

# ウェアラブル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,a)</sup> 内山 彰<sup>1,b)</sup> 東野 輝夫<sup>1,c)</sup>

**概要:** 近年スマートフォンに装着することのできる簡易型サーモグラフィが製品化されており、サーモグラフィによる温度計測は身近になりつつある。しかし簡易型サーモグラフィによる温度計測は環境変化に対するパラメータ調節精度などの影響から、高機能なサーモグラフィと比較して測定誤差が大きくなる傾向がある。しかし測定誤差の影響は熱画像全体に対してほぼ均一な特性があるため、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、画像内に絶対的な温度の指標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方法を提案する。提案手法では、まず安定した温度指標である腕時計型のウェアラブルセンサから取得した体表温度をもとに、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35%減少することを確認した。

## 1. はじめに

近年労働者に対し心理的な負担を把握するための検査を義務付ける制度が施行されるなど人の心理状態を把握することが求められている [1]。また人の皮膚温度はストレスや温熱快適度、表情など心理状態を表す指標として注目されており研究が盛んに行われている [2], [3], [4], [5]。皮膚温度の計測手段としてはサーモグラフィが用いられることが多い。これは他の計測手段と比較して測定の手軽さ、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である。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 사용할 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 [6] や CAT S60 [7], SeeK thermal 社の CompactPRO [8] が挙げられる。これらの製品の登場により、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。簡易型サーモグラフィは小型のため冷却装置を搭載することが難しいことから、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 [9]。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い傾向にあり、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、ウェアラブル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。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。ウェアラブルセンサにより高精度に体表温度を取得できるが、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ウェアラブルセンサで取得した手首温度から、手

<sup>1</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科

<sup>a)</sup> h-yoshikawa@ist.osaka-u.ac.jp

<sup>b)</sup> uchiyama@ist.osaka-u.ac.jp

<sup>c)</sup> higashino@ist.osaka-u.ac.jp

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  $R = 0.9573$  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がわかった。さらに提案手法により簡易型サーモグラフィの測定誤差が35%軽減されることが確認できた。

## 2. 関連研究

### 2.1 皮膚温度の活用

人の顔の温度を用いて心理状態を推定する研究は多く行われており、文献 [3] では額と鼻の体表温度に基づきストレス量を推定している。さらに疲労度はストレス量の合計であると仮定し推定式を立式することで、疲労度がストレス量に基づくことを確認している。近年日本では労働安全衛生法の改正により労働者に対して心理的な負担の程度を把握するための検査が義務付けられている [1] ように、人のストレスを把握することは大きな課題となっている。その課題に対し簡易型サーモグラフィを用いて皮膚温度を測定することで非侵襲かつ自動的にストレス量を推定するシステムを多くの場面で導入することが可能である。

### 2.2 サーモグラフィの活用

またサーモグラフィを用いて温熱快適度を推定する研究がある。文献 [2] では温熱快適度を暑さによる不快、寒さによる不快、快適の3状態を分類しており、文献 [4] ではサーモグラフィを用いて温熱快適度を推定することで空調制御にかかるエネルギーを削減する手法を提案している。しかし評価実験で使用しているサーモグラフィはいずれの場合も非常に高価で高性能な量子型モデルであり実用的ではない。

文献 [10] ではサーモグラフィにより取得した熱画像から顔の血流量を算出し、血流の増加量によって嘘をついている人を検出している。文献 [5], [11] では怒り、悲しみ、恐れ、喜びやその他の人の感情を顔の温度分布等から推定する手法を提案しており、非侵襲なセンサであるサーモグラフィを用いることで被験者に対し意図しない心理的な負担を与えない効果があると考えられる。

### 2.3 サーモグラフィ測定値補正法

サーモグラフィの誤差の要因はいくつか存在し、そのひとつに放射率の設定による誤差が存在する。一般に物体の熱放射により放出されるエネルギーを放射エネルギーと呼び、放射率とは物体からの放射のうち物体自身の持つエネルギーによる放射の割合である。放射率は物体の種類によって決まる固有の値であり、文献 [12] では、人の皮膚の放射率は日常環境でも皮膚の血流や肌の色の違いにより、0.95–0.99 の差異が存在することが指摘されている。また、この約4%の差異は体表温度の測定に  $0.25^{\circ}\text{C}$  程の誤差を誘

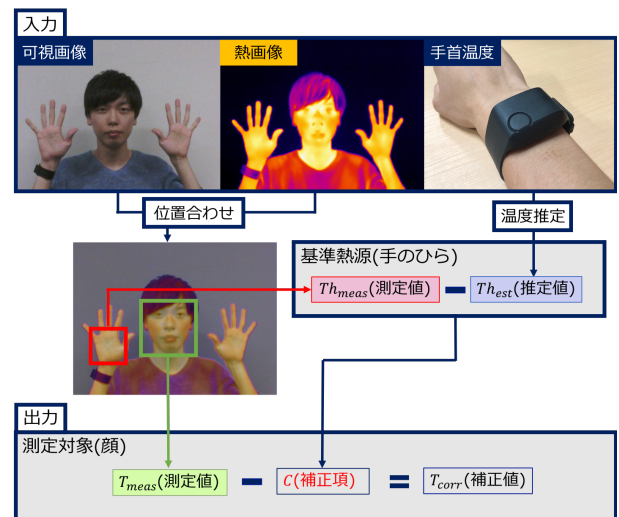


図 1 提案手法の概要

発すると述べられている。

放射率を求めるには黒体テープのような放射率が既知であるテープを測定対象に貼りサーモグラフィで放射率を設定し温度を測定する必要がある [13]。しかし放射率を調整するだけでは修正できない誤差も存在するため、この方法のみでは補正方法として十分でない。これ以外の誤差要因には電気的な雑音、熱エネルギーの授受の揺らぎによる雑音があるがこれらの影響を減少させるためには高いコストがかかる。

## 3. 簡易型サーモグラフィ補正法

### 3.1 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時計型ウェアラブルセンサを装着し、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、ウェアラブル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。最後に基準熱源の温度測定値と推定値を得ることで補正項を算出し、補正項と測定対象の測定温度から温度補正值を算出する。

### 3.2 画像位置合わせ

図 2 に示すように、可視画像と熱画像は位置が異なるレンズを用いて撮影するため、各画像には数ピクセルの位置のずれ ( $\Delta diff$ ) が存在する。図 3 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温度の測定が必要となることがある。そのた

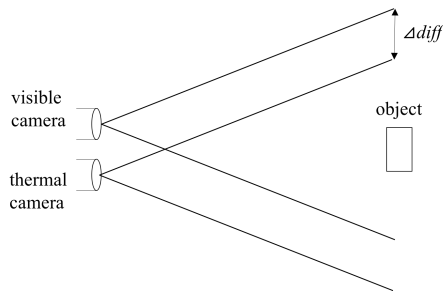


図 2 カメラの位置による画像のずれ

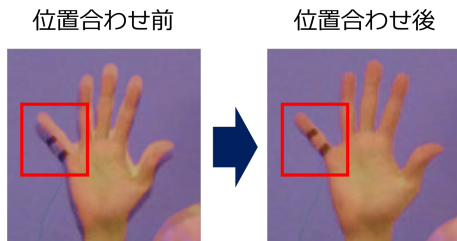


図 3 可視画像と熱画像の位置合わせ方法

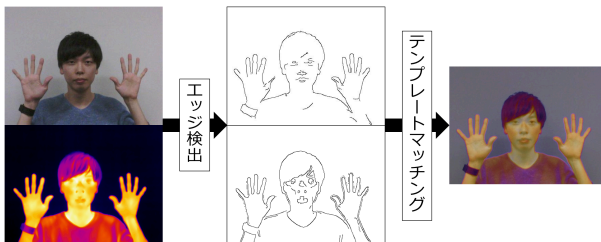


図 4 可視画像と熱画像間のずれ補正方法

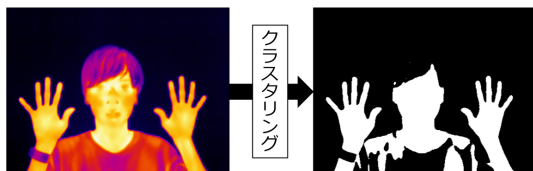


図 5 クラスタリングによる体表部位の識別

め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。

本研究で用いる可視画像と熱画像の位置合わせ方法を図 4 に示す。まず両画像に対し Canny アルゴリズム [14] 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 [15] により位置合わせを行う。

### 3.3 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 [16] 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。矩形では背景や衣服も含む領域が得られるため、これらを除くことで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 [17] を用いてクラスタリングを行う。本研究では  $k = 2$  とし、温度が最も高いクラス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クラスタリングする。クラスタリングの様子を図 5 に示す。

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。その状況において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。そのため手のひらを識別するために、色が一樣であることを利用し HSV 色空間の彩度の値を用いて領域の判定を行う。提案手法では可視画像の RGB 値を HSV 色空間 [18] に変換し色の鮮やかさを示す彩度に対し閾値を用いて判定する。

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  $T_{meas}$ 、手のひら温度を  $Th_{meas}$  とすると、

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

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

と表せる。ここで

$$F = \{(x,y) | (x,y) \in R_{face} \wedge T(x,y) \in C_f\}$$

$$H = \{(x,y) | (x,y) \in R_{hand} \wedge S(x,y) \in S_h\}$$

である。  $R_{face}$  および  $R_{hand}$  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、  $C_f$  はクラスタリングにより識別した体表温度の集合、  $S_h$  は手のひらの彩度の集合である。  $T(x,y)$  は座標  $(x,y)$  の温度、  $S(x,y)$  は座標  $(x,y)$  の彩度、  $N(X)$  は集合  $X$  の要素の個数である。

### 3.4 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、ウェアラブルデバイスにより取得した手首の体表温度に基づく手のひら温度の推定式を構築する。推定式構築のため手のひら温度を目的変数  $y$ 、手首温度を説明変数  $x$  として回帰分析を行い式 (3) の定数  $a, b$  を決定する、

$$y = a + bx \quad (3)$$

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

### 3.5 顔温度の補正

提案手法では 3.3 節, 3.4 節で得られた手のひら温度から顔表面温度の補正值を式 (4) で求める. ここで  $T_{corr}$  は顔温度補正值,  $T_{meas}$  は顔温度実測値,  $C$  は補正項,  $Th_{est}$  は手のひら温度の推定値,  $Th_{meas}$  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.

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

$$C = Th_{meas} - Th_{est}$$

## 4. 評価

### 4.1 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[19], 簡易型サーモグラフィ FLIR ONE[6], 腕時計型ウェアラブルセンサ E4 wristband[20] 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°C, 測定精度は ±0.2°C(対象温度 36-39°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.

### 4.2 位置合わせの効果

3.2 節と 3.3 節で述べた熱画像から温度を抽出する手法の精度評価を行う. 局所的な部位として小指の先端を対象とした. 位置合わせの有無による測定値の比較を図 6 に示す. 真値はプローブ型のデジタル温度センサである立山科学工業株式会社のサーミスタセンサ SZL-64(T57265), およびデジタル出力付き温度センサ変換器 DS103 により取得した. 測定誤差は ±0.02°C である. この結果により位置合わせなしでは局所的な部位に対して正確に温度を測定できないことがわかる. 一方, 位置合わせを行うことで熱画像の測定値とプローブにより測定した真値がほぼ一致する

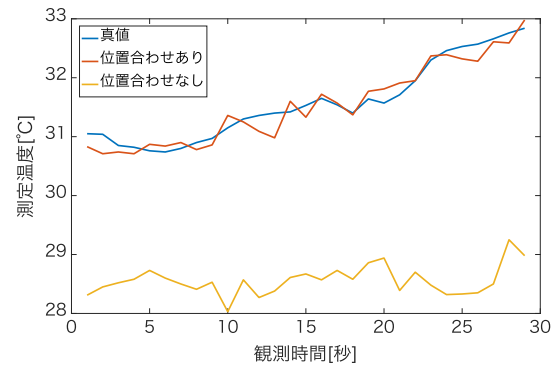


図 6 位置合わせによる温度抽出への影響

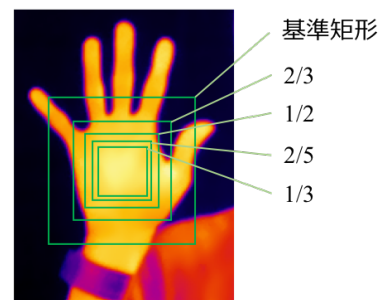


図 7 手のひら温度抽出パターン

表 2 手のひら部位温度と手首温度の相関

		内側	外側
辺の長さ	×1	0.9552	-
	×2/3	0.9570	0.9567
	×1/2	0.9567	0.9573
	×2/5	0.9564	0.9573
	×1/3	0.9560	0.9572

ことがわかる. 以上より位置合わせの有効性を確認した.

### 4.3 手のひら温度推定精度

3.4 節で述べた手首温度から手のひら温度を推定する手法の評価を行う. まず, 手のひらの中で手首温度と最も相関のある温度を持つ領域を決定する. このため手のひらの内部を大きさの異なる矩形で囲み, その内側と外側それぞれの温度との相関を比較し, 最も相関のある領域温度を手のひら温度として用いることとした. 比較を行った矩形のパターンを図 7 に, 相関係数の比較結果を表 2 に示す. この結果それぞれの部位には差はほとんど見られなかった. このため以降ではその中でも最も相関のあった, 基準矩形に対し 2/5 の 1 辺の長さを持つ矩形の外側と基準矩形との間の領域の温度の平均値を手のひら温度として用いる.

手首と手のひらの温度の関係を図 8 に示す. 目的変数を手のひら温度  $Th_{est}$  とし, 説明変数を手首温度  $Tw$  として線形回帰を行うと, 推定式は式 (5) のようになる. この推定式による平均絶対誤差は 0.6281°C となった.



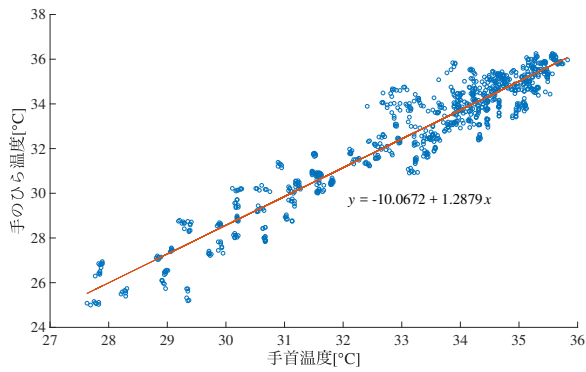


図 8 手のひら温度 (2/5 矩形外側) と手首温度の関係

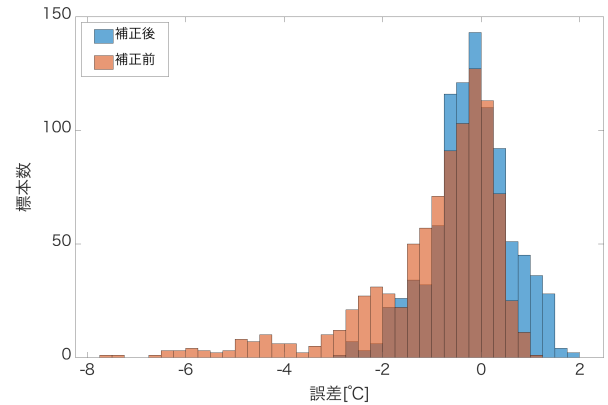


図 11 測定誤差と手のひら温度の推定値を用いた補正による誤差

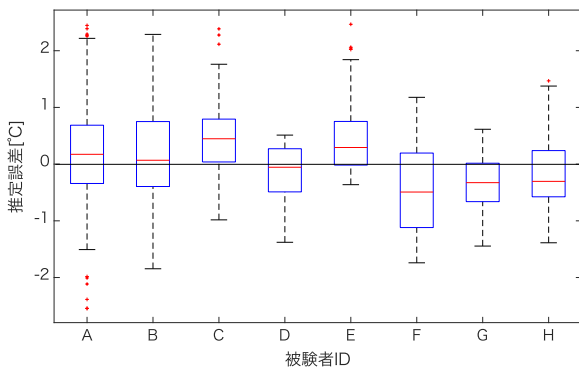


図 9 被験者別手のひら温度推定誤差

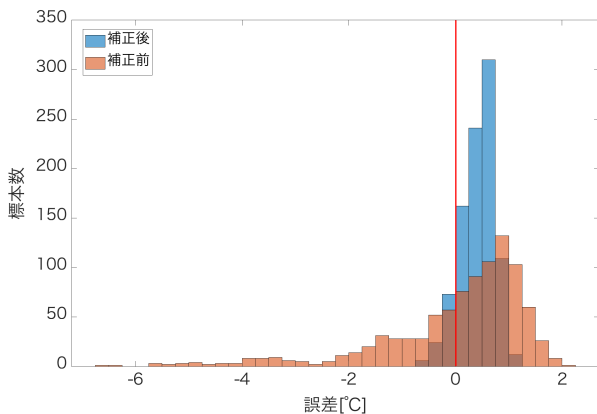


図 10 測定誤差と手のひら温度の真値を用いた補正による誤差

$$Th_{est} = -10.0672 + 1.2879T_w \quad (5)$$

被験者ごとの式 (5) による推定誤差を図 9 に示す。ここでは、箱の上端と下端から四分位範囲の 1.5 倍の距離外の値を外れ値としてプロットしている。この結果より、被験者ごとに誤差分布が異なることが分かる。したがって、手首と手のひらの温度差の個人差を考慮した推定モデルを構築することで、推定精度が向上すると考えられる。

#### 4.4 補正の効果

まず手のひら温度推定誤差の影響を除いた評価を行うた

め、式 (4) において  $Th_{est}$  の値に高性能サーモグラフィの測定値を用いて評価を行う。誤差のヒストグラムを図 10 に示す。

誤差の要因として物体検出における矩形領域のずれが考えられる。また、補正後、補正前ともに正の方向へのバイアスが生じている。これは同一画像内から複数の部位の温度を抽出するときに生じる対象との距離の差に起因すると思われる。サーモグラフィでは空気中を伝わる赤外線の影響を考慮して温度を算出している。簡易型サーモグラフィのレンズは小型なため、人体を近距離で撮影する場合には各部位から伝わる赤外線の伝搬距離差が生じやすく、画像に対する一律の補正では対応が難しいためである。これに対しては被写体との距離を考慮した減衰の補正が必要であると考えられる。ここではこの影響による誤差を除いて評価を行うために、平均絶対誤差 (MAE) が最小となる値を算出しバイアスを補正する。その結果補正後の MAE は  $0.2528^{\circ}\text{C}$ 、補正前の MAE は  $0.9554^{\circ}\text{C}$  となり、基準熱源を用いた温度補正の有効性を確認できた。

提案手法により推定された顔温度の誤差のヒストグラムを図 11 に示す。前述のバイアス補正後の MAE は  $0.6172^{\circ}\text{C}$  となった。この結果、提案手法では 4.3 節で評価を行った手のひら温度の推定誤差による影響を受け、誤差が発生することが分かる。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。

#### 5. 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、ウェアラブルセンサを基準とした測定温度の補正法を提案した。性能評価によりエッジ検出に基づく可視画像と熱画像の位置合わせでは人の指先など局所的な部位の温度測定に対して有効であることを示した。また、線形回帰モデルを構築することで、ウェアラブルセンサを用いて手のひら温度を

MAE 0.6281°C で推定できることを確認した。さらに、提案手法を用いて顔の測定温度を補正したところ、MAE が 0.9554°C から 0.6172°C へ減少したことから、手法の有効性を確認した。

今後の展望として提案手法を用いたアプリケーションへのを考えている。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、提案手法の利用可能性について検討する予定である。

## 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] 厚生労働省: ストレスチェック制度関係法令等, <https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000181838.html>.
- [2] 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).
- [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] 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).
- [6] FLIR: FLIR ONE, <http://www.flir.jp/flirone/>.
- [7] CAT: CAT S60, <http://www.catphones.com/en-gb>.
- [8] SeeKthermal: CompactPRO, <http://www.thermal.com/products/compactpro>.
- [9] 木股雅章: 赤外線センサ原理と技術 (2018).
- [10] Pavlidis, I. and Levine, J.: Thermal Image Analysis for Polygraph Testing, *IEEE Pulse*, Vol. 21, No. 6, pp. 56–64 (online), DOI: 10.1109/MEEMB.2002.1175139 (2002).
- [11] Salazar-Lpez, E., Domnguez, E., Ramos, V. J., de la Fuente, J., Meins, A., Iborra, O., Glvez, G., Rodriguez-Artacho, M. and Gmez-Miln, E.: The Mental and Subjective Skin: Emotion, Empathy, Feelings and Thermography, *Consciousness and Cognition*, Vol. 34, pp. 149 – 162 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.concog.2015.04.003> (2015).
- [12] Mitchell, D., Wyndham, C. H. and Hodgson, T.: Emissivity and Transmittance of Excised Human Skin in its Thermal Emission Wave Band., *Journal of Applied Physiology*, Vol. 23, No. 3, pp. 390–394 (online), DOI: 10.1152/jappl.1967.23.3.390 (1967).
- [13] フリーシステムズジャパン株式会社: 開発者向け赤外線サーモグラフィガイドブック, [https://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T559243/T559243\\_JP.pdf](https://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T559243/T559243_JP.pdf).
- [14] Canny, J. F.: A Computational Approach to Edge Detection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-8, pp. 679–698 (1986).
- [15] : 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).
- [16] 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).
- [17] 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).
- [18] Smith, A. R.: Color Gamut Transform Pairs, *SIGGRAPH Comput. Graph.*, Vol. 12, No. 3, pp. 12–19 (online), DOI: 10.1145/965139.807361 (1978).
- [19] FLIR: FLIR T540, <https://www.flir.com/products/t540/>.
- [20] empatica: E4 wristband, <https://www.empatica.com/research/e4/>.