

空間配置自由度が高い ウェアラブルコンピュータ向けネットワークシステム

秋田 純一[†] 新村 達[†]
村上 知倫[†] 戸田 真志^{††}

ウェアラブルコンピューティングやユビキタスコンピューティングにおいては、安定した電源供給方式、通信方式と高い空間配置自由度の確保は根本的な問題となる。すなわちウェアラブルおよびユビキタスコンピュータシステムでは、コンピュータやデバイスが空間に分散して存在し、各デバイスが電力を必要とするだけでなく相互通信も必要となる。この通信方式には無線通信と有線通信が考えられるが、無線通信では各デバイスへの長期的な安定した電力供給の方法が問題となり、また有線通信では電線の敷設にともなう空間配置の自由度の制約が問題となる。本稿では、ウェアラブル・ユビキタスコンピューティングシステムにおいて、これらの問題を解決できるネットワークシステム TextileNet を提案する。これは、衣服の表と裏にそれぞれ導電性布を用いて電極として用い、ここに1個のバッテリーから電力を供給する。そしてピンバッジのようにデバイスを衣服に差し込むことで実装が完了し、衣服表面電極に電源と信号を重畳することで、電源供給とデータ通信を行うことができる。本稿ではこの TextileNet システムの提案と実装、および評価を述べる。

Flexible Network System for Wearable Computing

JUNICHI AKITA,[†] TORU SHIMMURA,[†] TOMOMICHI MURAKAMI[†]
and MASASHI TODA^{††}

Numbers of devices distributed in wearable and ubiquitous environment requires stable power supply, communication channels, and flexibility of placement. There are two possible solutions for these problems; the wireless system and the wired system, but neither of them cannot satisfy these requirements perfectly. The wireless system has the problem of power supply method for devices, while the wired system has the restriction of physical placement for the complicated cables. In this paper, we propose the flexible network system, named as TextileNet, for wearable and ubiquitous computing systems that can solve these problems. TextileNet employs the wear whose both sides consist of low-resistance cloth as electrodes, and the power are supplied from a battery to the attached devices. The devices are attached on the wear by sticking the pin, and the devices can obtain both the power and communication channel by superposing of them on the conductive wear. This paper describes TextileNet system, as well as its implementation and evaluation.

1. はじめに

コンピュータの世界で、ウェアラブル、ユビキタスといった言葉が注目を集めて久しい。身の回りのあらゆるものにコンピュータ、各種センサ、アクチュエータ（ここでは、モータなどの可動部を備える機器だけでなく、ディスプレイなども含めた、コンピュータの出力デバイスの総称として用いている）が埋め込まれるユビキタスコンピューティング、また様々なデバイス

を身にまとうことで、ユーザの生活をさりげなく支援してくれる（あるいはユビキタスシステムとのインタフェースとなる）ウェアラブルコンピューティングにおいては、それらの有機的な結合によって従来とはまったく異なる、新しいコンピュータシステムのパラダイムの展開が期待されている¹⁾。

ウェアラブルあるいはユビキタスをキーワードとした新しいタイプのシステムも数多く提案されており、情報デザイン、ファッションあるいはアプリケーションなどの様々な観点から議論されている。たとえば極限状態での作業支援²⁾、消防服³⁾、戦闘服⁴⁾、看護支援⁵⁾、ライフログ⁶⁾、医療モニタリング⁷⁾、災害時の救助支援⁸⁾ など数多くの研究がある。

[†] 金沢大学

Kanazawa University

^{††} 公立はこだて未来大学

Future University-Hakodate

しかしこの種のシステムでは、各デバイス（コンピュータ、センサ、アクチュエータなど）の設置方法および接続方法が根本的な問題となる場合が多い。特に電源とデータ通信路の確保は、ほぼあらゆる応用面において根本的に重要な問題として指摘されている。

なお、ここで対象としているのは、機能を特化したウェアラブルまたはコピキタシステムではない。本格的なウェアラブル・コピキタ社会を迎え、個人がそれぞれのライフスタイルに応じて、自由にウェアラブル・コピキタを活用するためには、各デバイスの設置の自由度を確保しつつ、容易な敷設を可能とするような基盤システムが必要であると思われる。すなわち、衣服に装着するブローチやバッジのように、各デバイスの設置箇所や態様を自由にアレンジでき、かつ各デバイスに必須である電源供給路と通信路を基盤として提供されるネットワークシステムにより、個人が好みのシステムを構成することを可能とし、「気軽にウェアラブルまたはコピキタ」を実現しようとするものである。

本稿では、上記の考えを実現するために、導電性素材を両面に用いた衣服を1組の電極として用い、そこに空間的に自由に装着できるデバイスが1つの電力源からの電力供給を受け、かつ相互通信を行うことができるシステムについて述べる。

2. 既存技術・関連研究

2.1 既存技術とその問題点

前述のような、ウェアラブル・コピキタ時代に、その基盤システム、すなわちインフラストラクチャとしてのネットワークシステムに求められる機能は、次のように要約することができる。

- できる限り多数の機器を接続可能であること
- 機器の設置場所の制約ができる限り少ないこと
- 種々の機器が混在し、互いに独立な通信路を確保できること
- 機器が電力を供給されること

ウェアラブルコンピューティングあるいはコピキタスコンピューティングを見据えたセンサ・アクチュエータのネットワークの実装方式に関する研究や技術は、大きく無線通信システムと有線通信システムに区分される。

無線通信システムの例としては赤外線通信や Bluetooth、微弱無線機などがあり、デバイス間の通信のための通信ケーブル敷設の必要がないという利点がある。しかし各デバイスは、電源的に相互に独立して稼動する必要があるため、デバイスごとにバッテリーを持

つ必要があるが、バッテリー寿命とそれにとまなうメンテナンスの問題が不可避である。また無線通信では、情報漏洩や外部からの侵入という問題が根本的に避けられない。

一方の有線通信システムでは、あらかじめ環境内に通信および電源供給のためのケーブルを、電灯線やネットワークケーブル、信号ケーブルなどとして埋め込むものであり、無線通信システムで問題となる電源供給の問題は解決される。しかしながら敷設されたケーブルを再配置することは原理的に困難であり、各デバイスの配置位置の変更などの、システム構成の変更の自由度が著しく損なわれることになる。

