1A2-A09

三次元形状計測シート

Three-Dimensional Shape Measuring Sheet

○星貴之　　尾崎沙世　　正　篠田裕之（東京大学）

Takayuki HOSHI, Sayo OZAKI, and Hiroyuki SHINODA, The University of Tokyo
{star, ozaki, shino}@alab.t.u-tokyo.ac.jp

We propose a novel sensing device named "3-dimensional capture sheet (3DCS)". The cloth-like sheet measures its own 3D configuration. There is a lattice structure inside of the sheet, and each link of the structure has a triaxial accelerometer. The roll and pitch angles of the link are derived from the gravity vector measured by the accelerometer. Furthermore, the relative yaw angle is also determined owing to the lattice structure. The posture of each link is fully described by these three angles. Then, the whole shape of the sheet is estimated by combining all of the links in computation. The sensing theory, simulation results and prototype experiments are shown in this paper.

***Key Words*:** Sensor network, Flexible sensing device, 3-dimensional configuration, Triaxial accelerometer

1. はじめに

物体の三次元形状計測は通常、光学的手法によって行なわれる。例えばステレオ法、光切断法、モアレトポグラフィなどである[1]。これらの手法はカメラや照明などの外部装置を必要とし、また遮蔽が生じるような場合には適さない。

近年、CMOS-MEMS[2]や通信技術[3]の進歩により、多数の小型センサを布などの柔軟体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、我々は三次元形状計測の新たな方法を提案する。それは自身の形状をモニタリングする柔軟な布状シート（三次元キャプチャシート、3DCS）で物体を直接包み込む方法である。3DCS 上には多数の三軸加速度センサが配置されており、それらが計測した重力ベクトルをもとに全体の形状を再構成する。この方法では 3DCS 以外の装置を必要とせず、手軽に物体の大きさや形状を測ることができる。また、人間に着用させるモーションキャプチャや、発泡ウレタンなどの柔軟体と組み合わせて触覚センサとする[4]などの応用も考えられる。

本稿では 3DCS の計測原理を説明し、シミュレーションと試作機による検証結果を示す。

2. 構造

三次元キャプチャシート（3DCS）の内部構造を図 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一致するように配置されている。一般の織物と同様、このシートの伸縮は格子構造の対角線方向に生じる。

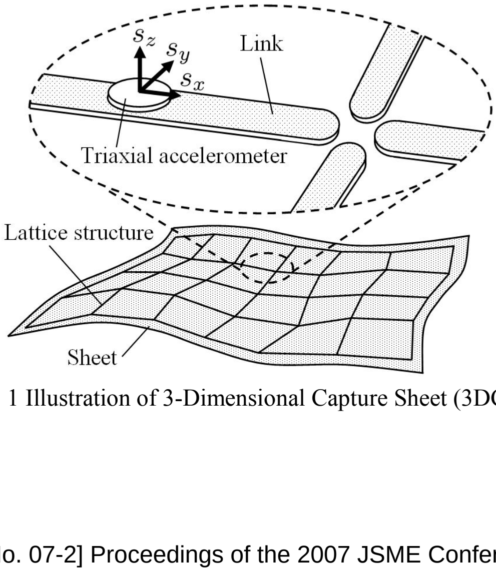

Fig. 1 Illustration of 3-Dimensional Capture Sheet (3DCS).

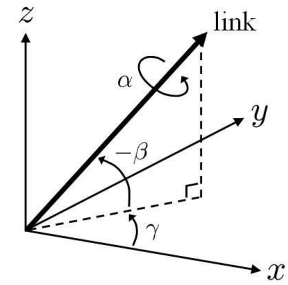

Fig. 2 Definition of rotational angles.

3. 計測原理

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（図 2）。加速度センサが計測した重力ベクトルから各リンクの姿勢を求め、それらを端から積み重ねて 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。

3.1 ロール角及びピッチ角

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 $\mathbf{g} = [0, 0, -g]^{\mathrm{T}}$ として以下のように表される。ここで g [m/s^2] は重力加速度を表す。

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

これを解くことでロール角 α 及びピッチ角 β が求まる。

3.2 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[5][6]。

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

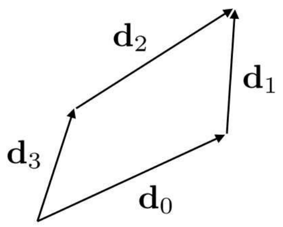

Fig. 3 Assumption about directional vectors.

