

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 4 月 3 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330106

研究課題名(和文)無線センサネットワークにおけるセンサノードの省電力化に関する研究

研究課題名(英文)Research of Low Power Wireless Sensor Node on Wireless Sensor Network

研究代表者

山脇 彰(Yamawaki, Akira)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：10325574

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：無線センサーネットワークにおいて、待機電力をほぼゼロにし、無駄な起動や事象の取りこぼしを防止できるセンサーノードを開発した。センサーノードは、事象発生時にのみ起動するための環境発電と、高度な信号処理・通信制御を実施する2次電池を組み合わせたハイブリッドな電源管理方式を持つ。無電力状態から起動する提案センサの起動時間は80ms程度であり、多くの応用において無視できる程度である。従来のバッテリー寿命の見積もり式を提案センサ向けに拡張し、試作機から得られた実パラメータを用いて評価した。その結果、従来より6～100倍の寿命が得られることが分かった。2つの応用事例を通して、提案ノードの実用性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The experimental results on the prototype system show that our sensor node can wake up from the suspended animation mode with zero standby power with about 80 ms delay. This delay is neglectable for many WSN applications. We have extended the conventional estimation method of the battery life to our proposal. By using this equation, we have confirmed that our proposal can improve the battery life of 6 to 100 times compared with the conventional node. Two case studies indicate that our proposed sensor node can realize actual WSN applications.

研究分野：デジタル回路システム

キーワード：センサーネットワーク センサノード 環境発電 バッテリー 省電力

1. 研究開始当初の背景

無線センサネットワーク (WSN) は、各種のモニタリングを通して、社会生活の向上に貢献し得る様々な応用が考えられ、社会の安全や安心及び生活における快適性やゆとりの向上、並びに生産や業務の効率化が期待されている (図 1)。

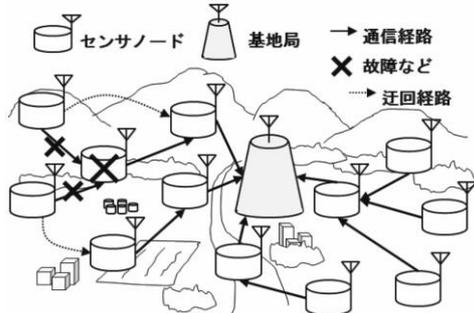


図 1 無線センサネットワーク (WSN)

WSN では多数のセンサをノードとした無線ネットワークが構成され、センサノードは、マルチホップネットワークを実現するための複雑な経路制御、センシングデータに対する信号処理や送信データの暗号化など、各種の高度な処理を高速に実施するため、通常のセンサ機器と比較して、より多くの電力を消費しているのが現状である。

WSN を構成する多数のセンサノードの電力供給には、通常、バッテリーが使用され、バッテリーの寿命を延ばすための様々な電源管理法が提案されてきた。センサノードは、大部分の機能をオフして消費電力を抑える待機モードと、電力をフルに供給して最大性能で動作する通常モードを持つ。そして、両モードの切り替えをうまくスケジューリングして省電力化が図られる。ただし、待機時にも常時電力を供給する必要があり、スケジューリングによってはノードを無駄に起動したり、センサの出力を取りこぼしたりすることもある。これらはバッテリーの浪費につながる。また、事象によってセンサに生じる電力 (環境発電) のみを用いて、バッテリーなしでセンサノードを動かす研究・開発も行われている。ただし、センサノードが高度な処理を実施するだけの電力は発生できず、近接ノードにセンシングデータを送るだけの単純な動作に留まっている。

2. 研究の目的

無線センサーネットワーク (WSN) の多数のセンサノードに対して、待機電力をほぼゼロにし、かつ無駄な起動や事象の取りこぼしを防止できるシステムの提供を目的とする。その為に、事象発生によるセンサの発電 (環境発電) を用いたノードの起動と、二次電池による高度な信号処理・通信制御を組み合わせた WSN による世界初かつ日本発のハイブリッドな電源管理手法をハードウェアにより実現する。

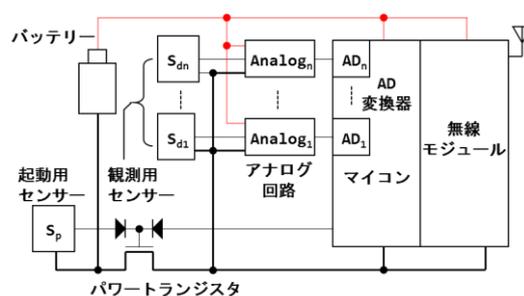


図 2 提案センサノード

3. 研究の方法

(1)センサノードの構成：図 2 に提案のセンサノードの構成概念を示す。提案センサノードは、事象観測用のセンサ ( $S_{d1} \sim S_{dn}$ ) に加えて、起動用センサ  $S_p$  を持つ。  $S_p$  はピエゾ素子、フォトダイオード、ペルチェ素子、ソーラーパネルなどの事象によって起電力を発生させるセンサである。その起電力がセンサノード

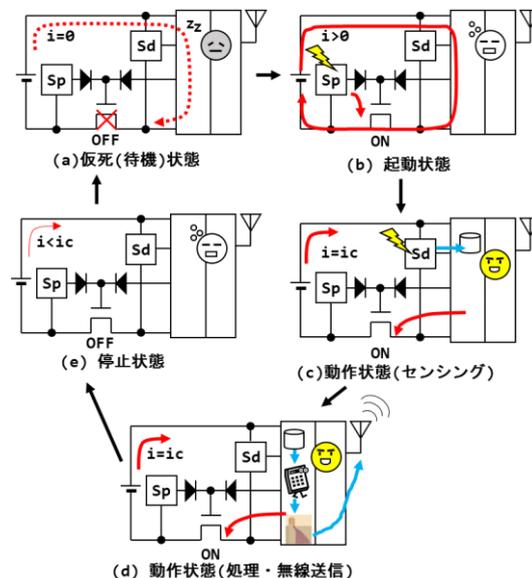


図 3 センサノードの動作

の起動に使用される。グランドラインにはパワートランジスタが挿入され、センサノードの起動時に起動用センサにより駆動される。

(2)センサノードの動作：図 3 に提案センサノードの動作概念を示す。

(a) 待機時にグランドラインが切断されているため、提案センサノードは、一切、電力を消費しない。この状態を仮死状態と呼ぶ。事象のモニタリングが無電力で行われるという特徴がある。

(b) 起動用センサに事象が発生すると、グランドラインが接続され、電流が流れだす。その結果、センサノードのマイコンが起動する。  
 (c) 起動したマイコンがグランドラインを接続し続け、観測用センサからのセンシングデータを得る。

(d) マイコンはセンシングデータに対して、ノイズ除去や、マッチング、暗号化などの信号処理を加えて、処理結果を WSN 上に無線送信する。

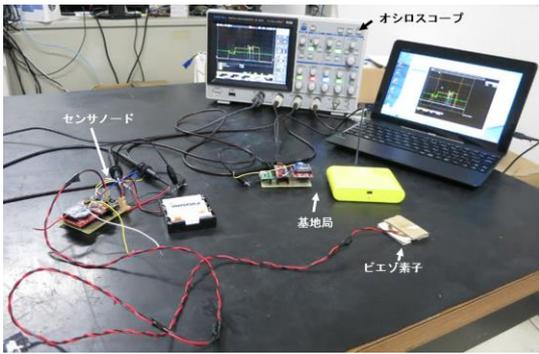


図 4 実験の様子

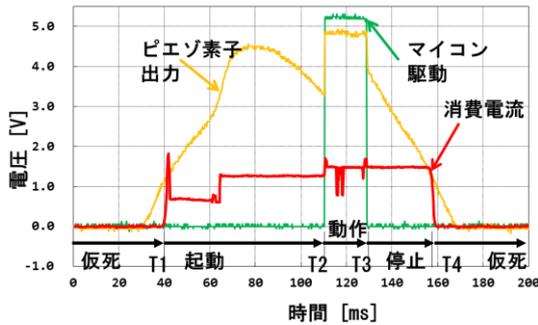


図 5 実験結果

(e) 一連の動作が完了したマイコンは、グラウンドラインを切断し、動作を停止する。その結果、再び提案センサノードは(a)の無電力な仮死状態になる。

#### 4. 研究成果

##### (1) 提案センサノードの実現性検証

図 2 に示した提案センサノードの試作機を開発し、実際に起動用センサによって無電力状態から起動したセンサノードが、遅延なくセンシングデータを無線送信できるか明らかにした。その実験の様子を図 4 に、実験結果を図 5 に示す。

実験結果より、仮死状態では消費電流がほぼゼロ (1nA 以下) であった。 piezoelectric 子の起電力によって起動されたマイコンは、約 60ms の後に、センシングと無線送信を約 20ms かけて実施した。そして基地局において、その送信結果が正しく受信されたことを確認した。結果として、提案センサノードは起動か

