

## 特集記事

## パーソナルネットワークの技術特集

## 二次元通信によるヒューマンインタフェース

東京大学 篠田 裕之

## 1. はじめに

我々のグループでは二次元通信、すなわち薄いシート(二次元媒体)内を伝播する電磁波を用いて通信する技術を提案し、研究を進めている<sup>[1,2]</sup>。通信距離は数m程度までを想定し、媒体上の任意の地点にカプラを近接させることで高効率の信号伝送が可能となるシステムの確立を目指している。面上任意の地点に近接すれば接続が確立し、接続位置の自由度は確保しながら無線よりも高速な信号伝送と電力伝送が実現されることが特長である。現時点では信号伝送の特性の改善や、電磁干渉の評価、安全な電力伝送技術の確立を急いでいるところであるが、そのアプリケーションの重要なターゲットはヒューマンインタフェースである。本稿では二次元通信技術の概要を説明し、本技術がどのようにヒューマンインタフェースに活用されるかを解説する。

2. 二次元通信の概要<sup>[1]</sup>

ヒューマンインタフェースが関係する場面での二次元通信の典型的利用形態は、

[形態1]机、床、壁などの表面に二次元通信媒体を実装し、その表面に近接する情報機器やセンサが部屋内・乗り物内規模で通信する

[形態2]布状の柔軟な通信媒体に多数のセンサや機能素子を実装し動作させる

の二つである。形態1での利用を想定した通信媒体の構造例を図1に示す。下から導体層、絶縁体層、導体のメッシュ

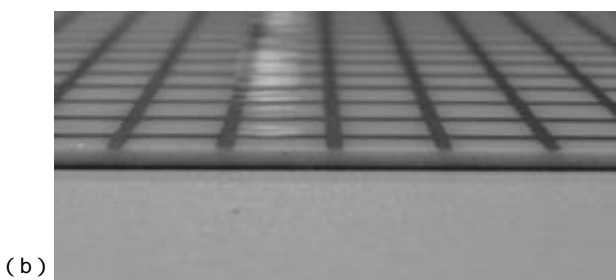
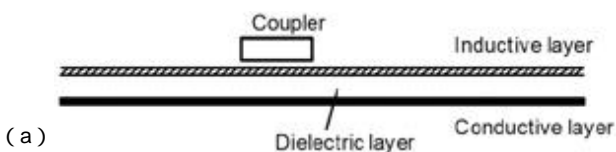


図1 (a)は表面結合タイプの二次元通信シート断面図。(b)は通信シート典型例(シート厚2mm、メッシュ周期7mm)の写真。

表1 二次元通信基礎技術開発の主要項目

開発項目	現状	目標(例)
広帯域化	ISM帯 54 Mbps	微弱無線局(相当)での 広帯域通信 10 Gbps以上
電力供給の 高効率化	供給可能電力 3 W/m 効率 10%	電波防護指針(相当)を みたく高効率伝送 100 W/m, 効率 60%
通信媒体の 多様化	フィルム, 板状	布状, 柔軟

状シート(誘導性層)からなる3層構造によって表面結合タイプの二次元通信が実現できる。通信シート表面付近には、表面からの距離に対して電磁界強度が指数関数的に減衰するエバネッセント波が形成されている。通常状態ではシート外に形成されるエバネッセント波のエネルギーはわずかである。図1(b)の通信シートにおいて、電磁場強度は表面から数cm以内で急速に減衰し、染み出したエネルギーの全体は通信シート内エネルギーの1%程度である。特殊なカプラがシート厚みと同程度の距離にまで近接すると通信シートとの相互作用によって結合が確立される。機器と媒体とは近接(非接触)結合が前提であるため、導体としては厚さ数 $\mu\text{m}$ のアルミでよい。絶縁体としては安価・軽量の発泡体を用いてよく、机の下や壁紙としてあらかじめ組み込んでしまえば実質的にはわずかなコストで環境に実装できる。

