

**「身体表面分散型エレクトロニクス」**

研究期間：2018年10月～2022年3月

研究者：野田 聡人

## 1. 研究のねらい

本研究の目的は、人体表面(衣服上あるいはその近傍)に分散配置された各種センサおよびアクチュエータ等を個別の配線なしに簡単にネットワーク化し、人がおかれた環境中(室内)のネットワークや周辺機器とも相互に情報の伝送を行うための標準的・汎用的な基盤技術を実現することである。これにより、人と環境とのインタラクションにおいて、人の状態を計測して環境に伝達し、人に対して全身の触覚を含む感覚器官を通じてフィードバックを与えるための標準的なハードウェアを確立し、より上位のインタラクション研究の生産性を向上させることをねらいとした。

「インタラクション」するためには、物理世界とソフトウェアの世界を接続するセンサおよびアクチュエータ・LED など(以下、総称して物理素子と呼ぶ)を取り扱うことを避けて通れない。本研究はこの接続部分に焦点を当てる。特に、ウェアラブルシステムにおいて今後ますます重要性を増すと考えられる衣服への物理素子の組み込みを主な対象としている。

衣服に物理素子を埋め込むという開発のための標準的なハードウェアがこれまで存在しなかった。何の工夫もなくただ衣服に沿ってケーブルを這わせるだけでは外観の印象を損ねるだけでなくケーブルの断線の高リスクが高く、断線を防ぐための接続部分の強化などの対策は衣服の柔軟性・着用性を損ねる。このような課題に対し、それぞれの研究開発ごとに個別に場当たり的に対処するというのでは研究の生産性・費用対効果を損ねることに繋がる。

この配線の問題の解決を目指したこれまでの研究は二つのアプローチに大別される。一つは配線を衣服の生地と同程度に柔軟にして生地と一体化させること、もう一つは完全に無線化することである。

本研究では、これら二つのアプローチの課題を指摘し、布1枚を一つの二次元的な伝送線路として使用する方法によって課題の解決を目指した。一方、提案手法を実際のハードウェアとして実現するには、高周波回路や通信技術についての専門知識が必要とされる。そのため、論文として基本的なアイデアや理論的側面に関する情報を公開しても、専門知識を持たない研究者が直ちにこれを利用することは難しい。そこで本研究では、上述の提案手法を実現する具体的なハードウェアの設計情報をインターネット上で公開し、他の研究者による利用を促進することをねらった。

## 2. 研究成果

## (1) 概要

導電性の繊維材料を用いて信号伝送路となる布地を形成し、この布上にピンバッジ状の通信デバイスを突刺すことで個別配線なく給電と通信を行うコンセプトについて、大きく二つの通信方式を実現した。一つは、クロック同期式シリアル通信として基板内・装置内の IC 間

通信としてデファクトスタンダードとなっている I2C (Inter-Integrated Circuit) を利用する方法であり、もう一つはデータの他にクロックを別送しない非同期式 (調歩同期式) としてマイクロコントローラが標準的に搭載している UART (universal asynchronous receiver-transmitter) インタフェースを利用する方法である。前者は、本来はクロックとデータの 2 本の導線を必要とするもので、これを単一の伝送路で伝送するために、周波数の異なる 2 つのキャリアをそれぞれの信号で変調して同時伝送する手法を開発した。後者は元々データのみ単一の信号線で一方のデータ伝送が可能であり、キャリアの変調によって伝送するのではなく、伝送路との AC 結合によって直流の電力伝送と切り分けることさえできれば良く、I2C を利用する方式よりもさらに単純な回路で実現可能となる。さらに、キャリアを用いないため、通信のクロック周波数がキャリア周波数より十分低くなければならないという制約からも解放され、高速な通信が可能となった。これらの成果の一部について、論文には掲載されない、そのまま回路モジュールの製造が可能となるだけの詳細な設計データをインターネット上で公開し、本成果を非専門家が利用できる素地を整えた。

導電布・衣服上で閉じたネットワークの形成に限らず、それを外部の無線ネットワークと接続したシステムの実装についても研究開発を行った。衣服上に分散した多数のセンサデバイスの一つ一つが無線通信を利用すると、無線通信特有のオーバーヘッドや消費電力の高さが無視できない課題となるが、衣服内で閉じたネットワークを、1 個ないし少数のゲートウェイデバイスを通して無線ネットワークと接続する構成が合理的であることを実証した。

これらをベースとしたさらに発展的な研究開発にも取り組み、一部は他大学・企業との共同研究や他の競争的研究資金による新規な研究開発プロジェクトへと発展している。

## (2) 詳細

### 研究テーマ A 「I2C を基本とする、市販 IC をそのまま利用可能な高速イントラウェア通信」

さきがけ研究開始以前の時点で、導電性の繊維材料を用いて信号伝送路となる布地を形成し、この布上にピンバッジ状の通信デバイスを突刺すことで個別配線なく給電と通信を行うコンセプトについて、限定的な条件下で動作するプロトタイプの実装までを完了していた。

さきがけ研究期間においては、このコンセプトを、回路の詳細についての知識を求めることなく誰もが利用可能な技術として完成させることを目指した。このための取り組みとして、安定して通信可能な条件は何かを明らかにした。これまでの研究開発で、デモシステムの実装・調整にあたって、通信エラーを回避するために試行錯誤的なキャリア強度の調整が必要となっていた。キャリア強度の設定と通信のエラー発生間の定量的関係が明らかでなく、試行錯誤的な調整に頼らざるを得ないことは、特にオープンソース化して非専門家でも手軽に扱えることを目指す本研究としては重大な課題であった。

具体的には図 1 に示すような通信エラーレートの評価測定系を構築したうえで、キャリア強度とエラーレートの関係を実験的に検討した。この結果明らかになったことは、(1)受信回路でのバンドパスフィルタの特性も含めた受信器検波回路入力における CIR (carrier-to-interference ratio) が、2 つのキャリアで等しくなる ( $CIR1 = CIR2$ ) 振幅条件を中心として、その前後数 dB の範囲でほぼエラーのない通信が可能であること、(2)この相対的なキャリア強度の関係が適切であれば、絶対的な強度は 30dB 程度の範囲にわたって変化させても同様

に通信可能であること、などである。これらが明らかになったことは、試行錯誤に頼らないパラメータの設計・調整法が明らかになるだけでなく、今後、回路の高機能化による無調整化（信号強度を適応的に自動設定することで、完成後の回路モジュールの個別のトリマー調整のような作業を不要とする）を実現するための基礎となるものである。

本成果は論文掲載（「5. 主な研究成果リスト」の（1）の 2）の後、論文誌掲載内容以上に詳細な設計データをインターネット上で下記 URL において公表している：

<https://github.com/akihitonoda/SimplexI2We>

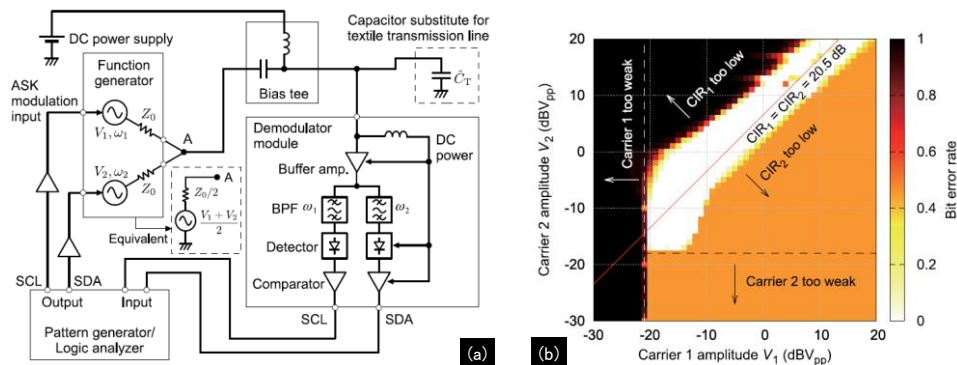


図 1 (a)ビットエラーレート(BER)測定系. 導電布伝送路のキャパシタンスに依存して信号強度が低下し BER に影響するため、このキャパシタンスを模擬するキャパシタ Ct を接続し、複数の Ct の値に対し同様の測定を行った。(b) Ct=0 nF の場合の測定結果. 白い領域がエラーなしで通信可能な領域、黒とオレンジは通信不可能な領域である。

また、I2Cを利用する方法を超える通信の高速化・回路の小型化を目指した研究開発を実施し、ほとんどの MCU が搭載する UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) インタフェースを利用する方針を決定した。UART は非同期方式（同期のためのクロック信号を伝送しない）方式であり、受信器側で 1 本の信号からクロック・データリカバリ (GDR) を実行するため、キャリアレスのベースバンド伝送が可能となる。本成果についての研究会での口頭発表に対し表彰を受けた（「5. 主な研究成果リスト」の（3）の 2）。

### 研究テーマ B 「無線 LAN を基本とする、市販通信機器をそのまま利用可能なインターウェア通信」

研究テーマ A は、導電布と接触導通した回路モジュール間の通信を扱うものであるが、実用的には、布上で閉じたネットワークに限定せず、外部の通常の無線ネットワークとも接続できることが重要となる。この目的のため、衣服上に無線 LAN・Bluetooth 通信モジュールを実装することで衣服の外部から衣服上のセンサ・アクチュエータにアクセスするシステムの実装を行った。図 3 に実装例を示す。導電テキスタイル上の任意の位置にピンバッジのように突刺すだけで接続可能な温度センサを分散させ、それぞれのセンサが出力する温度データをスマートフォンの web ブラウザ上で閲覧可能なシステムを構築した。本成果のデモ発表は国際会議で表彰を受けた（「5. 主な研究成果リスト」の（3）の 5）。

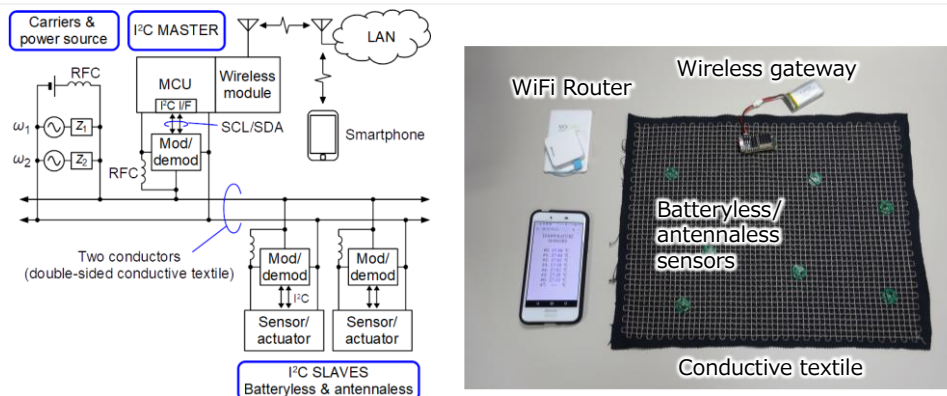


図 3 導電テキスタイル上に分散配置したセンサの情報をスマートフォン上で閲覧するシステムの実装例。

### 研究テーマ C 「市販製品・既存技術の枠を超えたイントラウェア通信・インターウェア通信の先端研究」

インターウェア通信および人の位置情報取得などの応用を目指した、衣服に組み込み可能なフレキシブルアンテナによるセンシング等の基礎検討を行った。単一あるいは複数のフレキシブルアンテナを用いる系で人体の近接が検出可能であり、(a)反射または透過する信号強度のみで検出できること(位相の情報は不要であること)、(b)人の動きの時間的スケールから、高速通信で必要とされるような高サンプリングレートは不要であること(毎秒数十～100 サンプリング程度で充分であること)から、かなり簡易な検出回路で実装可能であると見込んでいる。

また、導電布上での通信に関するその他の先端的な研究の展開として、近接場通信(NFC)との組み合わせによる皮膚上のセンサと衣服のネットワークの接続(「5. 主な研究成果リスト」の(2)の2)、衣服に限らないより広範な領域への応用展開を目指す新規研究課題への着手(総務省 SCOPE にて実施)、二次元導波路上でのさらに低消費電力な通信技術の研究(「5. 主な研究成果リスト」の(1)の1)などに発展している。

### 研究テーマ D 「上記1～3の成果を利用したアプリケーションシステムの研究開発」

触覚呈示のアプリケーション開発では、慶応義塾大学 南澤研究室、帝人株式会社、Enhance Inc.等と共同で開発を進め、Asia Haptics 2019 において成果のデモ発表を行った。

また、さきがけ同領域 1 期生の筑波大学 橋本悠希助教と、足裏への触覚呈示装置について本研究で開発する二次元通信技術を用いた実装の可能性を検討した。触覚呈示の研究ツールとして、ボイスコイルアクチュエータを駆動する任意波形を多チャンネル独立に伝送可能であることが要求され、これを FM アナログ変調により伝送する手法を検討した。本成果についての国内研究会での発表に対し 1 件の表彰を受け、電子情報通信学会の英文論文誌に 1 件の論文が掲載された。

## 3. 今後の展開

導電布上で安定して利用可能な通信システムの実現にこぎつけ、当初計画通りにその設計情報詳細をインターネット上で公開した。しかしながら、それのみで直ちに本成果が広く利

用されることにはつながらない。現在公開している情報だけでは不十分な部分もあり、今後継続的に情報を更新するなど、公開リポジトリのメンテナンスを継続する必要がある。

また、設計情報の公開にとどまらず、完成品の実物を頒布することによってより直接的に本成果の利用を促すことができると考えられる。現時点では具体的に取り掛かれていないが、成果物の頒布の展開については1~2年以内の実現を目指し今後早急に検討を進めたい。

#### 4. 自己評価

研究目的の達成状況としては、当初計画通り、基礎研究に基づきその成果を非専門家が利用可能なように設計データ詳細をインターネット上で公開するに至っており、また、当初想定を超える高速・低消費電力な通信方式を見出すなどの点で想定以上の達成状況と言える。学会発表・論文に対する11件の受賞に加え、令和4年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞の受賞内定(表彰予定日:令和4年4月20日)もその達成度の高さの裏付けとなっている。さらに成果の一部は民間企業によるビジネス利用にも到達している。

一方で、本成果は身体表面での多点にわたる生体の詳細なセンシングによる健康管理など有用な応用可能性を有しており、現時点で着手できている応用研究の範囲はその可能性に対してほんの一部に過ぎず、「やりつくした」と言える到達度ではない。今後継続して応用研究の発展に注力する必要がある。

予算執行に関しては、さきがけの予算規模を最大限に活用し、1台で数百万円規模となる高周波計測器を必要なスペックで必要な時期に調達し、一度の開発で数十万円を要する回路モジュール開発について複数回のアップデートを重ねることができた。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果として、成果の一部は論文のみならず特許登録に至ったものもあり、他大学・企業との共同研究や他の競争的研究資金による新規な研究開発プロジェクトにも発展している。一方、共同研究については、一部はコロナ禍の混乱とともに停滞しほぼ立ち消えの状態となってしまっているものもあり、今後、改めて最新の研究成果をもとに新規な提案をまとめて関係を回復し共同研究へとつなげたい。

#### 5. 主な研究成果リスト

##### (1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:5件

1. Akihito Noda. "Backscatter communication on 2-D waveguides". IEICE Communications Express. 2021, Advance publication

低消費電力無線通信として有望な Backscatter 通信方式を、二次元伝送環境に適用することを提案した。Backscatter 端末(BX)は、二次元通信の表面カプラの終端インピーダンスを切り替え、外部から供給された連続波(CW)を変調する。受信機(RX)では、この変調信号の受信と同時に強い CW 波の干渉を受けるため、これらの分離が課題となる。本論文では、BX が周波数シフトした変調信号を生成し、RX では表面弾性波(SAW)フィルタによって強い CW を除去することにより、単純な回路構成で省電力の BX, RX を構成できることを示した。

2. Akihito Noda and Hiroyuki Shinoda. "Simplex Inter-IC for Wearables and Its Applications".

IEEE Access. 2021, vol. 9, pp. 69654–69662

本論文では、一対の導電性繊維で構成された単一の伝送路上で、単信（一方向）での I2C 形式のシリアルビット伝送と直流給電を同時に実現する手法を提案した。これ以前に提案した半二重通信の手法に対し、より大きい伝送路の静電容量（すなわちより低い伝送路のインピーダンス）を許容し、安定した通信が可能であることを示した。導電性繊維で構成されたジャケットに LED やアクチュエータを取り付けたデモシステムも示した。

3. Akihito Noda and Hiroyuki Shinoda. "Inter-IC for Wearables (I2We): Power and Data Transfer Over Double-Sided Conductive Textile". IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems. 2019, vol. 13, no. 1, pp. 80–90

既存のシリアル通信プロトコルである I2C をベースに、導電布上の給電・通信ネットワークを提案した。両面導電性の布地上に配置された小型のセンサノードに対し、連続的な直流給電と I2C 形式のデータ伝送を同時に実現する方法を示した。パッシブ変調を可能にする特殊なフィルタを設計し、そのインピーダンスの極とゼロを適切な周波数に配置したことが特徴的である。

## (2) 特許出願

研究期間全出願件数: 1 件 (特許公開前のものも含む)

1	発 明 者	野田 聡人
	発 明 の 名 称	ウェアラブル生体センシングシステム
	出 願 人	学校法人南山学園
	出 願 日	2019/9/9
	出 願 番 号	特願 2019-163942
	概 要	人体の皮膚表面各所に複数のバッテリーレスのセンサを分散して貼り付け、それらのセンサへの給電とデータの読み出しを非接触で実現する着衣型のシステムを提示した。

## (3) その他の成果 (主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. (招待講演) Akihito Noda, "Wearable Network Using Conductive Textile for On-Body Distributed Micro-Nano Sensors and Actuators", the 30th 2019 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS2019) (2019 年 12 月 3 日)
2. (受賞) 野田 聡人, 2019 年度電子情報通信学会短距離無線通信研究会論文賞 (2020 年 8 月 24 日)
3. (受賞) 野田 聡人 and 篠田 裕之, 2019 年度電気通信普及財団賞 (テレコムシステム技術賞奨励賞) (2019 年 3 月)
4. (受賞) 野田 聡人, 2018 年度電子情報通信学会短距離無線通信研究会論文賞 (2019 年 6 月 10 日)
5. (受賞) Akihito Noda, IEEE CCNC 2019 Best Demo Award Runner-Up (2019 年 1 月 14 日)