

METs エネルギー換算法に基づく 生活活動時の消費カロリー計測手法

松林 静輝[†] 中村 嘉隆^{††} 白石 陽^{††} 高橋 修^{††}

生活習慣病の予防にとって生活活動時の消費カロリーを知ることは重要である。そこで本稿では、高精度に消費カロリーを計測する手法を提案する。加速度センサを用いた人の状態推定手法を応用し、METsを用いて消費カロリーを計測する手法が考えられているが、高精度に消費カロリー計測を行うには階段の上り下りや移動スピードといった状態の区別が不十分である。提案手法では、スマートフォンに内蔵されている加速度センサを用いて、従来の推定項目に加え階段の上り下りや移動スピードまで計算し、個々の状態推定項目の精度を高めることにより、高精度な生活活動時の消費カロリー計測を目指す。提案手法の精度評価を行ったところ、従来手法より誤差を約83%削減することができた。

An energy expenditure measurement method of life activities based on METs value

YOSHIKI MATSUBAYASHI[†]
YOSHITAKA NAKAMURA^{††} YOH SHIRAIISHI^{††}
OSAMU TAKAHASHI^{††}

It is important for prevention of Lifestyle-related diseases to know the consumption calorie at the time of life activities. So, in this paper, a technique of measuring the consumption calorie with high precision is proposed. Although the consumption calorie measurement using METs adapting the state estimation technique of the person using an accelerometer is considered, distinction in the state where it was gone up stairs and down stairs and the moving speed for performing consumption calorie measurement with high precision is insufficient. The proposed method aims to measure the calorie consumption during the life activity with high accuracy using an accelerometer that is built into the smartphone by calculating the moving speed and going up and down the stairs, in addition to the items of conventional estimation and increasing the accuracy of state estimation of an individual item. Finally, the accuracy evaluation of the proposal technique was performed, errors were able to be reduced by about 83% from the conventional methods.

[†]公立はこだて未来大学大学院

Graduate School of Systems Information Science, Future University Hakodate

^{††}公立はこだて未来大学

Future University Hakodate

1. はじめに

現在、日本人の死因のうち最も大きな要因を占めるのは生活習慣病である[1]。生活習慣病の予防のためには、摂取カロリーと消費カロリーのバランスを取ることが重要である。近年、摂取カロリーについては多くの食べ物に記載されるようになり、簡単に知ることができるようになったが、消費カロリーは簡単に把握することができない。そこで、簡単に消費カロリーを計算するための手法が求められている。活動の種類によって、それぞれの強度と継続時間などから簡単に消費カロリーを計算する手法として、METs エネルギー換算法[4]が知られている。この手法を用いることで、どのような行動をどれだけ続けたかがわかれば消費カロリーを求めることができる。消費カロリーの中でも、スポーツなど特別な運動以外の歩行状態や着座状態など、生活活動は一日の行動の多くを占めるため、一日の消費カロリーを大きく左右すると考えられている[2]。従って生活活動の状態を判定できれば、消費カロリーを高精度に計算することが可能となる。しかし、生活活動を検出するためには継続的に計測を行う必要がある。

一方、スマートフォンなど携帯端末の発達に伴い、様々な事象を高精度に計測できるセンサが多数搭載されるようになってきている。これらセンサの中には加速度センサのように動作を検出し、データ系列として記録できるものも多い。またこれらの端末は常時身につけて行動する傾向があるため、日常動作を記録するために都合が良い。このような携帯端末に搭載されているセンサを用いて行動を推定[3]、消費カロリーを計算する手法[5][6]もいくつか存在する。階段などの路面状況や移動スピードなどによっても消費カロリーは大きく変化するが、これらまで推定して、高精度な消費カロリーを計算しているような手法は見当たらない。また、現在ほとんどのスマートフォンには、加速度センサが搭載されているため日常計測器として有力なデバイスとして注目されている。

そこで本研究では、一日の行動のうち特に生活活動時の消費カロリーを高精度に求めるため、スマートフォン上の加速度センサを用いて、生活活動のより細かな状態推定および消費カロリーの計算を行う手法を提案する。

