

三次元形状キャプチャシートによる柔軟触覚センサ

○星 貴之, 篠田 裕之 (東京大学)

Soft Tactile Sensor Based on 3-Dimensional Shape Capture Sheet

○Takayuki HOSHI and Hiroyuki SHINODA (The University of Tokyo)

Abstract: In this paper, we propose a new soft tactile sensor. It is a compressible material covered by the 3-dimensional capture sheet (3DCS) which measures its own 3-dimensional configuration. Distributed triaxial accelerometers and a mounted lattice structure inside of the 3DCS enable us to reconstruct its whole shape in a virtual 3-dimensional space.

1. はじめに

近年、人間と協調して働くロボットの研究が盛んになってきている。そのようなロボットが人間と安全かつ親密に触れ合えるようにするため、柔軟な触覚センサで全身を覆うことが望まれる¹⁾。従来は、圧力センサ素子のアレイをゴムやウレタンの層で覆った触覚センサが多く試みられてきた。

今回我々は、新しい構造の触覚センサを提案する。それは、シリコンゴムや発泡ウレタンのような柔軟な材料を、自身の三次元形状を計測するシート(3-Dimensional Capture Sheet; 3DCS) で覆うものである。その触覚センサに対象物体が触れると、柔軟材料と3DCSは一体となって変形する。そこで3DCSの形状から、対称物体の個数や形状、接触位置などを知ることができる。また柔軟材料の弾性率を考え合わせることで、接触力を推定することもできる。

本稿では、現在開発中の3DCSの構造と形状計測原理について説明し、シミュレーション結果を示す。

2. 三次元キャプチャシート (3DCS) の構造

三次元キャプチャシート (3DCS) の内部構造を Fig. 1 に示す。シートに固定されたリンクが格子構造をなし、各リンクには三軸加速度センサが搭載されている。加速度センサの s_x 軸はリンクの長軸方向、 s_z 軸はシートの法線方向にそれぞれ

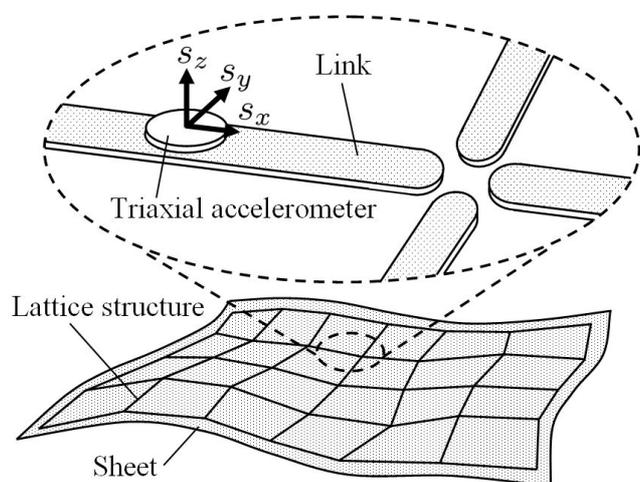


Fig. 1 Illustration of 3-Dimensional Capture Sheet (3DCS).

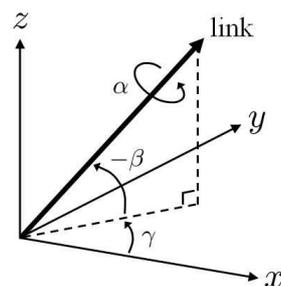


Fig. 2 Definition of rotational angles. The orthogonal coordinate in this figure means the world coordinate.

れ一致するように配置されている。織物と同様、格子構造の伸縮は対角線方向に生じる。滑らかな曲面を考えると、この格子構造はその表面に沿うように置くことができる。

3. 形状計測の原理

各リンクの三次元空間中での姿勢は、ロール角 α [rad]、ピッチ角 β [rad]、ヨー角 γ [rad] で記述される (Fig. 2)。加速度センサが計測した重力ベクトルからリンクの姿勢を求め、それを端から積み重ねることで3DCS全体の形状を再構成する。以下、リンクの姿勢の求め方を説明する。なお、最初の仮定として重力加速度以外の加速度は無視できるほど小さいとする。また初期状態においてセンサ座標 $\{s_x, s_y, s_z\}$ とワールド座標 $\{x, y, z\}$ の各軸は一致しているものとする。

2.1 ロール及びピッチ角

これらの角度は、加速度センサが計測した重力ベクトルから解析的に求めることができる。リンクがロール及びピッチ回転をしたときのセンサ出力 \mathbf{s} は、ワールド座標からセンサ座標への変換行列を $\mathbf{G}_{\beta\alpha}$ 、重力ベクトルを $\mathbf{g} = [0, 0, -g]^T$ として以下のように表される。ここで g [m/s²] は重力加速度。

$$\mathbf{s} = \mathbf{G}_{\beta\alpha}^T \mathbf{g} = \begin{bmatrix} g \sin\beta \\ -g \cos\beta \sin\alpha \\ -g \cos\beta \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (1)$$

これを解くことでロール角 α 及びピッチ角 β が求まる。

2.2 ヨー角

この角度に関する情報は加速度センサの出力に含まれ

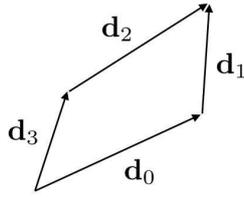


Fig. 3 Assumption about directional vectors. $\mathbf{d}_0 + \mathbf{d}_1$ must be equal to $\mathbf{d}_3 + \mathbf{d}_2$.

