Vol.2018-DPS-175 No.35
Vol.2018-MBL-87 No.35
Vol.2018-ITS-73 No.35
2018/5/25

環境発電素子の発電量に基づくコンテキスト認識手法の提案

梅津　吉雅[1]　中村　優吾[1,2]　荒川 豊[1,3]　藤本 まなと[1]　諏訪 博彦[1]　安本 慶一[1]

概要：バッテリ駆動が前提となるセンシングシステムでは，自然界の物理現象から電力を取り出すエナジーハーベスティング（環境発電）の応用が期待されている．環境発電素子の発電量は，照度や振動など，素子の状態や周辺の環境によって変化する物理量に依存する．本稿では，環境発電素子を電力供給に加えて，センサとしても活用し，その発電量を観測値として行動を識別できるようにすることを目指す．この目的に向け，まず環境発電素子の発電量が，どういった状況に依存しているのかを調査する．具体的には，5種類の太陽電池素子，温度差で発電するペルチェ素子，振動や圧力によって発電する2種類の振動発電素子を対象に，様々な物理量に対する発電特性を調査する．次に，対象とする様々な行動や環境の中で，それぞれの環境発電素子から得られる電圧の波形がどのように変化するのかを調査し，どの行動がどの発電素子によって識別可能になるかを明らかにする．調査に基づき，太陽電池と振動発電素子を搭載したネームプレート型デバイスを開発し実験した結果，動作や場所によって，発生する電圧値に明確な違いがあること，すなわち提案手法により行動認識が可能なことが分かった．

Context Recognition based on Power Output of Energy-harvesting Modules

YOSHINORI UMETSU[1]　YUGO NAKAMURA[1,2]　YUTAKA ARAKAWA[1,3]　MANATO FUJIMOTO[1]
HIROHIKO SUWA[1]　KEIICHI YASUMOTO[1]

1. はじめに

ユビキタスなサービスの実現には，人がどのような場所で，何をしているのかというコンテキスト認識技術が必要不可欠である．そのため，様々なセンサを搭載したスマートフォン，ウェアラブルデバイス [1] などの端末によるコンテキスト認識システムが提案されている [2], [3].

こうした従来のコンテキスト認識システムにおける共通の問題は，バッテリーである．例えば，Android ウォッチの加速度センサを利用したコンテキスト認識システムが提案されている [4] が，スマートウォッチのバッテリー容量は小さいため，センサを常時稼働するとすぐにバッテリーが切れてしまう．このようなバッテリー問題に対して，自然界の物理現象から電力を取り出すエナジーハーベスティング（環境発電）の応用が期待されている．代表的な環境発電素子としては，太陽電池（光），ピエゾ素子（振動），ペルチェ素子（温度差），レクテナ（電波）などが挙げられる．これらを用いてセンサを稼働させる試みは，これまでも多数行われており，例えば，川原らは放送用信号電波を用いてセンサノードを動かすことに成功している [5]．我々も，太陽電池だけで駆動するドアセンサや人感センサを用いたコンテキスト認識の研究を行っている [6]．ウェアラブル機器におけるエナジーハーベスティングとしては，2018年4月に発売された Matrix 社[*1]の PowerWatch がある．PowerWatch は，体温からエネルギーを得ることで半永久的に駆動する．これらの事例では，環境発電素子から得られる電力を，センサや基板を動かすための電源として用いている．しかしながら，加速度センサを常時動かすような電力を生み出すことは難しい．

我々は，環境発電によってセンサや無線機能を駆動するための電力を得るのではなく，状況によって変化する発電量自体から行動を認識できないかと考えた．環境発電素子の発電量は，照度や振動など，素子の状態や周辺の環境によって変化する物理量に依存する．太陽電池を例に取ると，屋外，屋内，照明の種類，といった環境の差により，受光する光が変化し，それにともなって発電量も変化する．つまり，環境発電素子を電力供給に加えて，センサとしても

[1] 奈良先端科学技術大学院大学，情報科学研究科
[2] 日本学術振興会特別研究員
JSPS Research Fellowships for Young Scientists
[3] JST さきがけ

[*1] Matrix : https://www.powerwatch.com/

ⓒ 2018 Information Processing Society of Japan

Vol.2018-DPS-175 No.35
Vol.2018-MBL-87 No.35
Vol.2018-ITS-73 No.35
2018/5/25

活用し，その発電量を観測値として行動を識別できれば，飛躍的に低消費電力なコンテキスト認識システムが実現可能であると考えた．

本稿では．まず環境発電素子の発電量が，どういった状況に依存しているのかを調査する．太陽電池の中には，一般的に使われるシリコン系太陽電池以外にも，屋内でも発電効率の良い色素増感型といったものがある．それら異なったタイプの太陽電池に対し，分光感度測定装置 CEP-2000RP を用いて，波長や光量に対する発電特性を明らかにする．温度差で発電するペルチェ素子や，振動や圧力によって発電するピエゾ素子についても同様に基本的な発電特性を明らかにする．次に，対象とする様々な行動や環境の中で，それぞれの環境発電素子から得られる電圧の波形がどのように変化するのかを調査し，どの行動がどの発電素子によって識別可能になるかを明らかにする．最後に，その調査に基づき，太陽電池と振動発電素子を搭載したネームプレート型デバイスを開発し，そのデバイスを用いてどのようなセンシングデータが取得できるのか確認する．