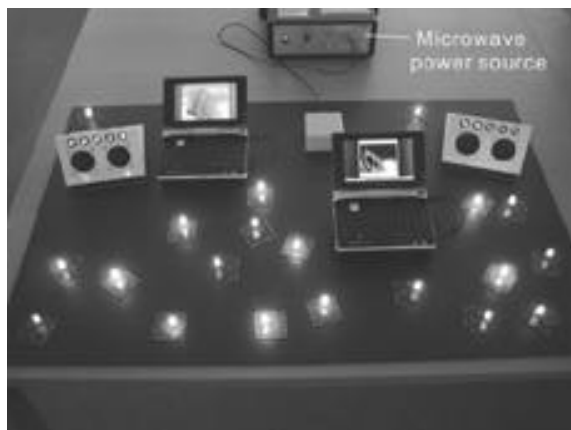
「けいはんな情報通信オープンラボ」に設置されている二次元通信ワーキンググループにおいては、表1のような目標を掲げ、産・官・学連携して実用技術開発を進めている。以下に二次元通信の一般的特徴と現在の開発段階を説明する。

## 2.1 信号の局在性

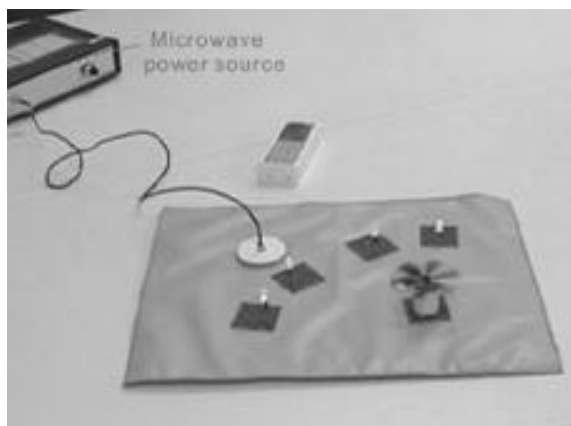
二次元通信の特徴の一つは、信号が目に見える通信シートの近傍に限定されていることである。そのため無線よりも情報漏洩の問題が生じにくく、外部からの妨害電波の干渉も受けにくい。

また遠方に放出される電磁波の強度が一定値以下になると、現行電波法で無線通信用に規定される帯域より広い帯域を利用できる可能性がある。この場合には無線通信よりも高速な通信が実現されることになり、例えば10Gbpsを超える高速伝送が原理上は可能になる。

現在は、2.4GHz帯および5.2GHz帯の現行無線機器（IEEE 802.11a/b/g、Bluetooth、Zigbee等）のプロトコルをそのまま用いた通信システムが実現している段階である。机上に通信シートを設置し、通常の無線LANよりもセキュリティの高い通信を実現するシステムがLANシート（第3章図4）として実用化を開始している。



(a)



(b)



(c)

図2 表面結合タイプの二次元通信デモ写真。

- (a) 2台のPC間で5.2GHz帯信号を用いて動画を伝送し、スピーカ、LEDの動作電力はマイクロ波源から通信シートを介して供給される。
- (b) 布状通信シートによる電力の伝送。白い円盤状のカプラからマイクロ波を送出している。
- (c) 収束ビームによる8W電力伝送の実験風景。8つのポートを用いて収束ビームを生成し、受電用カプラに電力を集積する。

## 2.2 電力の伝送

もう一つの重要な性質が、個別配線なく電力が伝送できる点である。シートに手を触れたときの安全性を保証できる範囲内であれば、センサやタグなどへの微弱電力はもちろん、家電などへの電力供給も可能になると考えられる。その場合には電気的接点がなくショートの大危険もない安全な電力供給が実現されることになる。

電力伝送の安全性は、通信シートの単位幅を横切って流れる電力密度W/mで規定される。通信シートに直接手を触れたときに皮膚に吸収される電力は十分小さく、それでいて特殊なコネクタを近接させたときには高い効率で電力を吸収する特性を付与することが技術開発目標となる。具体的には100W/mすなわち10cm幅のデバイスに10W程度を安全に電力伝送することを当面の開発目標としている。

