

## 非運動性活動を考慮した加速度センサによる消費エネルギー推定手法

笠 七 菜 実<sup>†1</sup> 川 原 圭 博<sup>†1</sup>  
小 林 亜 令<sup>†2</sup> 浅 見 徹<sup>†1</sup>

携帯電話はユーザが常に携帯しているため、ユーザのコンテキスト情報を得るためのデバイスとして都合が良い。本論文は、昨今携帯電話にも搭載されることが多くなった3軸加速度センサを利用し、ユーザの消費エネルギーをロバストかつ低消費電力で推定するためのソフトウェア手法を示す。本手法は、ユーザコンテキストからエネルギー消費指標であるMETS値を得ることで、ウォーキングやランニングといった能動的な運動のほか、日常的な非運動性活動(NEAT: Non-Exercise Activity Thermogenesis)も考慮した消費エネルギー推定を行うことが可能である。すべての計算処理は携帯電話のアプリケーションプロセス相当の能力を持つ組み込みLinuxシステム上において実装した。評価実験の結果、医療用の消費エネルギー計と比べて遜色の無い結果を得ることが確認された。

### A Energy Expenditure Estimation Method for Non-Exercise Activity Thermogenesis Using Accelerometer

NANAMI RYU,<sup>†1</sup> YOSHIHIRO KAWAHARA,<sup>†1</sup> AREI KOBAYASHI<sup>†2</sup>  
and TOHRU ASAMI<sup>†1</sup>

Mobile phone is a suitable device for monitoring user's context information because people carry them all the time. This paper presents a software technology for robust and light energy expenditure monitoring using a mobile phone handset equipped with 3-axis accelerometer. Different from existing approaches, we focused on detecting NEAT (Non-Exercise Activity Thermogenesis) as well as active exercise (walking and running) by estimating METS value based on the user's context. All the signal processing tasks have been implemented on the embedded Linux based system and fit well with mobile devices. Evaluation results show that our scheme allows to monitor energy expenditure as accurate as a medical calorie meter.

#### 1. はじめに

我が国では交通機関の発達や職場のオートメーション化に伴い人々はほとんど意識しない限り運動不足に陥りやすい傾向がある。厚生労働省の調査によると、1回30分以上の運動を週2日以上実施し、1年以上継続している者を運動習慣のある者と定義した場合、男性の20~50歳代、女性の20~40歳代において運動習慣のある者の割合は20%程度と、かなり低い。若い年齢での運動不足は肥満などの生活習慣病、メタボリックシンドローム(内臓脂肪症候群)の要因となり、重度の場合脳梗塞や心筋梗塞、突然死などにつながる。40~74歳でみると、男性の2人に1人、女性の5人に1人が、メタボリックシンドロームが強く疑われる者又は予備群と考えられており、多くの人が早急な対応を求められている<sup>1)</sup>。

本研究では、携帯電話に内蔵した加速度センサで一日の消費エネルギーを非侵襲的に記録するソフトウェアの構成法について示す。一日の消費エネルギーを知れば、食事による摂取エネルギーとのバランスをとるのに役立ち、さら

に運動による効果を確認することで運動のモチベーションを高めることができる。

そもそも、一日あたりのエネルギー消費量は、基礎代謝、食事誘発性体熱産生、運動による代謝、運動以外の身体活動による代謝から構成される(表1)。基礎代謝は全消費エネルギーの50~70%を占めるものの、当人の性や身長体重、除脂肪量などにより定まる。食事誘発性体熱産生は個人差が大きいものの、全消費エネルギーの約10%で、絶対量が小さいため相対的に誤差は小さくなる。運動による代謝は、前で述べたとおり習慣的に本格的な運動をしている人は少なく、例えば速歩を1時間行っただとしても、運動による消費エネルギーの増加分が一日の消費エネルギー量に占める割合は10%以下にしかない。したがって、残りの約20~30%を占める運動以外の身体活動による代謝(NEAT; Non-Exercise Activity Thermogenesis)が、最も個人差が大きく、一日全体の消費エネルギーを大きく左右していると考えられている<sup>2)3)</sup>。そこで本研究では、一日の消費エネルギーを正確に知るために、運動時の消費エネルギーに加え、NEATを的確に推定することを目指す。

また、多くの人が利用できるようにするには、日常生活に支障がないことはもちろん、測定だけのために取り付ける手間をなくすことが望ましい。しかしユーザの行動をリアルタイムで検出せねばならないため、常に身に付けられるものでなければならない。筆者らはそれをすべて解決できる電子機器として携帯電話に注目し、携帯電話に搭載した

<sup>†1</sup> 東京大学 大学院情報理工学系研究科

The University of Tokyo, Graduate School of Information Science and Technology

<sup>†2</sup> (株)KDDI 研究所

KDDI R&D Laboratories Inc.

表 1 消費エネルギーの内訳

| 成分               | 割合       | 特徴                     |
|------------------|----------|------------------------|
| 基礎代謝量            | 50～70%   | 個人の体格（身長体重、除脂肪量など）で決まる |
| 食事誘発性熱発生         | 約 10%    | 個人差が大きいが、相対的な割合は小さくなる  |
| 運動               | 0～約 10%  | 運動をしている日のみ約 10%        |
| 運動以外の身体活動 (NEAT) | 約 20～30% | 大きな個人差を生じる原因           |

加速度センサを用いた消費エネルギー推定手法を提案する。

携帯電話は消費電力に対する要求が厳しいため、アプリケーションを実装するためには、目的を達成するソフトウェア処理をなるべく軽い処理で実装し、CPU 使用時間を最小限にする必要がある。またユーザが携帯電話を所持する複数の場所においてもなるべく正確にエネルギー消費を推定する必要もある。本稿では、これらを解決するソフトウェア構成について示し、実際に組み込み Linux が動作する小型デバイス上に実装し、被験者が日常的に消費したエネルギーを記録し、市販の消費エネルギー表示デバイスと比較し有効性を調べた。