すなわち、既存の無線システム、有線システムのいずれも、前述の求められる機能をすべて満たすことはできない。

2.2 関連研究

このような、無線通信および有線通信が持つ問題点を解決するため、本稿と似たアプローチで、導電性素材を衣服に用い、これを電極として用いるシステムに関する研究がある。

Networked Vest⁹⁾ は、導電性素材を両面に用いた衣服と、そこに DC-PLC (直流電力線通信) 方式のモデムを備えるデバイスを装着し、直流の電力供給とキャリア周波数が数 MHz の FSK (Frequency Shift Keying) 変調による通信を行うシステムである。100 kbps 程度の通信速度と、周波数分割による多重通信の可能性を述べており、また伝送路である導電性衣服のインピーダンスマッチングのための導電性衣服の抵抗値の推定を行っている。しかし DC-PLC の性質として導電性衣服のインピーダンスの変化に対する安定性が低く、また多対多通信のためのルーティング機能などの実装には至っていない。

Pin&Play システム¹⁰⁾ は、壁の両面を平面電極とし、そこに電力通信重畳方式である 1-Wire¹¹⁾ を用いたデバイスを装着するシステムであり、電力供給の問題とケーブル敷設の問題を解決している。この Pin&Play システムは、その後、導電性衣服を用いたウェアラブルコンピューティングシステムへと拡張されている。しかし通信の物理層として 1-Wire を用いるため、通信速度が、近距離の場合には 115 kbps まで可能であるものの一般には 1 kbps 程度と遅く、またマスター-スレーブ形式のネットワーク構成に限定されるため、ネットワークシステムの構成としては自由度が欠ける。

PushPin システム¹²⁾ は、平面電極を用いて配置自由度の高い分散システムを構築するものであるが、平

面電極を電力供給のみに用いており、デバイス間の通信は無線通信を用いている。

Randell ら¹³⁾ は、導電性素材からなる衣服をウェアラブルコンピューティングにおける電力供給に用いることを検討しているが、通信機能の実装には至っていない。

このほかにも、平面の導電性素材ではなく、導電系によって衣服を構成し、ネットワーク機能などを持たせるシステムに関する研究もある。

Electronic Textiles¹⁴⁾ は、縦糸と横糸に、絶縁被覆を持つ導電系を用いて編んだ布を用いるシステムであり、縦糸と横糸の交差点にデバイスを装着することで導電系を用いたケーブルの存在しないネットワークを構築するものである。しかしデバイスの配置が縦糸と横糸の交差点に限られ、また複数のデバイスが縦糸や横糸を共有する場合の通信制御などは行っていない。

多数のケーブルを用いるウェアラブルコンピューティングシステムに関する研究は多数ある^{15),16)}。

医療モニタリングシステムは、ウェアラブルコンピューティングの最も期待される応用の1つであり、関連する研究が多数あるが^{17),18)}、いずれも前節で述べたような、ケーブルの煩雑さの問題、あるいは電源供給方法の問題のいずれかは、根本的には解決されていない。

この両者の問題を解決するために、電力を無線方式で送るシステムもいくつかある。CoBIT¹⁹⁾ システムは、音声信号で変調された光源からの光を太陽電池を持つ受信機が受けてイヤホンを駆動するシステムであり、受信機が電源を持つ必要がないが、供給可能電力は数 mW であり、用途は消費電力がきわめて小さいイヤホンなどに限定される。

RFID システム²⁰⁾ は、電磁波によって電力供給と通信を行う無電源タグシステムであるが、電磁波強度の制限から、受信機側での利用可能な電力はきわめて小さい。

3. TextileNet の設計

3.1 設計の指針

本稿で提案するネットワークシステム TextileNet は、

- デバイスへの電源供給問題の解消
- デバイス間の通信路確保の問題の解消
- デバイス間の接続、すなわちシステム全体の構成・変更の自由度がきわめて高い

の3つの特徴を同時に有するものであり、上述した有線・無線通信システムのかかえる問題の抜本的な解決を目指すものである。

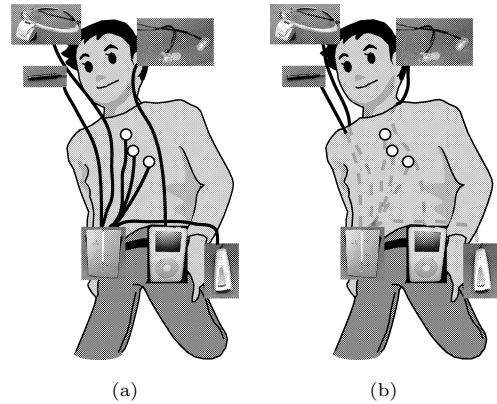


図1 ウェアラブルコンピューティングの利用形態。(a) 従来のウェアラブルコンピューティング、(b) TextileNet を用いたウェアラブルコンピューティング

Fig. 1 Using situations of wearable computing. (a) Former wearable computing, (b) Wearable computing using TextileNet.

TextileNet は、ウェアラブルコンピュータを含む日常生活の中でユーザにとって必須である衣服を、システムの基盤となる環境ととらえ、衣服の表面と裏面を導電性の素材として1組の信号線とし、コンピュータ・センサ・アクチュエータ間をこの1組の信号線のみを使って接続し、ここに電源と信号を重畳することで、電源供給とデータ通信の両方を行うものである。この方式によって衣服上に装着されたデバイスは、装着場所に依存せず、つねに相互に接続されていることとなるため、衣服の任意の位置に、相互に2本の信号線で接続されたセンサやアクチュエータを配置することが可能となる。つまり図1(a)のような、各デバイスが独立した電線で接続されている従来のウェアラブルコンピュータ環境に対し、このTextileNetのアーキテクチャでは図1(b)のように電線が存在せず、しかも電源供給方式の問題と空間配置自由度の問題の両方を解決することができると思われる。

ただしこれらの機能を有しつつも、衣服としての基本性能を損なわないことは必要である。すなわち十分な柔軟性があり、加工・縫製に際して特別な道具や経験を必要とせず、色や素材、手触りなどの観点からファッションとして楽しめるものでなければならない。

なお通信速度の観点からは、電源供給のみを導電性衣服を通して行い、通信を無線方式で行う方式も現実的であると考えられる。しかし無線通信では、情報漏洩や外部からの進入という問題が根本的に避けられない。本稿で提案するTextileNetの方式は、伝送路の特性インピーダンスが一定でないために無線通信方式よりも通信速度は高くしにくいものの、無線通信で問

題となるこれらの点は問題とならない。また無線通信方式よりも空間への電磁波の放射強度が弱いため、人体への影響や通信回路の消費電力、およびその回路規模が小さくできるという利点もある。以上の観点から、TextileNet で用いる衣服を伝送路として用いる有線通信方式も応用面が広いと考えられる。

