

令和 3 年 6 月 13 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11227

研究課題名(和文) 高効率な自立電源エネルギーハーベスティング回路の研究開発

研究課題名(英文) Efficient self-powered energy harvesting circuit designs

研究代表者

史 又華 (SHI, Youhua)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：70409655

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：人間がエネルギー源(例えば、踏む、歩く、漕ぐ、押すなどの動作によって発電させようというもの)として圧電素子を用いた高効率なエネルギーハーベスティング(EH)インターフェース回路設計の研究開発を行った。特に、(1)多段反転E-SECE回路と複数の圧電素子を用いたEH回路の最適化による自己駆動型スイッチング制御回路の設計、(2)スイッチの導通タイミングに位相差を挿入による広帯域化設計手法の提案、および(3)振動発電を利用したバッテリーフリー無線送信可能なウェアラブルデバイスの実現などの成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、人体の振動を用いた電力効率の良いEH回路を実現した。人体の動きから生成された微弱なエネルギーを効率よくハーベスティングすることができれば、どこでもいつでも自由にエネルギーを得ることが可能になる。本研究の成果により、将来的なバッテリーフリーウェアラブルデバイスの実現は可能と考えられる。さらに、EH技術を実現可能な応用を見据えながら確立し、バッテリーフリーIoTが実現できれば、様々な社会問題の解決につながると期待される。

研究成果の概要(英文)：Research and development on efficient energy harvesting (EH) interface circuit designs have been conducted for piezoelectric energy harvesting from our human body. The main achievements can be summarized as follows: (1) Efficient EH interface circuit designs have been proposed by implementing a multiple bias-flip-based E-SECE circuit and scalable EH circuit optimization for multi-source piezoelectric energy harvesting, (2) A wideband design technique with introduced switching delay is proposed for power and frequency bandwidth improvement in piezoelectric energy harvesting, and (3) A wearable device capable of battery-free wireless transmission is successfully realized by using the proposed Piezo-based EH interface circuit.

研究分野：電子工学

キーワード：Energy Harvesting

1. 研究開始当初の背景

近年、自然環境に存在するさまざまなエネルギーをうまく収集し、有効に利用しようというエネルギーハーベスティング (Energy Harvesting: EH) 技術が、大きな注目を集めている。EH が利用できる有効なエネルギー源として、日光、熱、振動などが挙げられる。それらの中で、最もエネルギー密度が高いものは、振動である。そのため、ウェアラブルデバイス普及に伴い、圧電素子 (= 振動エネルギーから電気エネルギー変換素子) を人間の体に付け、人間の動作によって生成された振動から電力を抽出し、ウェアラブルデバイスの電力源として使用できることが考えられる。

これまでエネルギーハーベスティング技術の研究や実用化が進んでいるが、現時点では本格的な普及には至っていない。その理由は主に 2 つある。1 つ目は、エネルギー源からエネルギーハーベスタ (= 圧電素子のような環境エネルギーを取り込むデバイス) を生成する電力が不安定で、電力量も微弱なためである。2 つ目は、エネルギー源は常に一定というわけではなく、環境条件によっては効率が著しく低下になってしまうためである。従って、エネルギーハーベスティングによる発電とバッテリー供电等との決定的な違いは電力供給の量と安定性である。そのため、微弱なエネルギーを効率的にハーベスティング技術が必要とされる。

2. 研究の目的

ウェアラブルデバイス普及に伴い、圧電素子 (= 振動エネルギーから電気エネルギー変換素子) を人間の体に付け、人間の動作によって生成された振動から電力を抽出し、ウェアラブルデバイスの電力源として使用することが考えられる。そのため、本研究は人間がエネルギー源 (例えば、踏む、歩く、漕ぐ、押すなどの動作によって発電させようというもの) として圧電素子を用いた高効率な EH 回路の開発を目的とした (図 1 示す)。

