

二次元通信におけるデバイス位置・方向計測

中 妻 啓*・篠 田 裕 之*

Device Position and Orientation Measurement for Two-Dimensional Communication

Kei NAKATSUMA* and Hiroyuki SHINODA*

In this paper we propose a method of device position and orientation measurement in Two-Dimensional Communication networks. Two-Dimensional Communication technology enables devices placed on a thin sheet to achieve two key functions for ubiquitous networks, to communicate with each other and to receive electricity through the sheet wirelessly. For device localization on the sheet, the top conductor layer of the sheet has a 2D pattern of position codes. We develop a positioning sensor based on capacitance sensing that identifies the position code in the 2D conductor pattern under the sensor. We evaluate the accuracy of obtained position and orientation through an experiment using a prototype of our positioning sensor.

Key Words: node localization, Two-Dimensional Communication, ubiquitous computing, location awareness

1. はじめに

本論文は、二次元通信環境に置かれたデバイスの高精度な位置・方向計測法を提案するものである。二次元通信は薄いシート上で無配線・非接触の通信・給電環境を実現する技術である。高精度な位置・方向情報を提供する機能を付加することでセンサネットワーク、ユビキタスコンピューティング、ヒューマンコンピュータインターフェースなどの分野でさまざまな応用が期待される。

人や物は屋内環境においてほとんどの時間、壁や床、机などの面に触れている。このことに注目し、ユビキタスコンピューティングの分野ではケーブルや無線ではなく面を通信・電力伝送のインフラとし、ユビキタスネットワーク環境として利用する“Surface Network”の研究がなされてきた^{1)~5)}。これらの技術は面を介したデータ・電力の伝送を実現している。

篠田らが提案する「二次元通信 (Two-Dimensional Communication)⁵⁾」もこうした技術の一つであり、二次元通信シート (Two-Dimensional Signal Transmission sheet, 2DST sheet) と呼ばれる薄いシート内に局在するマイクロ波を利用して二次元面を介したデータ・電力伝送を可能にする。Fig. 1に示されるようなワイヤレスかつバッテリーレスな環境が実現される。

本論文では、この二次元通信環境に置かれたデバイスの位置・方向計測手法について述べる。位置は時間と並び、物事

の物理的状態を記述するうえできわ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。ユビキタスネットワークにおいてセンサノード、ネットワークデバイスや一般の物体、人物などの位置情報を把握することは適切なサービスの提供に欠かせない要素である。屋外ではGPSがすでに実用的な測位技術として広く用いられており、主に屋内での使用を想定するSurface Networkの領域でも通信や電力伝送を行なう面上のデバイス位置を測定する技術が基礎研究として開発されている。

Kishinoらはピンを面に刺して通信・電力取得を行なうPin&Play¹⁾において、カメラ画像からピン位置を取得する手法を提案した⁶⁾。近年は高解像度の小型撮像デバイスが安価に入手できるようになっているが、カメラと物体の間に遮蔽物が存在すると位置が推定できなくなることが難点である。また、Scottらの提案したNetworked Surface²⁾では、通信・電力伝送のために面上に配置されたモジュールによりネットワークノード位置・方向を取得する⁷⁾。KurakakeらのMagic Surface³⁾においても同様に通信用のモジュールをノード位置検出に用いる。これらの方法は、面全体に電子回路を分散させることを前提にしている。

本論文では、二次元通信シートの導体層のパターンを、従来のものからわずかに変更することで高精度にノードの位置および角度を特定できることを示す。二次元通信に参加しているノードであれば、遮蔽の問題などなく確実にその自己位置(二次元座標値)と面内での回転角を同定することができる。以下ではその原理を説明するとともに、試作機を用いた位置・方向計測実験の結果について報告する。

* 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 8, 2011)
(Revised August 9, 2011)



Fig. 1 A demonstration of Two-Dimensional Communication (2DC) technology

2. 提案手法

2.1 二次元通信

本節では、本論文で提案する位置検出システムが前提としている二次元通信について概説する。二次元通信技術の詳細は文献5)で述べられている。

二次元通信は、壁や床、天井、デスクトップなど屋内に存在する平面を介してデータおよび電力の伝送を同時に実現する技術である。面に触れたデバイスがネットワークに接続してデータの送受信を行ったり、面を通じて電力の供給を受けたりすることができる。

このシート内部に印加された電磁波（マイクロ波）はシート内を2次的に伝搬する。Fig. 2に通信シート（2DSTシート）の構造を示す。2DSTシートは3層構造を有しており、3層は下から導体層（典型的にはアルミ層）、誘電体層（ポリエチレンなど）、導体層である。最下層が連続的なアルミ導体面であるのに対し、最上層はメッシュ状に加工されている。どちらの層も薄い誘電体フィルムで保護されている。

シートに印加されたマイクロ波は、シート内を2次的に伝搬する。このとき電磁波のエネルギーの大部分はシート内部に局在している。しかし最上層が有限のシートインダクタンスをもつメッシュ状導体のため、シート表面近傍にはシート内を伝搬する電磁波のエネルギーが漏出する。この漏出成分は空中に放射されずシート近傍に局在するエバネッセント場を形成する。シート上に置かれたノードは特殊なカプラによりエバネッセント場を介してシート内の電磁波に結合し、データ・電力伝送を行なう。エバネッセント場への結合は近接結合であり電氣的接触を必要としないため、シート上のどこでもノードが無配線・非接触で通信・給電をすることができる。さらに、適切にシートを設計することで外部環境への電磁波の漏出を最小限に抑え、大電力の無配線伝送を安全に行なうことができる。

2DSTシートはOSI (Open System Interconnection) 参照モデルの物理層（第1層）に相当する。シートそのものは単なる電磁波の伝送路であり、従来の無線通信の空間を二次元面へ変換した環境であるといえる。そのため、WiFi, Bluetooth, ZigBeeなどの既存の無線通信プロトコルが二次元通信環境でも使用可能である。すなわち無線機器のアンテナの出力を

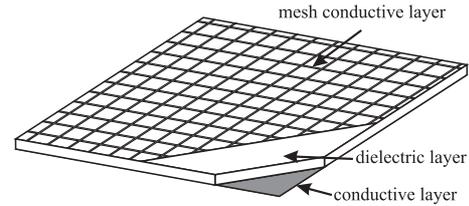


Fig. 2 Three layers structure of the Two-Dimensional Signal Transmission sheet (2DST sheet)

シート用の特殊なコネクタに置き換えることで、二次元通信ネットワークが構築できる。

2.2 提案手法の概要

提案システムは2DSTシートに付与された位置情報パターンとこれを読み取る位置検出センサからなる。

Fig. 2に示すように、2DSTシートはメッシュ導体層をもつ。われわれはこのメッシュ構造を用いて位置情報パターンをシートに付与する。従来のシートでは、メッシュ構造は単純な正方格子である。シート上の位置に応じて格子パターンを変形することで、その位置に固有のコードを書き込むことができる。メッシュ導体パターンの形状は2DSTシートのデータ・電力伝送特性を決定するうえで重要な要素の1つであるため、このパターンを勝手に変更することはできない。しかしメッシュの1周期は電磁波長より十分小さいため、シートに沿って流れる巨視的な電流と電圧の比で定義されるシートインダクタンスを保存する、という条件下であればシート上のデータ・電力伝送特性に影響を与えることなくこのパターンを変形することができる⁸⁾。

位置検出センサはシート上に置かれるとセンサ直下の導体パターンを読み取る。われわれはパターンの検出に静電容量分布計測を用いる。高解像度の静電容量センサアレイはシート上に描かれた導体パターンを取得することができる。センサがパターンを検出すると、パターン中に付与された位置情報および取得されたパターンとセンサとの位置関係から、センサのシート上における位置・方向を取得する。

われわれの提案する位置検出手法の特長は以下のとおりである。第1の特長は、位置検出機能は従来の二次元通信システムへ加える変更が非常に少ない点である。2DSTシートの最上層のメッシュ導体パターンを変更するだけで、位置計測を実現する環境が整う。このパターンはデータ・電力伝送特性に影響を与えることなく設計可能であるため、電力取得カプラなど従来の二次元通信におけるデータ・電力伝送の枠組みをそのまま用いることができる。第2の特長は、二次元通信が適用可能などのような環境下でも機能する点である。計測が静電容量測定に基づいているため、可視光領域の遮蔽に対しては頑健である。仮にわれわれが光学的な画像計測による位置情報取得を行なったとすると、オクルージョンによって計測不可能な状況が発生し得る。本論文の方法においても、2DSTシートとセンサ間に金属片などが挟まると計測が不可能になるが、そのような状況は通信・電力伝送自体が不可能

であるため二次元通信の使用状況にもともと含まれていない。すなわち本計測を実現するために使用上の制約条件が新たに付加されることはない。通信に参加しているノードであれば、センサと 2DST シートの間に紙やフィルムなどの絶縁体のシートが挟まったり、その表面に模様が描かれていても問題とならない。

提案手法は Anoto デジタルペン⁹⁾で用いられているペン先位置取得手法を二次元通信環境において実現するものである。Anoto ペンは紙の上で自身の絶対位置を検出し、その軌跡からユーザが書いた文字や線を認識する。このペンは紙に印刷された微細なドットパターンをペンに内蔵された小型カメラで読み取る。パターンはドットの配置が紙面上の位置情報を示すよう設計されている。われわれのシステムでは、Anoto ペンの小型カメラが静電容量センサアレイに対応し、ドットパターンは 2DST シート上の導体パターンに対応する。

以下の章で示す位置特定アルゴリズムは、2DST シート上の位置特定や、紙の上のペン先位置特定だけでなく、面上に置かれたセンサの自己位置特定法として幅広く適用可能なものであることを付記しておく。

