対人インタラクションのための 伸縮可能な被覆型柔軟ニットセンサ外装の開発

吉 海 智 晃* 福 島 寛 子* 小 林 一 也* 稲 葉 雅 幸*

Development of Soft Stretchable Enclosing Type Knit Sensor Exterior for Human-Robot Interaction

Tomoaki Yoshikai*, Hiroko Fukushima*, Kazuya Kobayashi* and Masayuki Inaba*

In order for humanoid robots to behave with soft contacts among humans, whole-body tactile sensing function is indispensable. For enclosing whole-body regions of a humanoid, softness and the stretchable property is necessary especially for the regions around joints. Although there are some studies to realize a whole-body enclosing-type tactile sensing exterior so far, most of them have difficulties to enclose the joint regions. Therefore, we propose the method to construct a soft stretchable enclosing type tactile sensing exterior using electro-conductive knitting structure and about 200% stretchable and pressure sensitive exterior can be realized. Furthermore cardigan type knit sensor exterior is developed and the feasibility of the proposed method is confirmed through behavior experiments by a humanoid wearing the developed cardigan knit sensor.

Key Words: Tactile Sensor, Soft Stretchable Exterior, Knit Sensor, Stroke Recognition, Human-Robot Interaction

1. は じ め に

人間同士のインタラクションのように、ロボットと人間が互いに自然なインタラクションを行うためには、接触箇所を限定せずに全身のどこでも触られたことが検知でき、複数箇所に加えられた多様な接触を同時に認識できる必要がある。そのような機能を実現するには、全身被覆型の柔軟触覚センサ外装の実現が必要不可欠である。例えば、Fig. 1 に示すように、人間とロボットが柔らかく接触をしながら行動していく場合には、人がロボットの身体を直接触りながら動作を導いていくということが頻繁に起こることが予想でき、その際に、身体の各部位で、人間との柔軟な接触を保ちつつ、様々な方向への伸縮可能なセンサ外装であることが重要である。

従来、全身被覆型の触覚センサ外装の実現を目指した研究は幾つかのグループで行われてきている。特にヒューマノイドロボットの全身を覆うものに関して考えると、まず、石黒らのグループによって開発されてきた分布触覚を備えた対人コミュニケーション研究のためのロボットがある。Robovie-IV [1], Repliee Q2 [2], そして、CB² [3] はおのおの、圧電フィルムを利用した柔軟分布圧力センサを全身に備えており、コミュニケーション

Fig. 1 Soft exterior needs to be stretched during interaction with humans

ン行動中の人間からロボットの全身への接触を検知可能である。また、國吉らは、曲面にフィットする切り貼り触覚センサを開発し [4], それを全身に 1,800 点以上備えたヒューマノイドロボットを利用した全身触覚行動研究へと展開を行っている [5]. 國吉らの開発した切り貼り触覚センサでは、反射型フォトフレクタの光拡散を柔軟ウレタンフォームで覆うことで、接触力を光拡散強度に変換している。一方、向井らは、小型圧力センサを弾性体要素に埋め込み、フレキシブル基板によりそれらを接続する方式の全身分布触覚センサ外装を開発しており、それ

原 2011 年 4 月 28 日

* 東京大学大学院情報理工学系研究科

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

■ 本論文は学術的に評価されました。

をヒューマノイドロボット RI-MAN に実装している [6]。これらのロボットにおけるセンサ外装は柔軟性と身体の広い部分をカバーする分布性を兼ね備えていたが、関節部位の被覆、センシングはできておらず、全身被覆型外装を進展させる上で大きな課題となっていた。

全身被覆型センサ外装を持つヒューマノイドロボットで関節部位まで被覆している研究はあまり多くはないが、関連研究として幾つか挙げる。まず、星野らは導電性の布と糸から構成される柔軟センサスーツを開発している [7]。センサスーツにおいては、電極は比較的小さく、スーツ自体に縫い付ける形をとるため、接触点を関節周りに付与することは比較的容易であったが、バイナリスイッチ構造であるためオン・オフの 2 値しかとれない、伸縮性はスーツを構成する導電性布に依存し、実装されたものの伸縮性はそれほど大きくない、といった問題があった。一方、林らは、柔軟肉厚のウレタン外装の内部に 3 軸力・トルクセンサを分布させることで全身柔軟センサ外装を構成する「柔軟肉質センサ外装」という構成法を明らかにし [8]、それを小型ヒューマノイド macra に実装した。柔軟肉質センサ外装においては、関節部位も含めてウレタン外装で覆うことができるが、関節周辺の伸縮性はウレタンの特性に依存している。現状の実装では、肘、膝など大変形を伴う関節部においては、可動性を確保するために関節周辺部のウレタンをくりぬくよう加工して対応しており、関節部に柔軟性を保ったままセンサ素子を配置するのは難しいという問題がある。

