

# サーモカメラによる非接触温冷感センシング

Contactless Estimation Method of Thermal Sensation using Infrared Thermography

楠 亀 弘 一  
Koichi Kusakame

シラワン ナワット  
Nawatt Silawan

米 田 亜 旗  
Aki Yoneda

野 坂 健 一 郎  
Ken-ichiro Nosaka

式 井 慎 一  
Shin-ichi Shikii

久 保 博 子  
Hiroko Kubo

## 要 旨

サーモカメラを用いた非接触式温冷感推定手法を開発した。サーモカメラで撮影した16名の被験者の熱画像を基に、着衣や皮膚表面からの外部への放熱量を推定し、温冷感との関係を明らかにした。放熱量と温冷感に着衣によらず、冬期、夏期ともに0.6~0.8の高い相関係数を有することを確認した。また、低解像度のサーモカメラにおいても温冷感推定を実現するため、3.4倍の分解能を実現する超解像技術を開発した。本技術により、8×8画素搭載の安価なサーモカメラを用いて6 m先の人の温冷感を推定するセンシングシステムを実現した。

## Abstract

We have successfully developed a novel contactless method for estimating human thermal sensation using a thermal camera. The relationship between heat loss and subjects' thermal sensation was investigated by estimating the outward heat loss from the surfaces of the subjects' clothes and skin using thermal images of 16 subjects. High correlation coefficients of 0.6 to 0.8 were confirmed in both winter and summer experiment data. This correlation is independent of the thickness of the subjects' clothes. We also developed a super-resolution technology that can increase thermal image resolution by 3.4-fold to estimate thermal sensation with a low resolution thermal camera. With these technologies, we can realize a sensing system that can estimate a person's thermal sensation from a distance of 6 meters using an inexpensive 8 by 8 pixel infrared array sensor.

## 1. はじめに

これまで、省エネと快適性を両立するルームエアコンの実現を目指して多くのセンシング技術が開発されてきた。例えば、室温、湿度、風速、壁や床の温度、日射量などの環境情報を基に、人にとっての快適性を推定する技術により、暖めすぎや冷やしすぎによるエネルギーロスを省き、省エネと快適性の両立を目指したルームエアコンも多く発売されている。しかし、同じ環境下においても、着衣の違いなどにより温冷感（人が感じる暑さ、寒さの度合い）は異なり、環境情報だけで温冷感を正確に推定することは難しい。一方で、人の末梢（まっしょう）部皮膚温と温冷感に関する研究はいくつか報告例がある[1]-[3]。しかし、特に寒い季節において、足は、靴下、スリッパなど装着物に覆われていることが多く皮膚温度を計測することができない。また、非接触で任意の位置にある手の皮膚温を測定することも困難を伴う。

これらの課題を解決する方法として、サーモカメラで着衣も含む人の表面温度と周囲温度を計測し、それらの温度差から算出される放熱量を基に温冷感を推定する方法[4]-[6]を検討した。また、本方法を低解像度の安価なサーモカメラにおいても実現するため、超解像技術によるサーモカメラの高分解能化手法を開発した。

## 2. 温冷感推定技術

基礎代謝や震えなどによる体内の熱生産の量を発熱量とし、対流や放射、汗の蒸散などによる熱の放出を放熱量とすると、発熱量と放熱量のバランスにより体温の上昇または低下が生じる。このバランスを一定に保ち、体温の恒常性を維持するための認識機能が、温冷感という感覚である。つまり、放熱量が発熱量を下回り体温が上昇している過程では『暑い』と感ずることで衣服を脱ぎ、冷涼地へ移動するなどの行動をとることができる。逆に、放熱量が発熱量を上回り体温が低下している過程は『寒い』と感ずることで上記と逆の行動をとることができる。運動中などを除けば発熱量はおおむね一定であるため、放熱量と温冷感には強い関係性をもつ。したがって、放熱量を測定できれば、温冷感を推測できると考えられる。

