

# 電場計測に基づく二次元通信シート上のデバイス位置推定

## Position Estimation based on Electric Field Sensing on Two-Dimensional Communication Sheet

○中妻 啓 牧野 泰才 篠田 裕之 (東京大学)

Kei NAKATSUMA, The University of Tokyo, tsuma@alab.t.u-tokyo.ac.jp  
Yasutoshi MAKINO, The University of Tokyo, yasutoc@alab.t.u-tokyo.ac.jp  
Hiroyuki SHINODA, The University of Tokyo, shino@alab.t.u-tokyo.ac.jp

Our group has proposed a new communication technology named “Two-Dimensional Communication” for high-density sensor networks. In this paper, we propose the method to estimate the positions and orientations of sensor nodes on the Two-Dimensional Communication sheet (2DC sheet). First, we introduce the position encoding scheme on the 2DC sheet. Next, we analyze the electromagnetic field modulation by the position code on the 2DC sheet, and propose the method to detect the position code on the 2DC sheet using the electric field sensing. Finally, we show the results of the fundamental experiment to confirm that the proposed method is useful for the position estimation on the 2DC sheet.

**Key Words:** Sensor Networks, Node Localization, Two-Dimensional Communication, Ubiquitous Computing

### 1. 序論

一般に、センサネットワークでは、分散したセンサノード間の通信の確保、各ノードへの給電、及びノードの位置取得が問題である。これらの問題を解決する新たな通信層として、我々は、従来の有線、無線通信に代わる、二次元通信 (Two-Dimensional Communication, 2DC) シートを提案してきた [1](図 1)。2DC シート上に置かれたセンサノードは、シート内部を伝播するマイクロ波を介して通信と電力の取得を行う。センサノードは 2DC シート上のどこでも、電気的接触なしに通信・給電ができる。これにより、ワイヤレス、バッテリーレスのユビキタス環境を実現することができ、センサネットワークにおける通信、給電の問題は解決する。

本稿では、2DC シート上のセンサノードの位置推定法について報告する。提案手法は、電場計測に基づき、既存の 2DC シートへのわずかな変更と、ノードに取り付けられた電場センサのみにより実現される。カメラなどの外部装置を使用しないため実用的であり、紙などをノードとシートとの間に挟むことも可能である。

センサノードの位置取得は、位置に対応したセンシングの実現だけでなく、シート上の特定のノードへの効率的な給電にも応用できる。また、位置検出機能は、大規模センサネットワークの設置やメンテナンスを簡単にする。さらに、2DC シート上に置かれたディスプレイや PDA、携帯電話、ノート PC など様々なデバイスに対し、位置に応じた機能の提供が可能である。

### 2. 位置取得法の概要

提案手法は、Anoto [2] のデジタルペンの位置取得法を参考にしている。Anoto ペンは、特殊な紙に印刷された微細なドットパターンをペンに取り付けたカメラで読み取り、ペン先の位置を同定する。このドットパターンは位置に応じて決定される。

我々は、位置に応じた電磁場パターンを用いて位置推定を行う。2DC シートは、2 層の導体層が誘電体層を挟む構造を有している。通信・給電のためのマイクロ波は、誘電体層を伝搬する。上部導体層はメッシュ構造を持つ。このメッシュ構造により、シート上部にはシート内を伝播するマイクロ波に

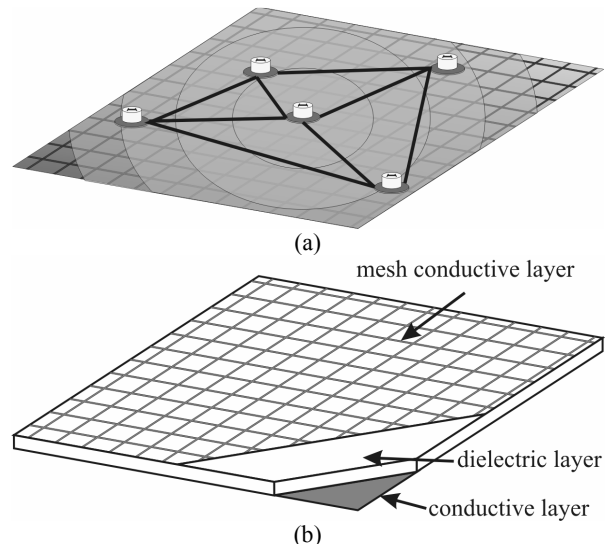


Fig. 1 (a): The concept of the Two-Dimensional Communication(2DC). Sensor nodes can send/receive packets through the 2DC sheet. (b): The structure of the 2DC sheet. Two conductive layers sandwich a dielectric layer. The top conductive layer has a meshed structure, and the bottom is a continuous conductive layer.