2.3 二次元通信シート上の位置情報符号化と復号

2DST シートへの位置情報付与は以下のように行なう。

2DST シートは Fig. 2 に示すメッシュ構造をもつ。われわれの位置情報符号化手法では、格子の 1 マスが 1 bit の情報を表わすため Fig. 3 に示すよう、その形状を変形している。形状を変形したマスをも “marked block”，変形していないマスをも “plain block” と呼ぶ。前述のように 2 種類のマスは、形状の違いが 2DST シートの電磁波伝搬特性に影響を与えないよう設計されている¹⁰⁾。そのため、2 種類のマスをも有するシートも、従来の 2DST シートと同様に使用することができる。

marked block と plain block をシート上に配置することで 2 次元ビットパターンが形成される。ここで、複数のマスを含む正方形領域を “Unit” と定義する。Fig. 4 には、1 Unit が 5 マス × 5 マスで構成されるとき位置情報符号化例を示す。各 Unit 内の 2 次元ビットパターンは、その 2DST シート上の (x, y) 座標値に対応する。Unit 内にはその領域境界と方向を指示するため、すべての Unit で配置・ビットパターンが不変の “reserved block” がある。reserved block 以外のマスは各 Unit 固有のビットパターンをもち、各 Unit の置かれた座標値と対応付けられる。隣接する Unit を隔てるため、plain block のみで構成される 2 マス分のラインがある。このラインを、 “Boundary zone” と呼ぶ。すべての Unit において Boundary zone と混同するパターンが存在しないよう reserved block の配置を設計しているため、Boundary zone は容易に検出可能である。

シート上に置かれたセンサは、自身の直下のビットパターンを取得する。完全に 1 つの Unit が損失なく取得された場合、コードの復号は簡単である。さらに以下で示すように、取得されたパターン中に完全な Unit が含まれないときも検出器は位置情報の復号が可能である。

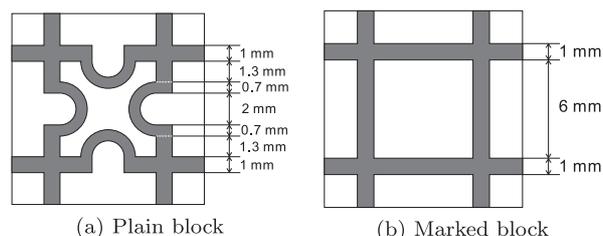


Fig. 3 The conductive patterns of the two types of blocks of the 2DST sheet. (a): A plain block corresponding to low bit (0). (b): A marked block corresponding to high bit (1)

例として、Fig. 4 中の Required measurement area の枠線で示される領域をセンサが取得した場合を考える。なお、われわれが想定する位置取得センサが取得する位置情報パターンはセンサとシート間の回転角に応じた回転をもつ。ここで、回転角が $90 \times i + \phi$ [deg] ($i = 0, 1, 2, 3, \phi = 0 \sim 90$) のとき、 ϕ はデータ処理により取得され補正がなされる (3.2 節)。すなわち本節で扱う位置情報復号の段階では、扱うビットパターンには i による 90 deg 間隔の回転のみが残されている。この回転は、“Unit” に含まれる reserved block のパターンを利用し容易に決定可能なため、以下では完全に回転補正がなされたビットパターンについて考察を行なう。今、取得パターン中には欠損のない完全な Unit が含まれていない。センサが位置を同定するためには、自身の下に存在するいずれかの Unit に割り振られた 2 進数コードを決定する必要がある。説明を簡単にするため、ここでは以下の仮定をおく。

- 縦方向、横方向にいくつの Unit が配置されているかは既知とする。
- 全 Unit 内のビットパターンは共通のルールに従い決定されている。

今、各 Unit はシートの左下の角から順に番号付けされたコードをもち、Unit の数は横方向に 2^N 、縦方向に 2^M であるとする。このとき、Unit に割り当てられたビット列の下位 M ビットは縦方向に並んだ Unit 間で不変である。同様に、上位 N ビットは横方向に不変である。この規則を使うと、センサが “1 Unit + Boundary zone” の広さの領域 (Fig. 4 中の枠で示す領域) のビットパターンを取得し、4 つの隣接する Unit のうち取得された部分を適宜組み合わせることで 1 つの “完全な” Unit を形成することができる。これは、任意の “1 Unit + Boundary zone” の領域内のビットパターンが一意的のものである、といい換えられる。

以下に、Fig. 4 の状況における実際の例を示す。ここでは、 $N = 9, M = 8$ と設計されている。reserved block のパターンが決まっているため、センサが取得した 7×7 の領域のパターンから、7 マス周期で表れる太さ 2 マスの Boundary zone を特定することは常に可能である。まず Fig. 4 の場合には 4 つの Unit が含まれていることを特定する。つぎにその 4 つの中で左下の Unit に割り当てている 17 ビットの 2 進数

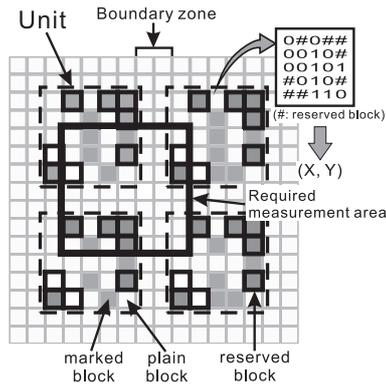


Fig. 4 The position information coding algorithm

を n とする. n は Unit 内の reserved block 以外のマスに, 左下を下位ビット, 右上を上位ビットとするよう配置している. 検出器により取得されたパターンには n に関して以下の情報が含まれている.

