

# 素材表面に形成する高速センサネットワーク

篠田 裕之\*

\* 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  
 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, Japan  
 \* E-mail: shino@alab.t.u-tokyo.ac.jp

キーワード：センサネットワーク (sensor network), ネットワークセンシング (networked sensing), 二次元信号伝送 (two-dimensional signal transmission), 表面 LAN (surface LAN).  
 JL0002/07/4602-0098 © 2007 SICE

## 1. はじめに

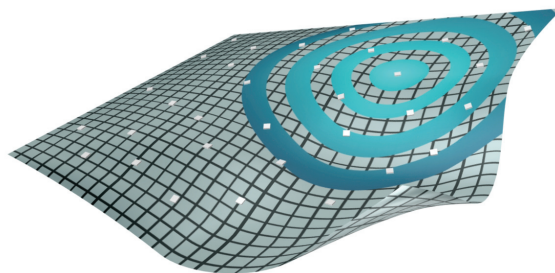
多数のセンサを配置し、ネットワークに結合する物理的手段の最適な形態は、その環境、センサ配置の空間密度と使用する帯域によって決定されると考えられる。

例えば 50 m 四方の農園に数台程度の監視カメラを設置する場合を考えよう。この程度であれば、各カメラに電源線と信号線を有線接続するのに大きな困難は伴わない。ところがこの 10 倍の 500 m 四方に 100 台を設置する場合や、設置場所が状態の悪い山岳地帯の場合には、配線の作業量は著しく増大する。この場合には無線のセンサノードであることが強く望まれるであろう。

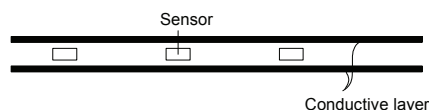
無線通信は、多くの場合にセンサの物理的な配置の手間とコストを最小化する通信手段である。人工物の存在しない広大な領域にセンサを分布させる場合には、他に選択肢が存在しないことも多いであろう。そしてそのような場所で利用可能なセンサノードは、工場、市街地、建物や乗り物等へも設置可能と考えられ、「無線センサネットワーク」という研究領域が誕生した。

しかし実際に無線のセンサを応用しようとする時、しばしば困難に遭遇する。第一の問題が、センサノードが消費する電力を供給する問題である。限られた電池で一定期間、例えば数年間動作を継続しようとした場合、センサに許される単位時間あたりの伝送情報量は、極めて僅かなものに限られる。連続的に画像情報を伝送しようとするれば、たちまち電池を消耗してしまう。センサノード側から外界に働きかける表示装置やアクチュエータなども、消費電力の観点から搭載することができない。無線センサネットワークの技術開発においては、電池消費を極限にまで抑えるプロトコル開発が主要開発項目の一つになっている。しかしそれらの研究目標は、必要なとき以外のセンサノードの活動を抑えるとともに、マルチホップ転送時の無駄を排除することである。各センサあたりの平均スループットがもともと大きい情報伝送に関しては、電池容量を拡大するか新しい発電方式・電力伝送方式の出現を待つほかない。

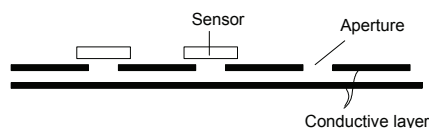
第二の問題が、混信の問題である。近年無線 LAN 対応機器同士の混信やタグリーダーとの混信などが問題となり始めているが、今後さらに身近な日用品や家電製品までが無線化されていくことで、混信の深刻化が懸念され始めて



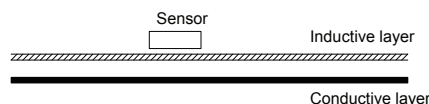
(a) 二次元通信の概念図。薄いシート中を電磁波が伝播する



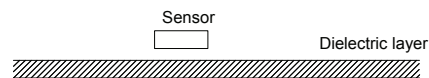
(b) 3層構造内部への素子実装



(c) 最上層開口部への素子実装



(d) 誘導性表面上への素子実装



(e) 単層誘電体による通信

図 1 二次元通信の物理形態 (断面図)

いる<sup>1)</sup>。使用できる帯域は有限であるから、通信端末の無制限の増大は許されない。特にマイクロ波帯までの電磁波は、隣の部屋や建物に容易に届いてしまい、このことが混信の対策を困難にする。自分が把握できる範囲で適切に帯域割り当てを行なったとしても、未知の機器からの妨害を容易に受けてしまう。