よってエバネッセント場が形成される。センサノードはこのエバネッセント場を介して通信・給電を行う。シート上におけるエバネッセント場の 2 次元強度分布は、上部導体層のメッシュ形状によって決まる。つまり、メッシュ形状をシート上の位置に応じたパターンにすることで、シート上部に位置に応じたエバネッセント場の強度分布が形成される。このとき、シート表面の電磁場強度分布を測定することで、2DC シート上のデバイスは自己位置を推定できる。なお、2DC シートのシートインダクタンスが一定であれば、メッシュ形状は自由に変更できることが分かっている ([1])。

提案する位置推定システムの設計に当たって、我々は以下の 3 つの設計目標を設定している。

- ・ 10 m 四方の 2DC シート上における一意の位置同定
- ・ ミリメートル精度の位置検出

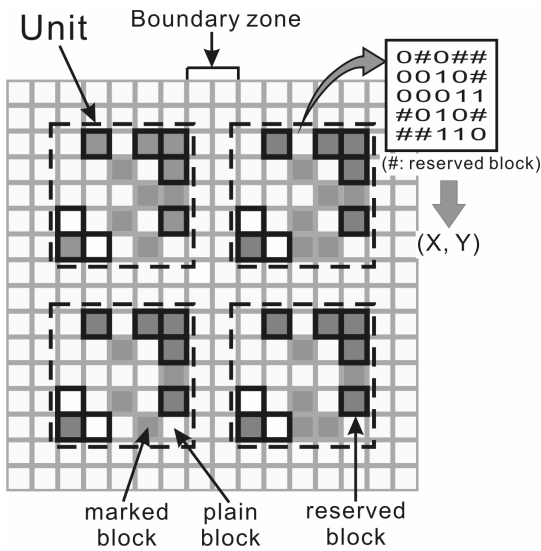


Fig. 2 The position encoding scheme on the 2DC sheet.

- 10 cm 四方程度以下のサイズの位置検出デバイス  
以下、これらの仕様を達成する位置情報コーディング法と、その検出法を述べる。

### 3. 位置情報コーディング

2DC シートに位置情報を付与するため、上部導体層のメッシュ形状は以下のように設計する。

- メッシュの構成する 1 マス(block)にその形状を変形することで 1 bit の情報を付与する。このとき、形状を変形した block を marked block, 変形していない block を plain block と呼ぶ。
- 5×5 マスの block から Unit を構成する。一つの Unit にその位置の X-Y 座標値をコードする。
- Unit 内には、Unit の境界と方向を示すために 8 マス分の reserved block が存在する。残りの 17 マスは、X-Y 座標値の 2 進数ビットパターンを表す。
- 隣り合う Unit を区別するため、Unit と Unit の間には 2 マス分の Boundary zone が設けられている。この領域は全て plain block から構成される。

以上の設計法を図 2 に示す。reserved block の存在により、Unit 領域と Boundary zone を区別することは容易である。

この設計法では、1 Unit が 17 bit の情報を持つ。これより、1 枚の 2DC シート上に縦  $2^9$  Unit, 横  $2^8$  Unit を並べることができる。文献[1]で用いられている  $d=7$  mm 間隔のメッシュを仮定すると、一つの Unit は Boundary zone を含めて  $49 \times 49$  mm<sup>2</sup> の面積を占める。以上より、この設計法により一意に位置を同定できる 2DC シートの面積は、およそ  $25 \times 12.5$  m<sup>2</sup> である。これは我々の目標である 10 m 四方より大きい。

また、我々は位置検出デバイスのサイズについて  $11 \times 11$  cm<sup>2</sup> 以上あれば回転方向に依らず、上記のサイズのシート上のあらゆる場所で少なくとも 1 つの Unit を完全に同定できることを確認している。これは、第 2 の目標仕様をほぼ満たす。

位置検出デバイスが 1 つの完全な Unit を検出すれば、コードの同定と同時に、block の配置から自身のより高精度な位置と回転方向を得ることができる。位置推定の精度は、検出器

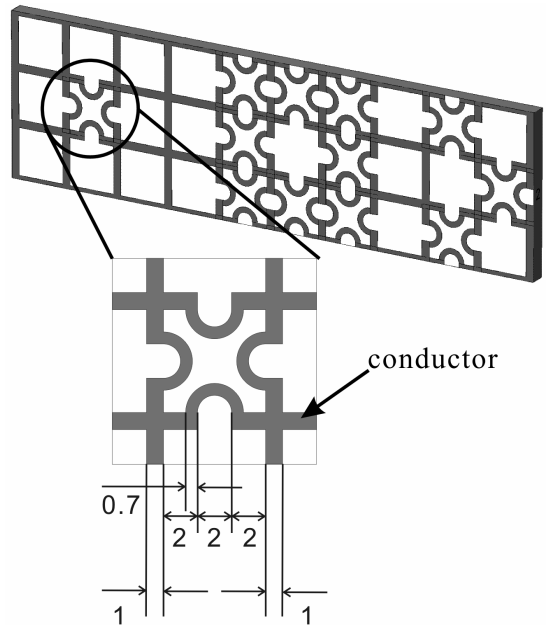


Fig. 3 The simulation model of the 2DC sheet for analyzing the electromagnetic field above the surface of the sheet. In this model, a marked block is realized with winding lines.

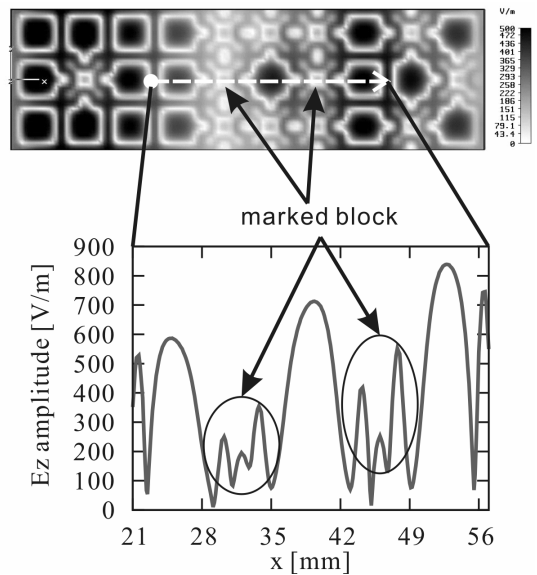


Fig. 4 The result of the simulation. The model is shown in Fig. 3. The time average of the vertical electric field 1 mm above the sheet surface is shown (upside). The contrast of  $E_z$  amplitude in the single block is apparently different between the plain and the marked block. The  $E_z$  amplitude on the dash line shown in the downside graph.

の空間分解能に依存する。高分解能の検出器を用いることで、サブメッシュ精度の位置検出が可能である。

### 4. 位置情報検出法

次に、2DC シートに付与された位置情報を物理的に検出する手法について述べる。

本稿で紹介する手法では、シート上部のエバネッセント場のうち、シート表面に垂直方向の電場の強度分布から位置情報を検出する。垂直方向電場  $E_z$  は、マイクロ波の伝搬方向に依らず、また、他の電場、磁場成分に比べ、より低い空間周

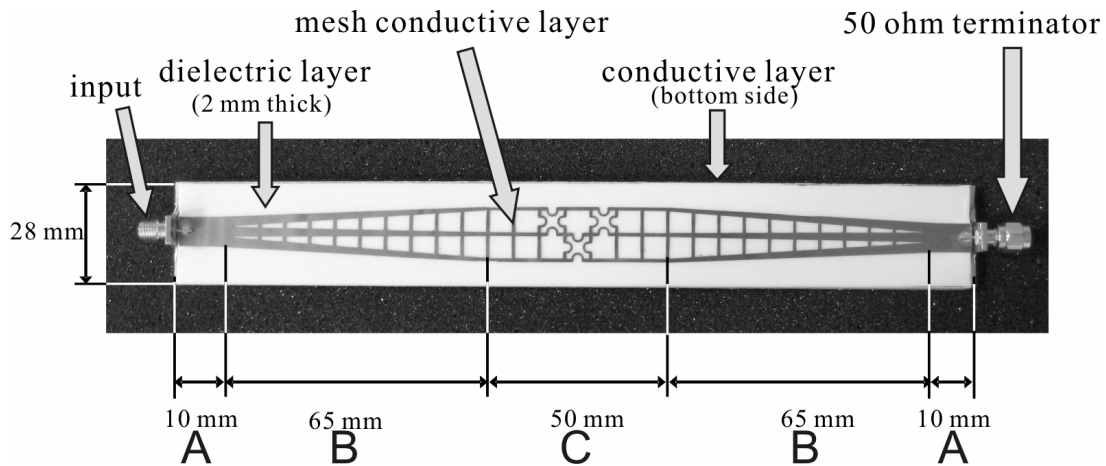


Fig. 5 The photograph of the partial 2DC sheet for the experiment. A part of the 2DC sheet top layer was fabricated in C. This grid pattern includes both the plain and the marked blocks. The part B has the horn structure so that C is smoothly connected to 50 Ω microstriplines A. The intermediate layer was 2 mm thick polyethylene sheet ( $\epsilon_r = 1.4$ ). The bottom layer is continuous conductive layer and its size was the same as the intermediate dielectric layer. The right end was terminated by a 50 Ω terminator. This sheet structure sufficiently eliminates microwave reflection and provides the same condition as the simulation in Fig. 3, 4.

波数成分を持つ。これは、空間分解能が粗い検出でもシートに付与した位置情報を検出できることを意味する。これらの性質を示すシミュレーション結果を以下に示す。

シミュレーションは、電磁界解析ソフト MW-STUDIO (AET Japan Inc.) により行った。図 3 に 2DC シートモデルを示す。このモデルは marked block と plain block を共に含む。図 3 の marked block の形状は、plain block との間のシートインダクタンス変化が無視できるように、シミュレーションによって湾曲部の線幅を最適化している。2.4GHz のマイクロ波をシート側面から印加したときの、シート表面近傍の垂直電場強度分布を図 4 に示す。この結果では、垂直電場強度分布が、marked block と plain block の間で明確に異なる。この違いは、メッシュ間隔  $d$  に対し  $d/2$  以下の周期の空間サンプリングにより検出可能である。

## 5. 実験

4 節の議論に基づき、位置情報検出の原理を検証するための基礎実験を行った。

実験のため、図 5 に示す 2DC シートを試作した。これは、2DC シートのメッシュパターンがホーン構造部を介して 50Ω のマイクロストリップラインに接続している。このため、入力端から終端抵抗までマイクロ波の反射が起らず、4 節のシミュレーションと同様の境界条件が実現される。

このシートを利用して、シート表面から 1 mm 上方の垂直電場を 1 mm 間隔で測定した。電場の測定には図 6 に示す微小電界プローブを用いた。プローブは高周波オシロスコープに接続され、出力の実効値を記録した。

結果を図 6 に示す。シート内の marked block と plain block の位置が、電場強度の差から明確に読み取れる。ここで、シミュレーション結果と実験結果には違いがある。シミュレーションでは、1 つの block 内での垂直電場の分布が marked block と plain block で異なった。理論上は、垂直電場強度の 1 つの block 内の平均値はどちらの場合も同じである。一方、実験結果では、検出された信号強度は上部メッシュ層の導体パターンの直上でのみ強くなっている。

この違いは、電場測定用プローブと 2DC シート表面との相互作用によるものとみなせる。導体のプローブがシート表面

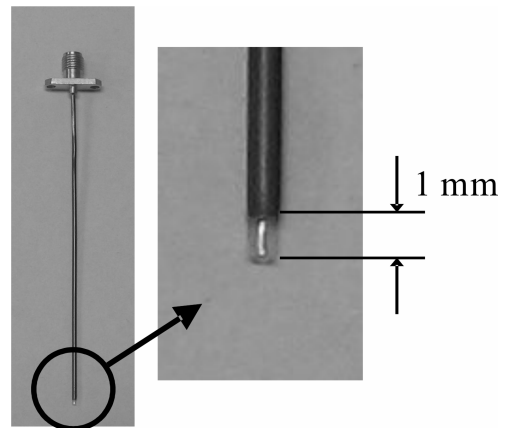


Fig. 6 The miniature electric field probe for measurement of vertical electric field on the 2DC sheet. We fabricated this probe by peeling the metallic shield of a semi-rigid cable. This probe senses the vertical component of the electric field.

