

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2015

課題番号：15K12074

研究課題名(和文)収束空中超音波によるワイヤレス電力伝送の研究

研究課題名(英文)Study on wireless power transmission using convergent ultrasound beam

研究代表者

篠田 裕之(Shinoda, Hiroyuki)

東京大学・新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：40226147

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：空气中を伝搬する収束超音波によって給電を行うという新しい空間伝送型給電システムを開発し、その有用性を示す実証実験を行った。電磁的結合を用いたワイヤレス電力伝送では、人体防護の観点から空間中に形成する電磁エネルギー密度を高めることができず、小型のデバイスに伝送可能な電力はごくわずかである。本研究では空中超音波のフェーズドアレイによって、一定条件下で1cm直径程度の小型の受電素子に0.15-0.65Wの電力を供給できることを実証した。さらに受電素子の位置を自動検出しながらフォーカシングを行う給電システムを試作し、運動する給電対象に対しても給電が可能であることを実証した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we examined the feasibility of wireless power transmission in the air using convergent ultrasound beam. Since the ultrasound is reflected at the human skin surface, stronger ultrasound energy density is available near a human skin than the case of electromagnetic wireless power transmission. In this study, we experimentally confirmed that a 1cm-diameter ultrasound transducer facing to an ultrasound phased array of 38 cm by 30 cm phased array could receive 0.15-0.65W in a parallel plane 20cm apart from the phased array. Next we realized a system that enabled power transmission to a moving target by keeping the ultrasound focus on it. We clarified the feasibility and limitation of the power transmission in the current available technologies.

研究分野：ハプティクス、バーチャルリアリティ、計測工学

キーワード：ワイヤレス電力伝送 ヒューマンインタフェース 超音波 インタラクション

1. 研究開始当初の背景

2006年にMITの研究グループが電磁界共鳴によるワイヤレス給電を発表して以来、ワイヤレス給電の研究開発が活発化している。申請者のグループも、シート状媒体を用いたマイクロ波給電の概念(2次元通信給電、サーフェイス通信給電)を提唱し、電界結合方式、磁界結合方式等の方式とともに、ブロードバンドワイヤレスフォーラム(BWF)において標準化の活動を行っている。

電磁場を用いたワイヤレス給電は、条件を整えば高効率の給電が可能であるが、生体を含む一般物体との相互作用が無視できないことが問題である。マイクロ波帯のビームは生体への吸収が大きく、低周波での近接場を利用するものは、生活の中にある金属物体との相互作用も大きい。そのため、強い電磁場に一般物体が触れないようにすることが使用の前提となり、人間が生活する空間においては、空間を隔てた物体に自由に給電ができる訳ではない。例えば ICNIRP および総務省の規定では、マイクロ波帯で人体に照射可能な電波強度は、一定の管理環境下においても $5\text{mW}/\text{cm}^2$ であり、この電力密度では、微弱な電力しか送ることができない。

1mW 以下の消費電力で足りるセンサ等への給電は、環境から電力を獲得するエナジーハーベスティングが有効である。しかしそれ以上の消費電力になると、特殊な環境以外は安定的なエネルギー供給は難しくなる。ビジョンセンサや、後述するような種々の応用において、1W 程度を安全にワイヤレス給電できることに対するニーズは非常に大きく、日常生活においても、また科学研究においても、それらの技術が強く求められている。

このような応用において、消費エネルギーの節約という意味でのエネルギー伝送効率に対する要求はそれほど大きくない。例えば家庭にある白熱電球と同程度の 100W の電力を送電側で消費し、その 1% の 1W が伝送できるだけであったとしても、従来不可能であった事が可能になる事例は数多い。

2. 研究の目的

そこで本研究では、1W 程度までの電力を、一般環境で空間伝送する方法として、収束超音波を用いた方法を提案・実証し、その後の本格的な研究開発の基礎を提供することを目的とする。空間に超音波を放射して給電する技術は、米国のベンチャー企業 uBeam によってもコンセプト提案されているが、技術としては依然黎明期にあり、我が国においてもいち早く本技術の可能性を見極めるべきであると考え。

申請者は、これまで超音波の大規模フェーズドアレイを用いて人体表面に超音波を照射し、触覚を提示する技術(空中超音波触覚ディスプレイ)の研究開発を進めてきた。現在の回路技術を用いれば、1平方メートル規模のアレイの個々の振動子の位相を 1ms の時

間分解能で変化させ、収束点を 3次元空間内で高速に制御することは原理上可能であり、それらのフェーズドアレイのハードウェアを、安価に製造するための技術開発も一部ですでに始められている。本提案では、これまで培ってきた超音波波面の制御技術を、ワイヤレス給電に適用する。

(1) 超音波を用いる理由

収束空中超音波を用いて移動するターゲットに対して 1W 程度までのワイヤレス給電を行い、本申請に示すような応用システムを実証した研究・開発例は存在しない。(前述の uBeam は、具体的にどのような給電が可能になるのか、システムとしてはまだ開示してはいない。)

これまで超音波給電が取り上げられなかった理由としては、(1) 空気中での減衰が大きい(40kHz の平面波は 1m 進行するごとに 1dB 減衰し、周波数を高めるとさらに著しく減衰)上に、空気-固体間のインピーダンス整合部における損失が大きく、電力伝送効率を高めるのが難しいこと(2) 電磁的なインタフェースは電極のパターンで実現できるのに対し、超音波の場合には、加工が困難な圧電材料を実装する必要があること、(3) フェーズドアレイで波動を形成することが前提となるため、より一層開発のハードルが高いこと、がその主なものと考えられる。

2006年のMITの共鳴給電の発表で、多くのエンジニアが電磁的結合によるワイヤレス給電の夢を描いたが、安全性において超え難い壁があることも認識し、現在は送電デバイスに接触するタイプか、人間からの一定距離を確保した上での利用に収束しつつある。

本研究では、「伝送効率は度外視できる小電力」に限定しつつ、今後ますますニーズが高まるユビキタスセンサや、環境型を含むインタフェースのデバイスへの給電方法を提案するものである。画像情報を用いたリアルタイムセンシングや、人間への様々な情報提示法の可能性はすでに数多く提案されているが、多くの場合、その電力はエナジーハーベスティングでは足りず、一方わざわざ充電作業が必要であれば、その有用性自体が大きく低下してしまう。(目安としてスマートフォンの消費電力である)1W を無線給電できることのニーズは非常に大きい。

(2) 本研究で明らかにすべき事

超音波フェーズドアレイは、一見非常に大がかりな装置に見えるが、将来的には大幅な低コスト化が可能と考えられる。しかしそれらの開発には、開発に見合う市場の存在が前提となる。まずは基礎研究としてどの程度の電力が確実に伝送できるかをシステムとして明らかにし、その限界も含めて今後の発展を予想するための確実なデータを提供することが急務であり、それが本研究の役割である。

なお本申請の出発点は、申請者が「空中超音波触覚ディスプレイ」の研究のために、超音波フェーズドアレイをすでに開発していたことであった。それは研究の経緯としての意味だけでなく、将来の応用を考える上でも有効な着眼点になると考えられる。触覚インタフェースにおいても、デバイスへの給電が重要な課題になっているからである。

3. 研究の方法

(1) 基礎検討

開発済みの40kHz超音波フェーズドアレイを使用し、焦点付近に設置した1つの超音波振動子が受電できる電力を明らかにする。受電素子の位置や角度を変化させながら、給電の能力を検証する。

(2) 給電システムの開発

受電された電力をインピーダンス整合しながら充電機に蓄積する周辺回路を開発する。次に給電ターゲットの定位と超音波収束位置の微修正機能を含む、給電システムを試作する。運動するターゲットを追尾しながら連続的に給電するシステムを実証する。

(3) アプリケーションを想定した検証

日常の健康を見守るウェアラブルデバイスの需要は高まる一方であるが、それらの機器への電力供給が課題である。消費電力の比較的小さいものについては、デスクワーク中、食事中、リビングでテレビを見ている時間等、日常生活の中で一定時間必ず滞在する場所に超音波アレイを設置して給電・充電を行うことで、わざわざ意識して充電しなくても済むようにすることが有効であると考えられる。

また日常の生活で利用する大抵のものは壁や床、机の上であり、空間に浮かんでいるものは存在しないが、空間に浮かんだものに給電が可能になれば、空間をさらに積極的に活用できるようになる。Heガスを充填し、センサや音声インタフェースを備えた浮遊体への給電も期待が大きい。

その他将来的には脳波などの生体計測用センサや、小型動物へのセンサ装着などにも応用が期待される。以上のような応用を想定した給電能力の評価を行う必要がある。

(4) 安全性について

瞬間的に超音波ビームが耳にフォーカスしてしまった場合や、長期的な健康被害については、十分検討される必要がある。少なくとも本研究においては耳栓やヘッドフォンを装着して実験を進める。

なお本技術が本格的な普及に至るまでに以下の2段階のステップが必要であると考えられる。第一段階は、工場内など、耳栓(ヘッドフォン)装着を強制可能な環境での実用化である。「ARメガネとヘッドフォンを装着している時に限り給電」ということであれば、

ただちに利用が可能である。その次の段階として一般環境での利用を目指した研究・開発に進むことになる。すなわち聴覚への安全基準を再評価するとともに、人間の耳をセンシングしてその付近の音圧強度を局所的に低減するシステムの開発が重要なテーマとなるであろう。(ただしこれらは本研究期間後に実施されるべき課題である。)

4. 研究成果

(1) 基礎検討の結果

図1に示すような空中超音波フェーズドアレイを用い、給電能力を評価した。直径1cmの40kHz振動子(日本セラミック製T4010A1)を縦14個、横18個配列したフェーズドアレイを用いている。まず図2のようにフェーズドアレイ正面に振動子を設置し、負荷抵抗Rを変化させながら、Rで消費される電力を求めた。結果を図3に示す。図3の結果から負荷抵抗Rが3k程度の際に負荷で消費される電力が最大となった。

次にフェーズドアレイの面から15cm離れた平面上で、フェーズドアレイの面に平行な方向に振動子を移動させながら受信電力を計測した。負荷抵抗Rは3k一定とし、フェーズドアレイから放射される音波の焦点を受信素子の位置に追従させながら測定を行った。結果を図3に示す。フェーズドアレイの幅と同程度までの範囲であれば単一の素子に対して0.1W程度かそれ以上の給電が可能であることが分かる。この電力は決して大きな値ではないが、近年の通信回路や発光素子、小型モータなども連続駆動可能な電力であり、間欠動作を前提とする場合には、さらに多様な駆動対象を想定することができる。

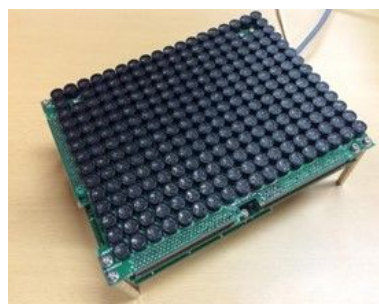


図1 実験に使用した超音波フェーズドアレイユニット

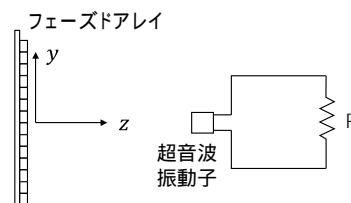


図2 評価実験の回路

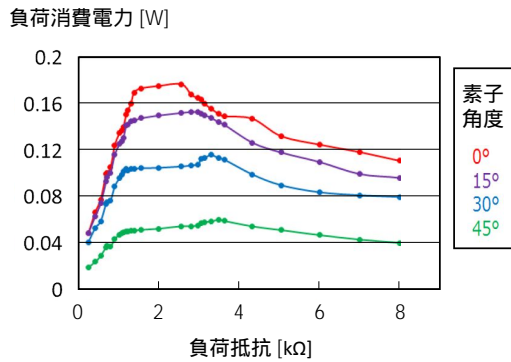


図3 負荷抵抗と負荷抵抗で消費される電力の関係

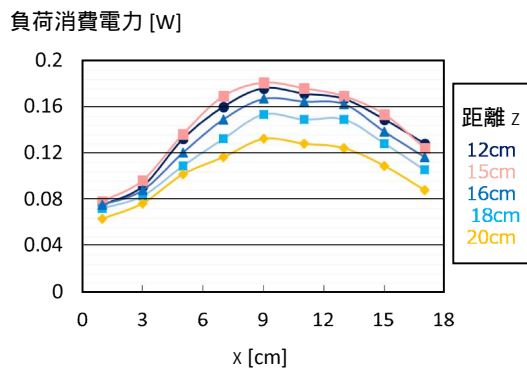


図4 追従給電時における給電電力の位置依存性

(2) 追尾給電システムの開発

以上の基礎検討を踏まえ、図5のような給電システムを開発した。前述の超音波フェーズドアレイユニットを4つ隣接配置し、給電対象を自動追尾しながら給電を行うシステムを試作した。Microsoft社のKinect v2を使用して給電ターゲットの3次元位置を検出し、その位置にリアルタイムで焦点を形成しながら給電を行う。

まず予備段階として、超音波振動子（受電素子）をXYステージに搭載し、その3次元位置がシステムに対して正確に与えられている条件下での追尾給電実験を行った。振動子は前の実験と同じものを用い3kの負荷抵抗を用いた。

フェーズドアレイの表面と受電素子の受信面の距離を20cmとし、フェーズドアレイに平行な平面上、20cm四方の領域内で受信素子をくまなく移動させながら、焦点の座標を受信点に追従させた。20cmの計測領域は、（フェーズドアレイを正面に見たとき）その1辺だけがフェーズドアレイ（4ユニットを用い、38cm×30cmの大きさをもつ）の1辺に重なっており、それと直交する2辺についてはフェーズドアレイの端から均等に離れるように設定してある。その平面内で1cmずつ焦点と受信素子の座標を移動させ、計400点での給電電力を測定した。

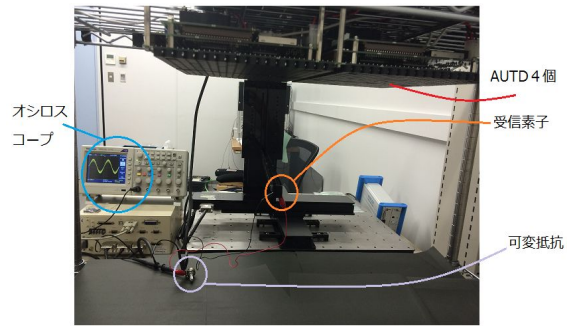


図5 フェーズドアレイユニットを4つ隣接させた追尾給電システム

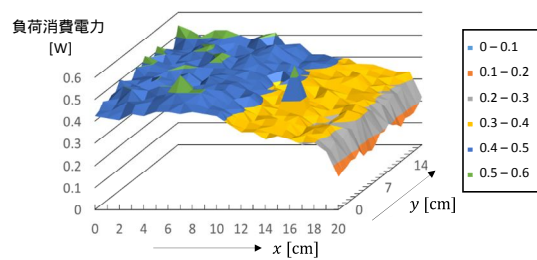


図6 追尾給電の結果（素子の位置が正確に与えられている場合）

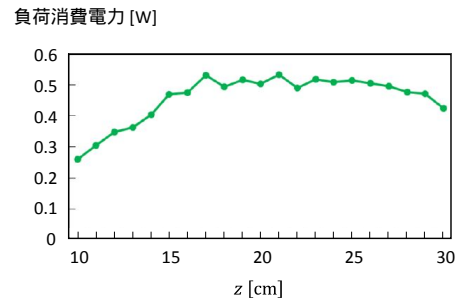


図7 フェーズドアレイから受電素子までの距離を変化させた場合の追尾給電結果

測定結果図6に示す。フェーズドアレイユニットを4個用いた今回のシステムでは、最大で0.65W、最悪のケースでも0.15W以上の給電が可能であった。図で右にいくほど電力が低下しているのは、フェーズドアレイの端辺に近付くためである。縦方向については20cm移動しても電力は大きく変動していないことが分かる。

次にフェーズドアレイから受電素子までの距離を変化させたときの結果を図7に示す。

以上の結果から、38cm×30cmのフェーズドアレイを用いたシステムでは、フェーズドアレイの手前30cm程度までの範囲であれば0.1Wを超える給電が実現されることが確認できた。

また、ターゲットの位置をKinectで計測して給電するシステムにおいても、1cm/sの移動速度までについて追尾給電が可能であ

ることを確認することができた。

以上の研究により、0.1W 以上、すなわち様々なセンサや通信回路を駆動可能な電力を、小型の受電素子（今回の実験では直径 1 cm）に対して超音波によって無線給電可能であることが確認できた。ただし本研究で確認したのは 30 cm 立方程度までのワークスペースでの給電である。さらに大きなワークスペースを確保するためには、大面積のフェーズドアレイを低コストで製造する必要があり、それが今後の課題になると思われる。

5．主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔学会発表〕(計 1 件)

馬 少翔, 吉本 東天, 井上 碩, 長谷川 圭介, 牧野 泰才, 篠田 裕之: 空中超音波による無線給電とその応用, 第 16 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp. 206-208, 名古屋国際会議場, 愛知県名古屋市熱田区, 2015 年 12 月 14-16 日.

* 優秀講演賞を受賞。

6．研究組織

(1)研究代表者

篠田 裕之 (SHINODA, Hiroyuki)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：40226147