

ウェアラブルセンサを用いた 発汗量推定モデルのパラメータ調整に関する一検討

濱谷 尚志^{*1} 内山 彰^{*1} 東野 輝夫^{*1} ^{*1} 大阪大学 大学院情報科学研究科
{ h-takasi, utiyama, higashino }@ist.osaka-u.ac.jp

1 はじめに

運動中の身体深部の体温（深部体温）ならびに発汗量を把握することは安全な運動を支援するために重要である．深部体温は鼓膜温や直腸温など，身体深部にできるだけ近い部位の温度を測定することで得られるが，運動中の測定は危険を伴うため困難である．一方，発汗量の測定については体重減少量を測定する必要があるため，運動時のリアルタイム計測は困難であったが，近年開発されたウェアラブル小型発汗センサにより装着部位の発汗量（局所発汗量）が推定できるようになったため，全身の総発汗量（全身発汗量）をリアルタイム推定できる可能性がある．

本研究では，運動中に装着可能な発汗センサにより局所発汗量をリアルタイムに計測することで，全身の発汗量，ならびに深部体温を推定することを目的とする．深部体温の推定は，センサから得られる生体情報ならびに温湿度などの環境情報を生体温熱モデルに与えることによって行う．全身発汗量は局所発汗量の総和と考えられるため，センサにより取得した局所発汗量を説明変数とした重回帰分析により，全身発汗量を推定できると考えられる．以降では，センサで取得した局所発汗量から全身発汗量を推定するモデルを発汗量モデルと呼ぶ．発汗量には個人差があると考えられるため，発汗量モデルは個人ごとに構築する必要がある．しかし，重回帰分析に必要なデータ収集は，被験者に発汗センサを装着し，複数回の運動と運動前後での体重減少量の測定を行う必要があるため被験者の負担が大きい．そこで本研究では，被験者の負担が少ない発汗量モデルの構築方法に関する検討を行った．

2 生体温熱モデルによる発汗量計算

人体の体温変化を評価する目的で，人体の熱産生，および体外への放熱をモデル化し体温の変化をシミュレートする方法がこれまでにいくつか提案されている [1, 2]．これらの生体温熱モデルでは人体を部分ごとに分割し各層において，隣接する層への熱勾配による熱移動，筋肉の代謝による熱の産生，血液との熱交換，および外界との熱移動を定式化することにより，各部位ごとの温度を算出する．生体温熱モデルでは発汗量の計算は体温の基準値との偏差に基づいて行われる．

Gagge の 2 ノードモデル [1] は，人体を深部と体表の 2 層からなる球体とみなすモデルであり，発汗，震え，皮膚血流量などの体温調節機構による温度変化は基準温度と体温の偏差によって定められる．Stolwijk が提案した 25 ノードモデル [2] では，2 ノードモデルよりもさらに詳細に人体を分割し，左/右腕，左/右脚，胴体，頭の 6 箇所を深部・筋肉・脂肪・皮膚の 4 層を考慮し，さらに血流を加えて合計 25 部位で熱計算を行う．以上のように生体温

熱モデルにおいては，入力として与える情報の粒度と計算量，精度はトレードオフの関係となっている．

しかし，実際の人体の運動に対する反応は必ずしも数理的に表現できない場合がある．例えば，運動の開始直後に深部体温が低下する現象 [3] についてはこれらの生体温熱モデルでは考慮することができない．従って，できるだけ正確な生体情報を得るためには，センサによって得られた生体情報や温湿度などの環境情報に基づき，体温や発汗量の実際の値を推定することが必要である．

3 提案手法

3.1 提案手法の概要

提案手法では，まずセンサから得た局所発汗量から計算した全身発汗量，環境の温湿度，運動量を生体温熱モデルに入力し深部体温を算出する．複数部位にセンサを装着することは難しいため，生体温熱モデルには 2 ノードモデルを用いる．2 ノードモデルによって毎分の深部体温の変化量が算出できる．2 ノードモデルには他にも初期体表温，初期深部体温， c_{lo} 値を入力として与える必要があるが，これらは事前に測定したり，参考値を元に与えることができる．2 ノードモデルによって得られた深部体温とセンサから得られた深部体温，および発汗量モデルから得られた全身発汗量と実測の総発汗量には誤差が存在するため，提案手法ではこれらの誤差が発汗量モデルのパラメータ誤りによって生じたものと仮定し，深部体温の誤差と発汗量の誤差の両方を小さくするようなパラメータを発見することで調整を行う．これによって，深部体温と発汗量の両方の予測精度を高める発汗量モデルのパラメータ調整を短時間，かつ少ない回数の運動により実現する．