### 2.1 放熱量計測原理

本節では、放熱量を計測する方法を解説する。

人体からの放熱量 $H$ [W/m<sup>2</sup>]は下記式で表される（第1図）。

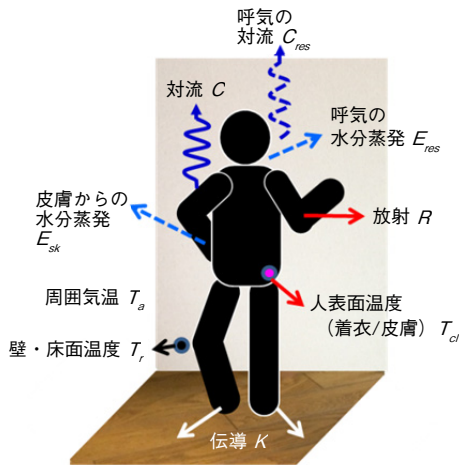
$$H = R + C + K + E_{sk} + E_{res} + C_{res} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$R$  : 放射による放熱量 [W/m<sup>2</sup>]

$C$  : 対流による放熱量 [W/m<sup>2</sup>]

$K$  : 伝導による放熱量 [W/m<sup>2</sup>]

$E_{sk}$  : 皮膚からの水分蒸発による放熱量 [W/m<sup>2</sup>]



第1図 人体からの放熱  
Fig. 1 Heat loss from the human body

$E_{res}$  : 呼気の水分蒸発による放熱量 [W/m<sup>2</sup>]  
 $C_{res}$  : 呼気の対流による放熱量 [W/m<sup>2</sup>]

着衣や皮膚の表面温度を  $T_{cl}$ , 周囲壁面温度を  $T_r$ , 周囲気温を  $T_a$  とすると,  $R, C$  はそれぞれ,

$$R = h_r \times (T_{cl} - T_r) \dots\dots\dots (2)$$

$$C = h_c \times (T_{cl} - T_a) \dots\dots\dots (3)$$

と書ける. ここで,

$h_r$  : 放射熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>℃]

$h_c$  : 対流熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>℃]

$h_r, h_c$  は無風の場合は主に人体の形状によって決定される定数であり, あらかじめサーマルマネキンなどを用いて計測しておくことが可能である. また, 冷えたフローリングの上に薄着で寝ている状態などを除き,  $K$  は小さく, 一般的な室温の範囲で安静状態であれば呼吸からの対流放熱量  $C_{res}$  も小さい. 周囲気温  $T_a$  と周囲壁面温度  $T_r$  はほぼ等しいので (1) 式は,

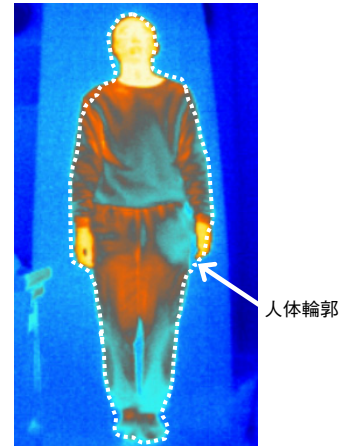
$$H = (h_r + h_c) \times (T_{cl} - T_r) + E_{sk} + E_{res} \dots\dots\dots (4)$$

と書ける. ここで, 安静状態のように水分蒸発による放熱量  $E_{sk}, E_{res}$  がほぼ一定とみなせる状況であれば, (4) 式の変数は  $(T_{cl} - T_r)$  のみとなるため, 安静状態において着衣などを含めた人の表面温度と壁面温度との差がわかれば, その人の放熱量を推定することができる. 温冷感 は, この放熱量と, 体内の発熱量との大小関係に起因する. 安静状態の発熱量はおおむね一定であるため, 放熱量を算出できれば温冷感 は推定可能である.

第2図はサーモカメラで撮影した人体の熱画像であるが,  $T_{cl}, T_r$  はそれぞれ点線の内部および外部の平均温度として算出することができる.

熱平衡状態において, 皮膚から着衣への放熱量は着衣から周囲環境への放熱量と一致する. この関係は着衣の

量や種類に依存せず成立する. したがって, 着衣によらず, 全身 (の皮膚) からの放熱量を算出することができる.



