

## リアルタイムに形状計測可能な布状デバイス

星 貴之\*・篠田 裕之\*

### Cloth-like Device Measuring 3D Shape in Real Time

Takayuki HOSHI\* and Hiroyuki SHINODA\*

A novel cloth-like device is proposed. It measures its own 3D shape in real time by utilizing a large number of minute sensors distributed on it. The shape reconstruction is based on the gravitational and the geomagnetic fields.

**Key Words:** sensor network, 3D cloth shape, flexible sensing device, accelerometer, magnetometer

#### 1. はじめに

布の三次元形状モニタリングには、それを介したマン・マシンインタフェースなどの応用が見込まれる。従来は映像にもとづく非接触な方法が採られてきた<sup>1)</sup>。その方法では自己遮蔽や人の手などで隠された部分が計測不能となる。またカメラや光源などの外部装置も必要である。

これに対し我々は、新しい計測法を提案している<sup>2)</sup>。布自身に微小センサを多数分布させ、それらの協調によって布の全体形状を求める方法である。これにより遮蔽の問題はなくなり、様々な場所や状況で手軽に布の形状計測ができる。この布状デバイスを“三次元キャプチャシート”(3DCS, Three-Dimensional Capture Sheet)と名付ける。

本論文ではセンサとして6軸センサ(3軸加速度+3軸磁気)を採用する。そのセンサを布上に多数配置し、計測した重力と地磁気の瞬時値にもとづいて布形状を再構成する。以下その詳細について説明し、実機によって検証する。

#### 2. 構造と原理

3DCSの内部構造をFig. 1に示す。複数の剛体リンクによる正方格子構造としてシートを離散化し、各リンクには三軸加速度センサと三軸磁気センサを搭載する。各センサのx軸はリンク長軸方向と一致している。これらのセンサが重力と地磁気を計測し、計測データはホストコンピュータへ送られる。リンクは全て同じ長さであり、格子点まわりに自由に回転できるものとする。

最初の仮定として、重力以外の加速度は無視できるほど小さく、磁気についても地磁気が支配的であるとする。リンクの三次元空間中での姿勢はロール角 $\alpha$  [rad]、ピッチ角 $\beta$  [rad]、ヨー角 $\gamma$  [rad]によって記述される(Fig. 2)。これらの姿勢角は計測データから算出でき<sup>3)</sup>、リンクの方向ベクトル $\mathbf{l}$ が求められる。全てのリンクについて計算した後、それらを結合することで3DCSの全体形状が再構成される。

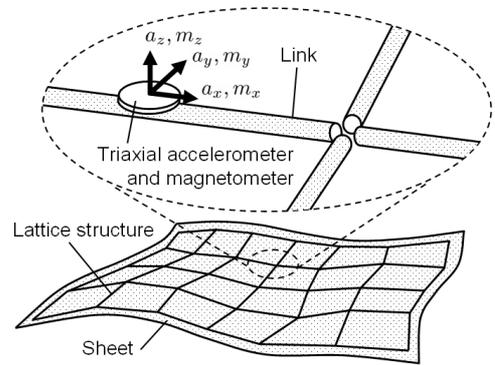


Fig. 1 Illustration of the 3DCS.

具体的には以下のような計算を行う。リンクは初期状態でx軸方向を向いていたとする。加速度センサ出力 $\mathbf{a} = [a_x, a_y, a_z]^T$ は、回転行列 $\mathbf{G}$ の転置と重力 $\mathbf{g} = g[0, 0, -1]^T$ の積として次のように書かれる。ここで $g$  [m/s<sup>2</sup>]は重力加速度、 $s$ と $c$ はそれぞれ $\sin$ と $\cos$ である。

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

同様に磁気センサ出力 $\mathbf{m} = [m_x, m_y, m_z]^T$ は、 $\mathbf{G}^T$ と地磁気 $\mathbf{b} = b[c\phi, 0, -s\phi]^T$ の積として次のように書かれる。ここで $b$  [T]及び $\phi$  [rad]は地磁気的全磁力及び伏角である。

$$\mathbf{m} = \mathbf{G}^T \mathbf{b} = b c \phi \begin{bmatrix} c\gamma c\beta \\ c\gamma s\beta s\alpha - s\gamma c\alpha \\ c\gamma s\beta c\alpha + s\gamma s\alpha \end{bmatrix} - b s \phi \begin{bmatrix} -s\beta \\ c\beta s\alpha \\ c\beta c\alpha \end{bmatrix} \quad (2)$$

(1), (2)式を解くことで $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ が得られる。その際 $g$ ,  $b$ ,  $\phi$ に関する知識は不要である。 $\beta$ ,  $\gamma$ とリンク長 $l$  [m]を用いて $\mathbf{l}$ が求められる。ここで $\mathbf{e}_x = [1, 0, 0]^T$ である。

$$\mathbf{l} \equiv l \mathbf{G} \mathbf{e}_x = l \begin{bmatrix} c\gamma c\beta \\ s\gamma c\beta \\ -s\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

\* 東京大学大学院情報理工学系研究科 東京都文京区本郷 7-3-1  
\* Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo (Received March 4, 2008)

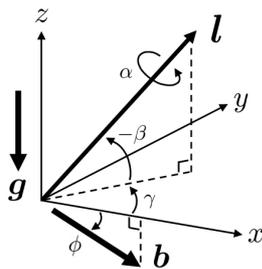


Fig. 2 World coordinate and posture angles of the link.