2. 関連研究

携帯デバイスを用いたコンテキスト認識システムにおけるバッテリーの問題に着目し，環境発電を用いてその解決を試みる研究が近年増えてきている．例えば，靴にピエゾ素子を内蔵し，足の着地時の発電により歩数の検出を行う研究 [7] や，衣服の摩擦に伴い発生する静電気の量から人の行動を認識し，発生した電力を汎用的な電源として利用する研究 [8] などがある．しかし，[7]，[8] ともに僅かな電力のみしか得られず，常時計測やデバイス全体の駆動は困難である．したがって，コンテキスト認識技術の幅広い応用のためには，現行の手法に加えてさらなるデバイスの省電力化や電力収集のメソッドが必要となる．本研究ではそのひとつとして，環境発電素子の発電量により行動を認識する方法を提案する．

同様の手法を用いる研究として，ピエゾ素子を搭載したデバイスを体に取り付け，様々な行動を行った際にその発電量から行動を推定する研究 [9] が行われている．本研究は，ピエゾ素子だけではなく，複数種類の素子の搭載によって，発電量の増大と，認識可能行動の多種類化を狙う．

3. 発電素子の特性調査

本稿で述べる行動認識システムの構築に先立ち，代表的な環境発電素子である太陽電池（5 種），振動発電素子（2 種），ペルチェ素子の特性を調査する．これにより，これまで行動認識に用いられてきたセンサのうち，代替可能なセンサの種類と代替素子について検討する．また，代替素子により認識可能な行動の種類についても検討する．発電素子の特性を調査するシステムは，独自に開発した．

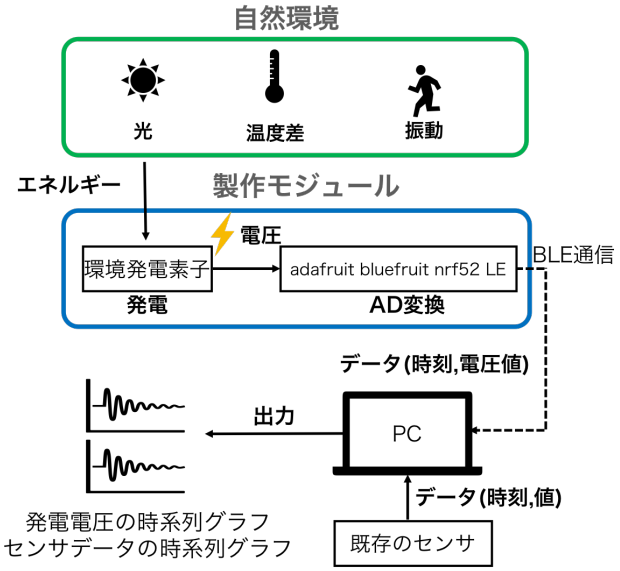


図 1　発電量記録システムの処理フロー

3.1 特性調査のための発電量記録システム

各素子の特性を調査するため，環境発電素子とマイコンボード（Adafruit Feather nRF52 Bluefruit LE）を搭載したモジュールを製作し，発電量を記録/可視化するシステムを開発した．図 1 に発電量記録システムの処理フローを示す. 環境発電素子の出力電圧をマイコンボードのアナログ入力ピンに入力し，AD 変換によってデジタル値に変した後，取得時刻情報とともに BLE（Bluetooth Low Energy）通信を用いてパソコンへ転送する．このとき，電圧値のサンプリング周波数は 50 Hz とする．そして，蓄積した発電量のデータをもとにパソコン上でグラフを描画する．本章では，各素子の発電に影響する環境や状態を変化させながら，環境発電素子の発電量と，既存のセンサデータの両方を記録し，波形の比較を行う．

3.2 太陽電池の特性調査

太陽電池は，受光面に入射する光の強度に応じた電力を生成する素子である．現在のエナジーハーベスト技術の中で最も高い出力が可能な発電方式であり，大規模な発電施設からウェアラブルデバイスまで，広く応用されている．太陽電池には素材や製法が異なるものが数種類あり，それぞれ発電量の受光波長依存性などの特性が異なる．本稿では，以下に示す 5 種類（表 1）の太陽電池の特性を調査する．

SC1, SC4: 多結晶シリコン太陽電池

多結晶シリコンの光電効果を利用した太陽電池であり，現在もっとも普及している種類である．SC1 は表面にガラス加工のあるもの，SC4 はないものである．

SC2: 色素増感型太陽電池

ⓒ 2018 Information Processing Society of Japan

Vol.2018-DPS-175 No.35
Vol.2018-MBL-87 No.35
Vol.2018-ITS-73 No.35
2018/5/25

表 1　評価した太陽光パネル

	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5
Picture					
Manufacture	SUNYOOO solar Limited.	フジクラ	VIMUN	SHARP	Panasonic
Type	多結晶シリコン	色素増感	アモルファスシリコン	多結晶シリコン	薄膜シリコン
Size (mm^2)	80×60	91×60	30×11	67×40	112×73