3.2 基準発汗量モデルの構築

パラメータ調整の基準となる発汗量モデルを構築するために，事前実験を行った．夏季（8月10日～8月13日）に男性 2 名を対象に，空調を利用しない室内で試行毎に運動強度を変化させながら一定速度での 15 分間のエルゴメータ運動を 16 回行い，運動中の生体情報を収集した．総発汗量として運動前後の体重の減少を 5g 刻みで測定し，局所発汗量はルーセット・ストラテジー株式会社製の発汗センサ SNT-200 を左腕，胸部の 2 箇所に装着し測定した．また，パラメータ調整の基準となる深部体温はテクノサイエンス株式会社製の鼓膜温度センサ DBTL-2 を用いて測定した．

得られた局所発汗量と全身発汗量の組から重回帰分析を行い，全身発汗量 S_{total} ，腕部発汗量 S_1 ，胸部発汗量 S_2 について次の式を得た．

$$S_{total} = 0.4378 \times S_1 + 0.1213 \times S_2 + 0.0275 \quad (1)$$

3.3 発汗量モデルパラメータ調整方法

提案手法では，各個人の発汗量モデルを構築する際の労力を削減するため，基準発汗量モデルの構築時と同様の生体情報をセンサにより測定しながら短い運動を少ない回数行うことで，基準発汗量モデルのパラメータ（係

A Study on Parameter Adjustment for Sweating Model Using Wearable Sensors

Takashi Hamatani^{*1} Akira Uchiyama^{*1} Teruo Higashino^{*1}

^{*1} Graduate School of Information Science and Technology, Osaka Univ., Osaka Japan

数)を調整する．さらに, 2 ノードモデルでは考慮できない深部体温の運動直後の低下に対応するため, 2 ノードモデルによるシミュレーションを開始する時間についても調整を行う．

発汗量モデルの腕発汗量 S_1 , 胸発汗量 S_2 とそれぞれに対する重み w_1, w_2 および 2 ノードモデルによる深部体温の算出開始時間 t_s について事前に定めた範囲での調整を行う． w_1, w_2 の範囲は $[0.5, 2.0]$, t_s の範囲は $[0, 5](\text{min})$ とした．提案手法では, 以下の発汗量モデルに基づき全身発汗量 S_{total} を得る．

$$S_{\text{total}} = 0.4378 \times w_1 \times S_1 + 0.1213 \times w_2 \times S_2 + 0.0275 \quad (2)$$

パラメータ調整の対象となる被験者から得られた m_i 分の学習データ k 個に対して, 時刻 t における深部体温の実測値および 2 ノードモデルにより算出された深部体温の推定値をそれぞれ $T_{c,t}, T_{c,t}$ とすれば, i 番目の学習データに対する深部体温誤差 $e_{T,i}$ は以下のように定義される．

$$e_{T,i} = \sum_{t=1}^{m_i} |T_{c,t} - T_{c,t}| \quad (3)$$

また, 1 回の運動で 1 サンプルだけ取得可能な全身発汗量 $\hat{S}_{\text{total}}$ もパラメータ調整に用いる． i 回目の運動で得られた全身発汗量および発汗量モデルにより得られた推定値をそれぞれ $\hat{S}_{\text{total},i}, S_{\text{total},i}$ とすれば, 全身発汗量の誤差 $e_{S,i}$ は以下のように定義される．

$$e_{S,i} = |\hat{S}_{\text{total},i} - S_{\text{total},i}| \quad (4)$$

提案手法では, まず調整対象の 3 パラメータの全組み合わせについて, 学習データに対する $e_{T,i}$ および $e_{S,i}$ を算出する．全組み合わせに対して算出した $e_{T,i}$ および $e_{S,i}$ について, それぞれ誤差範囲が $[0, 1]$ となるよう正規化を行ったうえで, 以下で定義する誤差を最小化するような 3 パラメータの組み合わせを決定する．

$$\sum_{i=1}^k \alpha \cdot e_{T,i} + (1 - \alpha) e_{S,i} \quad (5)$$

α は $[0, 1]$ の値であり, 大きいほど深部体温誤差の最小化を重視したパラメータ調整を行うことを意味する．

4 性能評価

提案手法による発汗量, および深部体温推定精度を評価するために, パラメータ調整を行う対象の被験者から得られた 14 回, 合計 210 分の運動データを用いて性能評価を行った．14 回の運動データを学習セット, テストセットに分割し, 学習セットを用いてパラメータ調整を行った発汗量モデルを用いた場合のテストセットにおける発汗量, および深部体温の平均誤差を評価した．

