

# 移動形態と歩行速度を考慮した消費カロリーの無拘束推定

## Estimation of consumed calorie applying moving behavior and walking speed

煤孫光俊\* , 大瀧保明\* , 鈴木明宏\*\* , 佐川貢一\*\*\* , 石原正\* , 猪岡光\*

Mitsutoshi Susumago\* , Yasuaki Ohtaki\* , Akihiro Suzuki\*\* ,  
Koichi Sagawa\*\*\* , Tadashi Ishihara\* , Hikaru Inooka\*

\*東北大学大学院情報科学研究科, \*\*(株) アイ・ティ・リサーチ,  
\*\*\*弘前大学理工学部

\*Graduate School of Information Science, Tohoku University , \*\*IT Research Co. ,  
\*\*\*Faculty of Science and Technology, Hirosaki University

キーワード： 消費カロリー (consumed calorie) , Intelligent Calorie Counter (Intelligent Calorie Counter) ,  
移動形態 (moving behavior) , 歩行速度 (walking speed) , 坂道歩行 (slope walk)

連絡先： 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 01 東北大学工学部機械系 2 号館 猪岡研究室  
煤孫 光俊 , Tel.: (022)217-7021 , Fax.: (022)217-7019 , E-mail: mago@control.is.tohoku.ac.jp

### 1. 緒言

現在、心臓病患者の心機能の診断やリハビリ効果の判定のために、日常生活の運動量を無拘束で求める研究が行われている。これまでは歩数計を利用し、例えば、1歩ごとにホルター心電計に記録する方法を利用するものがある<sup>1)</sup>。しかし、従来の歩数計では歩行以外の振動が伝わって歩数にカウントすることが多いことが問題である。さらに、階段昇りは平地歩行と比較して身体負荷が2～3倍大きい<sup>2)</sup>が、平地歩行と階段昇りなどの移動形態を判別することが不可能であるため、日常生活の運動量を正確に推定することは困難であった。これらの問題を解決するために、我々は加速度センサと大気圧センサを組み合わせた携帯型の歩行形態判別装置(ICC: Intelligent Calorie Counter)を

開発し、平地歩行や階段昇降などの歩行形態の違いを判別する方法を提案している<sup>2)3)4)</sup>。これにより、階段昇降を含めた日常生活の運動量を把握することが可能になった。しかし一方で、平地歩行でも歩行速度によって身体負荷が大きく異なり、また、階段よりも勾配が小さい坂道の昇降でも平地歩行に比べ、負荷が大きいことが報告されている<sup>5)6)</sup>が、上記の研究成果ではその判別までには到っていない。

本研究では、はじめに平地歩行時の歩行速度を推定するための歩行速度の推定法について検討する。つづいて、坂道で実験を行うことにより、階段よりも勾配が小さい坂道昇降の判別について検討する。



Fig. 1 Intelligent Calorie Counter (ICC)

Table 1 Intelligent Calorie Counter の主な仕様

大きさ	100mm × 55mm × 18.5mm, 90g
センサ	3軸加速度センサ(± 4G), 気圧センサ
記憶媒体	コンパクトフラッシュカード
データ精度	10 bit
電源	リチウムイオン蓄電池 (ACアダプターによる充電機能付)
外部 インターフェース	USB RS232C

## 2. Intelligent Calorie Counter

本研究で使用する Intelligent Calorie Counter(以下 ICC, (株)アイ・ティ・リサーチ製)を図1に, 装置の主な仕様を表1に示す. ICC の大きさは縦 100[mm], 横 55[mm], 厚さ 18.5[mm] で重量が 90[g] と非常に小型で軽量である. 装置には 3 軸加速度センサ (AnalogDevices製 ADXL202 × 2), 気圧センサ(フジクラ製 X3AM-115KPASR), 気圧信号処理回路, 電源としてリチウムイオン蓄電池が内蔵されている. ICC は ACアダプターで充電できるので, 昼間は携帯して計測を行い, 夜に充電するようになれば非常に長時間の計測も可能である. 計測データはサンプリング周期 10 [ms] でコンパクトフラッシュカードに記録される. また, USB などを使用してカードに記録したデータを PC に高速転送することが可能である. この装置を利用することにより, 使用者の負担にならず, また拘束感を与え

Table 2 代表的な RMR(Relative Metabolic Rate)

動作等	RMR
休息(立位)	0.4
休息(座位)	0.0 ~ 0.2
休息(臥位)	0.0
歩行( 50 m/min)	1.5
歩行( 60 m/min)	1.9
歩行( 70 m/min)	2.4
歩行( 80 m/min)	3.2
歩行( 90 m/min)	4.0
歩行( 100 m/min)	5.0
歩行( 110 m/min)	6.4
歩行( 120 m/min)	8.5
坂道歩行( -9 %)	1.3
坂道歩行( -5 %)	1.7
坂道歩行( 5 %)	3.8
坂道歩行( 10 %)	5.4
坂道歩行( 15 %)	7.2
坂道歩行( 20 %)	9.4
階段上り	10.0
階段下り	2.5

ることなく計測することが可能である.

