

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 20 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26540036

研究課題名(和文)ウェアラブルセンサを用いた低コストなリアルタイム深部体温推定

研究課題名(英文)Real Time and Low Cost Core Temperature Estimation Using Wearable Sensors

研究代表者

内山 彰(Uchiyama, Akira)

大阪大学・情報科学研究科・助教

研究者番号：70555234

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：近年、緊急搬送される熱中症患者が急増するなど、熱中症の予防や早期検知が社会的に大きな課題になっている。熱中症は深部体温の過度な上昇により引き起こされるが、深部体温の測定には直腸温度や鼓膜温度など活動中に測定が困難な部位での体温測定が必要である。本研究では腕時計型センサなどでリアルタイム計測可能な心拍数と皮膚温度をもとに個人差を考慮し、生体温熱モデルに基づき深部体温の時間的な変動を高精度に推定する手法を提案している。性能評価により、60分の歩行運動に対して平均絶対誤差0.23℃で深部体温を推定できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：Monitoring core body temperature is important to prevent heat stroke. Core temperature is often measured as rectal or tympanic temperature which is difficult to monitor during activities. In this research, we have proposed a method to estimate core temperature based on the two-node human thermal model by using wearable sensors. For accurate estimation of body core temperature, the optimal set of parameter values representing individual thermoregulation function and physical condition is decided by comparing sensor measurements and simulation results based on the two-node model. The real experiments have revealed that the proposed method can achieve 0.23℃ error in core temperature estimation for 60 minute walking.

研究分野：モバイルコンピューティング

キーワード：ユビキタスコンピューティング モバイルヘルスケア ウェアラブルセンサ

1. 研究開始当初の背景

近年、夏季のスポーツにおける熱中症や、高齢者の室内における熱中症の発生が問題となっている。熱中症は運動や暑熱環境によって身体深部の体温(深部体温)が上昇することで発生するため、予防のためには鼓膜や直腸などの深部に近い部位の体温を測定する必要がある。しかし、運動中にこれらの部位の継続的な体温測定は困難であり、現状では湿球黒球温度(WBGT)など気温や湿度をもとにした熱中症の危険度予報にとどまっている。

深部体温の上昇の原因となる外気との熱交換や運動による熱発生は熱力学的に説明可能であり、気温や湿度などの環境条件をもとに、身体全体の熱収支を定式化することで、深部体温や皮膚温度を計算するための生体温熱モデルが多数存在する。これらの生体温熱モデルでは、年齢、性別、身長、体重などの基礎データをもとに基礎代謝が計算され、運動負荷をもとに運動代謝が計算される。代謝で発生された熱量は、呼吸や発汗などによって体外へ放出される。残りの熱量は体温の上昇に使われる。一般に、体温上昇による発汗量や血流量の増加の割合には個人差があるほか、その日の体調や暑熱環境に対する慣れにも影響を受ける。モデルにおいて、こういった個人差に関連するパラメータ(個人差パラメータ)を高精度に調整するための取り組みが行われているが、体表の複数部位や直腸、鼓膜などにプローブを装着しなければならなかったり、環境条件を調整可能な大掛かりな実験室が必要であるため、リアルタイムでの深部体温推定は困難であり、コストの面でも課題がある。

2. 研究の目的

本研究では、運動中のように直腸温度や鼓膜温度を直接測定できないような環境においても、腕時計型センサなどで容易に測定可能な心拍数と皮膚温度の計測値を用いて、深部体温を低コストかつリアルタイムに推定することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、様々な生体温熱モデルの中でも計算量が少ないGaggeの2ノードモデルをもとに、活動中でも常時測定可能な心拍数や皮膚温度などの生体情報と環境情報を用いてリアルタイムに個人差パラメータの特定を行うことで、ユーザに負担をかけずに高精度に深部体温を推定する手法を提案する。提案手法では、個人差パラメータの標準値の最大70%(10%刻み)の値を網羅的に生成することで合計3,200通りの個人差パラメータ値の組を生成し、それらに対して運動中の心拍数の変化や気温、湿度などの環境情報をもとに身体全体の熱収支や皮膚温度、深部体温を計算し、心拍数と同時に計測している皮膚温度の時間変化に最も近い個人差パラメータ