一方、触覚センサ素子自体の研究に目を向けると、柔軟性と伸縮性を併せ持つ触覚センサ素子が幾つか提案されてきている。例えば、Hoshi らは柔軟かつ伸縮可能であり、さらに触覚面積を検知可能なセンサ素子を開発している [9]。開発したセンサ素子は、伸縮性を備えた導電性繊維を異なる柔らかさを持つ二つの圧縮可能な絶縁体によって挟み込む構造をしており、二つの絶縁体の間の静電容量が接触の際の力と面積により変化することを利用して、このセンサ素子の伸縮性は絶縁体の機械的な特性に依存しているが、実際にロボットの肘、膝などの関節部位に実装した場合の実現可能性の評価は行われていない。多田らは、柔軟性と伸縮性を備えた静電気式触覚センサを開発しており [10] [11]、導電性のシリコンゴムを利用することで元の 300% の大きさまで伸縮可能なことを検証しているが、検知できるのはオン・オフの 2 値であり、圧力をアナログ値でとれるわけではない。一方、長久保らは、身体全体を覆うような広い領域での分布圧力センシングを伸縮可能な素材で可能にする手法として、逆問題解析による接触部位・圧力推定手法を用いた伸縮センサを開発した [12] [13]。彼らの用いた手法は EIT (Electrical Impedance Tomography) と呼ばれ、広めの測定領域を電極で囲み電極間の位相差を計測し、そこから逆問題を解くことで圧力分布を計算することができる。この EIT を伸縮性を持つ導電体に適用することで、省配線かつ柔軟・伸縮性を備えたセンサ外装を構成することが可能になる。彼らの手法は、感圧導電性を備えた素材であれば適用可能であり、通常のニット繊維に導電性塗料を塗布したものを用いて 150% 伸縮可能な伸縮可能分布圧力センサを実現することに成功している。また、最近では、EIT を適用する対象を工夫し、押しにのみ反応し、伸縮に不感

な PsSi 構造を持たせることに成功しており、ダイナミックな伸縮条件においても正しく圧力分布推定ができることを示している [14]。この手法は適用範囲も広く、大変優れたものだが、ヒューマノイドロボットの全身被覆センサ外装を構築することを考えると、部位ごとの測定精度や配線の取り回しを考慮した電極配置設計を注意深く行う必要があり、その方法はまだ確立されているとは言い難い。

そこで、本研究では、通常の縫製技術を利用可能であり、プロトタイピング性の高い星野らのセンサスーツの手法を進展させ、各接点で連続的なアナログ量の圧力が検出可能な柔軟・伸縮性を備えた導電性ニットセンサ外装を構築することを目的とする。長久保らの試した導電性ニット EIT センサとの違いは、既製のニット構造を導電化するのではなく、導電性糸によりニット構造自体を構築することで伸縮センサを構築する点にある。それにより、着用するヒューマノイドの体型に合わせたセンサ外装の構成が容易になるとともに、ニットの編み方によりセンサ特性を変化させることが可能になる。もちろん、EIT 手法自体は、感圧導電性を備えた構造であれば適用可能であるため、本研究で示すアナログ出力の可能なニットセンサへも適用可能であるが、ニットセンサへの EIT 技術の適用可能性に関しては、本稿では扱わない。ここでは、導電性糸の編み込み構造による伸縮ニットセンサ外装の構成法について特に焦点を当てて論じるとともに、構築した導電性ニットセンサによりカーディガン型の伸縮外装を構成し、ヒューマノイドに着用させて実際に行動実験を行うことで、提案手法の実現可能性の検証を行う。

2. 導電性繊維により編まれたニットセンサ

2.1 ニットセンサの検出原理

前述のように、本研究では、星野らによって示されたセンサスーツの手法を進展させ、伸縮性の高いものとするとともに、アナログ値で圧力変化がとれるものを開発する。Fig. 2 に星野らの提案したセンサスーツ (図中左) と本稿で提案するニットセンサ (図中右) の構造の比較図を示す。導電性繊維を層状に重ねた基本構成はほとんど同じだが、以下の点が異なる。

- 高い伸縮性を確保するためにすべてのレイヤがニット化されている。本稿では、特に伸縮性の高い編み方として知られる一目ゴム編みにて全層のニットの編んでいる。また、セ

Fig. 2 Sensor structure comparison between Hoshino et al's sensor suit and the developed one

ンサの一樣性を保つために、可能な限り専用機械による機械編みを行っている。

- 接触時の圧力に応じたアナログ値を得るために、適切な抵抗値を有する導電繊維を用いた網目構造を構築することにより感圧抵抗層を製作している。
- 配線同士の接触を許容しつつニット中に配線を縫い込むために、細く柔軟な被覆銅線を用いて信号伝達を行っている。

最も大きな違いは、スパーサ層が導電性繊維の網目構造から構成される抵抗層に置き換わっていることである。これにより、ニット構造の一部が加圧されたときに、その周辺部の抵抗値が低下する。この加圧時の抵抗値変化は主に以下の理由で生じるものと考えられる。

- ニットセンサを構成する導電性糸間の接触面積の増大
- 電極と抵抗層、抵抗層とグラウンド層のおおのの間の接触面積の増大

この抵抗値変化をアナログ値として計測するため、本研究では、Fig. 3 に示すようなシンプルなシステム構成を用いる。図中では、保護層 (Fig. 2 ‘Insulating layer’) および、配線層 (Fig. 2 ‘Wiring layer’) は省略してある。プルアップ抵抗を介して電源 (3.3 [V]) に接続された電極とグラウンド層の間に感圧抵抗の抵抗層が挟まれ、電極層と抵抗層、グラウンド層の間は、物理的な接触により電氣的に接続される。この回路により出力される感圧抵抗の電圧はマイコンボード上で A/D 変換され、USB を介してホストコンピュータへと伝送される。プルアップ抵抗は、ここでは 100 [k Ω] のものを用いている。マイコンボードにはルネサスエレクトロニクス株式会社の H8S/2215 を用いており、10 [bit] の ADC 機能を内蔵している。以下の実験では 62.5 [Hz] でのデータサンプリングを行った。なお、この回路では、ニットセンサの加圧が大きくなるほど抵抗値が小さくなるため、その出力電圧は大きくなる。そのため、3.3 [V]- *Measured Voltage* を出力として計算した値を実際には用いている。以後、本稿において示されるニットセンサの計測値はこの値を用いるものとする。ニットセンサの電力消費に関しては、電極の数の増大と

