

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：12601
 研究種目：挑戦的萌芽研究
 研究期間：2011 ～ 2012
 課題番号：23650095
 研究課題名（和文） ロボット全身着ぐるみスーツのための多感覚を有する気泡分布外圧均衡皮膚構造の実現
 研究課題名（英文） Research on Multi-modal Sensory Skin Structure with Distributed Air Bubble and External Pressure for Whole-body Robotics Suit
 研究代表者
 岡田 慧（OKADA KEI）
 東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授
 研究者番号：70359652

研究成果の概要（和文）：

柔軟性を持ち環境との接触状態を検出可能な触覚センサをヒューマノイドロボットの全身に分散配置することにより全身触覚を有する被覆外装の構成法と、センサ郡の情報統合から押し込み、せん断、捻りという三種類の接触状態を識別する接触状態検出アルゴリズムを提案した。これらの手法は等身大ヒューマノイドを用いた動作実験によりその有効性を確認した。

研究成果の概要（英文）：

In this research, we introduced a design methodology to dispersedly arrange 347 multi-axis soft tactile sensors to a humanoid robot and an algorithm to determine environmental contact status; push, sheer and twist from integration of deformation of sensor modules. Usefulness of these approach are confirmed with a humanoid robot platform and real-world task experiments.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：知能ロボット

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：ヒューマノイド・衝撃吸収・多感覚外装・気泡分布・皮膚構造

1. 研究開始当初の背景

物体認識や道具操作等の知能ロボット研究の進展に伴い、配膳や片付けなどの高次知能を基盤とするロボットの日常生活支援タスクが実現可能になりつつある。申請者もまた認識行動システム構成法、視覚注意生成法を提案し、等身大ヒューマノイドを用いた家事支援タスクにおける実証研究を通じて世界的に高い評価を受ける研究に取り組んできている。

このような状況の中、実世界における高次知能研究の次なる段階として、ロボットが人

や環境と直接ふれあう共生環境で、人から、あるいは人とともにタスクを習熟していく知能構成法の研究が盛んになってきているが、そのためには人や環境と接触したことが全身でわかり、時にはバランスを崩し倒れても自分も相手も傷つけない身体構造が必須であり、これなくしてはロボット知能研究を次のステージに進めることが出来ないとの認識をもつに至った。

2. 研究の目的

本研究では 3 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することを目的し、図1で示した物体受渡行動システムを構築し、その効果を実証的に検証する。

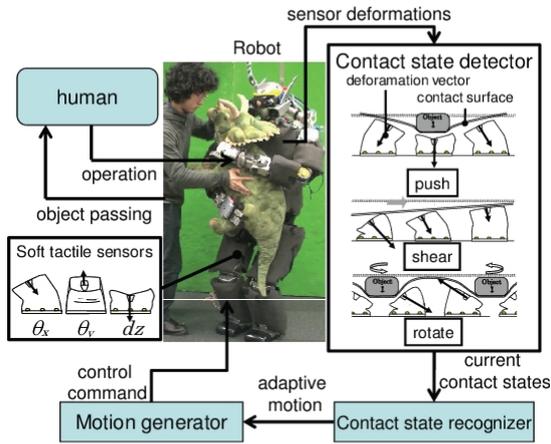


図1 : The object passing system between a human and the humanoid robot covered with a soft body exterior with soft tactile sensors

3. 研究の方法

・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[1]は状のウレタン外装内側にある上部5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10Hzで同図に示された5つの受光素子の出力電圧(最大3.3V)をA/D変換した8bitのデジタル値として得られる。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捻りの検出を可能にする。

・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



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

図2 : The humanoid robot covered with a soft body exterior with soft tactile sensors

ことである。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。

・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及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。本研究では図2の右表のように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ことが予想される荷重の大きさを基にして配置した。S.Weinsteinによる体表部の二点弁別閾図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出来る。

・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、捻りの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捻りとし、この三種類をまとめて接触状態として定義する。この三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各柔軟多軸触覚センサは自身の

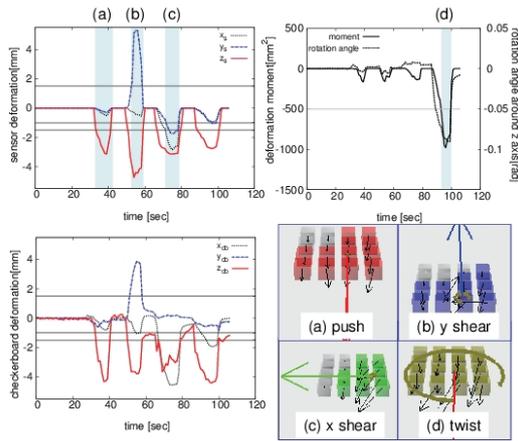


図3 : Contact state estimation in a 4x4 testbed by x deformation, y deformation, z pressure and rotation

変形を 3 次元ベクトル ($\uparrow x$, $\uparrow y$, 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 $R\uparrow x$, $R\uparrow y$ 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変形方向ベクトル 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、変形モーメント M_c 及び変形方向ベクトル平均 x_{dm} を計算し、予め設定した閾値 M_{th} , s_{th} と比較することにより接触状態を決定する。具体的には変形方向ベクトル 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 pc 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 M_{cn} に対して閾値 M_{th} を設定し、 $|M_{cn}| > M_{th}$ ならば接触面は捻りの状態にあるとみなす。

4. 研究成果

・接触状態検出器の性能検証実験

提案したアルゴリズムにより接触状態を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縦横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。

図3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。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) 方向のせん断及び押し

込みのうち5 推定された接触面の变形方向とその变形量である。図の左上のグラフでは接触面の变形方向ベクトル平均 x_{dm} 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 \times 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 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。横軸は全て時間であり、グラフ内には押し込み、せん断及び捻り検出の閾値が直線で示されている。

図3 (a) は押し込みを与えた場合を示している。ここでは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。(b) 及び(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。(d) は捻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 $|M_{cn}| > M_{th}$ が成り立ち、捻りが認識されている。

・物体受渡作用の検知と反応行動実験

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様子を図4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、push で示した部分のように胸部の変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捻りを与える twist で示した部分のように $|M_{cn}| < M_{th}$ が成り立つことで人間による箱の捻りを検出し、箱を放すことが出来た。また、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。さらに、せん断への変化を利用した物体受渡行動も可能なことを確認した。

研究期間を通じて、柔軟性を持ち環境との接触状態を検出可能な触覚センサをヒューマノイドロボットの全身に分散配置するこ

とにより全身触覚を有する被覆外装の構成法と、センサ群の情報統合から押し込み、せん断、捻りという三種類の接触状態を識別する接触状態検出アルゴリズムを提案した。これらの手法は等身大ヒューマノイドを用いた動作実験によりその有効性を確認した。具体的には、ロボットが人に触られる、ロボットが全身で抱えている物体を人が触る、ロボットが全身で環境と触れる、といった状態の検出が可能であることを示し、これにより、人とのインタラクションを開始する、人にモノを受け渡す、ロボットが環境接触動作を行う、といった行動のトリガとして有効であることを確認した。

一方で実用化等を視野に入れて継続的、安定的な行動実現を行うためには、常に環境と接触する苛酷環境にある柔軟触覚センサシステムにおいて、センサが故障していることを検出し、周囲のセンサ情報で補うことができる、あるいは故障している線さが通信システムのボトルネックにならないようルーティングを行うといった新しい身体通信システムを検討する必要があることも明らかになってきた。

[1] A. Kadowaki, T. Yoshikai, M. Hayashi, and M. Inaba. Development of soft sensor exterior embedded with multi-axis deformable tactile sensor system. In Robot and Human Interactive Communication, 2009. RO-MAN 2009. The 18th IEEE International Symposium on, pp. 1093-1098, 2009.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

熊谷伊織, 小林一也, 野沢峻一, 垣内洋平, 吉海智晃, 稲葉雅幸: 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, 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 10, 2013. (査読あり)

〔学会発表〕(計2件)

Iori Kumagai, Kazuya Kobayashi, Shunichi Nozawa, Yohei Kakiuchi, Tomoaki Yoshikai, Kei Okada, Masayuki Inaba: Development of a Full Body Multi-Axis Soft Tactile Sensor Suit for Life Sized Humanoid Robot and an Algorithm to Detect Contact States, Proceedings of the 2012 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2012), pp. 526--531, 2012. (査読あり)

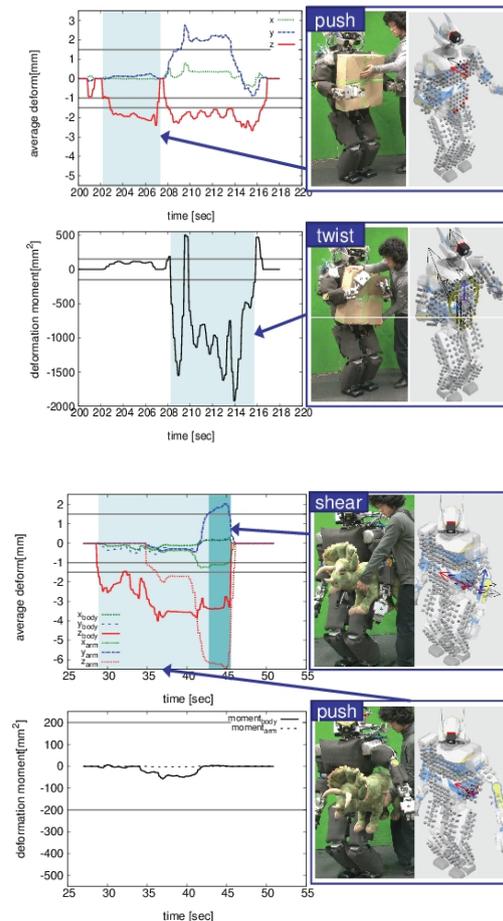


図4 : Passing a box using front body of the robot

熊谷伊織, 野沢峻一, 垣内洋平, 吉海智晃, 岡田慧, 稲葉雅幸: 環境接触行動ヒューマノイドのための柔軟変形多軸触覚センサを用いた全身分散配置被覆外装の実現, 第12回SICE システムインテグレーション部門講演会講演概要集, 1C1-5, 2011.

〔その他〕

<http://www.jsk.t.u-tokyo.ac.jp/~k-okada>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡田 慧 (OKADA KEI)
 東京大学・大学院情報理工学系研究科
 ・准教授
 研究者番号 : 70359652

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし