

2Y-06

サーモグラフィを用いた暑熱環境における非接触な深部体温推定法の検討

平野 華織^{*1} 工藤 寛樹^{*2} 内山 彰^{*2} 栗野 聡^{*3} 千田 泰史^{*3} 丸谷 賢弘^{*4}
 長谷川 凌佑^{*4} 横山 光樹^{*4} 中田 研^{*4}

^{*1} 大阪大学基礎工学部^{*2} 大阪大学大学院情報科学研究科^{*3} 株式会社サンワイズ^{*4} 大阪大学大学院医学系研究科

1 はじめに

熱中症は深部体温の上昇により発生することから、運動時の熱中症予防のためには深部体温をモニタリングすることが重要である。深部体温は臓器などの身体中枢付近の温度であり、その測定にはプローブを直腸や耳に挿入する必要がある。これらの測定方法は侵襲性を伴うため、安全性の観点から動きを伴う運動時に用いることは難しい。経口カプセル型センサを用いた深部体温モニタリング手法^{*}も実用化されているが、センサは使い捨てかつ高価であるためにコストに課題がある。これまでに、我々の研究グループでは、腕時計型のウェアラブルセンサを用いた深部体温推定手法 [1] を提案しているが、運動の種類によっては腕時計型センサの着用が困難な場合がある。さらに、クラブ活動などのアマチュアスポーツを想定した場合、多数のセンサを導入するコストが問題となる。また、デバイスの装着が不要な手法として、サーモグラフィを用いた深部体温推定法も存在する [2,3]。これらの手法では、顔の各部位の皮膚温度を用いて深部体温を推定しているが、発熱者の検出を目的としているため、様々な動きを伴う運動時に適用可能な手法の検討はされていない。

そこで本研究では、運動時におけるデバイス装着が不要、かつ低コストな深部体温モニタリングの実現を目的として、サーモグラフィの利用を検討する。具体的には、暑熱環境下の走行時において、被験者の顔の熱画像から部位別の表面温度を取得し、機械学習により深部体温推定のための回帰モデルを構築する。さらに、顔表面温度を取得する部位の特徴量検討や推定性能の個人差について考察を行う。

2 提案手法

提案手法では、サーモグラフィを用いて、運動時における被験者の顔の部位別の表面温度を取得し、深部体温を推定する。深部体温の推定には機械学習を用いる。本稿では基礎的な検討のため、重回帰 (Linear) とニューラルネットワーク (NN) を回帰モデルとして使用する。

図 1 に示すように、サーモグラフィにより取得可能な顔付近の可視画像と熱画像に対し、可視画像向けの部位検出器[†]を用いることで下唇 (lower_lip)、上唇 (upper_lip)、首 (neck)、鼻 (nose)、顔 (skin) の表面温度を取得する。まず、顔検出器[‡]を用いて顔付近の可視画像から顔の矩形を自動検出する。その後、得られた顔領域可視画像に対して、既存の可視画像向けの部位検出器を用いて部位検出を行う。検出の結果、得られる各部位の位置に対応する熱画像上のピクセルから表面温度を取得し、各部位の表面温度の平均値を瞬間部位別表面温度とする。

以上の手法により得た瞬間部位別表面温度を用いて、過去の瞬間部位別表面温度の統計値 (過去 5 分間の平均値、中央値、最大値、最小値、分散、標準偏差) を取得し、深部体温推定モデルの入力として与える。

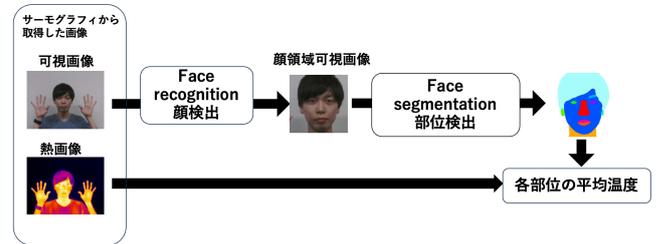


図 1: 部位別表面温度取得の手法概要

3 性能評価

3.1 評価環境

暑熱環境下を想定し、室温 40°C、湿度 40% の環境室内におけるトレッドミル上での走行時データを収集した。被験者は 20 歳前後の男性 6 名、女性 5 名であり、走行時間は 30 分間とした。走行中は、サーモグラフィにより顔付近の画像データを、経口カプセルセンサにより真値となる深部体温をそれぞれ取得した。深部体温の推定性能は leave-one-subject-out 交差検証を用いて平均絶対誤差 (MAE) により評価する。

3.2 特徴量選出

深部体温推定モデルに与える部位別特徴量選出を行うため、まず、唇、首、鼻、皮膚の 4 つの瞬間部位別表面温度を用いて網羅的な説明変数の組を 15 個作成した。各説明変数の組を Linear, NN それぞれに与えたときの平均 MAE を比較することにより特徴量選出を行う。

その結果、両方の回帰モデルにおいて平均 MAE が最小となった説明変数の組は、唇と皮膚の部位別特徴量を用いた場合であった。このときの Linear, NN における被験者 MAE 分布をそれぞれ図 2、図 3 中に緑の箱ひげ図で示す。比較のため、部位別特徴量単体からなる 4 つの説明変数の組 ({upper_lip, lower_lip}, {neck}, {nose}, {skin}) と、overall (顔から首にかけての全領域における平均表面温度) のみを説明変数として用いた場合の MAE 分布を示す。

図 2、図 3 の箱ひげ図より、説明変数 {skin, upper_lip, lower_lip} の組では両方の回帰モデルにおいて全体の 75% の被験者の MAE が 0.60°C 未満であり、他の説明変数の組と比べて全体的に MAE が抑えられていることが確認された。特に overall との比較からは MAE が 0.55°C 以下となる被験者が多くなり、部位抽出の効果が検証された。

部位別表面温度と深部体温との相関係数比較を表 1 に示す。唇、首、鼻、皮膚の 4 つの部位から取得された瞬間部位別表面温度のうち、首と鼻は他の部位と比べると深部体温との正の相関が小さいため、深部体温推定の特徴量として選出されなかったと考えられる。

3.3 過去の統計値の効果

平均 MAE の値が最小となった唇と皮膚の部位別特徴量を用いた組に対し、過去の統計値を深部体温推定モデルの

^{*}<https://www.bodycap-medical.com/>[†]<https://github.com/zllrunning/face-parsing.PyTorch>[‡]https://github.com/ageitgey/face_recognition

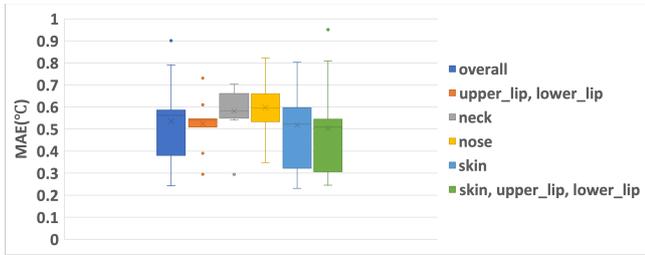


図 2: Linear における説明変数ごとの MAE 分布

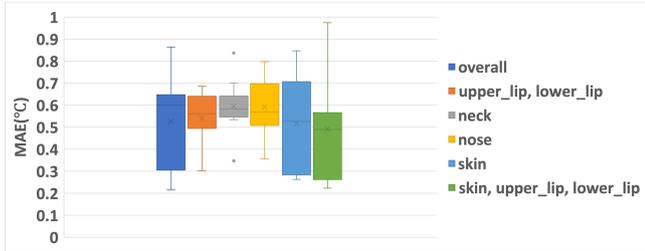


図 3: NN における説明変数ごとの MAE 分布

表 1: 部位別表面温度と深部体温との相関係数比較

取得部位	相関係数の平均値
唇	0.233
首	0.157
鼻	0.128
皮膚	0.363

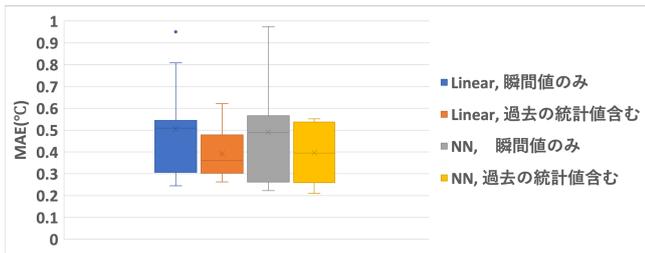


図 4: 唇と皮膚の部位別特徴量を推定モデルに与えた際の MAE 比較

入力として与えることの効果を検証する。瞬間部位別表面温度のみを入力として与え推定した性能と、2 節で述べた過去の部位別表面温度の統計値を追加し、入力とした場合の性能を比較する。

図 4 に示す MAE 分布より、Linear、NN 両方の場合において過去の統計値を含めた方が MAE 分布のばらつきが小さくなったといえる。また MAE の平均値の変化については、Linear では 0.505°C から 0.392°C 、NN では 0.491°C から 0.396°C となっており、ともに約 0.10°C 減少している。この結果より、過去の統計値を考慮することによって、全体的な MAE の改善に寄与することが分かった。

3.4 推定モデルによる性能差と個人差分析

Linear、NN 各回帰モデルにおいて、唇と皮膚の部位別表面温度を入力としたとき、ある被験者における推定深部体温と、実際に測定した深部体温の推移を図 5、図 6 に示す。回帰モデルごとの推定精度を見ると、NN では推定深部体温上昇が緩やかであるのに対し、Linear では上下に振動しながら上昇していく違いがある。これはサーモグラフィにより取得される皮膚温度そのものが上下に振動していたことが一因として考えられる。

また、両方のモデルに共通して推定深部体温の全体的な上

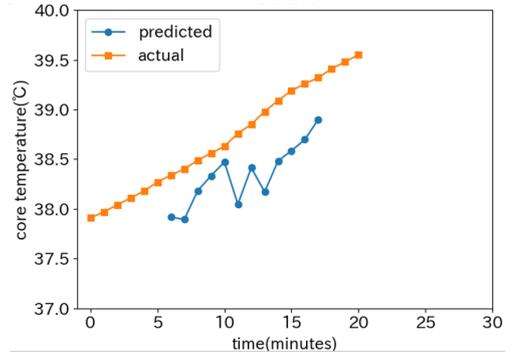


図 5: Linear における推定深部体温と測定深部体温推移

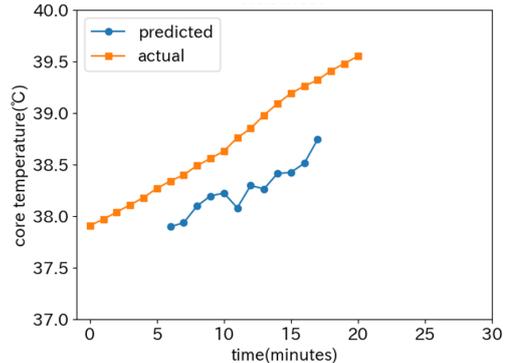


図 6: NN における推定深部体温と測定深部体温推移

昇は確認されたが、測定深部体温より低く推移していることがわかる。この被験者は、皮膚の部位検出が正確に行われていない時刻があり、首や衣服の一部の表面温度から部位別表面温度が算出されたことが原因と考えられる。

4 おわりに

本研究では、運動時における非接触な深部体温モニタリングを目的として、被験者の顔の熱画像から部位別表面温度を取得し、機械学習により深部体温を推定する手法を検討した。部位別表面温度は、可視画像の部位検出器から得られる部位ごとの座標情報と熱画像を重畳することで取得した。部位別特徴量選出の結果、唇と皮膚の表面温度を用いて推定を行うと平均 MAE は約 0.39°C となり、部位抽出の効果が確認された。

参考文献

- [1] 濱谷尚志, 内山彰, 東野輝夫. 多様な運動負荷を考慮した装着型センサによる深部体温推定法の提案. 情報処理学会論文誌, Vol. 58, No. 11, pp. 1818–1831, 2017.
- [2] Chayabhan Limpabandhu, Frances Sophie Woodley Hooper, Rui Li, and Zion Tse. Regression model for predicting core body temperature in infrared thermal mass screening. *IPEM-Translation*, 2022.
- [3] Nawatt Silawan, Koichi Kusakame, Khai Jun Kek, Win Sen Kuan. A novel environment-invariant core body temperature estimation for high sensitivity and specificity fever screening. In *Proceedings of the 2018 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pp. 1612–1615, 2018.