柔軟変形多軸触覚を分散配置した等身大ヒューマノイド用外装による物体受渡作用の検知反応行動の実現

熊谷 伊織* 小林 一也* 野沢 峻一* 垣内 洋平*
吉海 智晃* 岡田 慧* 稲葉 雅幸*

Achivement of a Response to Contact States During Object Passing Action of the Life Sized Humanoid with a Multi-axis Soft Tactile Sensor Cover

Iori Kumagai*, Kazuya Kobayashi*, Shunnichi Nozawa*, Yohei Kakiuchi*,
Tomoaki Yoshikai*, Kei Okada* and Masayuki Inaba*

When a humanoid robot works with a human, it is needed for the robot to pass and receive objects. The robot has to detect that the laden objects are operated by the human on the whole body in object passing tasks. It is important that the robot detects not only push but shear generated by pulling action and twist generated by rotating action for the robot to detect human operations. In this paper, we dispersedly arranged 347 multi-axis soft tactile sensors to a humanoid robot. The multi-axis soft tactile sensors are small muti-axis sensors with urethane structure and they can be placed densely on body of a humanoid. We calculate a deformation vector from the deformation of sensor's upper surface using the output of a muti-axis soft tactile sensor. Next, we suggest the method to detect deformation state in contact surface consisting of soft tactile sensors using deformation moment and average of deformation vectors in the contact surface. Finally, we confirmed the usefulness of the fullbody tactile sensor cover and contact state detector by object passing experiment between a human and a robot.

Key Words: Humanoid, Tactile Sensor, Soft Exterior, Contact State

1. 序 論

人間がロボットに荷物を渡す、ロボットの運んできた荷物を人間が受け取るという物体受渡行動はロボットと人間の間で多く行われる作業であり、人間を支援するサービスロボットにおいて円滑な物体受渡行動の実現は重要である。特に全身を用いた物体受け渡し行動においてはロボットが全身の任意の箇所でも物体受渡時に生ずる作用を面接触状態として検出し、それに応じた適切な応答を行うことが必要であると考えられる。

そこで本論文では三次元変形感覚を備え、かつロボットの全身に分布可能な触覚センサとして柔軟触覚センサ [1] をヒューマノイドロボットの全身に分散配置することで全身触覚を有する被覆外装の構成法を提案する。更にその外装から得られる触覚情報に基づいた環境との接触状態認識法を提案し、Fig. 1 で示した物体受渡行動システムを構築する。最後に人間とロボットの物体受渡行動実験を通して提案したシステムの有用性を検証し、その結果を述べる。

Fig. 1 The object passing system between a human and the humanoid robot covered with a soft body exterior with soft tactile sensors [1]

証し、その結果を述べる。

2. 身体を利用した物体把持とその物体受渡し行動

2.1 物体受渡行動に求められる触覚

物体受渡行動には手渡しによる受け渡しのほか、胸で抱える、

原稿受付 2012 年 7 月 23 日

*東京大学大学院情報理工学系研究科

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

■ 本論文は提案性で評価されました。

脇に挟むといった全身の部位を用いた受け渡し動作が考えられる。特にマニピュレータのみでは持てないような大きな物体を受け渡しする場合、腕や胸部を用いて把持する、肩にかける、脇で挟むといった全身を利用した物体把持が必要となる。これらの全身を用いた物体受け渡し行動においては、ロボットが接触・非接触のほかには物体受渡時に生ずる作用を複数の面接触状態として検出することで、人間の操作に対する意図を理解しそれに合わせた行動が可能となると考える。本研究ではこの物体受渡行動において対象物体への操作によって生じた接触面の状態を物体受渡作用と定義する。例えば人間がロボットの把持している物体を取る際には接触面に物体を引きぬくことによるせん断や回転させることによるねじりが発生すると予想される。したがって接触面の変化に応じて物体を把持、解放することによりコントローラ等による明示的な指令なしに適応的な物体受渡行動が可能となる。また、ロボットの全身を用いて物体受渡行動を実現するためには全身の任意の箇所でも接触面の状態変化を検出し、胸部であれば抱える、側面部であれば挟むといった部位に応じた適切な把持行動を行わなければならない。ロボットが複数の面接触状態を全身の任意の箇所でも検出するためには全身分布可能性と多軸出力性を備えた触覚センサが必要となる。

