

磁界共鳴方式を用いた衣服間無線電力伝送におけるコイル形状の検討

宮村 騎久也[†] 宮路 祐一^{††} 大村 廉^{††}

概要: 近年, 多くのウェアラブルデバイスが開発されているが, 複数のウェアラブルデバイスを同時に使用する場合には各デバイスの電源管理が大きな問題と成り得る. そこで, 我々は磁界共鳴方式を用いて衣服間で無線電力伝送を行うことで一つの電源から複数のデバイスに電力を分配する方法を提案している. 本研究では最初のステップとしてシャツとズボンに取り付けたコイル間で無線電力伝送を行うことを考え, 形状の異なる3パターンのコイルを布地表面に実装した. そしてそれぞれのパターンの電力伝送効率を, 人の動作に起因するコイル間の位置ずれを考慮して測定した. 結果から, ヘリカルコイルを使用したパターンは腰のひねりにより生じる位置ずれに対し安定した伝送効率となり, また平面コイルは位置ずれが少ない場合に高い伝送効率となることがわかった. これらの特性から, シャツとズボン間のような位置ずれの発生しやすい衣服間での電力伝送にはヘリカルコイルが適していると考えられ, 平面コイルについてはシャツとジャケット間のような位置ずれの少ない衣服間で応用できる可能性があると考えられる.

Feasibility Study of Coil Shapes in Wireless Power Transfer between Clothes

KIKUYA MIYAMURA[†] YUICHI MIYAJI^{††}
REN OHMURA^{††}

Abstract: In recent days, many wearable devices have been developed. However, in a case where a user wears multiple devices, supplying and managing their power supply would be a large problem. In this research, we propose utilizing a wireless power transfer technique between clothes with an aim to distribute power of a single (or a few) power source to multiple devices and minimize its maintenance requirement. Considering the wireless power transfer between a pair of trousers and a shirt as its first step, this research implemented three patterns of resonators on the surface of the fabrics. The transmission efficiency between them were measured by changing coil misalignment, which is assumed to be caused by the body movement of a wearer. The results showed that the helical model achieved stable wireless power transmission in ordinary wearer's movement and single and array model could have higher efficiency when transmitter and receiver coils could keep stable alignment.

1. はじめに

近年, 様々なウェアラブルデバイスが開発されている. 例えばメガネ型, 指輪型, 腕時計型のデバイスが一般的になってきているが, Smart Clothing と呼ばれるシャツやズボンなどの衣服型のデバイスも開発されている[1]. このように, 今後ユーザがウェアラブルデバイスを複数同時に着用するという可能性は非常に高いと考えられる. 例えば, エクササイズのモニタリング目的で生体情報をセンシングするシャツと膝の曲がり具合をセンシングするタイツを着用する, といったことが考えられる. また, 行動認識などを目的に IMU (initial measurement unit) を手首, 腕, 太腿, 足首, 腰など複数の離れた部位に装着するといった事例も実際にある [2]. しかし, このようにユーザがウェアラブルデバイスを複数装着した場合, 各デバイスの電源管理が大きな問題となる. 例えば各デバイスの電池残量を把握して充電を行うことがユーザの負担となる.

ユーザによる電源管理の負担を減らす一つの方法として,

単一のバッテリーからケーブルなどを用いて複数デバイスに電力を分配するという方法がある. しかし, ケーブル着脱の手間がかかるだけでなく, ケーブル自体がユーザの動作を妨害してしまうといった問題が発生する. また, スナップボタン型のコネクタなどウェアラブルに適したコネクタも多くあるが, 同様に着脱の手間がかかる [3]. この他, エナジーハーベスティング技術を用いてウェアラブルデバイスに電力を供給するといった方法もあるが, 本質的に環境に左右されて供給される電力が安定しないといった問題がある [4, 5].

本研究では無線電力伝送技術を用いて衣服間で電力を分配し, ウェアラブルデバイスの電源を一元化することを考える. これによりユーザは単一の電源管理だけに集中することができ, またケーブルや接点を必要としないためより自然にウェアラブルデバイスの機能を活かすことができると考えている. 無線電力伝送技術には様々な方式があるが, コイル間の位置ずれに強いという利点を持つ磁界共鳴方式

[†] 豊橋技術科学大学大学院
Graduate School of Toyohashi University of Technology.

^{††} 豊橋技術科学大学
Toyohashi University of Technology.

を採用した [6]. 磁界共鳴方式は共振周波数を一致させた二つの共振器間の磁界での結合を利用した無線電力伝送技術である. 例えば, シャツとズボン間で無線電力伝送を行う場合シャツとズボンの位置関係はユーザの動作によって大きく変化するため, コイル間の位置変動に対して強い磁界共鳴方式が適していると考えられる. また, シャツとズボン間でだけでなく, ジャケットとシャツ間, 靴下とズボン間で無線電力伝送を行うといったことも考えられる. 本研究では上半身と下半身に電力を分配することが最も重要であると考えた. そして, シャツとズボン間で無線電力伝送を行うことを研究の最初のステップとし, シャツとズボン間での無線電力伝送に適したコイルの形状を調査するためにコイル形状の異なる 3 パターンの共振器を布地表面に実装し, 人の胴体に近い円柱型のモデルに装着した. そして人の動作による位置ずれを考慮して電力伝送効率を測定し, 各パターンの特性について評価した.

本論文の構成は以下の通りである. 2 章において, 関連研究を説明し, 本研究で取り扱う問題を明確にする. 3 章において, 提案手法について述べ, 作成したコイルパターンについて説明する. 4 章において, 実際に行なった実験について述べ, 5 章においてその結果をまとめる. 6 章では結果をもとに, 衣類間で無線電力伝送を行なうに当って適したコイル形状について考察を行なう. 7 章で本論文をまとめる.

2. 関連研究

エナジーハーベスティング技術を用いてウェアラブルデバイスに電力を供給するバッテリーが開発されている. 例えば, 太陽光エネルギーを用いたテキスタイル型バッテリーが開発されている [4]. これはバッテリー自体が布に近い柔軟性を持っているためウェアラブルデバイスに適していると考えられるが, 太陽光の当たらない室内や夜には充電することができないため安定した電力の供給が難しい. また圧電素子を用いたテキスタイル型バッテリーも開発されているが, 同様に安定して電力を供給することが難しい [5]. 一般的なウェアラブルデバイスの使用方法としてユーザの活動をモニタリングするというのが考えられるが, その場合デバイスは環境に左右されず長時間安定して動作する必要がある. そのため, 上記のようなエナジーハーベスティング技術を用いたバッテリーを実用的に使用するにはまだ困難が多いと考えられる.

本研究と同様に無線電力伝送技術を用いてウェアラブルデバイスに電力を供給する手法が開発されている. 例えばテーブルクロスなどの布地表面に実装したコイルからウェアラブルデバイスに無線で電力を供給するシステムが提案されている [7]. このシステムは衣服間で電力を供給するのではなく, テーブルなどの周囲の環境からユーザが装着しているデバイスに電力を供給することを目的としている.

さらに, このシステムは電磁誘導方式を用いており, 実験ではコイル間のギャップが無い状態での電力伝送効率のみ考慮している. ウェアラブルデバイスでの応用を考慮するとユーザの動作によってコイル間の位置関係は大きく変化すると考えられるため, その位置ずれを考慮した実験と評価が必要であると考えられる.

無線電力伝送技術を用いてジャケットのポケットに収納しているスマートフォンなどのデバイスの電力を, 装着しているスマートウォッチなどに分配するシステムが開発されている [8]. このシステムでは直径 10cm 程度の送受信コイルを用いているため, 位置ずれに対して非常にセンシティブであると考えられる. しかし, コイル間の位置ずれやギャップに対する定量的な実験がなく, どの程度の位置ずれ, ギャップまで許容できるのかが明確ではない. スマートフォンからポケット内のコイルのように位置ずれがほとんど発生しない場合においては問題無いが, シャツとズボン間のようにユーザの動作によって位置ずれが大きく成り得る場合には伝送効率が安定しないと考えられる.

3. 提案手法

図 1 に衣服間無線電力伝送のコンセプト図を示す. ズボンとシャツにそれぞれ直接共振器を実装して無線電力伝送を行うシステムである. 一般的な磁界共鳴方式を用いた無線電力伝送システムは高周波電源やインピーダンス整合回路, 増幅回路など様々な要素から構成される. 本研究ではまず衣服に適したコイル形状について検討を行うため, 布地表面に実装した共振器間の電力伝送効率についてのみ評価を行う.

3.1 共振器設計

図 2 に本研究で評価する 3 パターンの共振器を示す. 図 2 の各モデルは, 下側のコイルがズボンに実装することを前提とした送信側コイルで, 上側のコイルがシャツに実装することを前提とした受信側コイルである. ここで, ユーザはズボンの腰部に取り付けた電源の電力をシャツ側に伝送すると仮定している. 表 1 に各パターンのコイルパラメータを示す. 各パターンのコイルは厚さ 3 mm 程度のフェルト生地地に銅箔テープを貼り付けることで実装している.

図 2 (a) の単一モデルは単一の平面コイルを送受信コイルとして用いたモデルである. シャツとズボンにコイルを実装することを考慮すると, コイルのサイズは制限される.

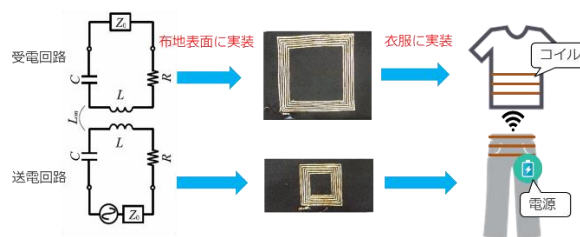


図 1 衣服間無線電力伝送のコンセプト



(a) 単一モデル (b) アレーモデル (c) ヘリカルモデル
図 2 3 パターンの実験モデル

表 1 各実験モデルのコイルパラメータ

	単一モデル	アレーモデル	ヘリカルモデル
受信コイル [mm]	180×180	100×100 (3 コイルアレー)	200(直径)
送信コイル [mm]	100×100	100×100	200 (直径)
コイルピッチ [mm]	2	2	2
線径[mm]	2	2	2
共振周波数 [MHz]	13.56	13.56	10.0

特にズボン側のコイルはシャツに近い位置である股上部分に実装する必要があるため、比較的小型にする必要がある。そこで、ズボン側の送信コイルの外径を 10×10 cm とした。一方でシャツ側は比較的小さいコイルを実装するスペースが大きいので、コイルの位置ずれに対する許容度を高めるためにコイルの外径を 18×18cm と比較的大きいサイズとした。送受信コイルそれぞれには可変コンデンサを取り付けて共振周波数を 13.56MHz に一致させている。

図 2 (b) のアレーモデルは 10×10 cm の平面コイルを 3 つ用いたアレーコイルを受信コイルとして用い、送信コイルに単一モデルと同じ 10×10cm の平面コイルを用いたモデルである。このモデルはアレーコイルによりコイルの水平ずれに対する許容度を高めることを狙っている。3 つの受信コイルそれぞれと、送信コイルに可変コンデンサを取り付け、共振周波数を 13.56MHz に一致させている。なお、伝送効率の測定には 3 つの受信コイルの内の中央のコイルのみを用いている。つまり中央のコイル以外は寄生素子として働く。

図 2 (c) のヘリカルモデルは送受信コイルともに同じ形状のヘリカルコイルを用いたモデルである。他のモデルに比べコイルのサイズは大きいですが、ズボンのベルトループに実装するなど衣服の形状に合わせて実装することができると考えている。

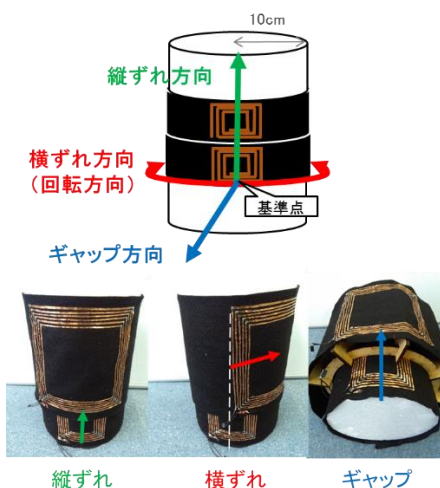


図 3 位置ずれの定義

4. 実験設定

図 2 に示した各実験モデルを用いて、人の動作に起因する 3 次元的位置ずれを考慮した電力伝送効率測定実験を行った。図 2 のように布地表面に実装した共振器は、平均的な女性のウエストに近い大きさである直径 20cm の円柱型発泡スチロールに取り付けている。この状態から受信コイルの位置をずらしながら電力伝送効率を測定した。

図 3 に本研究における 3 つの位置ずれの定義を示す。送信コイルに受信コイルをオーバーラップさせ、コイルの下端が揃った位置を基準点として位置ずれを発生させていく。円柱の軸方向に受信コイルをずらししていくことを縦ずれと定義する。円柱の円周を時計回り、または反時計回りに受信コイルをずらすことを横ずれと定義する。円柱の軸に対して垂直に受信コイルをずらすことをギャップと定義する。このギャップは図 4 のギャップの例のように木製の治具を用いて発生させる。この治具を用いることで送信コイルと受信コイルの間に 2.5cm, 5cm とギャップを作ることができる。

人体の関節可動域を考慮すると、シャツの腰回りの横ずれ、縦ずれは最大 15cm ほど発生すると考えられる。そこで縦ずれは 0cm から 3cm 刻みで 18cm まで発生させ、横ずれは -18cm から 3cm 刻みで 18cm まで発生させながら電力伝送効率を測定した。電力伝送効率を得るための S パラメータの測定にはベクトルネットワークアナライザ (VNA) を用いた。電力伝送効率は測定した透過係数 S_{21} から式 (1) を用いて計算した。

$$\eta_{21} = |S_{21}|^2 \times 100 [\%] \quad (1)$$

5. 実験結果

5.1 単一モデル

図 4, 5, 6 に単一モデルの位置ずれに対する電力伝送効率のグラフを示す。グラフの横軸が横ずれ、縦軸が縦ずれ

となっており、色によって伝送効率の高さを表している。各図はそれぞれギャップが 0, 2.5, 5 cm のときの位置ずれに対する伝送効率を示している。単一モデルは受信コイルの径が大きいので、比較的広い範囲で電力伝送が可能となっていることがわかる。しかし図 4 からわかるようにコイル同士が近づきすぎると伝送効率が非常に小さくなっていることがわかる。ギャップを 2.5, 5 cm と大きくしていくごとに伝送効率の高い範囲が現れ、図 6 のようにギャップが 5 cm のとき中心に 50% 以上の高い伝送効率の範囲が現れていることがわかる。ギャップが 5 cm のときは縦、横ずれが 5 cm 発生しても 50% 以上の高い効率となっており、15 cm までずらしても 40% 程度の効率を保っている。

5.2 アレーモデル

図 7, 8, 9 にアレーモデルの位置ずれに対する電力伝送効率を示す。単一モデルと同様にギャップごとに位置ずれに対する伝送効率の変化は異なるが、基本的に位置ずれが小さい範囲では 70% 以上の高い伝送効率が達成できている。またアレーコイルの効果により横ずれに対する許容度が増していることもわかる。単一モデルと同様にギャップを 2.5 cm, 5 cm と大きくしていくごとに伝送効率の高い範

囲が中心に集まっていくという特性があることがわかる。

5.3 ヘリカルモデル

図 10, 11, 12 にヘリカルモデルの位置ずれに対する電力伝送効率を示す。ヘリカルコイルは本研究の実験モデルにおける横ずれに対してコイル間の位置関係が変化しないため伝送効率も変化しない。また、図 10 のように単一モデルと同様にコイル同士が近づきすぎると伝送効率が非常に低くなる。そして縦ずれを 12 cm ほど発生させたところで伝送効率が最も高くなっており、その周辺で高効率であることがわかる。図 12 のようにギャップを 2.5 cm, 5 cm と大きくしていくと高効率な縦ずれの範囲が変化していることがわかる。

6. 考察

単一モデルの実験結果から、送信コイルに対して受信コイル径を大きくすることで、平均的な伝送効率は低くなるが、位置ずれに対する許容度が増すことがわかった。一方で、アレーモデルのように送信コイル径と受信コイル一つの径が同じであれば少ない位置ずれの範囲で高い伝送効率が達成できることがわかった。

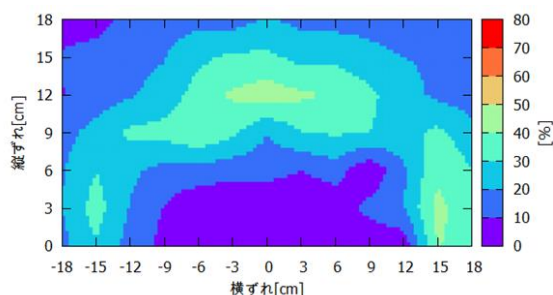


図 4 単一モデルの伝送効率 (ギャップ 0 cm)

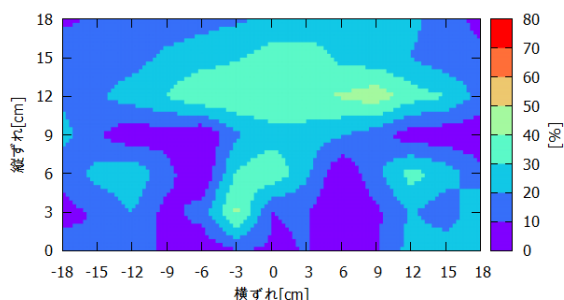


図 5 単一モデルの伝送効率 (ギャップ 2.5 cm)

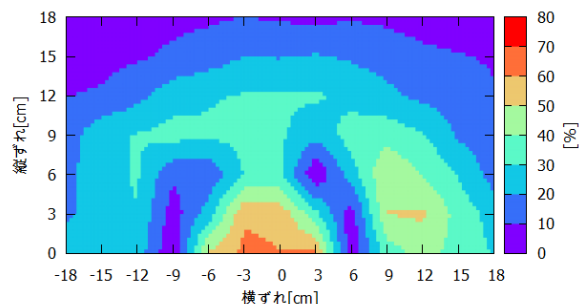


図 6 単一モデルの伝送効率 (ギャップ 5 cm)

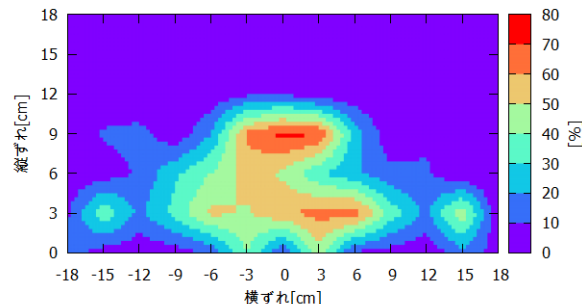


図 7 アレーモデルの伝送効率 (ギャップ 0 cm)

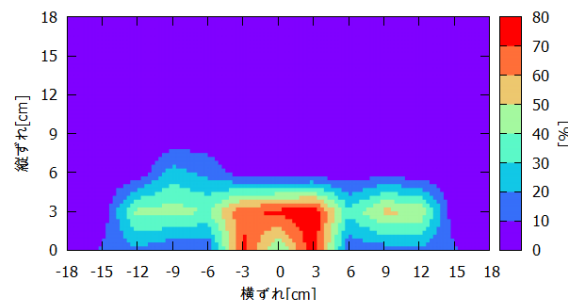


図 8 アレーモデルの伝送効率 (ギャップ 2.5 cm)

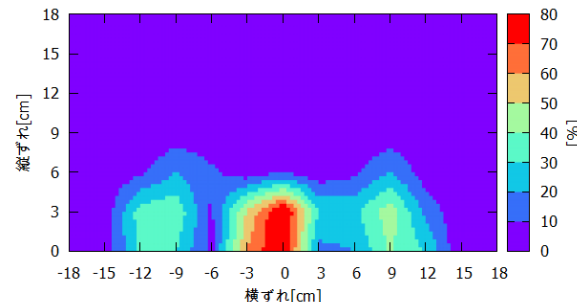


図 9 アレーモデルの伝送効率 (ギャップ 5 cm)

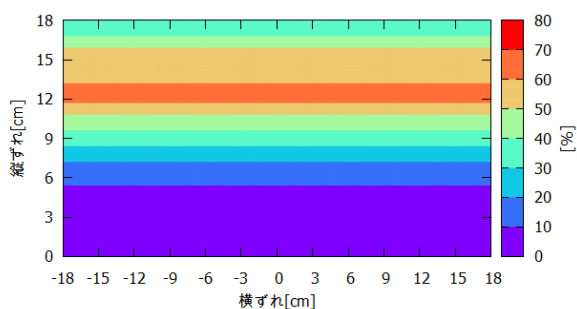


図 10 ヘリカルモデルの伝送効率 (ギャップ 0 cm)

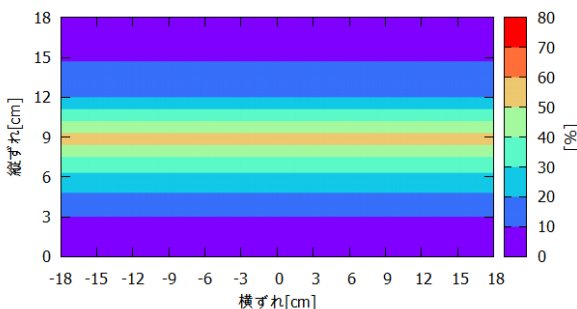


図 11 ヘリカルモデルの伝送効率 (ギャップ 2.5 cm)

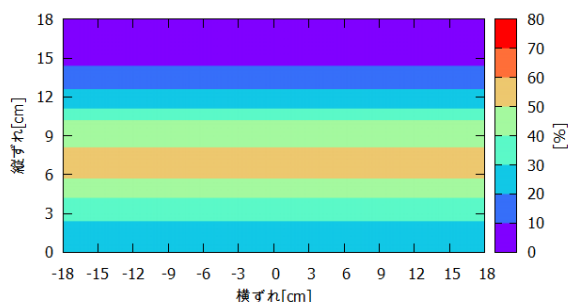


図 12 ヘリカルモデルの伝送効率 (ギャップ 5 cm)

アレーモデルはアレーコイルにより横ずれに対する許容度が増したが、中心コイル径以上の位置ずれでは伝送効率が30%以下と急激に低くなった。これは3.1節でも述べたように、3つの受信コイルのうちの中心コイルのみを伝送効率を測定する端子としているためであると考えられる。よって、位置ずれが発生した場合に最も伝送効率が良い受信コイルにスイッチングすることでさらに伝送効率を向上させることができると考えられる。

ヘリカルモデルの実験結果から、ヘリカルコイルにおいては適した縦ずれの位置が存在することがわかった。よって実際のシステムに組み込む場合には、受信コイルと送信コイルを衣類の適した位置に調整する必要があると考えられる。また、単一モデルとヘリカルモデルで顕著に現れたコイル同士が近づきすぎると伝送効率が非常に低くなるという現象は、コイル同士の結合係数が高くなりすぎて共振周波数が離れてしまうためであると考えられる [9]。この問題の解決策として、結合係数をモニタリングして電源周波数を変動させる、またはインピーダンス整合を行うといったフィードバック制御を行うことが考えられる。また、

単一コイルのような平面コイルにおいては送受信コイルの外径比によって、コイル間の距離と伝送効率の関係が異なるということがわかっている [10]。衣服にコイルを実装する際には起こり得る位置ずれ、ギャップを考慮してコイルのサイズ比を適切に設計する必要がある。

全体的な実験結果から、本研究で評価した実験モデルのうちシャツとズボンでの電力伝送に適したモデルはヘリカルモデルであると考えられる。シャツとズボン間で最も発生し得る位置ずれは腰のひねりなどによる横ずれであるため、横ずれをほぼ無視できるヘリカルモデルが適していると考えられる。さらに、ヘリカルコイルはズボンのベルトループ、シャツの胴回りに実装するなど衣服の形状に合わせた実装が可能であるという利点がある。

しかし、単一モデルやアレーモデルにも最大効率が高い、また、ヘリカルモデルに比べて小型であり実装が容易であるといった利点があり様々な応用が考えられる。例えばジャケットなどのヘリカルコイルの実装が難しい前開きの衣服では単一モデルまたはアレーモデルの応用が可能である。ジャケットからシャツへの電力伝送を考えると位置ずれはシャツとズボンほど発生しないと考えられるため、単一モデルやアレーモデルが有用であると考えられる。適用するウェアラブルデバイス、衣服によって適切にコイルを実装することが重要である。

7. まとめと今後の課題

ウェアラブルデバイスの電源一元化を目的として、衣服間で無線電力伝送を行う手法について検討を行った。コイル形状の異なる3パターンの共振器を布地表面に実装し、それらの電力伝送効率を3次元的な位置ずれを考慮して測定した。実験結果から単一モデルは広範囲な電力伝送、アレーモデルは高い伝送効率と横ずれへの許容度の増加、ヘリカルモデルは横ずれに対して安定した電力伝送を達成できることがわかった。全体的な結果から、シャツとズボンでの電力伝送にはヘリカルモデルが適していると考えられるが、単一モデルやアレーモデルが適している場面も多くあると考えられる。

今後はコイルを実際のシャツ、ズボンに取り付け、より人体に近い形状のマネキン人形に装着して電力伝送実験を行うことを考えている。実際の衣服にコイルを実装し、マネキン人形に装着すると衣服にたわみが生じるが、そのたわみが共振器の特性や電力伝送効率にどのような影響を与えるかを定量的に評価したいと考えている。また現在はコイルの線材に銅箔テープを用いているが、ウェアラブルでの応用を考慮すると、より柔軟性があり洗濯への耐久性を持った導電性繊維などが適していると考えられる。導電性繊維はインピーダンスが大きいなどの問題もあるが、今後は、よりインピーダンスの低い導電性繊維の選定やその他衣類に実装するのに適した素材を用いて無線電力伝送用の

コイルを作成し、評価を行なうことを予定している。

参考文献

- [1] “Smart clothing”. <https://www.wearable.com/smart-clothing/>, (参照 2017-07-27).
- [2] O. D. Lara and M. A. Labrador. A Survey on Human Activity Recognition using Wearable Sensors. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 15(3), pp.1192-1209. 2013.
- [3] S.P. Pinapati, T. Kaufmann, I. Linke, D. Ranasinghe, C. Fumeaux. Connection strategies for wearable microwave transmission lines and antennas, *International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2015)*, 9-12th November, Hobart, Australia, pp. 639-642. 2015.
- [4] Lee, Y. H., Kim, J. S., Noh, J., Lee, I., Kim, H. J., Choi, S., Seo, J., Jeon, S., Kim, T. S., Lee, J. Y. and Choi, J.W. Wearable textile battery rechargeable by solar energy. *Nano Letters*, Vol. 13, No. 11, pp. 5753-5761. 2013.
- [5] Nilsson, E., Mateu, L., Spies, P. and B. Hagström, Energy Harvesting from Piezoelectric Textile Fibers. *Procedia Engineering*, Vol. 87, pp. 1569-1572. 2014.
- [6] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances. *Science*, Vol. 317, No. 5834, pp. 83-86. 2007.
- [7] Zhu, D., Grabham, N. J., Clare, L., Stark, B. H. and Beeby, S. P. Inductive power transfer in e-textile applications: Reducing the effects of coil misalignment. *2015 IEEE Wireless Power Transfer Conference, WPTC 2015*, Vol. 1. 2015.
- [8] Worgan, P., and Fraser, M. C. Garment level power distribution for wearables using inductive power transfer. In *2016 9th International Conference on Human System Interactions (HSI 2016): Proceedings of a meeting held 6-8 July 2016, Portsmouth, United Kingdom*. pp. 277-283. 2016.
- [9] Imura, T., Okabe, H., Uchida, T. and Hori, Y. Study of Magnetic and Electric Coupling for Contactless Power Transfer Using Equivalent Circuits. *IEEJ Transactions on Industry Applications*, Vol. 130, No. 1, pp. 84-92. 2010.
- [10] BH Waters, BJ Mahoney, G Lee, JR Smith. Optimal coil size ratios for wireless power transfer applications. *Circuits and Systems (ISCAS)*, 2014 IEEE International Symposium on, 2045-2048. 2014