## 3. 消費カロリーの算出方法

歩行や階段昇降などの運動時の消費カロリー  $E$  は, 以下の式で表される<sup>5)</sup>.

$$E = (\text{RMR} + 1.2) \times \text{BMR} \times W \times T \quad (1)$$

$E$	: 代謝エネルギー量 [kcal]
RMR	: エネルギー代謝率
BMR	: 基礎代謝率 [kcal/kg/day]
$W$	: 体重 [kg]
$T$	: 時間 [day]

(1)式のように, 消費カロリーは運動強度を表す RMR(Relative Metabolic Rate) と, 被験者の年齢, 性別により決定される BMR(Basic Metabolic Rate) を利用することにより推定可能である<sup>5)</sup>. RMRは, 表2に示すように, 移動形態と歩行速度に大きく依存している<sup>5)6)</sup>. したがって, 運動時の消費カロリー  $E$  の推定に必要な RMR を決定するためには, このような移動形態を判別し, なおかつ歩行速度を求めることが重要である.

これまでの研究で, 静止と歩行状態だけでなく, 平地歩行や階段昇降などの移動形態の判別を行い,

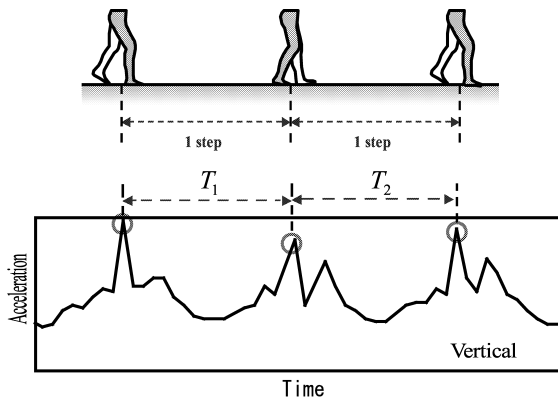


Fig. 2 歩行時の上下方向加速度

良好な結果が得られている<sup>3)4)</sup>。しかし、表2のように、RMRは歩行速度に大きく依存するため、歩行速度を正確に把握する必要があるが、その導出までには到っていなかった。また、歩行中の運動負荷は勾配の大きさによっても異なる<sup>6)</sup>ため、階段だけでなく、坂道歩行も判別することができれば、より正確な運動量を推定できると考えられる。そこで、ICCを用いた歩行速度の算出法と勾配の小さい坂道歩行の判別について検討を行った。

## 4. 歩行速度の推定

図2のように、歩行時の上下方向加速度には足の着地時の衝撃による周期的なピークが存在する。したがって、このピークを検出することにより、歩調を求めることが可能である。そこで、歩行中の上下方向加速度から得られる歩調を利用する歩行速度の推定法について検討を行った。ここで、歩行速度は歩幅、歩調により変化する<sup>6)7)</sup>ので、歩幅、歩調、歩行速度の関係を調べた。

### 4.1 実験方法

実験は腰部に加速度計を装着して50[m]の直線歩行を行い、歩幅、歩調、歩行速度を計測する。ただし、歩行速度は歩行距離を歩行時間で割ることによって求め、歩幅は歩行距離を歩数で割ること

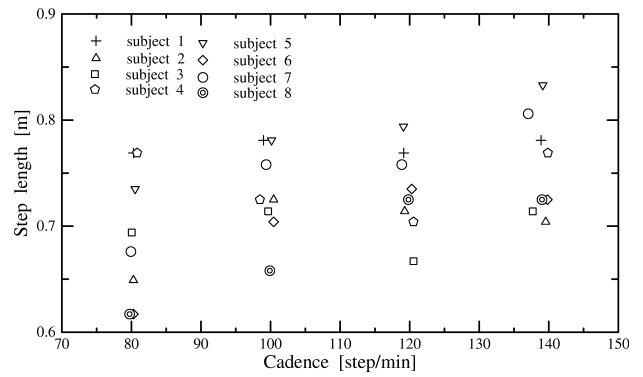


Fig. 3 歩調 - 歩幅 線図

によって求めた。被験者は若年者では20代の健康な男性7名と女性1名、高齢者では60歳以上の男性3名と女性16名である。実験は通常歩行のほかに、速度を80 [step/min]、100 [step/min]、120 [step/min]、140 [step/min]に設定し、各2回、合計10回行った。