現状では図2(a)のような65cm×100cmの通信シートに10Wの2.4GHz信号を入力し、分散したオーディオスピーカ、モーター、LEDなど合計20個のアイテムが2W程度の直流電力を消費するシステムが実現されている。ここでは400mWの直流電力を取得する15cm角のカプラ、100mW程度までを取得する5cm角のカプラが使用されている。また複数の地点からマイクロ波を入力してシート内に収束ビームを生成し、消費電力8Wの小型ディスプレイを駆動する実証実験が行われている<sup>[3]</sup>。この実験では20cm×10cmのカプラが用いられている。いずれの例においても、マイクロ波の発生と整流受電に伴う電子回路内のロスをも考慮した伝送効率は10%程度である。また最もエネルギー密度の高い場所に手を触れた場合には、手の吸収する電力が電波防護指針の基準値を上回ってしまう。

通信シートからの電磁波の漏えいをさらに抑制するとともにカプラの小型化、伝送効率の改善を進めることが今後の課題となる。

## 2.3 通信媒体の構造が最小限であること

通信媒体は2層の導電層を持っていればよく、低コストで実現できる。また電気的接点が必要であるため、従来は配線が困難であった柔軟な材料にも素子を実装できるようになると考えられる。

柔軟な布地に硬い部品を固定、配線しようとする場合、接合箇所に応力集中が起こり実用的な耐久性をもつ実装は容易ではない。しかし二次元通信では通信層と素子とが非接触であるため、通信層と素子を互いに固着させる必要がない。これによって媒体自体の柔軟性を損なうことなく実用的な耐久性をもつ素子実装が可能になると期待できる。特に布状素材に多数のセンサ素子を実装し、快適に着込むことができるようになると、人間の健康や疲労の状態、コンピュータに伝えたい意志などを皮膚表面から読み取ることができるようになる。

現在は、図2(b)のような実証実験を行っている段階である。実用的な耐久性をもつ柔軟素材の実現は今後の課題である。

## 2.4 端末位置の計測

二次元通信シート上で高精度の位置計測を行うことは、散乱体や遮蔽物の多い室内で3次元位置を計測するより簡単な問題である。二次元通信を行っている以上、シート上で電磁場(近接場)を観測していることになるが、そのパターン自体に位置コードを書きこむことができるからである。

図3はその手法の一例である<sup>[4]</sup>。図1の例では最上層のメッシュは正方格子であったが、電磁波の伝達特性を変化させないまま図3(b)のようにメッシュパターンを変化させることができる。これによって位置に対してユニークな0および1のパターンを形成することができる。図3(c)は(b)のパターン付近に微小電極を近接させ走査させたときに観測される垂直電界強度パターンである。センサを表面から1mmのところまで近接させることで、0/1パターンを読み取れることがわかる。図3(a)のように5×5マスを一ユニットとし、ユニット境界を2列分の空白領域で表示する試作例では、312m<sup>2</sup>にユニークな座標を設定することができる。これらのパターンを読み取るアレイセンサは現在試作中であるが、電界の読み取り分解能を高めることで、1メッシュ周期よりも細かい分解能で位置および角度を決定できる。なおここで説明したものと同様な位置計測法とし

