

# 腕装着型センサを基準とした 簡易型サーモグラフィ補正法の提案

吉川 寛樹<sup>1</sup> 内山 彰<sup>1</sup> 東野 輝夫<sup>1</sup>

**概要:** 近年サーモグラフィの小型化により非接触な温度計測は身近になりつつある。しかし、そのような簡易型サーモグラフィによる温度測定は、高性能サーモグラフィに比べ誤差が大きい傾向にある。この原因としては環境変化に対するパラメータ調整の影響などが存在する。一方でこの測定誤差は熱画像全体に対してほぼ均一に影響する。このため簡易型サーモグラフィにおいても熱画像内の任意の2点間の温度差は非常に高精度に測定することが可能である。本研究ではこの特性を利用し、画像内に温度が既知である基準熱源を写り込ませることによる、測定値の補正法を提案する。提案手法では、まず腕装着型センサから取得した誤差の小さい体表温度測定値をもとに、基準熱源とする手のひらの温度を推定する。推定した手のひら温度と熱画像内の手のひら温度を比較することで、熱画像全体のバイアスを算出し、熱画像の温度データを補正する。性能評価のため男性8名を対象とした実験を行った結果、平均絶対誤差が32%減少することを確認した。

## 1. はじめに

人の皮膚温度計測は熱中症 [1] や発熱を伴う感染症 [2] の早期発見への利用や、ストレス [3] や温熱快適度 [4,5], 感情 [6] など心理状態を表す指標として利用されており盛んに研究が行われている。皮膚温度の計測手段としてサーモグラフィは計測の手軽さ、面的かつ非接触にデータを取得できる点で優れているため、注目を集めている。近年ではサーモグラフィの小型化が進み、スマートフォンで使うことができる製品が発売されている。このようなサーモグラフィの例として、FLIR社のFLIR ONE [7] が登場しており、サーモグラフィによる温度計測が場所を問わず容易に行える環境が整いつつある。

サーモグラフィには赤外線検知方法の違いから量子型と熱型が存在する [8]。簡易型サーモグラフィは小型のため冷却装置の搭載が難しいことから、一般的に熱型が採用されている。熱型のサーモグラフィは赤外線の検知素子の温度上昇を電気信号に変換し、測定対象物の放射率を考慮して物体の温度を算出する。一般的な熱型サーモグラフィの測定誤差の要因としては測定対象物、測定環境に対する放射率などのパラメータ設定、カメラの温度上昇などによる計測信号の揺らぎの影響、温度センサの性能やパッケージングの影響が存在する [8]。これらの影響から、簡易型

サーモグラフィは高機能なサーモグラフィと比較して測定誤差が比較的大きく、測定誤差は $\pm 3^{\circ}\text{C}$ あるいは $\pm 5\%$ 程度と人の皮膚温度の変化を捉える用途で使用することは難しい。そこで本研究では簡易型サーモグラフィを用いた前述のようなヘルスケアアプリケーションを実現するため、腕装着型センサを基準とした簡易型サーモグラフィ補正法を提案する。

簡易型サーモグラフィにおいて、測定誤差要因は熱画像全体に対してほぼ均一に影響するため熱画像内の任意の2点間の温度差は高精度に測定可能である。提案手法ではこの特性に着目し、測定範囲内に基準熱源を設けることで簡易型サーモグラフィの測定値を補正する。まず温度が既知である熱画像内の特定部位を基準とし、簡易型サーモグラフィによる測定値と基準値を比較する。それらの差をもとに測定対象部位の温度に対し補正を行う。多くのアプリケーションでは人の顔表面温度を用いるため、基準熱源は放射率の等しい人体の一部を利用する。体表温度の高精度な測定手段として腕装着型センサを用いるが、装着部位はサーモグラフィから測定することができない。そこで提案手法では、線形回帰モデルによって、腕装着型センサで取得した手首温度から手のひら温度を推定し基準熱源として用いる。

評価では、手首温度と手のひら温度には相関係数  $R = 0.953$  の関係があり、線形モデルにより高精度に手のひら温度を推定できることを確認した。また、提案手

<sup>1</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science & Technology, Osaka University



図 1: 提案手法の概要

法により簡易型サーモグラフィの測定誤差が32%軽減されることがわかった。

## 2. 提案手法

### 2.1 概要と想定環境

提案手法の概要を図1に示す。本研究では利用者が日常生活において腕装着型センサを装着し、リアルタイムで手首の体表温度を取得できる環境を想定している。提案手法ではサーモグラフィにより可視画像と熱画像、腕装着型センサより手首体表温度の入力が与えられるものとする。サーモグラフィから対象部位の温度抽出を行うにあたり、可視画像と熱画像の取得に異なるカメラが用いられていることから、位置ずれが生じる。このずれを補正した上で各部位の温度を抽出する。最後に基準部位と測定対象部位の温度の差を相対温度とし、基準温度と相対温度から測定対象温度を算出する。

### 2.2 画像位置合わせ

可視画像と熱画像は位置が異なるレンズを用いて撮影されるため、各画像には数ピクセルの位置ずれが存在する。図2に示すように、取得した各画像を重ね合わせると指先などの小さな部位では位置ずれが温度抽出に大きく影響する。文献[3]のように鼻先の温度を利用するなど、アプリケーションによっては人体の局所的な部位の温度測定が必

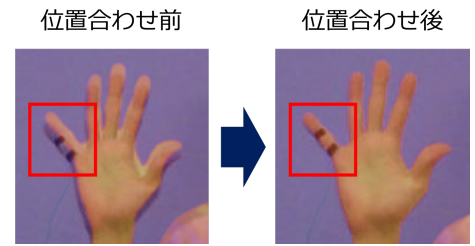


図 2: 可視画像と熱画像の位置合わせ方法

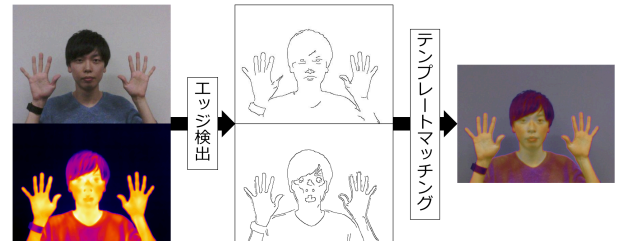


図 3: 可視画像と熱画像間の位置ずれ補正方法

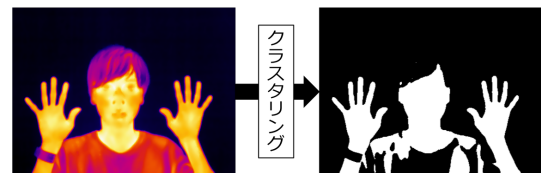


図 4: クラスタリングによる体表部位の識別

要となることがある。したがって正確に可視画像に対応する温度を抽出するためには、位置合わせを行う必要がある。

可視画像と熱画像の位置合わせ方法を図3に示す。まず両画像に対しCannyアルゴリズム[9]を用いてエッジ検出を行う。次に、エッジ検出を行った両画像に対し、ガウシアンフィルタを用いて平滑化を行った後、類似度に正規化相互相関を用いたテンプレートマッチング[10]により位置合わせを行う。

### 2.3 温度の抽出

位置合わせにより、可視画像内の任意のピクセルの温度を熱画像から抽出することができる。本研究では測定対象の顔と基準熱源である手のひらの温度の抽出を行う。可視画像から顔と手のひらを検出するためにOpenCVのHaar-Like特徴[11]によって作成した物体検出器を用いる。これにより検出対象の画像内位置を矩形として得ることができる。検出矩形には背景や衣服の領域が含まれるため、これらを除去して体表温度のみを抽出する必要がある。提案手法では顔と手のひらそれぞれに対しそれらの性質の違いから異なる手法を用いる。

顔を識別するために熱画像内のすべての温度に対してk-means++法[12]を用いてクラスタリングを行う。クラスタリングの様子を図4に示す。提案手法では $k=2$ とし、温度が最も高いクラスタを体表温度として扱う。これにより熱画像内の体表温度である領域を識別する。

一方、手のひらは気温の影響を受けやすく、気温の低い環境下では壁などの背景の温度とほぼ等しい温度となることがある。この場合顔と同様に熱画像に対しクラスタリングによる手法を用いると人体と背景との境界を正確に定められず、手のひら全体の温度を抽出することができない。そこで文献 [13] の手法を用いて肌領域の検出を行う。本研究では RGB 色空間の緑成分と HSV 色空間 [14] の彩度の値を用いて領域の判定を行う。

以上により識別された顔と手のひらの領域ピクセルの温度の平均を各部位の温度とする。具体的には顔温度を  $T_{\text{meas}}$ 、手のひら温度を  $Th_{\text{meas}}$  とすると、

$$T_{\text{meas}} = \frac{\sum_{(x,y) \in F} T(x,y)}{n(F)} \quad (1)$$

$$Th_{\text{meas}} = \frac{\sum_{(x,y) \in H} T(x,y)}{n(H)} \quad (2)$$

と表せる。 $T(x,y)$  は座標  $(x,y)$  の温度であり、 $n(X)$  は集合  $X$  の要素の個数である。また、 $F, H$  はそれぞれ

$$F = \{(x,y) | (x,y) \in R_{\text{face}} \cap C_{\text{skin}}\}$$

$$H = \{(x,y) | (x,y) \in R_{\text{hand}} \cap S_{\text{hand}}\}$$

である。 $C_{\text{skin}}$  は体表温度クラスタに含まれる座標  $(x,y)$  の集合、 $S_{\text{hand}}$  は色空間により検出した肌領域に含まれる座標  $(x,y)$  の集合である。 $R_{\text{face}}$  および  $R_{\text{hand}}$  はそれぞれ可視画像において検出された顔および手のひらの領域内の座標  $(x,y)$  の集合である。

## 2.4 基準熱源温度推定

基準とする手のひら温度推定値を得るため、腕装着型センサにより取得した手首の体表温度に基づく推定式を構築する。3章の評価で用いたデータセットに対して、目的変数を手のひら温度  $Th_{\text{est}}$  とし、説明変数を手首温度  $Tw$  とし、線形回帰を行うと、推定式は式 (3) のようになった。この推定式による平均絶対誤差 (MAE) は  $0.6255^\circ\text{C}$  であった。

$$Th_{\text{est}} = -7.9503 + 1.2251Tw \quad (3)$$

## 2.5 顔温度の補正

2.3 節、2.4 節で得られた手のひら温度から顔表面温度の補正値を式 (4) で求める。ここで  $T_{\text{corr}}$  は顔温度補正値、 $Th_{\text{est}}$  は手のひら温度の推定値、 $C$  は手のひらと顔の相対温度、 $T_{\text{meas}}$  は顔温度の実測値、 $Th_{\text{meas}}$  は手のひら温度の実測値を示す。実測値はすべて簡易型サーモグラフィにより取得した値である。

$$T_{\text{corr}} = Th_{\text{est}} + C$$

$$C = T_{\text{meas}} - Th_{\text{meas}} \quad (4)$$

表 1: FLIR T540 および FLIR ONE 仕様

	FLIR T540	FLIR ONE
赤外線カメラの解像度	464 × 348	160 × 120
温度精度	±1°C or ±1% (10–35°C)	±3°C or ±5% (0–35°C)
温度分解能	0.04°C	0.15°C

## 3. 評価

### 3.1 評価環境

評価のため実環境においてデータ収集を行った。データ収集では高性能サーモグラフィ FLIR T540 [15]、簡易型サーモグラフィ FLIR ONE [7]、腕装着型センサ E4 wristband [16] を使用した。FLIR T540 と FLIR ONE の仕様を表 1 に示す。また、E4 wristband はサンプリングレート 4Hz、分解能は  $0.02^\circ\text{C}$ 、測定精度は  $\pm 0.2^\circ\text{C}$  (対象温度  $36\text{--}39^\circ\text{C}$ ) である。データ収集のための実験は、20 代男性 8 名に対し 1 日 6 時間、30 分ごとにサーモグラフィ撮影を行った。サーモグラフィは 1 回の撮影で 10 秒ごとに 7 回撮影を行う。各被験者は 1 日または 2 日間実験に参加した。実験中、被験者は E4 wristband を装着し、実験室内にて日常通り作業を行う。撮影は両手のひらを正面に向け、顔と手のひらが重ならないような姿勢で行った。欠損しているデータを除き、合計 929 個のデータが得られた。1 名あたりのデータ数は最大 189 個、最小で 69 個であった。

### 3.2 補正の効果

精度の評価は、高性能サーモグラフィにより測定した顔温度を真値としたときの誤差を比較することにより行う。提案手法の比較対象として、補正を行う前の測定値と式 (4) において  $Th_{\text{est}}$  の値に高性能サーモグラフィの測定値を用いた補正値を用いる。誤差の分布を図 5 に示す。図 5 の箱ひげ図では、中心の赤い線が中央値、箱の上端と下端がそれぞれ第三四分位数と第一四分位数を表している。ひげの最大長は第三四分位数と第一四分位数の差の 1.5 倍であり、その外側の分布を外れ値としてプロットしている。

補正前 (図 5: 左) と提案手法 (図 5: 中央) を比較すると外れ値が減少し、誤差のばらつきが小さくなっていることが確認できる。また中央値を比較すると簡易型サーモグラフィの測定値が正の方向に偏っているのに対して、提案手法では中央値が 0 に近づき、偏りを補正できていることがわかる。また補正前、提案手法それぞれの MAE は  $0.6172^\circ\text{C}$ 、 $0.9359^\circ\text{C}$  であった。さらに、基準とする手のひら温度に真値を用いた場合 (図 5: 右) の評価を行ったところ、測定精度が飛躍的に向上し、MAE は  $0.2199^\circ\text{C}$  となった。

さらなる補正精度向上のためには基準熱源の正確な温度

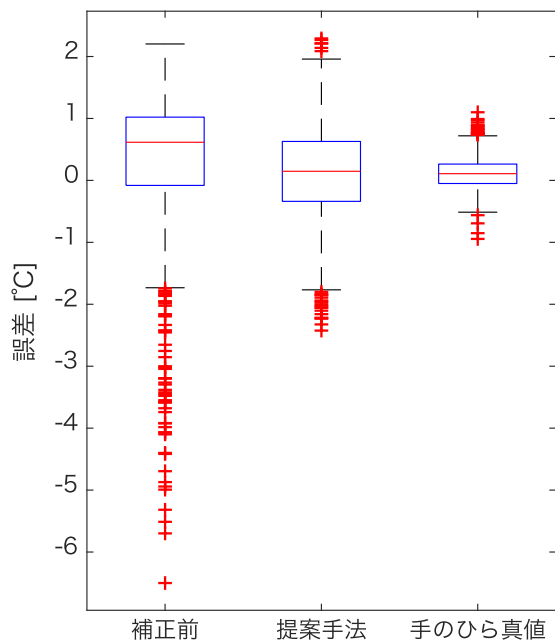


図 5: 測定精度の比較

を取得する必要がある。手首温度から手のひら温度を推定する精度を向上させることや、手のひらより正確な温度を取得できる他の部位を基準熱源とすることで精度が向上すると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では簡易型サーモグラフィの特性を利用し、腕装着型センサを基準とした測定温度の補正法を提案した。提案手法を用いて顔の測定温度を補正したところ、MAEが $0.9359^{\circ}\text{C}$ から $0.6385^{\circ}\text{C}$ へ減少したことから、手法の有効性を確認した。また、基準部位の温度の測定精度を改善させることで、提案手法の精度が向上する余地があることを確認した。今後の展望として提案手法を用いたアプリケーション応用を考えている。部位別の体表温度を用いた研究は盛んに行われており、それらに対し体表温度の測定方法として簡易型サーモグラフィを利用することで、提案手法の有効性を明らかにする予定である。