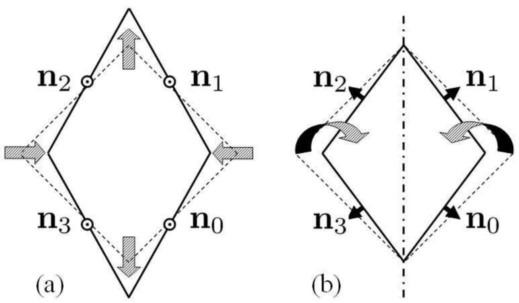

Fig. 4 Assumption about normal vectors. We assume two types of symmetric transformations, (a) squashing and (b) folding,.

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。

$$\mathbf{d}_i \equiv \begin{bmatrix} \cos\gamma_i & -\sin\gamma_i & 0 \\ \sin\gamma_i & \cos\gamma_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{G}_{\beta_i\alpha_i} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma_i \cos\beta_i \\ \sin\gamma_i \cos\beta_i \\ -\sin\beta_i \end{bmatrix} \tag{2}$$

格子が閉ループをなしているため（図 3)、各リンクがヨー回転した後でも次式が成り立つ。

$$\mathbf{d}_0 + \mathbf{d}_1 = \mathbf{d}_3 + \mathbf{d}_2 \tag{3}$$

また②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。

$$\mathbf{n}_i \equiv \begin{bmatrix} \cos\gamma_i & -\sin\gamma_i & 0 \\ \sin\gamma_i & \cos\gamma_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{G}_{\beta_i\alpha_i} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\gamma_i \sin\beta_i \cos\alpha_i + \sin\gamma_i \sin\alpha_i \\ \sin\gamma_i \sin\beta_i \cos\alpha_i - \cos\gamma_i \sin\alpha_i \\ \cos\beta_i \cos\alpha_i \end{bmatrix} \tag{4}$$

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（図 4)、$\mathbf{n}_i$ について次式が成り立つと考えられる。

$$\mathbf{n}_0 + \mathbf{n}_2 = \mathbf{n}_1 + \mathbf{n}_3 \tag{5}$$

式(3)(5)を解くことで γ_i が求められる。ただし式(3)(5)は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、z 軸回りの回転に任意性が残ることを意味している。

3.3 非可解性解析

式(3)(5)が解けない場合を特異値分解[7]によって調べる。式(3)(5)の γ_i が含まれる成分を整理して行列に書き換えると、次

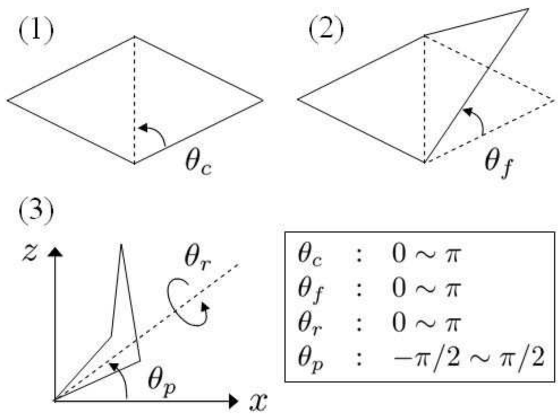

Fig. 5. Procedure of lattice model generation. The corner, fold, roll, and pitch angles are the changing parameters.