のメッシュ導体に近づくと、導体間で電場が誘導される。実験結果から、位置情報コードは低解像度の検出器でも安定して検出されることが分かるが、より高解像度の検出器を使うことで、導体パターンからより高精度の位置情報を得ることが期待できる。

4 節で、我々は marked block と plain block を、メッシュ間隔  $d$  に対し、 $d/2$  以下の周期の空間サンプリングにより区別できると述べた。今回用いた電界プローブの直径は 1.2 mm であり、 $d=7$  mm 間隔のメッシュの 2DC シートを使うとき、要求される解像度のプローブアレイを製作するのに十分な細さである。

## 6. 結論

本稿では、二次元通信シート上のセンサノードの位置・方向推定手法を提案した。まず、二次元通信シート上に位置情報を付与する手法と、この手法の特徴について論じた。また、シミュレーションを通して位置情報コードの物理的な検出法を議論し、垂直電場計測に基づく手法を提案した。最後に、提案手法の有効性を確認するための実験について述べた。実験の結果、垂直電場計測により、位置情報が付与される marked

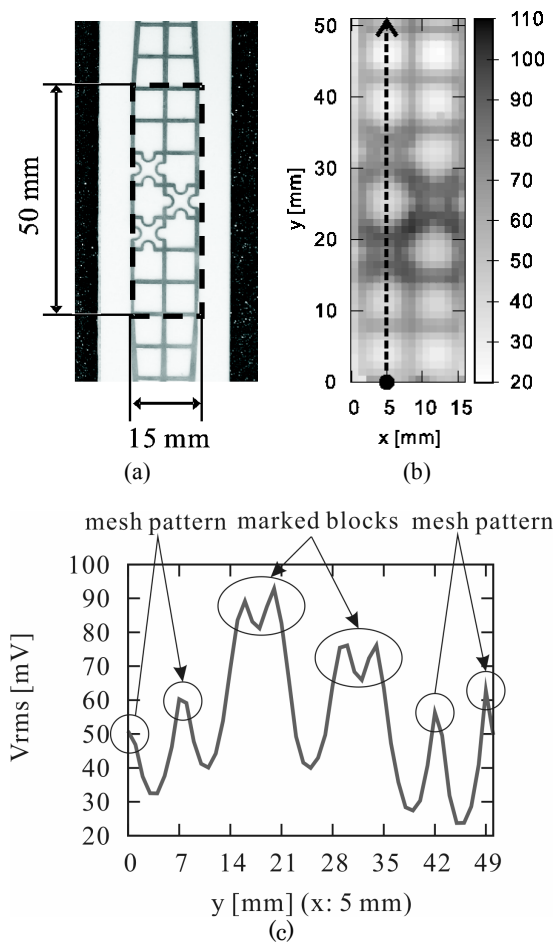


Fig. 7 (a) The measurement region. The microwave was applied from the lower side of this picture. We measured the vertical electric field with a 1 mm interval. The result is shown in (b). (c) is the result on the line of  $x = 5$  mm which is shown in (b) with a dash line. We can distinguish marked blocks from plain blocks clearly. Since we can detect the mesh conductor pattern, it is expected that we can obtain more accurate position information by the details.

block と plain block の位置の読み取りが可能であることが示唆された。以上の結果より、我々の提案手法が 2DC シート上の位置情報コーディングに有用であることを確認した。

今後、垂直電場のプローブアレイの製作と評価を進める予定である。4、5 節の議論より、プローブアレイに要求される解像度は 3.5 mm である。我々は既に各プローブに取り付ける計測回路を 3.5 mm 以内のサイズに収まることを確認している。現在、我々は試作モデルを製作中である。

## 文献

- [1] H. Shinoda, Y. Makino, N. Yamahira, and H. Itai, "Surface Sensor Network Using Inductive Signal Transmission Layer," in *Proc. INSS 2007*, pp. 201–206, 2007.
- [2] Anoto: <http://www.anoto.com/>.