

# 静電容量センサアレイによる 二次元通信におけるセンサノード位置計測

○中妻 啓、 落合 和樹、 篠田 裕之 (東京大学)

## Sensor Node Localization in Two-Dimensional Communication using Capacitance Sensor Array

○Kei Nakatsuma, Kazuki Ochiai, and Hiroyuki Shinoda (The University of Tokyo)

Abstract: Recently, there has been great interest in device localization in fields of sensor networks, ubiquitous computing, and HCI (human-computer interaction). We have developed a localization method on the Two-Dimensional Communication (2DC) sheet which is an environment to provide both communication and power supply simultaneously. Our method is based on capacitance pattern sensing. In this paper, we introduce our method of localization, especially development of a capacitance sensor array and sensing data processing. We also show a fundamental localization result using our method.

### 1. はじめに

位置は時間と並び、物事の物理的状態を記述する上で極めて重要な情報である。多くのセンサ情報が、どこで、いつ測定され得られたものであるかという基本情報抜きには意味をなさない。特に計測が個別のセンサにより独立に行われるのではなく、複数のセンサにより同時に行われるセンサネットワークでは各センサノードの位置を正確に知ることが計測の質を保つ上で欠かせない ([1])。また、ユビキタスコンピューティングなど状況に応じたインターフェースやサービスの提供を目指す技術でも、人やモノの位置情報はそれらの状況を推測する上で重要な手掛かりとなる。

我々は、信号・電力の無配線伝送を実現する二次元通信環境においてセンサノードをはじめとするユビキタスデバイスの高精度な位置及び回転角検出の方法について研究を行っている。

二次元通信(Two-Dimensional Communication, 2DC)では特殊な構造を持つ薄いシートに局在したまま 2 次元的に伝播する電磁波を用いて、シートに接するネットワークノード間での高速通信およびワイヤレス電力伝送を行う (図 1)。各ノードはケーブル等の拘束を受けことなく信号伝送と同時に電力供給を受けることができる。そのため、二次元通信を利用したセンサネットワークでは一度センサをシート上に配置すればバッテリー消費を気にする必要はなくなる。

本研究はすでに通信、電力伝送が可能な二次元通信環境に、デバイスがシート上の自己位置及び回転角を取得可能なセンサと計測環境を提供する。センサノードやその他のデバイスは位置取得センサを取り付けるだけでシート上の自己位置を取得できるようになる。



図 1 二次元通信の動作デモの様子。画像中の 2 台の PC はシートを介して通信を行い動画データの読み込み、表示を行っている。また、LED、スピーカなどのデバイスは画像上部のマイクロ波発振器からシートを介して電力供給を受け動作している。通信・電力伝送は全て特別なケーブルを介してシートと直接の電氣的接触なしに行われる。

本稿ではまず主な位置検出技術の紹介をした後、提案手法の概要を述べる。その後提案手法について詳細を述べ、実験結果、課題と展望について述べる。

### 2. 先行研究例

位置検出技術は GPS に代表される屋外位置検出と、屋内位置検出に大別される。屋外位置検出は GPS の他に WiFi アクセスポイントや携帯電話基地局からの電波を用いたシステムなどが存在する [2]。一方、衛星や基地局からの電波が届きにくい屋内では独自の方法が検討されている。

研究の初期には Active Badge システム ([3]) など超音波を用いて室内の人やモノの位置の取得を目指した

システムが提案された。近年では IEEE802.11 (WiFi)や携帯電話が一般的になってきており、電波強度を用いた位置検出の研究例も報告されている ([4])。さらに家庭内の電源線からの信号を用いる手法 ([5]) なども検討されている。これらは主に屋内の人やモノの活動を測定することで、それらの状況に応じたコンピュータやネットワークとのインタラクションを行うことを目的とするユビキタスコンピューティングへの応用を狙っている。こうした分野では求められる位置測定精度は数メートル程度であることが多い。

一方、デバイスの位置を取得しモノを用いたコンピュータとのインタラクションを目指すシステムも近年盛んに研究がなされている。Microsoft Surface [6], Data Tiles [7], IncreTable [8]などはいずれもディスプレイ上に置いたオブジェクトの位置を認識して何らかのインタラクションに利用するシステムである。こうしたインターフェースへの位置計測の応用では、数 mm 以下の高い精度の測定が求められる。