第2図 サーモカメラから得られた熱画像  
Fig. 2 Thermal image

## 2.2 放熱量に基づく温冷感推定

被験者実験の結果を用いて, 熱画像から算出する放熱量に基づく温冷感推定技術の有効性を示す.

冬期と夏期において, 人の体はそれぞれ寒冷順化, 暑熱順化することから代謝量も異なるため, 放熱量と温冷感の関係も冬期と夏期で異なることが考えられる.

そこで, 実験は, 温湿度を調整できる人工気候室を用いて夏期, 冬期の2回実施した. 第1表に示すように室温4条件, 着衣3条件とし, 湿度はすべて50%とした. 男女8名ずつの被験者について実験を行った.

第1表 室温・着衣に関する実験条件

Table 1 Clothing thicknesses and temperatures

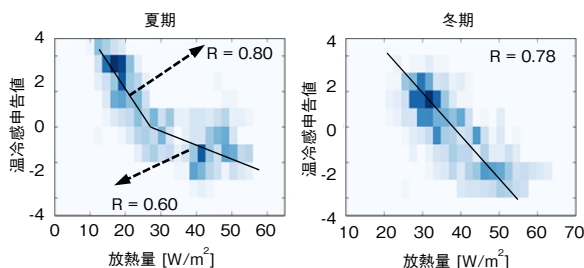
	室温 [°C]	着衣量 [clo]
冬期	16.0 19.0	0.54 : 各自下着, 靴下, 長袖シャツ, 薄手ズボン
	22.0 25.0	0.92 : 各自下着, 靴下, 長袖シャツ, トレーナー上下
		1.41 : 上記+フリースジャケット
夏期	22.5 25.0	0.38 : 各自下着, 半袖シャツ, 短パン
	27.5 30.0	0.44 : 各自下着, 半袖シャツ, 薄手長ズボン
		0.54 : 各自下着, 靴下, 長袖シャツ, 薄手長ズボン

温冷感 は空気調和・衛生工学会の温冷感小委員会の提案による9段階尺度 (-4 : 非常に寒い, -3 : 寒い, -2 : 涼しい, -1 : やや涼しい, 0 : どちらともいえない, +1 : やや暖かい, +2 : 暖かい, +3 : 暑い, +4 : 非常に暑い) を用いて申告させた. 第3図に, 熱画像から推定した放熱量と温冷感申告の関係を示す.

冬期実験における放熱量と温冷感申告の相関は, 被験

者ごとの場合で平均0.83, 全被験者のデータを統合した場合で0.78 ( $p < .01$ ) と高い。また, 夏期実験における相関は, 1つの直線にならず, 暑い側で0.80, 寒い側で0.60となった。これは, 暑い側で発汗の影響があったためと考えられる。

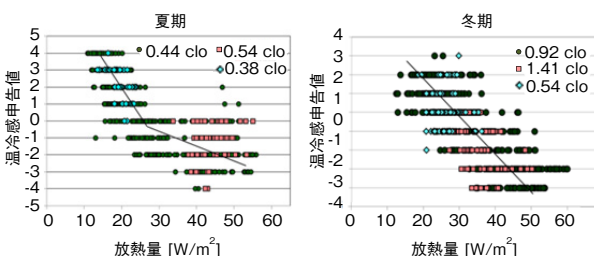
本方式の有効性を確認するため, 皮膚に接触式の温度計を設置し, 全身皮膚温により温冷感を推定した。その相関係数は冬期で0.76, 夏期で0.63であった。以上より, サーモカメラによる非接触計測でも, 接触型とほぼ同程度以上の相関係数が得られ, 本方式の有効性が確認できた。



第3図 温冷感申告と放熱量

Fig. 3 Relationship between thermal sensation and heat loss

第4図では, 基準着衣量 (夏期は0.44, 冬期は0.92), 薄着, 厚着の3種類の着衣量での実験結果を示している。夏期と冬期の両者ともに, 最も高い室温条件にて薄着を着用, 最も低い室温条件にて厚着を着用させた。室温が同じであれば薄着であるほど右下の (放熱量が大きく温冷感が低い) 方向に, 厚着であるほど左上の (放熱量が小さく温冷感が高い) 方向に分布するが, 基準着衣量の分布からは大きく外れない。これらのことから, 熱画像から推定した放熱量により, 着衣量の影響によらない温冷感推定が可能であることがわかった。



