

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630149

研究課題名(和文)体内埋め込み型電子機器に向けた人間の筋電からのエネルギーハーベスティングシステム

研究課題名(英文) Research on Energy Harvesting from Insulating Cover of AC Power Cord and Myoelectric Potential

研究代表者

高宮 真 (Makoto, Takamiya)

東京大学・大規模集積システム設計教育研究センター・准教授

研究者番号：20419261

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：筋電からのエネルギーハーベスティングの研究遂行過程において、電源コード外皮の漏れ電界からエネルギーハーベスティングできることを発見した。この発見を応用して、ビルエネルギー管理システム(BEMS)のセンサーノード向けに、新しい電源コード外皮からのエネルギーハーベスティングを提案した。提案手法では、2芯電源コードの外皮に電極を2つ取り付けて電極と芯線を容量性結合させ、芯線からの漏れ電界エネルギーがハーベストされる。提案手法は、従来手法の問題点である電源コード内部の電流や外部グラウンドが不要である。

研究成果の概要(英文)：A new energy harvesting with low installation cost is proposed to enable stable power supply to battery-less wireless sensor nodes for energy management systems. Two electrodes (copper tapes) are attached on the insulating cover of two-wire power cords and the leakage electric-field energy is harvested by the capacitive coupling between the electrodes and the core wires. The proposed energy harvesting does not require an additional ground connection and the current in the power cords. 3-4V, 1.4uW is harvested with 20-cm electrodes from 100-V AC power supply. Temperature and illuminance sensor nodes with the proposed energy harvesting and ZigBee modules for the building energy management system are demonstrated. Both the temperature and illuminance are measured and transmitted to a wireless receiver within a 100-m radius every 250s.

研究分野：電子デバイス・集積回路

キーワード：エネルギーハーベスティング 電源コード

1. 研究開始当初の背景

体内埋め込み型の電子機器を実現する上での技術課題は「小型化」「長期動作（10年以上）」「無線化」の3点である。これら3つの実現を阻む最大の要因が電源供給である。そこで、本研究では、3つの課題を一挙に実現する技術として、人間の筋電からのエネルギーハーベスティング（EH）システムの提案と実証を行うのが研究開始当初の背景であった。

筋電からのエネルギーハーベスティングの研究遂行過程において、電源コード外皮の漏れ電界からエネルギーハーベスティングできることを発見した。この発見を応用して、ビルエネルギー管理システム（BEMS）のセンサーノード向けに、新しい電源コード外皮からのエネルギーハーベスティングを提案した。

2. 研究の目的

ビルエネルギー管理システム（BEMS）においては、屋内環境を測定するためにセンサーノードが必要とされ、測定データを用いて空調と照明を調整し消費電力を削減する。BEMS向けセンサーノードには、(1)低導入コスト、(2)低運用コスト、(3)安定的かつ連続的な測定が求められる。従来の有線方式のセンサーノードは導入コストが高い。一方、従来の無線方式のセンサーノードは定期的なバッテリー交換を必要とし、運用コストが高い。エネルギーハーベスティングはバッテリー交換を不要にする有望な手法であるが、エネルギー源が自然現象の場合は連続的な測定が保証されない。本論文ではこれらの問題を解決するために、電源コード外皮からのエネルギーハーベスティングに注目する。

従来の電源コード外皮の漏れ電界からのエネルギーハーベスティング[1]-[4]では、電源コードに電流が流れている必要があり、連続的な測定を保証しない。電源コードに流れる電流が0Aの時は電界が発生せず、発電できないためである。従来の電源コード外皮の漏れ電界からのエネルギーハーベスティング[5]では、電

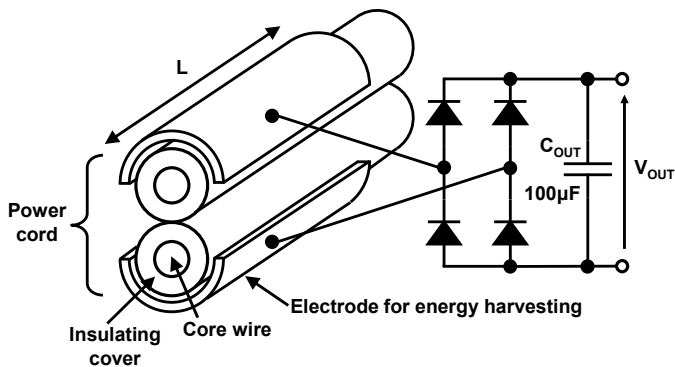


図 1. 提案手法の動作原理

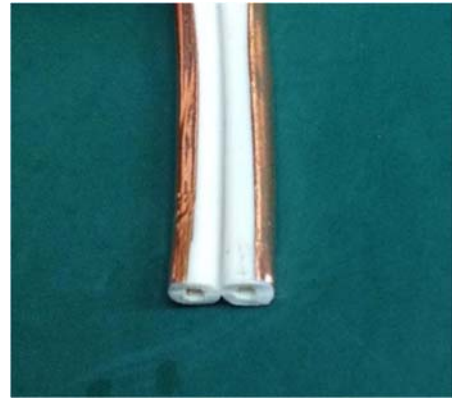


図 2. 2 芯電源コードと 2 つの電極

源コードの外に外部グラウンド接続が必要であり、導入コストが高い。これらの問題を解決するために、電源コードの電流や外部グラウンドが不要の、新しい電源コード外皮からのエネルギーハーベスティングを提案する。提案する技術は、BEMS 向けセンサーノードの導入コストと運用コストの低減と、安定的かつ連続的な測定を可能にする。

3. 研究の方法

図 1 に、提案する電源コード外皮からのエネルギーハーベスティングの動作原理を示す。2 芯電源コードの外皮に、長さ L の電極を 2 つ取り付ける。電極と芯線が容量性結合し、芯線からの漏れ電界のエネルギーを外皮に取り付けた電極からエネルギーハーベスティングする。2 つの電極は全波整流回路に接続され、AC 入力 DC 出力に変換される。図 2 は 2 芯電源コードと 2 つの電極の写真である。

4. 研究成果

提案手法を定量的に分析するために、L と電源コード外皮の厚さを変えて出力波形を測定した。表 1 に変化させたパラメータをまとめた。図 3 は薄いケーブル（VFF）と厚いケーブル（VCTFK）の写真である。

図 4 は L=20cm の時の出力 V_{OUT} の波形である。提案手法の等価回路作成し、等価回路によるシミュレーション

表 1. 変化させたパラメータ

		Thickness of cord	
		Thin	Thick
Length of electrodes (L)	10cm	○	△
	20cm	○	○
	30cm	○	△
	40cm	○	△

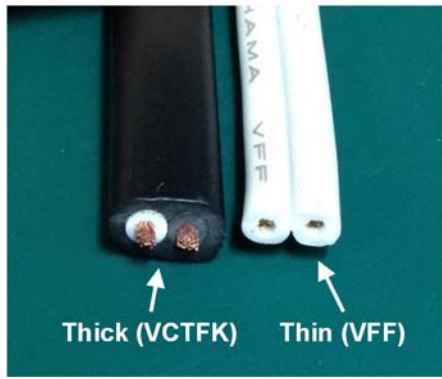


図 3. 外皮が厚いケーブルと薄いケーブル

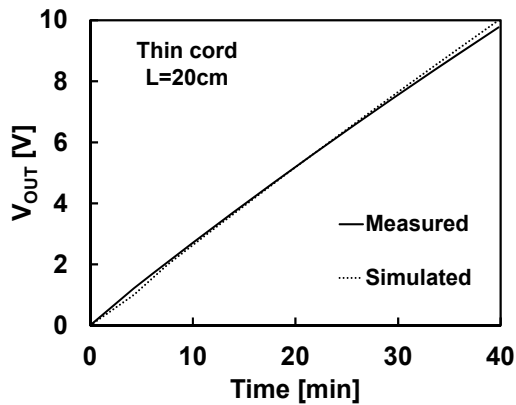


図 4. L=20cm の時の V_{OUT} の実測とシミュレーション

シミュレーションと実測を比較した。図 5 は L=20cm の時の提案手法の等価回路である。C₁ は芯線間の容量である。C₃ と C₄ は電極と近くの芯線との間の容量である。C₂ と C₅ は電極と遠くの芯線との間の容量である。等価回路によってシミュレーションされた V_{OUT} 波形は図 4 に示されている。シミュレーションは実測と非常によく一致しており、等価回路が正しいことが示されている。