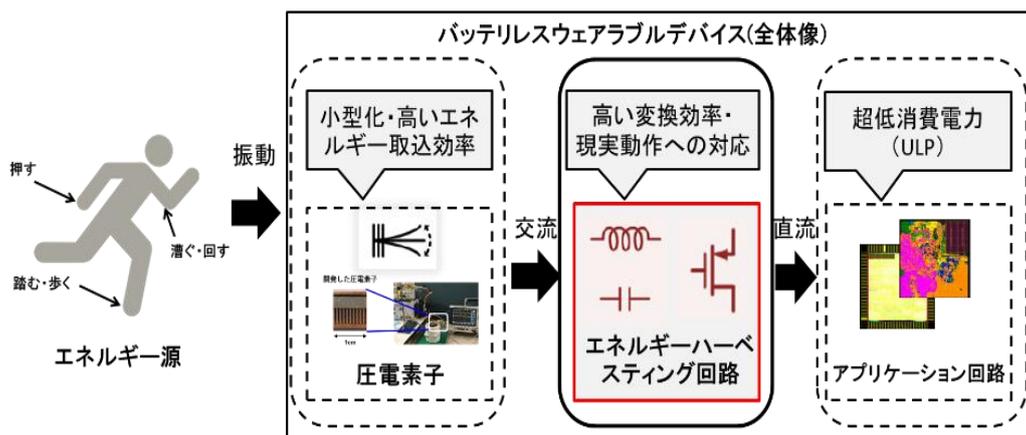


図 1 : 本研究の全体像

3. 研究の方法

EH 回路においては、微弱な振動エネルギーをいかに効率的に電気エネルギーに変換できるかが EH 回路性能向上の鍵である。しかし、人間の動作による振動の周波数は低周波帯域 (主には 1Hz~30Hz) であり、既存研究においてこのような低周波帯域では高い出力電力を得ることはできなかった。この問題を解決するためには、本研究は、まず変位ピーク検出の概念を導入し、自己駆動型スイッチング制御回路の開発を行った。変位ピーク検出とは、圧電素子に加えらるる振動が最大であるとき発生する電圧の最大値および最小値を検出することである。つまり、変位センサとして圧電素子自体を使用し、適切なスイッチ制御信号が生成可能な回路を開発した。

また、圧電素子の出力電圧は振動の振幅・周波数に依存するため、振動周波数の変動に生じた周波数ミスマッチにより、エネルギー変換能力が低下する問題点がある。既存研究では、振動の振幅・周波数が一定となる前提を仮定し、現実的な人間の動作に適用できない。本研究では、既存研究のような単純な振動だけでなく、現実的な人間の動作に対して、自己駆動により振動を追跡し、効率的な制御によるエネルギーの損失を抑制することを念頭に、正または負の位相遅延を導入し、周波数スイッチングタイミングを正しく制御する回路の研究開発を行った。

つまり、本研究は、既存研究の問題点の解決手法として、①実際の人間の動作に対して、変位ピーク検出の概念を導入し、自己駆動型スイッチング制御回路、と②周波数ミスマッチの問題に対して、位相遅延を導入し、スイッチングタイミングを正しく制御する広帯域化設計手法の研究開発を行ってきた。

4. 研究成果

研究内容は、1) 自己駆動型スイッチング制御回路の開発、2) 広帯域化設計手法の開発、および3) 回路試作により提案技術の実証に大別できる。それぞれについて、研究成果を説明する。

(1) 自己駆動型スイッチング制御回路の開発

① 提案多段反転 E-SECE 回路

圧電素子は圧電効果によって電流を生み出す。すなわち、力学的な変位によって電流が発生する。生じる電流は交流であり、交流電圧源とRLC素子を用いることで、電氣的等価回路で表すことができる。既存 EH インターフェース回路は SEH(Standard Energy Harvesting)、SSHI(Synchronized Switch Harvesting on Inductor)、SECE(Synchronous Electric Charge Extraction)などがあり、既存回路の利点と欠点は表1にまとめて示す。