のようになる。ここで、s と c はそれぞれ sin、cos を表す。

$$\begin{bmatrix} -\mathrm{c}\beta_1 & 0 & \mathrm{c}\beta_2 & 0 & \mathrm{c}\beta_3 & 0 \\ 0 & -\mathrm{c}\beta_1 & 0 & \mathrm{c}\beta_2 & 0 & \mathrm{c}\beta_3 \\ \mathrm{s}\beta_1\,\mathrm{c}\alpha_1 & \mathrm{s}\alpha_1 & -\mathrm{s}\beta_2\,\mathrm{c}\alpha_2 & -\mathrm{s}\alpha_2 & \mathrm{s}\beta_3\,\mathrm{c}\alpha_3 & \mathrm{s}\alpha_3 \\ -\mathrm{s}\alpha_1 & \mathrm{s}\beta_1\,\mathrm{c}\alpha_1 & \mathrm{s}\alpha_2 & -\mathrm{s}\beta_2\,\mathrm{c}\alpha_2 & -\mathrm{s}\alpha_3 & \mathrm{s}\beta_3\,\mathrm{c}\alpha_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{c}\gamma_1 \\ \mathrm{s}\gamma_1 \\ \mathrm{c}\gamma_2 \\ \mathrm{s}\gamma_2 \\ \mathrm{c}\gamma_3 \\ \mathrm{s}\gamma_3 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \mathrm{c}\gamma_0\,\mathrm{c}\beta_0 \\ \mathrm{s}\gamma_0\,\mathrm{c}\beta_0 \\ \mathrm{c}\gamma_0\,\mathrm{s}\beta_0\,\mathrm{c}\alpha_0 + \mathrm{s}\gamma_0\,\mathrm{s}\alpha_0 \\ \mathrm{s}\gamma_0\,\mathrm{s}\beta_0\,\mathrm{c}\alpha_0 - \mathrm{c}\gamma_0\,\mathrm{s}\alpha_0 \end{bmatrix} \tag{6}$$

γ_0 は基準となる固定値であり、 γ_i $(i=1, 2, 3)$ は γ_0 に対する相対値として得られる。係数行列の非零特異値が 3 個未満（劣決定）のとき、格子の形状は一意に定めることができない。

図 5 のように 4 変数をそれぞれ 20 段階で変化させてモデルを生成し、係数行列の特異値を計算した。図 6 に劣決定となる $(\theta_c, \theta_f, \theta_r, \theta_p)$ をプロットした。最大特異値に対する第三特異値の比が 0.1 未満 $(\lambda_3/\lambda_1<0.1)$ となるとき、劣決定とみなした。図 6 から、劣決定となる条件は①全てのリンクが水平面上にある場合、②格子が完全に潰れる場合、のどちらかに含まれることがわかる。条件②はリンク同士の接合部を制限すれば回避できるので、結局、非可解条件は条件①のみとなる。

4. シミュレーション

4.1 モデル生成と計算法

3DCS のリンクをバネ、それらの交点を質点として、13×13 の格子状バネマスモデルを作成した。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、このバネマスモデルをガウシアン形状の上に被せ、各リンクについて三軸加速度センサから得られる出力を計算した。

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(3)(5)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。