図 6 は L=20cm の時の薄いケーブルと厚いケーブルの出力 V_{OUT} の波形である。厚いケーブルの V_{OUT} は薄いケーブルの V_{OUT} よりも低い。これは、厚いケーブルの C₃ と C₄ が、薄いケーブルの C₃ と C₄ よりも小さいためである。図 7 は L=10, 20, 30, 40cm の時の V_{OUT} の実測波形である。L が増加するにつれて V_{OUT} は増加する。ハーベスト電流 (I_{HARVEST}) は以下で与えられる。

$$I_{HARVEST} = \frac{C_{OUT} V_{OUT}}{t} \quad (1)$$

t は出力容量 (C_{OUT}) を出力電圧 (V_{OUT}) まで充電するのにかかった時間である。図 8 は、薄ケーブルで測定された、I_{HARVEST} と L の関係を示している。I_{HARVEST} は L に比例している。例えば、L=20cm の時の I_{HARVEST} は 400nA である。また、I_{HARVEST} / L は 20nA/cm である。

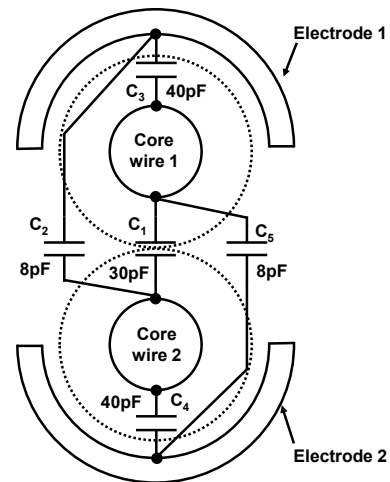
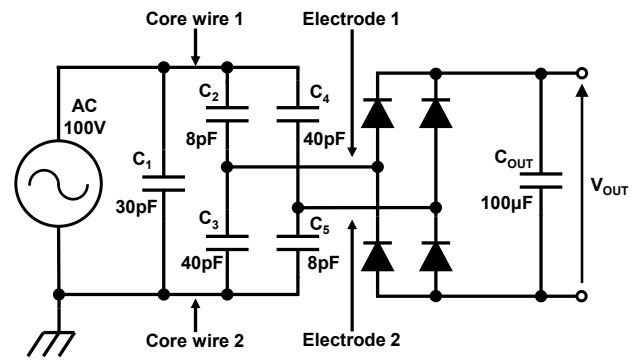


図 5. L=20cm、薄ケーブル使用時の等価回路

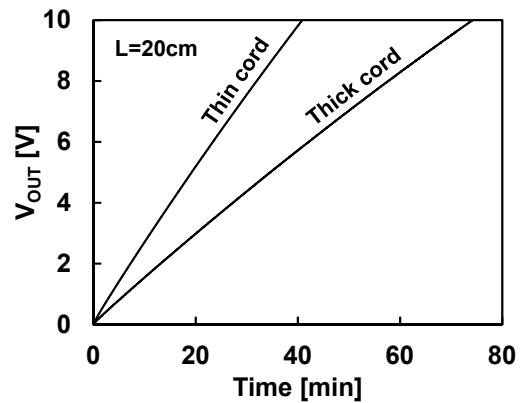


図 6. L=20cm の時の薄ケーブルと厚ケーブルの V_{OUT}

図 9(a)と(b)はそれぞれ、無線センサーノードのブロック図と写真である。4つのダイオードと1つのキャパシタで AC 入力 が DC 出力 に整流される。V_{DD} と V_{OUT} を切断する FET は、エネルギーハーベスティングにおいて非常に重要である。I_{HARVEST} が RF モジュールの消費電流よりも大幅に小さいため、この FET がないと C_{OUT} はチャージされない。ボルテージディテクタは FET を制御する上で重要な部品である。図 10 は

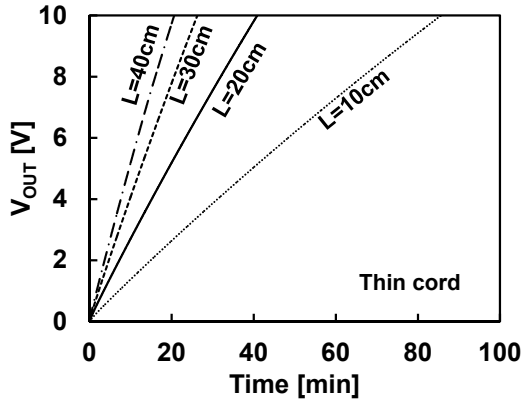


図 7. L=10, 20, 30, 40cm の時の薄ケーブルの V_{OUT}

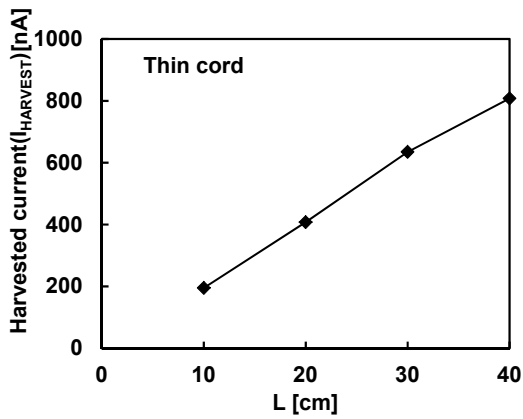


図 8. 測定された $I_{HARVEST}$ と L の関係

L=20cm, 薄ケーブルの時の V_{OUT} の波形である。ボルテージディテクタは 3V と 4V の間のヒステリシスを持っている。スタートアップ時には V_{OUT} は 0V から 4V に増加し、FET はボルテージディテクタによって OFF され、 V_{OUT} は V_{DD} から切断されている。 V_{OUT} が 4V に達すると、ボルテージディテクタは FET を ON して、 V_{OUT} と V_{DD} が接続される。すると、温度センサーと照度センサーが動作し、ZigBee モジュールが測定データを送信する。 $I_{HARVEST}$ が RF モジュールの消費電流よりも大幅に小さいため、 V_{OUT} は急激に減少する。 V_{OUT} が 3V まで減少すると、ボルテージディテクタは FET を OFF する。すると、 V_{OUT} が再度 4V までチャージされる。このようにして、センサーノードは 250 秒間隔で動作する。ハーベストされたエネルギーと電力は、以下のように計算される。

$$E_{HARVEST} = \frac{C_{OUT}}{2} (V_{OUT(final)}^2 - V_{OUT(initial)}^2) \quad (2)$$

$$P_{HARVEST} = \frac{E_{HARVEST}}{T} \quad (3)$$

$V_{OUT(final)}$ (= 4V) と $V_{OUT(initial)}$ (= 3V) はそれぞれ、1 回の充電における最後と最初 V_{OUT} である。図 10 においてハーベストされたエネルギーは 350 μ J であり、電

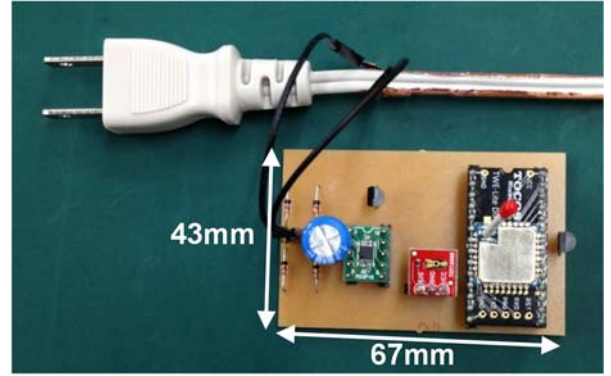
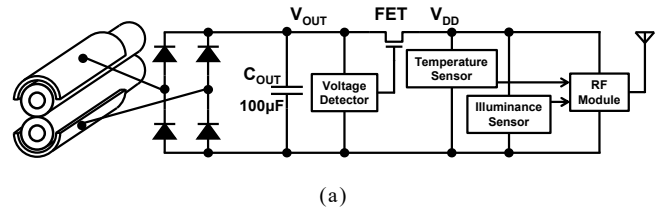


図 9. (a)提案したセンサーノードのブロック図と(b)写真

力は 1.4 μ W である。

図 11 は $V_{DD}=3.3V$ の時の ZigBee モジュールの消費電流の波形である。最初のピークはモジュールの起動を示し、2 番目のピークは無線送信を示している。図 12 は、測定された、無線センサーノードの消費エネルギーの内訳を示している。1 回の動作における消費エネルギーは 268 μ J であり、ハーベストされるエネルギー 350 μ J よりも小さい。RF モジュールと FET がそれぞれ、全消費エネルギーの 76% と 23% を消費している。

図 13(a)と(b)はそれぞれ、ミーティングルームで 24 時間測定された温度と照度を示している。作製した無線センサーノードによって、250 秒毎に温度と照度が同時に測定された。

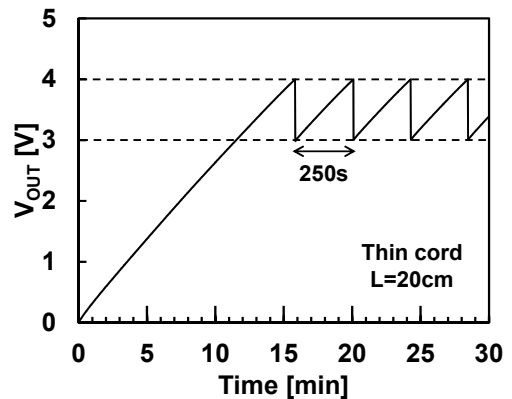


図 10. L=20cm の時のセンサーノードの V_{OUT}

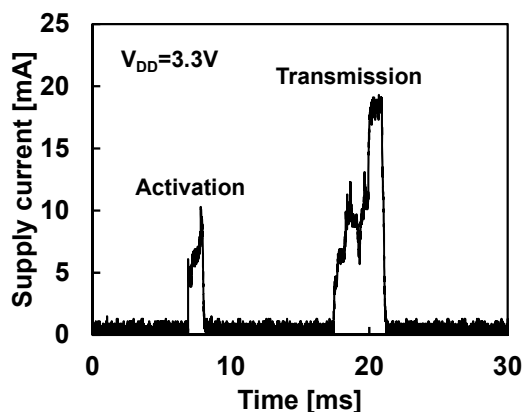


図 11. $V_{DD}=3.3V$ の時の RF モジュールの消費電流波形

Component	Energy/Operation [μJ]
RF module	204
FET	62
Illuminance sensor	2
Temperature sensor	0.32
Voltage detector	0.004
Leakage of capacitor	0.002
Total	268

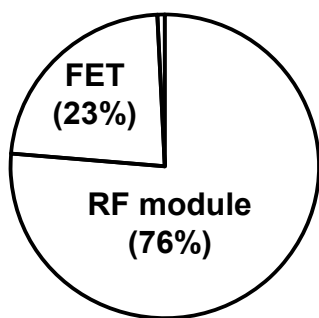
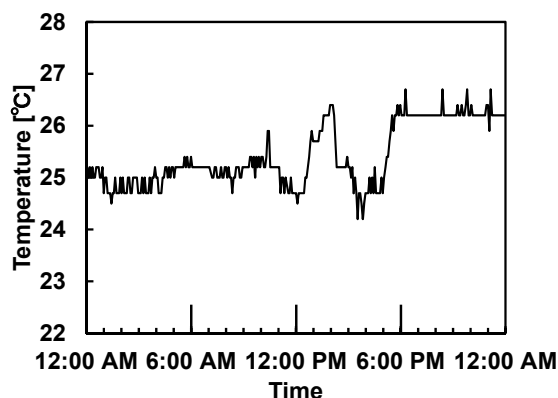


図 12. 提案したセンサーノードの消費エネルギーの内訳

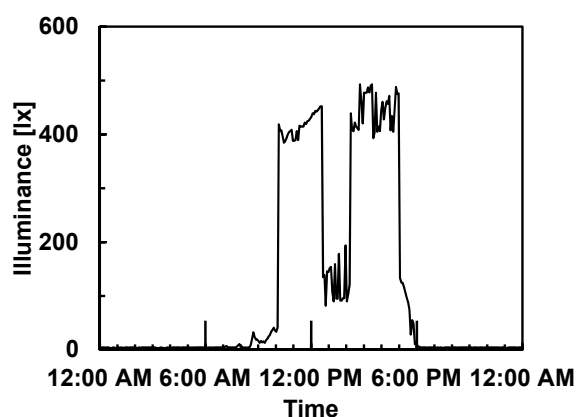
表 2 のように提案手法と既存手法を比較した。既存手法とは異なり、提案手法は電源コードの電流や外部グラウンドが不要であり、導入コストが低く、安定した発電と測定が可能である。

参考文献

[1] S. Takahashi, N. Yoshida, K. Maruhashi, M. Fukaishi, "Real-time current-waveform sensor with plugless energy harvesting from AC power lines for



(a)



(b)

図 13. 提案したセンサーノードで 24 時間測定された、ミーティングルームの温度と照度

表 2. 既存研究との比較

	[1]	[2]	[3]	[5]	This work	
Power Source	Magnetic field		Electric field			
Component for energy harvesting	Current Transformer		Piezoelectric bimorph and permanent magnet	20-cm electrodes		
Operation w/o current in power cord	No	No	No	Yes ✓	Yes ✓	
Dedicated ground	No ✓	No ✓	No ✓	Yes	No ✓	
Harvested	Voltage	1.1-1.3V	2.2-4.7V	NA	19.8-21V	3-4V
	Current	NA	NA	NA	NA	400nA
	Power	940 μW	1890 μW @4A AC	1120 μW @10A AC	8 μW	1.4 μW

home/building energy-management systems," IEEE International Solid-State Circuits Conference, pp. 220-222, 2011.

[2] T. Huang, M. Du, Y. Yang, Y. Lee, Y. Kang, R. Peng, and K. Chen, "Non-invasion power monitoring with 120% harvesting energy improvement by maximum power extracting control for high sustainability power meter system," IEEE Custom Integrated Circuits Conference, pp. 1-4, 2012.
 [3] J. Han, J. Hu, Y. Yang, Z. Wang, S. X. Wang, J. He,

"A nonintrusive power supply design for self-powered sensor networks in the smart grid by scavenging energy from AC power line," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 62, Issue 7, pp. 4398–4407, 2015.

- [4] W. He, P. Li, Y. Wen, J. Zhang, A. Yang, C. Lu, "A noncontact magnetoelectric generator for energy harvesting from power lines," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 50, Issue 11, Article# 8204604, 2014.
- [5] H. Kim, D. Choi, S. Gong and K. Park, "Stray electric field energy harvesting technology using MEMS switch from insulated AC power lines," IET Electronic Letters, Vol. 50, No. 17, pp. 1236 – 1238, 2014.

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 2 件)

- [1] 本田雅宣, 桜井貴康, 高宮 真, “容量性結合を用いた電源コードエネルギーハーベスティングの提案と実証,” 電子情報通信学会, 信学技報, ICD2015-64, pp. 7-11, 京都工芸繊維大学 60 周年記念館 (京都府, 京都市), 2015 年 12 月 17 日.
- [2] M. Honda, T. Sakurai, and M. Takamiya, “Wireless temperature and illuminance sensor nodes with energy harvesting from insulating cover of power cords for building energy management system”, IEEE Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, PES-APPEEC-255, Brisbane Convention and Exhibition Centre (Brisbane, Australia), 2015 年 11 月 16 日.

6. 研究組織

研究代表者

高宮 真 (TAKAMIYA, Makoto)

東京大学・大規模集積システム設計教育研究センター・准教授

研究者番号 : 20419261