Unit n (左下):	0x010xxxx	xxxxxxxx
Unit $n+1$ (右下):	x0xxx0xxx	xxxxxxxx
Unit $n+2^N$ (左上):	xxxxxx101	0x010010
Unit $n+2^{N+1}$ (右上):	xxxxxxxx	x0xxxxxx

ここで, “x” は取得領域外にコードされセンサにより読みとられていないビットを示す. n 番目の Unit の i ビット目に付与された情報 (1 または 0) を $B(n, i)$ とする. このとき, $B(n, i)$ ($i = 1, \dots, 17$) は以下のように決定される.

- $B(n, i) = B(n + 2^N, i)$ ($i = 1, \dots, 6$)
- $B(n, 7) = B(n + 2^{N+1}, 7) \Leftarrow B(n + 2^N, 1) = 0$
- $B(n, 8) = B(n + 2^N, 8) \Leftarrow B(n + 2^N, 1) = 0$
- $B(n, 9) = 0 \Leftarrow B(n + 2^N, 9) = 1, B(n, 9) = B(n + 2^N, 9) + 1$
- $B(n, i) = B(n + 2^N, i)$ ($i = 10, 11$)
- $B(n, i) = B(n + 1, i)$ ($i = 12, 16$)

以上より, n は $n = 00010010000010010$ と決定される.

センサが自身の下に存在する Unit のもつ情報を決定すれば, その情報および取得パターン中の各マスの配置から自身の絶対的な位置と回転角を取得できる. 位置取得の精度はセンサが読み取るパターンの空間分解能に依存し, 高分解能のセンサを用いれば, メッシュ間隔以下の精度で位置を決定することが可能である.

2.4 静電容量計測

上述の位置情報導体パターンは静電容量計測により測定される. Fig. 5 にわれわれが開発したセンサの構造を示す. このセンサは, 正方形導体のパッチを同じく正方形の導体ループが取り囲む構造である. パッチとループ間の静電容量値が測定される.

この静電容量センサが 2DST シート上に置かれると, センサとシートの導体メッシュ線が重なる部分で, センサとメッシュ線間にキャパシタが形成される. このときの静電容量値

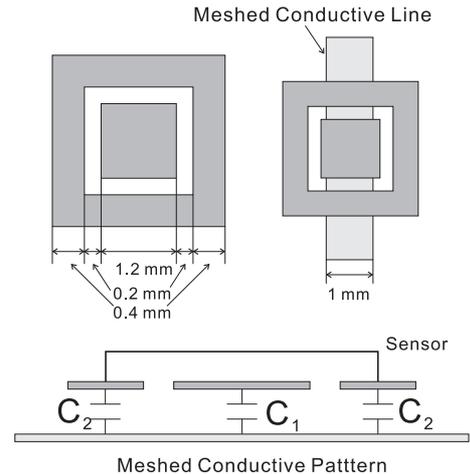


Fig. 5 The structure of an element of the capacitance sensor array. When the sensor is placed on a metal area of the 2DST sheet top layer as the right upper diagram shows, capacitors are formed as shown in the bottom

はセンサと導体メッシュ線が重なる面積に比例する. ゆえに, われわれはパッチとループ間の静電容量値を測定することでセンサの下に導体メッシュ線が存在するか否かを取得することができる. 加えて, センサをアレイ状に配置することでメッシュ導体線のパターンを取得することも可能である. われわれはこのセンサアレイを用いて, Fig. 3 に示した marked block と plain block を識別しその配置を取得する.

2.5 提案手法の限界

われわれの提案する位置検出手法では, 位置検出センサのサイズと一意に位置同定可能なシートのサイズにトレードオフが存在する. これらのサイズを決定する要因は Unit に含まれるマス数, すなわち 1 Unit のもつ情報量である.

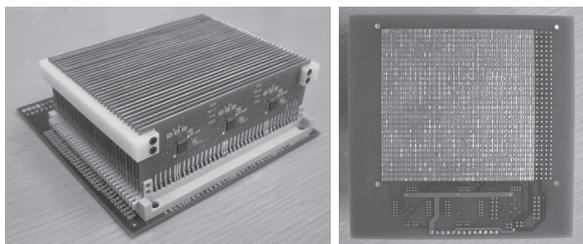
Fig. 4 と同様に Unit が 5 マス \times 5 マスで構成されるとき, (x, y) 座標値の符号化には 17 マスが使用される. Unit サイズが 4 マス \times 4 マスのとき, 位置情報符号化のために使用できるマスの数は 8 マスに減少する. これにより, 一意の位置情報パターンをもつシートの面積も減少する.