この問題は、センサネットワークにおいても例外なく当てはまる。大量のセンサが高密度に分布し、それぞれが高速通信することがきわめて有用であったとしても、特定の

センサの都合だけで勝手に通信帯域を使い切ってしまうことは許されない。このことはセンサ開発者の発想の幅をも狭めてしまうことになる。

本稿では、配線(一次元通信)でもなく無線(三次元通信)でもない第3の通信物理層として、薄いシートや物体の表面に沿って伝播する電磁波を利用する二次元通信について紹介する。ここで想定している物理的ネットワークの典型的な規模は、概ねオフィスの一部屋程度であり、床、机、衣服などの表面に、高密度、高速なネットワークを形成することを想定している。二次元面内には配線が存在せず、シート表面上任意の地点にセンサノードが近接することでネットワークに結合する。電磁エネルギーが面の近傍に閉じ込められている性質を利用して、前述の二つの問題が解決される。すなわち二次元面を通してセンサの動作電力が供給される。つぎに空間中の電波とは干渉しない信号空間が二次元面内に形成されることで、多数のセンサが無線と混信することなく高速結合される。通信のための消費電力は、伝播範囲が二次元面内であるため無線の場合より小さい。

三次元通信としての無線と比較したときの二次元通信の難点は、表面に特殊な通信層を必要とすることである。しかし二次元通信層は様々な低コスト素材で実現することができる。例えば机の表面にあらかじめ組みこんでしまえば、通信層を備えることによる製造コストの増分はごくわずかである。また導電性の糸を編んだファブリックを通信層に用いれば、伸縮可能な柔軟素材の中にセンサを分布して動作させることもできる。

## 2. 二次元通信関連技術の開発動向

薄いシートや表面に電磁エネルギーを局在させる方法として、いくつか可能な選択肢が考えられる。最も素朴な形態は、図1(b)のように平面的な導体の層をバスとして、そこに多数の素子を電気的に接続する方法である。このタイプを用いて各々がIDをもつセンサを集積した例としては、触覚素子を柔軟シートに集積した研究<sup>2)</sup>があり、通信ノードが層の外側からプッシュピンによって各層に接続するLaerhovenらのPin & Playシステム<sup>3)</sup>、LiftonらのPushpin Computing<sup>4)</sup>がほぼ同時期に提案されている。しかし2層の平行導体板は巨大なコンデンサを形成してしまうため、バスとして的高速駆動は一見すると困難である。そのため研究4)においてはプッシュピンによって直流電源を得るのみであって信号伝送は無線を用いていた。また研究3)においても極めて低速な信号伝送のアプリケーションが示されるのみであった。これらの方法では導電層と安定な電気的接続を確保するのが難しく、またどこか1箇所がショートすると面全体で通信が途絶えてしまうことも問題であった。筆者も2001年ごろから二次元面内に個別配線なく素子を集積する二次元通信のアイデアを提案し始めていたが、文献5)のように高密度配置されたセンサノードによる

マルチホップ伝送によって高速伝送を実現しようとしていたため、当面の製造コストがかさむことと、通信素子と通信層との電気的接続がやっかいであったことから、具体的な応用を見出すことができなかった。

二次元通信が効率のよい高速伝送を実現できることが示されたのは、研究6)においてである。図1(b)または(c)の構成を前提とし、導電性の繊維や、安価な紙、フィルム素材でマイクロ波を二次元伝送する理論および実験結果が示された。さらに図1(d)に示すように導電性のメッシュからなるリアクタンス層と絶縁層、導電層の3層構造によって、メッシュ層の外側から任意の箇所に近接するコネクタが通信層に結合できることを示した研究<sup>7)</sup>、また図1(b)に示す構造において、センサ素子と通信層が電気的に接続されなくても安定な結合を保つことができることを示した研究<sup>8)</sup>によって、二次元通信をセンサ実装の実用技術として考えることができるようになった。

導電体で誘電体をサンドイッチした図1(b),(c),(d)よりさらにシンプルな構造として図1(e)の構造も二次元通信の候補である。空気の誘電率より大きな誘電率をもつシートの近傍で電磁波を発生すると、光ファイバと同様な原理で誘電体の周囲にエバネッセント波が形成される<sup>9)</sup>。これと同様な原理によって透明体のプレートに光を閉じ込め、光信号伝送を行う技術も近年提案されている。富士ゼロックス社による「光シートバス<sup>10)</sup>」においては、帯状に展開された光信号によってバス接続を行う。

図1(e)の単層構造をマイクロ波帯以下のキャリア周波数信号に適用する際の問題の一つは、材料の厚さと誘電率に一定の制約が課せられることである。すなわち電磁波長に比して通信層が一定の厚みを有していなければ、良好な局在性が得られない。また局在化効果の高い高誘電率材料を使用しようとする、そのことが材料の選択の幅を狭めてしまう。もう一つの問題は、薄い誘電体を用いた場合、電磁エネルギーの大半が層の内部ではなく空間側に出てしまっていることである。このため通信層に接触する遮蔽物によって電磁波が容易に散乱されてしまう。

この他に二次元通信と似たコンセプトをもつ通信方式として人体通信が挙げられる。導電体の一種である人体を伝達媒体として信号を伝送する<sup>11)</sup>。物理的接触によって通信ノードの対応付けが可能であることを活かし、様々な分野での応用が検討されている。物体の表面(特定の装置、人物、商品タグなど)に触れることで通信が確立される点では二次元通信と似ているが、生じている物理現象は二次元通信とは大きく異なっている。人体通信においては3次元空間中に電流パスが形成され、その周囲に3次元近接場が形成される。

また、近接場を利用する通信という意味では、ココモ・エムビー・コミュニケーションズ社<sup>12)</sup>の開発例がある。これは鉄筋などの構造の代表長よりも電磁波長が大きくなる低

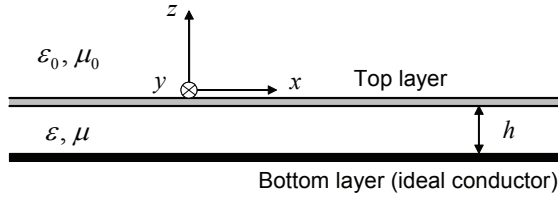


図2 説明に用いる座標系

周波の電磁場を用い、建物の周囲に近接場を形成して通信することで建物外との電磁的干渉を抑制するという技術である。特別な通信層を導入しなくても建物外と隔離した通信が可能になる点で注目に値する技術である。

布地等への素子実装においては、Infineon Technologies社のSmart-Carpetや、NTT関連企業によるCarpet LAN<sup>13)</sup>など、衣服や床材に素子や通信路を実装する技術開発も進められている。これらはいずれも従来の配線実装技術を新しい対象に適用したものと位置付けられる。

このように、2次元伝播するマイクロ波を通信シートに閉じ込め、そこに近接結合するノードが通信と電力取得を行うという形態は、単純でありながらこれまで検討されてこなかった結合手段であり、今後様々な分野での応用が期待できる。以下では特に図1(d)の形態について詳細を解説し、具体的な応用分野を概観する。

### 3. 三層構造型通信層による信号/電力伝送

図1(d)に示すシートの近傍にどのような電磁波が生じるかを以下で簡単に説明する。図2のように座標系をとり、空中および通信層内部の誘電率、透磁率をそれぞれ $\epsilon_0, \mu_0$ および $\epsilon, \mu$ とする。このとき、通信層の近傍を+x方向に伝播する電磁波のモードは、マックスウエルの方程式を解くことによって

$$E_z = \frac{k_2^2}{k_1} V \exp(-k_1 z) \exp(-jkx) \exp(j\omega t) \quad (z > 0) \quad (1)$$

$$\left[ \begin{array}{l} k_1^2 = (\mu\epsilon - \mu_0\epsilon_0)\omega^2 - \frac{j\sigma\epsilon\omega}{h} \\ k_2^2 = \frac{j\sigma\epsilon\omega}{h} \\ k^2 = \mu\epsilon\omega^2 - \frac{j\sigma\epsilon\omega}{h} \end{array} \right]$$

\*ただし  $|k_1 h| \ll 1$  かつ  $|k_2 h| \ll 1$  における近似値

と書かれる。ここでは電磁場の各成分のうち、z方向の電界のみを表記した。また通信層の厚さhは誘電体中の波長より十分小さいことを仮定し、近似計算を行なっている。式中Vは誘電体の上下面間の電圧振幅であり、とくに $x=t=0$ での電圧値に一致する。

なお $\sigma$ は最上層(Top layer)のシートインピーダンスであり、

$$\sigma \equiv R + jX \equiv \frac{E_x}{i_x} \quad [\Omega] \quad (2)$$

と定義される量である。これは、最上層の単位長線分を横切って流れる電流 $i_x$  [A/m]と、最上層に沿った電界 $E_x$ との比であり、実部Rはシート抵抗に相当する。

最上層として有用なのは、Rが十分小さくリアクタンス成分Xが有限の値をもつ層である。特に実現が簡単なのは、最上層を良導体のメッシュとすることである。電磁波長よりも十分細かいメッシュを作成した場合、そのメッシュでの $E_x$ および $i_x$ の平均値によって $\sigma$ を定義し、形成される電磁場についても同様にメッシュ周期での平均値を考えれば(1)式がそのまま成立する。メッシュを用いた場合には、Xは誘導性となり、 $\alpha$ を定数として

$$X = \alpha\omega \quad (3)$$

と書かれる。その場合、通信層内を伝播する波動の速度は、 $c = \omega/k$ より

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon + \alpha\epsilon/h}} \quad (4)$$

で与えられ、光の速さが周波数によらず上式のように減速したものとみなせる。

つぎに通信シートにおける波動伝播の基本特性として、波動の減衰距離 $\zeta$ (振幅が1/eに減衰する距離)を結果のみ記しておく。

$$\epsilon = \epsilon_{re} - j\epsilon_{im} \quad (\epsilon_{re} \gg \epsilon_{im}), \quad \tan\theta = \epsilon_{im}/\epsilon_{re} \quad (\text{誘電正接}) \quad (5)$$

とすると(4)式のcを用いて

$$\zeta = \frac{1}{-\text{Im}[k]} \approx \frac{1}{\frac{\omega}{2c} \tan\theta + \frac{\epsilon_{re} c}{2h} R} \quad (6)$$

が成り立つ(ただし $|\text{Re}[k]| \gg |\text{Im}[k]|$ を前提としている)。数値例として、誘電体の厚さhを1mm、誘電体の比誘電率を1.1、cは真空中の光速と同程度とし、表皮効果を考慮した良導体のシート抵抗Rを注目する周波数において $5 \times 10^2 \Omega$ と仮定すると、誘電正接を0としたときの $\zeta$ は17mとなる。

#### 3.1 近接コネクション

最上層が均質な良導体、すなわち $\sigma = 0$ の場合には、通信層の外部にはまったく電磁場が染み出すことがなく、通信層内のエネルギーを外部に取り出すことはできない。しかし $\sigma$ が有限である場合には、通信層の表面にエバネッセント波が形成され、外部と相互作用するようになる。

通信層が単独で存在するとき、通信層の内部を流れる電磁エネルギー $J_2$ に対する通信層の外に染み出して流れる電磁エネルギー $J_1$ の比を漏出比rとして定義すると、

$$r \equiv \frac{J_1}{J_2} = \frac{\pi\epsilon_0}{\epsilon} \frac{\gamma^2}{\sqrt{1+\gamma}} h \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda_0^2}} \quad (7)$$

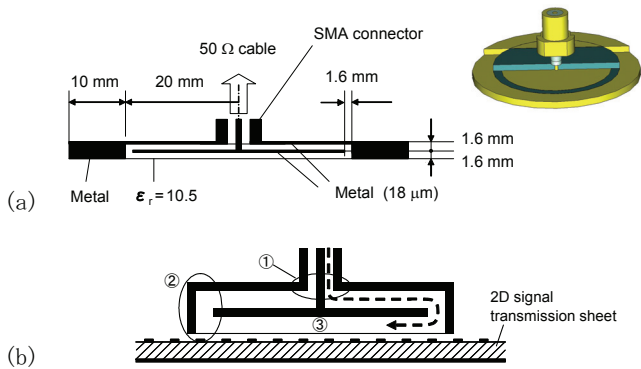


図 3 近接コネクタの構造図(a)と原理説明図(b)

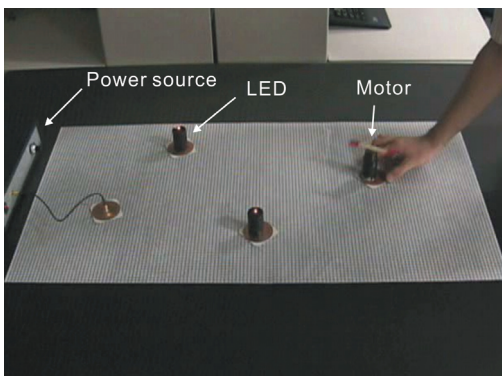


図 4 電力伝送の実験風景. 50×95 cm<sup>2</sup> のシートに 10 W の 2.4 GHz 信号を入力

のように書かれる. ただし  $\lambda_0$  は空気中の電磁波長,  $\lambda$  は通信層の誘電体が空間を埋め尽くしている場合の平面波電磁波長である. また  $\gamma$  はシートリアクタンス  $X$  を下記のように正規化した値である.

$$\gamma = X \frac{\epsilon}{h(\epsilon\mu - \epsilon_0\mu_0)\omega} \quad (8)$$

例えば  $h = 1$  mm,  $\gamma$  を 1 の程度とし, 誘電体の比誘電率を 1 に近づけると,  $r$  を容易に 0.1% 以下に設定することができる. それでいて, 図 3 に示すようなコネクタを近接させたときにはそれと良好に結合するシステムが実現できる.

近接コネクタの最適な設計方法については今後の開発の余地が大きいと考えられるが, ここでは一つの実施例を図 3 に示す<sup>7)</sup>. ケーブルから伝播してきた電磁波は図 3 (b) における波線矢印に沿って軸対称に伝播し, ①, ②および中心軸③で反射する. このときそれぞれの反射が①で相殺するようにコネクタ径を調整することで, 特定周波数の信号を反射なく通信層に導入することができる. なお図 (a) で示されているのは 2.4 GHz において同調する狭帯域型の近接コネクタである<sup>7)</sup>. シートとの接触時に次節で示す理論限界に近い結合特性が得られている. 図 4 は試作した近接コネクタを用いて電力伝送の確認実験を行っている風景である.

### 3.2 二次元通信におけるフリスの伝送公式

軸対称構造のコネクタを通信層に近接させ, 吸い取ることができる電力の上限値は, 以下の式で与えられる. すなわちある地点から  $p$  [W] の軸対称電磁波を 2 次元空間に送出したとき, そこから波長以上の距離  $L$  [m] 離れた地点に配置された等方的なコネクタで吸収できる電力の上限  $P_{\max}$  は,

$$P_{\max} = \frac{\lambda}{(2\pi)^2 L} p \quad (9)$$

で与えられる<sup>6)</sup>. これは放射源から広がる円筒波を, 受信点に向かってエネルギーが流れる軸対称な円筒波解  $\Phi$  を基底として含む正規直交基底で展開し,  $\Phi$  成分の強度を求めたものであり, 最良の(軸対称)コネクタを作ったときに吸収できる上限値を与える式である. ここで  $\lambda$  は通信層における波長であり, (1) 式の  $k$  を用いて  $\lambda = 2\pi/k$  で与えられる. 吸収可能な電力  $P_{\max}$  は電磁波長に比例するから, 広い通信層の中の 1 点に孤立して存在する通信素子が吸収できる電力を最大化するという観点において信号周波数は低い方がよい. 従って情報信号のエネルギー伝送効率を向上させる観点からは, 信号周波数を伝送スループットより極端に大きくすることは好ましくないといえる.

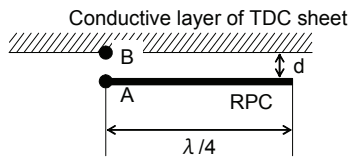
つぎにセンサの動作電力を電磁波で供給する問題を考えよう. 先の式 (9) は, 平面波が等方的コネクタを横切るとき, 波面に平行で長さが

$$w = \lambda/2\pi \quad (10)$$

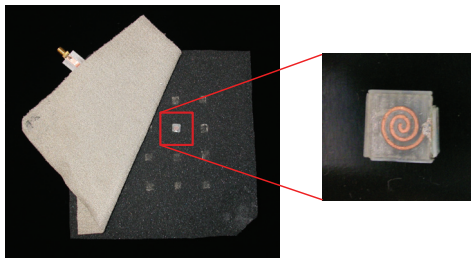
の等価線分を横切る波動のエネルギーが吸収されると考えてよいことを示している. いまセンサが比較的密に分布しており, 隣あうセンサとの間隔が  $w$  の程度であったとする. その場合には, 通信層に供給される電磁エネルギーはセンサによって無駄なく吸収される. すなわちセンサ側の電力吸収プロトコルが適切であれば, 波長  $\lambda$  の電磁波の大半を吸収することが理論上は可能である. したがってセンサの配置密度が高い場合には, 信号周波数と電力供給周波数を近い値に設定し, 同一の近接コネクタを共用することが合理的設計となる.

### 3.3 その他の近接結合方式

図 1 (b) のような構造においては, 波長に対して著しく小さいコネクタであっても通信層への安定した近接結合を確保することができる. 以下では人工皮膚での応用を想定したスパイラル電極によるコネクタを紹介する<sup>8)</sup>. 図 5 (b) に示すスパイラル状の電極が導電層に近接すると, 電極と導電層の対は一種のマイクロストリップラインを形成する. 図 5 (a) は原理説明のためにスパイラルを引き伸ばした図である. 電界は導電層に対して垂直, 電流は水平方向に流れる. ここで電極の一端 A とそれに近接する導電層の一点 B との間のインピーダンス  $Z$  に着目する. AB 間に電圧を引加すると, スパイラル電極の総延長距離が  $\lambda/4$  の場合に A 点が電流振幅の腹となり,  $Z$  は極小値となる. 数値シミュレ



(a) スパイラル近接電極の原理説明図



(b) 柔軟触覚センサの構造

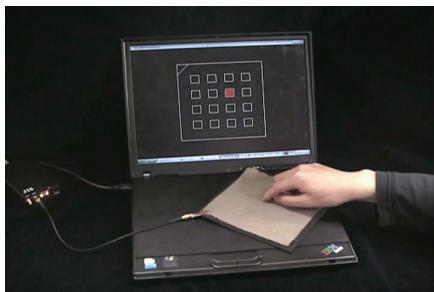


図 5 柔軟触覚センサの実現例

ーションによれば、コネクタと導電層の間隔が  $0 \sim 0.5 \text{ mm}$  まで変動したときのインピーダンスの変化は  $2.4 \text{ GHz}$  において数  $\Omega$  以下であり、例えば厚さ  $1 \text{ mm}$  の通信層の放射インピーダンスよりも小さい変動範囲にすることができる。このことは通信素子と導電層とが非接触であったとしても、その距離によらず安定した結合が維持できることを意味する。図 5 (b) はこのような電極を触覚素子に実装した人工皮膚の実現例である<sup>8)</sup>。通信素子と導電層の間に電気的な結合が存在しないことによって、柔軟性を維持した丈夫な人工皮膚を実現することができる。

#### 4. アプリケーション

二次元通信は、線による配線、無線の通信に並ぶ新しい通信形態の選択肢であるから、LAN、RFID タグ、情報家電やコンピュータ周辺機器の接続など、多様な分野での利用を想定することができる。例えば二次元通信は素子動作の電力を効率よく伝送することができるため、消耗品に取り付ける RFID タグに、発光機能など人間とのインタフェース機能を持たせることも可能になる。そうすれば取り出した物品の方が光って所在を教えてくれたり、品質保持期限の切れた物品がアラームの点滅をしてくれたりすることによって、物品の管理・検索の負荷が大幅に軽減し、薬品取り違いなどの事故を防いでくれることになる。

センサが関係する分野に限っても多様な展開が期待できる。わずかなコストで多数のセンサが設置できるようになれば身の回りの安全性は確実に向上する。人々がより快適で安全な社会を目指すことによって、人間を取り囲むセンサ数はますます増大していく。床に多数の接触センサを配置すれば最も確実な侵入者検知が可能となるし、独居老人の転倒などを知ることもできる。壁紙に多数の温度センサを設置すれば部屋の温度制御はより正確になるが、それに加えて歪みセンサを設置することで、地震後の倒壊の危険を察知することも可能になる<sup>14)</sup>。自動車の中には車内の状態を検出して快適・安全に役立てるためのセンサがすでに多数搭載されているが、運転席から内外壁にいたるまで、コストさえ許せばセンサの数はますます増大していくものと思われる<sup>15)</sup>。二次元通信はこれらのセンサネットワーク実装を可能にする技術である。

安全においても一つ重要な観点情報は情報漏洩のセキュリティである。無線 LAN の情報漏洩については、企業の機密保持の観点からはすでに問題となっているが、センサ情報においても、その漏洩管理は重要課題である。不定期に発生するセンサ情報においては、信号の有無だけでも部屋の中の様子を知る手がかり情報となりうる。したがってデータの暗号化とともに、二次元通信のような手段によって物理的に信号を外部に漏洩させないことが、確実なセキュリティ管理のために有効であると考えられる。

また、昨今は巨大な情報世界に簡単にアクセスできるようになった反面、デジタルデバイドの問題も深刻になりつつある。特別な知識やスキルを持たなくても、万人が有用な情報を引き出せるよう、インタフェースを充実することは重要な課題である<sup>16)</sup>。ユーザーを適切にサポートするためには、人間の状態を細かく検出することが必要であり、ここにおいても二次元通信技術の活用が可能であると思われる。

二次元通信は、柔軟なデバイスに多数のセンサを埋め込んで動作させることを可能にする。これによって人間が快適に身につけられるウェアに多数の分布型センサを実装することが可能になる。最近筆者らが提案しているのが、リストバンド型筋電位計測デバイス<sup>17)</sup>である。筋電位計測の歴史は古く、義手への指令信号をはじめ、近年ではパワーアシストスーツ<sup>18)</sup>などにも応用されている。現在構想しているのは、全身の表面に現れている筋電信号を、肌着のように快適に装着できるデバイスで計測し、情報インタフェースとして役立てることである。柔軟な繊維層に多数の微小計測ユニットを図 6 のような方法によって近接結合することにより、柔軟性を損なわない実装を実現する。素材の伸縮性を利用して乾式電極アレイを皮膚に密着させ、計測データを二次元信号伝送することで、高解像度の二次元筋電パターンを検出する。そのパターンから筋肉を特定するため、装着時の位置あわせは不要である。例えば手首に装着した

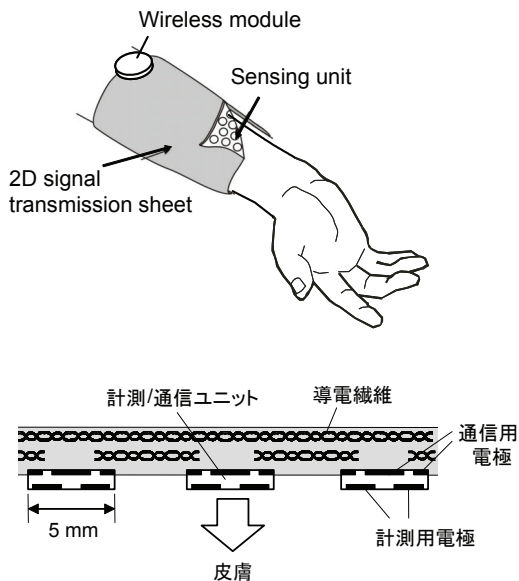


図 6 リストバンド型筋電計測サポータの構想図。装着した様子（上）と、デバイスの断面図（下）<sup>17)</sup>

場合には、手先での作業を妨害することなく、指の運動や力の状態を把握できる。このように、常時身に付けていても苦にならない筋電計測デバイスが実現すると、スポーツ等のスキルの伝達補助をはじめ、コマンド入力、操作量入力など情報インタフェースとして様々な応用が考えられる。筋電は実際に指が動き出すより 0.1 秒程度早く発生することから動きの予測が可能なる点も重要である。このことにより危険回避の補助、例えば足に装着することでブレーキングを早める、等の応用も期待できる。また筋肉疲労の直接計測への応用も興味深い。

## 5. おわりに

多数のセンサを物理的に結合する形態として、二次元通信を紹介した。二次元通信の個別の実現方法に関しては未だ発展途上にあるが、長期的には少なからぬ割合のセンサネットワークが二次元通信という形態で実装されるものと考えられる。素子の動作電力を伝送できること、信号の到達範囲を面内に限定できることは、大量の通信ノードが高速通信するために重要な性質である。現時点の二次元通信は、二次元通信路と近接接続の技術であるが、今後は高密度に配置されたセンサノード間のマルチホップ信号伝送へと開発が進展し、さらに新しい可能性が開けてくると思われる。

(2006年11月9日受付)

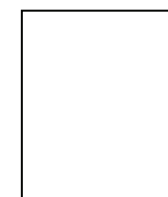
### 参考文献

- 1) Charles W. Einolf: Wireless Communications – Spectrum Challenges in Today's Environment, Proc. SICE-ICASE International Joint Conference 2006, Plenary talk 2, Korea (2006)
- 2) 篠田裕之: 柔らかい機械の人工皮膚, 日本ロボット学会誌 Vol.

- 19 No. 7, pp.814 ~ 817 (2001)
- 3) K. V. Laerhoven, N. Villar, A. Schmidt, and H.W. Gellersen: Pin & Play: The Surface as Network Medium, IEEE Communication Magazine, pp. 90-95 (2003)
- 4) J. Lifton and J. Paradiso: Pushpin Computing System Overview: A Platform for Distributed, Em-bedded, Ubiquitous Sensor Networks, Proc. Perv. Comp., LNCS 2414, pp. 139-151 (2002)
- 5) Hiroyuki Shinoda, Naoya Asamura, Mitsuhiro Hakozaki, and Xinyu Wang: Two-Dimensional Signal Transmission Technology for Robotics, Proc. 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, pp.3207-3212 (2003)
- 6) Yasutoshi Makino, Kouta Minamizawa and Hiroyuki Shinoda: Two Dimensional Communication Technology for Networked Sensing System, Proc. INSS2005 (Second Int. Workshop on Networked Sensing Systems), San Diego, pp. 168-173, June (2005)
- 7) Yasutoshi Makino, Naoshi Yamahira, and Hiroyuki Shinoda: Proximity Connector for Two-Dimensional Electromagnetic Wave Communication, Proc. IEEJ 23rd Sensor Symposium, pp. 397-402 (2006)
- 8) Hiromasa Chigusa, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda: Large Area Tactile Sensor based on Proximity Connection of Tactile Sensing Elements, Proc. IEEJ 23rd Sensor Symposium, pp. 437-442 (2006)
- 9) John Daniel Kraus and Daniel A. Fleisch: Electromagnetics with Applications, 5th Edition, McGraw-Hill, pp. 480-487 (1999)
- 10) <http://www.fujixerox.co.jp/company/technical/osb/index.html>
- 11) Mitsuru Shinagawa, Masaaki Fukumoto, Katsuyuki Ochiai, and Hakaru Kyuragi: A Near-Field-Sensing Transceiver for Intrabody, Communication Based on the Electrooptic Effect, IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement, Vol. 53, No. 6, pp. 1533-1538 (2004)
- 12) <http://www.cocomomb.co.jp/>
- 13) Masaaki Fukumoto and Mitsuru Shinagawa: Carpet LAN: A Novel Indoor Wireless(-like) Networking and Positioning System, Proc. of UbiComp 2005, pp. 1-18 (2005)
- 14) Keiichi Okada and Michihito Shiraishi: Peak Hold Sensor System for Post-Earthquake Structural Health Monitoring, Proc. 23rd Sensor Symposium, pp.541-544 (2006)
- 15) 第 55 回システム制御情報講習会資料, 最新センサ技術が切り拓く未来のクルマ社会 (2005)
- 16) 文部科学省科学研究費補助金「特定領域研究」情報爆発時代に向けた新しい IT 基盤技術の研究  
<http://itkaken.ex.nii.ac.jp/i-explosion/index.php>
- 17) 牧野泰才, 篠田裕之: 二次元筋電分布を計測するリストバンド型マン・マシンインタフェース, 第 23 回センシングフォーラム資料, pp. 293-298, Oct (2006)
- 18) Yoshiyuki Sankai: Leading Edge of Cybernics: Robot Suit HAL, Proc. SICE-ICASE International Joint Conference 2006, Plenary talk 1, Korea (2006)

### [著者紹介]

篠田 裕之 君 (正会員)



1988年東京大学工学部物理工学科卒業。90年同大学院計数工学修士, 90年より同大学助手, 95年博士(工学)。同年より東京農工大学講師, 97年より同助教授, 99年 UC Berkeley 客員研究員, 2001年より東京大学情報理工学系研究科助教授。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。