

重力・地磁気計測メッシュによる三次元形状復元

○星 貴之 (東京大学)

篠田 裕之 (東京大学)

3D Shape Reconstruction Based on Gravity-Geomagnetic Sensor Mesh

○Takayuki Hoshi (The University of Tokyo)

Hiroyuki Shinoda (The University of Tokyo)

In this paper, 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. It contains a lattice (mesh) structure inside of the sheet, and each link of the structure has a sensor chip consisting of a triaxial accelerometer and a triaxial magnetometer. The sensor chip measures the gravity and the Earth’s magnetic field to obtain the link posture. After all the link postures are obtained, the whole shape is reconstructed by combining them. Furthermore, magnetic disturbance is corrected by utilizing a constraint originating from the lattice structure.

keywords: Sensor network, 3-dimensional configuration, Flexible sensing device

1. はじめに

我々にとって布という素材は非常に身近なものであり、布に何らかの電子的な機能を付与するという研究はウェアラブルコンピューティングの分野において多く報告されてきた [1]-[3]。初期の段階では、いくつかのセンサを組み込む程度であった。近年、センサの微小化を可能にする CMOS-MEMS 技術 [4] の発達と、配線なしでそれらのセンサへの給電と通信を可能にする二次元通信技術 [5] の開発により、布上に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。このことは新しい柔軟デバイスの可能性を拓く。例えば文献 [6] では前腕の筋電をパターンとして取得するリストバンド型インタフェースが提案されている。

そのような技術的背景にもとづき、我々は新たな布状デバイスを提案する。それは自身の形状をモニタリングする柔軟なシート（三次元キャプチャシート、3DCS）である。布の三次元形状計測は、これまで光学的手法によって行われていた。例えばステレオカメラ [7] や布上に印刷した既知のパターン [8]、構造化光投影 [9] などによるものである。それらの方法はカメラや光源を必要とするため、作業空間が制限され、また障害物に弱い。布の特性として自己遮蔽が起りやすいことも問題となる。一方、3DCS は布自身がデバイスであるため、どこでも簡易に布形状を計測できる。応用としては、バーチャル物体表面を変形させる 3D モデリングツール、対象を直接形状や大きさを計測するデバイス、柔軟体の表面変位にもとづく触覚センサ [10]、モーションキャプチャスーツなどが考えられる。

3DCS の実現法について述べる。図 1 に 3DCS の内部構造を示す。シートは格子構造によって離散化されており、各リンクには三軸加速度センサ及び三軸磁気センサが取り付けられ

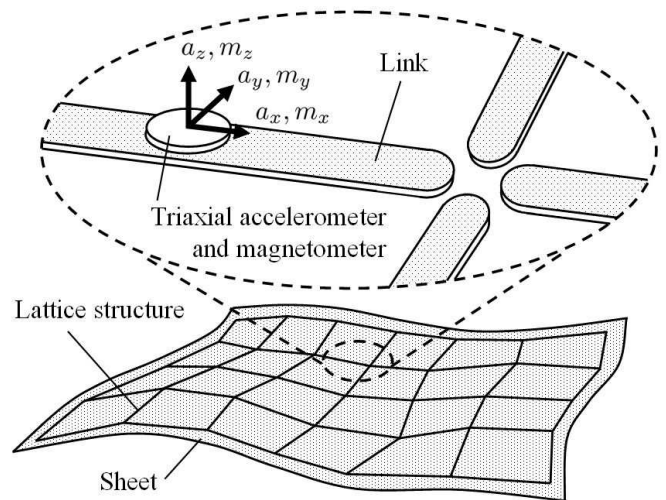


Figure 1. Illustration of the 3DCS.

ている。それらが計測した重力と地磁気からリンクの三次元空間中での姿勢が求められる。全リンクの姿勢がわかれば、全体形状を再構成することができる。運動加速度を積分する方法では誤差が時間的に蓄積する問題があるが、提案する方法はある瞬間のデータのみにもとづくのでそのような問題は生じない。また、重力と地磁気は地球上のどこでも利用することができる。

これまでに、我々は重力のみにもとづく 3DCS を報告している [10]-[11]。それは多くの場合において動作するが、劣決定に陥る場合が存在するものであった。そこで我々は地磁気を追加した新たなアルゴリズムを考案した。重力と地磁気の両方を用いた姿勢計測はモーションキャプチャの分野で報告されており [12]-[13]、我々はこれを 3DCS に応用する。

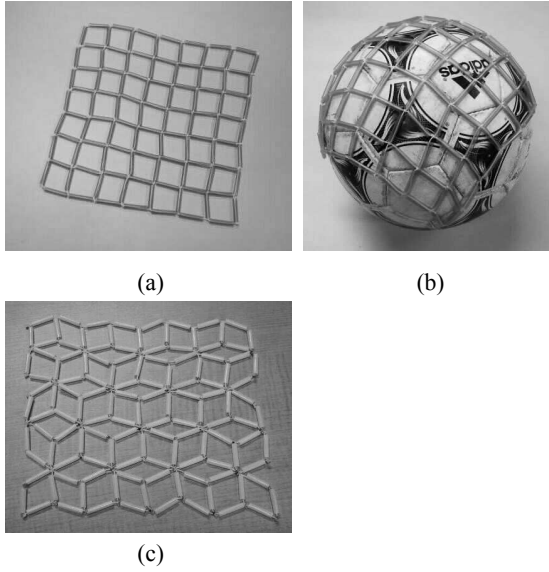


Figure 2. (a) Lattice model made of rigid tubes combined with strings (7×7 lattice consisting of 2.5 cm links). (b) The lattice can be mounted on a smooth curved surface. For example, here it covers the ball. (c) The omni-directional lattice structure.

本稿では3DCSの構造と計測原理を述べ、シミュレーションによる検証結果を示す。また、現在製作中のセンサチップについて説明する。

2. 三次元キャプチャシート

2.1 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。複数のリンクが格子(メッシュ)構造をなすようにシートに固定され、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軸はリンク長軸方向と一致している。これらのセンサは重力加速度と地磁気を計測し、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。

図2(a)にストローと糸で作ったモデルを示す。一般の織物と同様、伸縮は格子構造の対角線方向に生じる。図2(b)に示すように、このモデルは曲面に沿って変形することができる。また、図2(c)のようにリンクを組むことで全ての方向に伸縮する構造も可能である。

2.2 問題設定

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いとする。磁気についても地磁気が支配的であるとする。重力ベクトルと地磁気ベクトルは地球上の位置によってある角度(伏角 θ [rad])をなすが、ここでは直交していると仮定する(図3)。実際の場合については2.3節の後半で述べる。

重力ベクトルと逆向きの方向をz軸、地磁気ベクトルの方向をx軸とするようにワールド座標を定義する。加速度センサ

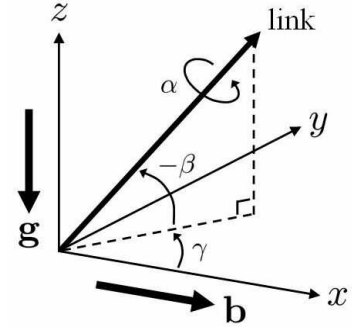


Figure 3. World coordinate and posture angles.

座標 $\{a_x, a_y, a_z\}$ 、磁気センサ座標 $\{m_x, m_y, m_z\}$ とワールド座標 $\{x, y, z\}$ の各軸は初期状態で一致しているとする。

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] ($-\pi \leq \alpha < \pi$, $-\pi/2 \leq \beta \leq \pi/2$, and $0 \leq \gamma < 2\pi$) で記述される(図3)。加速度センサと磁気センサが計測した重力ベクトルと地磁気ベクトルから各リンクの姿勢を求め、全リンクの姿勢を積み重ねて3DCS全体の形状を再構成する。2.3章ではリンクの姿勢の求め方について説明する。

2.3 姿勢角の算出法

ワールド座標からセンサ座標への回転行列 $\mathbf{G}_{\gamma\beta\alpha}$ は、リンクの姿勢角を用いて次のように書かれる。

$$\mathbf{G}_{\gamma\beta\alpha} \equiv \begin{bmatrix} c\gamma & -s\gamma & 0 \\ s\gamma & c\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha & -s\alpha \\ 0 & s\alpha & c\alpha \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} c\gamma c\beta & c\gamma s\beta s\alpha & -s\gamma c\alpha & c\gamma s\beta c\alpha & +s\gamma s\alpha \\ s\gamma c\beta & s\gamma s\beta s\alpha & +c\gamma c\alpha & s\gamma s\beta c\alpha & -c\gamma s\alpha \\ -s\beta & c\beta s\alpha & & c\beta c\alpha & \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここでsとcはそれぞれsinとcosを表す。 $\mathbf{G}_{\gamma\beta\alpha}$ の各列は、回転後のセンサ座標の各軸をワールド座標で記述したものである。よって加速度センサの出力 $\mathbf{a} = [a_x, a_y, a_z]^T$ は、 $\mathbf{G}_{\gamma\beta\alpha}$ の転置と重力ベクトル $\mathbf{g} = [0, 0, -g]^T$ の積として次のように書かれる。ここで g [m/s²] は重力加速度である。

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

同様に磁気センサの出力 $\mathbf{m} = [m_x, m_y, m_z]^T$ は、 $\mathbf{G}_{\gamma\beta\alpha}$ の転置と地磁気ベクトル $\mathbf{b} = [b, 0, 0]^T$ の積として次のように書かれる。ここで b [T] は地磁気の強度である。

$$\mathbf{m} = \mathbf{G}_{\gamma\beta\alpha}^T \mathbf{b} = b \begin{bmatrix} c\gamma s\beta \\ c\gamma s\beta s\alpha - s\gamma c\alpha \\ c\gamma s\beta c\alpha + s\gamma s\alpha \end{bmatrix} \quad (3)$$

(2)、(3)式を解くことにより、 α 、 β 、 γ が得られる。これらは重力加速度 g と地磁気の強度 b についての知識がなくても解くことができるので、今後、センサ出力は規格化して用いるものとする。

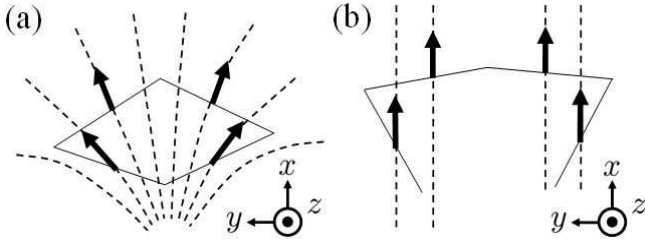


Figure 4. (a) Lattice unit in a disturbed magnetic field and (b) the estimated shape based on the parallel assumption. The dotted lines represent the magnetic field lines.

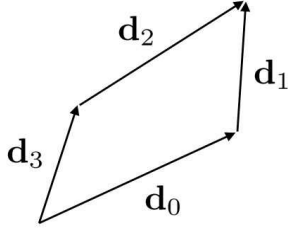


Figure 5. Lattice unit. Directional vectors form a closed-loop.

2.2節で述べたように、実際の地磁気ベクトルは（赤道以外の地域で）重力ベクトルと直交せず、伏角 θ をなす。従って次の計算により、磁気センサ出力 \mathbf{m} から加速度センサ出力 \mathbf{a} と平行な成分を除去し、得られた垂直成分 \mathbf{m}' を \mathbf{m} の代わりに用いる。

$$\mathbf{m}' = \mathbf{m} - \left(\mathbf{m} \cdot \frac{\mathbf{a}}{|\mathbf{a}|} \right) \frac{\mathbf{a}}{|\mathbf{a}|} \quad (4)$$

ヨー角 γ は $\mathbf{m}' \neq \mathbf{0}$ であれば求めることができる。またこの計算は伏角 θ についての知識を必要としない。

センサ出力の直交化と規格化により、前述のアルゴリズムは 3DCS 全体に加わる一様な運動加速度がある場合へ拡張される。すなわち重力加速度ベクトルー運動加速度ベクトルの方向が新しい「下方向」となる。そのとき 3DCS は、ワールド座標における絶対位置のみならず、上下方向も不定として、3DCS 自身の形状のみを測るデバイスとなる。

2.4 外乱磁場に対する補正

地磁気は微弱であるため（東京で $m' \approx 30 \mu\text{T}$ ）、磁石、コイル、強磁性体などによって容易に乱される。2.3節では一様な地磁気を暗に仮定しているので、外乱がある場合にはヨー角の推定値は大きく誤ってしまう（図4）。

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すると、ヨー角の推定値を補正できると考えている。ここで、四角形をなす4本のリンクに着目する（図5）。それらのリンクの方向ベクトル \mathbf{d}_i (i はリンクの番号) は閉ループをなしているので、次のような拘束式が成り立つ。

$$\mathbf{d}_0 + \mathbf{d}_1 = \mathbf{d}_3 + \mathbf{d}_2 \quad (5)$$

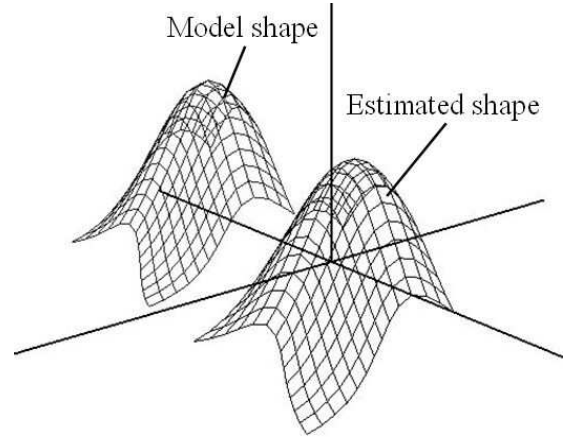


Figure 6. Simulation results for a Gaussian shape. The far and the near plots are the lattice model and the estimated shape, respectively.

$$\mathbf{d}_i \equiv \mathbf{G}_{\gamma_i, \beta_i, \alpha_i} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\gamma_i & c\beta_i \\ s\gamma_i & c\beta_i \\ -s\beta_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

(5) 式の解 γ_i を、(3) 式から初めに推定さ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。この方法は可解性や唯一性について未確認である。今後、磁場の連続性などの条件が追加される可能性もある。

3. シミュレーション

3.1 モデル生成と計算法

シミュレーションによって、提案手法の有効性を確認した。3DCS のモデルとして 13×13 の格子構造を用いた。各リンクは長さ 2 cm の剛体とし、格子点まわりに自由に回転できるようにした。そのモデルを仮想物体の上に被せ、モデル形状とした。被せる操作は反復計算によって行い、各リンクの姿勢から加速度センサ、磁気センサの出力を計算した。

得られたセンサ出力を用いて、2章で提案したアルゴリズムを用いて形状再構成を行った。(2)、(3) 式を解いて α 、 β 、 γ を求めた。ヨー角の再推定のため、(5) 式を (7) 式のような最小化問題に書き換えた。

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

ここで j はワールド座標の軸を表す。 P の最小値が 0 となるとき、(7) 式の解は (5) 式の解でもある。これを (3) 式から得られた γ_i を初期値として、共役勾配法 [14] によって解いた。得られた γ_i を、もっともらしい推定値として用いた。

3.2 形状再構成

まずノイズなし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。シミュレーション結果を図6に示す。ガウシアン形状が再構成できていることがわかる。

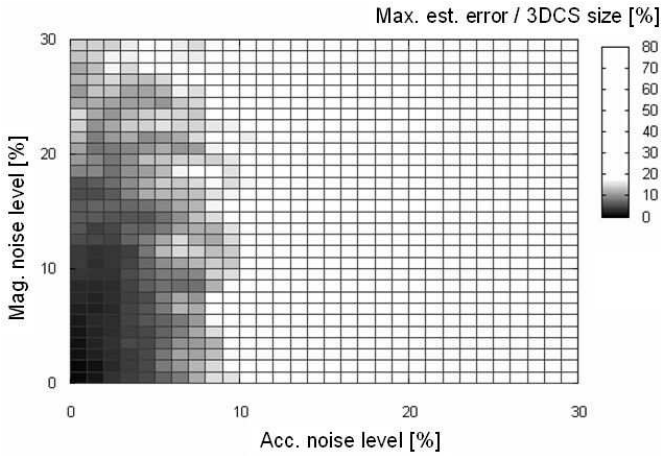


Figure 7. Simulation results on effect of noises. The worst cases of the maximum estimation error, i.e. the envelope of the error plot, are shown (10 trials per each noise level). The area where the maximum estimation error is lower than 15% is colored deeply.

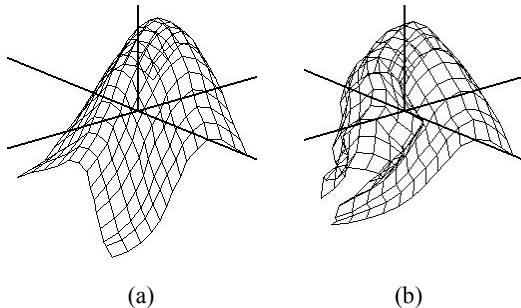


Figure 8. Examples in the cases of (a) 5% acc. and 20% mag. noises, and (b) 10% acc. and 20% mag. noises.

3.3 センサデータにノイズを加えた場合

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）、格子点での連結状態による実効的なリンク長の変動、時間的に変動する磁場源、運動加速度、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。メルセンヌツイスター [15] でランダムノイズを生成し、センサデータの各成分に加えた。ノイズレベルは、重力加速度 g と地磁気 b に対する百分率で表す。

図 7 に 10 試行での最大推定誤差を示す。ま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。これは再構成アルゴリズムの安定性を示す指標となる。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。従って図 7 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。これは実際のデバイスにおい

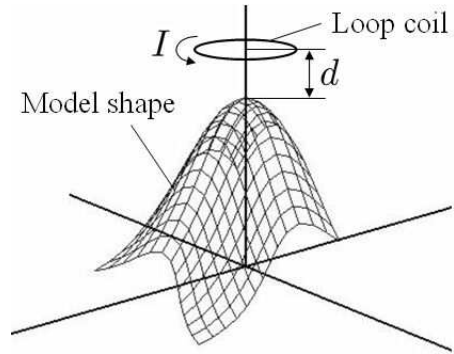


Figure 9. Simulation setting with a single-loop coil. The diameter is 10 cm and the current I is 10 A.

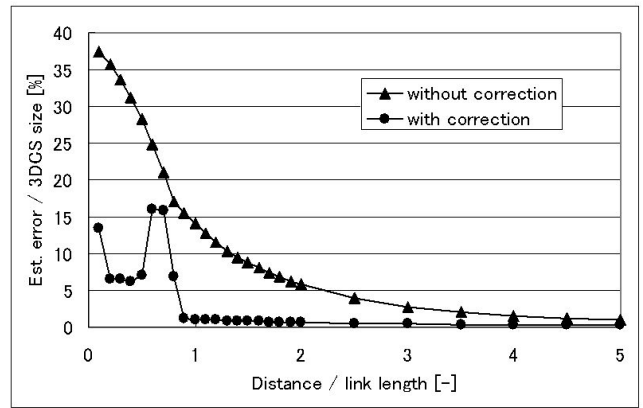


Figure 10. Simulation results on effectiveness of the correction algorithm. The horizontal axis is the distance d , normalized by the link length l , between the coil and the 3DCS.

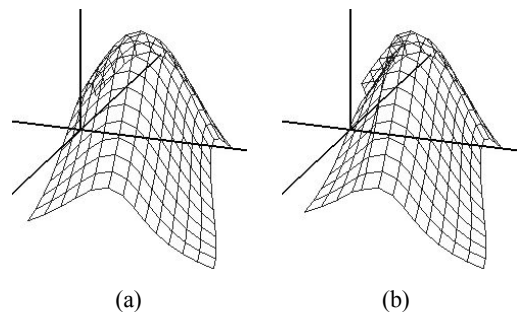


Figure 11. Examples in the cases with correction. (a) $d/l = 0.9$ (error = 1.1%) and (b) $d/l = 0.8$ (error = 6.9%).

ても達成可能な値であると考えられる。再構成が成功した場合と失敗した場合の代表的な例を図 8 に示す。

3.4 磁場源を近づけた場合

次に、補正アルゴリズムの効果を確認した。図 9 に示すように、x-y 平面に平行に置いたループコイルを磁場源とし、3DCS との距離 d [m] を変化させてそのときの推定誤差を記録した。コイルは直径 10 cm、電流 10 A とした。コイルから発生する磁場はビオ・サバル則を Romberg 積分 [14] によって数値積分して求めた。

図 10 に、距離 d に対する推定誤差の変化を示す。 d はリン

ク長さ l [m] で規格化してある ($l = 2$ cm)。ランダム性がないので、各距離に対して 1 試行ずつ行った。

結果から、補正アルゴリズムを用いた場合にはコイルが 1.8 cm ($d/l = 0.9$) まで近づいても再構成できることがわかる。そのときの推定誤差は 1.1% (2.9 mm 程度) である。補正アルゴリズムのない場合、同程度の推定誤差は $d = 9$ cm ($d/l = 4.5$) のときである。補正アルゴリズムが効果的に働いていることがわかる。再構成が成功した場合と失敗した場合の代表的な例を図 11 に示す。

4. 実装

現在、重力・地磁気にもとづく 3DCS 試作機用のセンサチップを製作中である。用いるセンサチップは 6 軸モーションセンサ (AMI601、アイチマイクロインテリジェント社製) を予定している。大きさ 5.2×6.0 mm² の小型センサであり、加速度と磁気をそれぞれ 3 軸で計測する。このセンサは I²C バス通信でデジタル出力するものであるが、製品固有のアドレスがあらかじめ設定されているため同一バス上に複数個を配置することができない。したがって I²C 端子を 2 ch 持つマイコン (PIC18F45J10-I/ML、マイクロチップ社製) をアドレス変換のため搭載する。これにより、センサチップはすべて同一バス上に配置され、ホストコンピュータに重力・地磁気データを送信することができる。

5. 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と三軸磁気センサによって重力と地磁気を計測し、その情報をもとにシート全体の形状を再構成する。シミュレーションによりその原理を検証した。また、現在製作中のセンサチップについて説明した。

将来的には、さらに布に近いデバイスを目指し、カスタム LSI などによっ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 [5] 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。

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] E. R. Post and M. Orth, "Smart fabric, or "wearable clothing"," Proc. 1st IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC '97), pp. 167-168, 1997.
- [2] J. Farrington, A. J. Moore, N. Tilbury, J. Church, and P. D. Biemond, "Wearable sensor badge and sensor jacket for context awareness," Proc.

- 3rd IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC '99), pp. 107-113, 1999.
- [3] T. Linz, C. Kallmayer, R. Aschenbrenner, and H. Reichel, "Embroidering electrical interconnects with conductive yarn for the integration of flexible electronic modules into fabric," Proc. 9th IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC '05), pp. 86-91, 2005.
- [4] O. Brand, "Microsensor integration into systems-on-chip," Proc. IEEE, vol. 94, no. 6, pp. 1160-1176, 2006.
- [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," 計測と制御, vol. 46, no. 2, pp. 98-103, 2007.
- [6] Y. Makino, A. Okada, and H. Shinoda, "Measuring myoelectric potential patterns based on two-dimensional signal transmission technology," Proc. SICE Annual Conference 2006, pp.2005-2009, 2006.
- [7] V. Scholz and M. Magnor: Multi-view video capture of garment motion, Proc. IEEE Workshop on Content Generation and Coding for 3D-Television, pp. 1-4, 2006.
- [8] R. White, A. Lobay, and D. Forsyth, "Cloth capture," UC Berkeley Technical Report No. UCB/CSD-5-1387, 2005.
- [9] P. Fong and F. Buron, "High-resolution three-dimensional sensing of fast deforming objects," Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2005), pp. 1606-1611, 2005.
- [10] 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.
- [11] 星貴之, 尾崎沙世, 篠田裕之, "三次元形状計測シート," ロボティクス・メカトロニクス講演会 2007 (ROBOMECH2007) 講演論文集, 1A2-A09(1-4), 2007.
- [12] J. Lee and I. Ha, "Real-time motion capture for a human body using accelerometers," *Robotica*, vol. 19, pp. 601-610, 2001.
- [13] D. Fontaine, D. David, Y. Caritu, "Sourceless human body motion capture," Proc. Smart Objects Conference (SOC '03), 2003.
- [14] 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.
- [15] 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.