Fig. 3 Detecting system of the developed knit sensor

ともに増えるが、後述の基礎性能検証実験で用いる中央に電極が一つ配置された 150 [mm] $\times$ 150 [mm] のテストピースでは、およそ 0.2 [W] の消費となっている。

2.2 開発した多層式ニットセンサの層構成

本節では、開発した多層式ニットセンサの各層の詳細に関し て論じる。Fig. 2 の右側に示したように、開発したニットセンサは、6 層から構成されている。各層の構成を以下に述べる。

- (1) 外側/内側の絶縁層：これらの層はニットセンサ内部を保護し、外部から絶縁する
- (2) 配線層：絶縁性の糸により一目ゴム編みにて編まれたニット層に細く柔軟な被覆銅線を縫い込んだもの。全体としての伸縮性を損なわないために、配線は半返し縫いで縫い込まれている。
- (3) 電極層：絶縁性の糸により一目ゴム編みにて編まれたニット層に直径 8 [mm]、厚さ 0.4 [mm] の円板の黄銅電極が縫いつけられている。Fig. 2 における ‘Electrode’ がこの黄銅電極になる。この電極に配線層からの信号線が直接接続されている。センサスーツにおいては、電極とそこまでの信号線は導電性布と導電性糸で構成されていたが、本センサはアナログ出力であるため、電極と信号線の間の結線のばらつきが出力にそのまま影響してしまう。そこで、全体の伸縮性を損なわない程度の小型の金属板電極に信号線を半田付けする構成とした。
- (4) 抵抗層：手指で押した際に適切な抵抗変化を実現可能な抵抗値を持つ導電性繊維を用いて一目ゴム編みで網目構造を構築する。加圧に対して一様な抵抗値変化を得るため、ここでは、三菱マテリアル電子化成株式会社製の ‘Noirfiber’ (Table 1) を合糸して十分な太さとしてからそれを編む方法をとった。‘Noirfiber’ は、カーボンナノファイバーが混入されたポリエステル長繊維であり、感圧抵抗体を構成するのに十分な抵抗値を備えている。‘Noirfiber’ を合糸した糸を編むにはある程度の技術が必要となるが、素人にも容易な 2 本取り (この場合は、通常の絶縁糸と ‘Noirfiber’ とを合わせて編むことを指す) では、明らかに感圧性能が劣化するため、本稿では縫製業者に依頼し、試験片および後述のロボット用ニットセンサの製作を行った。
- (5) グラウンド層：信号線のグラウンドを接続する層であるが、この層に関しては本稿では、二つの構成法を試している。一つ目は、すべて抵抗の低い導電性の糸 (三菱マテリアル電子化成株式会社製 ‘Silfiber’ (Table 1) を合糸したもの) を用いて一目ゴム編みとしたものであり、二つ目は、絶縁性の糸で一目ゴム編みした層に導電性の布 (セーレン株式会社製 ‘SUI-10-520N’ (Table 1)) を縫いつけたものである。これらの構成法による性能の違いは次章にて詳細を論じる。‘Silfiber’ は、銀で被覆されたポリエステル長繊維で

Table 1 Properties for the conductive strings and cloth used for the developed sensor

Material name	Manufacturer	Thickness	Resistance
Noirfiber	Mitsubishi materials Co.,Ltd.	420dT/48f	10^6 - 10^7 [Ω /cm]
Silfiber	Mitsubishi materials Co.,Ltd.	150d/72f	Less than 100 [Ω /cm]
SUI-10-520N	SEIREN Co.,Ltd.	110 [μ m]	Less than 0.03 [Ω /sq]

あり、100 [Ω/cm] 以下の良好な導電性を備えている。一方、‘SUI-10-520N’は、ポリエステル繊維と銅、ニッケルと一緒に編み込んだ導電性布であり、これも 0.03 [Ω/sq] 以下という良好な導電性を持っている。

3. ニットセンサの特性検証実験

3.1 ニットセンサの力・電圧特性

本章では、開発したニットセンサに関して、試験片を用いた特性検証実験を行う。まず、本節においては、Fig. 4 に示す実験セットアップの元で力・電圧特性についての実験を行った。IMADA 製のデジタルフォースゲージ DPX 50T を手動スタンドに取り付け、スチール製平型アタッチメントにて黄銅電極を中心に垂直荷重を片当たりなく荷重を加える。Fig. 5 にこの実験に用いた二種類のニットセンサ試験片を示す。この二つの試験片は、電極層、抵抗層、グラウンド層の 3 層構造に簡略化されており、配線層および絶縁層は省略されている。電極層、抵抗層に関しては、どちらの試験片も共通である。電極層は、黄銅電極を一つだけ中央に配置したものとなっており、電極に直接配線が接続されている。抵抗層は、2.2 節で説明した構造のものをそのまま用いている。一方、グラウンド層に関しては、この二つの試験片は異なる構成をとっている。Fig. 5 左に示したものは、導電性糸 (Electro Conductive String, 図中 ‘ECS’) を用いて一目ゴム編みにしたニット構造によりグラウンド層を構成したものであり、以後、ニットセンサタイプ 1 と呼ぶ。一

方、Fig. 5 右に示したものは、絶縁性の糸を用いて一目ゴム編みにしたニット構造に導電性の布 (Electro Conductive Fabrics, 図中 ‘ECF’) を縫いつけることでグラウンド層を構成したものであり、以後、ニットセンサタイプ 2 と呼ぶ。