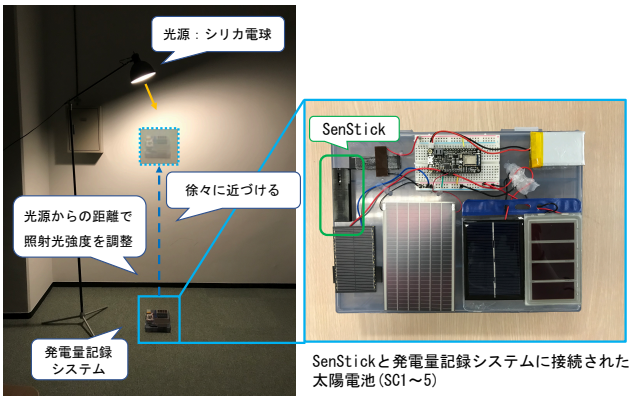


図 2　照射光強度に対する発電量測定実験の様子

酸化チタンの表面に色素を吸着させることで可視光への受光感度を増加させた太陽電池であり，低照度環境でも高電圧出力が可能である．また，製造コストやデザイン性や観点から，ユビキタスなサービスへの積極的な応用が期待されている．

SC3: アモルファスシリコン太陽電池

結晶シリコン型の太陽電池と異なり，不規則な結晶構造を持つシリコンで形成される太陽電池である．結晶シリコンに対して発電効率は低いが，薄膜化が容易，高温下での出力低下が少ない，などの優れた特性をもつ．

SC5: 薄膜シリコン太陽電池

数 nm 以下のシリコン膜を用いる太陽電池であり，多結晶シリコンを微細に砕いたものや，アモルファスシリコンが主に素材として用いられる．結晶シリコンに対して発電効率は低いが，軽量，フレキシブルという特徴がある．

これら 5 種類の太陽電池に対して，照射光強度に対する発電量の特性および量子効率の波長依存性を調査した．まず，照射光強度に対する発電量の特性の調査結果を記す．図 2 に示すように，実験は暗室で行い，光源には Panasonic のシリカ電球である LW100V54W を用いた．図 3 に照射光の強度を変化させた際の照度センサの値を示し，図 4 に実験中の各太陽電池の発電電圧の変化を示す．発電電圧

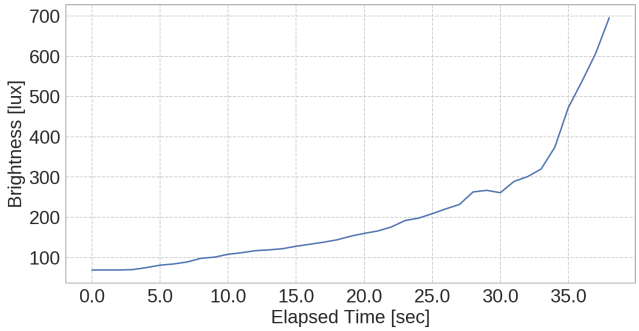


図 3　照射光強度を変化させた際の照度センサの値

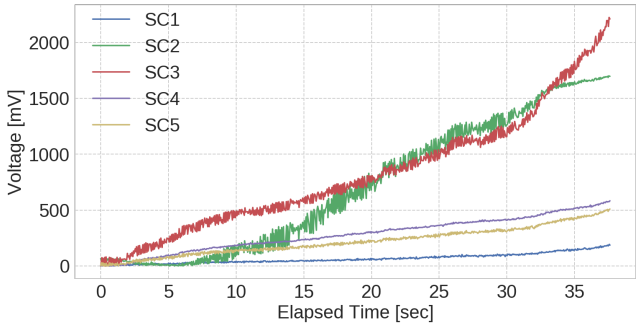


図 4　照射光強度を変化させた際の各太陽電池の発電電圧

は，照度センサの値と相関が見られた．これより，太陽電池を照度センサとして利用できる可能性があることを確認できる．

次に，量子効率の波長依存性の調査結果を示す．量子効率とは，太陽電池に入射した光子のうち，損失なく電子に変換されるものの割合であり，太陽電池の発電効率の大部分を決定する値である．調査には，図 5 に示す分光感度測定装置 CEP-2000RP を用い，照射光の強度は一定にした条件のもと，その波長を 300 nm ～ 1200 nm の間で 10 nm ずつ変化させた際の出力電流量をもとに，量子効率を測定した．

また，図 6 は，各太陽電池の波長ごとの量子効率 (Quantum Efficiency：QE) を測定し，最大値を 1 に正規化したグラフである．今回の実験環境では，800nm, 850nm 付近の山は，測定機器が光源を切り替る際に生じる波形であるため，最大値には含めない．図より，それぞれの太陽電池

ⓒ 2018 Information Processing Society of Japan

Vol.2018-DPS-175 No.35
Vol.2018-MBL-87 No.35
Vol.2018-ITS-73 No.35
2018/5/25

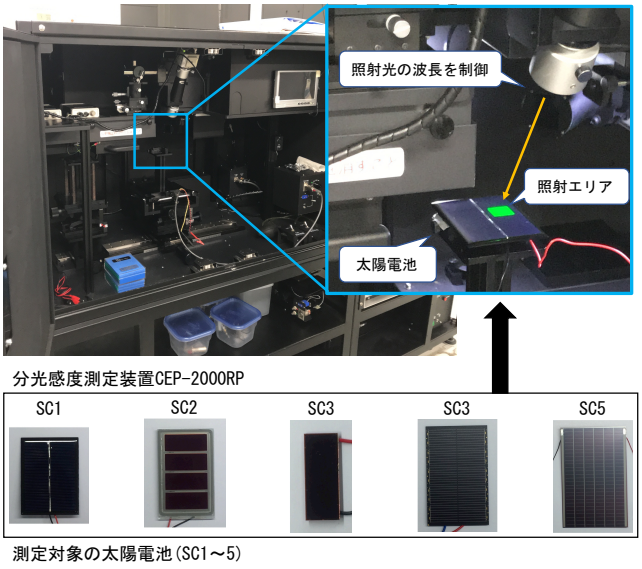


図 5　量子効率の波長依存性測定実験の様子

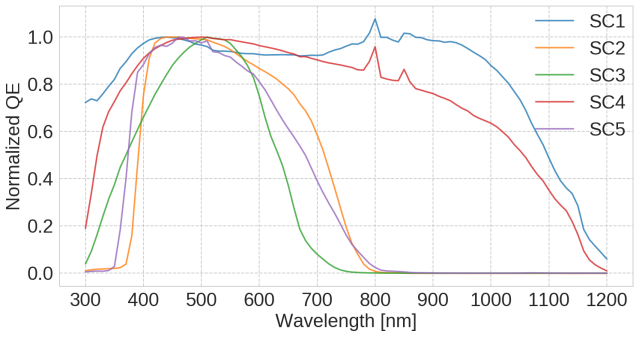


図 6　各太陽電池の量子効率（最大値で正規化）

において，波長に対する発電特性が異なることがわかる．したがって，同一環境下に複数の太陽電池を配置することで，照射される光の波長を簡易的な分光器のように推定できることを示唆している．

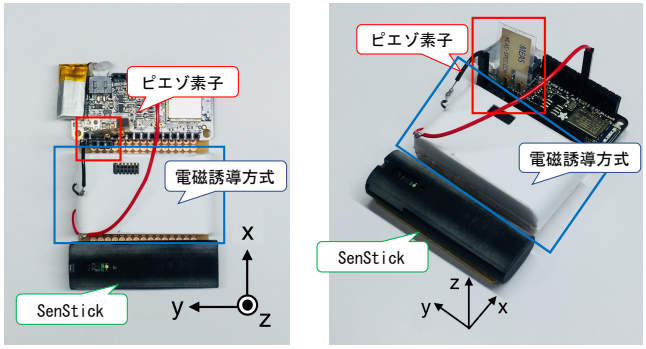
3.3　振動発電素子の特性調査

素子の振動の大きさに応じて発電を行う素子である．発電特性は発電方式によって大きく異なり，本稿では 2 種類の方式の素子の特性を調査している．

特性の調査のため，2 種類の振動発電素子と 9 軸のモーションセンサを搭載した SenStick[1] を搭載した計測システムを作製した．図 7 に計測システムの外観を示す．モジュールに対して図中の x,y,z 方向に振動を加えた際の各素子の発電量，加速度センサの値を取得し，比較した．参照データとして，図 8 に振動を加えた際の加速度センサの波形を，図 9 に合成加速度を示す．

電磁誘導方式

周辺の磁界の変化により導体に起電力を誘発する，電磁誘導（Electromagnetic Induction：EMI）によって発電を行う方式である．本稿では，モノワイヤレス社の TWE − LITE SWING に内蔵された電磁誘導



(a) 上から見た図　　(b) 斜めから見た図

図 7　振動発電素子の特性調査用計測システム

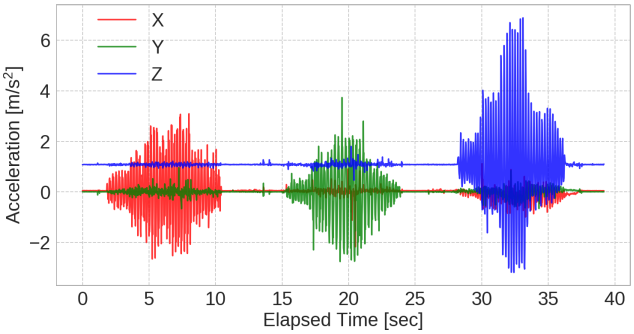


図 8　X,Y,Z 軸の加速度

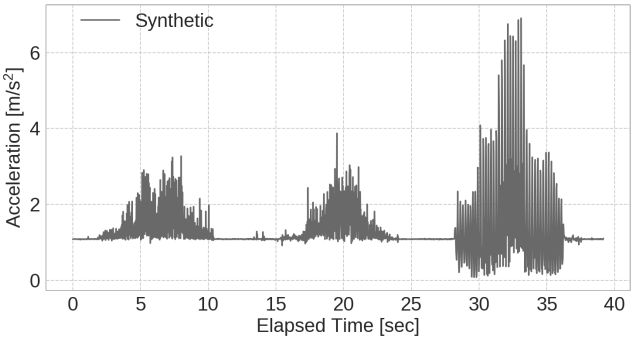


図 9　合成加速度

方式の発電回路を用いて，素子の特定を調査した．モジュール内に対する y 軸方向の振動により，内蔵された磁石が移動し，発電を行うよう素子を設置した．図 10 に発電波形の生データと，移動平均フィルター (時間窓 0.2 秒) で平滑化したデータの波形を示す．発電電圧は，図 8 中の加速度センサの y 軸の値と高い相関性が見られた．このことから，電磁誘導による発電を用いた振動発電素子は，特定の方向に対する運動を検知するセンサとして用いられると考えられる．