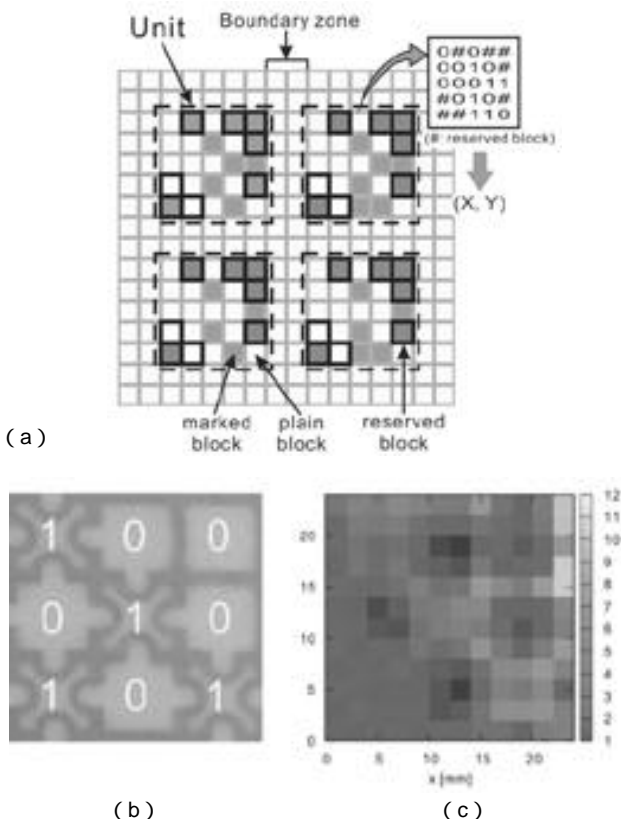


図3 通信シート上での端末位置計測法。

- (a)のように2種類のメッシュパターンを組み合わせると2次元座標をパターンニングする。
- (b)はパターンの一例。
- (c)は表面から1mmのところまでプローブを近接走査させ、垂直電界パターンを計測した結果。

て、アノトペン<sup>[5]</sup>として製品化されている技術がある。アノトペンは紙の上に精細な位置コードを印刷しておき、その光学パターンをペン先で読み取ることで紙の上のペンの位置を特定している。ここで述べた方式はその電界版である。

## 3. ヒューマンインタフェースとしての応用

二次元通信は、現在よりも1桁以上多い情報機器・素子が身のまわりで動作し互いに高速通信するために必須となる技術である。バッテリーレス・軽量で持ち運びが容易であり、メンテナンスも不要な機器が多様な情報表示やセンシングを実現できる。このような基礎技術によって実現されるヒューマンインタフェースを概観・予測する。

### 3.1 信号伝達領域の可視化

オフィスに二次元通信を導入すると(図4)、目に見える二次元領域ごとにアクセス可能な情報を区別して設定することができる。例えば人事情報を扱う部署のテーブルでは社内人事情報のデータベースにアクセスでき、接客テーブルではインターネットにのみ接続する、というような通信環境を構築できる。あるいは同じテーブルに載ったPC間では情報の交換が可能であるが、視界に入っていないPCは一切アクセスできない、というような設定も可能である。このように、人間の五感を利用した使い勝手のよい情報セキュリティ管理が可能になり、ヒューマンエラーによる情報漏えいを低減することができる。また情報漏えいという観点だけでなく外来電波による通信の障害を回避することができ、確実につながる通信媒体として利用することができる。

### 3.2 インタフェース機能をもつICタグ

消耗品に取り付け可能なパッシブ型のRFIDタグ(それ自身が電池を持たないタイプのICタグ)のリーダーを、空



図4 オフィスへの適用事例。シートに触ったPCがネットワークに接続される。この事例においてPCは通常の無線LAN対応機器を用いる。アクセスポイントからPCへ向けた信号のみがシート付近に局在し、PCから送信された電波は空中に放散する。(セルクロス アットセル LAN、イトーキ LANシート、帝人 セルフォーム。)写真はITmedia Biz.IDの2008年3月4日付ウェブ記事より転載。

中用アンテナのかわりに図1のタイプの二次元通信シートに接続すると、通信シートに近接するタグのみが読み取られるシステムとなる。タグが通信シートに近接しなければならぬという制約付きではあるが、その制約のもとでは(電磁エネルギーが通信シートに沿った方向にしか伝搬しないため)同じ投入電力での読み取り可能距離を拡大することができる。また空中に放散する電波強度は小さいから、(環境との電磁干渉という観点から)空中用よりもさらに読み取り電波強度を強めることが許容される。

通信シートから離れるとタグが読み取れないことは欠点にもなるが、逆にそれを利用することもできる。商品棚にこのシートを実装し、シートに接触しているタグのIDを常時監視していれば、商品を持ち上げるたびにそのことを検出できる。商品の売り上げだけでなくその商品が手に取られた回数をも知ることができるようになる。

また、タグに電力を供給しタグが発光できるようになると、人間の視覚に対してタグが直接働きかけられるようになり、有用性が拡大する。薬局で薬剤師が薬を取り分けるときにヒューマンエラー対策として、薬のロットにICタグを取り付ける動きが始まっている。この場合、薬剤師が取り上げた箱を読み取り機にかざしてダブルチェックすることになるが、さらに一歩進めて薬剤師が取るべき薬品の方が光ってその存在を教えてくれると作業の負荷が著しく軽減される。すなわち医師のカルテを読みこませることで選択すべき薬品の箱が光ってくれば薬剤師は薬を探しだす努力をする必要がなくなり、究極的には薬品を整理整頓して保管しておく必要もなくなり、保管スペースの節約にもなる。

### 3.3 位置計測機能を用いた無線機器のペアリング

2.4節のように個々の機器が安定かつ高精度で位置を計測できるようになると、その情報は様々な用途に用いることができる。一つの重要な応用は無線機器のペアリング(対応付け)である。

「PCとその周辺機器が同じシートに載せただけで繋がる」というのは、シートが目に見えるゆえに便利な利用形態である。多くの機器は面倒な認証なしに相互接続してしまっても問題が生じないからである。しかし例えば複数のPCが同じシート上に存在し、そこにディスプレイやハードディスクを接続する場合にはPCと周辺機器の対応関係を指定する必要があり、これは結構厄介な作業となる。このとき、機器の位置が把握できていれば「最も近くにある機器同士をペアリングする」というルールを用いることができ、直観的にわかりやすいインタフェースとなる。

### 3.4 カード型情報表示インタフェース

クレジットカードやSUICAのようなカード型デバイスはすでに日常生活に定着しているが、その表面に高精細ディスプレイが実装されており、それがバッテリーレスで動作するとともに自分自身の位置も検出できると便利な情報提示デバイスが実現できる。カードやタイルに映像を表示するアイデアはMicrosoft Surface<sup>[6]</sup>やDataTiles<sup>[7]</sup>などによってす

で示されているが、二次元通信はこれらのインタフェースを個人の機で実用技術として実現することを可能にする。

利用形態の一例としてメインとなるカード(メインのコンピュータ)は1枚決めておいて、その他はいろいろなサイズのを常時持ち歩いていてもよいし、机の上に常時何枚か置いておくことを想定してもよい。二次元通信層を備えた机の上にメインカードを置くと、それらはディスプレイとマウスの機能を兼ね備えたものとして動作する。仮想的には机の表面に広がっている文書の一部をカードの大きさ分の覗き窓を通して見ているように情報を表示し、窓の外の内容が見たければカードをその方向にスライドさせる、というような利用も可能である。もっと大きな画面が見たくなった場合には手近にある複数のカードを並べればメインのカードに自動接続され、同じ文書を広い画面で見ることができるようになる。このようなインタフェースが、二次元通信層を備えたテーブルや壁であればどこあっても実現されることになる。

### 3.5 面計測型バイタルセンサ

センサをアレイ状に実装したウェアラブルの柔軟デバイスは、主々のバイタルセンサとして活用できる。例えば心電など

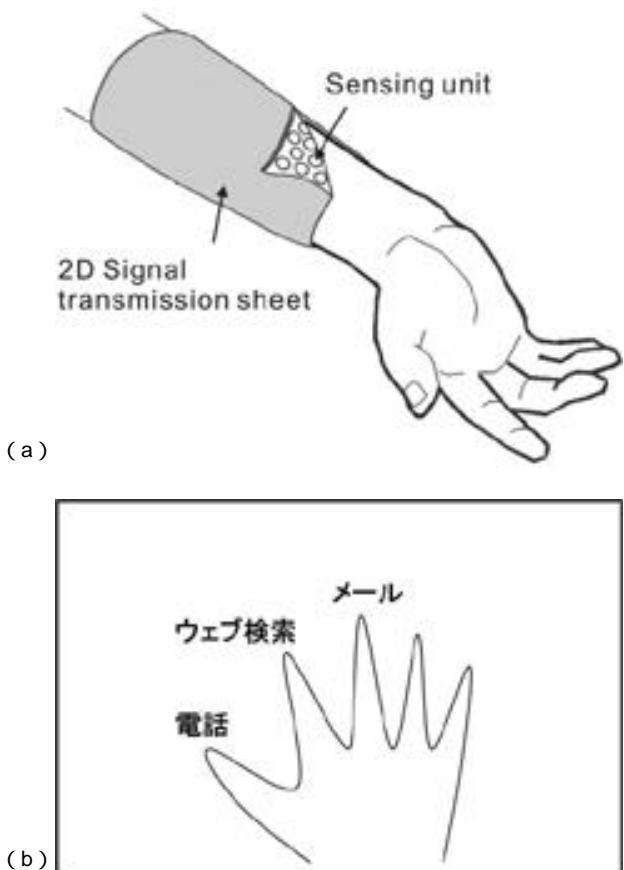


図5 筋電インタフェース。  
(a) はデバイスの概念図。  
(b) はこれを利用した選択画面の一例。図のように表示された画面に従い、仮にウェブ検索したければ人差し指で手近な面を押す。

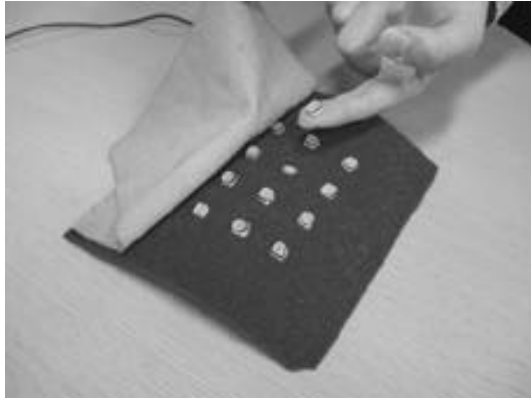


図6 二次元通信による柔軟触覚センサの実現例。素子は電気接点なく導電シートに挟みこめばよい。

はある程度決まった位置で計測される必要があるため、体の決まった位置にセンサを貼り付け、そこから信号線を引き出してくる必要がある。そのため日常的な装着に際しては物理的にも負担が大きい。しかし柔らかいウエア状のデバイスにすでにアレイ状のセンサが実装されており、面全体の情報を一旦取り込んでしまった後で必要な情報をコンピュータが取捨選択するようになればセンサの位置決めが不要になる。ここまでくると非専門家であっても計測が可能になるし、ウエアが軟らかく触感も良ければ一日中快適に装着することができる。なお、図6のようにカブラを導電層の間に挟みこむタイプでは、電磁波長よりも著しく小さいカブラが実現されている。図6のタイプは直径4mmのらせん状電極によって2.4GHzで良好に近接結合する<sup>[8]</sup>。

### 3.6 筋電インタフェース

さらに一歩進めて例えば筋電の2次元分布を計測することができれば新しいコンピュータインタフェースとして活用することができる。図5(a)は我々の研究室で開発しているサポーター状デバイスの例である<sup>[9]</sup>。人間の指を動かす筋肉は前腕部に集中しており、前腕部の周囲の筋電位を2次元パターンとして計測できれば各指が発生している屈曲力を同定可能であると言われている。また筋電は、空間波長にして数cm程度のパターンとして伝播すると言われているため、数ミリ程度離れた隣接点間の電圧を計測しても十分なSN比を確保できる<sup>[10]</sup>。したがって局所的な電圧勾配を計測する独立した計測素子を図5のように配列して筋電分布を映像化することが可能である。筋電信号帯域(数百Hz)において計測ユニットは環境から電氣的に孤立しているとみなせ、コモンモードノイズの影響を受けにくい頑強な計測が可能である。

筋電計測部位を位置決めしなければならないとなると日常生活での活用は難しい。しかしまず2次元パターンとして計算機に取り込み、その後そのパターンから筋肉を特定するのであれば非専門家であってもそれを使いこなすことができる。装着したままでも苦にならない柔軟サポーターであれば、それを腕に装着することで新しいコンピュータインタフェースを実現できる。

図5(b)はこのようなデバイスを用いたタッチインタフェースシステムの概念図である。図(b)の画面に表示された選択子に従い、対応する指で手近な面をタッチすれば筋電によってコマンドが送出できる。従来のタッチパネルであれば必ずパネルに触れなければならないが、このようなインタフェースであれば例えばヘッドマウントディスプレイに表示された映像ともインタラクションをすることができる。また両手に何も持つ必要がないため、他の作業と同時進行が可能である。

### 3.7 その他のインタフェース

図6に示すのは二次元通信を用いたロボット皮膚の実現例である。もともと二次元通信は、ロボットの表面に柔らかい触覚センサを実装するために考案されたものであった。センサ素子は固いものであったとしてもそのサイズを微小にし、個別配線を無くすことによって全体として柔らかさを得ようというのが基本コンセプトである。一方回路自体を柔らかくする研究も進展しており<sup>[11]</sup>、今後の開発の進展と最終的な性能・コストによって最適な方式が選択されることになる。センサの配置密度が比較的低い場合や様々なセンサ情報を複合して計測する必要がある場合、あるいは計測に高速性が必要な場合には二次元通信が適していると考えられる。

### 4. おわりに

二次元通信の概要を説明し、それがヒューマンインタフェースとしてどのように活用可能であるかを概説した。コピキタス機器の接続方法として現在は無線化が進展しているが、信号の届く範囲が目に見えないことや、信号の到達範囲を制御しにくいこと、電力の伝送が容易でないこと、など不都合な面もあることが指摘され始めている。二次元通信は有線と無線の長所をあわせもち、それらを補完する技術である。現在よりも桁違いに多くの機器やセンサによって人々をサポートするために不可欠になると考えられる。

なお本稿で挙げた事例の多くについて、フィージビリティの検証は今後行われていくことになる。二次元通信は基礎技術としてもまだ完成したものではないが、これからは本稿であげた可能性の中から具体的なアプリケーションを絞り込んで技術開発するフェーズに入っていく。ヒューマンインタフェース技術との連携がより重要になっていくと思われる。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] Hiroyuki Shinoda, Yasutoshi Makino, Naoshi Yamahira, and Hiroto Itai: Surface Sensor Network Using Inductive Signal Transmission Layer, Proc. INSS07, pp.201-206, 2007.
- [3] 板井裕人, 箱崎光弘, 張兵, 篠田裕之: シート状媒体を用いたワイヤレス電力伝送の一手法, 電子情報通信学会2008年通信ソサイエティ大会通信講演論文集2, BS-14-9, pp.S-220-221, 2008.
- [4] Kei Nakatsuma, Yasutoshi Makino, Hiroyuki Shinoda: Position Sensing based on Electric Field Measurement on Two-Dimensional Signal Transmission Sheet, Proc. 5th International Conference on Networked Sensing Systems (INSS 2008), pp.189-194, 2008.
- [5] Anoto: <http://www.anoto.com>
- [6] Microsoft Surface: <http://www.microsoft.com/surface/>
- [7] T. Rekimoto, B. Ullmer, H. Oba: DataTiles: A Modular Platform for Mixed Physical and Graphical Interactions, Proc. CHI 2001, pp.269-276, 2001.
- [8] H. Chigusa, Y. Makino, H. Shinoda: Large Area Sensor Skin Based on Two-Dimensional Signal Transmission Technology, Proc. World Haptics 2007, Mar., Tsukuba, Japan, pp.151-156, 2007.
- [9] Y. Makino, S. Ogawa, H. Shinoda: EMG Sensor Integration Based on Two-Dimensional Communication, Proc. 5th International Conference on Networked Sensing Systems (INSS 2008), pp.140-147, 2008.
- [10] J. H. Blok, J. P. van Dijk, G. Drost, M. J. Zwarts, D. F. Stegeman: A high-density multichannel surface electromyography system for the characterization of single motor units, Review of Scientific Instruments, Vol.73, No.4, pp.1887-1897, 2002.
- [11] H. Kawaguchi, T. Someya, T. Sekitani, T. Sakurai: Cut-and-Paste Customization of Organic FET Integrated Circuit and Its Application to Electronic Artificial Skin, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.40, No.1, pp.177-185, 2005.

## 著者紹介



## 篠田 裕之 (しのだ ひろゆき):

1988年東京大学工学部物理工学科卒業。1990年同大学院計数工学修士、1990年より同大学助手、1995年博士(工学)。同年より東京農工大学講師、1997年より同助教授、1999年UC Berkeley客員研究員、2001年東京大学大学院情報理工学系研究科助教授、2007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、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。