なおセンサやアクチュエータなどの配置の自由度については、用途によっては腰につけたウェアラブルPCと頭部に装着するディスプレイ（HMD）のように装着場所が限定される場合もある。しかし利用者の体全体の筋電位や発汗量などを常時測定する、いわゆる生体モニタリングへの応用では、多数のセンサを、自由な場所に装着することができる必要があり、またこれらのセンサからの情報の収集のためには高速な通信が必要となると考えられる。またネットワーク上での通信形態も、たとえばウェアラブルPCとHMDなどのほか、携帯音楽端末とヘッドホンなどのように、本格的なウェアラブル・コンピュータの時代には、多種多様な機器が身につけられ、相互に独立な通信を行う必要があると考えられる。これらの、来るべき要求に応えるべく、本TextileNetでは、配置自由度をできる限り高め、通信速度をできるだけ高め、かつマスター・スレーブ式ではない、ネットワーク上の自由な通信形態をとることができるように設計する。

3.2 通信モジュールと電源モジュールの設計

2本の信号線に電源・信号を重畳する通信方式に関する技術としては、建物内の電灯線を通信にも活用する、いわゆるPLC（Power Line Communication）²¹⁾と呼ばれる技術も特に近年開発がさかんであるが、デバイスの小型化が困難であり、また人体への安全性で重要な低電圧化が困難であるため、このままTextileNetで利用することは困難である。また多数のセンサを1組の信号線を用いて接続するシステムとして1-Wire¹¹⁾があるが、通信速度が遅く、またマスター・スレーブ式のネットワーク構成であるため、スレーブとなるデバイス間が直接に通信を行うことができないなどのネットワーク構成の自由度が低い。

以上のような背景をふまえ、本TextileNetシステムでは、独自の電源・信号重畳方式による通信モジュールを新規に設計することとした。本TextileNetシステム向けに設計した電力・通信重畳方式の等価回路を図2に示す。これは1個の電力供給モジュールと、複数個の通信モジュール、および容量性負荷である衣服表面からなり、電力供給モジュールは、バッテリーなどから供給される電力を、衣服表面を通して各デバイスに供給する機能を持つ。また通信モジュールは、衣服

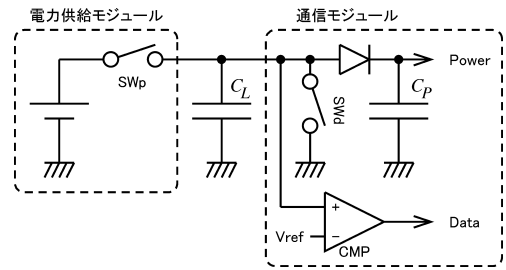


図2 TextileNetシステムの等価回路

Fig. 2 Equivalent circuit of TextileNet system.

表面を通して電力供給を受け、かつデータの送信および受信を行う通信機能を備える。

まず電力供給モジュールのスイッチ SW_p を一時的にONとして大きな容量性負荷 C_L である衣服表面を V_H （10V程度）まで充電し、その後OFFとする。衣服表面に蓄えられた電荷は、各通信モジュールが電力として利用するために次第に衣服表面の電圧は下がっていくが、これが各デバイスの動作に支障のない限界である V_L まで下がったところで、再度スイッチ SW_p をONとして再度充電し、この動作を繰り返す。

一方各通信モジュールのうちのいずれかがデータを送信する際には、スイッチ SW_d によって時間 t_0 の間だけ衣服表面の電圧を下げることで、データ“0”を発信する。その期間の通信モジュールへの電力は、各通信モジュールが備えるコンデンサ C_P によってまかなわれる。また電力供給モジュールは、この衣服電圧の低下を検出して一時的にスイッチ SW_p での充電を停止し、時間 t_0 が経過した後に再度スイッチ SW_p をONとして電力供給を再開する。なおこの1個の通信モジュールが発信したデータ“0”は、この通信モジュールを含む全通信モジュールが受信することになり、各通信モジュールが備える電圧比較器CMPによって“0”または“1”のデータとなる。最初の“0”を、通信開始を示すスタートビットとし、その後、決まったビット数のデータが、決まった時間間隔で送られるとする、いわゆる調歩同期式のプロトコルにより、1バイト単位でのデータ送受信が可能となる。このような、図3に示すような一連の動作によって、電源供給と通信の重畳を実現できることになる。なお実際には各デバイスが必要とする電源電圧は種々であるため、通信モジュールには、衣服に電源として印加される電圧から必要な電源電圧を生成するDC/DCコンバータを備えている。

通信モジュールは、このように電力供給と1バイト単位のデータ送受信の機能のみを持ち、これの上に積む形で接続される、センサやディスプレイなどの用途

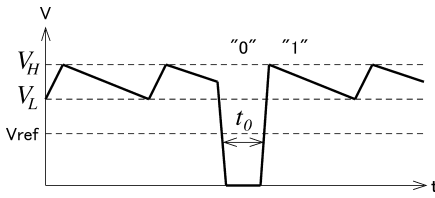


図3 TextileNet 動作時の衣服表面電圧の変化

Fig. 3 Voltage wave on textile in operation of TextileNet.



図4 電磁波シールドクロス

Fig. 4 Cloth to guard electromagnetic wave.

に応じた各種デバイスへの電力供給と通信データの送受信を行う基盤として機能する。

3.3 導電性衣服の設計

本 TextileNet を効果的に動作させるための基盤, すなわち衣服の設計にあたっては, 以下のような事項が必要であると考えられる。

- 表面抵抗値が低いこと
- 既成の布と同程度の柔軟性や加工の容易さが確保されること

これらの事項を満足する素材として, 今回は電磁波シールドクロスを用いた。これは, ナイロン糸に銀をコーティングし, メッシュ状に編み上げた素材であり, 表面抵抗値が $0.5 \Omega/\text{sq.}$ 以下ときわめて低いために, 導電路として十分な性能であると考えられる。全面がシースルーの形態であるため, 衣類としての仕立てが比較的容易であり, またこの導電性繊維は洗濯も可能である。図4に今回用いた電磁波シールドクロスを示す。

3.4 通信モジュールと衣服と接合部分の設計

ウェアラブルシステムを簡単に構築あるいは再構成する「気軽にウェアラブル」を実現するためには, 導電性衣服に通信モジュールを接続するための方式も, ユーザにとってきわめて平易であることが望ましい。これを実現するために, 本 TextileNet では, ネクタイピンなどで用いられるタイタックピンを改良し, 図5

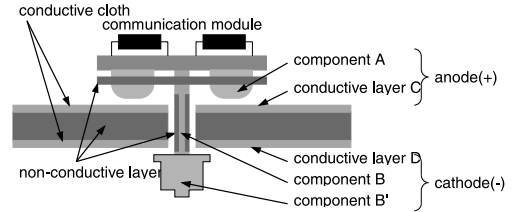


図5 ピンバッジ型インタフェース

Fig. 5 Pin badge interface.

のような, ピンバッジ型のインタフェースを設計した。

このピンバッジ型インタフェースは3つの部材 A, B, B' から成り立っている。部材 A は通信モジュールのプラス極に対応し, 導電性衣服の表面電極 C に接続される。部材 B および B' は通信モジュールのマイナス極に対応し, 導電性衣服の表面電極 D に接続される。なお, 部材 B と電極 C との間の電氣的短絡を防ぐために, 部材 B の根元から 1 cm 程度の区間に絶縁被膜処理を施す。

ユーザは, 部材 B を衣服に挿し込み, 部材 A と B' で衣服を挟み込むことでデバイスの装着は完了する。すなわちこのインタフェースによって, ユーザはピンバッジを衣服に装着するのとまったく同じ手順によって, ウェアラブル機器を身にまったり取り外したりすることが可能となる。

4. TextileNet の実装

4.1 通信モジュールと電源モジュールの実装

3.2 節の方式で設計した通信モジュールと電力供給モジュールの試作を行った。それらをそれぞれ図6および図7に示す。今回試作した通信モジュールの実装にあたっては, 後述の 5.1 節での導電性衣服の電氣的特性を考慮して回路素子定数を決定し, $C_P = 10 [\mu\text{F}]$, また電圧比較器には Linear Technologies 社の LT1716, 制御用のマイクロコントローラには Silicon Laboratories 社の C8051F300 を用いた。また図2内の Power 部には, DC/DC コンバータとして National Semiconductor 社の LM2675-3.3 (出力電圧: 3.3 [V]) を用い, スイッチである SWp, SWd には, それぞれ P チャンネル, N チャンネルのパワー MOS トランジスタを用いた。通信モジュールの寸法は $20 [\text{mm}] \times 20 [\text{mm}]$ であり, 電源供給出力は 3.3 V, 供給可能電力は 4 W である。

なお今回試作した通信モジュールでは, プロトタイプであることから動作のマーゼンの考慮, および使用したマイクロコントローラ (Silicon Laboratories 社 C8051F300) の性能の制約から 9,600 bps で動作する

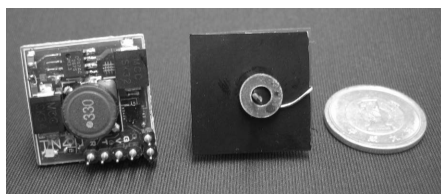


図 6 試作した通信モジュール
Fig. 6 Communication module.

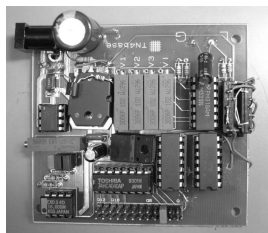


図 7 試作した電力供給モジュール
Fig. 7 Power supply module.



図 8 試作した導電性布地を用いたジャケット
Fig. 8 Prototype jacket with conductive cloth.

よう設計した。これは主に 1 ビット単位の送受信を、マイクロコントローラの割込み処理によって行っていることによる制約であり、送受信回路のハードウェア化により 1 Mbps 程度の伝送速度は実現できると考えられる。なお実際の通信速度は、むしろ伝送路である導電性衣服の電気的特性によって制約されるが、これに関しては 5.1 節で考察する。

4.2 導電性衣服の実装

3.3 節の設計方針に基づき、市販の電磁波シールドクロスを両面に用い、その中央に 2 枚のウール地の布を絶縁層として挟んだ布地を、ミシンで縫合してジャケットを製作した。この縫合は、布の端部で両面が電氣的に接触しないように注意しながら行った。製作した導電性衣服であるジャケットを図 8 に示す。

4.3 通信モジュールと衣服の接合部分の実装

通信モジュールと衣服の接合部分である、図 5 の構造の針を製作した。直径 0.9 mm のステンレス製の棒を機械加工によって切削し、図 9 のような構造の針を製作した。途中のくびれ部分に、直径が同じく 0.9 mm になるようにエポキシ樹脂を塗布し、絶縁層とした。

4.4 衣服装着型デバイスの実装

本 TextileNet の実際の応用では、試作した通信モジュールの上に、用途に応じたセンサや表示装置などを装着し、機能を持つ衣服装着型デバイスとして動作させる。ここでは、試行的に次のような計 5 種類の機能を持つ衣服装着型デバイスを、試作した通信モジュールを用いてを試作した。

- 光センサ：2 個
- 2 色 LED (赤・緑)



図 9 試作した接合部分の絶縁針
Fig. 9 Prototype pin with insulator.

- PC 接続 (シリアル)
- 数値表示 LED

今回試作した通信モジュールでは、送信先デバイスを特定してのデータ通信で必要となるルーティング機能が未実装であるため、データを送信する各デバイスである光センサデバイスと PC 接続デバイスが送信するデータを、表 1 (a) のように定義し、実装した。またデータを受信して動作を行うデバイスである 2 色 LED デバイスと数値表示 LED デバイスが受信するデータと、それに応じた動作を、表 1 (b) のように定義し、実装した。これらのデータ送受信が TextileNet を通して行われることで、表 1 (c) のような動作をすることになる。試作した衣服装着型デバイスを図 10 に示す。

5. TextileNet の評価

5.1 導電性衣服の電気的特性の評価

導電性衣服の電気的特性は、信号の伝送路、および電力の供給路として重要である。そこで、試作した導電性衣服の電気的特性として片面の表面抵抗 R_s と両面間の容量 C_s を、通常時、および表面が軽く濡れた場合 (雨に濡れた場合を想定)、生理食塩水をしみこ

表 1 試作した衣服装着型デバイスの送信データの定義 (a), 受信データの定義 (b) と, それらの動作 (c)

Table 1 Definition of transmitted data (a), received data (b), and operation (c)

