



熱電変換を利用した集束超音波による遠隔給電

Ultrasonic Wireless Power Transmission Using Thermoelectric Conversion

安藤諒一¹⁾, 鈴木颯¹⁾, 藤原正浩¹⁾, 牧野泰才¹⁾, 篠田裕之¹⁾

Ryoichi Ando, Shun Suzuki, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino,
and Hiroyuki Shinoda

1) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒 277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

概要: 集束超音波による遠隔給電は、例えばウェアラブル機器のバッテリーをなくすこと等を可能にする。従来の超音波給電では、受信器として超音波振動子を用いて電力を取り出していた。一方、本研究では、綿状の素材に集束超音波を照射した際に生じる熱を利用した発電手法を提案する。この手法は、受信器の指向性やインピーダンス相性が存在しないといった利点がある。本論文では、ペルチェ素子による熱電変換を用いて提案手法の性能を評価し、振動子を用いた手法と比較した。

キーワード: 超音波フェーズドアレイ, 遠隔給電, 熱電変換, ウェアラブル機器

1. 序論

電力を消費するデバイスの運用において、電源の確保の仕方はとても重要なファクターである。特にウェアラブル機器などにおいては、電力の供給方法は機器のサイズや構造に大きな影響を与え、ユーザーにとっての使いやすさを左右する。

そこで、デバイスに物理的に接触することなく電力を供給する手段として、様々な遠隔給電手法が提案されている。遠隔給電により、バッテリーの交換や充電、あるいは有線接続が不要となり、デバイスの可動域を広げることができる。例えば、電磁場を用いる方法、レーザー、マイクロ波、音響波を用いるものが挙げられる。これらにはそれぞれに適した伝送距離があり、また生体・環境への影響や給電効率の違いなどにより場面によって使い分けすることができる。

その一つに超音波フェーズドアレイによる集束音響波を用いた給電手法がある。超音波フェーズドアレイは圧電トランスデューサ(スピーカー)の集合体であり、各振動子の位相をコントロールすることにより、空間中のある一点だけ音圧レベルの高い焦点を形成することができる。これを同じ圧電素子で受信すると、電気エネルギーとしてとりだせる。この手法は送信機の数倍程度の伝送距離に適しており [1], 焦点を形成する位置を動かすことで任意の点への給電が可能である。ピンポイントにエネルギーを集中でき、人体表面でほとんど反射するため人体に対して比較的安全かつ、数 cm から数十 cm での伝送が可能であるこの手法は、ウェアラブル機器への遠隔給電方法としても注目されている [2]。

この集束超音波を圧電素子で受信する際の給電効率は、受信器の周波数特性や角度に大きく依存する。受信器の共振周波数と送信波の周波数の間にミスマッチがあると、音波

の一部が反射されてしまう [2]。また、超音波振動子は指向性を持つため、アレイと受信器を相対させた状態から、受信器の位置を変えずに角度を傾けていくと、 $50^\circ \sim 60^\circ$ でピーク効率の約 50% にまで低下する [1]。

そこで本研究では、音圧エネルギーを一度熱エネルギーに変換することで、指向性や搬送周波数に依らない遠隔給電手法を提案する。吸音性のある素材に集束超音波を当てることで効率よく発熱させられることが知られており [3], その熱エネルギーを電気エネルギーに変換することで遠隔給電を行う。受信器として振動子を使わないため、角度や周波数特性を気にせずに受信器を設置できる。

本論文では、提案手法の実用性を調べるため、角度や周波数特性は固定した状態で給電効率を測定し、振動子を用いた手法と比較する。実験では、吸音材として綿、熱電変換素子としてペルチェ素子を使用した受信器を作成した。結果としては、ペルチェ素子の特性によって得られる電力が大きく変わることで、そのなかで最も電力が得られる素子を使っても、振動子に比べて 1.6% の電力しか給電できないことがわかった。

2. 実験手法

2.1 空中超音波フェーズドアレイ

本研究では、超音波フェーズドアレイデバイスとして、AUTD3[4]を使用した。AUTD3は249個の40kHzの超音波振動子を並べたフェーズドアレイであり、それぞれの素子の振幅と位相を個別に設定できる。これにより空間中の任意の点に焦点を生成することができる。本実験では、焦点はアレイの中心から10cmの直上に形成した。

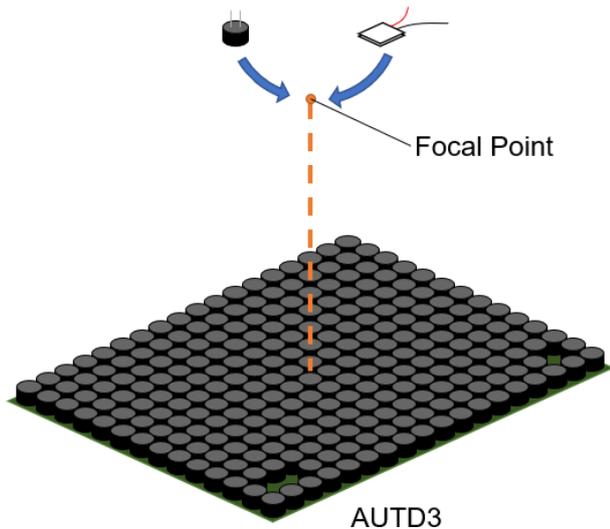


図 1: 実験装置

2.2 受信素子

実験において音響波を受信する素子としては、サイズや冷却効率の異なる3種類のペルチェ素子(型番…素子1:FPH1-3106NC, 素子2:FPH1-7106NC, 素子3:MGM250-17-10-16)に綿を装着したもの、および比較用に1つの振動子(型番…MA40S4S)を用いた。

2.3 実験装置

図1に実験装置の概略図を載せる。また、図2にペルチェ素子に綿をつけた受信器の写真を載せる。受信器の位置は振動子を受信器としたときの受信電圧の波形をオシロスコープでみながら、振幅が最大となる点を探すことで決定した。

2.4 負荷回路と電力算出

受信器で得られる起電力を電源として様々な抵抗値の抵抗をつなぎ、その両端の電圧を測定した。ペルチェ素子を電源とした時の回路図は、内部起電力 E と内部抵抗 R をもつ図3のような回路で表わされる。 r は負荷として接続した抵抗値、 V はその両端にかかる電圧である。また振動子を電源とした時の回路図は、図3の直流電圧源を交流電圧源で置き換えたものになる。このとき、 V は、