表1. 既存EH回路

EH 回路	最大出力電力	負荷依存性	回路面積
SEH	×	×	◎
SSHI	○	×	△
SSHC	◎	×	△
SECE	○	◎	△
M-PEH	◎	△	×

EH インターフェース回路において、電圧反転を複数ステップに分けることのメリットは、回路内の電力損失が減らせる点にあるとされる。スイッチング素子やインダクタ等に存在する回路の抵抗成分を全て合わせて R_d とすると、電流 I が流れたときの損失電力(瞬時値) P_{loss} は $P_{loss} = I^2 R_d$ で表される。この電力損失が電流値の2乗で効いているところである。すなわち、電流が多く流れれば流れるほど損失は非常に大きくなる。実際、LC共振回路においてスイッチング時にインダクタに流れる電流はスイッチング開始直後の電圧値に比例するので、これらの関係性からスイッチング回数を増やせば増やすほど消費電力は小さくなると考えられる。一方、スイッチ回数を増やせば増やすほど制御回路は複雑になり、スイッチング回路が大きくなる。以上の議論を踏まえ、本研究は、IoT(Internet of things)デバイスにおける動作の安定性と十分な出力電力を目指してEHインターフェース回路を提案した。提案回路は、回路の動作安定性に優れたSECEに多段bias-flip方式を採用した。これによって回路面積の肥大化は抑えつつも安定かつ高出力の回路を提案することが出来た。

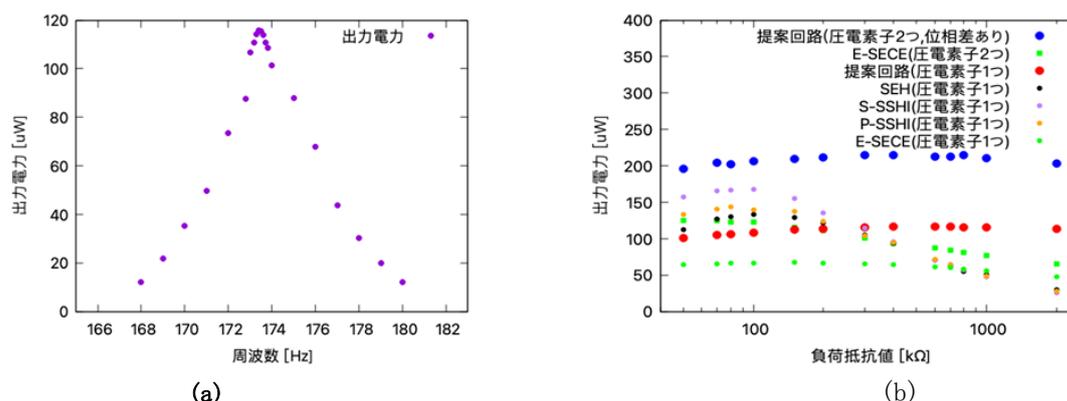


図2：提案多段反転 E-SECE 回路の実装結果：(a) 周波数特性(負荷抵抗値が 800kΩ)、(b) 負荷特性(周波数が 173.4Hz)。

提案回路は以下のような特徴を持つ。i) E-SECE をベースとすることで、複数の圧電素子を使用でき、必要に応じて入力電力を増やすことが出来る。ii) スwitching回路にMOSFETを用いることで、従来のBJTに必要であったベース電流の電力消費を抑える。iii) IoTでの応用を考え、IoTデバイスでよく用いられるMCUを利用する。Switching信号は低消費電力のMCUで生成することで、Switching部の回路体積肥大化を避ける。iv) Switchingを2ステップに分割することによって、簡単な回路構成のまま回路内部の電力消費を小さくする。

図2に提案多段反転E-SECE回路の実装結果の周波数特性と負荷特性を示す。既存回路より出力電力が最大137%の増加が確認された。また、提案回路では、負荷特性がほぼ一定であり、負荷抵抗値にほぼ関係なく電力を出力できるのは大きなメリットと言える。以上のような特性となったのは、SECE構造を取っているからであると考えられる。すなわち圧電素子が出力負荷に直接接続されることがなく、中間のインダクタを介して間接的に接続され、スイッチングが行われるため、負荷の状態に関係なく圧電素子から電流を取り出すことに成功しているからであると考えられる。

② 複数の圧電素子を用いたEH回路の最適化

人間の動きから生成された微弱なエネルギーを効率よくハーベスティングすることができれば、どこでもいつでも自由にエネルギーを得ることが可能になる。さらに、個々のハーベスタから得られるエネルギーは微弱であっても、多数のデバイスを集積化することで高い電力を得ることも可能になる。一方、既存EHインターフェース回路は単一入力であり、より多くの電力を抽出するために複数入力に対応できるインターフェース回路が必要である。しかし、負荷抵抗が一定値を超えると出力電力が急激に低下することから負荷依存性が高いことが問題点として挙げられる。本研究は圧電素子の個数と出力電力の関係を考察し、EHインターフェース回路構成の最適化手法を提案した。