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

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(3)(5)の解でもある。

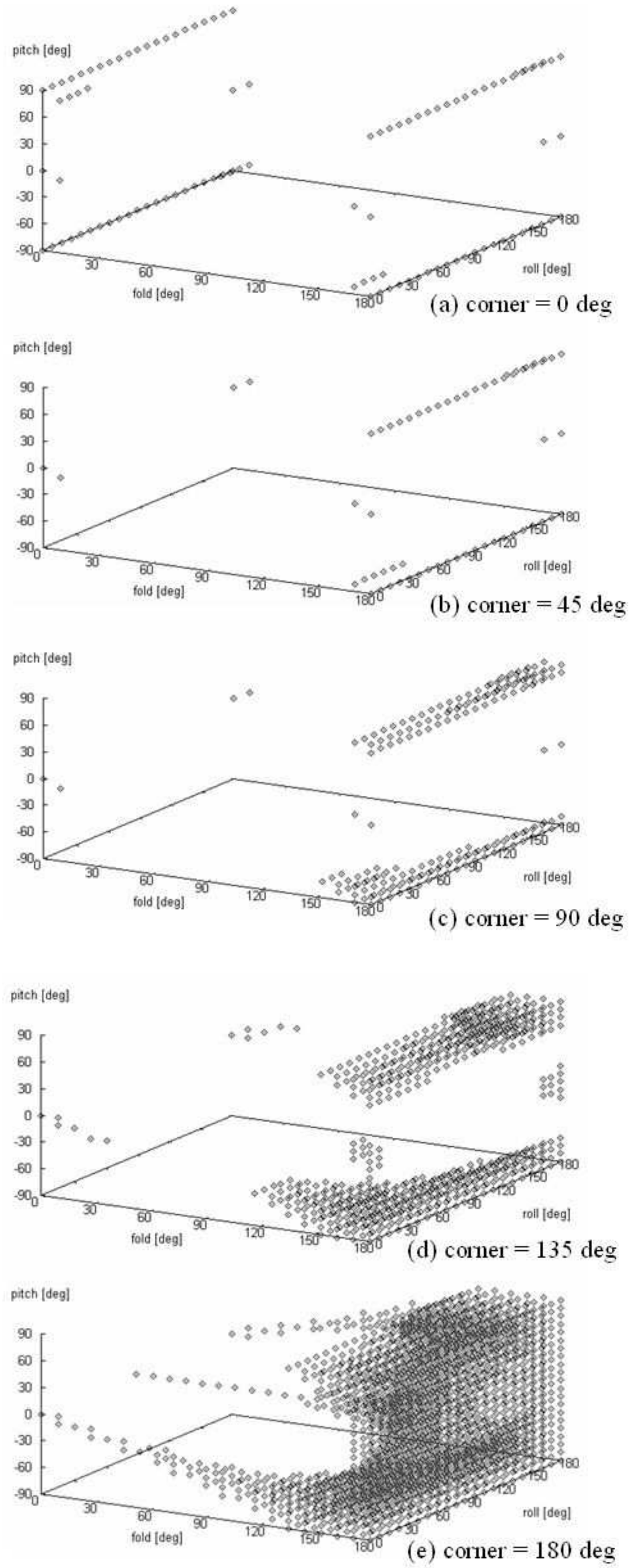

Fig. 6 Results of unsolvability analysis. The (θ_c, θ_f, θ_r, θ_p)s satisfying λ_3/λ_1<0.1are plotted in the parameter space. (a), (b), (c), (d), and (e) are for θ_c=0, 45, 90, 135, and 180 deg, respectively. It turns out that most of the space is left with no points, that means Eq. (6) is solvable outside of trivial cases.

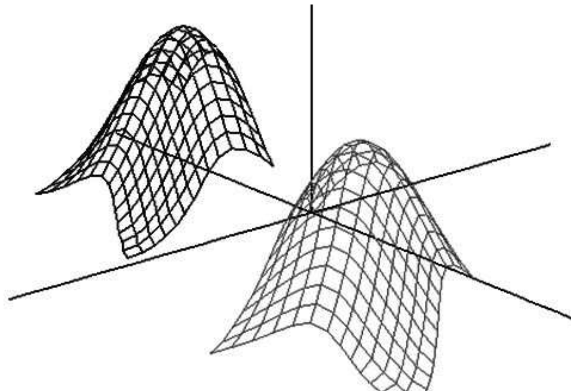

Fig. 7 Simulation result. The far and near shapes are the model and the estimated shapes, respectively.

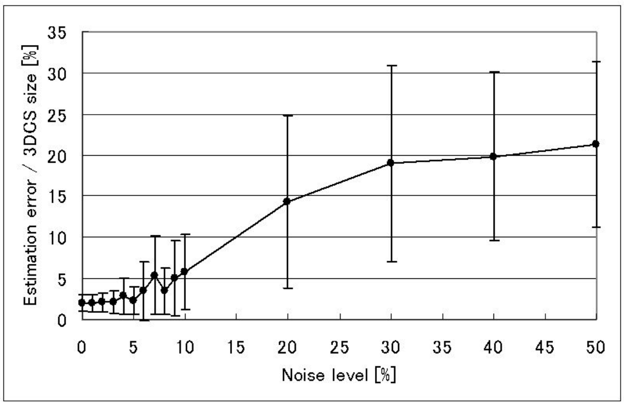

Fig. 8 Simulation results on effect of noise. The mean values (dots) and standard deviations (error bars) of the estimation error.