14 個のデータのうち学習セットとテストセットを 7 個ずつに分割し, 学習セットの 7 個のうち実際に学習に用いるデータを 1 個から 4 個まで変化させた．また, 式 (5) の α を 0, 0.33, 0.5, 1 とした場合について評価を行った．

4.1 結果

学習データ数に対する発汗量および深部体温の平均誤差を図 1, 2 に示す．この結果より, 学習データ数が 1 の場合においても, 深部体温の誤差と発汗量の誤差の両方を均等に考慮した ($\alpha = 0.5$) パラメータ調整を行うことで, 発汗量の誤差, 深部体温の誤差をそれぞれ約 $0.25 (\text{g/min})$, $0.01 (^\circ\text{C/min})$ で推定でき, 深部体温, 発汗量のみを考慮したパラメータ調整と比べてバランスの良い調整が実現できていることが分かる．また, 学習データ数が増加す

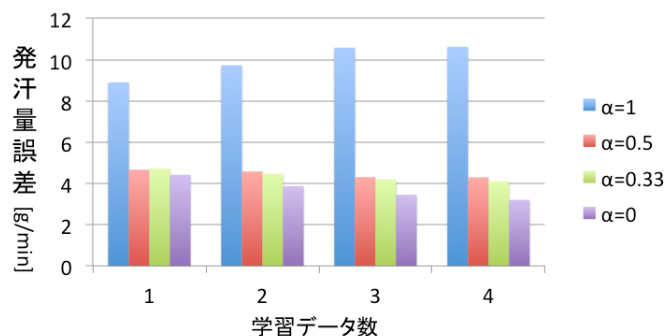


図 1: 平均発汗量誤差

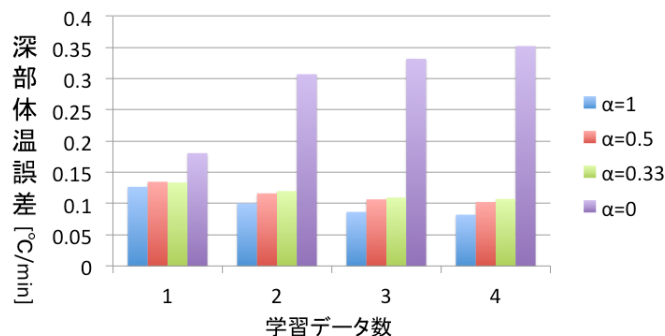


図 2: 平均深部体温誤差

ると, おおむね精度が向上していることが確認できるが, 深部体温については $\alpha = 0$, 発汗量については $\alpha = 1$ の場合に学習データ数が増加すると精度が低下している．この理由は $\alpha = 0, 1$ の場合, それぞれ発汗量, 深部体温のみを基準にパラメータ調整を行うためと考えられる．

以上の結果より, 15 分の測定を 1 回行うだけで被験者にとって負担が少なく精度の良い発汗量モデルを構築できることが分かった．

5 まとめと今後の課題

本稿では, 利用者の負担の少ない発汗モデルのパラメータ調整によって発汗量および深部体温の推定誤差を低減する手法を提案し, 評価を行った．

今後の課題として, 気候が異なる場合のデータからも妥当な発汗量モデルの構築が可能であるかを検証する必要がある．また, 多くの被験者から測定を重ねることで, より妥当な調整基準モデルの構築も望まれる．

参考文献

- [1] Gagge, A.: An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response, *ASHRAE Trans.*, Vol. 77, No. 2192, pp. 247–262 (1971).
- [2] Stolwijk, J. A.: A mathematical model of physiological temperature regulation in man, *National Aeronautics and Space Administration*, Vol. 1855, No. NAS 9-9531 (1971).
- [3] Oka, T. and Obara, S.: Changes in temperature of external auditory canal and sweat rate during 60-min pedaling exercise., *Journal of Human Sciences. Faculty of Integrated Arts and Sciences, the University of Tokushima*, Vol. 7, pp. 1–9 (1999).