ピエゾ素子

形状の歪みに応じて発電を行う素子である．素子の湾曲率が大きいほど，発電量が増大する．今回，Measurement Specialties Inc. 社の圧電フィルムである LDT0-028K をモジュール内で y-z 平面に平行に取り付け，素子が x 軸方向に湾曲するよう設置し，特性を

ⓒ 2018 Information Processing Society of Japan

Vol.2018-DPS-175 No.35
Vol.2018-MBL-87 No.35
Vol.2018-ITS-73 No.35
2018/5/25

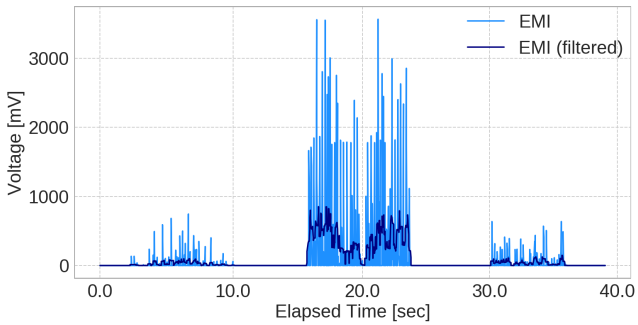


図 10　電磁誘導方式での発電電圧

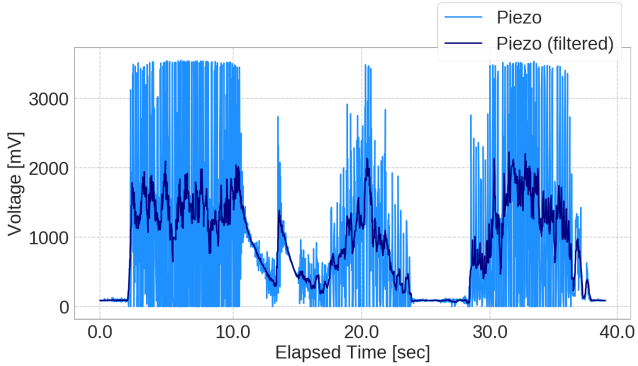


図 11　ピエゾ素子の発電電圧

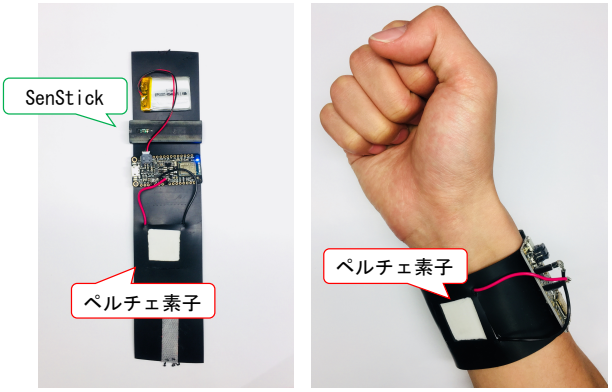
調査した．図 11 に発電波形の生データと，移動平均フィルター (時間窓 0.2 秒) で平滑化したデータの波形を示す．発電電圧は，図 9 に示される合成加速度の値と高い相関性が見られた．このことから，ピエゾ素子の発電量をセンサデータとして用いることで，物体の静止状態や，運動の激しさを推定できると考察できる．

3.4　ペルチェ素子の特性調査

素子の両面の温度差に応じて発電を行う発電素子である．本稿では，片面を手首の表面に接触させたまま気温の異なる場所を移動し，その際の発電量の推移を観測した．図 12 に実験のために作製したリストバンド型計測装置の外観を示す．この装置は，振動発電用の計測装置と同様に，SenStick を搭載しており，SenStick 上の温度センサにて外気温の測定を行う．また，腕の皮膚温の測定には，Empatica 社の E4 wristband[*2]を用いた．

図 13 は，実験中の腕の皮膚温と外気温の変化を表したものである．図 14 に, 実験中のペルチェ素子の発電波形の生データと，移動平均フィルター (時間窓 2 秒) で平滑化したデータの波形を示す．そして，図 15 はペルチェ素子の発電量の波形を，腕の皮膚温と気温との差の波形と比較したものである．図 15 において，2 つのグラフに高い相関性が見られることから，腕の皮膚温がほぼ一定という仮定のもとで，ペルチェ素子は温度センサとしての役割を担うことが考えられる．

[*2] Real-time physiological signals | E4 EDA/GSR sensor : https://www.empatica.com/research/e4/



(a) 全体図　(b) 装着図

図 12　ペルチェ素子の特性調査用計測装置

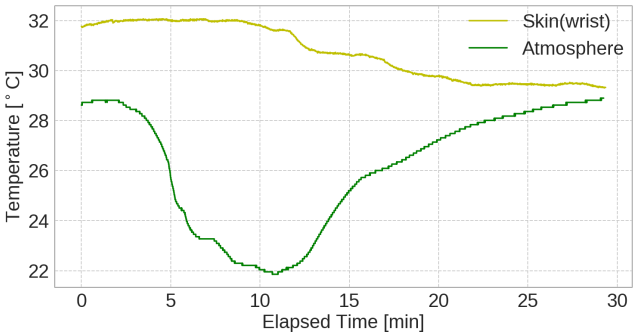


図 13　手首の皮膚温と気温

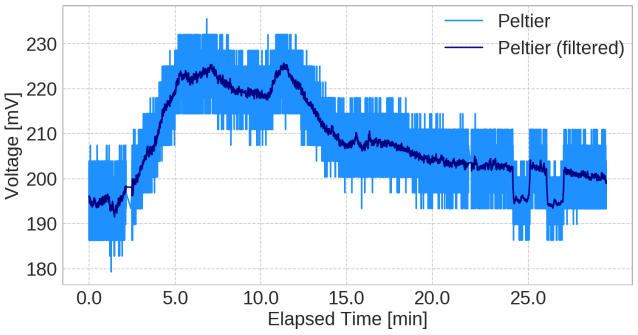


図 14　ペルチェ素子の発電電圧

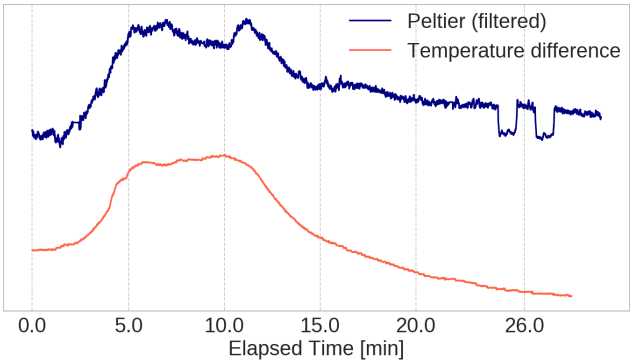


図 15　発電電圧と温度差の比較

3.5　認識対象コンテキストと発電量の関係

本研究で取り扱うコンテキストについて定義する．コンテキストは，人の状態と人が置かれている状況との 2 種類

ⓒ 2018 Information Processing Society of Japan

Vol.2018-DPS-175 No.35
Vol.2018-MBL-87 No.35
Vol.2018-ITS-73 No.35
2018/5/25

の情報を包含している．前者は動作や心理状態といったものを指し，後者は位置や環境（騒音，光，混雑度など）を指す．動作には，立ち・座り・歩行という体全体の動作から，ジェスチャーのように手や指の動きとったレベルまでさまざまな粒度がある．位置についても，緯度経度といった絶対位置，壁から何 cm といった相対位置，教室やトイレといった場所などさまざまな粒度がある．

本稿では，人の状態については，体全体レベルの動作を対象とし，細かな腕の動作や指のジェスチャなどは対象としない．具体的には，着座，起立，歩行, 走行の 4 種類の状態を対象とする．また，人が置かれている状況に関しては，場所レベルの情報かつ被験者が生活の中で訪問する場所に限定し，高精度な位置測位や複雑な環境については対象としない．具体的には，学校やオフィスなどにおける代表的な場所（研究室，廊下，階段，エレベータホール，屋外，コンビニなど）を対象とする．

ここで，各コンテキストと推定に活用可能な素子について検討する．動作コンテキストについては，当然ながら振動素子に基づく推定が考えられる．着座や起立時には振動がほとんど発生しないため発電量が少なくなることが予想される．また，歩行時には振動が発生するため発電量が大きくなることが予想される．これらのことから，振動に基づいて発電するピエゾ素子などを用いることで，動作（着座，起立，歩行）に関するコンテキスト推定が可能と考える．

また，場所コンテキストについては，太陽電池や温度素子に基づく推定が考えられる．屋外（昼間）であれば屋内に比べて明るいことがほとんどであり，その場合太陽電池の発電量は大きくなる．屋内においても，研究室やコンビニなどは明るく，廊下や階段などは比較的暗いことが想定できる．このことから太陽電池の発電量に基づいて場所の推定が可能と考える．同様に，研究室やコンビニについては空調により温度が快適に維持されており，廊下や階段，屋外とは温度差が発生すると考えられる．このことから，温度に基づいて発電するペルチェ素子などを用いることで，場所に関するコンテキスト推定が可能と考える．

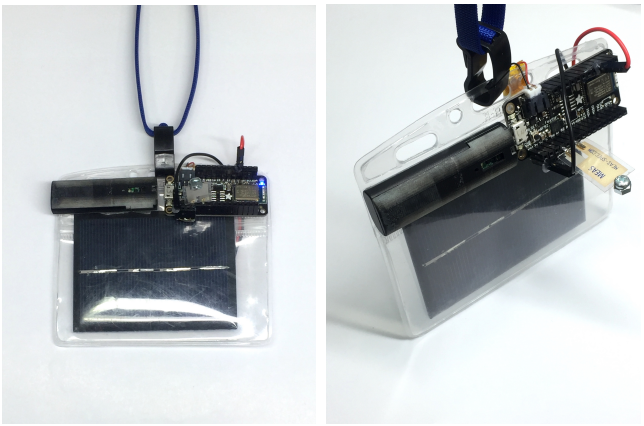
4. プロトタイプシステムの実装

4.1 プロトタイプシステムの概要

これまでの検証を踏まえて，実際に 2 種類の環境発電素子を搭載したデバイスを作製した．プロトタイプ 1（図 16）は，名札型のウェアラブルデバイスであり，環境発電素子としては前面に SC1（多結晶シリコン型）の太陽電池，およびピエゾ素子を搭載している．ピエゾ素子の代わりに，電磁誘導方式の振動発電素子を用いたデバイスによる行動認識結果については，文献 [10] において報告している．プロトタイプ 2（図 17）は，腕時計型のウェアラブルデバイスであり，環境発電素子としては，前面に SC3（アモルファスシリコン型）の太陽電池とピエゾ型振動発電素子，腕と接する面にペルチェ素子を搭載している．このデバイスを用いた行動認識については現在評価中である．

表 2　コンテキストと環境発電素子の関係性

コンテキスト		環境発電素子		
Name	Type	太陽電池	振動	温度
着座	動作		√	
起立	動作		√	
歩行	動作	√	√	
走行	動作	√	√	
屋外	場所	√		√
研究室	場所	√		
廊下	場所	√		√
階段	場所	√	√	
コンビニ	場所	√		√



(a) 正面図　　(b) 斜めから見た図

図 16　プロトタイプ 1 ：名札型デバイス

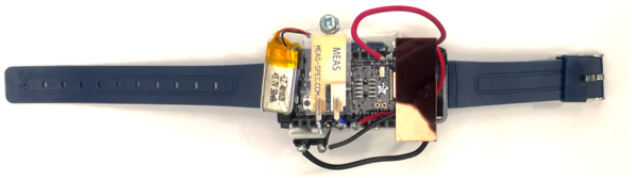


図 17　プロトタイプ 2 : 腕時計型デバイス

4.2 プロトタイプシステムの評価

構築したプロトタイプ 1 を用いて実際にデータ収集を行った．図 18 にその結果を示す．x 軸は時間である．上段には，実際の行動を，動作コンテキストと場所コンテキストに分けて示している．中段はピエゾ素子発電量であり，下段は太陽電池の発電量を示している．

動作コンテキストに着目して発電量を観察すると，ピエゾ素子の発電量が動作コンテキストと関連していることが

ⓒ 2018 Information Processing Society of Japan

Vol.2018-DPS-175 No.35
Vol.2018-MBL-87 No.35
Vol.2018-ITS-73 No.35
2018/5/25

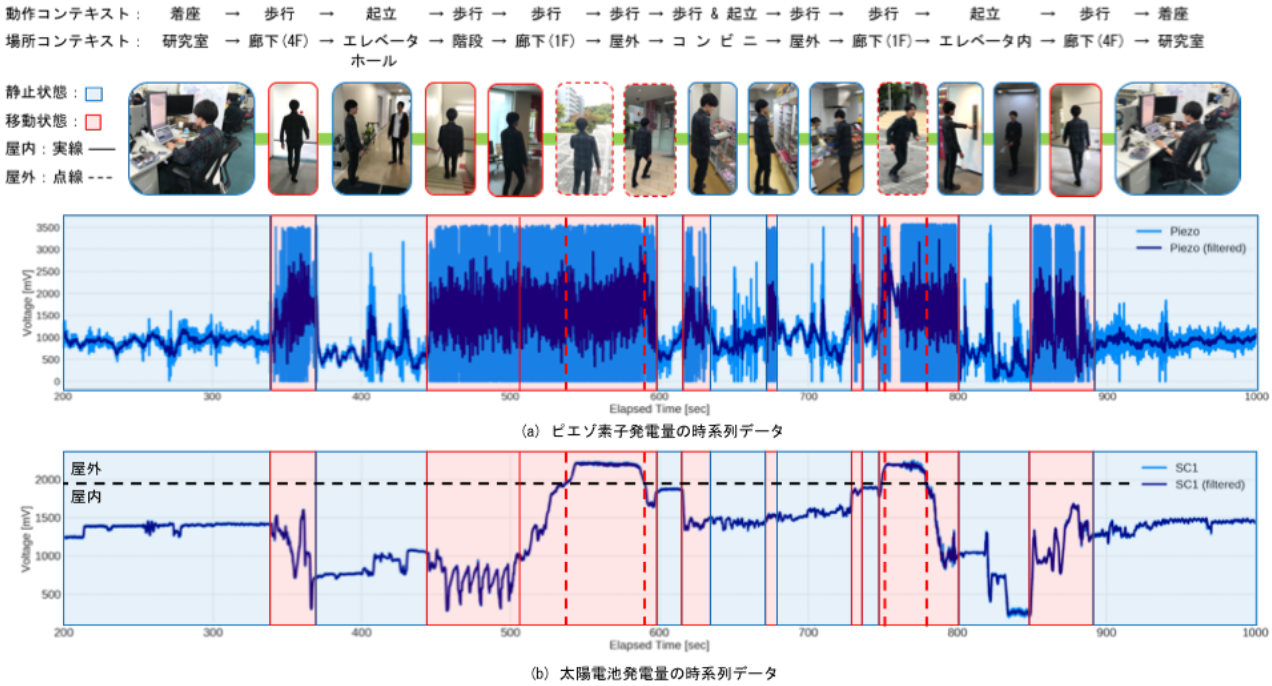


図 18 各コンテキストにおける発電量の時系列データ

確認できる．計測当初は着座しており，発電量は 1000 mV 程度とそれほど大きくない．しかしその後歩行を開始すると，最大で 3000mV 程度まで増加していることがわかる．その後も歩行時には同様に増加し，起立，着座時には減少していることが確認できる．