2. 関連研究

本章では、3軸加速度センサを用いた状態推定技術および状態推定技術で消費カロリー計測に応用した研究例と、その問題点について述べる。

2.1 加速度センサを用いた状態推定手法

加速度センサを用いた状態推定手法は、センサから得られたデータから複数のパ

ラメータを作成し、それぞれの状態でのパラメータの値の違いから状態を推定するものである[3]。図1はズボンの横ポケットに入れた加速度センサから得られた「座位」「立位」「歩行」「走行」の状態時の分散、FFTパワースペクトル、端末の角度の値の大きさの違いを表している。この値の違いからそれぞれの状態を推定することが可能である。

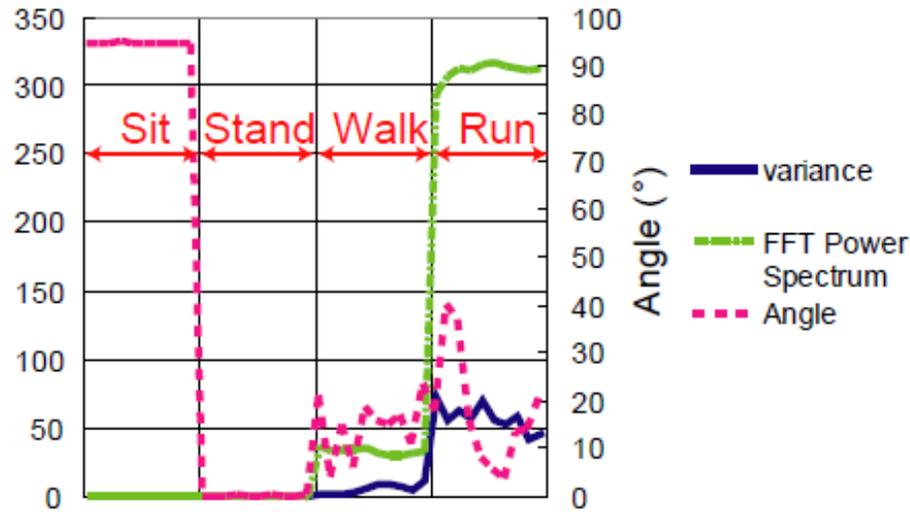


図1 パラメータの変化(文献[3]から引用)

2.2 状態推定手法を用いた消費カロリー計測

2.2.1 METs エネルギー換算法

状態推定の技術を消費カロリーに応用する研究には、METs エネルギー換算法を使用しているものが多い。METs エネルギー換算法とは、アメリカのスポーツ医学会により提案された手法であり、以下の式で表される[4]。

$$EE = 1.05 \times METs \times W \times T \quad (1)$$

EEとは消費カロリー (kcal)、METsは運動強度、Wは体重 (kg)、Tは運動時間 (時間) である。

METsとは、エネルギーを消費するすべての動きの強さを、安静時の何倍に相当するかで表す単位である(表1)。

表1 消費活動のMETsの例

METs	活動内容
1.0	静かに座って(あるいは寝転がって)テレビ・音楽鑑賞, リクライニング, 車に乗る
1.2	静かに立つ
1.3	本や新聞等を読む(座位)
1.5	座位での会話, 電話, 読書, 食事, 運転, 軽いオフィスワーク, 編み物・手芸, タイプ, 動物の世話(座位, 軽度), 入浴(座位)
1.8	立位での会話, 電話, 読書, 手芸
3.0	普通歩行(平地, 67m/分, 幼い子ども・犬を連れて, 買い物など)釣り(2.5(船で座って)~6.0(溪流フィッシング)), 屋内の掃除, 家財道具の片付け, 大工仕事, 梱包, ギター:ロック(立位), 車の荷物の積み下ろし, 階段を下りる, 子どもの世話(立位), 自転車エルゴメーター:50ワット, とても軽い活動, ウェイトトレーニング(軽・中等度), ボーリング, フリスビー, バレーボール
3.3	歩行(平地, 81m/分, 通勤時など), カーペット掃き, フロア掃き
3.8	やや速歩(平地, やや速めに=94m/分), 床磨き, 風呂掃除
10.0	ランニング:161m/分, 柔道, 柔術, 空手, キックボクシング, テコンドー, ラグビー, 水泳:平泳ぎ
15.0	ランニング:階段を上がる

例えば、体重60kgの人が平地で分速67m程度の普通歩行を30分間した時の消費カロリーは、以下の式で計算することができる。

$$1.05 \times 3.0 \times 60 \times 0.5 = 94.5(kcal)$$

2.2.2 状態推定手法を応用した消費カロリー計測手法

移動状態に着目した研究[5]では、携帯端末を使って、「停止」「歩行」「走行」「自転車」「電車、自動車、バス」の状態推定を行っている。さらに「歩行」状態では、「通常」「階段上り」「階段下り」の識別を行い、推定された状態とMETsから消費カロリーを計測している。

状態推定のパラメータは、加速度の FFT のパワースペクトルのみを使用し、測定したパワースペクトルを、あらかじめ決められたシンボルに変換し、複数のシンボルから確率的にそれぞれの状態を推定する。

生活活動に着目した研究[6]では、市販の加速度センサを使い基本的な生活活動である「座位」「立位」「歩行」「走行」の4つの状態を推定し、その状態に対応した METs 値から消費カロリーを計測している。

状態推定に使うパラメータは、加速度のデータの分散、端末の角度、加速度の FFT のパワースペクトルと卓越周波数である。

2.3 関連研究の問題点

表 2 に示すように、「歩行」や「走行」では、スピードの違いや階段であるかどうかなどで METs 値が大きく異なっている。これにより計算される消費カロリーの値にも大きな影響を与える。

表 2 歩行・走行状態における METs の違い

METs	活動内容
2.5	歩行 (54m/分)
5.0	歩行 (107m/分)
8.0	歩行 (階段昇り)
8.0	走行 (134m/分)
10.0	走行 (161m/分)
15.0	走行 (階段昇り)

[5]の手法では移動状態にのみに着目しており、生活活動時の消費カロリーを求めらるのであれば「電車・自動車・バス」や「自転車」の推定は不必要であり、また移動時のスピードは考慮されていない。また[6]の手法は階段の上り下りなど「走行」、「歩行」を行った場所の推定はなされていない。より正確な消費カロリー計算のためには、これらのスピードや場所まで正しく推定できる必要がある。

3. 提案方式

3.1 提案方式概要

提案方式は、状態推定処理と消費カロリー推定処理の2つの処理から生活活動時の消費カロリー計測を行う。状態推定処理には、スマートフォンに内蔵されている加速

度センサを利用し、消費カロリー計測処理には、METs エネルギー換算法を用いる。また、基本的な生活活動は、「座位」「立位」「歩行」「走行」の4つに分類されるものとする。

3.2 想定環境

3.2.1 端末の装着場所

提案方式ではスマートフォンを用いるが、スマートフォンの装着場所によって加速度が変化する問題があげられる。ズボンの横ポケットを使うことで、「座位」「立位」時は、足の角度により状態の変化を見分けることが容易で、また「歩行」「走行」時の加速度の変化を捉えやすい。



図 2 端末の装着場所

3.2.2 加速度センサのサンプリングレートとパラメータ

「歩行」、「走行」の周波数は通常 0~10 Hz に収まっている。そのため加速度センサのサンプリングレートは 20Hz に設定する。

また、状態推定には端末で計測された加速度の分散値、加速度の FFT から求められる基本周波数および端末の角度を用いる。加速度の分散値および周波数は最新 64 個の加速度データから求める。

3.3 状態推定処理

3.3.1 状態推定処理の全体の流れ

提案方式では、高精度に生活活動時の消費カロリーを計測するため、従来方式の「座位」「立位」「歩行」「走行」に加え、「歩行：階段上り」「歩行：階段下り」「走行：階段上り」の推定を行う。また「歩行」「走行」時については、その時の速度を計算する。以下に提案方式の状態推定の流れを示す。