まずは、ニットセンサタイプ 1 の力・電圧特性の実測値をプロットしたものを Fig. 6 に示す。この実験においては、Fig. 4 の手動スタンドにて、人間がなるべく一定の速度になるようにレバーを押し下げ、ニットセンサ上の直径 8 [mm] の電極に力を加えていき、一定のところでレバーを再度押し上げ、荷重なしの状態まで戻す操作を行った。このときの押し下げ/押し上げの速度は計測値からおおよそ 39.2 [N/s] であった。グラフにおいて、横軸はニットセンサにかけた力を表し、単位は [N] である。一方縦軸は、そのときの出力電圧 [V] である。ここでは、三つの伸縮条件 (1: 伸縮なし, 2: 横方向伸縮最大, 3: 縦方向伸縮最大) について調べた。一般にニット構造においては編み進める方向に応じて縦と横を定義することができ (縦: Warp direction, 横: Filling direction, Fig. 7), 方向に応じて伸縮特性が異なる。一目ゴム編みにおいては、縦方向よりも横方向の伸びのほうが大きいことが知られている。以後、グラフ中でも、縦方向を ‘Warp direction’, 横方向を ‘Filling direction’ と記述する。

Fig. 6 において、‘+’ の記号は伸縮なし条件のデータを、‘x’ の記号は横方向伸縮のデータを、‘*’ の記号は縦方向伸縮のデータをおおの表している。本実験では、横方向伸縮条件におい

Fig. 4 Experimental setups for examining basic properties of the developed knit sensor

Fig. 6 Load-Voltage properties for analog knit sensor type1 (‘+’: not stretched, ‘x’: filling 200% stretched, ‘*’: warp 150% stretched)

Fig. 5 Developed test pieces for basic experiments (size is about 150 [mm] × 150 [mm])

Fig. 7 Definition of the direction of knitted fabrics

Fig. 8 Density changes of the stretched resistance layer and ground layer

ては元の長さの 200%, 縦方向伸縮条件においては元の長さの 150% 伸ばしており, それぞれ各方向の伸縮値の最大値となっている。グラフから分かるように出力電圧の変化は非線形ではあるが, どの伸縮条件においても, 加圧に対して連続的なアナログ量を出力できていることが確認できる。また, グラフより, 伸縮とその方向により出力電圧が強く影響を受けることが分かる。横方向 (図中 filling direction) に伸縮した場合には, 伸縮なしの場合と比べて出力電圧は全体的に小さくなる。これは, 伸縮による抵抗層とグラウンド層の密度変化により, おおのこの層の抵抗が変化することが原因と考えられる。この実験に用いている試験片においては, グラウンド層を編んでいる糸のほうが抵抗層を編んでいる糸よりも細く, 横方向に伸縮した際にグラウンド層の方がより疎になる (Fig. 8 右側) ため, 結果として, 接触部位周辺の抵抗は伸縮なし条件と比べて大きくなり, 出力電圧は逆に伸縮なし条件よりも小さくなる。一方, 縦方向 (図中 warp direction) 伸縮の場合には, 出力電圧は伸縮なし条件と比べ全体として若干大きくなる。この変化も横方向伸縮の場合と同様に抵抗層, グラウンド層の伸縮による密度変化が原因と考えられる。この場合は, 抵抗層, グラウンド層ともに目がつまり, 密な状態になるが, 抵抗層は元々糸が太いためそれほど大きな変化がないのに対して, グラウンド層は縦方向伸縮による密度変化の割合が抵抗層よりも大きい (Fig. 8 左側)。そのため, 接触部位周辺の抵抗は伸縮なし条件と比較して小さくなり, 出力電圧は逆に伸縮なし条件よりも大きくなる。また, グラフから, 出力電圧にヒステリシスがあることが認められる。下側が加重時, 上側が減重時になるが, これは, 繊維同士が強く接触した際にある程度互いに噛み合ってしまうことがあり, 減重時には, 出力電圧が加重時よりも大きくなるためと考えられる。

全体が抵抗の低い導電性糸のニットで構成されるグラウンド層は構造がシンプルで製作しやすいが, 伸縮時の粗密変化が大きいため, ニットセンサ出力に大きな影響を与えることが, 上記の結果より確認できる。これを改良するため, 抵抗の低い導

Fig. 9 Load-Voltage properties for analog knit sensor type2 ('+': not stretched, 'x': filling 200% stretched, '*': warp 150% stretched)

電性布を絶縁性の糸のニット構造に縫い付けたグラウンド層を持つニットセンサタイプ 2 (Fig. 5 右側) を開発した。ただし, 導電性布は, あらかじめニットの伸縮分を想定した大きめのものをニットの伸縮を妨げないような形で縫い付けるものとする。このグラウンド層を用いると, 伸縮時にグラウンド側の抵抗が一定に保たれ, 密度変化による抵抗値変化が抵抗層のみで生じることが期待できる。Fig. 9 にこのニットセンサタイプ 2 を用いた力・電圧特性の測定結果を示す。 '+' の記号は伸縮なし条件のデータを, 'x' の記号は横方向伸縮のデータを, '*' の記号は縦方向伸縮のデータをおおのこの表している。伸縮条件もニットセンサタイプ 1 の場合と同じで, 横方向には元の長さの 200%, 縦方向には元の長さの 150% 伸ばした状態で測定を行った。グラフより縦方向伸縮時 (図中 warp direction) のデータと伸縮なしのときのデータは, ほぼ同じ挙動を示していることが確認できる。このことは, 縦方向伸縮時には, 抵抗層の密度変化による抵抗値変化がほとんどないことを示している。一方, 横方向伸縮時 (図中 filling direction) には, 伸縮なし条件と比較して, 出力電圧が大きくなっていることが確認できる。これは, 抵抗層が伸縮なし条件と比べて疎となることによって接触部位の抵抗値が減少し, その結果, 出力電圧が高くなるためであると考えられる。ニットセンサタイプ 1 では, 伸縮に伴う抵抗値変化が抵抗層とグラウンド層の双方で生じていたために, 伸縮に伴う挙動の変化をモデル化することは難しかったが, ニットセンサタイプ 2 では, 抵抗値変化は横方向伸縮でのみ生じるので, 挙動の予測が容易になる。