我々の目指す 2 次元的な面を用いて通信や電力取得の環境を提供すると同時に、その面上でデバイスの位置取得を行うシステムは、これまでに述べたセンサネットワークを含む室内規模のユビキタスコンピューティング、卓上で用いられるインターフェースどちらの応用にも適用可能である。そのため、同様のコンセプトを持つ研究例として、Networked Surface [9], Pushpin Computing [10], Pin&Play [11], Magic Surface [12]などが提案されている。

我々が提案する手法もユビキタスコンピューティング、インターフェースどちらの応用にも適用することを考え以下の 3 つの仕様を目標として開発を行った。

- 一意に位置・方向を計測可能な範囲：10 m × 10 m 以上
- 位置・方向計測デバイスのサイズ：10 cm × 10 cm 程度
- 位置計測の制度：1 mm 程度

### 3. システム構成

我々の提案する位置検出システムは

- 位置 (座標) 情報のコードされた二次元通信シート
- 位置取得センサ

の 2 要素から構成される。我々のシステムはデジタルペンシステム Anoto Pen ([13])のペン先位置検出システムを参考に設計されている。Anoto Pen システムは微細なドットパターンの印刷された紙を用いる。ドットパターンは紙面上の座標情報がコードされている。ペン

に内蔵されたカメラがこのパターンからペン先の位置を同定し、内蔵メモリにその軌跡を保存したり PC に情報を伝送したりする。

我々のシステムでは、通常の信号・電力伝送機能を持つ二次元通信シートにシート上の座標情報をビットパターンとしてコードすることで、Anoto Pen における紙と同等の機能を持たせる。シート上のビットパターンは 2 種類の導体を用いたマーカを 2 次元的に配置することで実現される。

この導体マーカによるビットパターンを読み取るための位置取得センサとして、我々は静電容量センサアレイを開発した。このセンサアレイは、微小な静電容量センサが 2 次元的に配列されている。センサがシート上に置かれたとき、アレイを構成する個々のセンサが測定する静電容量値はセンサ直下の導体の有無により変化する。センサが取得した静電容量分布からセンサの置かれた領域に導体マーカにより描かれたビットパターンを復元し、コードされた座標情報を抽出する。この座標情報はシートを大まかな間隔で区切った時の座標であるが、さらにビットパターンとセンサ自身との位置・方向関係を読み取ったパターンから推定することでより高精度にセンサの座標、回転角の計測を行う。

位置情報を持つマーカの読み取りにより位置検出を行う手法はすでに先行研究があるが[14]、我々の提案手法の特徴はマーカの読み取りにカメラ等の光学的な方法を用いない点にある。電磁気的現象を用いてマーカを読み取ることで、実空間で多く発生する光学的な遮蔽に対しロバストな手法である。なお金属など電磁気的な遮蔽を本手法では想定していない。これは、このような遮蔽は 2DC シート上の通信・電力取得も同時に阻害しデバイス自体が機能しないためである。

一方、本手法では光学的な手法と異なりレンズ等が使えないため、ある領域の位置情報パターンを取得するためにはその領域内を静電容量センサでスキャンするか、領域を完全に覆う大きさのアレイを用意する必要がある。今回我々はセンサアレイを用いる方法を選択した。この場合、アレイの大きさは取得できる情報量すなわち、センサが一意に自己位置を導体可能なシートの面積に依存して決まる。次節でこの関係についての具体例を述べる。

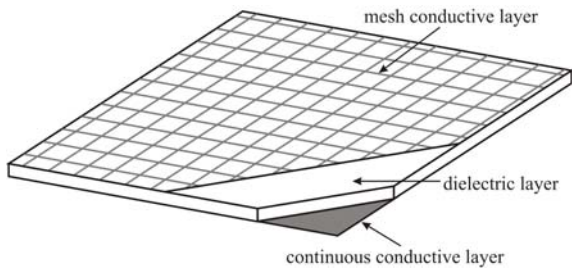


図 2 二次元通信シートの構造。最下部が導体層、中間層が誘電体層であり最上部はメッシュ格子構造を持つ導体層である。通信・電力取得をシート上で行うデバイスは最上部のメッシュ導体層上に置かれる。