$$V(r) = \frac{r}{R+r} E, \quad (1)$$

とかける。このとき負荷抵抗で消費される時間あたり電力 P は直流電源の場合、

$$P(r) = \frac{r}{(R+r)^2} E^2, \quad (2)$$

と表せる。 $P(r)$ は $r = R$ で最大値 P_{\max} となり、直流電源の場合、

$$P_{\max} = \frac{1}{4R} E^2, \quad (3)$$

となり、交流電源の場合は実効値を考えこれの半分となる。

3. 結果

3.1 振動子で受信した場合

負荷抵抗を変えて測定した結果を図4に示す。また、図4における実線は式(1)に基づく近似曲線である。このと

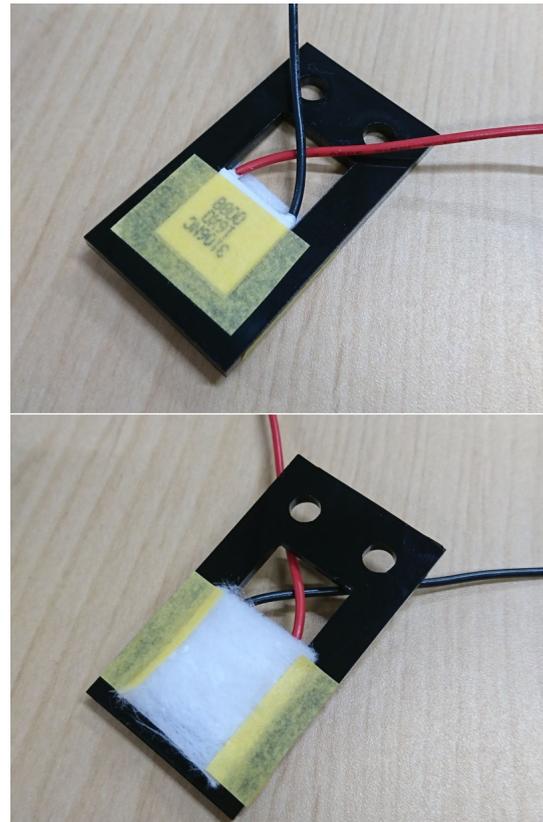


図 2: 綿をつけたペルチェ素子 (受信側の面は下画像)

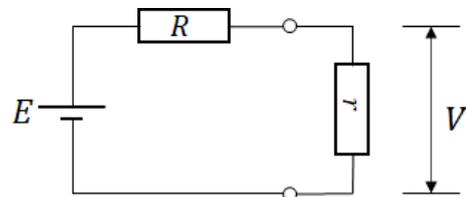


図 3: 回路図

き $E = 14.7\text{V}$, $R = 340\Omega$ であった。式(3) (の半分の値) を用いて振動子から得られる最大電力を推定すると、 $P_{\max} = 79.7\text{mW}$ と求められる。

3.2 ペルチェ素子と綿で受信した場合

ペルチェ素子を受信器として使い、様々な抵抗を接続した結果を図5に示す。図4と同様に、近似曲線が描かれている。

各素子の推定される E , R 及び、 P_{\max} を表1にまとめる。表1に示すように、ペルチェ素子は振動子に比べて E と R がともに非常に小さい。式(3)を用いて推測した最大電力は素子3が一番大きく $P_{\max} = 1.30\text{mW}$ と求められた。

4. 結論と今後の展望

得られたペルチェ素子の伝送可能な最大電力 1.30mW は、振動子の 79.7mW と比べると 1.6% と非常に小さく、熱変換を挟むことにより大きなエネルギーロスが生じてしまっている。振動子の角度による効率低下が $50^\circ \sim 60^\circ$ で 50%

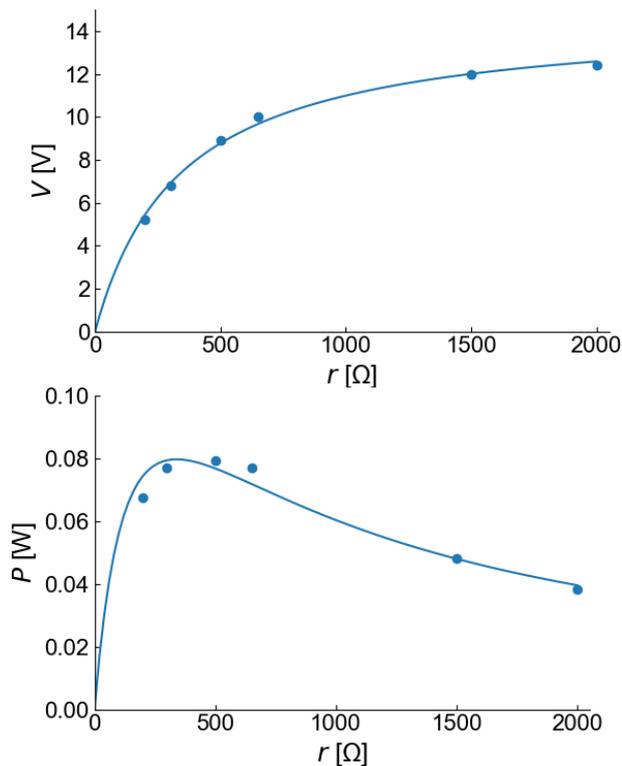


図 4: 振動子を受信器としたときの電圧, 電力

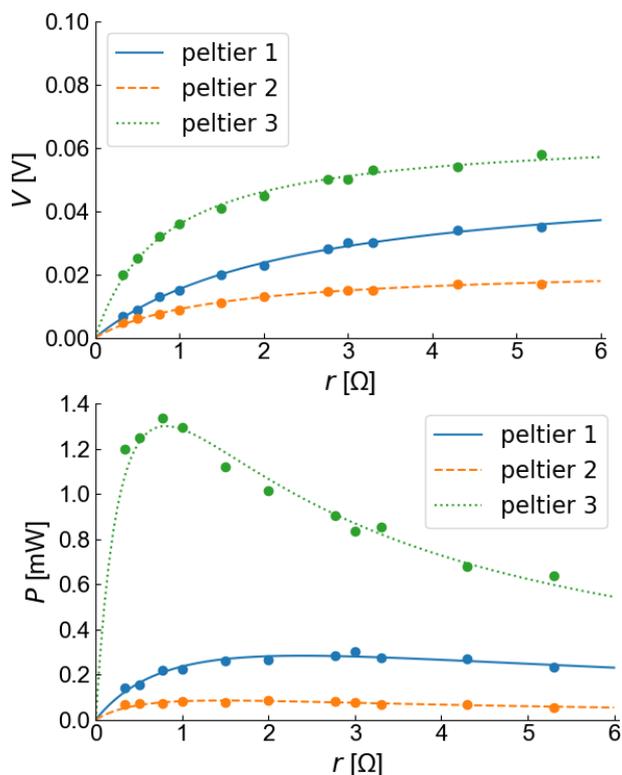


図 5: ペルチェ素子を受信器としたときの電圧, 電力

であること [1] を考えると, 指向性のロスよりも熱変換のロスの方が大きく出てしまう結果となった。

綿は吸音性の高い素材であるため反射されるエネルギーは比較的少なく, 音響エネルギーから熱への変換はほとん

表 1: 各ペルチェ素子の E, R , 及び, P_{\max} の推定値

項目	素子 1	素子 2	素子 3
E [V]	0.0519	0.0222	0.0648
R [Ω]	2.38	1.47	0.81
P_{\max} [mW]	0.283	0.0843	1.30

どロスなく行われていると考えられる。給電効率が低い原因としては, 綿からペルチェ素子への熱伝達が効率よくできていないことが大きいと考えられる。この解決策としては, 綿とペルチェ素子の間に熱伝導性の優れた接着剤のようなものを挟み, 効率よくペルチェ素子表面に熱が伝わるようにすることが第一に考えられる。

また, ペルチェ素子から得られる電圧は両面の温度差に比例するため, 低温側の放熱も工夫することで得られる電力を大きくすることができる。ヒートシンクに小型ファンを取り付けるなどして高温の空気を逃がすことで冷却能力を上げられると考えられる。ただしデバイスへの運用を考えると, サイズやスペース, 受信器の位置なども合わせて考慮する必要がある。

加えて, 吸音素材の選択も効率を左右する重要なファクターである。本実験では吸音性が高い綿を使用した, 熱容量や熱伝導性の大きい金属繊維などを用いた熱エネルギーへの変換も実験価値があると考えられる。

エネルギー伝達効率が低い問題点を解決し振動子による給電に近づけることができたなら, 指向性の影響なども調べていきたい。

謝辞 本研究は JST CREST JPMJCR18A2 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Victor Farm-Guoo Tseng, Sarah S Bedair, and Nathan Lazarus. Phased array focusing for acoustic wireless power transfer. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, Vol. 65, No. 1, pp. 39–49, 2017.
- [2] Rafael Morales González, Asier Marzo, Euan Freeman, William Frier, and Orestis Georgiou. Ultra-power: Powering tangible & wearable devices with focused ultrasound. In *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, pp. 1–13, 2021.
- [3] Takaaki Kamigaki, Shun Suzuki, and Hiroyuki Shinoda. Noncontact thermal and vibrotactile display using focused airborne ultrasound. *LNCS*, 2020.
- [4] Shun Suzuki, Seki Inoue, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Autd3: Scalable airborne ultrasound tactile display. *IEEE Transactions on Haptics*, 2021.