自立駆動が可能な多入力インターフェース回路であるM-PEH回路、SP-P-SSHI for M-PEH回路、NPC for M-PEH回路、MI-SECE回路、改良NPC for M-PEH回路の実装結果を図3に示す。圧電素子の個数を増やすにつれ、実装したインターフェース回路の負荷依存性が高くなることを示しているが、特にMI-SECE回路は負荷依存性が高いといえる。図3より、実装した多入力インターフェース回路の中で、最大出力電力を示した回路は提案したNPC for M-PEH回路であったことから、提案回路の優位性を実証することが出来た。加えて、改良NPC for M-PEH回路においても出力電力は高く、数百個単位で圧電素子を接続することを想定した場合は、回路面積を大幅に削減することが出来るので実用性が高いといえる。

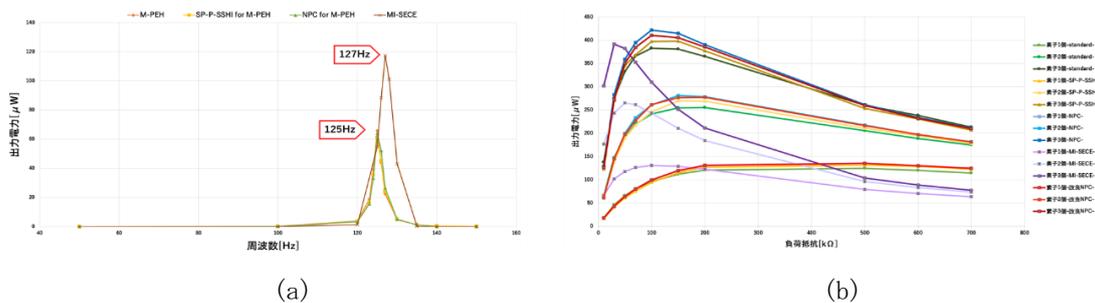


図3：自立駆動が可能な多入力インターフェース回路の実装結果: (a)周波数特性、(b)負荷特性。

(2) 広帯域化設計手法の開発

振動周波数の変動に生じた周波数ミスマッチにより、エネルギー変換能力が低下する問題点に対して、広帯域化設計手法の開発を行った。特に、Synchronous Electric Charge Extraction (SECE)回路に基づき、Phase-Shift回路設計を提案した。基本構造(図4(a)参照)がSECE回路に基づき、Peak Detectorで圧電電圧のピークポイントを検出し、Frequency Detectorで振動周波数を検出、Phase Shifterで周波数に適した遅延をPeak Detectorの制御信号に挿入し、スイッチの導通タイミングを遅らせることで、Phase-Shift手法を実現する。提案手法は、スイッチの導通タイミングに位相差を挿入することにより帯域幅を広げる手法である。特に、広帯域を得るために、振動周波数に適して正遅延又は負遅延を挿入することができる。

遅延挿入回路の実装結果は図4と図5に示す。遅延を挿入して非共振状態でも高出力を獲得することが確認できた。表2により、既存のSECE回路と比べ、-3dB帯域幅が78%広げられ、最大出力電力が34%向上することが実現できた。しかし、提案手法では、振動周波数が激しく変動すると正確に周波数を検出することができなかった。周波数検出精度の向上と消費電力の削減、低周波領域への適用は今後の課題として検討する必要がある。

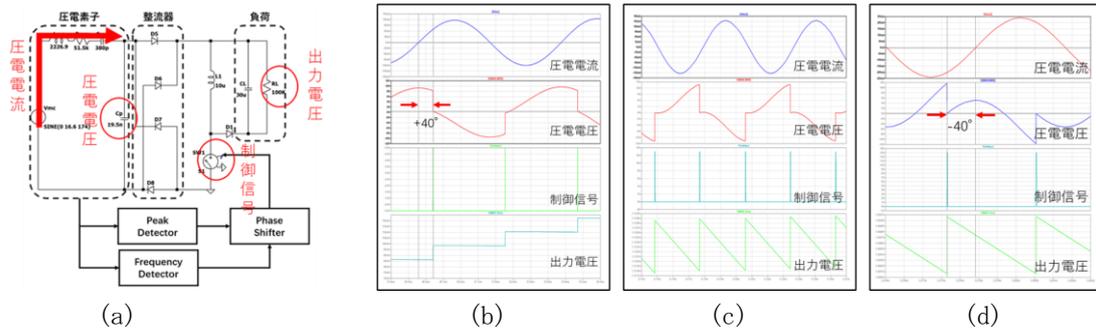


図4：遅延挿入回路の実装結果：(a) 提案回路、(b) 正遅延を挿入する際の波形、(c) 遅延を挿入しない際の波形、および(d) 負遅延を挿入する際の波形。

表2 既存研究との比較

インターフェース	提案回路	P-SSHI-φ	S-SSHI-φ	Delayed SECE
圧電素子	V22B	V22B	V22B	V22B
プロセス	180nm	-	0.25um	0.35um
制御回路消費電力	2.4nW*	-	12uW	0.85uW
負荷依存性	No	Yes	Yes	No
周期数検出	Yes	No	No	Yes
帯域幅改善率	78%	23%	56.1%	71%
最大出力改善率	34%	-	-	33%
比較対象	SECE	P-SSHI	S-SSHI	SECE

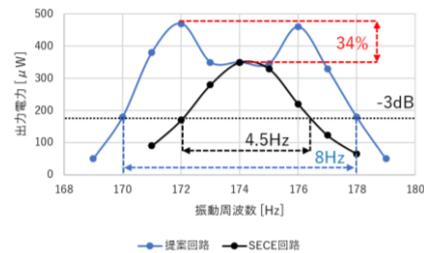


図5 周波数特性の比較

(3) 回路試作により提案技術の実証

上記(1)と(2)の提案技術を統合・改良し、その研究成果に基づくEHインターフェース回路の試作を通して提案技術全体を実証した。様々な環境状況や人間の動作に対して生成された電力などを評価した。試作した回路の一部は図6に示す。

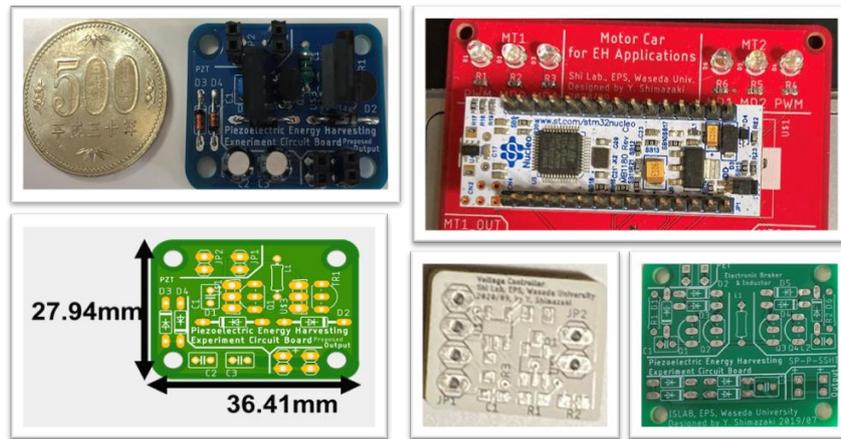


図6：試作したEHインターフェース回路

また、本研究の研究成果に基づく人体の動作を用いたバッテリーフリー無線送信可能なウェアラブルデバイスの製作も行い、実機で測定・評価した。その結果、提案EH回路を用いた人体の動作によるバッテリーフリー無線送信可能なウェアラブルデバイスの製作が成功した。測定実験の一部デモ動画を下記のURLに公開している。

<URL: <https://waseda.box.com/v/ISLAB-EnergyHarvesting>>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 J. Ye, N. Togawa, M. Yanagisawa and Y. Shi
2. 発表標題 Static Error Analysis and Optimization of Faithfully Truncated Adders for Area-Power Efficient FIR Designs
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉山貴紀, 戸川望, 柳澤政生, 史又華
2. 発表標題 低周波圧電エネルギーハーベスティングにおけるMOSs SP-SSHI手法
3. 学会等名 電子情報通信学会 第31回回路とシステムワークショップ
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

エネルギーハーベスティング インターフェイス回路設計 https://ambientronics.com/ https://waseda.box.com/v/ISLAB-EnergyHarvesting
--

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------