#### 4. 二次元通信シート上の位置情報パターン

二次元通信シートは3層からなる厚さ2 mm程度のシートである。この3層は下から導体層、誘電体層、メッシュ導体層である。なお、上下導体層の表面には保護層として絶縁体フィルムが存在する。我々は位置情報をコードするため最上部メッシュ導体層の格子構造を利用する。

メッシュ導体層の格子構造は1 mm幅の導体線による7 mm間隔の格子である(図2)。我々はこの格子の1マスに1 bitの情報を付与し、座標情報を複数のマスを使った2次元ビットパターンとしてシート上にコードする。

各マスのビット情報の識別には図3に示す2種類の形状の導体パターンをマーカーとして用いる。すなわち、あるマスの導体パターン形状が図3右であればそのマスに付与されたビット情報は1、左の形状であれば0である。本稿ではビット情報1のマスを **marked block**, 0のマスを **plain block** と呼ぶ。

この2種類の形状はシートの持つ信号・電力伝送特性に影響を与えないよう設計がなされている。シート内を伝搬する電磁波とシート上に置かれたデバイスの持つ通信・電力取得用のカプラの間の相互作用はシートの持つインダクタンスに影響を受ける([15])。 **Marked block**, **plain block** の形状はそれぞれの持つインダクタンスが同程度となるよう形状パラメータを調節してある([16])。これにより位置情報を付与したシートにおいても従来の二次元通信シートと同じ通信・電力伝送環境が提供される。

また、**marked block**, **plain block** の配置による座標値のコーディングには我々が考案したビットパターンのコーディング則を用いている。コーディング則については[16]に詳細が述べられている。図4は我々のコーディング則を用いたシートの各マスへのビット情報の配置例である。この図に示すように、我々は数マス角の正方形領域を **Unit** と名付け、この **Unit** 内に1組の(x, y)

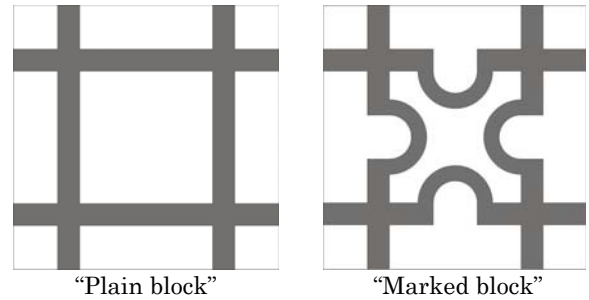


図3 二次元通信シートに位置情報をコードする際に用いるビット情報マーカー。図2に示すシートのメッシュ格子構造の各マスに **plain block**, **marked block** のいずれかの形状を割り当て、その2次元配置により2次元ビットパターンを構成する。

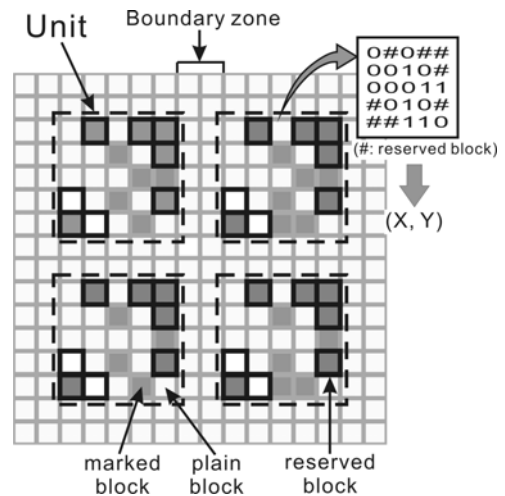


図4 図3の **plain block**, **marked block** を配置しシート上の(x, y)座標をコードするアルゴリズムの実際の配置例。

座標値をコードする。各 **Unit** は我々が **Boundary zone** と呼ぶ **plain block** のみで構成される2マス分の領域により隔てられる。**Unit** 内には **Unit** の方向、領域を指示するためビット配置が共通となっているマスが存在する。これは **reserved block** と呼ぶ。**Reserved block** 以外のマスは、設計する際に自由に決めたコーディング則に従い座標値をコードできる。

コードの読み取りの際は1つの **Unit** が完全にセンサの測定領域に含まれる必要はない。少なくとも1つの **Unit** と **Boundary zone** を合わせたマス数を1辺とする正方形領域が読み取れていれば、測定領域内に含まれる **Unit** の断片から1つの **Unit** 内のビット配置を復元することが可能であることを確認している。センサが回転することも考慮すると必要な読み取り領域は、**Unit** の1辺のマス数が5、**Boundary zone** のマス数が2、1マスの大きさが7 mm四方のとき、6.9 cm角でよい。またこのときセンサが自己位置を一意に同定できるシートの領域は17.7 m四方である。第2節で述べた我々の3つの設計目標のうち10 m四方以上のシート上で10 cm角以下

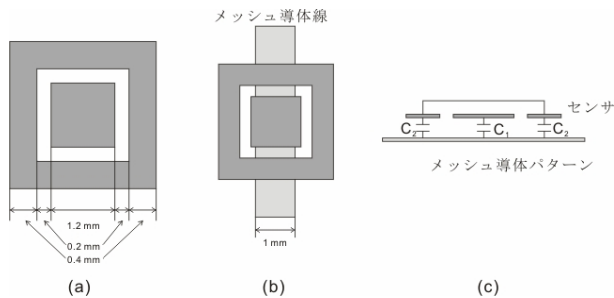


図 5 シートに描かれた導体パターンを読み取るセンサ構造。(a)が提案する静電容量センサ構造。内側導体パッチとそれを取り囲む導体間の静電容量を測定する。センサがシートの導体パターン上にあるとき(b)は、(c)のようにキャパシタが形成され、この静電容量値が測定される。

のサイズのデバイスによる一意の位置同定という 2 つの項目は満たされる。

## 4. 位置情報計測

### 4.1 静電容量センサアレイ

第 3 節で述べたように、位置・方向情報は plain block, marked block という 2 種類の形状のマス配置により 2 次元ビットパターンとしてシート上に存在する。我々は、シートのメッシュ導体層の導体パターンを静電容量パターン計測により読み取ることで、所望のビットパターンを取得する計測手法を用いる。我々が用いるセンサ構造を図 5 に示す。一つの静電容量センサは、正方形導体のパッチの周囲を導体を取り囲む構造を持つ。計測はこの 2 つの導体部の間で静電容量を測定することで行う。このセンサがシートの導体パターン上に乗ると(図 5(b))、センサと導体パターン間に容量が形成される(同(c))。これより、シート上の導体パターンのある場所と無い場所で測定される静電容量値に差が生じる。これを利用して、シート上の導体パターンを読み取る。

図 6 に試作した静電容量センサアレイを示す。このセンサアレイは、 $32 \times 32 = 1024$  チャンネルのセンサが 2.2 mm 間隔で配置されている。アレイ全体の測定領域は 70.4 mm 角である。これを用いてシート上の導体パターンを測定し、ビットパターンの抽出を行った。結果を図 7 に示す。

### 4.2 測定データ処理

上記の静電容量センサアレイにより測定した静電容量パターンから所望のビットパターンを抽出するためにはデータを適切に処理する必要がある。

我々が取得したデータは 2 次元配列であるため、これを画像として扱いビットパターンを抽出するアルゴリズムを開発した。開発は MATLAB で行った。アルゴ



図 6 製作した静電容量センサアレイ。アレイ下部の基板下面に図 5 に示す個々の静電容量センサが  $32 \times 32 = 1024$  チャンネル配置されている。各センサはアレイの上部に垂直に並べられた基板へと接続される。この基板には静電容量測定回路が実装されている。

リズムは主に以下の部分から構成される。

1. センサの回転角検出
2. 測定パターン中の各マスの位置の同定
3. 各マスのビット情報の判定
4. ビットパターンからの位置情報の抽出

#### 4.2.a 回転角検出

測定パターン内にはメッシュ線による強弱パターンが回転角に方向に沿って規則的に見られる(図 7(b))。回転角検出にはこの特徴を利用する。

測定パターンを 2 次元フーリエ変換するとメッシュ線による強弱パターンの角度方向にピークが出現する。このピーク点が軸となす角度を回転角とする。なお、ここで得られる検出角  $\theta$  は  $0^\circ \sim 90^\circ$  の範囲にあるが実際の回転角は  $0^\circ \sim 360^\circ$  であるため、センサの真の回転角は  $(\theta + 90 \times n)^\circ$  となる。ここで  $n$  は 0 から 3 の整数である。真の回転角についてはビットパターンに含まれる Unit 内の reserved block の配置から判定することができる。

#### 4.2.b 各マスの位置の同定

回転角を検出した後、画像は検出した角度分回転される。この時点で、測定パターンには  $(90 \times n)^\circ$  分の回転の自由度が残る。

回転後のパターンではメッシュ線が縦横に走るの、ここからメッシュ導体線の位置を判定し、それをもとに各マスがパターン中のどの位置に存在するかを同定する。メッシュ導体線の走る位置の判定には我々の用いる二次元通信シートにおいてメッシュ線幅が 1 mm であり、メッシュ間隔は 7 mm であるという知識を用いる。

まず、回転したパターンから処理に用いる正方形領域を切り出す。

アレイによる測定は 2.2 mm 間隔で行われるが、より高精度の位置測定のため正方形領域のパターンをアッ

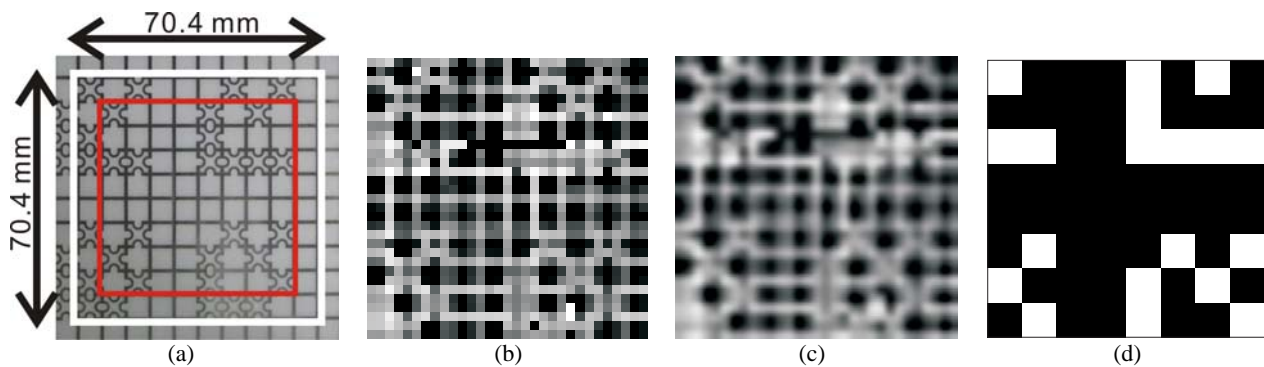


図7 図6のセンサによりビットパターンを持つシート上で測定を行った結果と、そのデータ処理結果。(a) シート上の測定領域(白線で囲まれた部分)。(b) 個々のセンサ特性に対し補正をかけた正規化した後の測定パターン。(c) 角度補正後1画素を10倍にアップサンプリングしたパターン。(d) (c)のパターンから各マスの位置を同定しマスごとにビット判定を行った後のビットパターン。処理に用いた領域は(a)中の赤線の領域であり、この中のビットパターンと(d)のビットパターンは一致している。

プサンプリングする(図7(c))。この画像に対し、縦方向、横方向で列ごと、行ごとに画素値の和を取る。それぞれ和を取った結果は1次元のデータ列となるが、これと1mm幅の線が7mm間隔で存在するという既知のメッシュ配置データとの相関を取る。相関値が最も大きくなる時に既知データがある位置にメッシュ線が走っていると判断する。これを縦、横にそれぞれ行うことで1bitの情報を持つマスがそれぞれどの位置に存在するかを同定することができる。

#### 4.2.c 各マスのビット情報の判定

各マスが持つ情報が1か0かの判定ではまず、先ほど同定された各マスの領域内で画素値の和を取る。これにより1マス1画素の画像が得られる。この画像に対し2値化処理を行う。2値化に用いる閾値の取得にはOtsu法を用いている。2値化結果をビットパターンとして用いる(図7(d))。