一方で, Unit のサイズを小さくすることは位置検出センサの小型化には有利に働く. 2.3 節で述べたように, 有効な位置情報を得るには “1 Unit + Boundary zone” の広さの領域のビットパターンの取得が必要である. Unit サイズが 5 マス \times 5 マスのときは 7 マス \times 7 マスの領域が必要である. シートのメッシュ間隔を, 先行研究における 2DST シートと同様の 7 mm とすると, これは 49 mm \times 49 mm の正方形領域に相当する. センサの回転も考慮すると, センサは 49 mm \times $\sqrt{2} = 69.3$ mm を 1 辺とする正方形領域の静電容量分布を読み取ることが求められる. すなわち, これが Unit が 5 マス \times 5 マスの場合にわれわれが製作すべき位置検出センサの最小サイズとなる. なお, 以上はセンサの読み取り領域を正方形に限定した場合の考察である.

Table 1 に Unit サイズ, 位置検出センササイズ, およびセンサが一意に位置同定可能な 2DST シートのサイズの関係

Table 1 The relationship between Unit size, the area of unique localization, and the positioning sensor size

Unit size [block]	4	5	6
Information in one Unit [bit]	8	17	26
Sheet size with a unique position information pattern [m ²]	0.45	313	2.10×10^5
Positioning sensor size (each side length) [cm]	5.9	6.9	9.9

**Fig. 6** The positioning sensor prototype

について示す。Table 1 によれば、1つのUnitが5マス×5マスのサイズであれば、一般的な部屋程度の面積のシート上で携帯電話やPDAといった“ハンドトップ”サイズのデバイスが一意に自身の位置を同定することが可能である。

3. 試作

3.1 試作機の構成

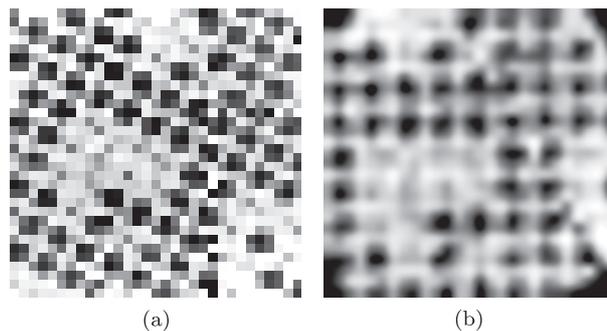
われわれは2章で述べた位置検出原理を実現する位置検出センサを試作した。試作機をFig. 6に示す。試作機は1024チャンネルの静電容量センサをもつセンサアレイである。各センサの大きさは2.2 mm × 2.2 mmである。このセンサが2.2 mm間隔で配置され、 $32 \times 32 = 1024$ チャンネルの静電容量センサアレイを構成する (Fig. 6右)。なお、個々のセンサは2.47 mm以下の間隔で配置される必要がある。これは、サンプリング定理から導かれる有効な位置情報ビットパターン検出のための条件である。静電容量分布の測定領域全体のサイズは70.4 mm × 70.4 mmである。Table 1より、この試作機では17.7 m × 17.7 mのシート上で一意に位置を同定することが可能である。電子回路を含んだセンサ全体の面積は105 mm × 105 mm、厚みは47 mmである。

われわれは、個々のセンサからの静電容量値の取得に Analog Devices 社製静電容量計測 IC “AD7142”を用い、マイコンボード “Arduino”によりAD7142の制御と静電容量値の取得を行なっている。Arduinoはまた、得られた静電容量値をPCへBluetoothにより無線送信している。

センサが2DSTシート上に置かれると、ホストPCからの命令に応じて静電容量測定が行なわれる。PCがマイコンから全データを受信すると、PCはデータを処理しセンサの位置・方向を決定する。

3.2 データ処理

2.3節で提案した手法に従い位置情報パターンを付与した2DSTシート上で、試作した位置検出センサが取得した静電

**Fig. 7** The raw sensing data (a) and the processed pattern (b)

容量パターンをFig. 7(a)に示す。

センサから得られる測定データは 32×32 の静電容量値行列である。ここから最も確からしいコードを読み取るのがつぎの問題となる。本システムの場合、パターンの格子の周期が既知であるため、その知識を用いてセンサと格子の相対位置を、(コードのパターンに強く左右されることなく)高い精度で特定することができる。そのため、格子の相対位置決定の工程と、コードパターン推定の工程を分離することができ、以下のように比較的簡単な処理が実現できる。まず、第一のステップとして、Fig. 7(a)のパターンからセンサの回転角を検出する。

本手法ではセンサの回転角 $\theta = 90 \times i + \phi$ [deg] ($i = 0, 1, 2, 3, \phi = 0 \sim 90$) に対し、測定データ処理により ϕ 部分を、位置情報ビットパターンからの位置情報復号の過程で残る90 degの不定性 i を決定する。ここでは ϕ の決定について述べる。格子パターンの傾きはセンサの回転角に対応する。この角度を、測定データの2次元フーリエ変換画像中の強度ピーク点の位置から特定する。観測された2次元パターンは、コーディングのために変調をうけており、完全な周期パターンとはなっていない。この変調分は前記ピーク位置を若干シフトさせるが、今回のシステムにおいて実験的に確認された変動分は後に示すように3 deg以内であった。