ータ値の組を特定し、それらの個人差パラメータ値の組に対する深部体温の時間的な変化を推定深部体温とする。

4. 研究成果

(1) 提案手法

概要

提案手法ではユーザが皮膚温度ならびに心拍数を測定可能な生体センサを装着し、暑熱環境下で活動している状況を想定する。近年ではBasisのように皮膚温度・心拍数を同時に計測可能な腕時計型センサが発売されている。また、ユーザの活動環境に設置された環境センサにより、温度、湿度、日射量が取得できるものとする。以上のセンサにより取得された情報は、携帯電話網などを通じてサーバに集約される。

サーバでは2ノードモデルに基づきユーザの身体の熱移動シミュレーションを行い、深部体温を推定する。2ノードモデルには個人差を表す4つのパラメータ(個人差パラメータ)が存在しており、深部体温を高精度に推定するためには、これらの個人差パラメータを適切に設定する必要がある。提案手法では、熱移動シミュレーションにより計算された皮膚温度と実測の皮膚温度との二乗誤差を最小化することで、最適な個人差パラメータを特定する。

2ノードモデルにおける熱移動計算式の概要

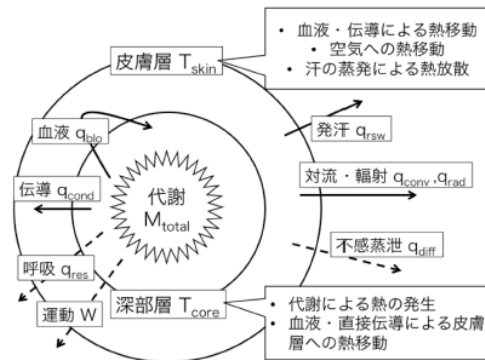


図1 Gaggeの2ノードモデル

Gaggeの2ノードモデルは図1のように人体を深部層(Core Layer)と皮膚層(Skin Layer)の二層から成る球体と見なし、これらの層と外部環境との間で移動する熱量を計算する。2ノードモデルは人体の分割数が少ない単純なモデルであるが、2ノードモデルの個人差パラメータを適切に設定することで、実際の生体反応を高精度に再現可能であることが分かっている。このため、提案手法では2ノードモデルを基に深部体温推定を行う。ただし、通常の2ノードモデルは屋内における利用を想定しており、日射による皮膚温度の上昇が式に組み込まれていない。そこで提案手法では、生体温熱モデルにおいて日射の影響を考慮する取り組み、および人体が受ける熱についての既存研究に基づき、

2 ノードモデルに日射の影響を組み込んでいる。

深部体温推定に必要な入力

表 1 提案手法の入力

事前情報	身体的特徴 (身長, 体重, 年齢, 性別), 衣服の熱抵抗, 運動の種類 (歩行, ジョギング, 自転車など), 安静時心拍数, 初期深部体温, 初期皮膚温度
環境センサ値	環境温度, 環境湿度, 環境日射量
生体センサ値	心拍数, 皮膚温度