以上, ニットセンサの二種類の構成法に関して計測を行ったが, まとめてみると, ニットセンサタイプ 1 のメリットはすべての層をニットで製作可能であるため, 既製の縫製技術を利用することができ, 全身被覆型の構造を作ることが容易な点にある。デメリットは, 伸縮時にグラウンド層と抵抗層の双方で生じる密度変化のため, 伸縮による影響がモデル化し難い点にある。一方, ニットセンサタイプ 2 のメリットは, 伸縮時の抵抗変化が抵抗層のみで生じるため, 伸縮に応じた抵抗値変化をモデル化

Table 2 Signal error ratio of the knit sensor type1 while static force is applied for 60 [s] to the sensor

Load[N]	Average sensor output[V]	Standard deviation[V]	Error ratio [%]
0	0.039	0.032	82.7488
0.32	0.164	0.045	27.7283
0.61	0.191	0.050	26.2818
1.11	0.275	0.048	17.6124
6.18	1.028	0.170	16.5717
11.47	1.326	0.175	13.1803
14.90	1.765	0.241	13.634

することが可能であり、伸縮に影響されないセンサを構成可能な点にある。デメリットは、広く全身を覆う構造を製作する際に、グラウンド層の導電性布とニットとの接合方法をさらに改良する必要があり、現状のままでは、全身被覆構造の製作・評価が難しい点にある。センサ特性としては、ニットセンサタイプ2のほうが優れているが、本研究では、全身被覆センサとして利用可能な柔軟伸縮ニットセンサを構築する手法を示すことが第一の目的であるため、以後、ニットセンサタイプ1の構造を用いてニットセンサ外装を構築し、その評価を行うものとする。

3.2 ニットセンサの出力安定性

本節においては、ニットセンサタイプ1 (Fig.5 左) を用いて、伸縮なし条件での出力の安定性に関して論じる。ここでは、電極に力を一定時間静的にかけた際に測定されるセンサアナログ値の分散を調べることで、出力の安定性を評価する。実際にセンサ試験片に対して静的に力を60秒間かけた状態で、得られる出力電圧の分散を評価した結果をTable 2に示す。この実験では、16 [ms] ごとにデータサンプルを行っており、表中の平均値と標準偏差はおおのこのケースに関して3,750 個のサンプルを用いて計算したものである。また、表中の‘Error ratio’は、標準偏差の平均値に対する比率を表している。平均値だけを見ると、前節で得られた結果と同じように荷重に応じて単調増加していくことが確認できるが、このセンサは荷重が1 [N] 以下の場合には、エラー率が25%を超えており値のばらつきが大きい。そのため、荷重の精密な計測は難しいことが分かる。これは、加圧する力が小さいと抵抗層とグラウンド層の間の接触状態が些細なことで変わりうるということが原因の一つとなっていると考えられる。一方、加圧する力が増大するにつれて、接触状態は安定し、エラー率は減少することが確認できる。10 [N] 以上の加圧では、およそ13%のエラー率となっている。このエラー率は決して小さなものではなく、精細な力制御等のアプリケーションには、このセンサは向いていないといえる。しかしながら、対人接触アプリケーションの場合には、柔軟性・伸縮性を備えていることの方が厳密な力検出精度よりも重要であると考えており、弱い力を含む複数の接触状態を区別できる程度の精度があれば十分、対人インタラクションにおける行動アプリケーションを構築することは可能であると考えている。このセンサ試験片を用いた接触状態識別の可能性については、本章の後半にて別の実験を行い、論じる。

3.3 ニットセンサの応答性

次に、前節と同じく、ニットセンサタイプ1に関して伸縮な

Fig. 10 Response time property of the knit sensor type1 when it is tapped at a slow speed (about 1.4 [Hz]) **Fig. 11** Response time property of the knit sensor type1 when it is tapped at a middle speed (about 3.9 [Hz])

し条件での応答性を調べた。この実験では、人間がニットセンサを軽く叩いたときのセンサ出力と人間の叩き動作自体を比較することで、どのぐらいの周波数まで応答できるかを評価する。人間の叩きによって応答性を評価するのは、本研究で開発するセンサ外装は、あくまでも対人接触アプリケーションを志向しており、人間が叩ける速度以上の応答性は必要ないと考えているためである。ここでは、叩き動作自体の記録のためにSensAble Technologies 社製の Phantom Omni を用いた位置計測を行った。すなわち、人間は Phantom Omni の先端により複数の速度でニットセンサ電極部を叩くことを要求される。なお、Phantom Omni の先端にウレタン小片をつけることにより、人間の指が電極に触れる場合のように柔らかさを持ったものが電極に繰り返し接触する状況になるよう留意した。本実験においては、ニットセンサは前節と同じく16 [ms] ごと、すなわち62.5 [Hz] でサンプリングを行い、Phantom Omni に関しても、ニットセンサと同期させてデータサンプリングを行った。実験の結果をFig. 10, Fig. 11, and Fig. 12に示す。おおのこのグラフにおいて、横軸は時間 [s] を表し、縦軸は右側がセンサ出力電圧 [V]、左側がそれと同期した Phantom Omni 先端のニット試験片からの高さ [mm] の変化をそれぞれ表している。図中にお

Fig. 12 Response time property of the knit sensor type1 when it is tapped at a very fast speed (about 6.2 [Hz])

Fig. 13 Output voltage of the knit sensor when touched by human

いて人間の叩き動作は実線で、その結果生じたニットセンサの出力は破線で示されている。三つのグラフは叩きの周波数が異なり、Fig. 10 はおよそ 1.4 [Hz] でゆっくり叩いたもの、Fig. 11 はおよそ 3.9 [Hz] でやや速く叩いたもの、そして、Fig. 12 は、およそ 6.2 [Hz] で被験者の可能な最大の速度で叩いたものを示している。叩き動作に対して、十分な応答性を持っている場合、センサ出力のピークが叩き動作グラフの最下点とほぼ一致しているはずである。グラフより、Fig. 10 では、センサ出力ピークと叩き動作最下点はほぼ一致しているが、Fig. 11 になると、センサ出力ピークが叩き動作最下点よりも遅いときで 58 [ms] 程度（平均では 46 [ms] 程度）遅れて出力されるようになる。さらに、Fig. 12 では、時々、ニットセンサ出力が叩き動作に対し

て十分な出力を出していないことが確認できる。この結果から、開発したニットセンサは少なくとも 4 [Hz] の力の入力に対しては 60 [ms] 以内に十分応答できるが、およそ 6 [Hz] あたりでは、対応できなくなっていくことが分かる。しかしながら、実際に人間同士の接触によるインタラクションを考えても、それほど高速なものではなく、4 [Hz] の入力に対して 60 [ms] 以内での応答性は本研究で志向する対人インタラクションには十分だと考えられる。

3.4 ニットセンサの接触状態の違いによる出力の変化

最後に、ニットセンサタイプ 1 に関して伸縮なし条件の元で人間が電極部周辺に対して絶縁層の上から様々な触り方をした際のセンサ出力結果を調べた。実験の結果を Fig. 13 に示す。グラフの横軸は時間 [s]、縦軸は加えた力 [N] になっており、接触方法の異なる領域を破線で区切り表示している。また、おのおの接触方法をグラフの下に写真で示した。グラフから分かるように、センサ出力の時間変化パターンはおのおの互いに異なっている。‘push softly’ と ‘push strongly’ のような強度に明らかな違いがあるものだけでなく、‘stroke’ と ‘tickle’ のように比較的弱い接触についても出力の違いを確認できる。さらに、‘pat’ のようなインパルス状の接触に対しても繰り返しの信号出力が得られており、他とは異なる特徴を確認することができる。

4. 伸縮可能な柔軟ニットセンサ外装の実装

ヒューマノイドが着用するための全身被覆型柔軟伸縮ニットセンサ外装の実現可能性を確認するために、小型ヒューマノイドの上半身を覆うことが可能なカーディガン型ニットセンサ外装を開発した。開発したカーディガン型ニットセンサは筆者らがこれまで開発してきている小型ヒューマノイド ‘macket’ [15] の身体に合わせて製作した。‘macket’ は、25 [mm]–30 [mm] 程度の肉厚な柔軟ウレタン外装の中に 48 個の柔軟三次元変形センサ [16] を埋め込まれた触覚センサ外装を備えているが、センサ単体でも 3 [N] 以下の弱い力に対する変化は少ないため、なおかつ厚いウレタン肉質の下に配置された状態では、3 [N] 以下の弱い力で表面を撫でるような接触動作については、検知することができなかった。今回開発したニットセンサを着用することで、そのような弱い力での接触を検出することが可能になる。Fig. 14 の左にカーディガン型ニットセンサ外装そのものの写真を示し、右に開発したニットセンサ外装を ‘macket’ に着用させた様子を示す。ニットセンサ外装のための処理回路はここでは、身に付けているナップサック内に収納している。なお、被覆型センサ外装の製作が容易になるように、ニットセンサタイプ 1 を用いて外装の製作を行った。macket は柔軟ウレタン外装を備えているため、一番内側の絶縁層は省略した。また、Fig. 15 に、このニットセンサ外装の電極配置を示す。円の中記載された数字は、各電極の ID を表している。開発したニットセンサ外装は上半身部だけで 75 点の電極が配置されている。図から分かるように ‘Front’ 部分と ‘Back’ 部分の電極は一様に配置されているが、両腕部に関しては、肩、肘、手首、の特に人間から頻繁に触られる可能性のある部分に重点的に電極が配置されている。

開発したニットセンサ外装を実際の行動実験の中で評価する

Fig. 14 Cardigan type knit sensor for a humanoid

Fig. 15 Electrode arrangement of cardigan knit sensor

Fig. 16 Geometrical model of the robot and the developed knit sensor

ために、ニットセンサの電極配置はロボット用オブジェクト志向 Lisp である EusLisp [17] で記述されたロボット幾何モデルに関連付けてモデル化を行った。Fig. 16 は、macket が開発したニットセンサ外装を着用した状態をモデル化し、ビューワに表示した様子を示している。図中、比較のため上段左側にカーディガン型ニットセンサ外装がない状態の macket モデルを、上段右側にカーディガン型ニットセンサ外装を着用した macket モデルをおの示した。ニットセンサ外装モデル上に配置された各点がおののセンサ電極を表している。また、図中下段には、A/D 変換された実際のセンサ信号をモデル上に反映した様子を示している。各センサ電極の出力電圧は電極モデルの色変化とそこから伸びる法線方向線分の長さで表現される。す

Fig. 17 Software system for reactive contact behaviors

なわち、電極が強く押された際には、色は青から赤へと段階的に変化するとともに、線分長さが長くなっていく。

5. ヒューマノイドのインタラクション行動を通じたニットセンサ外装の評価

本章では、開発したカーディガン型ニットセンサ外装を着用した小型ヒューマノイドロボットの行動実験により、本研究で提案した柔軟性と伸縮性を併せ持つ触覚センサ外装の実現可能性を確認する。

Fig. 17 に、EusLisp を用いて実装した接触反応行動実験システムの概要を示す。まず、実ロボットから得られる触覚センサデータに 5.0 [Hz] のローパスフィルタをかけたものが、ロボットモデルに反映され、図中 ‘Contact state recognition’ モジュールにて複数の接触状態のいずれかとして認識される。ここでは、おののセンサ電極 i における接触応答強度 So_i に対して閾値により以下のような状態判断を行う。

‘strong push’: if $So_i > Th_{\text{strong push}}$
 ‘soft push’: if $Th_{\text{strong push}} \geq So_i > Th_{\text{soft push}}$
 ‘stroke’: if $Th_{\text{soft push}} \geq So_i > Th_{\text{stroke}}$
 ‘no contact’: if $Th_{\text{soft push}} \geq So_i$

そして、この各電極における状態判断結果を用いて、‘Finite state machine’ モジュールの中で状態遷移判定を行い、状態遷移時にロボット動作を規定するモータコマンド列が、ロボット幾何モデルを介して実機に送信される。なお、ここでの接触状態判別方法は簡易なものであるが、本実験の目的は、ロボットが着用することのできるように構築したニットセンサ外装で実際に人のインタラクションを行わせたときに複数の接触状態を

Fig. 18 Reaction against soft push

Fig. 19 Reaction against strong push

識別して動作生成可能かどうかを確認するものであるため、その目的には十分であると考えている。

Fig. 18, Fig. 19, そして Fig. 20 に動作中のセンサ信号出力の例を幾つか示す。各図は、上段右上に動作中の写真、上段左上にそのときのセンサ信号出力をロボット幾何モデルに反映した図、下段に同じ時刻のセンサ出力のうち、特徴的な変化のあった電極の信号を選んで表示したグラフから構成されている。各グラフの凡例に書かれた電極の数字は Fig. 15 に書かれた配置の番号と対応している。まず、Fig. 18 では、人間がロボットの両腕の肘の部分を手を軽く触っている際の挙動を示しており、実際に左肘電極（電極 33, 34）において‘soft push’が、右肘電極（電極 69）において‘strong push’が検出された。接触に対

Fig. 20 Reaction against stroke

する反応動作は、認識された接触状態に応じて決定されるが、ここでは、左腕電極の‘soft push’に対応して左腕を見る動作が生成されている。これは、左腕電極の‘soft push’が右腕の‘strong push’に先んじて検出されたためである。次に、Fig. 19 は、人間がロボットの両腕の肘の部分を手を強く掴んだ状態であり、それが左右肘の両側（電極 33, 69）で‘strong push’として検出されている。一方、Fig. 20 では、人間が右肘付近を撫でた際の挙動を示しており、‘soft push’よりも弱い出力の際に検出される‘stroke’が（Electrode 24, 25, 26）で認識され、その結果‘stroke’に対する反応動作としての頷きが実行されている。

これらの結果から、開発したカーディガン型ニットセンサを着用したロボットに対して実際に人間がインタラクションする状況でも、各センサ電極において連続的なアナログ電圧を得ることができ、それを利用して複数の接触状態を認識し、反応行動を行わせることが可能なことを確認した。接触状態の認識に関しては、今回の行動実験においては、接触強度の差を利用した単純なものであり、撫で（‘stroke’）、弱い押し（‘soft push’）、そして、強い押し（‘strong push’）の3種類を区別するものであったが、今後、Fig. 13 に示したような他の接触パターンに対しても認識可能な識別手法を確立していく必要がある。

6. 結 論

本稿では、ヒューマノイドロボットを被覆する柔軟伸縮可能な触覚センサ外装を実現するための手法として、導電性ニットを感圧導電体として用い、さらに配線やグラウンドもすべてニットにした層状のニットセンサ外装の構成法を提案した。従来の導電性ニットを用いた触覚センサの伸縮性を改善するために、すべての層に関して一目ゴム編みを用いることで、開発したニットセンサ試験片では最大で元の長さの200%伸縮させた状態で接触に応じたセンサ出力を得ることができた。また、抵抗値が高めの導電性糸のみを用いて一目ゴム編みにより抵抗層を構成することで、圧力に対して連続的にアナログ変化を生じる感圧

特性を実現することが可能になった。さらに、提案したセンサ外装構成手法に基づいて小型ヒューマノイド *macket* の上半身を被覆するカーディガン型のニットセンサ外装を開発し、実際に人間との間で接触インタラクション行動実験を行った。実験では、撫で、弱い押し、強い押しの3種類の異なる接触状態を識別して反応行動を行うことができ、提案手法の実現可能性が確認できた。

今後の展開として、グラウンド層を改良したニットセンサタイプ2を用いた全身被覆型のニットセンサ外装の構築法の確立が重要な課題である。また、EIT技術をこのニットセンサに適用することで、電極と配線を大きく減らすことが可能ではないかと考えている。一方、この柔軟伸縮センサ外装を利用した触覚センサ情報処理に関しても今後進めていく必要がある。例えば、関節周辺の伸縮率や、自己接触状態を監視して、自動的に全身のセンサ出力を補正する処理を行えるようにする、あるいは、ニットセンサを着用したあとに自動的にセンサキャリブレーションを行えるようにする、といった展開が考えられる。また、局所並列的に変化するセンサ出力に応じて行動生成を行っていく並列的な行動生成法の確立も興味深い展開の一つである。