2.2 先行研究

ヒューマノイドロボットの全身触覚の先行研究としては、高精度な多軸力センサを全身局所的な触覚として用いる場合と小型の圧力センサを全身に高密度で分布させて触覚として利用する場合がある。

前者では岩田らによる TWENDY に実装された六軸力センサが代表的である [2]。また、石坂らによる柔軟肉質ロボット macra では柔軟な外装の要所に三軸力覚センサを埋め込むことで人間との接触を検出することに成功している [3]。しかし六軸力センサはある一点にかかる力を高精度で計測することが可能な反面、大きさや配線上の観点から全身に高い密度で分布させることが困難である。また、力センサを全身に分布させる場合、可動性や排熱の問題が生ずることが報告されている [3]。物体受渡し行動時の面接触状態の検出において六軸力センサのような高い精度による外力の測定は不要であるが、物体把持行動は抱えるだけでなく脇に挟む、膝に載せる等ロボットの全身で起こりうるため、ロボットは全身の任意の箇所でも人間の操作による状態変化を検出する必要がある。柔軟変形多軸触覚センサは 20 [mm] 立方と一般的な六軸力センサに比べて小型であるとともに、デージーチェーンによりセンサ同士を数珠つなぎに配線して SMBus による通信を行い省配線化することで高密度での全身分布を可能としている。

一方後者では星野らによる先駆的な例として導電性ファブリックを用いた全身被覆型触覚スーツ [4] の研究がある。これは導電性の布と糸を用いて任意の形状のロボットに対してもフィットするセンサスーツを構成し着脱可能な外装を構成している。全身に分布実装可能で押し方向一軸の力を測定することが可能なセンサの例として、大村らによって開発された分布触覚センサ [5] を利用して全身動作を行う等身大ヒューマノイド [6] が挙げられる。同様に向井らによる介護支援ロボット RIBA では半導体を利用した面状分布センサ [7] が、コミュニケーションロボット

Robovie-IIS では圧電素子を利用した圧力センサ [8] がそれぞれ利用されている。これらのセンサは全身に高密度で分布させることが可能であるが、力センサに比べて押し方向一軸のみの出力しか得られない等機能が限定的であるという欠点を持つ。物体受け渡し行動時の面接触状態の検出においては物体との接触を多軸出力で検出しなければ複数の面接触状態を検出する事は困難である。柔軟多軸変形センサは環境との接触による接触面の変形を三次元ベクトルとして検出することで複数の面接触状態の検出に必要な多軸出力性を実現する。

3. 接触面変形検出のための柔軟変形多軸触覚センサ

柔軟多軸変形センサは Fig. 2 左図のように、立方体状のウレタン外装内側にある上部五つの受光素子で底面の LED からの光量を計測することでウレタンの三次元変形を検出する。柔軟多軸触覚センサの出力はサンプリングレート 10 [Hz] で同図に示された五つの受光素子の出力電圧（最大 3.3 [V]）を A/D 変換した 8 [bit] のデジタル値として得られる。荷重および変形による出力値の変化は文献 [1] に示されている。複数の柔軟多軸触覚センサを組み合わせることで従来の押し方向のみを検出する分布型センサでは困難なせん断やねじりの検出が可能である。

3.1 柔軟多軸触覚センサの変形特性

本研究では、この柔軟変形多軸触覚センサの変形を Fig. 2 左上図のように上面の x, y 軸回りの回転 θ_x, θ_y および z 方向の押しこみ dz の三次元からなるベクトル (θ_x, θ_y, dz) として定義する。

まず柔軟変形多軸触覚センサの変形特性を確認するため、柔軟変形多軸触覚センサ 1 個を台座に固定し、そのセンサ上面に接着したチェッカーボード（グリッド数 7×6 、一辺 15 [mm]）の位置と姿勢をセンサ上面から 160 [mm] 上部に固定したカメラを用いて求め、センサの出力と比較する実験を行った。

Fig. 2 右上図および Fig. 2 左下図に示された折れ線はそれぞれ θ_x, θ_y 正負方向にチェッカーボードを 3 回ずつ傾かせた際のセンサ出力値の初期値からの差分とカメラから求めたセンサ上面の変形角度の関係を示している。この結果から、センサ出力の初期値からの差分とセンサ上面の回転 θ_x, θ_y に正の相関が