(a)		
データ送信側デバイス	送信データ	
光センサ A	0x00 (手をどかしたとき) 0x01 (手をかざしたとき)	
光センサ B	0x10 (手をどかしたとき) 0x11 (手をかざしたとき)	
PC 接続 (シリアル)	0x80 ~ 0x89 (文字'0' ~ '9')	
(b)		
データ受信デバイス	受信データと動作	
2色 LED (赤・緑)	0x00 (赤が消灯) / 0x01 (赤が点灯) 0x10 (緑が消灯) / 0x11 (緑が点灯)	
数値表示 LED	0x80 ~ 0x89 (文字'0' ~ '9'を表示)	
(c)		
センサ	アクチュエータ	アクチュエータの動作
光センサ A	2色 LED	A に手をかざすと赤が点灯
光センサ B	(赤・緑)	B に手をかざすと緑が点灯
PC 接続 (シリアル)	数値表示 LED	PC から送られたデータ (文字'0' ~ '9')を表示

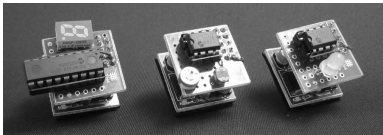


図 10 試作した衣服装着型デバイス (左から数値表示 LED デバイス, 光センサデバイス, 2色 LED デバイス)

Fig. 10 Prototype devices. (From left) Numerical display LED device, Photo sensor device, Bi-color LED device.

表 2 導電性衣服の部位ごとの抵抗・抵抗率

Table 2 Resistance and resistance ratio for each location of wear.

部位	抵抗・抵抗率
袖	0.28 [Ω/cm]
背中	0.16 [Ω/cm]
左袖口-右袖口	15 [Ω]
袖口-前ボタン列の最下部	18 [Ω]

ませた場合 (汗がしみこんだ場合を想定), および洗濯による性能変化について評価を行った²²⁾.

導電性衣服の抵抗成分

衣服の部分ごとの抵抗を, LCR メータ (Hewlett Packard 4284 A) によって, その測定端子を 4.3 節で述べた接合機構によって接触させて測定した結果を表 2 に示す. 袖部分は, 背中部分よりも電極面積が狭いため, 単位距離あたりの抵抗率が大きくなるのが分かる. また直線距離が最も長い左右の袖口の間では

表 3 霧吹きで水道水を噴霧した場合の導電性衣服の部位ごとの抵抗率

Table 3 Resistance ratio for each location of wear when surface is wet.

部位	噴霧回数 [回]	抵抗率 [Ω/cm]
袖	0	0.28
	3	0.18
	9	0.12
	18	0.06
背中	0	0.16
	3	0.11
	9	0.05
	18	0.03

表 4 導電性衣服の部位ごとの容量

Table 4 Capacitance for each location of wear.

部位	容量 [nF] @1 MHz
袖	7.5
襟	9.0

15 [Ω], 袖口と, 前ボタン列の最下部との間では 18 [Ω] となった. これより, 衣服上で任意の位置にデバイスを配置した場合に最も相互伝送路の抵抗成分が大きくなるのは, 袖口と前ボタン列の最下部にデバイスを配置した場合で, その場合の抵抗成分 R は 18 [Ω] となる.

続いて, 雨に濡れた場合を想定し, 霧吹きで水を導電性衣服表面に噴霧した場合の, 袖部分と背中部分の抵抗率の変化を表 3 に示す. この結果から, 表面が濡れるほど衣服表面の表面抵抗が小さくなるのが分かる. なおこれらの噴霧時には, 表面と裏面の電気的ショートは確認されなかった.

続いて袖部分に対して, 汗がしみこんだ場合を想定し, 生理食塩水をしみこませた場合の抵抗率も測定したところ, 0.05 [Ω/cm] となった. なお導電性衣服を着用した場合, およびひじ部を折り曲げた場合の各部の抵抗率を測定したところ, 非着用時とほぼ同じ値であった.

以上のことから, 本 TextileNet 方式の通信速度の上限を決める抵抗成分は, 最大で $R_s = 18 [\Omega]$ 程度と考えられる.

導電性衣服の容量成分

衣服の部分ごとの容量を, 抵抗の場合と同様の方法で, 測定周波数を 1 MHz として測定した結果を表 4 に示す. 直流に対する静電容量は, 部位によらずに一定であるはずであるが, 交流信号に対しては, 表面の抵抗を含めた分布定数回路と見なされるため, 部位ごとに等価的な容量が異なることになる. またこれよりも高い周波数の信号に対する等価的な容量は, これよりも小さくなると考えられる.

表 5 霧吹きで水道水を噴霧した場合の導電性衣服の部位ごとの容量
Table 5 Capacitance for each location of wear when surface is wet.

部位	噴霧回数 [回]	容量 [nF] @1 MHz
袖	0	7.5
	10	5.6
	20	5.2
	30	5.4
襟	0	9.0
	10	9.4
	20	7.7
	30	7.5

続いて、雨に濡れた場合を想定し、抵抗の測定の場合と同様に、霧吹きで水を導電性衣服表面に噴霧した場合の、袖部分と襟部分の容量の変化を表 5 に示す。この結果から、表面が濡れるほど衣服表面の容量がある程度小さくなるのが分かる。

続いて、汗がしみこんだ場合を想定して生理食塩水をしみこませた場合の容量を、同一の素材で製作した袖部分に対して、同様の条件で測定を行った。この袖部分の乾燥時の容量は 1.7 [nF] であったが、生理食塩水を十分しみこませた後には 4 [nF] と、およそ 2.3 倍となった。この後、濡れを自然乾燥させたときの容量は 1.5 [nF] と、以前とほぼ同じ値となり、乾燥によって機能が回復されることが示された。なお生理食塩水で十分しみこませた際には、表面と裏面の抵抗が 30 [Ω] 程度となっており、正常な通信動作を行うことができないと考えられる。この場合は、電源ユニットの保護機構によって一時的に動作を停止されるが、軽微な濡れの場合は、6.4 節で述べるような自己回復機構によって継続した動作が可能であると考えられる。したがって表面と裏面がショートしない程度に汗がしみこんだ場合の容量は、これよりも小さい。

なお導電性衣服を着用した場合、およびひじ部を折り曲げた場合の各部の容量は、それぞれ非着用時と比べてほぼ 20%増加した。

以上のことから、本 TextileNet 方式の通信速度の上限を決める容量成分は、乾燥時、および表面が濡れた場合には、導電性衣服を着用している場合で最大で 11 [nF] 程度、汗などがしみこんだ場合は、最大でその約 2 倍の 22 [nF] 程度となると考えられる。

導電性衣服の汗のしみ込み・洗濯による電気的特性の変化

この導電性衣服の現実的な場面での電気的特性の変化を見積もるため、汗のしみこみと洗濯・乾燥の繰返しによる電気的特性の変化の測定を行った。なおこの実験でも、衣服と同一の素材で製作した袖部分を用い

表 6 汗のしみこみ・洗濯による電気的特性の変化
Table 6 Measured electrical characteristics during sweating and washing.

試行	状態	R_s [Ω]	C_s [nF]
1	汗しみこみ前	4.9	3.0
1	汗しみこみ後	3.5	2.6
2	汗しみこみ前	3.2	2.3
2	汗しみこみ後	4.4	2.2
3	汗しみこみ前	4.5	2.1
3	汗しみこみ後	4.7	2.2
4	汗しみこみ前	5.0	2.3
4	汗しみこみ後	4.5	2.4
5	汗しみこみ前	3.0	2.1
5	汗しみこみ後	3.7	2.1
6	汗しみこみ前	3.6	2.2



図 11 試作したジャケットに衣服装着型デバイスを装着して動作させた状態

Fig. 11 Conductive jacket with devices in operation.

て行った。

まず袖部分の両端の片面の電気抵抗 R_s と両面間の静電容量 C_s を、汗を模擬する生理食塩水を霧吹きによって十分しみ込ませる前後で、前述の導電性衣服の抵抗、容量の測定と同様の方法で測定した。その後、全自動洗濯機による洗濯と陰干しによる自然乾燥を行った。このしみ込ませと洗濯・乾燥を 1 セットとして 5 セットの試行を行った際の、導電性衣服の袖部分の電気抵抗 R_s と静電容量 C_s の変化を表 6 に示す。各試行の「汗しみこみ後」と「汗しみこみ前」の間に、洗濯・乾燥を行っている。この結果から、汗のしみこみが起こっても、乾燥後には電気的特性は回復し、また洗濯・乾燥を経ても電気的特性の変化はほぼ起こらないといえる。

5.2 全体動作

試作した導電性衣服、通信モジュールを用いた 5 個の衣服装着型デバイス、および電源モジュールを用い、TextileNet 全体の動作評価を行った (図 11)。

なお今回試作した通信モジュールでは、衝突検出・再送制御機能が未実装であり、各データ送信デバイスが同時にデータ送信を始めた場合には正常な通信を行

うことができないため、各デバイスの操作はデータ送信のタイミングが重ならないように実施した。

導電性衣服上の衣服装着型デバイスの装着位置を衣服全体で 10 通りに様々に変化させて動作させたところ、エラー訂正機能がないものの、ほぼ正常動作を確認することができた。

6. 考察

6.1 導電性衣服への印加電圧とシールド効果

本 TextileNet システムでは、利用者の皮膚に直接接触する可能性がある衣服を電極とし、そこに電圧を加える。しかし印加電圧が直流 10 V 程度と低く、また導電性衣服の人体側の面が基準電圧であるグラウンドとなるため、表と裏を皮膚で触れても感電は起こらない。また TextileNet を着用している人の全体の電位が浮遊であるため、他の金属物体に触れた場合でも、感電や放電は起こらない。

なお導電性衣服の人体側のグラウンド面によるシールド効果によって、人体への電磁波の影響を小さくする効果があると考えられる。

6.2 通信速度の上限の見積り

3.2 節で設計した通信モジュールの通信速度の上限は、通信モジュールでスイッチ sw_a および電源モジュールのスイッチ sw_p による衣服表面の電荷の充放電に要する時間によって決まる。この時間は、充放電の経路の抵抗成分 R と容量成分 C によって決まるが、これらは次のような成分からなる。

- 抵抗成分 R : 衣服表面の抵抗 R_s , スwitchの ON 抵抗 R_{on} , 衣服とデバイスの接触部の抵抗 R_c
- 容量成分 C : 衣服表面の容量 C_s , デバイスの入力部の負荷容量 C_j

今回用いる導電性素材では、 $R_s = 10 [\Omega]$ 程度、 $R_{on} = 0.1 [\Omega]$ 程度、 $R_c = 1 [\Omega]$ 程度であるため、 R は、ほぼ R_s によって決まる。また $C_s = 10 [\text{nF}]$ 程度、 $C_j = 0.3 [\text{nF}]$ 程度（ダイオードの逆バイアス時の接合容量）であるため、衣服に接続されるデバイス数を n とすると、全体で駆動される容量 C は次の式で求められることになる。

$$C = C_s + n \cdot C_j \quad (1)$$

すなわち通信モジュールを含む衣服装着型デバイス数が 10 個程度であれば、 C は、ほぼ C_s によって決まり、デバイス数が多くなると、 C_j に比例して増加することとなる。

これと、導電性衣服の抵抗および容量の測定結果をあわせ、接続デバイス数と動作条件を変えた場合の、通信速度の上限の理論値を充放電の定数 $R \cdot C$ の逆

表 7 種々の条件に対する通信速度の上限の理論値
Table 7 Estimated communication speed for various condition.

導電性衣服の状態	デバイス数	C [nF]	通信速度の 上限 [Mbps]
乾燥	2	12	4.6
乾燥	10	14	4.0
乾燥	100	36	1.5
乾燥	1,000	261	0.2
汗しみこみ	2	23	2.4
汗しみこみ	10	25	2.2
汗しみこみ	100	47	1.2
汗しみこみ	1,000	272	0.2

数として求めた結果を表 7 に示す。なお抵抗成分に関しては、最も抵抗が大きかった袖口と前ボタン列の最下部のすべてのデバイスを装着した場合を想定した。以上のことから、デバイス数が 10 個程度であれば、乾燥時に 4 [Mbps] 程度、汗がしみこんだ状態（ただし表面と裏面がショートしない状態）で 2 [Mbps] 程度の通信が可能であると考えられる。またデバイス数が 100 個程度、1,000 個程度の場合には、いずれも衣服の状態にはほぼよらずに、それぞれ 1.2 [Mbps] 程度、0.2 [Mbps] 程度の通信が可能であると考えられる。

6.3 接続可能な衣服装着型デバイス数の見積り

本 TextileNet システムに取り付けることができるデバイスの数は、6.2 節で考察したような通信速度のほかに、通信モジュールを含む衣服装着型デバイスの消費電流と、導電性衣服表面の抵抗から決まる、衣服装着型デバイスまでの電圧降下によって制限される。

そこで例として、消費電力の小さい温度センサを備える衣服装着型デバイスを多数取り付け、温度分布を計測する応用を考える。1 つの衣服装着型デバイスの消費電流を 20 [mA] と仮定すると、その消費電力は、電源電圧が 3.3 [V] であることから 60 [mW] となる。今回試作した通信モジュールでは、衣服の印加電圧 (10 [V]) から利用する電源電圧である 3.3 [V] への変換を DC/DC コンバータを用いて行っており、その変換効率は 90 [%] 以上であることから、導電性衣服側に流れる電流は、1 つの通信モジュールあたり 6 [mA] 程度となる。5.1 節の導電性衣服の電気的特性の測定結果から、今回試作した導電性衣服上に任意に配置された通信モジュール間の導電性衣服表面の電気抵抗は、平均値で 10 [Ω] 程度と見積もられるため、この電流と抵抗によって発生する電圧降下によって衣服装着型デバイスでの導電性衣服表面電圧が、供給電源電圧を生成する DC/DC コンバータが動作する下限の電圧 (4 [V] 程度) まで下がる衣服装着型デバイスの数 N_{\max} は、

$$6 [\text{mA}] \times N_{\text{max}} \times 10 [\Omega] = (10 [\text{V}] - 4 [\text{V}])$$

より, $N_{\text{max}} = 100$ 個程度となる. 通信モジュールのさらなる低消費電力化により, 消費電力の小さいデバイスの場合にはさらに多数のデバイスを導電性衣服に装着し, 利用することも十分可能であると考えられる.

6.4 導電性衣服の一時的なショートの対策

導電性衣服の両面間の絶縁層の軽微な濡れや, 導電性糸が表から裏へ導かれたことによってショートが導電性衣服に発生した場合には, その部分の電気抵抗が小さくなるため, 局所的な電流が流れることとなる. この局所的な電流によって微小な発熱が電源投入時に瞬間的に起こり, 濡れの蒸発や糸の焼き切れが起こることから, これらのショートは解消される. このような自己回復機構によって, 継続した通常動作が可能である. また金属で導電性衣服の表と裏を接触させた場合には, 一時的に電力供給を停止する保護機構が電源ユニットに内蔵されている.

なおこの導電糸の焼き切れに要する時間 t は, 表面から裏面に回りこむ導電糸の本数を 1 本と仮定すると, 導電糸の抵抗率 ($50 [\Omega/\text{cm}]$), 導電糸の心材の材質であるナイロンの比重 ($1.14 [\text{g}/\text{cm}^3]$), 比熱 ($0.4 [\text{cal}/\text{g} \cdot \text{K}]$), 融点 ($225 [^\circ\text{C}]$), 布の厚さ ($2 [\text{mm}]$), および印加電圧 ($10 [\text{V}]$) から, $t = 28 [\mu\text{s}]$ と見積もられる. これから, この焼き切れの際に発生する熱量 Q は, $Q = 280 [\mu\text{J}]$ と見積もられる. 衣服の絶縁部分の体積の大半は空気であることから, この発熱量 Q によって, 焼き切れた部位の周辺の空気の温度が上昇することになる. この温度が上昇する空気の領域の大きさを表面方向に $1 [\text{cm}] \times 1 [\text{cm}]$ と仮定すると, その温度上昇 ΔT は, 空気の比重 ($1.24 [\text{mg}/\text{cm}^3]$), 比熱 ($1.0 [\text{J}/\text{g} \cdot \text{K}]$) から $\Delta T = 2.3 [^\circ\text{C}]$ となる. この温度上昇は, 焼き切れが起こるまでの時間 $t = 28 [\mu\text{s}]$ の間だけ起こることから, この焼き切れの際に発生する熱による人体への影響はほぼ無視することができると考えられる.

また, 衣服の発汗量が多い部位に近い部分のみは, 導電性布地を用いない構成も現実的であると考えられる.

6.5 衣服の劣化

6.4 節で述べたような, 一時的なショートを解消する導電糸の焼き切れのほかにも, 針を刺すことによって導電糸の断線が起こる場合があると考えられる. しかし導電布は $0.1 [\text{mm}]$ 以下の密度で多数の導電糸が編まれる平面であり, この断線による布としての電気的特性の劣化による寿命は, 一般的な布に針を刺すことによる布の劣化によるものと同程度であり, 実用上は問題はないと考えられる.

6.6 通信モジュールと衣服の接合部分

提案システムは, その構造から, 導電性衣服の表面と通信モジュールの物理的な接触が安定していることが望ましい. 通信モジュールの小型化を進めた結果, 5.2 節で述べたような全体動作においても十分な安定性が確保されているが, その一方で, 裏側の留め具の固定が不十分な場合には, 衣服装着型デバイスの自重によって衣服装着型デバイスが垂れ下がり, 導電性衣服の表面との接触不良を起こす場合が散見された. これは, 通信モジュールと衣服との接合部分にある弾性を持たせ, 装着時に密着させるなどの改良を行うことで解決可能と思われる. また裏側の留め具が人体側に飛び出しているため, 用途によってはこの飛び出しの大きさが問題となると考えられる. そのため, 安全ピン型などの, 人体面への飛び出しが小さい接合部分の構造も検討する必要があると考えられる.

6.7 通信の衝突検出・再送制御

本稿の範囲ではないが, 本 TextileNet システムの実用化をふまえた場合, 通信品質の向上を検討する必要がある. すなわち, 複数の通信モジュールが同時に通信を開始した場合の衝突の検出と再送制御, エラー検出と訂正, ルーティングなどの機能である. そして, 今後はこれらの機能を, 上位の通信層の制御として実装する必要がある.

この衝突検出・再送制御のアルゴリズムは, Ethernet などでも用いられる CSMA/CD を基本とする方式が現実的であると考えられる. この衝突検出・再送制御により, 実効的な通信速度が低下することになるが, その影響の評価は, これらの制御機構の検討, 実装とあわせて, 今後の課題である.

またエラー検出と訂正は, エラー訂正符号を用いるのが現実的であり, 通信時のビットエラー率の定量的な評価とあわせて, 今後の課題である.

任意のデバイス間で通信を行うためのルーティング機能は, TCP/IP のように, 各通信モジュールに識別 ID を割り当て, 送信元と送信先を考慮したデータ送受信を行う方式が現実的であると考えられるが, その実装は今後の課題である.

7. おわりに

本稿では, ウェラブル・ユビキタスコンピューティングにおいて, そのインフラストラクチャとしてのネットワークシステムに求められる機能として以下の 4 項目をあげ, それらの解決を図る TextileNet システムの提案と実装, 評価について述べた.