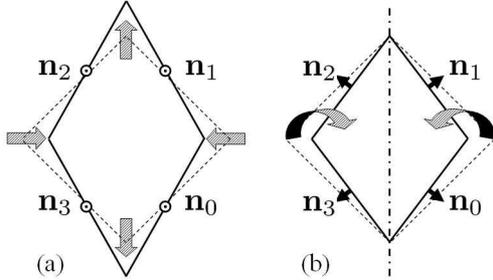


Fig. 4 Assumption about normal vectors. We assume two types of centrosymmetry transformations, (a) squashing and (b) folding, and then $\mathbf{n}_0 + \mathbf{n}_2$ is equal to $\mathbf{n}_1 + \mathbf{n}_3$.

ない。そのため加速度センサを用いた人体モーションキャプチャの研究では、ヨー角を求めるために磁場センサなどを併用している²⁾³⁾。

我々は、リンクが格子状に組まれていることを利用してリンク間の相対的なヨー角を求める方法を考案した。ここでリンク4本がなす格子1つに注目する。①まずリンクの長軸方向ベクトル \mathbf{d}_i について考える。 i はリンクを区別する添え字である。ヨー回転後の \mathbf{d}_i は次のように表される。

$$\mathbf{d}_i \equiv \begin{bmatrix} \cos \gamma_i & -\sin \gamma_i & 0 \\ \sin \gamma_i & \cos \gamma_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{G}_{\beta, \alpha_i} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_i \cos \beta_i \\ \sin \gamma_i \cos \beta_i \\ -\sin \beta_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

格子は閉ループをなしているので (Fig. 3)、各リンクがヨー回転した後でも次式が成り立つ。

$$\mathbf{d}_0 + \mathbf{d}_1 = \mathbf{d}_3 + \mathbf{d}_2 \quad (4)$$

②また、同様にリンクの法線ベクトル \mathbf{n}_i についても考える。ヨー回転後の \mathbf{n}_i は次のように表される。

$$\mathbf{n}_i \equiv \begin{bmatrix} \cos \gamma_i & -\sin \gamma_i & 0 \\ \sin \gamma_i & \cos \gamma_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{G}_{\beta, \alpha_i} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_i \sin \beta_i \cos \alpha_i + \sin \gamma_i \sin \alpha_i \\ \sin \gamma_i \sin \beta_i \cos \alpha_i - \cos \gamma_i \sin \alpha_i \\ \cos \beta_i \cos \alpha_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

滑らかな曲面上に載せる場合を考えると、格子の変形は中心対称のモードのみとなり (Fig. 4)、 \mathbf{n}_i について次式が成り立つと考えられる。

$$\mathbf{n}_0 + \mathbf{n}_2 = \mathbf{n}_1 + \mathbf{n}_3 \quad (6)$$

式 (4) (6) を解くことで γ_i が求められる。ただし式 (4) (6) は

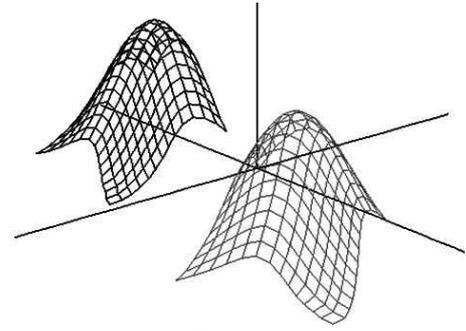


Fig. 5 Simulation result. The far and near shapes are the model and the estimated shapes, respectively.

不良設定問題であるため、4つの γ_i のうち少なくとも1つは定数として固定する必要がある。これは、再構成された形状について、ワールド座標の z 軸回りの回転に任意性が残ることを意味する。

4. シミュレーション

前章で述べた方法で形状再構成が可能であることを、シミュレーションによって確認した。3DCS のリンクをバネ、それらの交点を質点として、 13×13 の格子状バネマモデルを作成した。リンク長が変わらないよう、バネは非常に硬く設定した。反復計算により、このバネマモデルをガウシアン形状の上に被せた。そして各リンクについて方向ベクトルと法線ベクトルを計算した。

形状再構成をする際、ロール及びピッチ角は式 (1) から解析的に求めた。ヨー角は、式 (4) (6) が煩雑であるため、以下のような最小化問題に作り変えて最急降下法によって求めた。ここで j はベクトルの成分を表す添え字である。

$$P \equiv \sum_{j \in \{x, y, z\}} \{(d_{0j} + d_{1j} - d_{2j} - d_{3j})^2 + (n_{0j} - n_{1j} + n_{2j} - n_{3j})^2\} \rightarrow \min. \quad (7)$$

もし P の最小値がゼロとなるような解 γ_i があれば、それは式 (4) (6) の解でもある。

Fig. 5 にシミュレーション結果を示す。ガウシアン形状が再構成できていることがわかる。

5. おわりに

本稿では柔軟な触覚センサのための新デバイス、3DCS を紹介した。重力ベクトルを利用する原理上、例えば格子をなすリンク全てが水平面上にある場合に、形状が不定となる。式 (4) (6) が唯一解を持つ条件について今後詳しく調べる。

参考文献

- 1) M. H. Lee and H. R. Nicholls: Tactile sensing for mechatronics - A state of the art survey, *Mechatronics*, **9**, 1/31 (1999)
- 2) J. Lee and I. Ha: Real-time motion capture for a human body using accelerometers, *Robotica*, **19**, 601/610 (2001)
- 3) N. Miller, O. C. Jenkins, M. Kallmann, and M. J. Mataric: Motion capture from inertial sensing for untethered humanoid teleoperation, *Proc. Humanoids 2004*, **2**, 547/565 (2004)