表 1 に示すように, 提案手法の入力には大別して(1) 事前情報(2) 環境センサ値(3) 生体センサ値の 3 種類が存在する。事前情報とは, 身長, 体重などの身体的特徴, 衣服の熱抵抗, 運動の種類, 安静時の心拍数, および初期の深部体温・皮膚温度である。身体的特徴に基づき基礎代謝量, 深部層・皮膚層の質量, 血流量が決定される。また, 皮膚から空気に移動する熱は衣服の熱抵抗に依存する。運動の種類は筋肉から発生する熱量のうち, 外力に変換される率(仕事率)を決定するために用いる。代表的な運動における仕事率は既存の研究により示されており, 提案手法ではこれらの値を用いる。また, 2 ノードモデルでは単位時間毎の温度変化量を計算するため, 絶対温度を推定するには初期深部体温が必要となる。このため, 運動開始前に安静時の鼓膜温度を測定することで初期深部体温を与えるものとする。初期皮膚温度は生体センサの活動開始時の値を用いる。安静時心拍数は生体センサ値で得られた心拍数と組み合わせ, 運動強度に応じた代謝量(運動代謝量)を算出するために用いる。環境センサ値は温度, 湿度, 日射量であり, 一般に入手可能なセンサを用いて取得可能である。生体センサにより得られた皮膚温度は個人差パラメータの特定のための基準として利用する。

個人差パラメータの特定と深部体温の推定

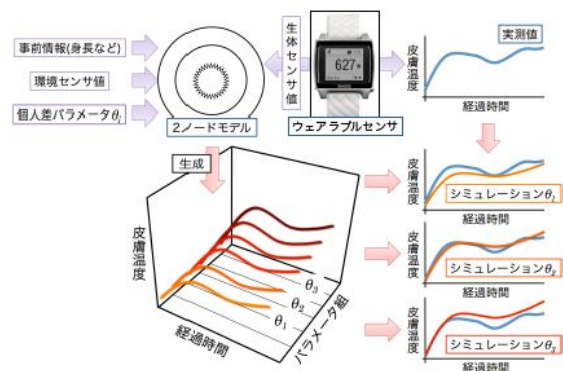


図 2 提案手法の概要

後述する 4 つの個人差パラメータそれぞれの値の組み合わせを特定すれば, シミュレーションにより対応する皮膚温度, 深部体温のそれぞれの時刻 0 から時刻 t までの系列が

得られる。このとき, シミュレーションへの入力として で述べた事前情報ならびに推定開始時刻 0 から時刻 t までに得られた単位時間毎の環境・生体センサ値が与えられる。

個人差パラメータを適切に決めることができれば, モデルによって実測に近い深部体温と皮膚温度が計算できる。そこで, 提案手法では活動中に測定可能な皮膚温度を基準に個人差パラメータを決定することで, 高精度な深部体温の推定を行う。そのために, 図 2 に示すように提案手法では総当たりによりユーザに最適な個人差パラメータの組み合わせを特定する。提案手法では, 皮膚温度の実測値とシミュレーション値の二乗誤差を最小化するような組み合わせを最適な個人差パラメータとする。

深部体温推定アルゴリズム

2 ノードモデルでは時刻 t の深部体温 $T_{core}^{t[]}$, 皮膚温度 $T_{skin}^{t[]}$ およびセンサから得られた入力に基づき, 時刻 t から時刻 t + 1 での深部層, 皮膚層の温度変化量 $T_{core}^{t[]}$, $T_{skin}^{t[]}$ を計算する。これらを時刻 t の $T_{core}^{t[]}$, $T_{skin}^{t[]}$ に加算することによって, 時刻 t+1 の深部体温 $T_{core}^{t+1[]}$, 皮膚温度 $T_{skin}^{t+1[]}$ を算出する。これを繰り返すことにより, 各時刻での深部体温, 皮膚温度を計算する。また, 前述の通り, 提案手法では考えられる全ての個人差パラメータの組み合わせについて皮膚温度の時系列 $T_{skin}^{t[]}$ を求め, 実測の皮膚温度と比較することで最適なパラメータ組を決定する。

(2) 個人差パラメータ

運動や暑熱環境によって深部体温や皮膚温度が上昇すると, 人体は皮膚の血管を拡張させることで深部層から皮膚層へ血液を通じて熱を運び, 空気中へ放出する。また, 発汗を促し, その気化熱を利用して皮膚温度を下げることで皮膚層, 深部層の温度の上昇を抑制する。これらの体温調節機構には個人差があることが知られている。