以降、第 2 節において一般的な消費エネルギー推定の測定法について述べ、第 3 節において携帯電話における消費エネルギー推定のアルゴリズムについて述べる。第 4 節では提案手法の市販の消費エネルギーデバイスとの比較結果について述べる。最後に第 5 節に結論を述べる。

## 2. 関連研究

現在エネルギー消費量を推定するのにいくつかの方法が考案されている。各方法の概要と、長所、短所を述べる。

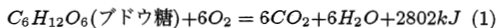
### 2.1 消費エネルギーの測定法

一般的に消費エネルギーを測定する方法には、実験室的方法とフィールド法がある。

#### 2.1.1 実験室的方法

人間の体内で作られたエネルギーは熱として即座に体外に拡散するため、消費エネルギーを測定する方法として一番に考えられる方法は、体から放出される熱量を直接測るというものであり、Atwater らによって 100 年以上前から行われてきた。これを直接法という。直接法での測定は、実験室内に水の流れる管を張り巡らせ、被験者の放出する熱を吸収させ、被験者の体温の変化と、室内で発生した水蒸気量から求めた水蒸気の気化熱から消費エネルギーを測定する。この方法は放出された熱を捕らえるための閉じた空間が必要であり、装置が大がかりで現在ほとんど使用されていない。

人間がエネルギーを生み出す際には、食物から取り込んだ栄養が酸素と結合し二酸化炭素が合成される。例えばでんぷんを摂取した場合、消化酵素により分解されてきたブドウ糖がエネルギー源として利用される。そのときの反応は熱化学方程式で



と表される。つまり酸素摂取量と二酸化炭素生産量が分かれば消費エネルギーが得られる。人間のエネルギー源はでんぷんなどの炭水化物以外にもタンパク質や脂肪があり、タンパク質は唯一窒素原子を含むものであるが、食事に占めるタンパク質の割合を 12.5% と仮定した場合、消費エネ

ルギーは Weir の式より、

$$\text{消費エネルギー (kcal)} = 3.9 \times \text{酸素摂取量} + 1.1 \times \text{二酸化炭素生産量} \quad (2)$$

と与えられる<sup>3)</sup>。酸素摂取量と二酸化炭素生産量から消費エネルギーを求める方法は間接法と呼ばれ、極端にタンパク質の多い食事をとっていたりしなければ直接法による測定との誤差は 1% 以内に収まる。以下で示す方法はすべて間接法である。

#### ● 呼吸ガスチャンバー法、ダグラスバック法

専用の実験室で生活し（またはガスマスクを装着し）、その間の酸素濃度と二酸化炭素濃度の変化から酸素消費量と二酸化炭素生産量を求める。既存の設備の中ではエネルギー消費量を最も正確に測定できる。

#### ● 二重標識水 (Doubly Labeled Water: DLW) 法

酸素と水素の安定同位体が含まれた水を飲み、約 2 週間にわたり尿中へ安定同位体が排出される経過を観察・測定する。式 (1) より、酸素は水と二酸化炭素として、水素は水としてのみ排出されるため 2 つの同位体の排出量の違いから二酸化炭素の生産量が求まる。欧米諸国を中心に広まりつつある比較的新しい測定法であるが、呼吸ガスチャンバー法に匹敵する正確度を持っている<sup>4)</sup>。

### 2.1.2 フィールド法

#### ● 心拍数法

胸に心拍センサをとりつけて心拍数をとったり、心拍とほぼ一致する脈拍を脈拍計でとり、心拍数と酸素摂取量が相関することを用いて消費エネルギーを推定する。低強度の身体活動時では心拍数は精神的興奮、刺激物の摂取などの影響を受けやすいため、この方法が使えるのは 40% VO<sub>2</sub>max<sup>-1</sup> 以上（有酸素運動より強い運動）の時のみとされている。

#### ● 加速度計法

加速度計を装着して生活活動や運動によって生じる衝撃（加速度）を測定し、酸素摂取量との相関から消費エネルギーを推定する。複数の加速度センサを用いる方法、単一の加速度センサを用いる方法があり、単一の加速度センサは腰に固定するものや腕時計型のものがある。一般に加速度計による推定量は小さく見積もられることが報告されている。

#### ● METS エネルギー換算法

アメリカスポーツ医学会により提案された方法で、消費エネルギーは式 (3) で与えられる。

$$\text{消費エネルギー (kcal)} = 1.05 \times \text{運動強度 (METS)} \times \text{運動時間 (時)} \times \text{体重 (kg)} \quad (3)$$

運動強度 (METS 値) は安静時の運動強度を 1.0 (MET) とし、身体運動時の酸素摂取量が安静時の酸素摂取量の何倍にあたるかを表す指標で、様々な日常動作や運動について実験的に定められている。一部抜粋したものを表 2 に示す。METS 値は年齢や性別によらず動作の種類のみによって決まり、一般の人でも簡単に消費エネルギーを計算できることから日本の厚生労働省も運動の単位として導入している。例えば、平地で分速 67m 程度の普通歩行した場合の METS 値は 3.0 となっ