## 4.2 実験結果および考察

### 4.2.1 若年者歩行からの近似式の導出

歩調と歩幅の計算結果を図3に示す。この結果から歩調が大きくなると歩幅も広がる傾向が見られた。歩幅が歩調に依存すると考え、各被験者ごとに最小自乗法を適応し、近似式を求めてみたところ、増加率(傾き)は平均0.001となった。そこで、被験者ごとに近似式を設けず、一般式を立てるために増加率を0.001とする。したがって、以下のような式が成り立つ。

$$l = 0.001f + b \quad (2)$$

$l$  : 歩幅 [m]  
 $f$  : 歩調 [step/min]  
 $b$  : 定数

増加率を0.001に設定し、 $b$ を求めたところ、被験者ごとにばらつきが見られた。これは身長による差だと考えられるため、各被験者の $b$ と身長 $h$ との関係を調べた結果、

$$\frac{b}{h} \simeq 0.37 \quad (3)$$

Table 3 実際の歩行速度と推定歩行速度との平均誤差(若年者)

Cadence [step/min]	Average error [%]
Normal Speed	3.83
80	6.76
100	4.47
120	6.09
140	6.74

Table 4 実際の歩行速度と推定歩行速度との平均誤差(高齢者)

Cadence [step/min]	Average error [%]
Normal Speed	7.09
80	8.04
100	6.72
120	7.59
140	10.41

となることがわかった。したがって、歩幅  $l$  は以下の式で表される。

$$l = 0.001f + 0.37h \quad (4)$$

ここで、歩行速度、歩幅、歩調には以下のような関係が成り立つ。

$$v = lf \quad (5)$$

$v$  : 歩行速度 [m/min]  
 $l$  : 歩幅 [m]  
 $f$  : 歩調 [step/min]

(5)式に(4)式を代入すると、

$$v = 0.001f^2 + 0.37hf \quad (6)$$

となる。(6)式より推定した歩行速度と実際の歩行速度の平均誤差を表3に示す。速度が遅い場合と速い場合に誤差が多少大きくなってしまったが、通常速度と100~120 [step/min]において誤差は十分に小さく、この近似式は非常に有効だといえる。

#### 4.2.2 高齢者における検証

各被験者の歩調を求め、(6)式を用いて推定した歩行速度と実際の歩行速度の平均誤差を表4に示す。誤差がほぼ 10 [%] 以内であり、十分に推定が

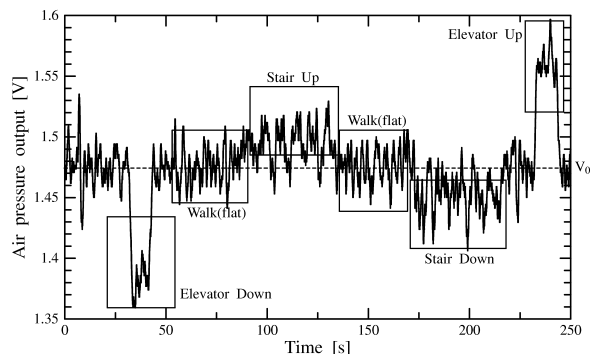


Fig. 4 移動形態別の気圧信号の変化

可能であることが確認できた。しかし、若年者比べて誤差が大きくなり、特に 70 歳以上の被験者において誤差が大きくなる傾向が見られた。加齢による歩幅の減少の影響が顕著になるためと考えられるので、今後はこの点に関して検討していく必要がある。

## 5. 移動形態判別

ICC で計測される気圧信号は、図4のように、移動形態によって基準値  $V_0$  を中心に出力が変化するので、階段昇降などの判別を行うことが可能である。しかし、気圧信号には計測雑音が含まれているため、静止時または平地歩行時でも出力が変化するので、勾配の小さい坂道でも誤判別を起こさずに判別を行うためには、上下移動有無の判別基準値をどの位置に設けるかが重要となる。

そこで、坂道を歩行した際にどの程度気圧信号が変化するかを調べ、平地歩行と誤判別を起こさずに判別できる基準値を設定できるか検討を行った。

### 5.1 実験

実験は ICC を右腰部に装着し、平均勾配が 14.4 [%](13 °)、8.9 [%](8 °)、3.9 [%](3.5 °)の3種類の坂道を使用し、10秒間静止、30秒間昇り、20秒間静止、30秒間降り、10秒間静止するように時間を設定して計測を行った。被験者は、20代の健常な

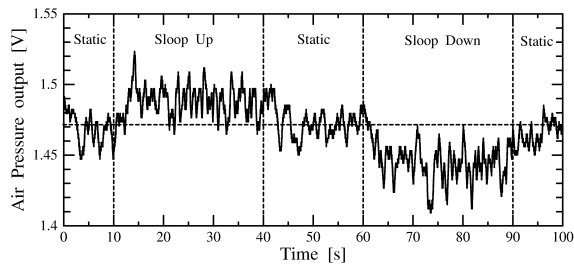


Fig. 5 坂道歩行時の出力結果(勾配 14.4%)

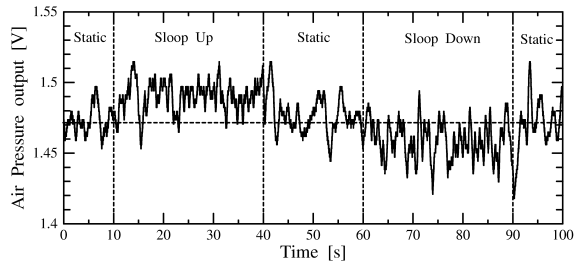


Fig. 6 坂道歩行時の出力結果(勾配 8.9%)

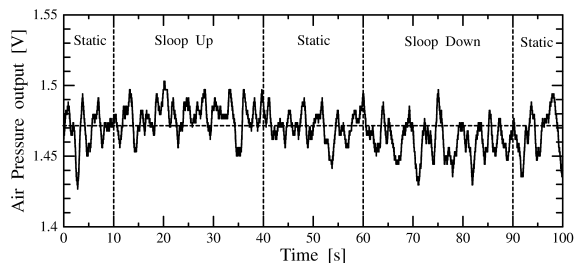


Fig. 7 坂道歩行時の出力結果(勾配 3.9%)

男性であり、それぞれの坂道で各 3 名ずつである。

## 5.2 実験結果および考察

坂道を歩行した場合の気圧信号の出力結果を図 5~7 に、平均変化率の結果を表 5 に示す。実験の結果、勾配が小さくなるにつれて変化率が小さくなった。これは時間あたりの気圧変化率が小さくなったためと考えられる。また、坂道歩行の場合、勾配が大きくなるほど昇りよりも降りのほうが歩行速度が速くなるため、変化が大きくなった。

この結果から、1 秒ごとの気圧の平均変化率に対して、図 8 のような判別を行う。平地歩行と誤判別を起こさず、なおかつある程度の勾配が存在する坂道歩行を判別するためには、判別基準値を  $\pm 10$  [mV] に設定し、同一の移動形態を 3 回(3 秒間)以上検出したときに移動形態を変更すればよい

Table 5 坂道歩行時の気圧信号の平均変化率

Slope angle [%]	Up[mV]	Down[mV]
14.4	19.41	-22.28
8.9	16.37	-18.42
3.9	9.23	-10.70

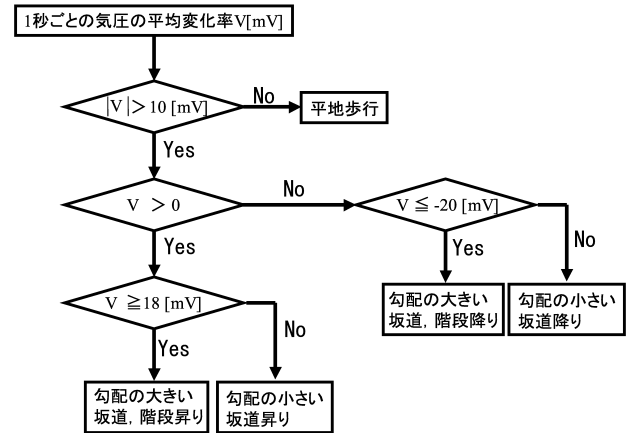


Fig. 8 上下方向の移動形態判別

と考えられる。また、14.4 [%] の坂道はかなり急であるため、10 [%] 以下の坂道と比べ、気圧変化も大きく、昇る場合には身体負荷も大きいので、階段昇降の場合の変化率が約  $\pm 30$  [mV] であることも考慮すると、昇りでは  $+18$  [mV] 以上、降りでは  $-20$  [mV] 以下の場合を「勾配の大きい坂道歩行および階段昇降」と判別することが可能だと考えられる。

そこで、従来の方法と設定した基準値を元に、

静止 平地歩行 階段降り 平地歩行 坂道(7.2[%])  
 降り 静止(折り返し地点) 坂道(7.2[%]) 昇り 平地歩行 階段昇り 平地歩行 静止

というように連続的に歩行形態を変えながら移動する実験を被験者 3 名に行い、移動形態判別を試みた。その判別結果を図 9 に示す。この結果から平地歩行、坂道歩行、階段昇降の判別が可能であることが確認できた。しかし、昇り始めや降り始めの部分では気圧の変化率が小さいために、移動形態の変更が多少遅れてしまうことがわかり、今後

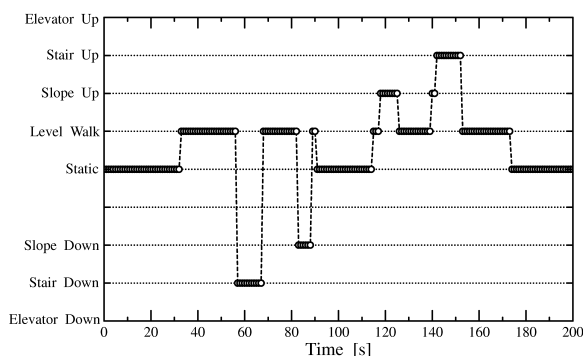


Fig. 9 移動形態判別結果

の課題といえる。

## 6. 結言

本研究では、より詳細な運動量を推定するために、歩行中の上下方向加速度から得られる歩調を用いた歩行速度推定法と坂道歩行の判別方法について検討を行った。実験の結果、歩行速度については歩幅、歩調、歩行速度の関係式から推定する方法を提案し、今後有効となる手段を求めることができた。また、移動形態に関しては、気圧信号に判別基準値を設けることで坂道歩行の判別が可能であることがわかった。本手法は Intelligent Calorie Counter を使用した消費カロリーの推定において非常に重要な役割を果たしており、有効なものといえる。

今後は、本研究で示した方法と従来の方法により、より詳細な消費カロリーの無拘束推定を実現する。さらに、推定した消費カロリーの妥当性を検討するために、酸素摂取量から得られる消費カロリー との比較も行う予定である。また、RMR 値に関して、坂道歩行などはあまり調べられてなく、従来の使用してきた階段昇降や坂道歩行時の指標においても酸素負債といわれる運動後の酸素消費を含んだ値ではない可能性があり、実際に平地歩行、坂道歩行、階段昇降時の酸素負債を含んだ RMR 値の調査を行う予定である。

## 参考文献

- 1) Eiji Ino-Oka, Showko Umeda, Yoshiharu Kutsuwa, Takashi Takahashi, Kouichi Sagawa, Takayuki Takahashi, Hikaru Inooka, “The Effects of an Angiotensin-Converting Inhibitor (Enalapril) on Patients with Mild Cardiac Failure Evaluating Cardiac Function Based on the Relationship between Daily Walking Pace and Heart Rate”, *Clinical Cardiology*, Vol.21, pp.893-898, 1998.
- 2) 高橋 隆行, 大沢 博文, 鈴木 明宏, 猪岡 光, “歩行形態分析アルゴリズムの開発と携帯型計測装置の試作”, *自動計測制御学会論文集*, Vol.32, No.7, pp.1057-1064, 1996.
- 3) 佐川 貢一, 伊奈 淳, 高橋 隆行, 石原 正, 猪岡 光, “加速度および大気圧を利用した人間の移動形態の推定”, *計測自動制御学会論文集*, Vol.35, No.2, pp.184-190, 1999.
- 4) Koichi Sagawa, Hikaru Inooka, Akihiro Suzuki, “Estimating the Consumed Calories While Walking Using a Non-restricted Measurement System of the Human Gait”, *Proceedings of the IASTED International Conference, MEASUREMENT AND CONTROL*, pp.112-117, 2001.
- 5) 佐藤 方彦, “人間工学基準数値数式便覧”, pp.200, 技報堂, 1992.
- 6) 杉山 允宏, 桐島 日出夫, 平谷 昭彦, 大八木 達也, “歩行のエネルギー消費”, *人間工学*, Vol.17, No.6, pp.259-265, 1981.
- 7) Robert L. Waters, Brenda Rae Lunsford, Jacquelin Perry, Richard Byrd, “Energy-Speed Relationship of Walking: Standard Tables”, *J Orthop Res*, Vol.6, No.2, pp.215-222, 1988.