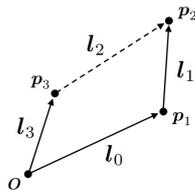


Fig. 3 1x1 lattice structure.  $l_2$  is the redundant link.

### 3. 冗長自由度

3DCS が持つ冗長性の程度を見積もる。いま  $N \times N$  格子を考える ( $N$  は一辺をなすリンクの本数)。最終的にはすべての格子点の座標値が求まればよいので、一点を基準点として固定すると、未知変数の個数は  $3 \times \{(N+1)^2 - 1\}$  個である。一方、リンク 1 本につき  $l$  (既知),  $\beta$ ,  $\gamma$  に関して 3 本の式が利用できる。よって式の総数は  $3 \times 2N(N+1)$  となる。変数と式の比  $\mu$  をとると次のようになる。

$$\mu = \frac{3N(N+2)}{6N(N+1)} \rightarrow \frac{1}{2} \quad (N \rightarrow \infty) \quad (4)$$

これは冗長自由度の個数がたかだか変数と同程度であることを表している。この冗長性はセンサフュージョンの手法によって、ノイズの影響を低減するために利用できる<sup>4)</sup>。

例えば  $N=1$  のとき (Fig. 3),  $\mu=3/4$  となる。これは次のように理解される。1x1 格子は 4 本のリンクできているが、その頂点位置は 3 本のリンク  $l_0, l_1, l_3$  のみで決定できる。これは  $l_2$  が冗長であることを表す。  $l_2$  は次のように書いて、追加条件として用いることができる。

$$-l_3 + l_0 + l_1 = l_2 \quad (5)$$

(5) 式にもとづいて  $\beta_i, \gamma_i$  ( $i$  はリンクを表す添え字) を最適化することで、よりもっともらしい推定値が得られる。例えば外乱磁場源となるループコイルがリンク長と同程度の距離まで近づいても、その影響をほぼ除去できることがシミュレーションによって確かめられている<sup>2)</sup>。

### 4. 試作機

市販の 6 軸センサとマイコンを用いてセンサチップ ( $13 \times 33 \text{ mm}^2$ ) を作成し、それら 24 個をパラレルケーブルで接続して  $3 \times 3$  格子構造 ( $165 \times 165 \text{ mm}^2$ ) を試作した。計測データは I<sup>2</sup>C バス通信によって PC へ送信される。

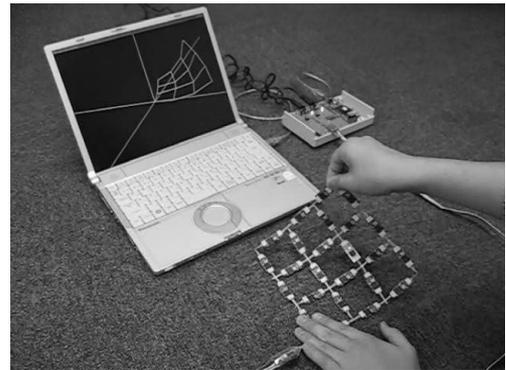


Fig. 4 Demonstration. Picking up one corner of the 3DCS.

再構成結果の更新レートは現在のところ 7 Hz である。

動作実験の様子を Fig. 4 に示す。  $3 \times 3$  格子の形状が PC 内で再現されていることがわかる。また精度を見積もるため、アクリル板に貼り付け  $0^\circ$  から  $90^\circ$  まで傾ける実験を行った。傾きに関する誤差は  $9^\circ$  以下 (平均  $6^\circ$ ) であった。また平面形状 (理論値) と再構成結果を最小自乗法で重ね合わせて比較したところ、対応する格子点同士の距離 (位置の誤差) は 15 mm 以下 (平均 10 mm) に収まっていた。

### 5. おわりに

自己形状を計測する布状デバイスを提案した。布形状の再構成は重力と地磁気の瞬時値を用いて行われる。そのため、計測データの時間変動の情報については利用する余地が残されている。例えば運動加速度を検出することによるダイナミックな動きの推定や、磁場変化による物体の検出、統計的手法による形状再構成の精度向上などが考えられる。またモーションキャプチャの研究ではしばしば重力、地磁気の他に角速度も利用して精度を上げる方法が採られる。布に多数実装できるような薄くて小さい (数 mm 角の) 9 軸センサが実現できれば、その方法を導入することも可能である。

今後は実用的なデバイスを目指し、通信やアルゴリズムの高速化によるリアルタイム性の向上と、センサの小型化、二次元通信<sup>5)</sup> の導入による布への高密度実装を行う。

謝辞 本研究の一部は文部省科研費補助金 (特別研究員奨励費 19・1708) によっている。

### 参考文献

- 1) R. White, K. Crane, and D. A. Forsyth: Capturing and animating occluded cloth, ACM Trans. Graphics, **27-34** (2007)
- 2) T. Hoshi and H. Shinoda: 3D shape capture sheet based on gravity and geomagnetic sensing, Proc. IEEJ 24th Sensor Symposium, 423/427 (2007)
- 3) D. Fontaine, D. David, and Y. Caritu: Sourceless human body motion capture, Proc. SOC '03 (2003)
- 4) Y. Nakamura and Y. Xu: Geometrical fusion method for multi-sensor robotic systems, Proc. ICRA '89, 668/673 (1989)
- 5) 篠田裕之: 素材表面に形成する高速センサネットワーク, 計測自動制御学会誌, **46-2**, 98/103 (2007)