

近接や触覚を可能とするロボティックスキンの開発と、 人と協調できるロボットへの応用

Development of Fabrics-Based Sensor with Proximity and Tactile Sensing with Application in Safety Control of Robot

2171021



研究代表者

北陸先端科学技術大学院大学先端
科学技術研究科

准教授

ホ アンヴァン

[研究の目的]

ロボットは製造業の工場などに限定されるものではなく、最近ではサービスロボットが導入され、人の暮らしに近いところでの支援が必要とされている。そこに、最も懸念されている問題の一つは、ロボットが人間に対し、完全かつ快適な動作をしてくれるかということである。そのようなロボットは、人の存在を予測するだけでなく、人と接してもけがをさせないような動きに調整する必要がある。しかし、そこにビゾン（画像処理）によって周りの環境を認識し、障害物との衝突を回避するロボットの軌道を生成する研究のほとんどが、ロボットと人との近接や接触について、カメラで検出することができない。そこで人がロボットに触れる・抱きしめるなどの動作を通じてロボットに感情を伝えることが期待される。つまり、人間との近接と接する状態を感知できるロボティックインタフェースが求められる。曲面の多いロボットのボディに沿って貼り付けられるセンサの開発の要求も求められる。

そこで本研究では、低コストで造られる近接覚と触覚を可能とする柔軟な布地ロボティックスキンを開発することを目的し、実際に産業ロボットに一部貼り付けて人間にぶつからないようなロボットの軌道の制御を行った。

[研究の内容、成果]

1. センサのプロトタイプの開発

本研究で、近接覚と触覚二つの測定方法を統合する布地センサのプロトタイプの開発を行った。両測定方法は、センサの層の間の静電容量の値を読み込むために設計された。このプロトタイプは2×2分解のある触覚素子にプロトタイプの表面と近づく物体との距離を検出する近接覚素子を重ねて造形される。具体的な構成は下記で記述する。図1に示す構造は、各近接覚および触覚素子の静電容量の測定を可能にする多層構造で設計した。

触覚素子は底層（BL）と柔軟な誘電体層（DL1）と変形できる導電層（CL1）から成る。低層BLは、フレキシブルプリント基板等に電極の配列で触覚素子分解を決定する。そして、干渉ノイズを低下するために、電極を囲まれたグラウンド層に設けてある。この低層における各電極は、その電極における触覚要素（taxel）の静電容量を測定する市販のICチップ（MTCH112）に配線され、active電極と呼ばれた。その触覚要素に外力がかかった時、BL-DL1-CL1から成るコンデンサの静電容量が変わって、その変化の測定に基づいて外力の大きさが推定できる。そして、BL層における電極数を増やすと、触覚素子の分解が上げられ