Fig. 2 Upper left: the structure of a soft tactile sensor [1], others: result of fitting of sensor output to deformation (upper right: θ_x , lower left: θ_y , lower right: dz)

Table 1 Result of the soft tactile sensor's evaluation

Target	Gradient	Offset	Standard deviation
θ_x	1.38	0.22	0.102[rad]
θ_y	2.82	0.33	0.099[rad]
dz	12.38	-17.0 (= z_0)	0.92[mm]

あり、センサ上面の回転にセンサ出力が比例していることが分かる。

次に、同一の実験装置を用いて z 方向に五回チェッカーボードを押し込み、その時のセンサ出力と、カメラから求めた押し込みによる実際のセンサの z 方向への変形を記録した結果を Fig. 2 右下図の折れ線に示す。この結果から、 dz の導出式は光の強度が光源からの距離の二乗に反比例するモデルを用いることで求められると考えられる。

3.2 柔軟多軸触覚センサによる変形の取得

3.1 節の出力特性から、Fig. 2 左上図内の受光素子 1 から 5 の出力値をセンサ出力 (r_1, r_2, r_3, r_4, r_5) と定め、無変形時のセンサ出力を ($r_{10}, r_{20}, r_{30}, r_{40}, r_{50}$)、無変形時の受光素子高さを z_0 としてセンサの変形を以下の式によって求める。

$$\theta_x = k_x \{(r_2 - r_{20}) - (r_1 - r_{10})\} \quad (1)$$

$$\theta_y = k_y \{(r_4 - r_{40}) - (r_3 - r_{30})\} \quad (2)$$

$$dz = \frac{k_z}{\sqrt{r_5}} - z_0 \quad (3)$$

k_x, k_y はそれぞれ定数であり、受光素子の出力とセンサ上面の回転角の対応関係から最小二乗法によるフィッティングを用いて求めることが可能である。また、定数 k_z は $k_z = \sqrt{r_{50}} z_0$ として無変形時のセンサ出力と受光部の高さから決定できる。

3.3 出力精度評価

柔軟変形多軸触覚センサの変形を検出できることを確認するため、3.1 節の実験結果として得られたセンサ出力に対して式 (1), (2), (3) に基づき最小二乗法によるフィッティングを行った。本節における柔軟変形多軸触覚センサの精度評価を Table 1 にまとめる。これらのパラメータはセンサの個体ごとに異なるウレタン外装の密度による影響を受けるが、 k_x, k_y について本研究では使用するセンサの個体差を考慮せずすべて同一の値を使用しても 5 章で示した状態推定法により接触状態の推定が可能であった。

4. 分散配置全身触覚被覆外装の構成

本研究で目標とする物体受渡行動においては渡される物体の大きさ、形状、材質が不明であり、また渡される部位も胸部だけでなく脇や膝上など全身にわたって存在する。それらの任意の組み合わせに対応するためにはロボットの全身に触覚を分散配置し、全身の任意の部位において接触状態を検出する必要がある。そこで本研究では以下に示す方法でヒューマノイドロボットの分散配置全身触覚被覆外装を構成した。

4.1 分散配置全身触覚被覆外装の構造

接触面の接触状態を確実に検出することが可能な分散配置全身触覚被覆外装を構成するためにヒューマノイドロボットの外骨格に柔軟変形多軸触覚センサを配置し、その上からヒューマノイドロボットの形状に合わせたスーツ状の被覆を装着するこ

Fig. 3 The humanoid robot covered with a soft body exterior with soft tactile sensors

Part	Interval [mm]	Hardness	Number
Chest	20	52.2	56
Upper arm	30	52.2	42
Lower arm	25	52.2	24
Front waist	20	46.4	26
Side waist	30	52.2	12
Back of body	30	52.2	30
Hip	30	71.1	9
Back of thigh	30	71.1	24
Leg	30	52.2	124
Total			347

とで全身分散配置被覆外装の実装を行う。なお外骨格とは分散配置全身触覚被覆外装を装着しない状態におけるロボットの外装面のことであり、外骨格に固定することにより被覆のずれによる接触位置の誤認識を防ぎ、被覆外装によりセンサ同士の間にはセンサが変形するための間隔により生ずる不感帯を埋めるとともにカメラの赤外光等のセンサ下部 LED 以外からの光を防ぎ、変形の誤検出を防止する。

4.2 柔軟多軸触覚センサ分布の決定

柔軟変形センサの配置はセンサの変形量および検出可能な力の閾値と密度によって決定される。本研究の目的である人間との物体受渡行動の実現には人間の触覚と同程度の感度と密度があれば良いと考える。

柔軟多軸変形センサの最大変形量はセンサの大きさにより決定されるが、外装装着時の可動域確保という観点から、センサのウレタン外装の硬さを変更することによりセンサの大きさを維持しつつセンサの感度を調節するものとした。本研究では Fig. 3 右表のように 3 種類の硬さを持つ柔軟多軸変形センサを各部位にかかると予想される荷重の大きさを基にして配置した。なお S.Weinstein による体表部における圧覚閾値分布図 [9] を見ると腹部や腕部は圧覚閾値が低く、脚部は圧覚閾値が高いことが分かる。このことから Fig. 3 右表の触覚配置でも人間の触覚と同程度の感度分布が実現されていると考えられる。

今回利用する柔軟変形センサの最大変形量は実測から 10 [mm] であることが分かっているので、センサの隣接面間隔は 20 [mm] 以上とする。S.Weinstein による体表部の触二点弁別閾図 [9] によれば柔軟変形センサの隣接面間隔を 20 [mm] に設定してもほぼ人間の体表と同等の触二点弁別能を確保することができる。本研究では各部位に配置するセンサの間隔を Fig. 3 右表のように決定した。

4.3 全身触覚被覆外装の実装

全身の任意の部位において接触状態を検出するためにロボットの全身に触覚外装を実装する上で、センサを実装する外装面には平面の場合と曲面の場合がある事を考慮しなければならない。センサの配置方法は実装面の曲率によって決定する。胸部、腰部、臀部のような曲率が大きい平面にはそのまま骨格にセン

サを行列状に配置することで平面形状を保ちつつ等間隔にセンサを配置することが可能である。一方腕部、脚部のような曲率が小さい曲面では、一定のセンサ間隔を担保することができるように等間隔で行列状に柔軟多軸触覚センサを貼りつけたシートを作りそれを曲面に巻く事で Fig. 3 のように柔軟多軸変形センサを実装した。

5. 分散配置全身触覚被覆外装による接触状態検出

5.1 接触状態の定義とその検出方法

本研究では面接触状態の例として押し込み、せん断、ねじりの3状態を検出することを目指す。接触面に垂直方向の外力が働いている状態を押し込み、接触面に平行な方向に外力が働いている状態をせん断、接触面の法線方向周りにモーメントが働いている状態をねじりとし、この三種類をまとめて接触状態として定義する。この3状態を検出するため、下に示す接触状態検出器を提案する。

まず3章で述べたように、各柔軟多軸触覚センサは自身の変形を三次元ベクトル (θ_x, θ_y, dz) として検出し、センサのローカル座標系 x, y 軸回りの回転行列 $R_{\theta_x}, R_{\theta_y}$ を計算する。この変形を用いて各柔軟多軸触覚センサごとに5.2節で述べる変形方向ベクトル $\mathbf{x}_d$ を計算し、そのノルムにより各センサが環境と接触しているか否かの判定を行う。次に環境に接触しているとされた柔軟多軸触覚センサのインデックス集合 T に対して、5.3節で述べる変形モーメント $\hat{\mathbf{M}}_c$ および変形方向ベクトル平均 $\mathbf{x}_{dm}$ を計算し、あらかじめ設定した閾値 M_{th}, s_{th} と比較することにより接触状態を決定する。

5.2 柔軟多軸触覚センサの触覚情報処理

5.2.1 変形方向ベクトルの取得

変形したセンサ上面の法線方向単位ベクトルである、 $\mathbf{e}_d = (e_{dx}, e_{dy}, e_{dz})^T$ はセンサのローカル座標系 z 軸方向の単位ベクトル $\mathbf{e}_z$ を用いて

$$\mathbf{e}_d = R_{\theta_y} R_{\theta_x} \mathbf{e}_z \quad (4)$$

と計算できる。最後にこのベクトルの z 成分の大きさが dz となるようにスカラー倍し、ベクトル $\mathbf{x}_d$ を得る。

このベクトルは変形したセンサ上面の法線方向に平行で、ノルムは変形したセンサ上面にかかる力と相関があると考えられる。以降このベクトル $\mathbf{x}_d$ を変形方向ベクトルと定義するものとする。

実際にヒューマノイドロボットに分散配置全身触覚被覆外装を実装する場合柔軟変形多軸触覚センサの硬さの違いによりセンサ上面にかかる荷重と変形方向ベクトルの間の関係が変化する。そこで変形方向ベクトル $\mathbf{x}_d$ に対して柔軟変形多軸触覚センサの硬さに応じた重み w を与えることで変形方向ベクトルと荷重の関係が硬さによらないよう調整するものとした。本研究では臀部および腿裏部に実装した硬いセンサについて、 $w = 1.5$ 、腰前部に実装した柔らかいセンサについて $w = 0.5$ 、ほかの部位については $w = 1.0$ の重みをつけている。

5.2.2 接触の検出

次に全身に分布した柔軟多軸触覚センサを、接触しているものの集合と接触していないものの集合に分割する。ある適切な

閾値 d_{th} を設定し、ロボットの外装表面に実装されている各柔軟多軸触覚センサについて、 $\|\mathbf{x}_d\| > d_{th}$ ならばそのセンサが接触しているものと判断する。

5.3 変形方向ベクトルを利用した接触状態検出

5.3.1 ねじりの検出

ロボットの外装表面に実装されている柔軟多軸触覚センサは、それぞれ前述の変形方向ベクトル $\mathbf{x}_d$ とグローバル座標系における位置座標 $\mathbf{p} = (x, y, z)^T$ 、および姿勢行列 R を持つ。

これらを用いて同一接触面内で接触している柔軟多軸触覚センサのインデックス集合 T について、そのセンサの変形方向ベクトルのノルム $\|\mathbf{x}_d\|$ を重みとして接触点の重心位置 $\mathbf{p}_c$ を求める。

$$\mathbf{p}_c = \frac{\sum_{i \in T} \|\mathbf{x}_{di}\| \mathbf{p}_i}{\sum_{i \in T} \|\mathbf{x}_{di}\|} \quad (5)$$

ここで以下のように変形モーメント $\hat{\mathbf{M}}_c$ を定義する。

$$\hat{\mathbf{M}}_c = \sum_{i \in T} (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_c) \times (R_i \mathbf{x}_{di}) \quad (6)$$

変形方向ベクトル $\mathbf{x}_d$ の定義からこの変形モーメントは接触点の重心位置 $\mathbf{p}_c$ まわりのモーメントと相関があると考えられる。そこで変形モーメントの接触面法線方向成分 $\hat{M}_{cn}$ に対して閾値 M_{th} を設定し、 $\|\hat{M}_{cn}\| > M_{th}$ ならば接触面はねじりの状態にあるとみなす。

5.3.2 せん断と押し込みの検出

同一接触面内で接触している柔軟多軸触覚センサのインデックス集合 T について、その変形方向ベクトルの平均 $\mathbf{x}_{dm} = (x_{dm}, y_{dm}, z_{dm})$ を求める。ただし N は同一接触面内で接触している柔軟多軸触覚センサの個数とする。

$$\mathbf{x}_{dm} = \frac{1}{N} \sum_{i \in T} \mathbf{x}_{di} \quad (7)$$

得られた $\mathbf{x}_{dm}$ の x, y, z 方向成分 (x_{dm}, y_{dm}, z_{dm}) のうち、 x_{dm}, y_{dm} について閾値 s_{th} を設定し、 $\|\mathbf{x}_{dm}\| > s_{th}$ または $\|y_{dm}\| > s_{th}$ ならば $\|\mathbf{x}_{dm}\|, \|y_{dm}\|$ のうち大きいほうの方向にせん断が働いているとみなす。それ以外の場合は接触面は押し込みの状態にあるとみなす。

5.4 接触状態検出器の性能検証実験

本章において論じたアルゴリズムにより接触状態が検出できることを確認するため、20 [mm] の間隔を開けてセンサを 4×4 の行列状に配置したテストベッドを用いた接触状態検出実験を行った。本実験ではテストベッド内の柔軟多軸触覚センサ 16 個をまとめて一つの接触面として定め、 $d_{th} = 1.0$ 、 $M_{th} = 500.0$ 、 $s_{th} = 1.5$ と設定した。

右下のモデル上にある立方体がセンサの位置と反応状態を示している。モデル上で表示されている黒い矢印は5章で述べた変形方向ベクトルであり、検出された接触状態を各図の下に表記している。またモデル上に示された円形矢印は5.3節に基づき求められた変形モーメントの大きさ、直線矢印は (x, y, z) 方向のせん断および押し込みのうち5.3節に基づき推定された接触面の変形方向とその変形量である。

図の左上のグラフでは接触面の変形方向ベクトル平均 $\mathbf{x}_{dm}$

Fig. 4 Contact state estimation in a 4 × 4 testbed by x deformation, y deformation, z pressure and rotation

の (x, y, z) 方向成分を (x_s, y_s, z_s) , 左下のグラフでは接触面に接着したチェッカーボード (グリッド数 7×6 , 一辺 15 [mm]) の位置をセンサ上面から 160 [mm] 上部に固定したカメラを用いて求めた接触面の变形を (x_{cb}, y_{cb}, z_{cb}) で表している. グラフから, 実際の変形と変形方向ベクトル平均により求めた変形は 2 [mm] 程度の誤差で上面の変形を検出できていることが分かる. また右上には接触面法線方向まわりの変形モーメント $\hat{M}_{cn}$ を縦軸左側に, (x_{cb}, y_{cb}, z_{cb}) と同様の手法で求めた接触面の法線軸回りの回転角度を縦軸右側に取ったグラフを示している. 横軸はすべて時間であり, グラフ内には押し込み, せん断およびねじり検出の閾値が直線で示されている.

Fig. 4 の (a) は押し込みを与えた場合を示している. ここで接触と判定された柔軟多軸触覚センサ群に対して押し込みの条件を満たしている. Fig. 4 の (b) および (c) はそれぞれ y 方向, x 方向のせん断を与えた場合を示している. (c) で y 方向の変形出力がやや強く出ているものの, 共にせん断の条件を満たしかつ与えた方向の成分が他方の成分を上回っている. Fig. 4 の (d) はねじりを与えた場合を示している. 接触面の法線軸回りの回転角度が 0.05 [rad] 程度の時点で $\|\hat{M}_{cn}\| > M_{th}$ が成り立ち, ねじりが認識されている.

なお, 本実験においてテストベッドは 10 [N] から 20 [N] 程度の荷重で押しこみを検出することが確認された. テストベッドの接触面は 60 [mm] 四方であるため, ねじりを加えたときのモーメントはおおよそ 0.6 [Nm] から 1.2 [Nm] 程度であると考えられる.

6. 接触状態に基づく物体受渡作用の検知と反応行動実験

そこでここまで論じたハードウェア構成とアルゴリズムを用いることで, ロボットが全身触覚により接触面の状態変化から人間が物体受渡しを行おうとする人間の意図を認識し適切な反応をすることで物体受渡し行動が実現できることを示すため, 分散配置全身触覚被覆外装を実装したヒューマノイドロボット HRP-2 [10] との物体受渡し行動実験を行った.

Fig. 5 Passing a box using front body of the robot

6.1 物体受渡作用の検知と反応行動実験の概要

本実験ではまずロボットの外装を胴体前面部, 胴体左右側面部, 背部, 臀部, 両腕両脚の前後左右部の計 21 面に分割し, ロボットがいずれかの面に押し込みを検出すると物体を渡されたものと認識して接触面に応じた物体把持行動を開始するものとした. その後把持物体の接触面の状態がせん断およびねじりに変化した場合, 人間による取り出し操作と認識し把持物体を離す行動を行うことで人間とロボットの物体受け渡し行動を実現した.

本研究では全身での接触状態検出を用いた物体受渡し行動を目的とするため, 全身を利用して把持する必要がある大きさを持ち, かつ一般的に受渡し行動の対象となると考えられる物体として直方体形状剛体, 円柱形上剛体, 複雑形状柔軟物体の 3 種類を想定し, 直方体形状剛体の例として大きさ 500 [mm] × 500 [mm] × 70 [mm], 重量 1.0 [kg] の段ボール箱, 細長い円柱形状剛体の例として半径 35 [mm], 高さ 1,200 [mm], 重量 0.3 [kg] の紙筒 3 本, 複雑形状柔軟物体の例として全長 1,200 [mm], 幅 300 [mm], 重量 2.8 [kg] のぬいぐるみという 3 種類の物体を利用する.

また全身の異なる部位でも物体受渡し行動を実現できることを示すため, 胴体前面部を用いた抱え把持と胴体左側面部および左腕右側面部を用いた挟み把持の 2 種類の把持行動を行った.

実験の各図において左のグラフは横軸に時間, 縦軸に使用した接触面の变形方向ベクトル平均および変形モーメントを示したものであり, 接触状態の変化ごとに実験の様子とその時の各柔軟多軸変形センサの变形方向ベクトルを左の図に示している.

6.2 ねじりへの変化を利用した物体受渡し行動

段ボール箱をロボットが抱え把持により受け渡す実験を行った図を Fig. 5 に示す. この実験では $d_{th} = 1.0$, $M_{th} = 150.0$, $s_{th} = 1.5$ と設定した. 人間がロボットの胸部に箱を押し付けると, Fig. 5 の push で示した部分のように胸部の变形方向ベクトル平均の z 成分のみが大きくなることでロボットが人間による箱の押し込みを検出して箱をつかみ, 人間がロボットの把持している箱にねじりを与えると Fig. 5 の twist で示した部分のように $\|\hat{M}_{cn}\| < M_{th}$ が成り立つことで人間による箱の捻りを検出し, 箱を放すことができた. また Fig. 6 に示すように,

Fig. 6 Passing an object using front body of the robot(left: a doll, right: a stick)

Fig. 7 Passing an object using left side of the robot(left: a doll, right: a stick)

箱のような直方体状の剛体だけでなくぬいぐるみのような柔軟物や紙筒のような棒状の物体でも箱と同様の方法で接触状態を検出し受渡行動が実現できた。この実験では $M_{th} = 200.0$ と設定した。

6.3 セン断への変化を利用した物体受渡行動

ぬいぐるみと紙筒を脇に挟むことにより受け渡す実験を Fig. 7 に示す。本実験では、胴体左側面部と左腕右側面部に実装されている触覚外装面を接触面として利用する。本実験では胴体左側面部と左腕右側面部の2接触面を取り扱うため、右側のグラフには実線で示された胴体左側面部の接触状態と破線で示された左腕右側面部の接触状態の2種類を示した。

図中の push に示した部分のように人間が胴体左側面部にぬいぐるみおよび紙筒を押し付けると 6.2 節同様に胴体左側面部の変形方向ベクトル平均 z 成分のみが大きくなることで接触を検出できていることが確認できる。更に図中の twist に示した部分のように人間が把持物体を受け取ろうと物体を持ち上げると、ぬいぐるみの場合は左腕右側面部、紙筒の場合は胴体左側面部で $\|y_{dm}\| > s_{th}$ となり y 方向のせん断を検出し物体を離

すことができていることが分かる。

7. 結 論

本稿では柔軟多軸出力センサを等身大ヒューマノイドロボットの全身に配置することで全身高密度分布性と多軸出力可能性を両立した全身触覚外装を実現し、また柔軟多軸触覚センサの外装上面の変形方向を表す変形方向ベクトルを用いて押し込み、せん断、ねじりという三つの接触状態を検出する手法を提案した。更に提案手法を用いてヒューマノイドロボットが人間との物体受渡行動を実現することで、ヒューマノイドロボットが面接触状態の変化を物体受渡作用として検知することにより人間による把持物体の操作から人間の意図を理解し、人間の操作に応じた行動を実行することが可能となることを示した。

以上より、本研究で提案するロボットが接触面の接触状態を認識し適切な行動を計画する手法は、人間とロボットの物体受渡行動だけでなく、人間とロボットが協調して大きい物体を運搬する際に把持物体の接触位置やせん断の状態から人間の進行方向を予測して自身の移動方向に反映するといった応用が可能

である。またロボット単独の動作についても、把持物体との接触面のせん断や捻りから物体の落下を検出し把持し直すといったロボットと環境の接触状態を利用した認識行動計画に適用可能であると考ええる。

参 考 文 献

- [1] A. Kadowaki, T. Yoshikai, M. Hayashi and M. Inaba: "Development of soft sensor exterior embedded with multi-axis deformable tactile sensor system," The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN) 2009, pp.1093-1098, 2009.
- [2] H. Iwata and S. Sugano: "Whole-body covering tactile interface for human robot coordination. Robotics and Automation, 2002," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) '02, vol.4, pp.3818-3824, 2002.
- [3] 林摩梨花, 石坂唯, 植田亮平, 吉海智晃, 稲葉雅幸: "発泡体型柔軟肉質の全身被覆分布変形感覚を備えたヒューマノイドの実現", 日本ロボット学会誌, vol.26, no.8, pp.925-931, 2008.
- [4] 稲葉雅幸, 星野由紀子, 井上博允: "導電性ファブリックを用いた全身被覆型触覚センサスーツ", 日本ロボット学会誌, vol.16, no.1, pp.80-86, 1998.
- [5] Y. Ohmura, Y. Kuniyoshi and A. Nagakubo: "Conformable and scalable tactile sensor skin for curved surfaces," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1348-1353, 2006.
- [6] Y. Kuniyoshi, Y. Ohmura and A. Nagakubo: "Whole body haptics for augmented humanoid task capabilities," ISRR, pp.61-73, 2007.
- [7] T. Mukai, S. Hirano, H. Nakashima, Y. Kato, Y. Sakaida, S. Guo and S. Hosoe: "Development of a nursing-care assistant robot riba that can lift a human in its arms," Proc. the IEEE/RSJ 2010 International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.5996-6001, 2010.
- [8] 田近太一, 宮下敬宏, 石黒浩, 萩田紀博: "全身触覚をもつロボットによる人間の位置・姿勢の推定", 日本ロボット学会誌, vol.25, no.8, pp.1243-1250, 2007.
- [9] S. Weinstein: "Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex, and laterality," the First Int'l symp. on the Skin Senses, pp.195-222, 1968.
- [10] K. Kaneko, F. Kanehiro, S. Kajita, H. Hirukawa, T. Kawasaki, M. Hirata, K. Akachi and T. Isozumi: "Humanoid robot hrp-2," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) '04, vol.2, pp.1083-1090, 2004.

熊谷伊織 (Iori Kumagai)

2012 年東京大学工学部機械情報工学科卒業。同年東京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。(日本ロボット学会学生会員)

野沢峻一 (Shunnichi Nozawa)

2013 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)。2013 年東京大学大学院情報理工学系研究科助教となり現在に至る。2008 年日本機械学会畠山賞受賞。2010 年から 2013 年まで日本学術振興会特別研究員。2012 年 IEEE Robotics and Automation Society Japan Chapter Young Award (ICRA2012) 受賞。ヒューマノイドロボットによる全身物体操作の研究に従事。(日本ロボット学会正会員)

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。2012 年株式会社キビテック設立。(日本ロボット学会正会員)

稲葉雅幸 (Masayuki Inaba)

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 年同大学助教授。2000 年同大学教授。現在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)

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 年同課程修了。同大学情報理工学系研究科知能機械情報学専攻博士課程入学。2011 年から日本学術振興会特別研究員。(日本ロボット学会学生会員)

垣内洋平 (Yohei Kakiuchi)

1998 年東京大学工学部機械情報工学科卒業。2000 年東京大学工学系研究科機械情報工学専攻修士課程修了。同年三菱重工業 (株) 入社。2012 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)。2012 年東京大学大学院情報理工学系研究科特任助教となり現在に至る。ヒューマノイドロボットによる家事支援、三次元点群処理の研究に従事。(日本ロボット学会正会員)

岡田 慧 (Kei Okada)

1997 年京都大学工学部情報工学科卒業。2002 年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了。博士 (工学)。2002 年東京大学大学院情報理工学系研究科科学技術振興特任教員。2006 年同特任講師。2009 年同大学准教授となり現在に至る。ヒューマノイド統合システム、ヒューマノイドプランナ、実時間三次元ビジョンの研究に従事。1999 年第 4 回ロボティクスシンポジウム優秀論文賞、2006 年 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots Best Paper Award 受賞。情報処理学会、IEEE の各会員。(日本ロボット学会正会員)