#### 謝辞

本研究にあたり協力いただいた花王株式会社に感謝の意を表す。

#### 参考文献

- [1] Stine, R. J.: Heat illness, *Journal of the American College of Emergency Physicians*, Vol. 8, No. 4, pp. 154–160 (online), DOI: 10.1016/S0361-1124(79)80343-3 (1979).
- [2] Eccles, R.: Understanding the symptoms of the common cold and influenza, *The Lancet Infectious Dis-*

- eases*, Vol. 5, No. 11, pp. 718 – 725 (online), DOI: [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(05\)70270-X](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(05)70270-X) (2005).
- [3] Genno, H., Ishikawa, K., Kanbara, O., Kikumoto, M., Fujiwara, Y., Suzuki, R. and Osumi, M.: Using Facial Skin Temperature to Objectively Evaluate Sensations, Vol. 19, pp. 161–171 (1997).
- [4] Juhi Ranjan and James Scott: ThermalSense: Determining Dynamic Thermal Comfort Preferences using Thermographic Imaging, *Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, ACM (2016).
- [5] Mihai Burzo, Mohamed Abouelenien, Verónica Pérez-Rosas, Cakra Wicaksono, Yong Tao and Rada Mihalcea: Using Infrared Thermography and Biosensors to Detect Thermal Discomfort in a Building’s Inhabitants, *Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, ASME (2014).
- [6] Basu, A., Routray, A., Shit, S. and Deb, A. K.: Human Emotion Recognition from Facial Thermal Image based on Fused Statistical Feature and multi-class SVM, *2015 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, pp. 1–5 (2015).
- [7] FLIR: FLIR ONE, <http://www.flir.jp/flirone/>.
- [8] 木股雅章: 赤外線センサ 原理と技術 (2018).
- [9] Canny, J. F.: A Computational Approach to Edge Detection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-8, pp. 679–698 (1986).
- [10] OpenCV: Template Matching — OpenCV 2.4.13.7 documentation, [https://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/imgproc/histograms/template\\_matching/template\\_matching.html](https://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/imgproc/histograms/template_matching/template_matching.html).
- [11] Viola, P. and Jones, M.: Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features, *Computer Vision and Pattern Recognition, 2001. CVPR 2001. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on*, Vol. 1, pp. I-511–I-518 (online), DOI: 10.1109/CVPR.2001.990517 (2001).
- [12] Arthur, D. and Vassilvitskii, S.: K-means++: The Advantages of Careful Seeding, *Proceedings of the Eighteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, SODA ’07, Philadelphia, PA, USA, Society for Industrial and Applied Mathematics, pp. 1027–1035 (online), available from (<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1283383.1283494>) (2007).
- [13] Tan, W. R., Chan, C. S., Yogarajah, P. and Condeell, J.: A Fusion Approach for Efficient Human Skin Detection, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 8, No. 1, pp. 138–147 (online), DOI: 10.1109/TII.2011.2172451 (2012).
- [14] Smith, A. R.: Color Gamut Transform Pairs, *SIGGRAPH Comput. Graph.*, Vol. 12, No. 3, pp. 12–19 (online), DOI: 10.1145/965139.807361 (1978).
- [15] FLIR: FLIR T540, <https://www.flir.com/products/t540/>.
- [16] empatica: E4 wristband, <https://www.empatica.com/research/e4/>.