で，センサが分厚くなってしまうというトレードオフがあるため，これもアプリケーションに従って選択する必要があるだろう．

その他の問題としては，現状利用している伸縮布の耐

NII-Electronic Library Service

The Virtual Reality Society of Japan

久性である．本研究で利用したストッキングは，6[N]で牽引すると破れてしまった．これは，目的に合わせて，厚い素材を選択したり，複数枚重ねて利用することで，この問題に対処できると考えている．また，伸縮布の色もセンサ値の変化に関係するため，今後は，この関係性を一般化する．また，本手法は，編み目が広がらないような布素材に対して適用させることは困難である．

7 まとめ

本論文では，伸縮布に光を照射した際に透過する現象を利用し，これを捉えることで，布の伸縮を計測する手法を提案した．実装ではセンサとしてフォトリフレクタを利用した．本手法はフォトリフレクタの上に伸縮布を配置するだけで実現でき，ファブリケーションも容易である．また接着が不必要なため素材の柔らかさを損なうこともない．さらに対象に合わせて面積やセンサ個数を変更可能な拡張性の高いものである．この特徴によって，様々な場所に装着して水平方向入力を可能とするインタフェースを開発できた．今後は，素材のモデル化や外乱光からのフィルタリングを行っていく予定である．

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] Baudisch, P., Sinclair, M. and Wilson, A. Soap: a pointing device that works in mid-air. In *Proc. UIST '06*. ACM (2006), pp. 43-46.

[2] Cassinelli, A. and Ishikawa, M. Khronos projector. In *ACM SIGGRAPH 2005 Emerging technologies*. ACM (2005), Article 10.

[3] Dunne, L., A Coarse Desktop Method for Evaluating Transmission of Vibration through Textile Layers. In *Proc. ISWC '09*. pp. 29-32.

[4] Conductive Rubber Cord Stretch Sensor + extras!, www.adafruit.com/products/519

[5] Grillet, A., Kinet, D., Witt, J., Schukar, M., Krebber, K., Pirotte, F. and Depre, A. Optical fiber sensors embedded into medical textiles for healthcare monitoring. IEEE Sensors J, vol. 8, no. 7, pp. 1215-1222.

[6] Heo, S. and Lee, G. Force gestures: augmenting touch screen gestures with normal and tangential forces. In *Proc. UIST '11*. ACM, pp. 621-626.

[7] Herot, C. F. and Weinzapfel, G. One-point touch input of vector information for computer displays. In *Proc. SIGGRAPH '78*. ACM, pp. 210-216.

[8] Hoshino, K. and Mori, D. Three-dimensional tactile sensor with thin and soft elastic body, IEEE Intl. Conf. on Advanced Robotics and its Social Impacts, pp. 1-6, 2008.

[9] Kadowaki, A., Yoshikai, T., Hayashi, M., Inaba, M. Development of Soft Sensor Exterior Embedded with Multi-axis Deformable Tactile Sensor System. In *Proc. Ro-Man '09*. IEEE, pp. 1093-1098.

[10] Kamiyama, K., Kajimoto, H., Vlack, K., Kawakami, N., Mizota, T. and Tachi, S. Gelforce. In *ACM SIGGRAPH 2004 Emerging technologies*. ACM, pp. 5-5.

[11] Karrer, T., Wittenhagen, M., Lichtschlag, L., Heller, F. and Borchers, J. Pinstripe: eyes-free continuous input on interactive clothing. In *Proc. CHI '11*. ACM, pp. 1313-1322.

[12] Moraveji, N., Olson, B., Nguyen, T., Saadat, M., Khalighi, Y., Pea, R. and Heer, J. Peripheral paced respiration: influencing user physiology during information work. In *Proc. UIST '11*. ACM, pp. 423-428.

[13] Ohmura, Y., Nagakubo, A. and Kuniyoshi, Y. Con-formable and scalable tactile sensor skin for curved surfaces. In *Proc. ICRA '06*. IEEE, pp. 1348-1353.

[14] Perner-Wilson, H. and Buechley, L. Making textile sensors from scratch. In *Proc. TEI '10*. ACM, pp. 349-352.

[15] 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 photoreflectivity measurement. In Proc. UIST '11, ACM (2011), pp. 509-516.

[16] Sugiura, Y., Inami, M. and Igarashi, T. A thin stretchable interface for tangential force measurement. In *Proc. UIST '12*. ACM, pp. 529-536.

[17] 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.

[18] 杉浦裕太，稲見昌彦，五十嵐健夫，MetaSkin: 薄くて伸縮性のある皮膚のようなインタフェース，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013，茨城，2013 年 5 月．

[19] 働く女性のむくみ～2.7mm の差が、働く女性の不快感の原因か？ DSQUARE. http://www.dsquare.jp/fb/health/0903legedema.html

[20] 山根直樹，大岡昌博，三矢保永，光導波路形三軸触覚センサの高精度化，JSME annual meeting 2000(1), pp. 229-230.

(2015 年 12 月 15 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．

NII-Electronic Library Service

The Virtual Reality Society of Japan

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．

NII-Electronic Library Service