つぎに、データ画像中の各マスの位置特定を行なう。すなわち、測定データ中のどこにメッシュ導体の格子線が走っているかを特定する。このためにわれわれは、2DSTシートの構成に関する以下の2つの先験情報を用いる。

- 隣接する格子線間隔は7 mmである。
- 各格子線の幅は1 mmである。

上記の情報をもとに格子線パターンのテンプレートを準備し、取得したデータとの相関のピーク位置から2次元相対位置を特定する。なお、回転角についてはすでに推定されている値を用いて事前に取得データを回転しておく。なお、取得データを回転する前にアップサンプリングとローパスフィルタリングを行なっておく (Fig. 7(b))。

こうして決定されたメッシュ格子線位置に基づいて、取得データを2DSTシートの格子のマスの対応する正方形領域に分割し、位置コード特定のプロセスに入る。分割されたデー

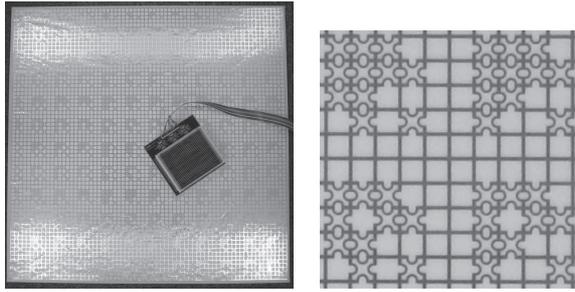


Fig. 8 The setup of the positioning experiment (left) and the encoded 2D bit pattern on the 2DST sheet (right)

タごとに値の総和を取ることで、1ピクセルがシートの1マスに対応する画像が生成できる。このマス単位の解像度をもつ画像を2値化することで、位置検出センサ下のビットパターンを取得する。

取得されたビットパターンからは2.3節に述べた方法でセンサ下のUnitのシート上の位置を特定する。またこの際に回転角について残る90degの不定性*i*が取り除かれ、0~360degの範囲でセンサの完全な回転角 θ が決定される。

センサの絶対(x, y)座標値は、Unit内の位置情報と測定データ全体とデータ中のUnitの位置関係により決定される。

4. 実 験

実験環境として、われわれは位置情報パターンをもつ2DSTシートを用意した。実験用のシートのサイズは476mm×476mmである。**Fig. 8**右に、このシートの表面を示す。本実験ではUnitのサイズは4×4[block]として位置情報コーディングを行なった。

位置・方向計測の誤差評価のため、試作機の真位置・方向取得には、カメラ画像を用いた手法を採用した。試作機に2つの赤外線LEDを取り付け、この位置をシート上方から赤外線カメラで取得した。真位置取得システムの分解能は1mm以下である。

シート上で、試作機を用いた位置・方向取得を行なった。**Fig. 8**左に実験の様子を示す。2DSTシート上に置かれた位置取得センサと、測定結果が示されている。グラフ中にはシートを表わす枠と位置取得センサの位置・方向が描かれている。測定は任意の100の位置・方向で100回行なわれた。100の測定点はシート全域にランダムに分散するように選択した。**Fig. 9**に、測定点と各位置における位置取得結果が示されている。

位置取得センサは100試行中3回、センサ下のビットパターン取得に失敗した。このとき失敗の判定基準は、位置誤差が50mm以上の場合としている。

Fig. 10に真値からの位置、角度誤差を示す。グラフにはビットパターン復元に成功した97データがプロットされている。すべての*x*および*y*の誤差(x_e, y_e)はいずれも絶対値で4mm未満であり、 θ の誤差 θ_e は3deg未満である。**Table 2**に x_e, y_e と、 $\sqrt{x_e^2 + y_e^2}$ 、および θ_e についてその

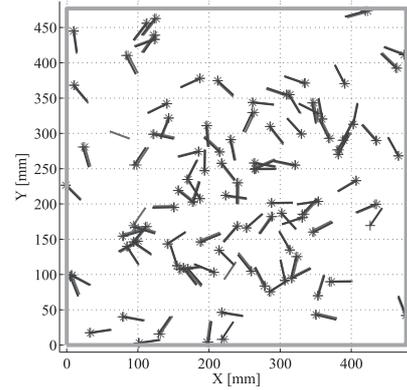


Fig. 9 Ground truth and measured result points in the experiment on the sheet shown as a 48 cm square in the graph. Asterisks (*) are ground truth position of measurement points. Crosses (+) are measured result position. Small bars coming out from the positions represent rotation angle corresponding to each point