4.2 形状再構成

最初に、ノイズなしの場合に前述のアルゴリズムで形状が再構成できることを確認した。図 7 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。

4.3 ノイズの影響

ノイズありの場合を考える。外乱要因としては、センサデータのノイズ（角度エラー）、実効的なリンク長の変動、式(5)の法線条件に適合しない格子の変形、などがある。このうちセンサデータのノイズの影響が最も大きいと考え、様々な S/N 比での再構成アルゴリズムの安定性を調べた。ノイズはメルセンヌツイスター[8]で生成し、センサデータの各成分に加えた。ノイズレベルは重力 g に対する百分率で表す。

図 8 に推定誤差の平均値と標準偏差を示す。ここで推定誤差は、最小自乗法によってモデル形状に再構成形状を重ね合わせて計算した、対応する格子点同士の距離である。1,960 サンプル（196 格子点 × 10 試行）を用いて算出した。再構成結果を観察したところ、推定誤差が格子構造全体の一辺の 5 %を超えると、再構成結果が大きく崩れているように見えた。図 8 によると、推定誤差が 5 % を超えるのはノイズレベルが 5 %（加速度換算 0.5 m/s^2 程度）より大きいときである。よって、ノイズレベルが 5 % 以下ならば 3DCS は安定して動作すると期待できる。これは実際のデバイスにおいても達成可能な値であると考えられる。

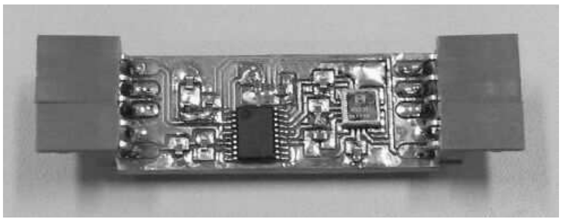

Fig. 9 Sensor chip (14×38 mm^2).

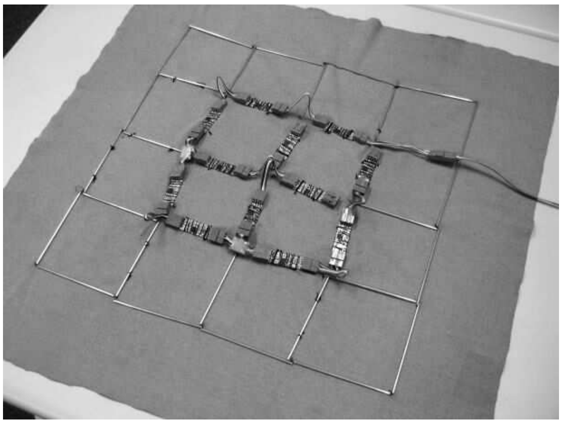

Fig. 10 Prototype of 3DCS (60×60 cm^2). Each link is 10 cm in length. There are the 12 sensor chips.

5. 試作・実験

5.1 試作機

試作したセンサチップを図 9 に示す。三軸加速度センサ（AGS61231、松下電工）と、そのアナログ出力を 10 bit A/D 変換するマイコン（R8C/16、Renesas Technology）を搭載している。このマイコンは I^{2}C バス通信機能を持ち、ディジタル化されたセンサデータを PC へ送信する。センサチップの大きさは幅 14 mm、長さ 38 mm であり、リンクの役割も果たす。

このセンサチップを用いて、試作機を製作した（図 10）。一辺 60 cm の布に長さ 10 cm のリンク（真鍮パイプ、直径 2 mm、内径 1 mm）で 4 × 4 格子を構成し、その内部の 2 × 2 にセンサチップを 12 個配置した。それらからセンサデータを受信し、共役勾配法[7]によって式(7)の最小化問題を解き、再構成結果をディスプレイに表示した。システム全体の実効的なサンプリングレートは 58 Hz であった。

