

効率的な衣類上の無線電力伝送実現にむけた コイルの形状・サイズとズレ・曲げが及ぼす影響評価

宇野 葵¹ 奥田 崇礼¹ 宮路 祐一² 大村 廉²

概要：近年、ウェアラブルデバイスの普及に伴い、複数のデバイスを同時に着用する機会が増えている。しかし、このことは各デバイスの電源管理の手間の増加という新たな問題を引き起こしている。これに対して、電源を一元化し、無線電力伝送によって衣類上を介し各デバイスに電力を供給することで、個々のデバイスの電源管理の手間を削減することが期待できる。そこで本研究では、ウェアラブル上での無線電力伝送に適したコイルの形状やサイズを明らかにすることを目的とし、各コイル形状、サイズの組み合わせにおける伝送効率の調査をした。具体的には、正方形、円形、正六角形、正三角形、長方形の5つの形状と、1, 3, 5, 10 cmの4つの大きさの組み合わせについて、コイル間のズレやコイルの曲げが発生する状況下において、シミュレーションにより伝送効率を評価し、コイルの形状やサイズによるズレや曲げに対する耐性を明らかにした。結果から、送電側が正方形、円形の場合、受電側が正方形、円形、正六角形では、送受電に5cm, 10cmのコイルを使用した組み合わせ、受電側が正三角形、長方形の場合は送受電に10cmのコイルを使用した組み合わせでズレや曲げに対して耐性がよいことが分かった。また、送電側が正三角形の場合、送受電に使用するコイルを10cmとすることで、受電側のコイル形状によらずズレや曲げに対する耐性が向上することが分かった。

1. はじめに

IoT時代における通信端末として、ウェアラブルデバイスがあげられる。ウェアラブルデバイスは、カメラやスマートウォッチなどの情報・映像機器 [1]、活動量計等のモニタリング機能を有する端末 [2]などが実用化されている。これらのデバイスを使用することにより、手軽に映像データを扱えるようにできることや、心拍、脈拍、歩行距離などのデータをリアルタイムで測定し、自身の動作や身体情報を知ることができる。

しかし、一人のユーザが複数のデバイスを同時に使用することは、各デバイスの電源管理の手間が増加するという新たな問題を引き起こす。これを解決する方法として、壁や床などにワイヤレス充電器を設置し、複数のデバイスを装着したまま同時に充電するという研究が行われている [3][4][5]。しかし、これらの研究で提示されている手法は、利用者がデバイスを充電するために、充電器が設置されている空間にいない必要がある。そのため、その場所から離れてしまうと継続的に充電することができない。また、充電装置が壁や床などに組み込まれて設計されているので、充電器を持ち運ぶことはできない。そのため、長時間充電装置のある環境にいない場合、各デバイスを主導で充電する負担からユーザを開放することはできない。

そこで、そのような充電装置がない場所において、複数のデバイスを同時に充電するために、電源を一元化し、ウェアラブルデバイスを身に着けた状態で複数のウェアラブルデバイスに電力を供給することが考えられる。例えば、人間が比較的重みを感じにくい腰部などにバッテリーを装着し、そこから各ウェアラブルデバイスに供給する。このようにすることで、充電する対象を複数から一つに減らすこ

とができ、電源管理によるユーザの負担が抑えられることが期待できる。

これを実現するにあたり、衣類間や衣類からデバイスへ電力を送電する必要がある。まず、ケーブルや導電繊維などを用いて電源を供給することが考えられる。しかし、ズボンやシャツなどの衣類間や衣類からウェアラブルといった場所では、接続されたケーブルによってユーザの動きを阻害してしまうことが考えられる。そこで、無線電力伝送技術を使用することで、ユーザの動きを阻害することなく、柔軟な電力伝送をすることが可能になると考えられる。

効率的な無線電力伝送を行うにあたり、使用周波数や周辺機器など様々な要素について検討する必要があるが、中でもコイル形状がシステムの性能に大きくかわってくる。無線電力伝送の多くの研究では、円形や正方形のコイルが用いられ、使用するコイルのサイズは、送受電間である程度決められた大きさとなっている。しかし、裾や襟のような衣類上でコイルを実装する部分やデバイス形状の制約によってこれらのコイル形状では実装が難しくなる可能性が考えられる。また、コイルサイズについても同様に様々な可能性が考えられる。さらに、衣類間や衣類とウェアラブルデバイスでの無線電力伝送を考えたときに、ユーザの動作によってコイルの位置ずれが発生し、このことが電力の伝送効率に大きく影響する可能性が高い。そこで、本研究では、様々なコイル形状、大きさのコイルを用い、シミュレーションによりコイル間の位置ずれや、コイルを曲げた際の電力伝送効率を測定することで、ウェアラブル上で無線電力伝送を行うことを想定したコイルの評価をおこなう。

本論文の構成を以下に示す。2章では先行研究を上げ、それらの問題点より本研究で取り扱う課題を示す。3章では、実験で使用するコイルモデルやシミュレーション条件

¹ 豊橋技術科学大学大学院

² 豊橋技術科学大学

について説明する。4～6章では無線電力伝送において、コイルの形状、サイズの組み合わせや、ズレ、曲げの影響評価をし、その結果をまとめる。7章では、実験に対する考察をし、8章で本研究のまとめを行う。

2. 関連研究

本研究では、無線電力伝送を行うにあたり、次回共鳴方式を採用する。この方式は、Marin らが Massachusetts Institute of Technology (MIT) で初めて提唱した無線電力伝送の方式の一つである [6]。送受電コイルにコンデンサを取り付け、共進周波数を合わせて電力伝送を行うことで、電磁誘導方式よりもずれに対して強いという特徴がある。以下に記す、コイルの位置ずれが考えられるウェアラブル上での無線電力伝送に関する研究では、この方式が採用されている。

無線電力伝送では、コイルの大きさが伝送距離に大きく影響を与える。Yang らは、円形コイルの半径に対する伝送距離の影響を調査した [7]。無線電力伝送に使用するコイルサイズが大きくなることで、伝送距離が増加することを示している。しかし、衣類にコイルを設置することを想定していないため、コイルに発生する曲げなどを考慮していない。ウェアラブルを対象とした無線電力伝送では、コイルに体やデバイスに合わせた曲げが発生することが考えられるため、コイルの湾曲を考慮した評価をする必要がある。

コイルの曲げに関して、正方形、または円形のコイルに曲げを発生させ、その曲げによる影響を調べた研究がある。Yi らは、導電性インクによって送受電に使用するコイルを作成し、衣類間での無線電力伝送を行った [8]。また、柔軟なコイルとして、フレキシブル PCB を用いたコイルにより、無線電力伝送を行っている研究もある [9][10]。これらの研究では、曲げが強くなるに従い効率が悪化することが明らかになった。しかし、これらの研究では、コイルのサイズや形状について十分な評価はされていない。衣類ごとにコイルを設計した際に、コイルを実装する部分は同じであってもコイルのサイズや形状が変わり、それによりコイルの組み合わせが毎回変わることが考えられる。したがって、コイルのサイズや形状の変化について評価をする必要がある。

衣類上のみでなく、衣類とデバイス間での無線電力伝送を想定した研究もおこなわれている。Seungtaek らは、スマートウォッチのバンド部分に長方形のコイルと受電回路を取り付け、袖口から電源を供給するシステムを提案した [11]。しかし、デバイスの装着時に充電をするというシステムのため、装着者の動作によって衣類に設置したコイルの位置がずれることが想定される。そのため、コイル間に発生するズレについて考慮する必要がある。また、奥田らは、スマートウォッチと袖口での電力伝送を想定し、5つの形状のコイルを用い位置ずれや曲げによる影響評価を行った

[12]。様々なコイル形状の組み合わせにおいて、位置ずれが発生した際の伝送効率の評価を行っている。この研究では、特にコイル形状による影響について着目しているため、コイル形状に加えコイルサイズによる検討を行う必要がある。

以上のことから、無線電力伝送で使用するコイルのズレ、曲げ、形状やサイズの組み合わせによる影響を調べた研究は行われているが、これらをすべて同一の条件下で行っている研究はない。1章で述べたように衣類やデバイスでは、デザインや外装などの構造により、正方形や円形以外の形状や様々な大きさで実装することが考えられる。また、衣類間や衣類とデバイス間では、ユーザの動作によるズレや体や衣服に合わせコイルが曲げることが考えられる。そのため、本研究では、同一条件で作成されたコイルについて、ズレや曲げ、サイズや形状の組み合わせに対する伝送効率の評価を行う。具体的には、正方形、円形、正六角形、正三角形、長方形の5種類のコイル形状と形状ごとに4つの大きさのコイルを使用し、これらの組み合わせによる曲げやズレへの伝送効率への影響を明らかにする。

3. 実験概要

本研究では、シミュレーションによりコイル形状の組み合わせの評価を行う。そのため、本章では、シミュレーションにより評価を行ったコイルの設計やシミュレーションの条件について述べる。シミュレーションには有限要素法による電磁界シミュレータ ANSYS HFSS を使用する。

本研究では、実験1から実験3の3つの実験を行った。実験1では、まず送電側を正方形で固定し、受電側コイルの形状や送受電に使用するコイルのサイズの組み合わせを変え、伝送効率を測定することにより、コイルのサイズや形状が与える伝送効率への影響を調べる。実験2では、実験1と同様の組み合わせにおいて、受電側コイルに曲げを発生させることで、曲げによる伝送効率への影響を調べる。実験3では、受電側コイルの形状だけでなく送電側コイルの形状による影響を調べるため、送電側に円形、正三角形のコイルを利用し、伝送効率を測定する。以下、本章ではシミュレーションに用いたコイルモデルや、各シミュレーションに共通する条件を述べる。各実験の詳細については、4章から6章に記す。

3.1 コイル設計

本研究で使用したコイルモデルを図1に示す。正方形、円形、正六角形、正三角形、長方形を使用した。各々のコイル形状について、一辺が1, 3, 5, 10 cmの正方形に収まる最大の大きさとなる5種類のコイルを使用した。図1に示すように正方形、円形、正六角形、正三角形についてdはそれぞれ1, 3, 5, 10 cmとなる。長方形について、d1=3 cmの時、d2=1.33 cmを基準とし、d1がこれと異なる

サイズでも、同様の縦横比となるように設計した。それぞれのコイルは銅箔で作成することを想定し、巻き数 4 回、線幅 0.2 cm、線の間 0.01 cm、厚さ 0.0035 cm で設計した。これを満たすことが困難となる小さいサイズのコイルについては、巻き数を減らすことで対応した。これらのコイルの形状やコイルのパラメータについては、様々な形状のコイルの組み合わせについて研究したものを参考に決定した [12]。また、各コイルの共振周波数は ISM (Industry Science Medical) バンドである 13.56 MHz となるように、コンデンサの値を表 1 に示すように設定した。

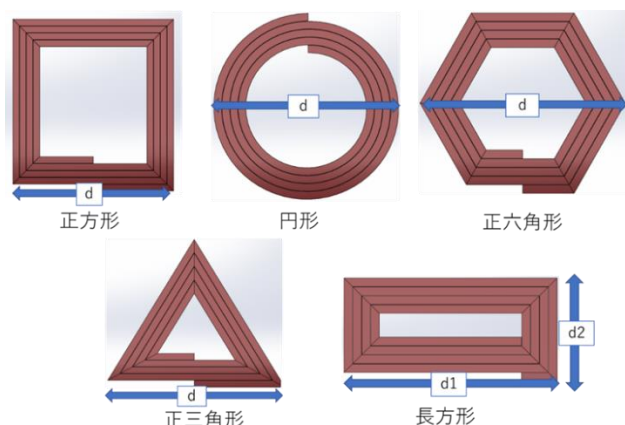


図 1 作成したコイルモデルの一例

表 1 各コイルの設定静電容量(pF)

	1 cm	3 cm	5 cm	10 cm
正方形	14000	202	73	20.8
円形	50000	445	150	44.5
六角形	55000	372	121	33.5
三角形	52000	990	187	43.5
長方形	65000	851	189	40

3.2 シミュレーション条件

図 2 にシミュレーションでのコイルモデル配置の一例を示す。送電側、受電側それぞれのコイルを空間内に配置した。コイル間は、衣類間ではほぼ密着状態であることを想定しズレが発生していない状況においてその感覚を 0.04 cm とした。

実装した際に発生するコイル間のズレをシミュレーションするため、図 2 に示す位置を中心とし、X 方向に 0 cm~8 cm、Y 方向に -8 cm~8 cm の範囲で、0.2 cm 刻みで移動させ、各々の地点において伝送効率を測定した。ここで、伝送効率はシミュレーションで得られる S パラメータの S_{21} により (1) 式より評価した。

$$\text{伝送効率 [\%]} = 10^{S_{21}/10} \times 100 \quad (1)$$

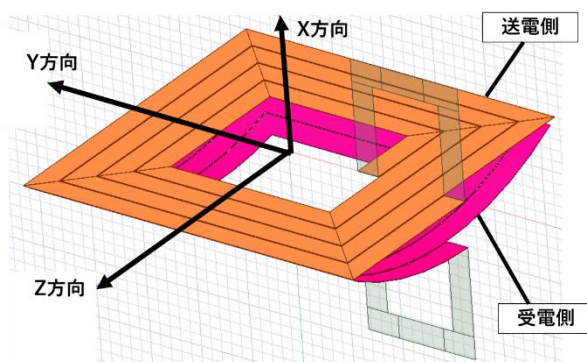


図 2 コイルの位置と移動方向

4 実験 1: コイルサイズと受電側コイルの形状による影響

4.1 実験手法

まず、コイルサイズと受電側コイルの形状による影響を調べるためのシミュレーションを行った。送電側のコイル形状を正方形に固定し、受電側に正方形、円形、正六角形、正三角形、長方形を使用した。また、各コイル形状について、1, 3, 5, 10 cm の大きさのコイルを使用し、それぞれの組み合わせに対し、伝送効率を測定した。コイル形状ごとの大きさの組み合わせは表 2 に示す 25 組の組み合わせとなる。受電側のコイル形状 5 つについてこの 25 組の大きさの組み合わせについてシミュレーションを行った。

伝送効率の評価は、最大効率を用いる。最大効率は、ズレを発生させた際、伝送効率が最大となる値である。

また、ズレへの影響を評価するため、ズレなしの効率、効率のピーク、50%以上の範囲の三つを用いる。ズレなしの効率は、コイル間でズレのない位置での伝送効率である。効率のピークは、X 方向では 0 cm~8 cm、Y 方向では -8 cm~8 cm の範囲で、伝送効率が最大となった位置である。50%以上の範囲は、ズレを発生させたとき、伝送効率が 50%を超えた範囲である。これらは、ズレによる伝送効率の低下度合を示すことにより、ズレに対する伝送効率の評価をする。また、磁界共振結合方式ではコイル同士が近すぎると共振周波数が二つに分かれてずれてしまうという特徴があるため、その影響についても評価する。

4.2 実験結果

送電側、受電側に曲げを発生させていない正方形を使用し、Y 方向ズレを発生させた際の、最大効率を表 2 に示す。これ以降、表中に記されるコイルの大きさを 1 cm のように表記する。表 2 より、1 cm のコイルを使用した組み合わせでは、最大効率がすべて 1%を下回っていた。また、受電側の形状が正方形以外の場合でも 1 cm のコイルを使用した組み合わせでは、最大効率は 1%未満と十分な効率を得ることができなかった。そのため、ズレを発生させた場合、より伝送効率が下がると考えられるため、以降の結果

から省略する。

表2 送電側正方形，受電側正方形曲げなしの最大効率

			送電側			
			1cm	3cm	5cm	10cm
受電側	正方形	1cm	0.03%	0.37%	0.06%	0.06%
		3cm	0.37%	84.2%	62.1%	34.5%
		5cm	0.05%	62.0%	94.9%	91.9%
		10cm	0.06%	36.2%	91.7%	92.7%

各受電側のコイル形状に対する Y 方向ズレを発生させた場合の結果を表3(a)～(e)に示す。

まず，送電，受電どちらかに 3 cm のコイルを使用した場合に着目する．表3(a)～(e)より，最大効率は，3 cm のコイルを使用した時，組み合わせる形状やサイズによって大きく変化している．最大効率が 50%を超える組み合わせはいくつかあるが，50%以上の範囲を確認すると，いずれも 1cm 前後動かしたまでしか 50%以上を維持できていない．

次に，送電，受電に 5cm，10cm のコイルを使用した場合に着目する．5cm，10cm のコイルを使用した組み合わせでは，受電側のコイル形状によらず，最大効率はいずれも 50%以上と全体的に高い．特に，90%を超える組み合わせも多く存在する．ズレへの耐性としては，受電側のコイル形状によって良い大きさの組み合わせが変わってくるが，50%以上の範囲を確認すると，最大で 4cm 程度のズレが発生した地点まで 50%以上を保つことができています．これは，3cm の大きさのコイルを使用した場合より，ズレに対する効率の低下が抑えられているといえる．しかし，表2(a)，(b)，(c)より，送受電に 10cm のコイルの大きさを使用した組み合わせでは，ズレなしの効率がそれぞれ 7.2%，14.3%，23.1%と低く，効率のピーク地点まで移動することで効率が上昇している．そのため，伝送効率が 50%以上の範囲も 2 つに分かれてしまっていることが確認できる．

5 実験2：コイル曲げによる影響

5.1 実験手法

6 コイルの曲げの影響を評価するため，実験1のコイルに曲げを発生させていない場合と今回の曲げを発生させた場合の比較を行う．使用するコイルは送電側の形状を正方形とし，実験1と同様の形状，大きさの組み合わせを用いた．コイルの曲げ半径は，手首でのコイルの曲げを想定し，一辺が 3 cm のコイルに対し，曲げ半径 4 cm を基準とした．この時，曲率は 43 度となった．大きさが異なるコイルでも同様の曲率となるよう，コイルの直径を d cm としたときの曲げ半径 R cm を(2)式より設定した．

$$R [\text{cm}] = \frac{d \times 360}{2\pi \times 43} \quad (2)$$

表3 送電側正方形，受電側曲げなしでの各組み合わせの結果

受電側：正方形		送電側3cm	送電側5cm	送電側10cm
受電側 3cm	最大効率[%]	84.2	62.1	34.5
	ズレなしの効率[%]	84.2	53.8	10.5
	効率のピーク[cm]	0	-0.8,0.8	-3.4,3.4
	50%以上の範囲	-0.8~0.8	-1.2~1.2	N/A
受電側 5cm	最大効率[%]	62.0	94.9	91.9
	ズレなしの効率[%]	54.2	61.6	82.1
	効率のピーク[cm]	-0.8,0.8	-1.8,1.8	-2.6,2.6
	50%以上の範囲	-1.2~1.2	-2.8~2.8	-4~4
受電側 10cm	最大効率[%]	36.2	91.7	92.7
	ズレなしの効率[%]	10.6	81.2	7.2
	効率のピーク[cm]	-3.4,3.4	-2.8,3	-6.8,6.8
	50%以上の範囲	N/A	-4~4	-7.4~-5.5~-7.4

(a) 受電側正方形

受電側：円形		送電側3cm	送電側5cm	送電側10cm
受電側 3cm	最大効率[%]	58.6	25.6	3.5
	ズレなしの効率[%]	58.6	20.3	3.5
	効率のピーク[cm]	0	-1,1	0
	50%以上の範囲	-0.4~0.4	N/A	N/A
受電側 5cm	最大効率[%]	74.3	95.6	83.5
	ズレなしの効率[%]	74.0	84.2	51.8
	効率のピーク[cm]	-0.2,0.2	-1.2,1.2	-2.8,2.8
	50%以上の範囲	-1.2~1.2	-2.2~2.2	-3.8~4
受電側 10cm	最大効率[%]	46.1	95.3	90.8
	ズレなしの効率[%]	15.1	94.2	14.3
	効率のピーク[cm]	-3.2,3.2	-3,3	-5.4,5.4
	50%以上の範囲	N/A	-4.4~4.4	-6~-3.6,3.6~6

(b) 受電側円形

受電側：正六角形		送電側3cm	送電側5cm	送電側10cm
受電側 3cm	最大効率[%]	50.7	23.5	14.1
	ズレなしの効率[%]	50.7	14.1	2.8
	効率のピーク[cm]	0	-1.2,1.2	-3.6,3.8
	50%以上の範囲	0	N/A	N/A
受電側 5cm	最大効率[%]	78.6	93.5	77.9
	ズレなしの効率[%]	76.7	88.6	41.4
	効率のピーク[cm]	0.2	-0.8,0.8	-2.8,3
	50%以上の範囲	-1~1.2	-2~2.2	-3.8~-1.6,1.6~3.8
受電側 10cm	最大効率[%]	44.6	94.4	92.4
	ズレなしの効率[%]	18.5	94.3	23.1
	効率のピーク[cm]	-2.6,2.6	-6,-2.4,0,2.6,6.2	-4.8,4.8
	50%以上の範囲	N/A	-3.8~3.8	-5.4~-3.2,3.2~5.4

(c) 受電側正六角形

受電側：正三角形		送電側3cm	送電側5cm	送電側10cm
受電側 3cm	最大効率[%]	15.0	5.0	3.4
	ズレなしの効率[%]	15.0	1.9	0.5
	効率のピーク[cm]	0	-1.2,1.4	-4.3,8
	50%以上の範囲	N/A	N/A	N/A
受電側 5cm	最大効率[%]	77.8	77.0	50.8
	ズレなしの効率[%]	75.9	69.7	16.7
	効率のピーク[cm]	-0.2,0.2	-0.6,0.6	-3.4,3.4
	50%以上の範囲	-0.6~0.8	-1.6~1.4	3.4
受電側 10cm	最大効率[%]	64.6	94.1	92.8
	ズレなしの効率[%]	32.3	72.7	68.0
	効率のピーク[cm]	-1.2,2.6	-1.4,2.4	-3.6,4.2
	50%以上の範囲	1.4~3.4	-2.6~3.6	-4.2~5.6

(d) 受電側正三角形

受電側：長方形		送電側3cm	送電側5cm	送電側10cm
受電側 3cm	最大効率[%]	11.7	8.1	0.6
	ズレなしの効率[%]	11.7	3.0	0.6
	効率のピーク[cm]	0	-1.6,1.4	0
	50%以上の範囲	N/A	N/A	N/A
受電側 5cm	最大効率[%]	47.7	82.2	63.3
	ズレなしの効率[%]	47.7	69.7	16.8
	効率のピーク[cm]	-0.8,0.8	-1.2,1.2	-3.8,3.8
	50%以上の範囲	N/A	-1.8~1.8	-4~-3.4,3.4~4
受電側 10cm	最大効率[%]	48.8	91.1	93.0
	ズレなしの効率[%]	47.4	84.0	55.0
	効率のピーク[cm]	-0.2,0.2	-0.8,0.8	-4.4,0.4,6
	50%以上の範囲	N/A	-1.8~1.8	-5~-3.4, -1.2~1.2,3.4~5

(e) 受電側長方形

コイルの曲げによる伝送効率の変化を評価するために、最大効率の変化率を使用した。変化率は(3)式により与えられる。この変化率は、実験1のコイルに曲げが発生していない場合の最大効率と、曲げが発生した際の最大効率を比較した際の変化の割合であり、変化率が正の場合、伝送効率は増加、負の数の場合、伝送効率は低下していることを示す。

変化率 [%] =

$$\left\{ \left(\frac{\text{曲げありの最大効率}[\%]}{\text{曲げなしの最大効率}[\%]} \right) - 1 \right\} \times 100 \quad (3)$$

6.1 実験結果

受電側に曲げを発生させたときの正方形を使用し、Y方向ずれを発生させた際の、最大効率を表4に示す。実験1と同様に1cmの大きさのコイルを使用した組み合わせは、受電側の形状によらず最大効率は1%未満となった。そのため、以降のズレを発生させた場合、より伝送効率が下がると考えられるため、以降の結果から省略する。

表4 送電側正方形、受電側正方形曲げありの最大効率

			送電側			
			1cm	3cm	5cm	10cm
受電側	正方形	1cm	0.03%	0.07%	0.04%	0.06%
		3cm	0.04%	54.9%	49.2%	22.2%
		5cm	0.03%	47.8%	95.2%	89.9%
		10cm	0.04%	9.8%	90.1%	91.1%

各受電側のコイル形状に対するY方向ズレを発生させた場合の結果を表5(a)～(e)に示す。

まず、送電、受電のどちらかに3cmのコイルを使用した場合に着目する。表5(a)～(e)より、ほとんどの組み合わせで、最大効率が50%を下回っている。また、最大効率の変化率が大きく、曲げにより、最大効率が大幅に低下していることがわかる。表5(b)の送電側10cm、受電側3cmでは、変化率が大きくなっているがこれは、実験1での最大効率がそもそも小さかったため、少しの効率上昇でも割合

変化は大きくなってしまったと考える。

次に、送電、受電に5cm、10cmのコイルを使用した場合に着目する。表4(a)の受電側が正方形の場合、どの組み合わせにおいても、最大効率が90%前後と非常に高く、コイルを曲げた際の最大効率の変化率も大きくて±2%と小さい。一方で、表4(b)～(e)の受電側が正方形以外の場合では、受電側が正方形の場合と最大効率は同様の傾向を示したが、送電側10cm、受電側5cmの場合は、最大効率が大幅に低下するという違いがみられた。特に、表4(d)(e)より、正三角形と長方形を使用した組み合わせでは、変化率は-40%程度であり、最大効率は30%程度まで低下している。50%以上の範囲は、受電側のそれぞれのコイル形状で、良い大きさの組み合わせでは、約4cmのずれを発生させた位置で最大効率が50%を下回っており、実験1と大きく変化することとはなかった。送受電に10cmの大きさのコイルを使用した組み合わせでは、表4(a)(b)(c)より、受電側が正方形、円形、正六角形の場合、変化率は小さく最大効率は90%以上となっているが、実験1と同様にズレなしの効率はそれぞれ9.7%、23.5%、35.2%と低く、そこから効率のピークまでずらすことで効率が向上している。そして、50%以上の範囲が2つに分かれており、その範囲は表3(a)(b)(c)と比較すると0.2cm程度の変化となっている。

7 実験3：送電側のコイル形状による影響

7.1 実験手法

実験1、2では、送電側のコイル形状を正方形で固定して伝送効率の評価を行った。しかし、実際にコイルを使用することを想定すると、送電側のコイル形状も様々なパターンが考えられる。そこで、送電側のコイル形状を変えた際の伝送効率について評価をする。

使用するコイルの組み合わせは、送電側を円形と正三角形とし、受電側に正方形、円形、正六角形、正三角形、長方形のコイルを使用した。

使用したコイルの大きさについては、3、5、10cmのコイルを用いた。これは、実験1、2では1cmのコイルを使用した組み合わせはどの組み合わせでも最大効率が1%未満となり、今回のコイル設計では十分な伝送効率を得られることは見込めない。そのため、本実験では、1cmのコイルを使用した組み合わせは除外した。

また、曲げ半径や評価方法については実験2と同様のものを使用した。

7.2 実験結果

送電側が円形のときの結果を表5(a)～(e)に示す。

まず、送電、受電のどちらかに3cmのコイルを使用した場合に着目する。表5(a)～(e)より、変化率を見ると、実験2と同様に、最大効率が大幅に低下していることがわかる。特に、実験2と異なる点は、最大効率が50%を上回る

表 4 送電側正方形, 受電側曲げあり
での各組み合わせの結果

受電側：正方形		送電側3cm	送電側5cm	送電側10cm
受電側 3cm	最大効率[%]	54.9	49.2	22.2
	変化率[%]	-34.8	-20.8	-35.7
	ズレなしの効率[%]	54.9	48.9	9.5
	効率のピーク[cm]	0	-0.4,0.6	-3.2,3.2
	50%以上の範囲	-0.2~0.2	N/A	N/A
受電側 5cm	最大効率[%]	47.8	95.2	89.9
	変化率[%]	-22.9	0.3	-2.2
	ズレなしの効率[%]	45.2	81.3	79.5
	効率のピーク[cm]	-0.4,0.6	-1.4,1.4	-2.6,2.6
	50%以上の範囲	N/A	-2.6~2.6	-3.8~3.8
受電側 10cm	最大効率[%]	9.8	90	91.1
	変化率[%]	-72.9	-1.9	-1.7
	ズレなしの効率[%]	7.1	78.6	9.7
	効率のピーク[cm]	-2.8,2.8	-2.6,2.6	-6.4,6.4
	50%以上の範囲	N/A	-3.8~3.8	-7.2~-4.4,4.4~-7.2

(a) 受電側正方形

受電側：円形		送電側3cm	送電側5cm	送電側10cm
受電側 3cm	最大効率[%]	31.7	29.5	11.1
	変化率[%]	-45.9	15.2	217.1
	ズレなしの効率[%]	31.7	21.4	3.4
	効率のピーク[cm]	0	-1.2,1.2	-3.6,3.4
	50%以上の範囲	N/A	N/A	N/A
受電側 5cm	最大効率[%]	52.8	96.5	67.8
	変化率[%]	-28.9	0.9	-18.8
	ズレなしの効率[%]	52.0	88.5	59.4
	効率のピーク[cm]	-0.4,0.4	-0.8,0.8	-2.4,2.4
	50%以上の範囲	-0.8~0.8	-2~2	-3.4~3.4
受電側 10cm	最大効率[%]	17.8	92.5	91.6
	変化率[%]	-61.4	-2.9	0.9
	ズレなしの効率[%]	13.3	90.2	23.5
	効率のピーク[cm]	-2.6,2.8	-2.2,2	-5.2,5.2
	50%以上の範囲	N/A	-4~4	-6.2~-3.3~6.2

(b) 受電側円形

受電側：正六角形		送電側3cm	送電側5cm	送電側10cm
受電側 3cm	最大効率[%]	25.0	24.4	7.1
	変化率[%]	-50.7	3.8	-49.6
	ズレなしの効率[%]	25.0	14.9	2.6
	効率のピーク[cm]	0	-1.2,1.2	-3.4,3.4
	50%以上の範囲	0	N/A	N/A
受電側 5cm	最大効率[%]	58.5	96.2	62.3
	変化率[%]	-25.6	2.9	-20.0
	ズレなしの効率[%]	58.2	94.3	42.0
	効率のピーク[cm]	-0.2,0.2	-0.8,0.8	-3.3
	50%以上の範囲	-0.6~0.6	-1.8~2	-3.6~-1.8,1.8~3.6
受電側 10cm	最大効率[%]	17.1	95	92.7
	変化率[%]	-61.7	0.6	0.3
	ズレなしの効率[%]	17.1	94.6	35.2
	効率のピーク[cm]	0	-2.2,2.4	-4.6,4.8
	50%以上の範囲	N/A	-3.8~4	-5.6~2.2,2.2~5.6

(c) 受電側正六角形

受電側：正三角形		送電側3cm	送電側5cm	送電側10cm
受電側 3cm	最大効率[%]	6.5	9.7	1.7
	変化率[%]	-56.7	94.0	-50.0
	ズレなしの効率[%]	6.5	3.1	0.5
	効率のピーク[cm]	0	-1.4,1	-3.6,3.6
	50%以上の範囲	N/A	N/A	N/A
受電側 5cm	最大効率[%]	40.9	74.8	29.4
	変化率[%]	-47.4	-2.9	-42.1
	ズレなしの効率[%]	39.9	69.7	13.5
	効率のピーク[cm]	0.2	0.6	-3.3
	50%以上の範囲	N/A	-1.6~1.4	N/A
受電側 10cm	最大効率[%]	24.2	94.4	92.8
	変化率[%]	-62.5	0.3	0.0
	ズレなしの効率[%]	23.9	81.4	80.6
	効率のピーク[cm]	1	-1.4,2.2	-3.2,3.8
	50%以上の範囲	N/A	-2.6~3.6	-4.4~5.4

(d) 受電側正三角形

受電側：長方形		送電側3cm	送電側5cm	送電側10cm
受電側 3cm	最大効率[%]	5.5	7.0	2.4
	変化率[%]	-53.0	-13.6	300.0
	ズレなしの効率[%]	5.5	3.0	0.6
	効率のピーク[cm]	0	-1.6,1.4	-3.8,3.8
	50%以上の範囲	N/A	N/A	N/A
受電側 5cm	最大効率[%]	25.5	71.0	34.2
	変化率[%]	-46.5	-13.6	-46.0
	ズレなしの効率[%]	25.5	58.4	14.2
	効率のピーク[cm]	0	-1.2,1.2	-3.4,3.6
	50%以上の範囲	N/A	-1.8~1.8	N/A
受電側 10cm	最大効率[%]	21.4	92.1	93.9
	変化率[%]	-56.1	1.1	1.0
	ズレなしの効率[%]	21.4	86.6	65.3
	効率のピーク[cm]	0	-0.8,0.6	-4.2,4.4
	50%以上の範囲	N/A	-1.8~1.8	-5~5

(e) 受電側長方形

組み合わせが, 送電側円形 3cm, 受電側正方形 5cm のみとなっている。

次に, 送受電に 5cm, 10cm の大きさコイルを使用した場合に着目する。表 5(a) より, 受電側が正方形の場合, 5cm, 10cm の大きさのコイルでの組み合わせでは, いずれも最大効率が 80%以上であり, 曲げによる変化率も小さくなっている。一方で, 表 5(b)~(e) より, 受電側が正方形以外の場合, 送受電に 5cm, 10cm をそれぞれ組み合わせた場合では, 最大効率が 15~30%程度の割合で低下していることがわかる。しかし, 10cm の大きさ同士を組み合わせた場合, 最大効率は 90%を超え, 曲げによる効率の低下も小さいことが分かった。また, 表 5(a)~(c) より, 受電側が正方形, 円形, 正六角形の場合, 実験 1, 2 と同様に, 送受電に 10cm の大きさのコイルを使用した組み合わせでは, ズレがない地点での効率がそれぞれ 21.8%, 25.3%, 33.6%と低く, そこからピーク地点までズレを発生させることで効率が上昇し, 50%以上の範囲が 2 つに分かれてしまうことを確認できた。

送電側が円形のときの結果を表 6(a)~(e) に示す。

まず, 送受電のどちらかに 3cm のコイルを使用した場合に着目する。表 6(a)~(e) より, 送電側が円形の時と同様, 変化率が大きく, 曲げによる伝送効率への影響が大きいことがわかる。また, 伝送効率が 50%を超える組み合わせは送電側が正三角形 5cm, 10cm, 受電側が正方形 3cm の 2 パターンのみと少ない。

次に, 送受電に 5cm, 10cm の大きさコイルを使用した場合に着目する。送電側が円形の時と異なり, 表 6(a)~(e) より, 送受電に 5cm 同士を用いた組み合わせと, 送受電に 5cm, 10cm それぞれを用いた組み合わせでは, 変化率が大きい。それに対し, 送受電に 10cm 同士を組み合わせた場合では, 受電側の形状によらず, 最大効率が 90%前後と高く, 変化率も小さい。また, 効率のピークはズレがない地点ではないものの, ズレなしの効率はいずれも 70%を超えており, ズレがない地点での効率の低下が抑えられている。

表 5 送電側円形，受電側曲げあり
での各組み合わせの結果

受電側：正方形		送電側3cm	送電側5cm	送電側10cm
受電側 3cm	最大効率[%]	33.7	61.0	31.9
	変化率[%]	-42.0	-17.4	-30.4
	ズレなしの効率[%]	33.7	61.0	14.1
	効率のピーク[cm]	0	0	-3.2,3.2
	50%以上の範囲	N/A	-1~1	N/A
受電側 5cm	最大効率[%]	19.4	96.4	95.6
	変化率[%]	-34.7	1.2	0.8
	ズレなしの効率[%]	18.2	94.6	93.4
	効率のピーク[cm]	-1.1	-0.8,0.8	-2.6,2.6
	50%以上の範囲	N/A	-2.2~2.2	-4.4~4.4
受電側 10 cm	最大効率[%]	9.8	90.1	83.2
	変化率[%]	-41.8	8.7	-8.7
	ズレなしの効率[%]	7.1	78.6	21.8
	効率のピーク[cm]	-2.8,2.8	-2.4,2.4	-5.2,5.2
	50%以上の範囲	N/A	-4~4	-6.2~-3.4,3.4~6.2

(a) 受電側正方形

受電側：円形		送電側3cm	送電側5cm	送電側10cm
受電側 3cm	最大効率[%]	23.1	33.9	14.3
	変化率[%]	-56.9	-11.1	-40.4
	ズレなしの効率[%]	23.1	25.3	5.1
	効率のピーク[cm]	0	-0.8,0.8	-3.4,3.4
	50%以上の範囲	N/A	N/A	N/A
受電側 5cm	最大効率[%]	24.3	97.6	80.2
	変化率[%]	-36.4	2.1	-15.5
	ズレなしの効率[%]	24.0	97.6	65.9
	効率のピーク[cm]	-0.2,0.2	0	-2.6,2.6
	50%以上の範囲	N/A	-1.6~1.6	-3.8~3.8
受電側 10 cm	最大効率[%]	6.7	70.6	96.0
	変化率[%]	-72.2	-25.6	0.9
	ズレなしの効率[%]	4.7	63.7	25.3
	効率のピーク[cm]	-3.3	-2.2,2.2	-4.2,4.2
	50%以上の範囲	N/A	-3.4~3.4	-5.6~-2.2,2.2~5.6

(b) 受電側円形

受電側：正六角形		送電側3cm	送電側5cm	送電側10cm
受電側 3cm	最大効率[%]	19.2	20.1	10.7
	変化率[%]	-58.4	-35.1	-47.4
	ズレなしの効率[%]	19.2	19.4	3.7
	効率のピーク[cm]	0	-0.6,0.6	-3.2,3.2
	50%以上の範囲	N/A	N/A	N/A
受電側 5cm	最大効率[%]	27.8	96.4	74.8
	変化率[%]	-35.0	1.0	-17.5
	ズレなしの効率[%]	27.8	96.3	53.4
	効率のピーク[cm]	0	-0.8,1	-2.6,2.6
	50%以上の範囲	N/A	-2.2~2	-3.6~3.6
受電側 10 cm	最大効率[%]	7.6	75.0	95.8
	変化率[%]	-65.7	-20.7	0.4
	ズレなしの効率[%]	5.9	73.3	33.6
	効率のピーク[cm]	-2.2,2.2	-1.8,1.8	-3.8,3.8
	50%以上の範囲	N/A	-3~3	-5.4~1.6,1.6~5.4

(c) 受電側正六角形

受電側：正三角形		送電側3cm	送電側5cm	送電側10cm
受電側 3cm	最大効率[%]	4.9	4.5	2.2
	変化率[%]	-65.0	-41.1	-58.2
	ズレなしの効率[%]	4.9	4.2	0.7
	効率のピーク[cm]	0	-0.2,0.2	-3.4,3.4
	50%以上の範囲	N/A	N/A	N/A
受電側 5cm	最大効率[%]	23.7	61.8	36.5
	変化率[%]	-57.1	-24.8	-36.0
	ズレなしの効率[%]	23.7	61.4	19.6
	効率のピーク[cm]	0	-0.2	-3.2,8
	50%以上の範囲	N/A	-1~1	N/A
受電側 10 cm	最大効率[%]	24.7	83.6	95.3
	変化率[%]	-35.5	-12.2	0.6
	ズレなしの効率[%]	8.9	82.8	77.1
	効率のピーク[cm]	-1.6,2.8	-0.4	-3.6,2.8
	50%以上の範囲	N/A	-1.8~2.6	-4.8~4.2

(d) 受電側正三角形

受電側：長方形		送電側3cm	送電側5cm	送電側10cm
受電側 3cm	最大効率[%]	4.4	5.7	3.5
	変化率[%]	-62.9	-48.1	-55.1
	ズレなしの効率[%]	4.4	5.0	0.8
	効率のピーク[cm]	0	-1.6,1.4	-3.8,3.8
	50%以上の範囲	N/A	N/A	N/A
受電側 5cm	最大効率[%]	6.4	60.7	47.3
	変化率[%]	-76.8	-20.6	-31.0
	ズレなしの効率[%]	6.4	60.7	20.4
	効率のピーク[cm]	0	-1.2,1.2	-3.4,3.6
	50%以上の範囲	N/A	-0.8~0.8	N/A
受電側 10 cm	最大効率[%]	8.2	71.4	93.9
	変化率[%]	-62.8	-23.9	3.5
	ズレなしの効率[%]	8.2	71.4	61.6
	効率のピーク[cm]	0	-0.8,0.6	-4.2,4.4
	50%以上の範囲	N/A	-1~1	-4~4

(e) 受電側長方形

8 考察

以上の結果より次のようなことが考えられる。

3cm の大きさのコイルでは，曲げによる伝送効率への影響が大きく，また，コイル間にズレがない地点では伝送効率が高くなる組み合わせもあったが，コイルにズレに対して効率の低下が著しい．このことから，実際に衣類上において曲げが発生する状況で利用する場合には，3cm 程度の大きさのコイルは好ましくないと考えられる。

5cm，10cm のコイルを使用した組み合わせでは，送電側が正方形，円形，受電側が正方形の時，曲げによる伝送効率への影響が小さかった．受電側が円形，正六角形では，送電側の形状によってコイル曲げによる伝送効率への影響に差はあるものの，最大効率が 70% を下回る大きさの組み合わせはなかった．また，送受電で 5cm，10cm それぞれを組み合わせた場合では，50% を上回る範囲が 4cm 程度となった．このことから，送電側が正方形，円形の時，受電側が正方形，円形，正六角形では送受電で 5cm，10cm それぞれを組み合わせた場合が効率的な電力伝送を行うことができる組み合わせであると考えられる．また，送受電コイルがこれらの形状の時，送受電に 10cm の大きさのコイルを使用した組み合わせでは，ズレのない地点で効率が低下し，50% を上回る範囲が 2 つに分かれることを確認できた．ただし，曲げを発生させても最大効率は大幅に低下することはなかった．このことから，実装する際に，もともとズレを発生させた位置に配置することで 10cm の大きさ同士の組み合わせでも利用できることが考えられる．ただし，デメリットとして，ズレに対する耐性が低くなってしまうことがあげられる。

送電側が正方形，円形，受電側が正三角形，長方形の場合では，送受電に 10cm の大きさ同士の組み合わせの場合，最大効率，ズレへの耐性がよくなった．また，コイルの曲げに対しても最大効率が大きく低下することはなかった．特に，受電側が正方形などの時とは異なりズレのない地点での効率の低下は小さかった．このことから，大きいサイズのコイルを用いることで，受電側が正三角形，長方形と

表 6 送電側正三角形, 受電側曲げあり
での各組み合わせの結果

受電側：正三角形		送電側3cm	送電側5cm	送電側10cm
受電側 3cm	最大効率[%]	5.1	54.6	50.7
	変化率[%]	-65.9	-29.1	-23.0
	ズレなしの効率[%]	5.1	54.6	30.7
	効率のピーク[cm]	0	0	-2.2,1
	50%以上の範囲	N/A	-0.2~0.2	-2.2
受電側 5cm	最大効率[%]	2.8	61.7	94.6
	変化率[%]	-40.6	-21.2	0.4
	ズレなしの効率[%]	2.8	60.7	73.5
	効率のピーク[cm]	0	-0.2	-2.2,1.4
	50%以上の範囲	N/A	-1.2~1.2	-3.6~2.6
受電側 10 cm	最大効率[%]	0.6	14.1	86.4
	変化率[%]	-84.1	-70.1	-6.5
	ズレなしの効率[%]	0.6	10.6	84.2
	効率のピーク[cm]	0	-2.4,2.8	-3.2,3.8
	50%以上の範囲	N/A	N/A	-4.2~5.4

(a) 受電側正三角形

受電側：円形		送電側3cm	送電側5cm	送電側10cm
受電側 3cm	最大効率[%]	5.7	33.7	38.9
	変化率[%]	-58.8	-40.2	-23.5
	ズレなしの効率[%]	5.7	33.7	11.0
	効率のピーク[cm]	0	0	-2.8,3.6
	50%以上の範囲	N/A	N/A	N/A
受電側 5cm	最大効率[%]	4.0	70.8	46.8
	変化率[%]	-45.9	-13.7	-50.3
	ズレなしの効率[%]	4.0	70.8	20.4
	効率のピーク[cm]	0	0	-2.4,3.4
	50%以上の範囲	N/A	-1~1.2	N/A
受電側 10 cm	最大効率[%]	0.2	23.7	95.8
	変化率[%]	-96.7	-58.4	1.1
	ズレなしの効率[%]	0.2	18.6	74.7
	効率のピーク[cm]	0	-2.6,2.4	-2.6,3.8
	50%以上の範囲	N/A	N/A	-4.4~4.8

(b) 受電側円形

受電側：正六角形		送電側3cm	送電側5cm	送電側10cm
受電側 3cm	最大効率[%]	4.9	26.9	19.3
	変化率[%]	-56.5	-40.5	-40.8
	ズレなしの効率[%]	4.9	26.9	8.2
	効率のピーク[cm]	0	0	-2.6,1.6
	50%以上の範囲	N/A	N/A	N/A
受電側 5cm	最大効率[%]	4.9	64.5	88.7
	変化率[%]	-23.8	-23.4	-6.4
	ズレなしの効率[%]	4.9	64.5	85.5
	効率のピーク[cm]	0	0	-1
	50%以上の範囲	N/A	-0.8~0.8	-3~2
受電側 10 cm	最大効率[%]	1.0	23.6	95.7
	変化率[%]	-63.9	-60.2	0.7
	ズレなしの効率[%]	1	22.5	73.5
	効率のピーク[cm]	0	-0.8,1.2	-2.4,3.4
	50%以上の範囲	N/A	N/A	-4~4.4

(c) 受電側正六角形

受電側：正三角形		送電側3cm	送電側5cm	送電側10cm
受電側 3cm	最大効率[%]	1.6	7.0	4.9
	変化率[%]	-65.3	-59.1	-48.6
	ズレなしの効率[%]	1.5	6.7	1.8
	効率のピーク[cm]	0.2	-0.2	-3.4,3.4
	50%以上の範囲	N/A	N/A	N/A
受電側 5cm	最大効率[%]	5.2	52.8	53.1
	変化率[%]	-68.6	-41.3	-34.0
	ズレなしの効率[%]	5.2	52.8	39.9
	効率のピーク[cm]	0	0	2.2
	50%以上の範囲	N/A	-0.2~0	1.6~2.4
受電側 10 cm	最大効率[%]	4.6	33.3	95.5
	変化率[%]	-56.6	-56.6	2.2
	ズレなしの効率[%]	1.6	32.9	69.5
	効率のピーク[cm]	-1.4,1	-0.2	-1.8,1.8
	50%以上の範囲	N/A	N/A	-3.2~3

(d) 受電側正三角形

受電側：長方形		送電側3cm	送電側5cm	送電側10cm
受電側 3cm	最大効率[%]	3.3	6.6	4.8
	変化率[%]	-12.6	-55.9	-35.5
	ズレなしの効率[%]	2.4	5.4	2.0
	効率のピーク[cm]	0.2	0.4	-1.8
	50%以上の範囲	N/A	N/A	N/A
受電側 5cm	最大効率[%]	2.5	33.7	51.5
	変化率[%]	-71.7	-47.5	-24.8
	ズレなしの効率[%]	1.9	30.5	47.9
	効率のピーク[cm]	0.2	0.4	-0.6
	50%以上の範囲	N/A	N/A	-1~-0.6
受電側 10 cm	最大効率[%]	1.4	28.0	93.4
	変化率[%]	-67.6	-56.8	0.5
	ズレなしの効率[%]	1.2	28.0	85.1
	効率のピーク[cm]	0.8	0	-1~1.8
	50%以上の範囲	N/A	N/A	-2~2.6

(e) 受電側長方形

いった形状でも、衣類上の無線電力伝送に用いることが可能であると考えられる。

送電側が正三角形の時、受電側の形状によらず、送受電に 10cm 同士を組み合わせた場合では、最大効率が 90%前後と高く、曲げによる変化率も小さかった。しかし、それ以外の組み合わせでは、最大効率が比較的低く、曲げによる変化率が大きかった。このことから、送電側に正三角形を用いる場合は、送受電に使用するコイルを大きくすることで、曲げやズレが発生する状況下でも利用できると考える。

9 結論

本研究では、衣類上での無線電力伝送に適したコイルの大きさや形状の組み合わせを検討し、各組み合わせにおいてコイルに発生するズレや曲げによる伝送効率への影響を調査した。実験では、衣類上での無線電力伝送を行うことを想定し、送電側に正三角形、円形、正六角形、受電側に正三角形、円形、正六角形、正三角形、長方形のコイル形状を使用し、4つのサイズについてそれぞれの組み合わせについて、曲げやズレが発生する条件下で、伝送効率やその耐性をシミュレーションにより評価した。

結果より、送電側が正三角形、円形の場合、受電側に正三角形、円形、正六角形を使用した時、5cm、10cmのコイルを合わせた際に、高効率かつズレや曲げに対する耐性が高い組み合わせであることが分かった。また、受電側に正三角形、長方形の時、送受電に 10cm の大きさのコイルを組み合わせることで、ズレや曲げに対する耐性が向上することが分かった。

送電側が正三角形の場合、送受電に使用するコイルを 10cm とすることで、受電側のコイル形状によらずズレや曲げに対する耐性が向上することが分かった。

これらのことより、衣類上の無線電力伝送には、適切な大きさのコイルを使用することにより、様々な形状を用いた組み合わせでも、効率的に電力伝送を行うことが分かった。

引用文献

- [1] Apple, “Watch - Apple (日本),” [オンライン]. Available: <https://www.apple.com/jp/watch/>. [アクセス日: 16 2 2021].
- [2] rakunew, “RunScribe Plus | ランニングをデータ解析するウェアラブルデバイス,” [オンライン]. Available: <https://www.rakunew.com/items/81197>. [アクセス日: 16 2 2021].
- [3] Jouya Jadidian, Dina Katabi, “Magnetic MIMO: How To Charge Your Phone in Your Pocket,” Proceedings of the 20th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom '14), Pages 495-506, 2014.
- [4] Paul Worgan, Mike Fraser, “CoilMove: An Actuated to-body Energy Transfer System,” Proceedings of the 2017 Conference on Designing Interactive Systems (DIS '17), Pages 791-795, 2017.
- [5] Takuya Sasatani, Chouchang Jack Yang, Matthew J. Chabalko, Yoshihiro Kawahara and Alanson P. Sample, “Room-Wide Wireless Charging and Load-Modulation Communication via Quasistatic Cavity Resonance,” Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, VOL. 2, NO. 4, Article 188, Pages. 23, 2018.
- [6] André Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, J. D. Joannopoulos, Peter Fisher and Marin Soljacic, “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances,” SCIENCE, VOL 317 Pages 83-85, 2007.
- [7] Yang Li, Shan Jiang, Xue-Li Liu, Quan Li, Wei-Hao Dong, Jia-Ming Liu and Xin Ni, “Influences of Coil Radius on Effective Transfer Distance in WPT System,” IEEE Access, vol. 7, pp. 125960-125968, 2019.
- [8] Yi Li, Neil Grabham, Russel Torah, John Tudor and Steve Beeby, “Textile-Based Flexible Coils for Wireless Inductive Power Transmission,” IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 18, NO. 6, Pages 2599-2606, 2018.
- [9] Ryo Takahashi, Takuya Sasatani, Fuminori Okuya, Yoshiaki Narusue and Yoshihiro Kawahara, “A Cuttable Wireless Power Transfer Sheet,” Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies December, Article No.190, 2018.
- [10] Seungtaek Jeong, Jinwook Song, Seongsoo Lee, Seokwoo Hong, Boogyo Sim, Hongseok Kim, Subin Kim and Joungho Kim, “Design, Simulation and Measurement of Flexible PCB Coils for Wearable Device Wireless Power Transfer,” IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), pp. 1-4, 2018.
- [11] Seungtaek Jeong, Dong-Hyun Kim, Jinwook Song, Hongseok Kim, Seongsoo Lee, Chiuk Song, Jaehak Lee, Junyeop Song and Joungho Kim, “Smartwatch Strap Wireless Power Transfer System With Flexible PCB Coil and Shielding Material,” IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 66, NO. 5, 2019.
- [12] 奥田 崇礼, 宇野 葵, 宮路 祐一, 大村 廉, “手首装着型デバイス向け無線電力伝送用コイルのシミュレーション評価,” 研究報告ユビキタスコンピューティングシステム, pp. 1-8, 2021.