2 ノードモデルにおける暑熱環境での個人差は, 発汗反応や血流量増加の感度として表される。既存研究では, 安静時の血流量 V_{blo} および発汗量 m_{rsw} の個人差を考慮した計算式が定義されており, 深部体温および皮膚温度それぞれの初期値に対する上昇分に応じて, 血流量および発汗量が増加する。提案手法では, これらの計算式に対して, 運動時を考慮した項を追加し, それぞれの項にかかる合計 4 つの係数を個人差パラメータとする。

提案手法では, これらの個人差パラメータに対し, 2 ノードモデルで用意されている標準値を基準にプラスマイナス 70% 以内の値を 10%刻みで網羅的に生成し, それら全ての組み合わせに対して 2 ノードモデルの計算式に従って熱移動シミュレーションを行う。組み合わせの総数は 3,200 通りである。

(3) 性能評価

評価環境

提案手法の評価のため、協力者7人が実際に暑熱環境で運動を行い、合計52時間の運動データを収集した。被験者はセンサ Basis および心拍センサ adidas micoach を装着し、時速5kmで60分間の歩行を行った。Basisは手首にベルトを締めることで固定し、歩行時の手の動きによりずれないようにした。また、深部体温の真値として赤外放射式の鼓膜温度計 DBTL-2 を用いて鼓膜温度を測定した。さらに環境計 WBGT-203B を携帯し、運動中の気温および湿度も収集した。評価指標は運動開始時刻0からtまでの深部体温の絶対誤差の時間平均(平均絶対誤差)である。

比較対象として、(1) 個人差パラメータの標準値を用いる場合(DEF)、(2) 深部体温の実測値に基づき個人差パラメータを決定した場合(OPT)を考える。OPTは実際に測定した深部体温との二乗誤差を最小化するように個人差パラメータの組を決定した場合であり、2ノードモデルにおける平均絶対誤差の下限である。

シミュレーションにおける皮膚層、深部層の温度変化の計算単位時間を1分とし、メモリ23.6GB、Intel Xeon 2.66GHzを搭載した計算機で60分の実験データに対し提案手法を実行したところ、個人差パラメータの特定に要した時間は約1秒であり、深部体温のリアルタイム推定に十分な計算時間であった。

実験結果

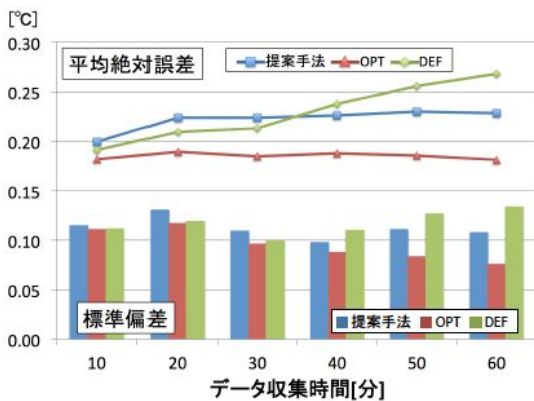


図3 深部体温の平均絶対誤差

個人差パラメータ特定に用いるデータの収集時間と精度の関係を明らかにするため、全員分のデータについて、運動開始後10分から運動終了時点(60分後)までのそれぞれの時刻について、その時点までに収集された情報から個人差パラメータの特定を行った結果を図3に示す。

DEFの場合個人差パラメータは固定であるため、パラメータの特定に要する時間の影響を受けないにも関わらず、時間とともに平均絶対誤差が増加している。この原因として2ノードモデルでは実際の深部体温変化を