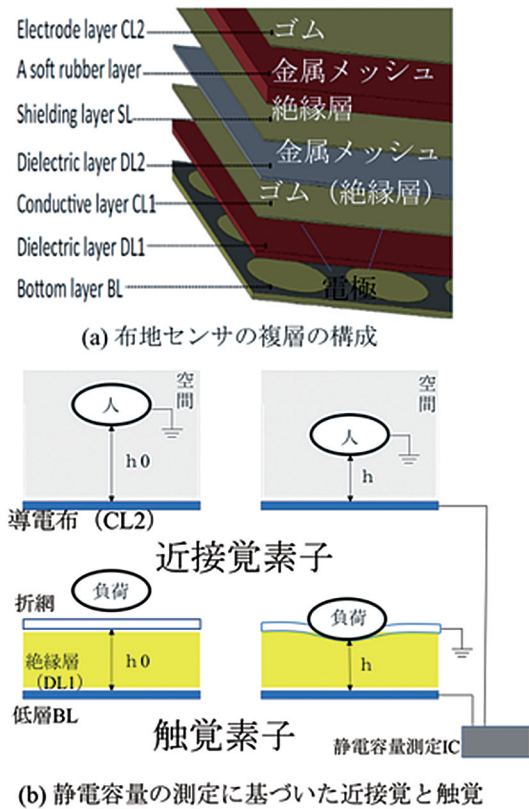


図1 センサの構成と動作原理

ると推定できる。今回のプロトタイプには4つの電極を設けてあり、 2×2 触覚要素 (taxel) を持つ構造にした。各 taxel の感度と検出可能範囲は誘電体層 (DL1) と導電層 (CL1) の特性によって設計されており、その材料は高硬度で検出範囲が広がるが感度が下がる一方、低硬度で感度は高い。従って、用途によって適切なセンサの特性を設計しなければならない。人間との接触を目的として開発したプロトタイプには DL1 が 2 mm 厚さのある低反発シリコンゴムを選択した。この材料はヒステリシスが発生することはあるが、人肌の特性に近い。そして、導電層 (CL1) には、過去に開発された導電性織物または感圧導電ゴムを利用することは可能であるが、かなりの厚さであるため、導電性材料に挟まれた層には適さない。そこで柔らかい金属製折り網を選択した。近接覚の素子は図1が示すように導電性織物 (CL2) と人の手指を二つの電極層とし、CL2 と手指との空間を誘電体層としながらコンデンサと成る。また、布

地 CL2 は IC チップ (MTCH112) と配線されると、手指のような導電性物体が CL2 の表面に近づき、測定された静電容量が増えて、その近接の距離を推定することができる。ただ、図1のセンサの構成のように近接覚の素子は触覚素子の上に重ねられて、そこでそれぞれ素子のコンデンサが生じる電界が混ざる恐れがある。その干渉を妨げるために基準電圧 (3.3 V) に接続されたシールド層 (SL) を設けてある。その結果、同時に各素子の静電容量の測定を行うことにより、近接覚と触覚を可能とする。

2. 触覚のモデル

布地センサの複層構成で触覚素子の静電容量の反応は各層 (主に触覚素子と近接覚素子における層) の材料の特性に依存することがある。そして、それを調べるために触覚要素 (taxel) の等価モデルを図2のように構築した。そこで、触覚要素の静電容量の推定は下記の方程式のように示される。

$$\partial C = C_1 - C_0 = \epsilon \epsilon_0 A \left(\frac{1}{l_1 - x_1} - \frac{1}{l_1} \right), \quad (1)$$

ただし、 A は電極の面積、 l_1 は無負荷の状態の初期距離、 C_0 は無負荷時の触覚要素の静電容量、 C_1 は負荷時の触覚要素の静電容量である。外部の負荷 f_e に起因した変形量 x_1 を算出することにより、 ∂C と f_e との関係抽出することができる。そして、図2(a) が示す等価モデルの全体の運動方程式が下記の式のように表されている。

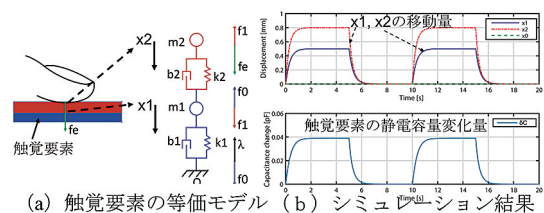


図2 等価モデルとシミュレーション

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\chi}_0 \\ \dot{\chi}_1 \\ \dot{\chi}_2 \\ \dot{\nu}_0 \\ \dot{\nu}_1 \\ \dot{\nu}_2 \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nu_0 \\ \nu_1 \\ \nu_2 \\ \mathcal{D} \\ \mathcal{E} \\ \mathcal{F} \\ \mathcal{G} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

ただし

$$\begin{aligned} \mathcal{D} &= k_1(\chi_1 - \chi_0) + b_1(\nu_1 - \nu_0) \\ \mathcal{E} &= k_2(\chi_2 - \chi_1) + b_2(\nu_2 - \nu_1) - k_1(\chi_1 - \chi_0) - b_1(\nu_1 - \nu_0) \\ \mathcal{F} &= f_e - k_2(\chi_2 - \chi_1) - b_2(\nu_2 - \nu_1) \\ \mathcal{G} &= -\omega^2 u_0 - 2\omega \nu_0 \end{aligned}$$

その中に k_1 , b_1 と k_2 , b_2 が触覚素子と近接素子の材料の特性を示す剛性と減衰係数 (damping coefficient) である。上記の方程式を解くことにより外力 f_e による触覚素子の静電容量変化 δC の推定ができる。例えば, $f_e = 1.5$ N のステップ入力で変化量 χ_1 と δC の応答は図 2(b) のように予測することができる。この等価モデルは、センサの機械的な特徴による触覚の応答をダイナミクスに検討することができ、センサの設計段階に不可欠だと考えられる。