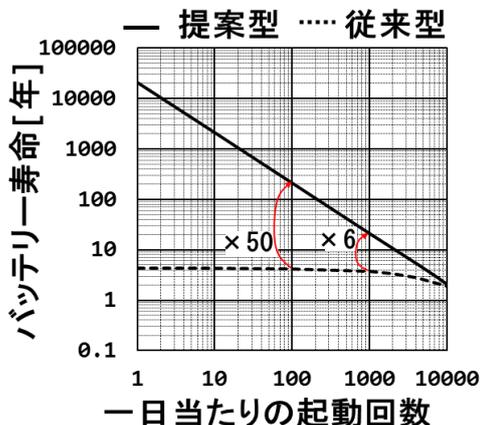


図 6 バッテリー寿命の評価

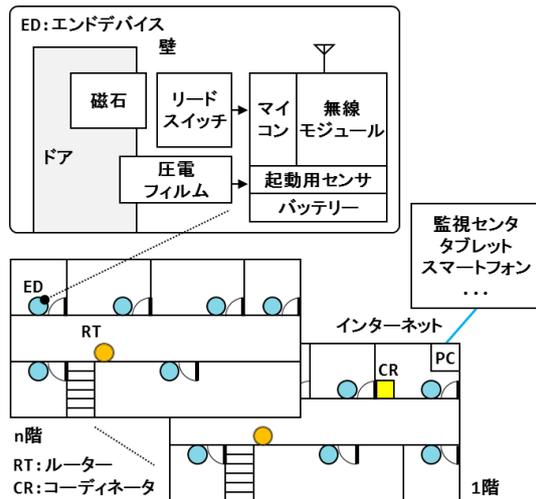
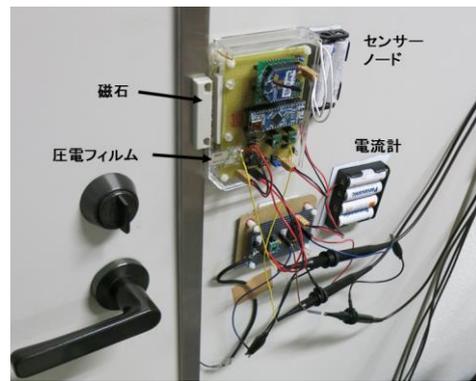


図 7 ドアモニタリング

ら約 80ms で無線送信でき、多くの応用において、その起動時間は無視できる程度であることがわかった。

##### (2) バッテリー寿命の評価

提案センサノードのバッテリー寿命を見積もるために、その動作特性 (仮死状態から事象に応じて起動する適応型の待機/動作スケジューリング) を考慮して、従来からのバッテリー寿命の見積もり法 (一定期間で待機/動作を繰り返す周期的スケジューリングに基づいた方法) を拡張した。そして、試作機で得られた各種実パラメタ (仮死状態での漏れ電流など) を用いて、従来型センサノードとの寿命を比較した。その結果を図 6 に示す。

提案ノードは従来ノードと比較し、一日当たり 100 回の起動では 50 倍、1000 回では 6 倍のバッテリー寿命を達成できることがわかった。

##### (3) 各種応用への適用実験

提案センサノードが実際に各種応用にどのように適用でき、どのように役立てるかを検証するために、2 つの応用に対する適用実験を行った。一つが無線ドアモニタリングシステムであり、一方が無線火災警報器である。

##### (a) 無線ドアモニタリングシステム

工場や事務所などのセキュリティ対策として、ドアの開閉状態やドアの開閉頻度を調べることは重要である。

図7に提案センサノードを用いたドアモニタリングシステムの構築例を示す。WSNの業界標準であり Zigbee をベースとしたシステムである。

センサノードは無電力の仮死状態でドアの開閉をモニタリングする。ドアの端に当たるように設置された圧電フィルムが、ドアの開閉時に弾かれ、起電力を生じる。それによって起動したセンサノードは、ドアの開閉をリードスイッチの電圧レベルで判断する。ドアの開閉状態を WSN へ無線送信した後に、仮死状態に遷移する。複数台の提案センサノードによって上記の動作が正しく行われたことから、ドアモニタリングシステムへの適用可能性を確認した。

### (b) 無線火災警報器

図8の上段に示すように、従来の無線火災警報器は、スリープと起動を周期的に繰り返しながら、火災をセンシングしていた。火災はいつ発生するかわからない。何十年もの長期間にわたって発生しないかもしれない。そのため、いざ火災を検出した際に、バッテリーがほぼ空になっていると、長距離での警報を無線で送信できない。

一方、図8の中段に示すように、温度差を電力に変換するペルチェ素子を備えた提案センサノードの場合、火災のモニタリングは仮死状態で行うため、その間、バッテリーは消費されない。いざ、火災が検出されると、ペルチェ素子の起電力によってセンサノードは動き出し、ほぼ満充電なバッテリーの電力をすべて使い切って遠方の基地局に警報を送ることができる。

図8の下段のように、試作機で実際の動作を確認した。グラウンドラインを切断するトランジスタの接続電圧の閾値を変えれば、センサの起動温度も変更できることを確認した(実験では 50°C, 70°C, 90°C)。

### 5. 主な発表論文等

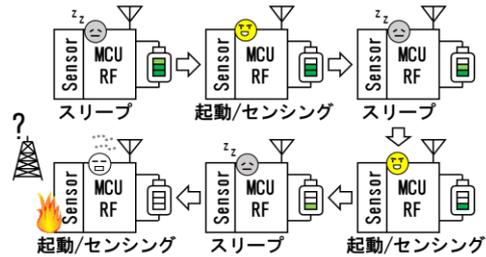
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

① Akira Yamawaki, Mayu Yamanaka and Seiichi Serikawa: "A sensor node architecture with zero standby power on wireless sensor network", *Artificial Life and Robotics*, vol. 20, no. 3, pp.210-216 (2015), 査読有

② Akira Yamawaki and Seiichi Serikawa: "Remote Power Switch to Make Standby Power of Infrared Remote Controlled Product Zero", *IAENG International Journal of Computer Science*, vol. 42, no. 2, pp.132-138 (2015), 査読有

### 従来型無線火災センサノード



### 提案無線火災センサノード

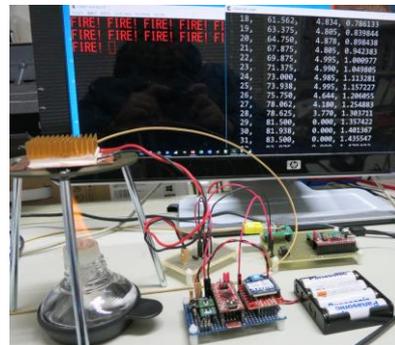
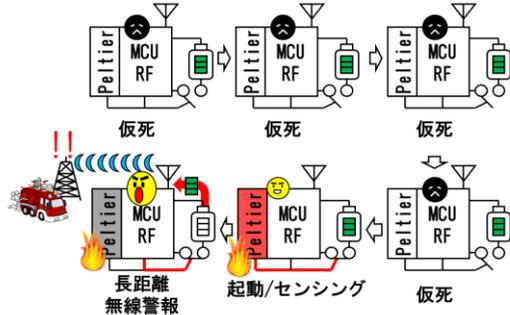


図8 無線火災警報器

[学会発表] (計8件)

① Toru Kuwatani, Yasunobu Takaichi and Akira Yamawaki: "A Fire Alarm Sensor Node with Long Battery Life by Zero Standby Power Consumption", 5th IIAE Int'l Conf. on Industrial Application Engineering 2017, 2017年3月29日, 北九州国際会議場 (福岡・北九州)

② Ryuji Funemizu, Yasunobu Takaichi and Akira Yamawaki: "Development of Wireless Monitoring Device for Window Security using Light Sensor", 5th IIAE Int'l Conf. on Industrial Application Engineering 2017, 2017年3月29日, 北九州国際会議場 (福岡・北九州)

③ Yasunobu Takaichi, Daichi Koide, and Akira Yamawaki: "Wake-up Time Measurement of Wireless Sensor Node with Zero Standby-power", 4th IIAE Int'l Conf. on Intelligent Systems and Image Processing 2016, 2016年9月10日, 京都市国際交流会館 (京都・左京区)

④ Akira Yamawaki and Seiichi Serikawa: "Battery Life Estimation of Sensor Node with Zero Standby Power Consumption", 19th IEEE Int'l Conf. on Computational Science

and Engineering, 2016年8月24日, パリ(フランス)

⑤ Akira Yamawaki and Seiichi Serikawa: "Applying Sensor Node with Zero Standby Power to Door Monitor," Int'l MultiConf. of Engineers and Computer Scientists 2016, 2016年3月17日, 香港(中国)

⑥ Akira Yamawaki and Seiichi Serikawa: "An Extending Method of Operable Distance for Infrared Remote Controlled Power Switch with Zero Stand-by Power", 4th Int'l Conf. on Informatics, Electronics & Vision 2015, 2015年6月17日, 北九州国際会議場(福岡・北九州)

⑦ Akira Yamawaki and Seiichi Serikawa: "Power Supply Circuit With Zero Standby Power Consumption on Infrared Remote Controlled Product by Using Energy Harvesting", Int'l Multi-Conf. of Engineers and Computer Scientists 2015, 2015年3月20日, 香港(中国)

⑧ Akira Yamawaki, Mayu Yamanaka and Seiichi Serikawa: "A sensor node architecture with zero standby-power on wireless sensor network", Twentieth Int'l Symp. on Artificial Life and Robotics 2015, 2015年1月21日, ビーコンプラザ(大分・別府)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山脇 彰 (YAMAWAKI, Akira)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 10325574

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号:

### (4) 研究協力者

芹川 聖一 (SERIKAWA, Seiichi)