\*1 VO<sub>2</sub>max: 最大酸素摂取量。1 分間に体が摂取できる酸素の最大値であり、大きいほど持久力がよい

表 2 さまざまな活動の METS 値

| METS | 活動内容                                        |
|------|---------------------------------------------|
| 15.0 | 走って階段を上がる                                   |
| 10.0 | ランニング (161m/min)                            |
| 8.0  | サイクリング (約 20km/h), ランニング (134m/min), 階段を上がる |
| 7.5  | 山を登る (約 1~2kg の荷物を背負って)                     |
| 5.5  | 自転車エルゴメーター (100 ワット)                        |
| 5.0  | かなり速歩 (107m/min)                            |
| 4.0  | 速歩 (95~100m/min), 自転車に乗る (16km/h 未満)        |
| 3.8  | やや速歩 (94m/min)                              |
| 3.3  | 歩行 (81m/min)                                |
| 3.0  | 自転車エルゴメーター (50 ワット), 普通歩行 (67m/min), 階段を下りる |
| 2.5  | ゆっくりした歩行 (54m/min)                          |
| 2.3  | 立ち仕事                                        |
| 2.0  | ゆっくりした歩行 (54m/min 未満)                       |
| 1.8  | 立って会話, 電話など                                 |
| 1.5  | 軽いオフィスワーク, 座って会話, 電話など                      |
| 1.3  | 座って読書など                                     |
| 1.2  | 静かに立つ                                       |
| 1.0  | 静かに座って (あるいは寝転がって) 音楽鑑賞など                   |

表 3 主な市販消費エネルギー表示デバイス

| デバイス                      | センサ                  | 特徴                        |
|---------------------------|----------------------|---------------------------|
| 提案手法                      | 3 軸加速度               | 加速度センサで姿勢推定し, METS を得る    |
| BodyMedia 社, SenseWear    | 2 軸加速度, 熱流束, 体温, GSR | 上腕に巻き付け, 動きと代謝熱からエネルギーを推定 |
| Polar 社, 心拍計              | 心拍数                  | 胸の心拍から運動強度, エネルギーを推定      |
| Microstone 社, ViM スポーツメモリ | 1 軸加速度+ジャイロ          | 腕時計型センサにより運動強度を 10 種類に分類  |

ており, 体重 60kg の人が 30 分の普通歩行したときの消費エネルギーは,

$$1.05 \times 3.0 \times 0.5 \times 60 = 94.5(\text{kcal}) \quad (4)$$

と算出される。自身の一日の行動を記録すれば, METS エネルギー換算法により消費エネルギーを求めることができる。ただし, 実行には手間がかかり, 自己申告なので個人差が大きいという問題がある。

### 2.1.3 実験室的方法とフィールド法の長所, 短所

実験室的方法是専用の実験室で熱量や酸素摂取量を計測し消費エネルギーを計測する。正確な値が期待されるが, 大がかりな装置や長時間にわたる計測が必要であるため, 日常の消費エネルギーを推定するには不向きである。フィールド法は小型デバイスを人間に装着させ行動や動作などをモニタリングすることで消費エネルギーを算出する。実験室的方法に比べ正確さに劣るものの, 日常の行動に影響することなく簡単に消費エネルギーを推定できる。

### 2.2 市販の消費エネルギー表示デバイス

市販の消費エネルギー表示デバイスは, 小型性を実現するためフィールド法を用いている。主なデバイスについて使用するセンサと消費エネルギーの推定方法を記す。

BodyMedia 社の SenseWear(図 1) は, 上腕に巻きつけるデバイスで, 2 軸加速度, 熱流束, 体温, GSR(Galvanic Skin Response:皮膚電気反応) をセンサで測定する<sup>5)</sup>。独自の機械学習アルゴリズムによりユーザの動きと, 消費エネルギーを推定する<sup>6)</sup>。



図 1 Bodymedia 社, SenseWear



図 2 Polar 社, 心拍計



図 3 MicroStone 社, ViM スポーツメモリ

Polar 社の心拍計 (図 2) は, 胸に心拍計付きのベルト巻き, 心拍数を測定する<sup>7)</sup>。この心拍数の変化から消費エネルギーを推定する。

MicroStone 社の ViM スポーツメモリ (図 3) は, 腕時計型のデバイスで, 1 軸加速度と 1 軸角速度を測定する<sup>8)</sup>。動きの周期性のあるなしと腕の鉛直方向の加速度, 腕を振る方向の角速度から, 運動を散歩, 平常歩, 速歩, 急歩, ジョギング, ランニング, 座位作業, 立位作業, 軽いスポーツ, 激しいスポーツの 10 種類に分類し, それぞれ別の係数を掛けることで消費エネルギーを算出する<sup>9)</sup>。

### 3. 携帯電話による消費エネルギー推定アプリケーション

#### 3.1 携帯電話で消費エネルギーを推定する意義

消費エネルギー表示デバイスは上で述べたとおり小型なものがいくつか存在するが, ユーザが測定のためにわざわざ取り付けなければならぬ高価であるため, 運動の意識が

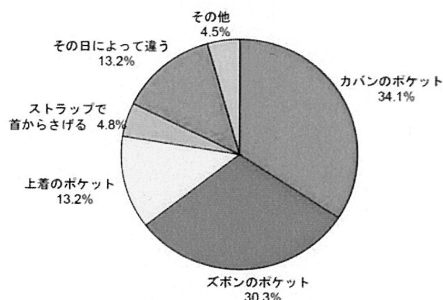


図 4 携帯電話の所持方法

高い人が運動時のみ装着し、消費エネルギーを確認する手段でしかなかった。しかし、多くの人が毎日の生活で利用できるように、特別な装置を用意するのではなく、多くの人が持ち歩く電子機器である携帯電話で実装することが有効であると考えられる。携帯電話の利用者数は増加の一途をたどり、現在日本国内での携帯電話の加入台数は一億台を超え、人口普及率は78.5%に達している<sup>10)</sup>。さらに備わっているOSは十分高機能であり、加速度センサを搭載するものも登場している。現在の加速度センサの用途としては、歩数計機能、カメラにおける手ブレ防止、モーションコントロールでのゲーム、携帯電話を傾けたり振ったりすることで操作できる機能など幅広く、これから搭載機種が増える可能性がある。本アルゴリズムを適用するだけで、多くの人が気軽に利用できるツールとなることが期待される。

### 3.2 消費エネルギー推定アルゴリズム

携帯電話で消費エネルギー推定を行うには、フィールド法でかつ、携帯端末におさまるセンサを使用して推定する必要があるため、単一の加速度センサを用い、METSエネルギー換算法を用いることにする。

ここでは、3軸加速度センサを用いてユーザのコンテキスト(活動状況)を推定し、さらにユーザのコンテキストからMETSエネルギー換算法を用いて消費エネルギーを推定する方法について説明する。

#### 3.2.1 3軸加速度センサを用いた携帯端末のコンテキストとユーザのコンテキスト推定法

アイシエアの調査によると、携帯電話の所持方法で最も多いのは鞆の中で、次にズボンのポケット、胸ポケット、と続いている<sup>13)</sup>(図4)。本アルゴリズムではこの上位3パターンに対応させるため、携帯端末のコンテキスト(装着場所)は、「身に付けていない、鞆の中、ズボンのポケット、胸ポケット」の4箇所を想定している。

ユーザのコンテキストは、「座る、立つ、歩く、走る」の4種類の推定を目指す。

##### ● サンプルングレート

加速度センサのサンプルングレートをSR[Hz]とする。

##### ● 前処理

RB[個]の要素数を持つリングバッファを用意し、SR[Hz]でサンプルングした加速度のデータを挿入していく。コンテキスト推定に用いる特徴量として、前処理において最新AVE[個]の平均値、最新VAR[個]の分散、最新FFT[個]のFFTのパワースペクトラムの最大値、端末

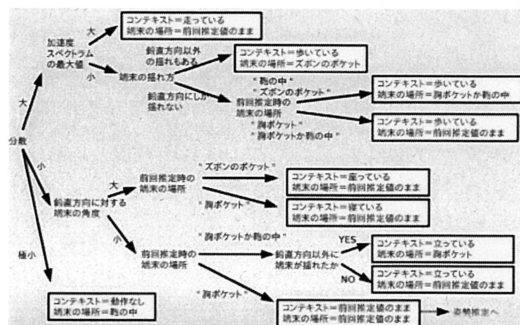


図 5 コンテキスト推定の流れ

の傾きの変化を求める。端末の傾きの変化は、重力方向ベクトルの変化をとらえることで角度を求める。

#### ● コンテキスト推定

今回使用するアルゴリズムは図5に示すように、初めに加速度の値からユーザのコンテキストと携帯端末のコンテキストを推定し、さらに前回の携帯端末のコンテキストの情報と加速度の値から次のユーザのコンテキストと携帯端末のコンテキストを推定するという、相互連携の仕組みをとっている<sup>11)</sup>。

具体的には、前処理で求めた、最新AVE個の平均値、最新VAR個の分散、最新FFT個のFFTのパワースペクトラムの最大値、端末の傾きの変化のデータを基に、それぞれのデータに対する閾値との大小に従って場合分けした決定木を辿る仕組みである。

ユーザのコンテキスト推定は、以下のように行う。

- 分散値の大小によってユーザのコンテキストを座っているか立っている(動きなし)、歩いているか走っている(動きあり)の2種に分類する。
- ユーザに動きがあるとき、FFTのパワースペクトラムの最大値の大小と卓越周波数の値から、歩いているか走っているかを分類し、さらにこのとき走るリズム(周波数)を推定する。
- 端末がズボンのポケットにあるとき、端末の傾きの大きな変化から座る動作を推定する。

携帯端末のコンテキスト推定は、以下のように行う。

- 端末が身に付けられておらず放置されているときは加速度センサの値は重力方向のみに現れ、それぞれの軸においてわずかな変化が観測されるのみである。したがって分散値がほとんど0のときユーザは端末を身に付けていないと推定する。
- ユーザが歩いているとき、ユーザが端末をズボンのポケットに入れている場合は太ももの動きに応じて端末が大きく傾くが、胸ポケットに入れている場合は端末が鉛直方向にしか揺れないことを利用し所持状態を推定する。ユーザが歩いているときの端末の傾きをバッファにため、その最大値が閾値を超えているとき、ズボンのポケットに入っていると推定する。
- 座る動作の瞬間、前かがみになる動作を端末の傾きの急激な変化で検知し、その際のそれぞれの軸の平均値の変化から、端末が胸ポケットにあることと人の正面方向を推定する。

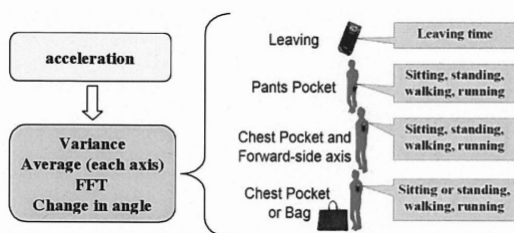


図 6 コンテキスト推定

以上をまとめたのが図 6 である。

#### ● 省電力のための工夫

一日の消費エネルギーを求めるためには、一日中常にユーザの動きをモニタリングしコンテキスト推定を行う必要があるが、携帯電話の本来の利用目的である通話や Web ブラウザ機能などと共存する以上、電力消費を抑える工夫が必要である。