完全に再現できないことが挙げられる。このことは、OPTの場合であっても一定の誤差が存在することからも分かる。2ノードモデルでは深部体温の変化が滑らかであるのに対して、実際の深部体温は細かい上下を繰り返しながら変化する。従って、時間平均を取った場合でも誤差が生じることは避けられない。この点、提案手法では運動開始後20分を経過すると誤差が約0.23に収束しており、時間経過による増加は起こっていない。提案手法の運動開始直後の推定誤差はDEFに劣っているが、この原因として運動開始直後の皮膚温度の変化が急なため、その変化だけを再現するように個人差パラメータを決定すると深部体温の推定において誤差が大きくなってしまふことが考えられる。このことは、運動開始後10分から30分まで、提案手法において標準偏差が大きくなっていることから分かる。

一方で提案手法のDEFに対する相対的な誤差は運動開始40分以降、時間の経過とともに小さくなっている。また、40分経過以降は標準偏差もDEFに対し小さくなっている。この結果から、提案手法はパラメータ特定に用いるデータの時間が長いほどDEFに対して誤差が小さくなることが分かった。すべての被験者の全日程における最終的な深部体温の平均絶対誤差は約0.23であり、DEFと比較して約15%、誤差軽減の性能限界であるOPTを基準とすると、DEFと比較して約45%の誤差軽減を確認した。また、60分時点での深部体温の真値との誤差、および標準偏差は提案手法、OPT、DEFでそれぞれ 0.04 ± 0.38 [], 0.03 ± 0.25 [], 0.22 ± 0.36 [], となっており、標準パラメータを用いる場合より真値に近いシミュレーションを行えていることが分かる。以上より、提案手法によってリアルタイムにパラメータ特定を行うことの有用性が確認できた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計1件)

濱谷 尚志, 内山 彰, 東野 輝夫, "ウェアラブルセンサと生体温度モデルを用いた暑熱環境下での深部体温推定の一手法", 情報処理学会論文誌, Vol. 56, No. 10, pp. 2033-2043, 2015年10月.

[学会発表](計7件)

東野 輝夫, 内山 彰, 濱谷 尚志, "熱中症センサを用いた深部体温推定とアスリートの活動量評価", e-textile/e-garment 研究会, 愛知, 2016年1月.

Akira Uchiyama, Takashi Hamatani, and Teruo Higashino, "Estimation of Core Temperature Based on a Human Thermal Model Using a Wearable Sensor", in Proceedings of IEEE 4th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2015), Osaka,

Japan, October 2015.

濱谷 尚志, 内山 彰, 東野 輝夫, “ 装着型センサを用いた生体温熱モデルにおける日射量のモデル化とパラメータ調整法の提案 ”, マルチメディア、分散、協調とモバイル(DICOMO2015)シンポジウム, 岩手, 2015 年 7 月 .

Takashi Hamatani, Akira Uchiyama, and Teruo Higashino, "Real-Time Calibration of a Human Thermal Model with Solar Radiation Using Wearable Sensors", in Proceedings of the 2015 workshop on Wearable Systems and Applications (WearSys '15), pp. 45-50, Florence, Italy, May 2015.

Takashi Hamatani, Akira Uchiyama, and Teruo Higashino, "Estimating Core Body Temperature Based on Human Thermal Model Using Wearable Sensors", in Proceedings of the 30th ACM/SIGAPP Symposium On Applied Computing (SAC 2015), pp. 521-526, Salamanca, Spain, April 2015.

濱谷尚志, 内山彰, 東野輝夫, “ ウェアラブルセンサを用いた生体温熱モデルに基づく深部体温推定法の提案 ”, 情報処理学会第73回MBL研究会, pp.1-8, 福岡, 2014 年 11 月.

濱谷尚志, 内山彰, 東野輝夫, “ ウェアラブルセンサを用いた深部体温推定に関する一検討 ”, 情報処理学会第72回MBL研究会, 神奈川, pp.1-5, 2014 年 8 月.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

内山 彰 (UCHIYAMA, Akira)

大阪大学・大学院情報科学研究科・助教

研究者番号 : 7 0 5 5 5 2 3 4

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし