

ウェアラブルセンサ・アクチュエータシステムのための 導電布を介した通信と給電

○野田聡人(南山大学) 増田祐一(東京大学) 篠田裕之(東京大学)

1. はじめに

近年一般に普及し始めたウェアラブルデバイスは、腕時計型あるいは眼鏡型などのアクセサリ状の形態がほとんどである。知能化された機能を有する衣服型の「着られる」デバイスは、全身にわたる多点での生体情報のセンシングや多点の触覚刺激の提示など、小物のアクセサリ状デバイスにはない機能を実現可能にする。このような機能を日常的に長時間にわたって利用可能とするために、センサ・アクチュエータ等の個々の素子・モジュール（以下「物理素子」と呼ぶ）を柔軟に実現することに加え、それらを接続・統合しシステムとして動作させるための給電と通信についても、衣服の着用性を損ねることなく実現することが求められる。またこの給電・通信の技術は柔軟センサ・柔軟アクチュエータに限らず様々な物理素子を衣服に実装するためにも有用となる。

本稿では、衣服上に分散したバッテリーレスの物理素子への給電および通信を、個別の配線なく実現するための一手法を提案する。

電源の確保と通信の無配線化のための有効な手法の一つは、各物理素子にバッテリーを搭載したうえで電波による無線通信を利用することである。しかし、衣服上に多数の物理素子を実装する場合には、小型のバッテリーであっても全体として無視できない重量の増加となり着用性を損ねること、充電や交換の手間が増大することが問題となる。また、無線通信は有線系よりもより多くの外的要因の影響を受けるためデータ欠落・再送などが増加し、データ伝送の即時性が損なわれる点も課題の一つである。

一方、銀メッキを施した繊維や銀粒子を含むインクなど、衣服に使用可能な柔軟で導電性の高い材料や製造技術・印刷技術が登場してきており、これらを利用することで着用性を損なわずに衣服に電子回路を形成することが可能になってきている [1, 2]。しかしこれらの材料は通常の銅線と比較すると抵抗が高い。例えば銀メッキ導電糸では導電性を有するのは繊維表面の薄い銀メッキ層であり、繊維全体の断面積に対して銀の断面積は小さいためである。センサを駆動する程度のマイクロワットからミリワットクラスの給電であれば無視できるほどの抵抗であっても、着用者に触覚刺激を知覚させるようなアクチュエータを駆動する程度のサブワット～数ワットクラスの電力伝送では無視できない抵抗損を生じる。この損失は、ただ電力の利用効率を低下させるということだけでなく、発熱によって導電材料そのものを損傷させ動作不能とするなどの問題を生じ得る。

こうした材料を用いながら、アクチュエータを動作させるほどの電流を供給するためには、一本一本の銅

線を導電糸で置き換えるような方法ではなく、本稿で以下に提案するような面的な伝送路を形成することが有効である。布地のような二次元面的な素材には、表と裏という二つの面が必ず存在するため、これら2面を独立した導体面として一対の伝送路を形成することは合理的である。すなわち、2面間に電圧を印加して電力と信号の伝送を行うことができる。片側の面に伝送路を形成することも可能であるが [3]、衣服では表面同士の間隔（関節の内側や、腕と胴体との間など）は頻繁に生じるため短絡を生じやすい。また繊維材料の性質として繊維が毛羽立つこともあり、導電性の毛羽立ちを介して短絡するリスクもある。同一の面上の導電パターンはすべて同電位として、表と裏の2面間にだけ電位差を与える方式がより安全であると言える。電流が流れる断面積の合計が大きくなることにより、抵抗値が減少し許容電流値が増大する。電流が面的に分散することで、同じ断面積の一次元的な配線よりも放熱しやすいことも許容電流を増大させる効果を生むと考えられる。

提案する手法は、導電性の繊維を使用して内側・外側の両面に導電性を持つ衣服を構成し、物理素子をピンバッジのように突刺して固定することで導電繊維と接触導通させ、衣服を通して給電と通信を行うものである。内側と外側の導電面は互いに絶縁されており、この2面の導電面を一対の伝送線路として用いる。

本稿では以下、この導電布とタック（鉤）型コネクタによる伝送路形成について説明した上で、これを用いた衣服上に分散した物理素子への給電法と、給電を個別に制御するためのいくつかの手法について述べる。

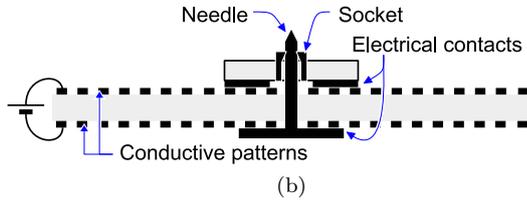
2. 導電布とタック型コネクタ

提案手法では導電繊維を用いた両面導電布とタック型のコネクタを用いる。本手法における導電布およびコネクタに対する原理的な要求は、布上に2枚の互いに絶縁された導電面を形成し、コネクタがそれら2面に接触導通することである。布およびコネクタの構造の一例を図1に示す。

両面導電布の製造方法としてはいくつかの方法が考えられる。一つの例としては、図1(a)のように非導電性の基布の両面に導電糸で刺繍を施す方法がある。この時、基布の表と裏の刺繍は互いに絶縁されている必要があるため、基布を貫通させるように導電糸を刺繍するのではなく、導電糸を基布の一面に固定するように非導電性の別の糸で縫い付ける。刺繍は均一な格子状の単純なパターンでも良いし、任意のパターンで意匠性を高めることもできる。その他の方法としては、導電性インクを基布にプリントしたり、導電糸だけで織られた導電布2枚を非導電性の布を挟んで重ね合わせ



(a)



(b)

図1: (a) 両面に導電糸でメッシュパターンを形成した両面導電布. (b) 両面導電布にタック型コネクタを突き刺した断面図. 本図では物理素子を実装する基板 (PCB) 側にソケットを実装する例を示している.

る方法も有効である. 布の製造方法は, 用途に応じて柔軟性・伸縮性や電気的特性およびコストを考慮して適当なものを採用する.

この導電布に, 図1(b)に示すように一方の面からタック型コネクタの針を突き刺し, 反対側の面から針をソケットで受ける. 針とソケットはともに導電性を有し, 嵌合状態においてこれらは導通している. 針とソケットのいずれを物理素子側に配置することも可能である. ソケットを物理素子側に配置する場合, 針は画鋲のように薄い円盤状のベースと一体化・導通させたものを使用する. 円盤ベースが導電布と接触導通し, ピンを介してソケットが実装された物理素子側の回路に電流パスを接続する. 物理素子側の回路基板も導電布と接触する側に導電面を露出させておき, 接触導通することでこの基板から布の両面に電流パスを接続することができる.

これらの間で短絡を生じさせないためには, 基板の裏面において針が貫通する部分の周囲の銅パターンをくり抜くこと, および針をシートに突き刺す際には両方の導電面に同時に接触しないように, 針に適当な絶縁加工を施すあるいは布の導電パターンに開口部を設けておき (図1(a)では格子の目が開口部となる) そこに針を刺すようにする.

3. 物理素子への給電

3.1 全素子への一斉給電

前節で説明したように導電布にタック型コネクタを突き刺して導通することで, 布の導電パターンが連続している範囲で物理素子を複数並列に接続することができる. 図1(b)に示すように2面間に直流電圧を印加すると, その面に接続された全ての物理素子に同時に直



(a)

(b)



(c)

図2: 触覚提示ジャケットの実装例. (a) 前面, (b) 背面. (c) 導電面はジャケット上で12セクションに分割されている. 左右の腕が上腕・前腕で各2分割, 前身頃・後ろ身頃が各4分割である.

流電源を供給できる. 衣服全体にわたって導電パターンを連続させておくと, 衣服に分散させた物理素子のすべてに直流電源を供給できる. これだけでは単純な直流電源の供給のみで通信や個別の通電・遮断の機能は実現できないが, 外部との通信なしに自律的に動作をする物理素子を分散させたり (例えば局所的な明るさに応じてアクチュエータが動作するなど [4]), 無線通信機能を持った物理素子を個々にバッテリーを搭載せずに分散させるといった応用例が考えられる.

3.2 複数セクションへの分割給電

導電パターンを衣服全体にわたって連続とせず, 適当なセクションに分割してそのセクションごとに通電・遮断を制御することは少数の配線で実現可能である. 例えば片腕につき上腕と前腕で導電パターンを分割し, それらの分割位置付近に電源およびスイッチング回路を固定してそれぞれに電氣的に接続することで, 上腕と前腕への給電を個別にオン・オフして2 bit (4通り)の状態を作り出すことができる. この場合は上述のように各素子が自律的に機能する場合に限らず, 給電スイッチの回路によって特定の機能を実現することができるようになる. 複数の物理素子の一つ一つに個別に配線する必要がなく, また一つのセクション内で物理素子を任意に配置でき, 変更も容易である. ただし本方式では面全体が同電位とはならないため, 面同士の接触による短絡が生じないように注意が必要である. 前述の通り腕と胴体の接触などが生じるのは衣服の外側の面であるから, 外側はすべて同電位としておいて, 内側のみ分割する方法がより安全と言える.

図2はこの方式による触覚提示ジャケットの実装例である. ジャケットを左右の上腕・前腕の4セクショ

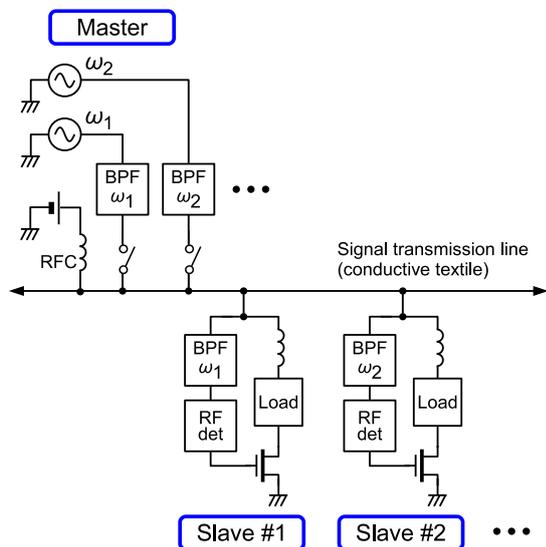


図 3: 直流電源を常時接続したうえで同一伝送線路上に制御用の RF 信号を重畳して伝送する系の構成。

ンおよび前後の身頃を左右上下に分割した 8 セクションの計 12 セクションに分割している。上述の通り、内側の導電面に対してこのように分割しており、外側は全セクションで共通のグラウンド電位としている。各セクションに 5~6 個程度の振動モータをそれぞれタック型コネクタで取り付け、各セクションへの通電・遮断をマスターデバイスから制御することで上半身の各セクションに選択的に振動刺激を提示できる。

セクション内に実装するアクチュエータの数を増加させても触覚刺激の表現の自由度は向上しないが、個々のアクチュエータとしては小型・軽量なものを使用しながら、単一のアクチュエータよりも広い面積に刺激を提示することができる。着用者の姿勢・動作により皮膚と衣服の接触状況は変化するが、広い面積に刺激を提示していれば皮膚に刺激を伝達する確実性を高めることができる。また、詳細な評価は未実施であるが、複数の被験者に着用させて自由に感想を述べてもらうと、小型の振動アクチュエータ単体の振動から想像される刺激とは印象が異なるとの意見が多く、振動だけでなく圧覚を伴うような刺激を感じると報告する者もあった。

アプリケーションとして、立体視ディスプレイと併用して映像に同期した触覚刺激の提示により映像に触れる感覚を表現したり、音楽に合わせて振動を提示することで臨場感を高めるなどの用途が考えられる。

3.3 同一セクション内の個別給電

上述の導体パターンの分割による個別の給電ではなく、連続した導体パターン上で表裏 2 面 (2 線) で電力および信号のすべての伝送を実現するには、何らかの多重化方式を用いる必要がある。基本的に直流で給電しつつ信号伝送の期間のみ電源を遮断する時分割多重化 (TDM) [5]、直流での給電と同時に高周波で信号を伝送する周波数分割多重化 (FDM) [6] が考えられる。著者らは、FDM により複数チャンネルの高周波 (RF) 給電を行う方法 [7] や、直流電源に重畳して制御用の

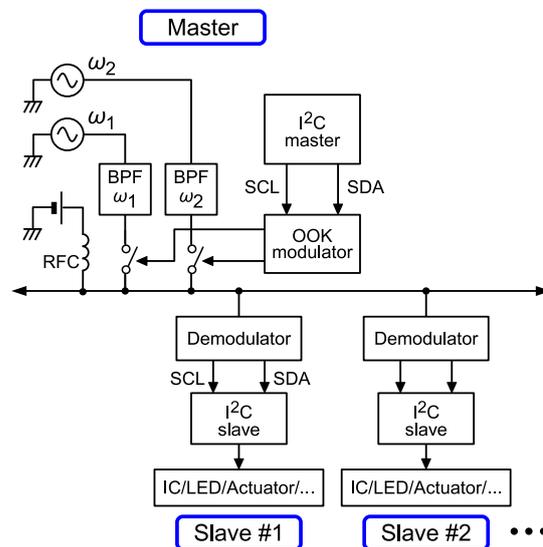


図 4: 同一伝送路上で直流給電と I²C 信号伝送をする系の構成。

RF 信号を伝送路に与える方法 [8] を報告している。後者の報告例 [8] では、図 3 に示すように特定の周波数の制御信号を受信すると通電するスイッチング回路を受電する物理素子側に搭載しておき、このキャリアの数だけ個別の通電・遮断の制御を実現している。具体的には 25, 40, 54 MHz の 3 チャンネルのキャリアを単純な LC 共振フィルタにより分離・検出している。市販のチップキャパシタ、チップインダクタによる LC 共振回路の Q 値は高々数十程度であるから、周波数帯域あたりのキャリア数をより高密度に配置するには異なる検波方式が必要である。

3.4 シリアル通信

上述のように複数キャリアにより制御信号を伝送する方式で、伝送する bit 数分だけキャリアを用意するパラレル伝送以外に、キャリアを時間的にパルス変調してシリアル伝送を行う方法が考えられる。本稿では、IC 間のシリアル伝送方式として標準的に用いられる I²C (Inter-Integrated Circuit) [9] 形式の信号を伝送する方法を提案する。

I²C ネットワークでは全てのデバイスが一つの I²C バスに並列に接続され、クロック (SCL) とデータ (SDA) の 2 本の信号線でデータを伝送する。これに対応して 2 つの異なる周波数のキャリアを用意し、これらをそれぞれ I²C インタフェースを搭載した IC の SCL および SDA の論理レベルでオンオフ変調 (OOK) し、同一伝送路上に直流電源に重畳して伝送する (図 4)。受信回路では 2 つのキャリアを分離して検波し、元の SCL および SDA データを復調して IC の I²C ポートに入力する。

本手法では、市販の I²C 対応の IC をそのまま利用可能であることから部品の選択肢が多く、また IC と通信するマイクロコントローラ (MCU) に実装するソフトウェアライブラリも既存の I²C 通信用のものがそのまま利用可能である点が大きなメリットである。

図 5 は本手法により複数の振動アクチュエータおよ

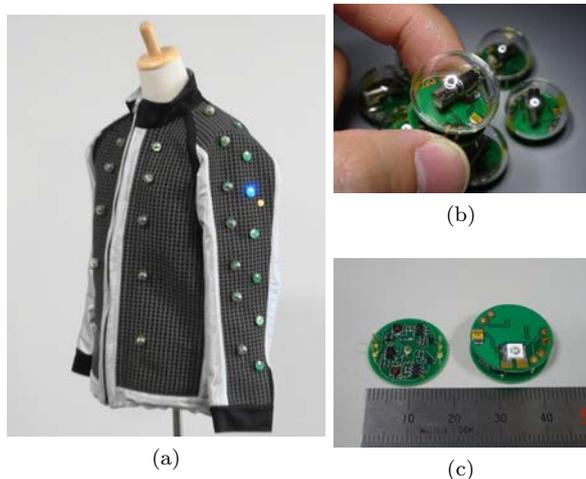


図 5: (a) 触覚提示用振動アクチュエータと LED を実装したジャケットの例. (b) 振動アクチュエータ, (c) 復調回路 (左) と LED モジュール (右).

び LED をジャケット上に分散実装した例である。それぞれにユニークな識別番号をプログラムした MCU を搭載しており、すべて個別にオン・オフの制御が可能である。SCL と SDA の伝送用に 2 MHz および 5 MHz のキャリアを用いており、I²C のクロック周波数 10 kHz での通信を実現している。I²C ではマスターから通信相手のスレーブのアドレスを指定した後に 8 bit 単位で任意の長さのビット列を伝送できるので、一つの物理素子に対して単純なオン・オフの 1 bit の制御だけでなく、LED の輝度・点灯時間や振動アクチュエータの振動強度・動作時間などの詳細な制御情報を伝送することも可能である。I²C プロトコルとしては通常 7 bit 長のアドレスでスレーブを識別する (10 bit アドレスも仕様として存在する) が、この任意長のデータ内に識別番号をコーディングすることによれば、7 bit を超える多数のスレーブの識別が可能である。このように識別可能なスレーブ数や 1 スレーブに対する伝送データの大きさには原理的な制約がないが、クロック周波数によって I²C ネットワーク全体での通信速度が規定されるので、1 回の伝送データの大きさとその更新レートの高さがトレードオフとなる。

また、図 4 の構成を双方向の通信を行うように変更することで、各種センサ IC をスレーブデバイスとしてマスターから逐次データを読み出すセンサネットワークが構成できる。ワンチップのモーションセンサ IC を各所に取り付けてモーションキャプチャを行ったり、多点での筋電計測を行ったりといった用途が考えられる。

4. まとめと展望

本稿では、センサ・アクチュエータを埋め込んだ知能化された衣服を実現するにあたり、導電布を介して各物理素子への給電と信号の伝送を可能とする手法を提案した。通常の衣類の縫製に用いるのと同程度の柔軟性を有する導電糸や、スクリーン印刷あるいはインクジェット印刷可能な導電インクなどを用いることで、衣服上に柔軟な伝送路を形成することは可能となってきている。しかし、繊維素材の毛羽立ちや衣服の変形

と面同士の接触などを考慮すると、プリント回路基板上に回路を作るのと同じように導電パターンを形成する方法は必ずしも適切ではない。本稿では衣服の表と裏という 2 面を独立した導電面として、2 面 (2 線) のみで給電および通信を行う手法を提案し、実装例を紹介した。提案手法は市販の多くのセンサ IC やアクチュエータを用いた実装が可能であるが、柔軟センサ・柔軟アクチュエータとの組み合わせにより、それらの特徴を活かしたアプリケーションの開拓が期待できる。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 17H04685 の助成を受けて行われた。通信シートおよび衣服の一部は帝人株式会社による。

参考文献

- [1] L. Buechley, and M. Eisenberg, “The LilyPad Arduino: Toward Wearable Engineering for Everyone,” *IEEE Pervasive Computing*, vol.7, no.2, pp.12-15, April 2008.
- [2] Y. Kim, H. Kim, and H.J. Yoo, “Electrical characterization of screen-printed circuits on the fabric,” *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, vol.33, no.1, pp.196-205, Feb 2010.
- [3] C.K. Harnett, “Tobiko: A contact array for self-configuring, surface-powered sensors,” *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.2024-2028, New York, NY, USA, 2017, ACM.
- [4] H. Uematsu, D. Ogawa, R. Okazaki, T. Hachisu, and H. Kajimoto, “Halux: Projection-based interactive skin for digital sports,” *ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies*, pp.10:1-10:2, New York, NY, USA, 2016, ACM.
- [5] J. Akita, T. Shinmura, and M. Toda, “Flexible network infrastructure for wearable computing using conductive fabric and its evaluation,” *26th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, p.65, 2006.
- [6] E. Wade, and H.H. Asada, “Cable-free wearable sensor system using a DC powerline body network in a conductive fabric vest,” *IEEE EMBC 2004*, vol.2, pp.5376-5379, Sept. 2004.
- [7] Y. Tajima, A. Noda, and H. Shinoda, “Signal and power transfer to actuators distributed on conductive fabric sheet for wearable tactile display,” *Proceedings of AsiaHaptics 2016*, pp.163-169, Kashiwanoha, Japan, November 2016.
- [8] A. Noda, and H. Shinoda, “Frequency-division-multiplexed signal and power transfer for wearable devices networked via conductive embroideries on a cloth,” *2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Proceedings*, pp.1-4, TUHF1-21, Hawaii, USA, June 2017.
- [9] NXP Semiconductors, “UM10204: I²C-bus specification and user manual, Rev. 6,” <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>, 2014.