利用する計算資源を少なくすれば、これから述べる方法で加速度の測定とコンテキスト推定のタイミングを一定に保ち、スレッドでのスリープ時間を長くすることができると、結果として消費電力を抑えることができる。

ここでは、計算資源に乏しい携帯端末上でリアルタイムにコンテキスト推定するためのアプローチについて述べる<sup>12)</sup>。

#### ー タスクスケジューリング

本アルゴリズムでは加速度の測定とともにユーザのコンテキスト推定を行っている。しかし、計算資源の乏しい端末においては加速度の測定間隔以内にコンテキスト推定の計算が終わらず、そのために加速度の取りこぼしや測定のタイミングのずれが生じる。計算処理を行うタスクと加速度測定を行うタスクを別スレッドに分け、加速度測定を行うタスクに高い優先度を設定することで、コンテキスト推定の計算が行われている間であっても正確な間隔で加速度の測定が行えるようにする。

#### ー 古典的な数値計算の高速化手法の適応

古典的な数値計算の高速化手法として、三角関数のテーブル参照、および浮動小数計算の除去を行っている。

ユーザのコンテキスト推定には加速度の平均値、分散値、端末の角度、および周波数スペクトラムを用いるが、特に周波数スペクトラムを求める際の FFT の計算コストが大きく、そのなかでも  $\sin$  や  $\cos$  の値を求める演算に大きく時間がかかっていることが分かった。任意の値での三角関数の値を求めるためには、毎回テイラー展開などで値が収束するまで演算を行う必要があるが、64 要素の FFT の場合を考えると、必要になる値の数は高々 64 点の値でしかないため、あらかじめ計算しておくことが可能である。そこで、必要な  $\sin$  関数の値はあらかじめ計算してテーブルに保存しておき、実際のプログラム実行時にはテーブルから参照させることで  $\sin$  関数の計算コストをおさえている。

また、浮動小数の計算はコストがかかるため途中

表 4 ユーザコンテキスト推定から METS 値推定

| コンテキスト | 運動強度 (METS)                               |
|--------|-------------------------------------------|
| 座る     | (加速度の動きに応じて)1.0~2.0                       |
| 立つ     | (加速度の動きに応じて)1.2~2.3                       |
| 歩く     | $0.0272 \times \text{歩く速さ (m/min)} + 1.2$ |
| 走る     | $0.093 \times \text{走る速さ (m/min)} - 4.7$  |

の計算はすべて整数として計算を行った。値が 1~1 の範囲となる三角関数については、あらかじめ定数倍したものの整数部分だけを利用し、三角関数を用いた計算をするごとにその定数で割ることににより浮動小数の計算の除外を行った。

#### ー 計算桁と推定精度のトレードオフへの考慮

計算の桁数を落とせばそれだけ高速に計算を行うことが可能になると考えられるが、桁数が少なくなるために推定精度が落ちてしまうと考えられる。そのため、推定の精度を落とさない範囲で、なるべく計算に用いるビット幅を少なくするようにしている。

#### 3.2.2 ユーザのコンテキストからの METS エネルギー推定法を用いた消費エネルギー推定法

アメリカスポーツ医学会によりさまざまな活動について METS 値が定められているが、自転車エルゴメーターを使った運動、ダンベルや重い荷物を持ちながらの歩行、など単一の加速度センサで判断することができないものを除くと、人間の日常での動作は「座る、立つ、歩く、走る」の 4 種類に帰着される。表 2 に基づく METS 値をこの 4 種類の動作に分類しそれぞれについて定義し直したものが表 4 である。

座って安静にしているときの METS 値は 1.0 である。読書やオフィスワークなどの静的な作業をしているとき、動きに応じて 2.0 までの値をとる。立って静かにしているときの METS 値は 1.2 で、会話や仕事などをしているとき、動きに応じて 2.3 までの値をとる。歩いている場合と走っている場合、METS 値は速さの関数となり、<sup>1)</sup> に示された METS 値の表より数式化すると式 5、6 となる。

歩いている場合:  $METS = 0.0272 \times \text{速さ (m/min)} + 1.2$  (5)

走っている場合:  $METS = 0.093 \times \text{速さ (m/min)} - 4.7$  (6)

次に、歩く/走る速さの推定について述べる。歩く/走る速さは式 (7) で表される。

速さ = 卓越周波数 (ピッチ) × 歩幅 (ストライド) (7)

卓越周波数は第 3.2.1 節で述べた FFT 処理により求まるが、歩幅は、身長と (歩く/走る) 速さの関数であり、加速度のデータから直接求めるのが困難である。歩いているときの歩幅は速さにより大きく変わるが、日常で走っているときの歩幅は一定とみなしてよいと考えられる。

したがって歩いている場合はユーザの動きの大小から歩く速さを推定し、式 5 より METS 値を求める。走っている場合は歩幅を一定 (width[cm]) として式 7 より走る速さを推定し、式 6 より METS 値を求める。

次に、ユーザの動きと METS 値や速さの対応付けについて述べる。ユーザが動くとき加速度の値に動きがみられ、したがって分散に反映される。ある被験者で加速度の分散と METS 値や速さとの対応付けを行い、それを教師データとして全員に共通のパラメータとする。

対応付けの具体的な方法は次のように行う。

- 座る、立つ

被験者が十分長い間座った/立ったままで動作を行い、その中で観測された分散の最小値と METS 値の最小値、分散の最大値と METS 値の最大値を対応させ、その間には線形に対応させる。

- 歩く

被験者が歩行速度を表示するトレッドミル上で歩き、分散と速さとの対応をとる。具体的には、トレッドミルに表示される速さで十分長い間歩き、そのときの分散の平均を対応させる。調整可能な何段階かについて速さを変化させ、得られた分散と速さの対応をもとに分散と速さの関係直線を得る。

以上よりユーザの METS 値が推定される。コンテキスト推定の間隔を求め、METS 値と掛け算をして式 (3) により消費エネルギーを算出する。

#### 4. 消費エネルギー推定アルゴリズムの携帯端末への実装と比較評価

本論文のユーザコンテキスト推定アルゴリズムでユーザのコンテキストが座る、立つ、歩く、走るの4パターンに高精度で分類できるのは携帯電話をズボンのポケットか胸ポケットに入れている場合である。したがって、携帯電話の装着場所をズボンのポケット（被験者1,2）、胸ポケット（被験者3,4）のそれぞれに固定して消費エネルギー推定を行い、第2.2節で紹介したデバイスの推定と比較した。さらに、携帯端末をズボンのポケットに入れた場合と胸ポケットに入れた場合の違いを見るため、同じ仕様の2つの端末をそれぞれズボンのポケットと胸ポケットに入れ（被験者5~8）、推定結果の比較をした。

##### 4.1 実装環境

本論文では、携帯電話サイズの組み込み機器に提案手法を実装した。

##### 4.1.1 プロセッサ

実験用のターゲットデバイスとして、Gumstix社開発の板ガムサイズの Gumstix Basix 400xm-bt を利用した。Intel 社の XScale PXA255 マイクロプロセッサ（クロック周波数 400MHz、64MB の SDRAM）を備え、60 ピン拡張コネクタが搭載されている。OS は組み込み用 Linux が利用可能である。さらに、Bluetooth で外部機器と通信が可能である。データを保存するストレージとして 1GB の MMC カードを搭載した。SANYO 製 DB-L40 充電電池で駆動させた。充電電池は 3.7V で 1200mAh の電力を供給する。

##### 4.1.2 加速度センサ

旭化成 AK8971N を含むセンサボードを、マザーボードと拡張コネクタで接続し利用した。AK8971N は 3 軸地磁気センサと 3 軸加速度センサを備えており、今回筆者は 3 軸加速度センサのみを利用した。これは MEMS のセンサチップでピエゾ抵抗を配置しており、外力がかかると素子の結晶格子が歪み抵抗値が変化するのを利用して加速度を検出する。加速度の測定範囲は約 ±2.5G であり、分解能は各軸 10bit、128Hz である。携帯電話用途に特化すべく、小型で低消費電力を実現しているのが特徴である。

以上を組み合わせ（図7）パッケージ化することにより、小型な処理デバイスを実現した。

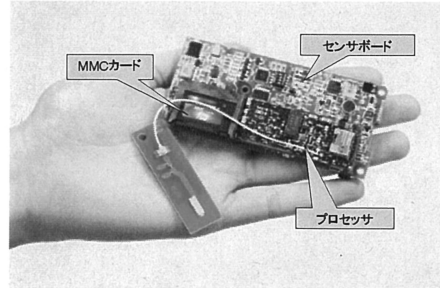


図7 利用した組み込み Linux デバイス

##### 4.1.3 プログラムの実行

- クロスコンパイル環境

ターゲットデバイス上では直接コンパイルできる環境がないため、ホスト PC を用意し、ホスト PC 上にクロスコンパイル環境を構築した。ホスト PC の Linux OS のディストリビューションとして FedoraCore5 を使用した。

- Bluetooth による PAN 接続

Bluetooth による外部デバイスからの操作を可能にするため、ターゲットデバイスとホスト PC との間に PAN(Personal Area Network) を構築した。Bluetooth 接続には、ソフトウェア Bluesoleil を使用している。gumstix がクライアント、Linux マシンがサーバとして動作するように設定したので、複数の gumstix を同時に動かすことができる。

- プログラムの実行

消費エネルギーを推定するプログラムを C 言語で作成し、PC でクロスコンパイルし、生成された実行ファイルを SCP により Bluetooth 経由でターゲットデバイスに送った。次に、PC から PAN 経由で SSH 接続でログインし、コマンドによりバックグラウンドで実行させた。表示されるデータは搭載した MMC カードに保存させた。

##### 4.1.4 実装条件

- サンプリングレート

今回使用したセンサのサンプリングレートはデバイスドライバの仕様で 128Hz で固定であった。そこで、測定されるデータの平均を算出することで 128Hz より低いサンプリングレートを実現することにした。つまり  $128/n$  (n:自然数) Hz でのサンプリングが可能である。サンプリングレートを増やすと求まる周波数の精度が落ちることを考慮し、SR = 16 で実装した。つまり測定されるデータ 8 個の平均を算出した。

- 前処理で利用するパラメータ

RB=128 とし、AVE=2, VAR=6, FFT=64 とした。

- ユーザのコンテキストから METS 値を推定する際のマッピング

- ー 座っているとき、立っているとき

事前に座っているときの加速度の分散を長時間測定し、最小値と最大値を記録した。表2によると座っているときの METS 値は 1.0 から 1.5 であるから、分散値の最小値から最大値まで線形にマッピ

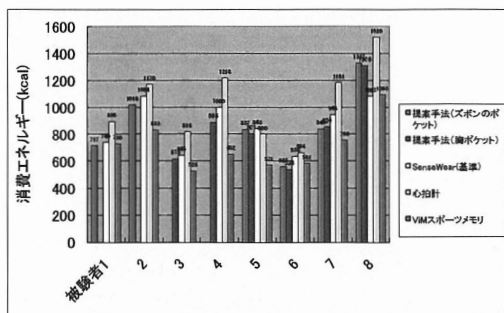


図 8 8 人の被験者の消費エネルギー推定結果

- ングした。立っているときも同様にした。
- 歩いているとき  
筆者がデバイスを身につけ、トレッドミルで速さを変えながら歩きその速さにおける分散の平均を記録しマッピングした。
- 走っているとき  
筆者の走る歩幅を計測し、width=100[cm]で固定した。

#### 4.2 実験方法

筆者を含む研究室のメンバーで実験を行った。被験者 1 は筆者である 20 代女性、2 は 30 代男性、3 は 20 代女性、4,5 は 20 代男性、6 は被験者 1 と同じで、7,8 は 20 代男性である。それぞれの被験者にデスクワーク、1 時間程度の散歩（うち少々のランニング）を含む普段どおりの生活を行わせ、8 時間にわたり第 2.2 節で紹介したすべての消費エネルギー表示デバイスと第 3 節のアルゴリズムが搭載された機器の装着を依頼した。なお SenseWear と ViM スポーツメモリについては、日常生活に支障をきたさないよう、利き腕でない方の腕に装着した。胸ポケットがない者は、首から携帯電話用ポーチをぶら下げさらにジャケットの中のポケットに入れるか、安全ピンで上着に取り付け、胸ポケットに近い状態を作った。実験中最低一度の外出を依頼した他は運動の量などについては特別な指示をしていない。

#### 4.3 結果

それぞれの被験者に装着したデバイスの消費エネルギー量の推定結果を図 8 に示す。

ViM スポーツメモリ、心拍計が主にスポーツ（ランニング）をする人向けに開発されているのとは比べ、BodyMedia 社 SenseWear は、運動時のみでなく日常生活での消費エネルギーを計測するために開発されている。この方式は、消費エネルギーを直接代謝熱から求めており、一切制約のない日常生活での成人の一日の消費エネルギー測定量が、第 2 節で述べた二重標識法の測定量と比べ 8% 以内の誤差に収まることが示されている<sup>14)</sup>。したがってフィールドにおけるデバイスとして最も信頼性があると考えられるため、本実験での妥当基準とすることにした。SenseWear を基準としたときのそれぞれのデバイスの誤差率をグラフにしたものを、図 9 に示す。

##### ● 装着場所が与えた影響

被験者 5~8 については、ズボンのポケットと胸ポケットの両方に推定手法の搭載された機器を入れて実験を

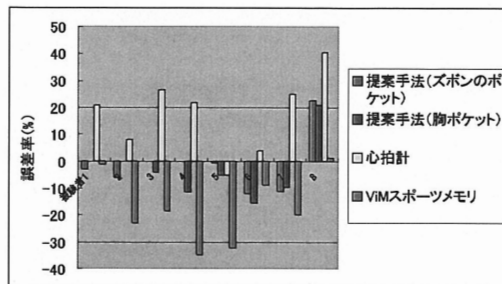


図 9 8 人の被験者の推定結果の SenseWear に対する誤差率

行っている。ズボンのポケットと胸ポケットのいずれに入れても推定結果はほぼ変わらない。

##### ● 提案手法の誤差率

被験者 8 で +22% もの大きな誤差を生じたものの、他の 7 人においては -15%~1% の誤差にとどまった。7 人の誤差率の平均をとると -8% であった。

##### ● 心拍計の誤差率

被験者 5 にて妥当基準を 5% 下回ったが、他の 7 人においては +4~40% の誤差率となった。7 人の誤差率の平均をとると +21% であった。

##### ● ViM スポーツメモリの誤差率

被験者 8 で妥当基準を 1% 上回ったものの、他の 7 人においては -32~-1% の誤差率となった。7 人の誤差率の平均をとると -20% であった。

使用したデバイスについて寄せられた、ヒューマンインタフェース的観点からのコメントを以下に列挙する。

##### ● SenseWear

腕に一日中巻きつけるので、運動をした場合汗をかいいたりしてかぶれやすい。荷物を持ったときにずり落ちる。

##### ● 心拍計

胸に直接巻くため、圧迫感がある。つけているだけで心拍数があがる。

##### ● ViM スポーツメモリ

腕時計より大きいのでデスクワークの際は特に邪魔である。

#### 4.4 考察

##### ● 装着場所が与えた影響

装着場所がズボンのポケットと胸ポケットでは推定結果に影響を及ぼさないことから、加速度の分散は、歩き方、ズボンの遊び、上着の締め付け具合などで変化するものと考えられた。消費エネルギーの推定に関しては、ユーザの携帯端末のコンテキストはズボンのポケットか胸ポケットか考慮する必要がないと考えられる。

##### ● 提案手法について

妥当手法自体がゴールドスタンダードである二重標識水法と約 8% の誤差を生じることを考えると、平均誤差率が -8% である推定手法は有効であると結論できる。

##### ● 心拍計について

心拍計は、ランニングしながらリアルタイムで心拍数を確認し、最適な心拍数を保つために使用する製品であるため、心拍数が低い活動強度にあるときには対応していない可能性がある。そもそも心拍数は低い活動強度であるときは精神的興奮、刺激物の摂取などの影

響を受けやすく、今回の実験ではデスクワークなどの低い活動強度である時間が長かったため大きな誤差を生じたと考えられる。また、心拍数から消費エネルギーを推定する際、算出には最大酸素摂取量と最大心拍数を使うが、この値は本実験では購入時に設定してある値で統一している。しかし実際には個人差が大きく、特に運動能力が普通より高い/低い人は消費エネルギーが小さく/大きく見積もられる傾向にある。

#### ● ViM スポーツメモリについて

ViM スポーツメモリは、手首に装着したセンサの加速度の大きさから歩行と走行を判別し、腕を振る方向の角速度の大きさから歩行や走行の速さを分類するため、散歩やジョギングでは有意な値が推定されるが、腕の動きに制約のある歩行の占める割合が多いNEATの推定には適さなかった可能性がある。

#### ● ヒューマンインタフェース

比較デバイスに対しては、いずれの3つの機器も、違和感があり日常生活には使いたくないという意見が多く寄せられた。これに対し、本提案は普通の携帯電話で、所持方法を変えることなく推定が可能であるため、連続的に装着するという観点から自然なシステムとなっていると考えられる。

### 5. おわりに

本稿では、加速度センサを搭載した携帯電話で消費エネルギーの推定を行うことを目指し、ユーザの運動状況からMETS値を求め、METSエネルギー換算法で消費エネルギーを求めるアルゴリズムを考案した。

さらにそのアルゴリズムをLinuxデバイス上に実装し、NEAT中心の生活において実験を行ったところ既存の医療用消費エネルギー表示デバイスと同等の性能を実現したことを確認した。

消費エネルギー推定アルゴリズムに関しての今後の課題として、自転車に乗っている場合の消費カロリーの推定や、装着場所を頻繁に変えたり、携帯電話で通話中である場合など、より現実に近い状況での推定を実現する必要がある。また今回、歩く/走る速さを加速度の値から直接推定するのが難しいため、ユーザが歩いているときは加速度の分散からMETS値をマッピングし、走っている場合は歩幅を固定する方法をとった。今後歩くテンポやその他の手がかりと歩幅の関係を解明するなどして歩幅を正確に求めることができれば、歩幅と速さからMETS値を求めることができる。そのときの推定値と現時点での推定値を比較する必要がある。

実験に関しては、今回非常に限られた人数、年齢、体格の被験者で行ったため、統計的誤差が大きい可能性があり、今後はより広範囲にわたって行う必要がある。さらに、今回は端末の装着場所を胸ポケットとズボンのポケットのみに固定して行ったため、携帯電話の所持方法のうち43.5%しかカバーできていないが、範囲の中の推定も行えば77%をカバーすることができる。

さらに、加速度センサと心拍センサを同時に用いるデバイスも報告されている<sup>15)</sup>。有酸素運動時には心拍数から消費エネルギーが精度よく求まることから、運動するときのみ心拍センサを取り付けデータをBluetoothで携帯電話に送信し、有酸素運動時のみ心拍から消費エネルギーを算出することで一日の消費エネルギーをより正確に推定するこ

とも考えられる。

### 参 考 文 献

- 1) 厚生労働省, 健康づくりのための運動指針 2006(エクササイズガイド 2006).
- 2) Levine J.A., Lanningham-Foster L.M., McCrady S.K., Krizan A.C., Olson L.R., Kane P.H., Jensen M.D., and Clark M.M., "Interindividual Variation in Posture Allocation: Possible Role in Human Obesity," *Science*, Vol. 307. no. 5709, pp. 584 - 586, January 2005.
- 3) 田中 茂穂, "間接熱量測定法による1日のエネルギー消費量の評価," *体力科学*, 55, pp.527-532, 2006.
- 4) 海老根直之, 島田美恵子, 田中宏暁, 西牟田守, 吉武裕, 齊藤慎一, JonesPeter J.H., "二重標識水法を用いた簡易エネルギー消費量推定法の評価: 生活時間調査法, 心拍数法, 加速度計法について," *体力科学*, 51, pp.151-164, 2002.
- 5) SenseWear: <http://www.bodymedia.com/>
- 6) Liden C.B., Wolowicz M., Stivorac J., Teller A., Kasabach C., Vishnubhatla S., Pelletier R., Farringdon J., and Boehmke S., "Characterization and Implications of the Sensors Incorporated into the SenseWear Armband for Energy Expenditure and Activity Detection," *Bodymedia White Paper*.
- 7) Polar, <http://www.polar.jp/>
- 8) Vim: <http://www.microstone.co.jp/product/sensor-vim.html>
- 9) 市川 和豊, 井澤 裕司, 北澤 俊二, 芳川 美代子, 浜 淳, "人体の行動識別が可能な腕時計型装置の開発," 日本機学会第15回バイオエンジニアリング講演会 講演論文集, 2003.
- 10) 社団法人電気通信事業者協会, <http://www.tca.or.jp/>
- 11) 倉沢央, 川原圭博, 森川博之, 青山友紀, "センサ装着場所を考慮した3軸加速度センサを用いた姿勢推定手法," *情報研報*, Vol.2006, No.54(20060523) pp. 15-22, UBI-11-3, 2006.
- 12) 小澤政博, 川原圭博, 川西直, 森川博之, "資源制約デバイスにおける3軸加速度センサを用いた姿勢推定手法," *情報研報*, Vol.2007, No.118(20071129) pp. 65-70, UBI-16-10, 2007.
- 13) アイシェア, "意識調査「携帯電話、忘れて困る。自宅に忘れた経験9割」" [http://blog.ishare1.com/press/archives/2005/11/post\\_19.html](http://blog.ishare1.com/press/archives/2005/11/post_19.html), 2005.
- 14) St-Onge M., Mignault D., Allison D.B., and Rabasa-Lhoret R., "Evaluation of a portable device to measure daily energy expenditure in free-living adults," *Am J Clin Nutr*, vol.85, pp.742-749, 2007.
- 15) 小熊祐子, 山本哲史, 木下訓光, 勝川史憲, 大西祥平, 山崎元, "心拍同時記録3次元加速度計を用いた活動強度と身体活動量の評価 1) 基礎的研究," 1999 年慶応義塾大学スポーツ医学研究センター紀要, P.25-31, 2001.