重力成分を除去した合成加速度の鉛直成分を算出

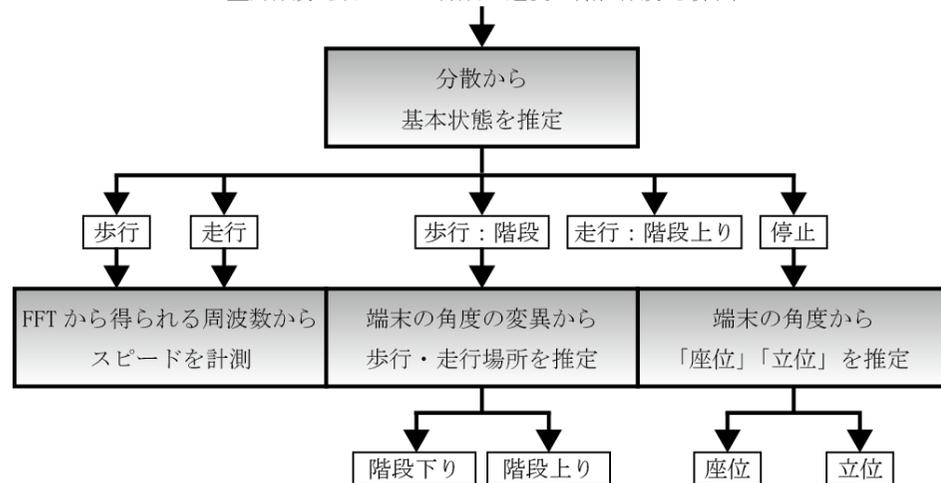


図 3 状態推定の流れ

[3]では、合成加速度の分散により「歩行」「走行」「停止」を分類することが可能であることが示されている。また、分散は計算が容易にできるため、提案方式では分散による基本状態の推定を行う。更に提案方式では、「歩行」「走行」に加え、階段を歩行・走行しているのかどうかを推定するが、図4に示すように合成加速度の分散では歩行・走行と階段を歩行・走行しているかどうかを区別することができない。

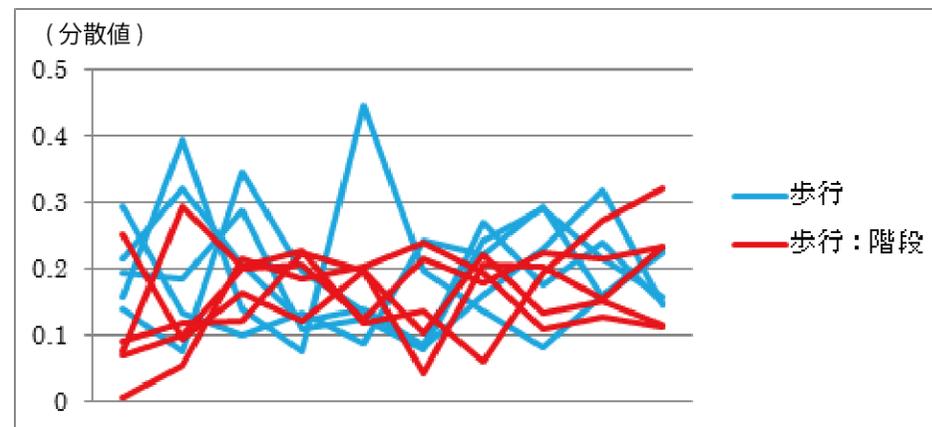


図 4 「歩行」「歩行：階段」時の合成加速度の分散

そこで、階段上の歩行は普通の歩行と比べ、鉛直方向の動きが強いということに着目し、合成加速度の鉛直成分の分散を用いて特徴を検出できるか検証を行った。結果は図5のようになった。

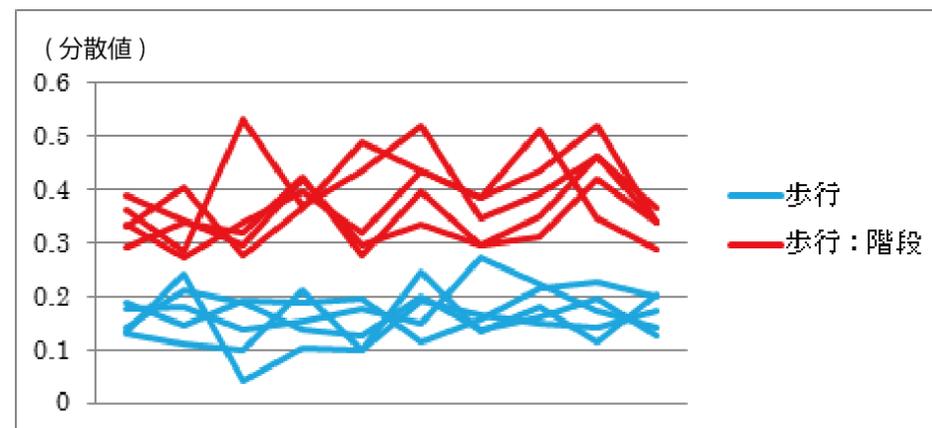


図 5 「歩行」「歩行：階段」時の合成加速度の鉛直成分の分散

図5が示すように、合成加速度の鉛直成分の分散に着目した場合、階段を移動しているかないかで、分散値に大きく差が出る事がわかる。そのため、提案方式では、

合成加速度ではなく合成加速度の鉛直成分の分散を用いることで、分散のみを用いて「歩行」「走行」「歩行：階段」「走行：階段」「停止」を推定することを可能にした。

3.3.2 合成加速度の鉛直成分の算出

本研究では、「歩行」「走行」状態が階段かどうかの推定を行う。そこで階段を歩行または走行した時の特徴を強く出すために、鉛直方向の加速度を利用する。以下に、鉛直方向の加速度の算出手順を述べる。

- ① xyz 軸の加速度から重力成分を除去する。
- ② 重力成分を除去した xyz 軸の加速度を以下の式により合成する。

$$Acc = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (2)$$

- ③ 合成した加速度と重力との内積から角度を計算する。角度の計算式は以下に示す。

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{a} \cdot \vec{g}}{|\vec{a}| |\vec{g}|} \right) \quad (3)$$

- ④ 計算した角度から鉛直方向の加速度を計算する。計算式は以下に示す。

$$VAcc = Acc \times \sin\theta \quad (4)$$

Acc とは重力成分を除去した加速度の合成値、 x は重力成分を除去した加速度の x 軸成分、 y は重力成分を除去した加速度の y 軸成分、 z は重力成分を除去した加速度の z 軸成分のことである。 θ は合成加速度と重力加速度との角度、 \vec{a} は重力成分を除去した加速度、 \vec{g} は加速度の重力成分のことである。 $VAcc$ とは鉛直方向の加速度のことである。

3.3.3 状態の推定

各状態の推定は、計測された加速度の分散値および角度、角度の変異（角度データの最新 64 個の最大値と最小値の差）について実験的に求めた閾値を用いて行う。閾値の設定方法については 3.3.5 節で述べる。

まず、基本状態である「停止」「歩行」「歩行：階段」「走行」「走行：階段上り」は鉛直方向の加速度の分散値を利用して推定する。設定された閾値は表 3 の通りであり、計測された加速度の分散値が閾値のどの範囲に入るかで状態を決定する。

表 3 基本状態の閾値

状態	閾値
停止	分散 < 0.07
歩行	$0.07 \leq \text{分散} < 0.33$
歩行：階段	$0.33 \leq \text{分散} < 0.53$
走行	$0.53 \leq \text{分散} < 1.35$
走行：階段上り	$1.35 \leq \text{分散}$

次に、「歩行：階段」部分の状態について、端末で計測された角度の変異を用いて「歩行：階段上り」「歩行：階段下り」を推定する。同様に実験から設定された閾値は表 4 の通りであり、角度の変異の値が閾値のどの範囲に入るかで状態を推定する。

表 4 歩行階段上り・下りの閾値

状態	閾値
歩行：階段上り	$0.67 < \text{角度の変移}$
歩行：階段下り	$\text{角度の変移} \leq 0.67$

最後に「停止」状態について、端末で計測された角度データから「座位」と「立位」とを推定する。実験から設定された閾値は表 5 の通りである。計測された角度の値が閾値のどの範囲に入るかで状態を推定する。

表 5 角度の閾値

状態	閾値
座位	$1.1 \leq \text{角度} < 2.0$
立位	座位以外の時

3.3.4 「歩行」「走行」時の速度の計算

また、歩幅に関しては以下のように定義されているため、以下の式を用いて計算を行う[7]。

$$\text{歩行時の歩幅}(m) = \text{身長}(m) \times 0.45 \quad (5)$$

$$\text{走行時の歩幅}(m) = \text{身長}(m) \times 0.5 \quad (6)$$

また速度に関しては、FFT から「歩行」「走行」時のピッチを求め、以下の式で計算することが可能である。

$$\text{速度(m/分)} = \text{歩幅(m/歩)} \times \text{ピッチ(歩/分)} \quad (7)$$

3.3.5 閾値設定方法

閾値の設定には決定木を用いた。男女含めた被験者 6 名に対し、各動作の状態をそれぞれ約 300 秒間続けてもらい、その時に得られた加速度の分散、角度、角度の変異データを決定木にかけ設定を行った。以下に各被験者における歩行・走行時の分散の値を示す。

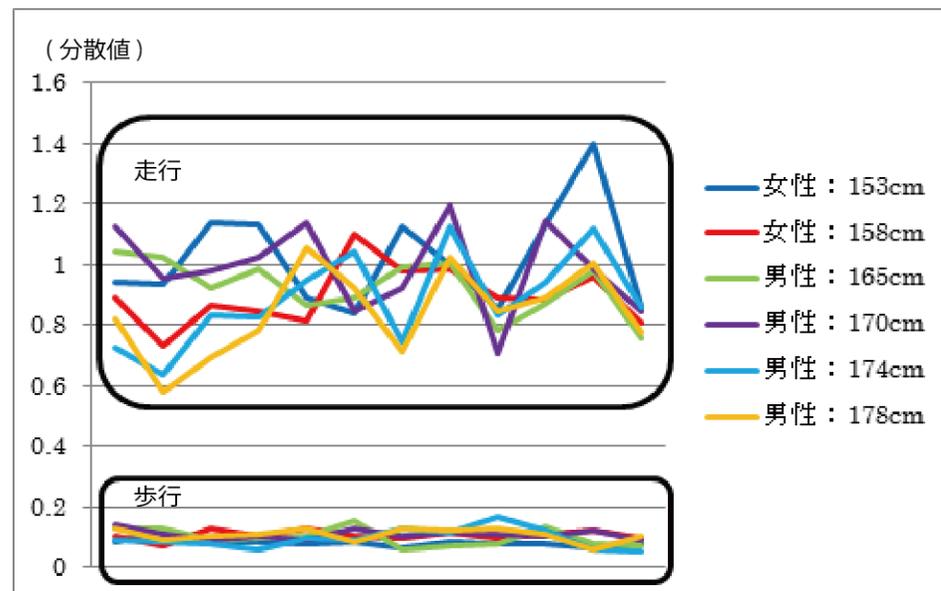


図 6 各被験者における歩行・走行時の分散

図 6 より身長が低いほど分散が小さくなる傾向はあるものの、歩行・走行時の分散の範囲ははっきり分かれており、閾値によって区別が可能である。つまり、提案手法で定めた閾値は多くの人に有効であるものと判断できる。

3.4 消費カロリー計測処理

提案方式における状態に対応した METs 値は、以下のように設定する。

表 6 各状態の METs 値

状態	METs
座位	1.5
立位	1.8
歩行	式(8)
走行	式(9)
歩行:階段下り	3
歩行:階段上り	8
走行:階段上り	15

また、「歩行」「走行」時のスピードの違いによる METs は、METs は速さの関数となる[3]ことから、以下の式で表す。

$$\text{歩行: } M = 0.0272 \times V + 1.2 \quad (8)$$

$$\text{走行: } M = 0.0930 \times V - 4.7 \quad (9)$$

V は「歩行」「走行」時の速さ (m/分)、M は、METs を表す。

4. 実験および評価

4.1 精度評価

本研究では、iPhone4 上に提案手法を実装した。精度評価を消費カロリー計測の精度評価と状態推定処理の精度評価の 2 つに分けて行う。

4.1.1 消費カロリー計測の精度評価

被験者 6 名を対象に、本研究で独自に作成したルートを移動してもらい、その時の正解値と提案手法による計測値、従来手法による計測値を比較することで精度評価を行い、提案手法の有効性を示す。正解値は実際に行った動作と METs エネルギー

一換算法から計算する。ルートは以下のように設定した。

表 7 評価のためのルート

順序	状態	運動時間
①	歩行	30 秒
②	歩行:階段上り	30 秒
③	歩行	30 秒
④	歩行:階段下り	30 秒
⑤	立位	60 秒
⑥	走行	15 秒
⑦	走行:階段上り	15 秒
⑧	座位	60 秒

結果を図 7 に示す。

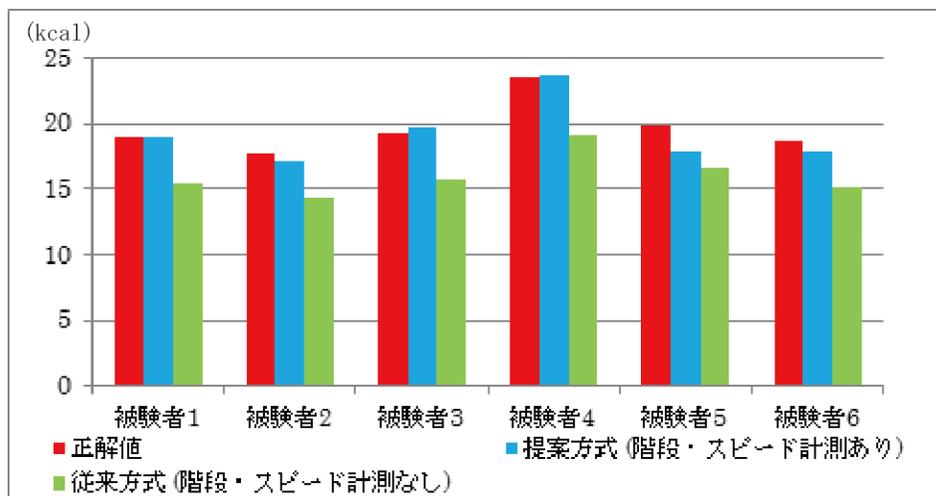


図 7 消費カロリー計測実験の結果

図 7 より、提案方式の方が従来方式よりも正解値に近い消費カロリーを算出できて

いるということがわかる。

4.1.2 状態推定処理の精度評価

消費カロリー計測の精度評価時の状態推定処理の正解率を以下の式に従って計算し精度評価を行う。

$$\text{正解率(\%)} = \frac{\text{正解した状態の個数}}{\text{推定された状態の個数}} \times 100 \quad (10)$$

本研究では個々の状態推定項目の精度を上げることにより、高精度な生活活動時の消費カロリー計測を目標としている。そのため、個々の状態推定項目の精度は、正解率 90%以上を目指す。状態推定処理の精度評価の結果を以下に示す。

表 8 状態推定処理の精度評価の結果

	座位	立位	歩行	歩:上り	歩:下り	走行	走:上り
座位	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
立位	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
歩行	0.00%	0.00%	95.40%	0.00%	4.60%	0.00%	0.00%
歩:上り	0.00%	0.00%	19.50%	70.70%	0.00%	9.80%	0.00%
歩:下り	0.00%	0.00%	12.00%	32.0%	44.00%	12.00%	0.00%
走行	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	84.40%	15.60%
走:上り	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	3.20%	22.60%	74.20%

表 11 は横軸が推定結果、縦軸が実際の状態を表した表である。表 11 より、「座位」「立位」の精度は 100%、「歩行」は 95.4%と目標である 95%以上に達した。「歩行:階段上り」は 70.7%、「走行」は 84.4%、「走行:階段上り」は 74.2%であった。「歩行:階段下り」に関しては 44%と低い結果となった。

5. 考察

5.1 消費カロリー計測の精度に関する考察

提案方式の消費カロリー計測精度について考察する。図 7 より、提案方式の計測

値の方が、従来方式の計測値より正解値に近いという結果であった。このことから、従来方式より提案方式の方が正確に生活活動時の消費カロリーを計測することが可能であるということがわかった。また、提案方式の計測値と正解値の誤差平均は約0.69kcalである。これに比べ、従来方式の誤差平均は約3.6kcalである。これらの誤差は4分30秒間あたりの誤差であり、これを人の1日の平均活動時間である18時間に換算すると提案手法は約165kcalに相当し、従来方式では約860kcalに相当する。これより、提案方式では、従来方式より誤差を86%削減することができたことがわかる。例えば、ごはん茶碗一杯分(140g)で235kcal [8]であり、従来手法の860kcalという誤差は、ごはん茶碗3~4杯分に相当することから、非常に大きな誤差であることがわかる。提案手法の誤差である165kcalは、ごはん茶碗一杯分にも満たない程度の誤差であることから、十分な精度であるということがわかる。これは、本研究で作成したルートを18時間に換算したときの誤差であり、本来の人の日常生活では、提案方式で高精度に推定可能な「座位」「立位」「歩行」が生活活動の多くを占める。そのため日常生活において提案方式を使用した場合、誤差は165kcalより少なくなることが予想される。

5.2 状態推定処理の精度に関する考察

評価実験より提案方式の状態推定処理の精度について考察した。表11より「座位」「立位」「歩行」は95%以上と目標である90%を達成することができた。しかし「歩行：階段下り」の推定率は44%と低い。「歩行：階段下り」は「歩行：階段上り」との誤推定が多くなっていることがわかる。誤推定が多くなってしまう原因として、閾値設定の有効性についての問題があげられる。「歩行：階段下り」と「歩行：階段上り」の端末の角度の変移を以下に示す。

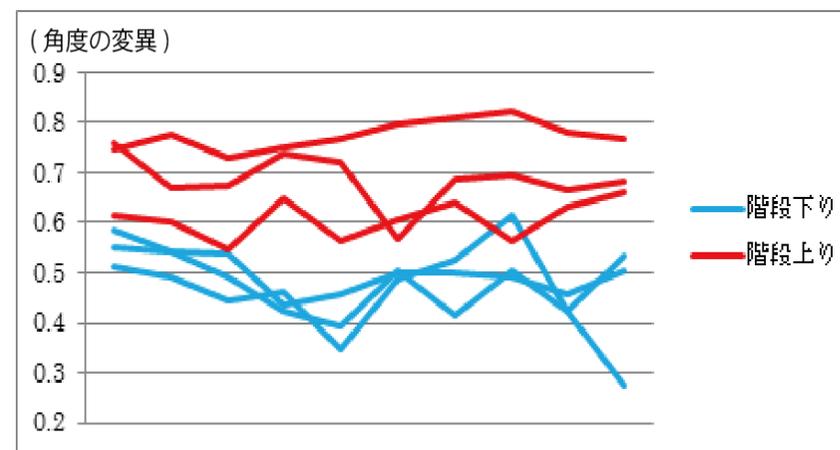


図8 「歩行：階段下り」「歩行：階段上り」時の端末の角度の変移

図8を見ると、「歩行：階段下り」「歩行：階段上り」の角度の変移に差がある部分と、差が出ていない部分がある。これは、階段の上り方、階段の下り方の個人差によるものである。特に「歩行：階段上り」については、足を高く上げながら階段を上ると、角度の変移は大きくなったりしてしまう。つまり端末の角度の変移については、個人個人で閾値設定をすることで推定の正解率向上は図れると考えられる。

6. おわりに

本稿では、生活活動時に着目して高精度な消費カロリー計測手法を提案した。高精度に計測するために従来の方式に加え、階段を「歩行」「走行」している場合、また「歩行」「走行」時のスピードまで計算しMETsエネルギー換算法に基づき消費カロリーを計測した。従来方式と提案方式の比較実験を行い、提案方式の精度を評価した。その結果、提案方式の方が従来方式に比べ正確に消費カロリーを計測できることが示された。一方、提案方式では「歩行：階段下り」の精度が低いので改善の余地は残されている。

今後は、複数の学習モデルを組み合わせることでの状態推定率の向上を目指す。また、より多くの被験者を使い閾値設定時のデータ収集、評価実験を行いたい。また、今回は、独自に作成したルートでの評価実験だったので、1日単位の消費カロリー計測実験を行う必要がある。

参考文献

- [1] 全国健康保険協会, <http://www.kyoukaikenpo.or.jp/>
- [2] Levin J.A., Lanningharn-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, 584-586, 2005-01
- [3] 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, 情報処理学会研究報告. UBI, 2006(54), 15-22, 2006-05-23
- [4] 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
- [5] 南川 敦宣, 小林 亜令, 横山 浩之: 情報利得を基にした移動状態推定による携帯電話搭載型消費カロリー計測システム, 情報処理学会論文誌 52(2), 866-876, 2011-02-15
- [6] 笠 七菜実, 川原 圭博, 小林 亜令, 浅見 徹: 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, 情報処理学会研究報告. UBI, 2008(40), 67-74, 2008-05-08
- [7] Run & Walk, <http://run.auone.jp/>
- [8] 簡単! 栄養&カロリー計算, <http://www.eiyoukeisan.com/>
- [9] 小林 亜令, 岩本 健嗣, 西山 智: 釈迦 : 携帯電話を用いたユーザ移動状態推定・共有方式, 情報処理学会研究報告. MBL, 2008(44)
- [10] 関口 純平, 松井 崇志, 新津 善弘: 座位姿勢コンテキストの推定方法, 平成22年度電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会
- [11] 松村 吉浩, 廣部 一彦, 西野 健司[他]: 3軸加速度法による身体活動量計測, 松下電工技報 56(2), 67-72, 2008-06
- [12] 内科・循環器科あおやまクリニック, http://www1.s3.starcat.ne.jp/aoyama_c/
- [13] Weka, <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>
- [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, 742-749, 2007.