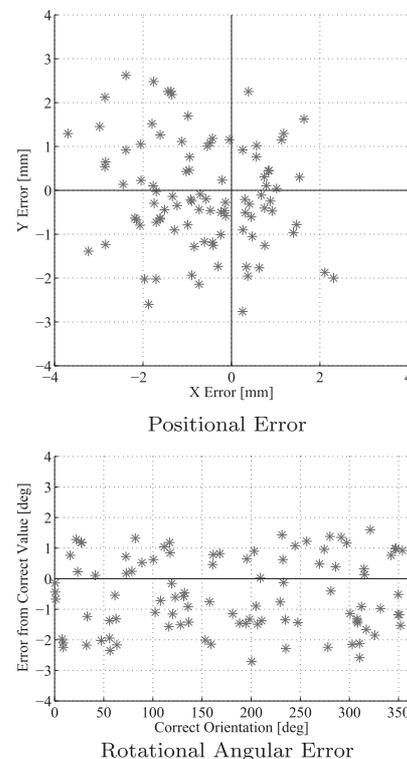


Fig. 10 The positional errors and the orientation angular errors in the experiments are shown. The upper graph shows the positional errors (x_e, y_e) from ground truth position. The lower one shows the orientation angular errors (θ_e) to correct angular values. The 97 data eliminating three measurement failures are plotted

平均、標準偏差、最大値(絶対値)を示す。

5. 考 察

Table 2より、実験において試作機は位置($\sqrt{x^2 + y^2}$)誤差3.7mm以下、角度誤差2.7deg以下で位置・方向を同定することに成功した。位置については 1.73 ± 0.78 mm、角度

Table 2 The mean, the standard deviation (SD), and the maximum (absolute) values of positioning results' errors

	x_e [mm]	y_e [mm]	$\sqrt{x_e^2 + y_e^2}$ [mm]	θ_e [deg]
Mean	-0.60	-0.13	1.73	-0.51
SD	1.31	1.24	0.78	1.21
Max (abs)	3.70	2.76	3.70	2.71

については -0.51 ± 1.21 deg の範囲を中心に誤差が分布することも確認した。

本手法ではセンサが自身の直下の位置情報パターンを読み取るため、空間中に存在する位置情報の状態は位置によらず一定であり、系統的に推測可能な誤差要因は存在しない。すなわち上記の測定誤差を生じさせる支配的な要因は、シート上のパターン計測の空間離散化によるもの、センサとシート表面の接触状態によるものと考えられる。特に空間離散化によるものとしては、現在各静電容量センサを 2.2 mm 間隔で配置していることから 1 mm 程度の誤差が生じるものと予想される。そのため、サブミリ精度などさらに位置測定精度を向上させるためには、静電容量計測の空間分解能を上げる必要がある。

実験では 100 試行中 3 回、正しいビットパターンを復元できず位置測定に失敗した。われわれはこの原因は静電容量測定時のノイズにより取得データの閾値処理が正しく行なえなかったためと考えている。解決策としては測定回路の改良による計測の安定性の確保のほか、1 ビット程度の読み取りエラーを許容するよう位置情報パターンコーディングに冗長性をもたせることも、シート表面の汚れなどに対する頑健性を確保する上では有効である。ただし冗長ビットの導入は一意に位置同定可能なシートのサイズを縮小させる。

つぎに測定時間についてであるが、実験では 1 組の (x, y, θ) の取得に 10~21 sec 程度を要した。現在、ホスト PC はセンサからのすべてのデータの受信とデータ処理の実行に約 1 sec を要している。すなわち、これ以外のほとんどの時間が静電容量計測に消費されている。1 チャンネルの静電容量センサからの静電容量値の取得には 5 msec から数十 msec 程度を要する。

試作システムは 1 回に 1 チャンネルの値のみを読みだしている。これに対し、われわれはセンサに複数のマイコンを組み込み、32 チャンネル同時読み出しを行なうことで測定時間を短縮したセンサをすでに開発している¹¹⁾。これにより、1 回の位置・方向検出に要する測定時間はおよそ 1.7 sec となる。

以上の位置測定誤差、測定時間結果より、提案システムについてわれわれが想定する応用について考察する。われわれは二次元通信と本論文で提案した位置取得システムを組み合わせた応用として、センサネットワークのノード位置取得、デスクトップをはじめとする日常の面上インタフェースを考えている。センサネットワークのノード位置取得は 1 章でも述べたとおり重要な問題であるが、現状の提案システムのように 1 sec 以上の測定時間がかかる位置計測手法では動的なセ

ンサノードへの適用は限定される。一方、静的ノードの位置計測システムに対しては数 mm および数 deg 以下という高精度な位置・方向計測が重要となる応用があげられる。たとえば、モーションキャプチャシステムや空間中に存在する人やモノの位置を取得するセンサシステムには複数のカメラなどのノードを用いる手法が一般的であるが、各ノード位置を高精度に決定することが結果として得られる人やモノの位置精度に大きく影響する。静的なノードの場合は、設置時に人手により位置を高精度に決定する、あるいは設置後に精密な校正を行なうことでノード位置を保証することが多いが、本手法を用いてノード位置を決定することで高精度な位置および方向をセンサを環境中に配置すると同時に得ることができる。これにより、設置時の経済的、時間的コストを軽減することが期待される。また、センサノードへの適用には多数のセンサが必要でありそのコストも問題である。本論文で紹介した試作機は多数の静電容量計測 IC を利用した高コストのものであるが、マルチプレクサを利用してより少ない部品により安価にセンサを構築することが可能である。

一方、面上インタフェースなどの利用に関しては現状の性能では実用的な応用を満足しない点がある。高精度な位置取得は二次元通信の通信・電力伝送の機能と組み合わせることで *Microsoft Surface*¹²⁾ のようにデスクトップに配置したモノの位置関係を利用したインタフェースシステムに有用であると考えているが、現状では 1 sec 以上かかる位置取得時間が大きな問題となる。この点に関しては今後の技術開発により改善が必要である。また、センササイズに関しては測定可能領域が 17 m 四方のとき 6.9 cm 角であり (Table 1)、スマートフォンなどのハンドトップサイズ以上のデバイスがわれわれが想定する適用範囲となる。

6. 結 論

本論文は 2DST シート上におけるデバイスの位置・方向計測手法について論じたものである。静電容量センサアレイによってシート最上層のメッシュ導体パターン中に符号化された位置・方向情報を読み取る。提案する手法を実現する試作センサを実装し実験を行なった結果、位置測定誤差 3.7 mm 以下、角度誤差 2.7 deg 以下の位置・方向計測が実現されることを実証した。これによりワイヤレス、バッテリーレスかつ位置情報取得可能な環境が実現される。この環境はセンサネットワーク、ユビキタスコンピューティング、ヒューマンコンピュータインタラクションなど幅広い分野に応用可能である。

今後、測定時間の高速化、センサの薄型化や安定した計測が課題である。

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、推定アルゴリズムの構築に際しては、慶應義塾大学環境共生・安全システムデザイン教育研究センターの牧野泰才氏、東京大学情報理工学系研究科落合和樹氏の協力を得た。

参 考 文 献

- 1) K. Van Laerhoven, N. Villar, A. Schmidt, H. Gellersen, M. Hakansson and L.E. Holmquist: Pin&Play: the surface as network medium, *IEEE Communications Magazine*, **41**-4, 90/95 (2003).
- 2) J. Scott, F. Hoffmann, M. Addlesee, G. Mapp and A. Hopper: Networked surfaces: a new concept in mobile networking, *Mobile Networks and Applications*, **7**-5, 353/364 (2002).
- 3) R. Kurakake, Y. Nishizawa, K. Sakakura, H. Ouchi, M. Minami and H. Morikawa: Magic Surfaces: A Smart Building Material for Indoor Sensing Infrastructures, in *Proc. of INSS 2007*, 213/220 (2007).
- 4) J. Lifton, D. Seetharam, M. Broxton and J.A. Paradiso: Pushpin Computing System Overview: A Platform for Distributed, Embedded, Ubiquitous Sensor Networks, in *Proc. of the First International Conference on Pervasive Computing (Pervasive 2002)*, 139/151 (2002).
- 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, **46**-2, 98/103 (2007).
- 6) Y. Kishino, T. Terada, S. Nishio, N. Villar and H. Gellersen: A Position Detection Mechanism for Location-aware Pin&Play, in *Proc. of ICHIT 2006*, **2**, 308/317 (2006).
- 7) F. Hoffmann and J. Scott: Location of Mobile Devices Using Networked Surfaces, in *Proc. of UbiComp 2002*, 281/298 (2002).
- 8) H. Shinoda, Y. Makino, N. Yamahira and H. Itai: Surface Sensor Network Using Inductive Signal Transmission Layer, in *Proc. of INSS 2007*, 201/206 (2007).
- 9) Anoto Pen, <http://www.anoto.com/>
- 10) K. Nakatsuma, Y. Makino and H. Shinoda: Position sensing based on electric field measurement on Two-Dimensional Signal Transmission Sheet, in *Proc. of INSS 2008*, 189/194 (2008).
- 11) 中妻, 丹野, 篠田: 二次元通信における位置計測法(第4報)—柔軟通信シート上の位置計測とウェアラブルインタフェースへの応用—, 第11回 SICE システムインテグレーション部門講演会論文集, 1079/1082 (2010).
- 12) Microsoft Surface, <http://www.microsoft.com/surface/>

篠 田 裕 之 (正会員)



1988 東京大学工学部物理工学科卒。90 年同大学院計数工学修士, 同年より同大学助手, 95 年博士(工学)。同年東京農工大学講師, 97 年同助教授, 99 年 UC Berkeley 客員研究員を経て 2001 年東京大学大学院情報理工学系研究科助教授, 07 年同准教授。触覚を中心としたセンサシステムとデバイス, センサネットワーク, 二次元通信, ヒューマンインタフェース, 光・音響・生体計測などの教育と研究に従事。

[著 者 紹 介]

中 妻 啓 (学生会員)



2009 年東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程修了。同年より同博士課程・日本学術振興会特別研究員(DC1)。位置情報計測とインタフェースシステムへの応用, 触覚センサなどの研究に従事。ACM, 日本バーチャルリアリティ学会, 情報処理学会各会員。