場所コンテキストに着目して発電量を観察すると，太陽電池の発電量が場所コンテキストに関連していることが確認できる．計測当初は研究室に在室しており 1500mV 弱の発電量であるが，その後光源の弱い廊下やエレベータホールへ異動した際には，発電量が低下していることが確認できる．また，450〜500sec の間では踊り場のある階段を移動しているが，光源の変化に合わせて発電量が上下している様子が確認できる．さらに屋外に向かって移動するのに合わせて発電量が増加し，最大時には 2000mV を超える発電量が屋外で計測されている．その後，コンビニ，屋外，廊下，エレベータホール，研究室と移動するのにあわせて，発電量が変化している様子が確認できる．

これらのことから，動作コンテキストについてはピエゾ素子で，場所コンテキストについては太陽電池でその変化を検出できることが確認された．この結果は，我々が提案する環境発電素子の発電量に基づくコンテキスト認識手法によって，コンテキストが推定できる可能性を示している．

5. おわりに

本稿では，環境発電素子を電源かつセンサと利用する新しいコンテキスト認識手法の実現に向けて，入手可能な環境発電素子の特性評価を行った結果を報告した．５種類の太陽光発電素子，２種類の振動発電素子，１種類の温度差発電素子を評価した結果，動作や場所によって，発生する電圧値に明確な違いがあることを明らかにした．今後は，作成した２種類のプロトタイプデバイスを用いて，コンテキスト毎の発電量を計測し，機械学習を用いた識別モデルを構築する予定である．

謝辞 本研究の一部は，JSPS 科研費（18H03233），および JST さきがけ（16817861）の支援を受けて実施されたものである．また，分光感度測定装置においては，奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科物質創生領域・辨天准教授の指導のもと実施した．ここに謝意を記す．

参考文献

[1] Nakamura, Y., Arakawa, Y., Kanehira, T., Fujiwara, M. and Yasumoto, K.: SenStick: Comprehensive Sensing Platform with an Ultratiny All-In-One Sensor Board for IoT Research, *Journal of Sensors*, Vol. 2017, p. 16 (2017).

[2] Mukhopadhyay, S. C.: Wearable sensors for human activity monitoring: A review, *IEEE sensors journal*, Vol. 15, No. 3, pp. 1321–1330 (2015).

[3] Nakagawa, E., Moriya, K., Suwa, H., Fujimoto, M., Arakawa, Y., Hatta, T., Miwa, S. and Yasumoto, K.: Investigating Recognition Accuracy Improvement by Adding User's Acceleration Data to Location and Power Consumption-based In-home Activity Recognition System, pp. 100–105 (online), DOI: 10.1145/3004010.3004036 (2016).

[4] Weiss, G. M., Timko, J. L., Gallagher, C. M., Yoneda, K. and Schreiber, A. J.: Smartwatch-based activity recognition: A machine learning approach, *Biomedical and Health Informatics (BHI), 2016 IEEE-EMBS International Conference on*, IEEE, pp. 426–429 (2016).

[5] 川原圭博，塚田恵佑， 浅見徹ほか：放送通信用電波か

ⓒ 2018 Information Processing Society of Japan

らのエネルギーハーベストに関する定量調査，情報処理学会論文誌，Vol. 51, No. 3, pp. 824–834 (2010).
[6] Kashimoto, Y., Morita, T., Fujimoto, M., Arakawa, Y., Suwa, H. and Yasumoto, K.: Sensing Activities and Locations of Senior Citizens toward Automatic Daycare Report Generation, pp. 174–181 (2017).
[7] Kalantarian, H. and Sarrafzadeh, M.: Pedometers Without Batteries: An Energy Harvesting Shoe, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 16, No. 23, pp. 8314–8321 (online), DOI: 10.1109/JSEN.2016.2591331 (2016).
[8] Huang, H., Li, X., Liu, S., Hu, S. and Sun, Y.: TriboMotion: A Self-Powered Triboelectric Motion Sensor in Wearable Internet of Things for Human Activity Recognition and Energy Harvesting, *IEEE Internet of Things Journal* (2018).
[9] Khalifa, S., Lan, G., Hassan, M., Seneviratne, A. and Das, S. K.: HARKE: Human Activity Recognition from Kinetic Energy Harvesting Data in Wearable Devices, *IEEE Transactions on Mobile Computing* (2017).
[10] 梅津吉雅，藤原聖司，中村優吾，藤本まなと，荒川　豊，安本慶一：環境発電素子の発電量に基づく屋内行動認識システムの検討，p. 178 (2018).

ⓒ 2018 Information Processing Society of Japan