5.2 動作実験１：平面の場合

試作機を平面に貼り付け、全体を一様に傾けた場合の動作を確認した（図 11）。センサチップを載せた 2 × 2 の格子が再構成できていることがわかる。角度誤差は 5° 程度、格子点の平面形状からの誤差は 7 %（一辺 200 mm に対して 14 mm）程度であった。これはセンサチップの取付け誤差をソフトウェアで補正しきれていないことが主な原因と考えられる。

5.3 動作実験２：球面の場合

試作機を球体（直径 23.2 cm）に載せたときの結果を図 12 に示す。この場合にも 2 × 2 格子を再構成することができた。

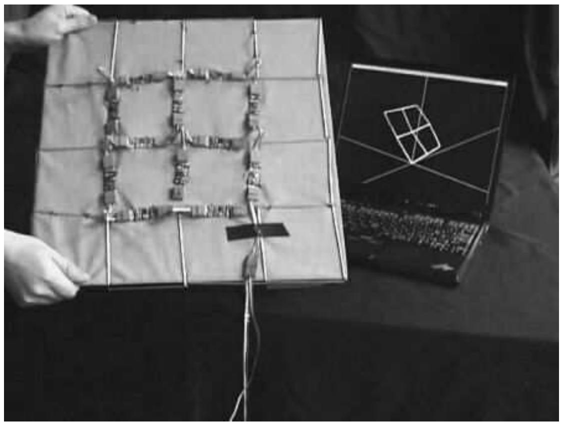

Fig. 11 Demonstration I : flat plate.

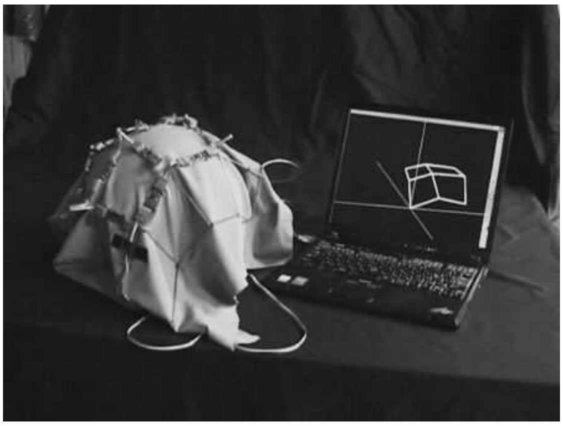

Fig. 12 Demonstration II : sphere.

6. おわりに

本稿では物体の三次元形状を計測する柔軟な新デバイス 3DCS を提案した。シート内部の格子構造の各リンクに配置された三軸加速度センサによって重力ベクトルを計測し、その情報をもとにシート全体の形状を再構成する。シミュレーションと試作機によりその原理を検証した。

今後さらに布に近いデバイスを目指し、LSI などを用いてセンサチップを小型化する。また多数のセンサチップへの給電やデータ通信は、二次元通信技術[3]によって行なうことを考えている。これにより煩雑な配線が不要となり、実用的な 3DCS を実現することができる。

文　献

[1] 谷田貝豊彦, 第二版 応用光学 光計測入門, 丸善株式会社, 2005.

[2] O. Brand, "Microsensor Integration into Systems-on-Chip," Proc. IEEE, vol. 94, no. 6, pp. 1160-1176, 2006.

[3] 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, vol. 46, no. 2, pp. 98-103, 2007.

[4] 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, pp. 464-465, 2006.

[5] J. Lee and I. Ha, "Real-Time Motion Capture for a Human Body Using Accelerometers," *Robotica*, vol. 19, pp. 601-610, 2001.

[6] N. Miller, O. C. Jenkins, M. Kallmann, and M. J. Mataric, "Motion Capture from Inertial Sensing for Untethered Humanoid Teleoperation," *Proc. Humanoids 2004*, vol. 2, pp. 547-565, 2004.

[7] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing Second Edition*, Cambridge University Press, 1992.

[8] M. Matsumoto and T. Nishimura, "Mersenne Twister: A 623-Dimensionally Equidistributed Uniform Pseudorandom Number Generator," *ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation*, vol. 8, no. 1, pp.3-30, 1998.