3. キャリブレーション

触覚におけるキャリブレーションには、各触覚要素 (taxel) に負荷をかけて、taxel の測定した静電容量と力覚センサに測った負荷の力との関係を調べなければならない。そのために、 $2 \mu\text{m}$ 分解の電動リニアステージ (XMG650, ミスミ) と 6 自由度の力覚センサ (BL-テック) から成るキャリブレーション testbed を立ち上げた。そこで、今回のプロトタイプの触覚におけるキャリブレーション結果を利用し、シミュレーションと同じく 1.5 N のステップ荷重をかけて、ある taxel のダイナミクス応答が図 3(a) のようになる。そこで、taxel の測定結果は力覚センサで測った結果 (ground truth) とほぼ一致することがわかった。近接覚におけるキャリブレーションには、静電容量が近接物体

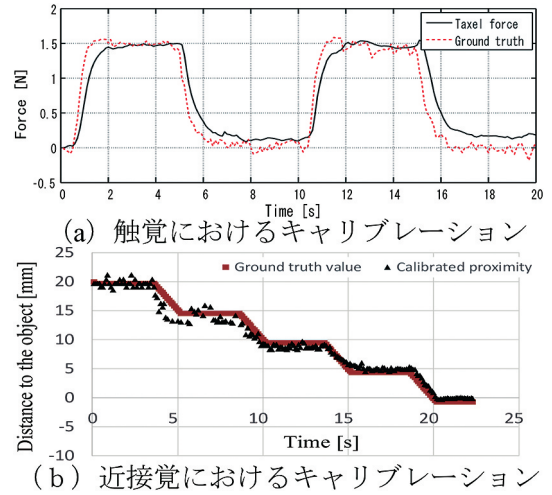


図3 キャリブレーション結果

の電動性に依存するため全ての物体を対象とする一般的なキャリブレーション方法は存在しないことである。今回の研究は人間を対象とするため、人の手指による近接覚のキャリブレーションを行った。図 3(b) は、人の手がセンサの表面に近づいたり、離れたりする近接距離 d とセンサの近接覚素子における静電容量との関係を示すキャリブレーションの結果である。それによって、 h が約 3 cm 以内に線形の関係がわかったが、数ミリ以内に測定された静電容量は急に増えて、対象物 (人の手) が表面に接する瞬間 ($h=0$) ピークとなって、非線形である。そのピークによって対象物とセンサとの瞬間的な接続が検出され、触覚には重要な役割である。

4. 近接覚による安全制御

開発した布地センサの近接覚に基づいて人にぶつからないようなロボットの制御を調べた (図 4)。

まず、 $3 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$ 面積のあるセンサを造って、測定された近接覚における静電容量をマイコンボード (Arduino Pro M0) で Low Pass Filter (cut-off frequency = 0.39 Hz) をかけながらパソコンに送る回路を設計した。このセンサを図 5 のようにロボットアーム (デンソー・VP-6242 A) の一部を貼り付けた。キャリブ

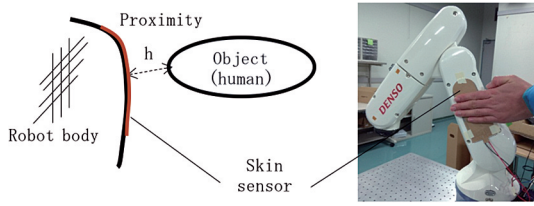


図4 実験のシナリオ

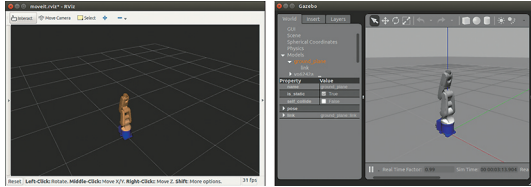


図5 ROSでの仮想環境

レーションの結果によって、このセンサの検出可能な範囲は9 cm 以内とわかった。そして、近接覚をロボットの制御のループに入れ込んで、ロボットをコントロールするためLinux環境にRobot Operating System (ROS) を立ち上げた。ROSはロボットを動かすライブラリを提供し、ロボットやセンサを統合した環境でリアルタイムにロボットの軌道を制御できるソフトウェアである (<http://www.ros.org/>)。ROSもシミュレーターとして様々なロボットの動作をシミュレーションで確認することができる。そして、デンソー・VP-6242Aの3D-CADモデルを仮想環境パッケージRVizとGazeboに埋め込んで、布地センサの触覚と近接覚のフィードバックモデルを構築した上でロボットの安全な軌道制御を調べられる環境を備える(図5)。そして、今回の調査に図6が示すようにロボットやセンサやROSとの閉ループ

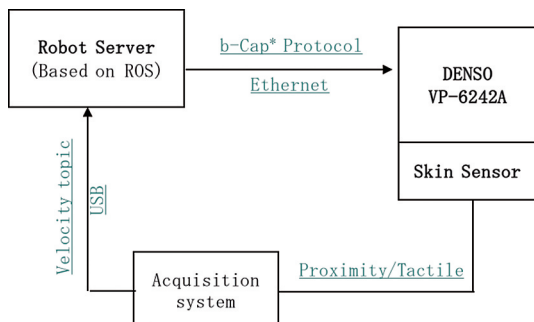


図6 制御閉ループ

プを造って、人間がロボットに近づく時ロボットの速度を落としたり止めたりする制御を行った。具体的には、ロボットアームの **pick-and-place** のような動作を定格の6割の速度 v_1 で繰り返し、人間はロボットに貼り付けたセンサの表面より9 cm 以上の距離で存在すると v_1 をキープするが (phase1)、もっと近づくとき速度を定格の2割の v_2 に下げ (phase2)、さらにロボットに接する瞬間にロボットを止めた (phase3) 後に、人が十分離れたことを近接覚で確認できたらロボットを v_1 で再起動した (phase4) (図7)。各 phase におけるロボットアームの具体的な座標と速度は図8が示す。

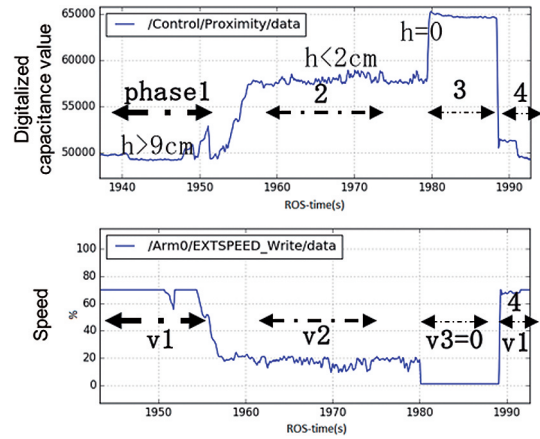


図7 センサの近接覚によるロボットの速度の応答

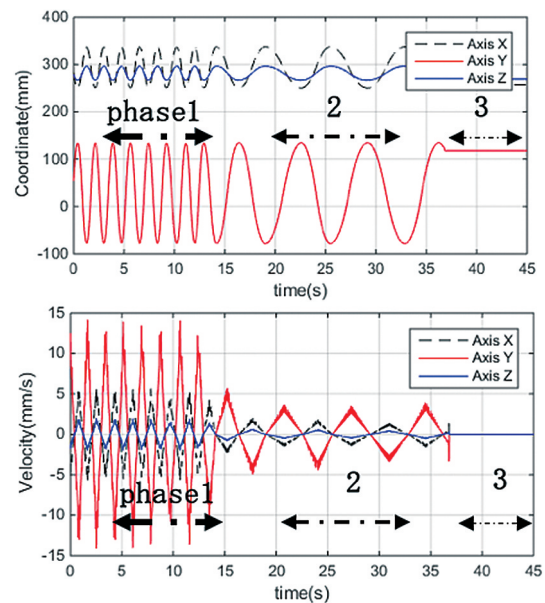


図8 ロボットの各自由度の情報

5. まとめ

本研究は近接覚と触覚を可能とする布地センサのプロトタイプの開発に成功した。さらに、提案された構成・原理・等価モデルに基づいて本格的なロボティックスキンの開発が期待される。そして、このセンサをロボットアームに貼り付けて、人間の近接をリアルタイムにフィードバックし安全な制御を行ったパイロット実験にも成功した。

[今後の研究の方向、課題]

現在、ROS と実験で触覚による人間と優し

い接続を維持できるロボットアーム制御方法の検討を進めている。近接により人間と接する状態は様々なので、それをセンサではっきり識別するのは安全な制御に重要な課題である。そして、参考論文のような他のロボティクス用途に、このセンサを活かせるような開発も展開していきたいと考えている。

[成果の発表、論文等]

Van Anh Ho, *Grasping by Wrapping : Mechanical design and evaluation*, 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 6013-6019, Vancouver, Canada, 24-28 Sept. 2017