Vol.2021-MBL-98 No.9
Vol.2021-UBI-69 No.9
2021/3/1

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

奥田 崇礼[1,a)]　宇野 葵[2,b)]　宮路 祐一[2,c)]　大村 廉[2,d)]

概要：近年，ウェアラブルデバイスの発展に伴い，複数のデバイスを同時に着用する機会が増えている．このような場合，各デバイスの電源管理がユーザの負担となる．これに対し，電源を一元化し，無線電力伝送によって各ウェアラブルデバイスに電力を分配することで電源管理の手間を軽減することが期待できる．そこで本研究では，ウェアラブル用途に適したコイルを明らかにすることを目的とし，スマートウォッチと上着の袖口間での無線電力伝送を想定して，各コイル形状の組合わせにおける伝送効率の調査を行なった．具体的には，円形，正六角形，正方形，長方形，正三角形のコイル形状の組合わせについて，曲げやズレが発生する条件下のもとシミュレーションにより伝送効率を評価し，その伝送効率や曲げやズレに対する耐性を明らかにした．結果から，デバイス側や衣類側に形状の制約がない場合，正方形同士でコイルが実装されることが望ましいこと，衣類側は正方形コイルを用いると，デバイス側のコイル形状に関係なく高い効率と曲げやズレに対する耐性を得られることが分かった．また，デバイス側のコイルは，円形，正六角形，正方形を使用すると長方形，正三角形コイルよりも効率やズレに対する耐性が高いことが分かった．

1. はじめに

近年，様々なウェアラブルデバイスの開発が行われている．例えば，スマートフォンやメガネ型，腕時計型などのほかに，着用者の生体情報をモニターするシャツ [1], [2] や，くつの中敷き型のデバイス [3] といったものが市販されている．これらのウェアラブルデバイスを装着することにより，着用者の生体情報を取得し，健康管理など様々なサービスを提供することができる．しかし，装着する機器の数が増えるということは，そのデバイスの管理の負担，特にバッテリーの充電の負担が増えることを意味する．そのため，この管理の手間を軽減することで，ウェアラブルコンピューティングサービスの実用性を高めることができると考えられる．

充電の手間を軽減するための対応として，身についているウェアラブルデバイスの各電源を一元化し，一個，あるいは少数個のバッテリーから衣類を介して各デバイスへ電源を供給することが考えられる．各デバイスへの電源供給を行うにあたり，コネクタをもちいる方法があるが装着者の動きを制限する可能性がある [4], [5], [6]．一方で，無線電力伝送をもちいれば，装着者の動きを損なうことなく，衣類間や衣類とデバイス間で電力を伝送することが期待できる．

そこで，本研究では無線電力伝送技術に着目し，衣類とウェアラブルデバイス間との効率的な無線電力伝送の方法について検討する．ウェアラブルで無線電力伝送を使用する場合，組み合わされるコイルの形状を考える必要がある．通常の無線電力伝送では送信側コイルと受信側コイルはペアで最適化された設計がなされるのに対し，ウェアラブル上での無線電力伝送では，別々に設計されたコイルが組み合わせることが考えられる．例えばジャケットと腕時計のコイルはそれぞれ別々に設計され，コーディネートによってそれらが組み合わされる場合である．このことについて，予め効率が良いコイル形状の組み合わせを明らかにしておくことで，シャツや時計のデザイナーがどのコイル形状を選択しても一定の伝送効率で実装することが可能となる．また，コイル間のズレとコイルに発生する曲げについて考慮しなければならない．コイル間のズレは，実際の使用時に装着者の動作で自然に発生するものである．コイルに発生する曲げは，コイルを布に衣類につけることで発生する．

コイルの組み合わせについて，送電側と受電側でサイ

[1] 豊橋技術科学大学大学院
Toyohashi University of Technology
[2] 豊橋技術科学大学
Toyohashi University of Technology
[a)] okuda@usl.cs.tut.ac.jp
[b)] u.mamoru@usl.cs.tut.ac.jp
[c)] miyaji@ee.tut.ac.jp
[d)] ren@tut.jp

ⓒ 2021 Information Processing Society of Japan

ズの異なる円形と正方形コイルを組み合わせた研究がある [7]．この研究では，円形同士より円形と正方形のコイルを組み合わせた方が効率が高くなる場合もあることが示された．コイル間の位置ズレについては，これまでにも関連する研究が行われている．その中には，いくつかのコイル形状をもちいてズレに対する効率を比較したものがある [8], [9]．また，コイルの外形や形状を改良しズレにより発生する伝送効率低下を抑えたものがある [10], [11], [12]．また，いくつかの研究では，コイルを曲げた場合の効果を評価している [13], [14]．これらの研究では，コイルに曲げが発生すると効率が悪化し，曲げが大きいほど効率は低下することが報告されている．

上記の研究では，主に正方形か円形のコイル形状をもちいている [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16]．しかし，ウェアラブルデバイスはサイズやデザインの制約があり，正方形や円形以外の形状をもちいることが考えられる．そのため本研究では，様々なコイル形状について検討を行う．

すなわち，異なる形状の組み合わせ，コイル間に発生するズレ，コイルに発生する曲げなどが発生する状況下において，正方形や円形のコイル以外を用いた場合の伝送，効率に対する影響はこれまで十分に研究されてこなかった．そこで本研究では，曲げやズレが発生する条件下のもと各コイル形状の伝送効率を調査し，ウェアラブル用途に適したコイルを明らかにする．具体的には，正方形と円形に加え，長方形，正三角形，正六角形のコイル形状の組合わせについて，シミュレーションにより伝送効率を評価し，その伝送効率や曲げやズレに対する耐性を明らかにする．

電力伝送を行なうウェアラブルデバイスは様々なものが考えられる．本研究では，スマートウォッチを無線電力伝送の対象とする．これは，スマートウォッチは近年，最も普及しているデバイスの一つであるためである [17]．

本論文の構成は以下の通りである．2 章ではウェアラブルデバイス用の無線電力伝送に関する先行研究について述べる．3 章では本研究の実験環境を説明し，4 章では実験結果を示す．そして，5 章で実験の考察をし，6 章で本研究のまとめをおこなう．

2. ウェアラブルデバイスと衣類間での無線電力伝送で考慮すべきこと

2.1 コイル形状とズレ，曲げ，組み合わせ

1 章で述べたように，衣類間あるいは，衣類とデバイス間での無線電力伝送では，コイル間に発生するズレ，コイルに発生する曲げ，各コイル形状の組み合わせについて考慮する必要があると考えられる．

コイル間に発生するズレに関して，正方形と円形のコイル形状のズレに対する耐性の比較をおこなった研究がある [8], [9]．また，正方形や円形をベースに，コイル形状の改良や工夫でズレが発生した際における効率の低下を抑えた研究がある [10], [11], [12]．これらの研究より，ズレによって効率が低下するものの，コイル形状によってその低下の度合いが異なることがわかる．しかし，このような研究は正方形および円形のコイルに対してしか行われておらず，他のコイル形状におけるズレへの耐性に関する研究は十分に行われていない．例外的に，正六角形のコイルを用いた研究もある [18]．この研究では，ズレに関する検討は行われているものの，曲げの影響や，他の形状との組み合わせに関する研究はまだ行われていない．

また，コイルに発生する曲げに関しては，正方形，または円形のコイルに曲げを発生させ，その曲げの影響を調べた研究が行われている [13], [14], [15], [16]．これらの研究より，正方形や円形のコイル形状は共に，コイルに曲げが発生すると効率は悪化し，曲げが大きくなるほど効率は更に悪化することが明らかになった．また，正方形コイルにシワを発生させ，曲げとの違いについて研究したものがある [19], [20]．これらの研究では，コイルの全面が曲がる曲げより，局所的に曲がるシワの方が効率は悪化することを明らかにした．しかし，曲げの影響についても，対象は正方形や円形コイルについてのみであり，他の形状について，十分な研究はまだ行われていない．

さらに，コイル形状の組み合わせについては，円形と正方形のコイル形状を組み合わせたときの効率の変化を測定した研究がある [7]．この研究より，条件次第では同じ形状同士よりも，異なるコイル形状を組み合わせる方が，効率がよいことが明らかになった．しかし，ここで行われているコイルの組み合わせは円形と正方形のコイルの組み合わせのみであり，他の形状に関する組み合わせの研究は行われていない．

無線電力伝送用のコイルを，衣類やウェアラブルデバイスに取り付ける研究も行われている [13], [15], [21], [22], [23]．これらの研究には，ズレの影響を考慮したもの [13], [15], [21] や，コイルに発生する曲げを考慮したもの [22] も存在する．しかし，円形，正方形，長方形といった単一形状のコイルでしか評価がされていない．

上記のように，正方形や円形のコイル形状を用いて，ズレ，曲げ，組み合わせの影響を調べた研究は行われているものの，正方形や円形以外の形状をもちいた場合のコイル間のズレやコイルに発生する曲げ，コイルの組み合わせによる影響は十分に研究が行われていない．また，それぞれの研究は独立に行われており，曲げやズレに対する耐性や，その時のコイル形状の組み合わせを統一的に評価することは困難だった．1 章でも述べたように，衣類やデバイスでは，デザインや内部構造の観点から，円形や正方形以外のコイルを実装することが考えられる．このため，本研究では，正方形や円形以外の形状にも焦点をあてて研究をおこなう．そして，本研究では，形状以外は同一条件で作成さ

れたコイルについて，ズレや曲げ，組み合わせに対する評価をおこなう．具体的には，正方形，円形に加え，長方形，正六角形，三角形の 5 種類のコイル形状を用いてズレと曲げを発生させると共に，これらの組み合わせにおける伝送効率を明らかにする．

2.2 おこなう実験の条件まとめ

本研究では 1 章で記述したようにスマートウォッチを対象として進める．Apple Watch[24]，moto 360[25]，Galaxy Gear S3[26] といった市販の無線給電機能付きスマートウォッチは本体にコイルが内蔵されており，本研究でもコイルはスマートウォッチ本体に内蔵することを想定する．もちいるコイルサイズは 3 cm × 3 cm 以内で収まるものとした．このサイズは上で挙げたスマートウォッチに収まるものである [24], [25], [26]．コイル形状は正方形，円形の他に長方形，正三角形，正六角形を使う．この 5 種類の形状は，袖口でのコイル形状としてだけでなく，特に腕時計型のデバイスの形状を考慮した場合，十分に実装される可能性が高い形状だと考えられる．

1 章で述べたように，ウェアラブルデバイスと衣類間のコイルは独立に設計され，異なった形状で組み合わせられると考えられる．そのため，コイルは同じ形状同士だけでなく，異なる形状でも組み合わせる必要がある．

装着者の動作により発生するズレを考慮するために，コイル間にズレを発生させる．発生するズレは，以下のものを想定する．

- 身体に沿った平行なズレ
- 衣類とデバイス間に隙間が発生し，コイル間が離れる

これらを発生させ，各コイル形状のズレに対する耐性を評価する．

スマートウォッチと袖口間で無線電力伝送をおこなうため，衣類側のコイルは袖口に付けることを想定する．袖口にコイルを装着する場合，身体の形に沿ってコイルに曲げが発生すると考えられる．従って，衣類側に使用するコイルは曲げを発生させ実験をおこなう．また，コイルに曲げをつけない場合のデータも取得し，結果を比較することで，コイルの曲げによる影響を測定する．

3. 評価方法

3.1 実験設定

始めに，全ての実験でもちいている設定を述べる．コイル形状は 2.2 章で述べた通り，正方形，円形の他に長方形，正三角形，正六角形を選択した．また，コイルサイズは 3 cm × 3 cm に収まるものとした．実験にもちいたコイル形状を図 1 に示す．コイルサイズの詳細を表 1 に示す．その他のパラメータは図 2 に示すように線幅 0.2 cm，線の間 0.01 cm，厚さ 0.0035 cm とした．また，コイルの巻き数は 4 回とし，コイルの素材は銅とした．これらのパラメータの内，線幅，線の間，コイルの巻き数は，直径 3.3cm の円形コイルで 90%の伝送効率を示した関連研究のものを参考に決定した [23]．なお，3 cm × 3 cm に収まるサイズの長方形では，巻き数 4 回ではそのサイズに収まらなくなるため，3 回にした．コイルの厚みは，PCB で比較的よくもちいられる銅箔を参考に決定した．コイルの素材は，入手性がよく，無線電力伝送用のコイルの素材として広く使われている銅とした．

これら 5 つの形状をそれぞれ，デバイス側，衣類側に適用し，各実験で合計 25 種類の組み合わせを評価した．電力は衣類側からデバイス側へ送った．実験はシミュレータにより S_{21} を取得した．取得した S_{21} は 2 式をもちいて伝送効率に変換した．シミュレータは，有限要素法を使用する電磁界シミュレータの ANSYS HFSS をもちいた．

$$S_{21}[dB] = 10\log_{10} S_{21} \tag{1}$$

$$\text{Efficiency}[\%] = 10^{\frac{S_{21}}{10}} \times 100 \tag{2}$$

3.2 実験概要

本研究では実験 1 から実験 4 の 4 つの実験を行なった．実験 1 では，まず，曲げやズレを発生させず，各コイルの伝送効率を測定し，効率のよいコイル形状と組み合わせを調べる．実験 2 では，衣類側コイルに曲げを発生させて伝送効率を測定し，曲げの耐性が高いコイル形状の組み合わせを調べた．実験 3 では各コイルの組み合わせに対して曲げとともにズレを発生させ，コイル間ズレに対する耐性が高いコイル形状の組み合わせを調べた．実験 4 では，コイルの面積が効率に与える影響を考慮するため，面積が 9cm^2 で一定のコイルをもちいて実験 1 から実験 3 の内容をおこなった．そして，実験 1 から 3 の結果と比較をおこない，コイル面積の違いによる効率やズレへの影響の変化を調べた．各実験の詳細は以下の通りである．

3.3 実験 1：コイル形状と組み合わせによる効率の違い

まず，基本的な効率と効率的なコイル形状の組み合わせを確認するために，各コイル形状の組み合わせについて，曲げやズレがない状態での効率を評価した．

25 種類のコイル形状の組合わせにおいて，各コイルは曲げずに対面させて配置した．コイル間距離は 0.04cm とした．これは，シャツや，ジャケットの袖口がデバイスにほぼ接触している状況を仮定した．

3.4 実験 2：コイルの曲げによる影響

この実験では，曲げが各コイル形状の組合わせに与える影響について調査をおこなった．実験では，デバイス側のコイルはデバイスに内蔵するため，衣服側のみに曲げを発生させた．具体的には，コイルを図 3 に示すように配置し，各コイルの組み合わせについて効率の測定をおこなった．

ⓒ 2021 Information Processing Society of Japan

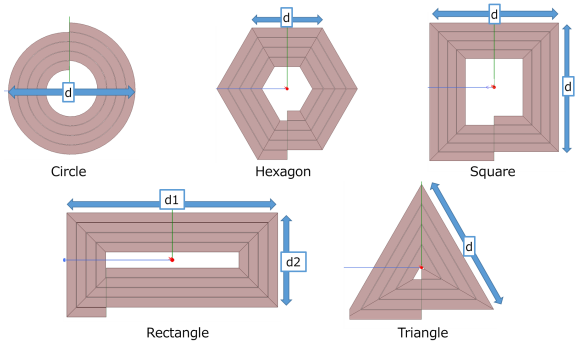


図 1 コイル形状

曲げ半径は，成人の標準的な手首サイズと袖口に発生する曲げを想定して 4cm とした．曲げの影響を評価する指標として低下率を使用した．低下率は，3 式をもちいて計算した．低下率は小さい方がより曲げの影響が少ないことを示す．なお，実験はズレを発生さずにおこなった．

$$\text{低下率}\ [\%] = \frac{\text{平面コイルの効率} - \text{曲げコイルの効率}}{\text{平面コイルの効率}} \times 100 \quad (3)$$

3.5 実験 3：コイルのズレに対する性能の調査

この実験では，曲げに加えてズレが発生した場合の伝送効率を評価した．コイル間には図 3 に示す矢印の向きにズレを発生させた．本研究では，1 章で述べたようスマートウォッチに対して給電することを想定し，下記に示すようなズレを想定した．

- 大きなジャケットなどの袖口により X 方向に 2 cm 程度のズレが発生する．
- 腕をねじることにより 45° 程度の回転ズレが発生する．
- スマートウォッチの画面を見るために Y 方向に 3 cm 程度袖をまくる．

これら想定するズレの大きさは筆者の身体で測定した．また，シミュレーションでは，上記の値を踏まえ上で更に大きさに余裕を持つようにズレを発生させた．

ズレに対する耐性の評価には，各ズレの最大効率の半値幅，いわゆる HWHM 値（以下では「半値幅」と呼ぶ）をもちいた．この値が大きいほど，ズレに対する耐性が高いことを示す．

3.6 実験 4：コイルのサイズによる影響

3 cm × 3 cm の面積に収まるコイル形状の場合，それぞれのコイル形状の大きさが異なる．コイルの大きさが無線電力伝送の効率に大きく影響することが既存の研究で知られており，コイルの形状の違いのみの影響を調べるために，面積が 9cm^2 で固定のコイルサイズをもちいて実験 1，2，3 と同様の実験を行なった． この実験にもちいたコイルのパラメータは表 1 に示すとおりである．

表 1 各コイルのサイズ

Coil Shape	Coil Size	
	3cm×3cm	9cm^2
Circle	d = 3 cm	d = 3.38 cm
Hexagon	d = 1.5 cm	d = 1.86 cm
Square	d = 3 cm	d = 3 cm
Rectangle	d1 = 3 cm, d2 = 1.33 cm	d1 = 4.5 cm, d2 = 2 cm
Triangle	d = 3 cm	d = 4.55 cm

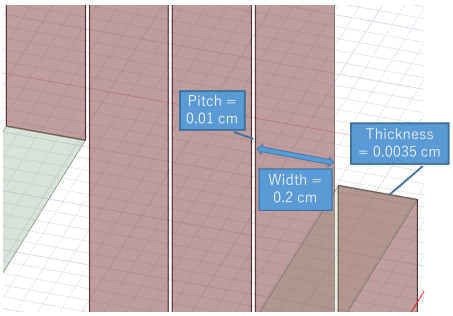


図 2 その他コイルパラメータ

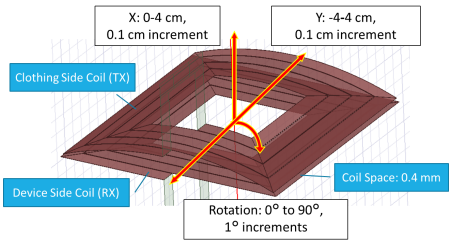


図 3 シミュレーション条件

4. 実験結果

4.1 実験 1（コイル形状と組み合わせ）の結果

実験 1 の結果を表 3 に示す．各表のセルは，色が濃いほど値が大きいことを示す．なお，以降に示す各表には同様に色づけをおこなった．

始めに，同一のコイル形状をもちいた組み合わせの結果より，コイル形状の違いによる効率の差を確認した．効率は円形 61%，正六角形 50%，正方形 85%，長方形 8%，正三角形 6%となった．これらの結果より，効率は正方形が最も高いことが分かった．

次に，コイルの組み合わせの違いによる効率の差を確認した．効率は片側が円形，正六角形，正方形であった場合，効率は 60〜50%ほどとなった．しかし，長方形，正三角形と他の形状を組み合わせた場合は効率は 20%に満たなかった．これらの結果より，異なる形状の組み合わせを含め，円形，正六角形，正方形の組み合わせをもちいると効率は高くなることが分かった．

4.2 実験 2（曲げの影響）の結果

実験 2 の結果を表 2 に示す．Bending は衣類側に曲げがある場合の伝送効率を示し，Decrease Rate は式 3 で求めた伝送効率の低下率を示す．赤色のセルは伝送効率を示し，緑色のセルは低下率を示す．

ⓒ 2021 Information Processing Society of Japan

Vol.2021-MBL-98 No.9
Vol.2021-UBI-69 No.9
2021/3/1

始めに，曲げが発生した時の効率を確認する．最も効率が高いのは正方形同士の組み合わせであり，62%であった．次点で効率が高いのは，正方形同士の組み合わせを除く円形，正六角形，正方形の組み合わせであり，効率は約30%〜40%となった．長方形，正三角形とその他の形状を組み合わせると効率は10%未満であった．

次に，低下率を確認する．最も低下率が低いのは正方形同士の組み合わせであり，27%であった．また，衣類側もしくはデバイス側いずれかに正方形のコイルを用いた場合，他の形状をもちいた場合に比べて低下率が低くなった．逆に，衣類側もしくはデバイス側いずれかに長方形，または正三角形を用いた場合，他の形状をもちいた場合に比べて低下率が高くなった．

4.3 実験3（ズレの影響）の結果

実験3の結果を図4，および表4に示す．図4は正方形同士のコイルを組合せた場合の各ズレに対する効率の変化を示す．図4の縦軸はコイル間の伝送効率を示し，横軸は各ズレの大きさを示す．他の形状の組み合わせでも，同様の形状の効率変化プロットが得られたが，スペースの関係上，本稿では省略する．表4は各ズレを発生させたときの半値幅を表す．

各方向のズレが発生したときの半値幅を確認すると，半値幅の値にほとんど差がないことが分かる．そのため，コイル形状の組み合わせによるズレへの耐性に大きな差は無いことが分かった．しかし，衣類側，デバイス側ともに，正方形をもちいるとY方向ズレとX方向ズレに対して強くなり，長方形をもちいると回転ズレに対して強くなった．

4.4 実験4（面積一定）の結果

実験4の結果を表5–表7に示す．各表内の値の見方は，表2–表4と同様である．なお，表7におけるN/Aは，ズレを発生させるとコイル同士が接触するため結果が得られなかったことを示す．

始めに，表5より効率の違いを確認すると，正六角形同士の組み合わせが最も効率が高く89%だった．また，円形，正六角形，正方形で組み合わせると効率は80%以上となり，長方形，正三角形と他の形状を組み合わせるものより高くなった．ここで，表3の3 cm × 3 cmに収まるコイルサイズの結果と表5の面積が9cm^{2}で一定となるコイルの結果を比べると，面積が大きくなることで効率が向上し各コイルの組み合わせの効率差が少なくなったことが分かる．しかし，表5より，同一面積でコイルの実装をおこなっても形状の組合わせによって効率差は発生している．よって，表3と同様に，円形，正六角形，正方形の組み合わせをもちいた場合，三角形や長方形を用いた場合よりも効率が高くなると分かった．

次に，曲げによる影響を確認する．曲げが発生した場合

表2 各コイルの組み合わせによる効率

		Device side				
		Circle	Hexagon	Square	Rectangle	Triangle
Clothing side	Circle	61%	52%	63%	13%	16%
	Hexagon	52%	50%	52%	11%	14%
	Square	63%	52%	85%	11%	14%
	Rectangle	13%	11%	11%	8%	3%
	Triangle	16%	14%	14%	3%	6%

表3 曲げありコイルの効率と曲げ無しに対する効率の低下率

			Device Side				
			Circle	Hexagon	Square	Rectangle	Triangle
Clothing Side	Circle	Bending	34%	30%	41%	6%	7%
		Decrease Rate	44%	42%	35%	54%	56%
	Hexagon	Bending	28%	24%	34%	5%	5%
		Decrease Rate	46%	52%	35%	55%	64%
	Square	Bending	40%	35%	62%	7%	7%
		Decrease Rate	37%	33%	27%	36%	50%
	Rectangle	Bending	6%	4%	7%	2%	5%
		Decrease Rate	54%	64%	36%	75%	67%
	Triangle	Bending	7%	5%	7%	1%	1%
		Decrease Rate	56%	64%	50%	67%	83%

の効率は表3の3 cm × 3 cmに収まるコイルサイズと同じく，正方形同士の組み合わせが最も高く62%だった．円形，正六角形，正方形を組み合わせると効率はおおよそ60%から50%となり，3 cm × 3 cmに収まるコイルサイズと同じく，長方形，正三角形とその他の形状を組み合わせた場合よりも効率は高くなった．さらに，特に衣類側に正方形をもちいると，その他の形状をもちいるよりも効率が高くなった．低下率は，衣類側正方形の組み合わせが最も低く，おおよそ25%から30%であった．衣類側に円形，正六角形，正方形をもちいるとデバイス側の形状に関係なく効率の低下率は50%以下になった．衣類側に長方形，正三角形をもちいると効率の低下率はおおよそ60%から70%になり，3 cm × 3 cmに収まるコイルサイズの結果と比較すると，改善が見られない，もしくは悪化していることがみて取れる．しかし，デバイス側に長方形，正三角形をもちいる場合，3 cm × 3 cmに収まるコイルサイズの結果と比較すると効率，および効率の低下率は改善していることが分かる．

最後に，ズレによる影響について，表7の各方向のズレが発生したときの半値幅を確認すると，半値幅の値にほとんど差がないことが分かる．そのため，コイル形状の組み合わせによるズレへの耐性に大きな差は無いことが分かった．しかし，3cm × 3cmに収まるコイルの結果と比較すると，半値幅の値は全体的に向上しているのが分かる．

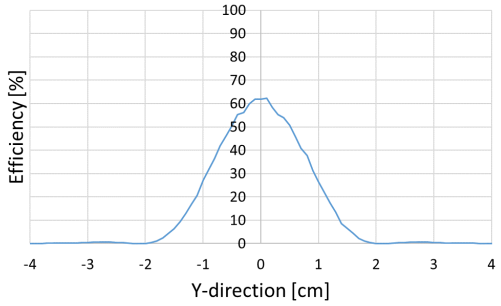
5. 考察

以上の結果より，以下のように考えることが出来る．

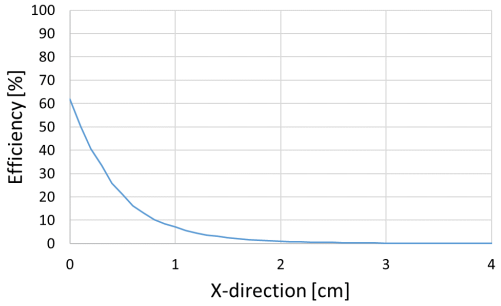
(1) 3 cm × 3 cmに収まる大きさの場合と9cm^{2}の場合を比較すると，コイル形状間における曲げやズレへの耐性の善し悪しはほぼ同じ傾向が見られた．

(2) 全体を通して，正方形同士の組み合わせが最大効率，

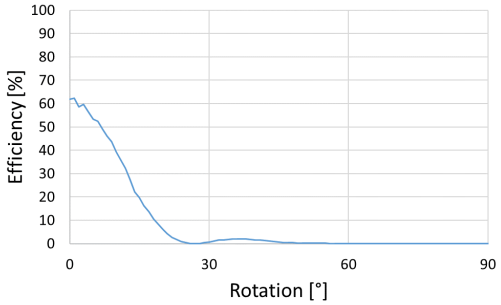
ⓒ 2021 Information Processing Society of Japan



a.Y 方向ズレ



b.X 方向ズレ



c. 回転ズレ

図 4 シミュレーション結果

表 4 各ズレの半値幅

			Device Side				
			Circle	Hexagon	Square	Rectangle	Triangle
Clothing Side	Circle	Half Width(Y)	0.7 cm	0.7 cm	0.8 cm	0.6 cm	0.6 cm
		Half Width(X)	0.3 cm	0.3 cm	0.3 cm	0.3 cm	0.3 cm
		Half Width(Rotation)	11 deg	10 deg	12 deg	13 deg	9 deg
	Hexagon	Half Width(Y)	0.7 cm	0.7 cm	0.8 cm	0.6 cm	0.7 cm
		Half Width(X)	0.3 cm	0.3 cm	0.3 cm	0.2 cm	0.3 cm
		Half Width(Rotation)	11 deg	10 deg	12 deg	13 deg	9 deg
	Square	Half Width(Y)	0.9 cm	0.8 cm	1.0 cm	0.8 cm	0.8 cm
		Half Width(X)	0.4 cm	0.3 cm	0.4 cm	0.3 cm	0.3 cm
		Half Width(Rotation)	12 deg	12 deg	13 deg	11 deg	9 deg
	Rectangle	Half Width(Y)	0.6 cm	0.6 cm	0.8 cm	0.4 cm	0.7 cm
		Half Width(X)	0.3 cm	0.2 cm	0.3 cm	0.2 cm	0.3 cm
		Half Width(Rotation)	13 deg	13 deg	11 deg	11 deg	9 deg
	Triangle	Half Width(Y)	0.6 cm	0.6 cm	0.7 cm	0.6 cm	0.5 cm
		Half Width(X)	0.3 cm	0.2 cm	0.3 cm	0.2 cm	0.2 cm
		Half Width(Rotation)	11 deg	10 deg	12 deg	15 deg	7 deg

曲げへの耐性，ズレへの耐性に対して優れた結果となった．

(3) デバイス側，衣類側それぞれに円形，正六角形，正方形を用いた組合わせは，三角形や長方形を用いた場合よりも，最大効率，曲げへの耐性，ズレへの耐性が高くなる傾向を示した．特に，衣類側に正方形を用いた場合，いずれのデバイス側コイル形状においても，曲げへの耐性，ズレへの耐性は向上する傾向にあった．

(4) コイルの面積を 9cm^2 にした場合，一部曲げへの耐性では性能が低下する場合があったが，全体を通して最大効率やズレへの耐性は向上した．特に，デバイス側に正三角形や長方形を用いた場合の最大効率や曲げへの耐性を改善することができた．

(5) 回転ズレに関しては，衣類側に長方形を用いた場合，他の形状を用いた場合よりも耐性が向上する傾向が見られた．

(2) から，デバイス側や衣類側に形状の制約がない場合，できる限り正方形同士でコイルが実装されることが望ましいことがわかる．

(3) から，衣類側のコイル形状に正方形を用いた場合，デバイス側のコイル形状やコイルサイズに関係なく，高い効率と曲げやズレに対する耐性を得ることが可能であるとわかる．このことから，衣類側にコイルを実装する際は，デバイス側のコイル形状を考慮せずに，正方形の形状を基準にコイルを実装すればよいことがわかった．

表 5 各コイルの組み合わせによる効率（面積一定）

		Device side				
		Circle	Hexagon	Square	Rectangle	Triangle
Clothing side	Circle	83%	83%	80%	47%	68%
	Hexagon	83%	89%	81%	49%	70%
	Square	80%	81%	85%	41%	68%
	Rectangle	47%	49%	41%	76%	38%
	Triangle	68%	70%	68%	38%	77%

表 6 曲げありコイルの効率と曲げ無しに対する効率の低下率（面積一定）

			Device Side				
			Circle	Hexagon	Square	Rectangle	Triangle
Clothing Side	Circle	Bending	53%	57%	53%	29%	44%
		Decrease Rate	36%	31%	34%	38%	35%
	Hexagon	Bending	47%	53%	48%	26%	39%
		Decrease Rate	43%	40%	41%	47%	44%
	Square	Bending	54%	61%	62%	28%	49%
		Decrease Rate	33%	25%	27%	32%	28%
	Rectangle	Bending	17%	20%	17%	24%	14%
		Decrease Rate	64%	59%	59%	68%	63%
	Triangle	Bending	23%	25%	24%	12%	23%
		Decrease Rate	66%	64%	65%	68%	70%

表 7 最大効率と最大効率から効率が半分になる各ズレの大きさ（面積一定）

			Device Side				
			Circle	Hexagon	Square	Rectangle	Triangle
Clothing Side	Circle	Half Width(Y)	0.9 cm	0.9 cm	1.0 cm	0.7 cm	0.8 cm
		Half Width(X)	0.4 cm	0.4 cm	0.4 cm	0.3 cm	0.4 cm
		Half Width(Rotation)	13 deg	N/A	12 deg	N/A	N/A
	Hexagon	Half Width(Y)	0.9 cm	0.9 cm	0.9 cm	0.8 cm	0.9 cm
		Half Width(X)	0.4 cm	0.4 cm	0.4 cm	0.4 cm	0.4 cm
		Half Width(Rotation)	N/A	13 deg	13 deg	N/A	N/A
	Square	Half Width(Y)	0.9 cm	1.0 cm	1.0 cm	0.8 cm	0.9 cm
		Half Width(X)	0.4 cm	0.4 cm	0.4 cm	0.4 cm	0.4 cm
		Half Width(Rotation)	N/A	N/A	13 deg	N/A	N/A
	Rectangle	Half Width(Y)	0.7 cm	0.7 cm	0.9 cm	0.6 cm	0.9 cm
		Half Width(X)	0.4 cm	0.4 cm	0.4 cm	0.3 cm	0.4 cm
		Half Width(Rotation)	19 deg	19 deg	19 deg	N/A	17 deg
	Triangle	Half Width(Y)	0.8 cm	1.0 cm	0.9 cm	0.4 cm	0.8 cm
		Half Width(X)	0.3 cm	0.4 cm	0.4 cm	0.4 cm	0.3 cm
		Half Width(Rotation)	15 deg	15 deg	15 deg	N/A	N/A

ⓒ 2021 Information Processing Society of Japan

次に，デバイス側のコイルについては，(3) から，デバイスの大きさにかかわらず，円形，正六角形，正方形を使用することが望ましいことがわかる．一方，(4) より，三角形や長方形を用いた場合でも，コイルサイズを大型化した場合には，最大効率やズレへの耐性が改善可能であることが解る．よって，デバイス設計時にデバイスのサイズが大型化可能な場合や，正三角形コイルや長方形コイルがデバイス内に収まるサイズとして最大の大きさとなる場合，正三角形や長方形もコイル形状の候補となり得ると考えられる．

一方，ズレについては，十分な耐性をもったコイル形状の組合わせを得ることができなかった．本研究の結果では，(2) から衣類側のコイル形状は正方形がもっとも良いことが示された．一方で，(4) で述べたように，コイルを大型化することによって最大効率やズレへの耐性が改善することが示されている．また，(5) で述べたよう，衣類側が長方形の形状となる場合においては，回転ズレに対する耐性が向上することがわかった．このことは，衣類側のコイルサイズや形状を変化させることで，位置ズレが発生しても効率が低下しにくいコイル形状が存在する可能性を示唆している．

6. まとめ

本研究では衣類とウェアラブルデバイス間の無線電力伝送に適したコイル形状や組み合わせを検討した．実験では，スマートウォッチと袖口で無線電力伝送をおこなうことを想定し，袖側，デバイス側それぞれ 5 種類のコイル形状の組み合わせ，計 25 種類の組合わせについて，曲げ，ズレが発生する条件下での効率やその耐性をシミュレーションで評価した．

その結果，デバイス側や衣類側に形状の制約がない場合，できる限り正方形同士でコイルが実装されることが望ましいことが分かった．また，衣類側のコイル形状には正方形を用いると，デバイス側のコイル形状やコイルサイズに関係なく，高い効率と曲げやズレに対する耐性を得ることができることが分かった．さらに，デバイス側のコイルについては，デバイスの大きさにかかわらず，円形，正六角形，正方形を使用するとより良い性能を発揮することができ，三角形，四角形のコイル形状を用いると，サイズの大きさが十分に大きい場合にはより良い性能を発揮することができることがわかった．

これらのことより，組合わせる相手側のコイル形状に関係なく，効率よく無線給電できるコイル形状が分かった．具体的には，衣類側には正方形コイルを使い，デバイスには円形，正六角形，正方形コイルを使うのがよい．よって，3cm 程度のウェアラブルデバイスと衣類間の無線電力伝送用コイルを独立に設計する際に，組合わせる相手側のコイル形状を考慮せずとも効率よく無線給電できるコイル形状を選ぶことが出来るようになった．

一方，コイル形状や組み合わせを変更しても，ズレへの耐性は大きく変化しなかった．しかし，コイルを大型化することによって最大効率やズレへの耐性が向上することが期待できることがわかった．

参考文献

[1] Hexoskin connected health platform — carre technologies inc (hexoskin). https://www.hexoskin.com/pages/hexoskin-connected-health-platform. (Accessed on 05/19/2020).

[2] Hitoe™— toray. https://www.hitoe.toray/en/. (Accessed on 04/24/2020).

[3] Sport profiler ©running, the connected running insoles. https://www.digitsole.com/connected-running-insoles-sport-profiler/. (Accessed on 04/24/2020).

[4] Akihito Noda and Hiroyuki Shinoda. Frequency-division-multiplexed signal and power transfer for wearable devices networked via conductive embroideries on a cloth. In *2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, pp. 537–540. IEEE, 2017.

[5] Andreas Mehmann, Matija Varga, Karl Gönner, and Gerhard Tröster. A ball-grid-array-like electronics-to-textile pocket connector for wearable electronics. In *Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers*, pp. 57–60, 2015.

[6] Michael M Gorlick. Electric suspenders: A fabric power bus and data network for wearable digital devices. In *Digest of Papers. Third International Symposium on Wearable Computers*, pp. 114–121. IEEE, 1999.

[7] Jaewon Choi, Jun-Kyung Cho, and Chulhun Seo. Analysis on transmission efficiency of wireless energy transmission resonator based on magnetic resonance. In *2011 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications*, pp. 199–202. IEEE, 2011.

[8] Xinzhi Shi, Chang Qi, Meiling Qu, Shuangli Ye, Gaofeng Wang, Lingling Sun, and Zhiping Yu. Effects of coil shapes on wireless power transfer via magnetic resonance coupling. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 28, No. 11, pp. 1316–1324, 2014.

[9] Shruti Seshadri, Merugu Kavitha, and Phaneendra Babu Bobba. Effect of coil structures on performance of a four-coil wpt powered medical implantable devices. In *2018 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)*, pp. 1–6. IEEE, 2018.

[10] Yang Li, Jingtai Zhao, Qingxin Yang, Liu Liu, Jingnan Ma, and Xian Zhang. A novel coil with high misalignment tolerance for wireless power transfer. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 55, No. 6, pp. 1–4, 2019.

[11] Daerhan Liu and Stavros V Georgakopoulos. Cylindrical misalignment insensitive wireless power transfer systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 33, No. 11, pp. 9331–9343, 2018.

[12] Taejun Lim and Yongshik Lee. Size-adjustable coils for compensation of lateral misalignment in wpt systems. In *2018 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, pp. 1–4. IEEE, 2018.

[13] Yi Li, Neil Grabham, Russel Torah, John Tudor, and Steve Beeby. Textile-based flexible coils for wireless inductive power transmission. *Applied Sciences*, Vol. 8, No. 6, p. 912, 2018.

ⓒ 2021 Information Processing Society of Japan

[14] 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*, Vol. 2, No. 4, pp. 1–25, 2018.

[15] Kun Bao, Constantinos L Zekios, and Stavros V Georgakopoulos. A wearable wpt system on flexible substrates. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 18, No. 5, pp. 931–935, 2019.

[16] 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. In *2018 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, pp. 1–4. IEEE, 2018.

[17] Wrist-worn wearables maintain a strong growth trajectory in q2 2019, according to idc — business wire. https://www.businesswire.com/news/home/20190912005263/en/Wrist-Worn-Wearables-Maintain-Strong-Growth-Trajectory-Q2. (Accessed on 04/24/2020).

[18] Kazunobu Sumiya, Takuya Sasatani, Yuki Nishizawa, Kenji Tsushio, Yoshiaki Narusue, and Yoshihiro Kawahara. Alvus: A reconfigurable 2-d wireless charging system. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 3, No. 2, pp. 1–29, 2019.

[19] Kikuya Miyamura, Yuichi Miyaji, and Ren Ohmura. Feasibility study on wireless power transfer for wearable devices. In *Proceedings of the 2017 ACM International Symposium on Wearable Computers*, pp. 166–167, 2017.

[20] Ren Ohmura, Kikuya Miyamura, Takanori Okuda, and Yuichi Miyaji. Wrinkling and bending effect in wireless power transfer on clothes. In *Proceedings of the 23rd International Symposium on Wearable Computers*, pp. 172–176, 2019.

[21] Neil J Grabham, Yi Li, Lindsay R Clare, Bernard H Stark, and Stephen P Beeby. Fabrication techniques for manufacturing flexible coils on textiles for inductive power transfer. *IEEE sensors journal*, Vol. 18, No. 6, pp. 2599–2606, 2018.

[22] 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, pp. 4054–4064, 2018.

[23] Mo Huang, Yan Lu, and Rui P Martins. A reconfigurable bidirectional wireless power transceiver for battery-to-battery wireless charging. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 34, No. 8, pp. 7745–7753, 2018.

[24] Watch - apple. https://www.apple.com/watch/. (Accessed on 04/24/2020).

[25] Moto360 - motorola. https://www.motorola.com/us/moto360/p. (Accessed on 04/24/2020).

[26] Highlights — samsung gear s3 - the official samsung galaxy site. https://www.samsung.com/global/galaxy/gear-s3/. (Accessed on 04/24/2020).

ⓒ 2021 Information Processing Society of Japan