#### 4.2.d ビットパターンからの位置情報の抽出

ビットパターンには第3節で述べたようにUnit部分とBoundary zone部分が含まれる。測定で得られたビットパターンには常にあるUnitが完全に含まれるとは限らない。多くの場合は隣り合うUnitが断片的に測定領域に含まれているだけであるため、それらの情報からある1つのUnitにコードされた座標情報を取得する。

まず、得られたビットパターンからBoundary zoneを見つける。その後、Unit部分からUnitの方向を指定するreserved blockを見つける。Reserved blockの配置が分かることで、回転角検出で自由度を残していた $(\theta+90 \times n)^\circ$ のnが分かる。さらにreserved block以外のマスの0,1から測定領域に含まれる1つのUnitの完全なビット配置を計算する。得られたビットパターンが1つのUnitとBoundary zoneを合わせたマス数を1辺とする正方形領域以上であれば、1つのUnit内の全てのマ

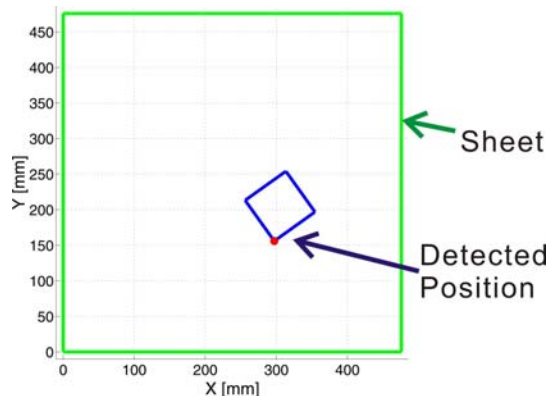
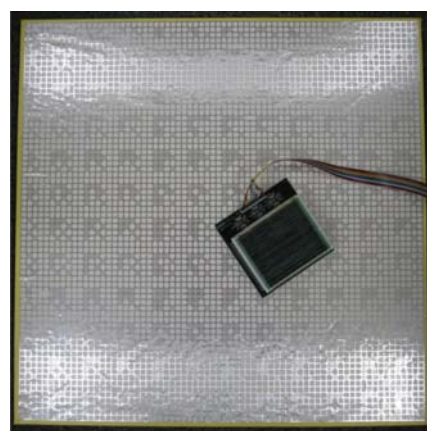


図8 位置取得実験結果。上の画像は今回用いたビットパターンを持つシート全体と、その上に置かれた位置取得センサ。このとき測定された位置・方向が下の図に示される。緑線がシートの領域であり、この中に青線でセンサ位置が示されている。

スのビット情報を復元するのに十分な数の連立方程式が得られる。これを解くことで測定領域に含まれるUnitにコードされた座標値が得られる。

以上のアルゴリズムに従って読み取った測定パターンから座標情報を抽出したのちは、読み取られたUnitの測定領域内の位置とアレイの原点との関係からアレ

イが置かれた高精度な位置を求める。

### 4.3 位置取得結果

図 8 に我々が開発した位置取得センサ、データ処理アルゴリズムを用いてこのセンサの置かれたシート上の位置及び回転角を測定した結果を示す。センサが置かれた回転角、及びシート上の位置が、測定結果の図と対応している。

測定は、センサから I2C 通信で PC にデータを取り込み MATLAB によりデータ処理を行い結果を表示している。測定開始から表示までの所要時間は 34 [sec]程度であった。これは PC との MATLAB 上のデータ処理は 0.6 [sec]程度所要しており、大部分の時間がデータ取得に要している。測定時間の短縮は今後の課題であるが、主に PC によるセンサ IC との通信の制御に時間を要している。この部分のプログラムの改善、制御ハードウェアの変更によりリアルタイムの連続的な位置・方向計測も可能である。

### 4.4 位置取得精度の検証

実機計測による精度検証は今後実施予定であるが、本稿ではシミュレーションによる精度検証について述べる。シミュレーションでは、アレイを構成する各静電容量センサの出力を、シートの導体パターンと重なる面積に比例した値として測定パターンを作成した。このパターンにデータ処理アルゴリズムを適用した。また精度検証では真の値をランダムに設定した 1000 測定データに対してデータ処理アルゴリズムを適用し検証を行った。

まず、回転角については静電容量計測の測定誤差を考えない時、真の値との誤差の絶対値は平均が 0.02°、最大値が 2.1°であった。

次に位置についてであるが、アレイの原点の真の座標と推定座標値の誤差は最大で 10 mm 以内に収まる事が確認できた。

第 2 節で述べた我々が目指す 3 つの目標のうち最後の項目である精度については 1 mm 程度の位置検出精度を目標として述べた。上記の検証ではこの目標には到達していないが、サンプリングの高密度化、データ処理アルゴリズムの改良で精度の改善の余地はあると考えている。これらについてはまず実機を用いた精度検証実験を行った後に検討する予定である。

## 5. 結論

本稿では無配線の通信・電力伝送環境を提供する二次元通信シート上に置かれたセンサノードなどのデバ

イスの位置・方向検出手法について報告した。

現在までに我々は、位置情報パターンを持つ二次元通信シートの設計と製作、シート上で適切に位置情報を取得可能なセンサ及び計測アルゴリズムの開発と実装を行った。また、このセンサがシート上で自身の位置・回転角を検出することを確認した。

今後の展開として、まず現在の位置取得センサの精度検証と改良が必要である。具体的には現在 1 回 30 秒程度かかる計測時間をリアルタイム計測が可能なレベルまで短縮する改良を行う予定である。

## 謝辞

本研究は日本学術振興会特別研究員奨励費 (21-5508) の助成を受けたものである。また本研究の一部は、独立行政法人情報通信研究機構 (NICT) の委託研究 13701 の助成によるものである。

## 参考文献

- [1] L. Doherty, et al., "Convex position estimation in wireless sensor networks," in *Proc. of IEEE INFOCOM 2001*, 2001, pp. 1655-1663.
- [2] J. Rekimoto, et al., "LifeTag: WiFi-based Continuous Location Logging for Life Pattern Analysis," in *Proc. of 3rd International Symposium on Location- and Context-Awareness (LOCA2007)*, 2007, pp. 35-49.
- [3] R. Want, et al., "The active badge location system," *ACM Transactions on Information Systems*, vol. 10, pp. 91-102, 1992.
- [4] P. Bahl, et al., "RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system," in *Proc. of the 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, vol. 2, pp. 775-784, 2000.
- [5] S. N. Patel, et al., "PowerLine Positioning: A Practical Sub-Room-Level Indoor Location System for Domestic Use," in *Proc. of UbiComp 2006*, 2006, pp. 441-458.
- [6] Microsoft Surface, <http://www.microsoft.com/surface/>
- [7] J. Rekimoto, et al., "DataTiles: a modular platform for mixed physical and graphical interactions," in *Proc. of SIGCHI 2001*, 2001, pp. 269-276.
- [8] J. Leitner, et al., "IncreTable, bridging the gap between real and virtual worlds," in *ACM SIGGRAPH 2008 new tech demos*, Los Angeles, California, 2008.
- [9] F. Hoffmann and J. Scott, "Location of Mobile Devices Using Networked Surfaces," in *Proc. of UbiComp 2002*, 2002, pp. 281-298.
- [10] J. Lipton, et al., "Pushpin Computing System Overview: A Platform for Distributed, Embedded, Ubiquitous Sensor Networks," in *Proc. of the First International Conference on Pervasive Computing (Pervasive 2002)*, 2002, pp. 139-151.
- [11] K. Van Laerhoven, et al. (2003) Pin&Play: the surface as network medium. *IEEE Communications Magazine*. 90-95.
- [12] R. Kurakake, et al., "Magic Surfaces: A Smart Building Material for Indoor Sensing Infrastructures," in *Proc. of INSS 2007*, 2007, pp. 213-220.
- [13] Anoto Pen, <http://www.anoto.com/>
- [14] S. Saito, et al., "Indoor Marker-based Localization Using Coded Seamless Pattern for Interior Decoration," in *Proc. of IEEE Virtual Reality Conference 2007*, 2007, pp. 67-74.
- [15] 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, pp. 98-103, 2007.
- [16] K. Nakatsuma, et al., "Position sensing based on electric field measurement on Two-Dimensional Signal Transmission Sheet," in *Proc. of 5th International Conference of Networked Sensing Systems (INSS 2008)*, Kanazawa, Japan, Jun., 2008, pp. 189-194.