

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 (東京大学)

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

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

Abstract: We introduce a novel sensing device named “three-dimensional capture sheet (3DCS).” The cloth-like sheet measures its own 3D shape with no external equipments. Small-sized triaxial accelerometers and magnetometers are distributed on the 3DCS. The sheet shape is reconstructed based on the gravity and the Earth’s magnetic field.

1. はじめに

近年 CMOS-MEMS¹⁾ や二次元通信²⁾ などの技術を背景として、布上に小型センサを大量かつ高密度に実装することが現実味を帯びてきている。その流れを受け、我々は新しい布状デバイスを提案する。それは自身の形状をリアルタイムにモニタリングする柔軟なシート(三次元キャプチャシート、3DCS)である。

従来、布の形状は光学的手法によって計測されてきた。一方 3DCS は、布上に大量に分布したセンサの出力から全体の形状を再構成するデバイスである。カメラなどの外部装置が必要なく、どこでも簡易に形状計測することができる。

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。これは以前に発表した重力のみにもとづく方法³⁾ の改良版である。

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と三軸磁気センサが搭載されている。各センサの x 軸はリンクの長軸方向と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、滑らかな曲面に沿うように変形することができる。

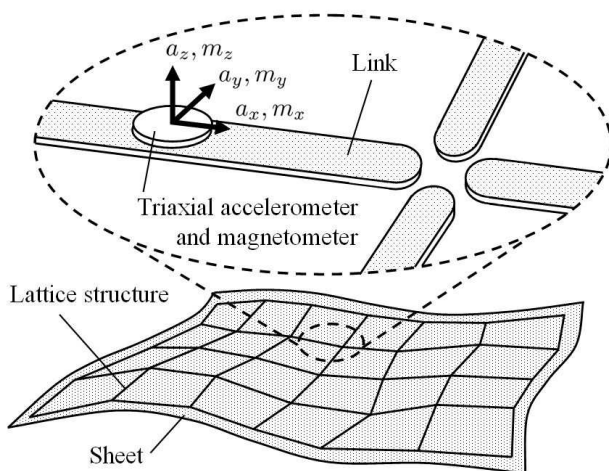


Fig. 1 Illustration of the 3DCS.

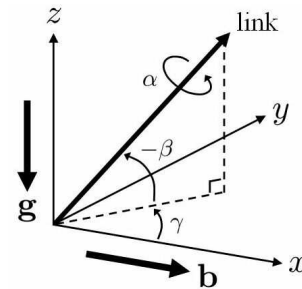


Fig. 2 World coordinate and posture angles.

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・磁気センサが計測した重力・地磁気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。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。磁気についても地磁気が支配的であると仮定する。また、重力ベクトルと地磁気ベクトルは直交していると仮定する(実際には、磁気センサデータから加速度センサデータと平行な成分を除去する)。初期状態において加速度センサ座標、磁気センサ座標とワールド座標の各軸は一致しているものとする。

3.1 姿勢角の算出法

リンクの姿勢角は、加速度センサの出力 \mathbf{a} と磁気センサの出力 \mathbf{m} から解析的に求めることができる。ワールド座標からセンサ座標への変換行列 $\mathbf{G}_{\alpha\beta\gamma}$ 、重力 $\mathbf{g} = [0, 0, -g]^T$ 、地磁気 $\mathbf{b} = [b, 0, 0]^T$ を用いて次のように書かれる。ここで g [m/s²] は重力加速度、 b [T] は地磁気の強度である。式 (1) (2) から、 α 、 β 、 γ が得られる。

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

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

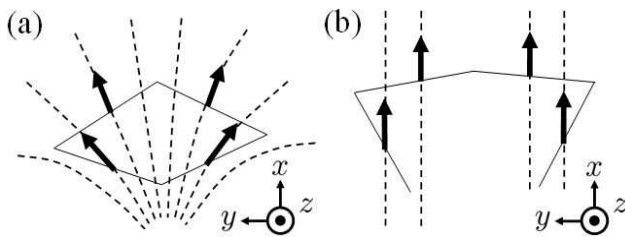


Fig. 3 (a) Lattice unit in a disturbed magnetic field and (b) the estimated shape based on the parallel assumption. The dotted lines represent the magnetic field lines.

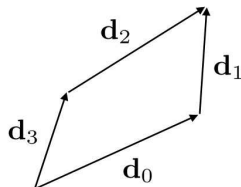


Fig. 4 Lattice unit. Directional vectors form a closed-loop.

3.2 外乱磁場に対する補正

地磁気は微弱であるため、磁石などによって容易に乱される。3.1 節では一様な地磁気を仮定しているため、外乱がある場合、ヨー角の推定は大きく誤ってしまう (Fig.3)。これに対して我々は、リンクが格子構造をなしていることを利用してヨー角を補正する。四角形をなす 4 本のリンクに着目する (Fig.4)。それらが閉ループをなすという条件は、方向ベクトル \mathbf{d}_i (i はリンクの番号) を用いて次のように書かれる。

$$\mathbf{d}_0 + \mathbf{d}_1 = \mathbf{d}_3 + \mathbf{d}_2 \quad (3)$$

式 (3) の解 γ_i を、式 (2) から初めに得られた値の周辺で探索することで、閉ループとなるように再推定が行われる。ただし可解性や唯一性については未確認である。

4. シミュレーション

提案手法によって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。13×13 の格子モデルを用意し、反復計算によりガウシアン形状の上に被せた。そして各リンクの姿勢から、加速度センサ出力及び磁気センサ出力を計算した。形状再構成をする際、姿勢角は式 (1) (2) から解析的に求めた。ヨー角補正のため、式 (3) を次のような最小化問題に作り変えて共役勾配法によって解いた。

$$P \equiv \sum_{j \in \{x,y,z\}} (d_{0j} + d_{1j} - d_{2j} - d_{3j})^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

ここで j はワールド座標系の軸を表す。 P の最小値が 0 となる時、式 (4) の解は式 (3) の解でもある。式 (2) から最初に得られた γ_i を初期値として解き、再推定結果を得た。

Fig. 5 にノイズなしの場合の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。また、センサデータにランダムノイズが混入した場合についても調べた。ノイズレベルは重力加速度 g と地磁気 b に対する百分率で表す。Fig. 6 に 10 試行での最大推定誤差を示す。ま

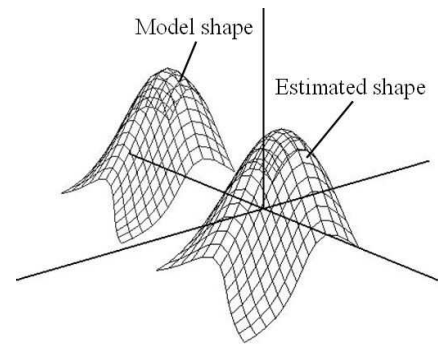


Fig. 5 Simulation results for a Gaussian shape.

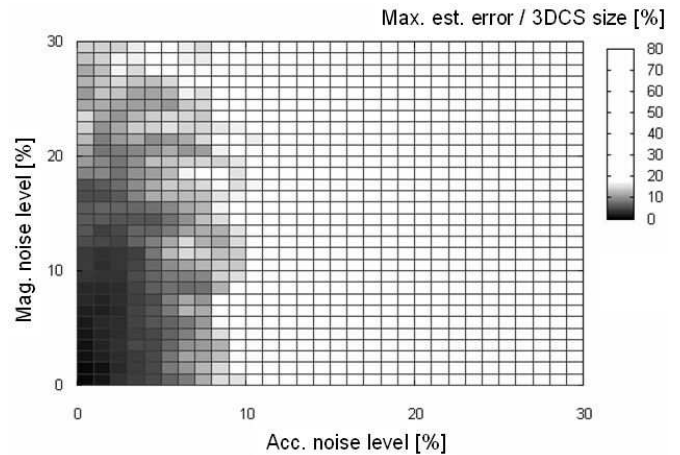


Fig. 6 Simulation results on effect of noises. The worst cases of the maximum estimation error are shown (10 trials per each noise level).

ず最小自乗法によって、モデル形状と再構成形状の対応する格子間の距離が最小になるように重ね合わせた。モデルは 196 個の格子点を持つが、そのうち対応する格子点間の距離が最大のものを、その試行の推定誤差とした。それを 10 試行繰り返したうちで最大のものを最大推定誤差とした。我々の観察により、最大推定誤差が 3DCS の一辺の 15 % を超えると再構成結果が大きく崩れることがわかった。従って Fig. 6 から、加速度ノイズレベルが 8 % (加速度換算 0.8 m/s^2 程度) 以下、磁気ノイズレベルが 25 % (東京での磁気換算 $7.5 \mu\text{T}$ 程度) 以下ならば 3DCS が安定して動作すると期待できる。これは実際に達成できる値である。

5. おわりに

本稿では布状デバイス 3DCS について説明した。今後、提案手法にもとづいた試作機を製作する予定である。

参考文献

- 1) O. Brand: Microsensor integration into systems-on-chip, Proc. IEEE, 94-6, 1160/1176 (2006)
- 2) 篠田裕之: 素材表面に形成する高速センサネットワーク, 計測と制御, 46-2, 98/103 (2007)
- 3) 星貴之, 篠田裕之: 三次元形状キャプチャシートによる柔軟触覚センサ, 第 7 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, 464/465 (2006)