- できる限り多数の機器を接続可能であること

- 機器の設置場所の制約ができる限り少ないこと
- 種々の機器が混在し、互いに独立な通信路を確保できること
- 機器が電力を供給されること

本 TextileNet システムでは、導電性衣服を用いて、そこに利用形態に応じたデバイスを装着する形態をとることで、デバイスの装着数、装着位置の自由度に関する問題を解消し、かつその表面に電力と信号を重畳することで、通信路確保と電力供給を達成することができた。

試作システムでは、通信速度 9,600 bps、デバイス 1 個あたりの供給可能電力 4 W を達成した。また信号伝送路である導電性衣服の電気的特性の評価により、デバイス接続数は消費電力の小さいデバイスでは 100 個以上も原理的には可能であり、また通信速度も、使用条件によって異なるが 0.2 Mbps ~ 4.6 Mbps 程度の通信が可能であることを示した。

今後は、通信モジュールにおいて、衝突検出・再送制御、エラー訂正、ルーティングなどの機能の実装を進め、また TextileNet アーキテクチャ上で動作するセンサなどのピンバッジ型デバイスのさらなる改良と、それらを用いたアプリケーションの開発も順次進める予定である。また、実用化を目指した耐久試験として、本稿で述べた汗や洗濯といった衣服特有の試験に加え、接合部分の絶縁被膜の剥離に関する耐用試験などを行う予定である。

参 考 文 献

- 1) Weiser, M.: The computer for the 21st century, *Scientific American*, Vol.265, No.30, pp.94-104 (1991).
- 2) Rantanen, R., et al.: Smart Clothing for the Arctic Environment, *Proc. ISWC2000*, pp.15-23 (2000).
- 3) Baldegger, J. and Giger, C.: WEARABLE GIS: ASmart ASSISTANT IN DISASTER MANAGEMENT, *Proc.6th AGILE Conference on Geographic Information Science*, pp.10-26 (2003).
- 4) Murray, J.: Wearable Computers in Battle: Recent Advances in the Land Warrior System, *Proc. ISWC2000*, pp.169-170 (2000).
- 5) Noma, H., et al.: Wearable sensors for auto-event-recording on medical nursing—user study of ergonomic design, *Proc. ISWC2004*, pp.8-15 (2004).
- 6) Yamazoe, H., et al.: A Body-mounted Camera System for Capturing User-view Images without Head-mounted Camera, *Proc. ISWC2005*, pp.114-121 (2005).
- 7) Anliker, U., et al.: AMON: A Wearable Multi-parameter Medical Monitoring and Alert System, *IEEE Trans. Information Technology in Biomedicine*, Vol.8, No.4, pp.415-427 (2004).
- 8) Michahelles, F., et al.: Applying Wearable Sensors to Avalanche Rescue: First Experiences with a Novel Avalanche Beacon, *Computer & Graphics*, Vol.27, No.6, pp.839-847 (2003).
- 9) Wade, E. and Asada, H.: DC Behavior of Conductive Fabric Networks with Application to Wearable Sensor Nodes, *Proc. BSN'06*, pp.27-30 (2006).
- 10) Laerhoven, K., et al.: A Layered Approach to Wearable Textile Networks, *Proc. IEE Euroearable 2003*, pp.61-67 (2003).
- 11) <http://www.maxim-ic.com/>
- 12) Lifton, J., et al.: Pushpin Computing System Overview: A Platform for Distributed, Embedded, Ubiquitous Sensor Networks, *Pervasive Computing 2002*, pp.139-151 (2002).
- 13) Randell, C., et al.: Textile Tools for Wearable Computing, *Proc. IFAWC 2004*, pp.63-74 (2004).
- 14) Bharatula, N., et al.: Power and Size Optimized Multisensor Context Recognition Platform, *Proc. ISWC2005*, pp.194-195 (2005).
- 15) DeVaul, R., et al.: MIThril 2003: applications and architecture, *Proc. ISWC2003*, pp.4-11 (2003).
- 16) <http://www.scottevest.com/>
- 17) <http://www.vivometrics.com/>
- 18) Park, S., et al.: The Wearable Motherboard: A Framework for Personalized Mobile Information Processing (PMIP), *Proc. DAC'02*, p.170 (2002).
- 19) 中村嘉志, 西村拓一, 伊藤日出男, 中島秀之: 無電源でユーザ属性と位置を発信する CHOBIT 端末の設計と実装, *情報処理学会論文誌*, Vol.44, No.11, pp.2670-2680 (2003).
- 20) Finkenzerler, K.: *RFID Handbook*, Wiley & Sons (1999).
- 21) <http://www.echonet.gr.jp/>
- 22) 新村 達, 村上知倫, 秋田純一, 戸田真志: 給電機能をもつネットワークシステム向け導電性衣服の電気的特性の評価, *情報処理学会研究報告 (2006-UBI-10)*, pp.245-249 (2006).

(平成 18 年 3 月 6 日受付)

(平成 18 年 9 月 14 日採録)



秋田 純一（正会員）

昭和 45 年生．平成 5 年東京大学工学部電子工学科卒業．平成 10 年同大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻博士課程修了．同年金沢大工学部電気・情報工学科助手．平成 12 年公立ほこだて未来大学講師．平成 16 年金沢大学大学院自然科学研究科電子情報科学専攻講師．集積回路工学とその応用システム（特にインタラクティブシステム）に関する研究に従事．博士（工学）．電子情報通信学会，映像情報メディア学会各会員．



新村 達

昭和 57 年生．平成 17 年金沢大学工学部電気電子システム工学科卒業．現在，同大学大学院自然科学研究科電子情報工学専攻博士前期課程在学中．集積回路とその応用システム（特にインタラクティブシステム）に関する研究に従事．



村上 知倫

昭和 58 年生．平成 17 年金沢大学工学部情報システム工学科卒業．現在，同大学大学院自然科学研究科電子情報工学専攻博士前期課程在学中．集積回路とその応用システム（特にインタラクティブシステム）に関する研究に従事．



戸田 真志（正会員）

昭和 44 年生．平成 4 年東京大学工学部計数工学科卒業．平成 10 年北海道大学大学院工学研究科電子情報工学専攻博士後期課程修了．同年セコム（株）入社．平成 13 年公立ほこだて未来大学講師．平成 17 年同大学助教授．コンピュータビジョン，センサフュージョン，ユビキタスコンピューティング，ウェアラブルコンピューティング，教育情報システムに関する研究に従事．博士（工学）．電子情報通信学会会員．