参 考 文 献

- [1] N. Mitsunaga, T. Miyashita, H. Ishiguro, K. Kogure and N. Hagita: "Robovie-iv: A communication robot interacting with people daily in an office," Proc. of Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.5066-5072, 2006.
- [2] H. Ishiguro: "Scientific issues concerning androids," International Journal of Robotics Research, vol.26, no.1, pp.105-117, 2007.
- [3] T. Minato, Y. Yoshikawa, T. Noda, S. Ikemoto, H. Ishiguro and M. Asada: "*cb*²: A child robot with biomimetic body for cognitive developmental robotics," Proc. of Intl. Conf. on Humanoid robots, 2007.
- [4] A. Nagakubo, Y. Ohmura and Y. Kuniyoshi: "Conformable and scalable tactile sensor skin for curved surfaces," Proc. of Intl. Conf. on Robotics and Automation, pp.1348-1353, 2006.
- [5] Y. Ohmura and Y. Kuniyoshi: "Humanoid robot which can lift a 30 kg box by whole body contact and tactile feedback," Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1136-1141, 2007.
- [6] T. Mukai, M. Onishi, T. Odashima, S. Hirano and Z. Luo: "Development of the tactile sensor system of a human-interactive robot "ri-man"," IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, vol.24, no.2, pp.505-512, 2008.
- [7] Y. Hoshino, M. Inaba and H. Inoue: "Model and processing of whole-body tactile sensor suit for human-robot contact interaction," Proc. of Intl. Conf. on Robotics & Automation, pp.2281-2286, 1998.
- [8] M. Hayashi, T. Sagisaka, Y. Ishizaka, T. Yoshikai and M. Inaba: "Development of functional whole-body flesh with distributed 3-axis force sensors for a humanoid to have close interaction," Proc. of Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.3610-3615, 2007.
- [9] T. Hoshi and H. Shinoda: "Robot skin based on touch-area-sensitive tactile element," Proc. of Intl. Conf. on Robotics and Automation, pp.3463-3468, 2006.
- [10] Y. Tada, M. Inoue, T. Kawasaki, Y. Kawahito, H. Ishiguro and K. Suganuma: "A flexible and stretchable tactile sensor utilizing static electricity," Proc. of Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.684-689, 2007.
- [11] 多田泰徳, 井上雅博, 河崎俊実, 川入康, 石黒浩, 菅沼克昭: "柔軟性と伸縮性のある静電気式触覚センサの原理と特性", 日本ロボット学会誌, vol.26, no.2, pp.210-216, 2008.
- [12] A. Nagakubo, H. Alirezai and Y. Kuniyoshi: "A deformable and deformation sensitive tactile distribution sensor," Proc. of Intl. Conf. on Robotics and Biomimetics, pp.1301-1308, 2007.
- [13] 長久保晶彦, アリレザーイー ハサン, 國吉康夫: "逆問題解析に基づく触覚分布センサ", 日本ロボット学会誌, vol.25, no.6, pp.960-969, 2007.
- [14] 長久保晶彦, アリレザーイー ハサン, 國吉康夫: "高伸縮可能な触覚分布センサ", 第14回ロボティクス・シンポジウム予稿集, pp.211-216, 2009.
- [15] T. Yoshikai, M. Hayashi, A. Kadowaki, T. Goto and M. Inaba: "Design and development of a humanoid with soft 3d-deformable sensor flesh and automatic recoverable mechanical overload protection mechanism," Proc. of Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.4977-4983, 2009.
- [16] A. Kadowaki, T. Yoshikai, M. Hayashi and M. Inaba: "Development of soft sensor exterior embedded with multi-axis deformable tactile sensor system," Proc. of Intl. Sympo. on Robot and Human Interactive Communication, pp.1093-1098, 2009.
- [17] T. Matsui and M. Inaba: "EusLisp: An object-based implementation of lisp," Journal of Information Processing, vol.13, no.3, pp.327-338, 1990.

吉海智晃 (Tomoaki Yoshikai)

2005年東京大学情報理工学系研究科知能機械情報学専攻博士課程修了。博士(情報理工学)。2004年から2006年にかけて日本学術振興会特別研究員。2006年より東京大学助手。2007年より、職名変更により同大学助教。2008年より、同大学特任講師。大学院情報理工学系研究科創造情報学専攻所属、現在に至る。(日本ロボット学会正会員)

福島寛子 (Hiroko Fukushima)

2006年慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科卒業。2009年東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻修士課程修了。科学技術に対し法律的観点から貢献すべく、知的財産法を専門とする弁護士となるため、同年東京大学法科大学院入学、現在に至る。IEEE学生会員。(日本ロボット学会学生会員)

小林一也 (Kazuya Kobayashi)

2009年東京大学工学部機械情報工学科卒業。同年同大学情報理工学系研究科知能機械情報学専攻修士課程入学。2011年修了、同専攻博士課程に進学。2011年より日本学術振興会特別研究員に採用され、現在に至る。(日本ロボット学会学生会員)

稲葉雅幸 (Masayuki Inaba)

1981年東京大学工学部機械工学科卒業。1986年東京大学大学院工学系研究科情報工学専門課程博士課程修了。工学博士。1986年東京大学講師。1989年助教授。2000年教授。現在、同大学大学院情報理工学系研究科創造情報学専攻所属。日本機械学会、計測自動制御学会、情報処理学会、人工知能学会、ソフトウェア科学会等会員。(日本ロボット学会正会員)