第4図 温冷感と放熱量の着衣依存性

Fig. 4 Effect of clothing on the relationship between thermal sensation and heat loss

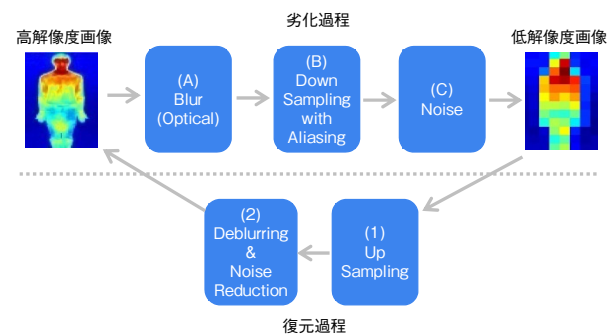
### 3. サーモカメラ超解像技術

前記した温冷感推定技術を実装するためには, 熱画像のなかから人が存在する領域を判定し, その表面温度を抽出することが必要となる。そのため, 人領域の輪郭が判定できる程度の解像度の熱画像が必須となる。しかし, 一般的に家電製品に搭載される安価なサーモカメラ (サーモパイルセンサ) は, 数十画素程度の低画素, 低解像度であり人領域の輪郭を判定することが難しい。

そこで, 安価なサーモカメラを用いて温冷感推定を実現するべく, 超解像技術によるサーモカメラの高分解能化手法を開発した。

#### 3.1 解像の原理

画像が劣化する過程をモデル化し, その逆の過程をたどることにより, 劣化した画像を劣化前の画像に近づける技術が超解像である[7] (第5図)。



第5図 解像技術における劣化, 復元モデル

Fig. 5 Distortion and restoring model of the super-resolution process

第5図の劣化過程をサーモカメラに適用すると, 下記のようにモデル化できる。

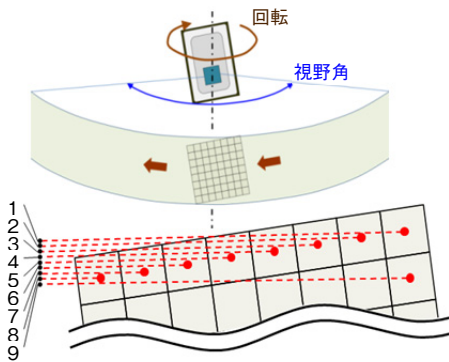
- (A) レンズで集光する際のBlur (ぼけ)
- (B) 低い解像度のサーモカメラで測定することによる Down Sampling
- (C) 測定時に加わるNoise

この劣化過程を逆にたどる処理として, 下記の2つの処理を行うことで, 劣化画像の復元 (超解像処理) が可能となる。

- (1) サブサンプリング (画素間の位置で測定) による解像度の増大 (Up Sampling)
- (2) ぼけとノイズの逆関数 (ウィナーフィルタ) の演算によるDeblurringとNoise Reduction処理

### 3.2 サーモカメラ傾きとサブサンプリング

第6図に示すように、縦8画素×横8画素の64画素搭載サーモカメラをステッピングモータの回転軸上に設置し、横方向に回転させながら得られた熱画像を合成する。各画素の視野角よりも細かいピッチで回転することにより、横方向の解像度を高めることが可能となる。また、サーモカメラを回転方向に対して傾けて設置することで、縦方向の解像度も高めることができる。



第6図 傾けたサーモカメラによるサブサンプリング  
Fig. 6 Subsampling

### 3.3 ウィナーフィルタ

ぼけ関数を $B$ 、ノイズ成分を $nsr$ とおくと、それらの逆関数 $W$ （ウィナーフィルタ）は下記で定義される。

$$W = \frac{\bar{B}}{|B|^2 + nsr} \dots\dots\dots (5)$$

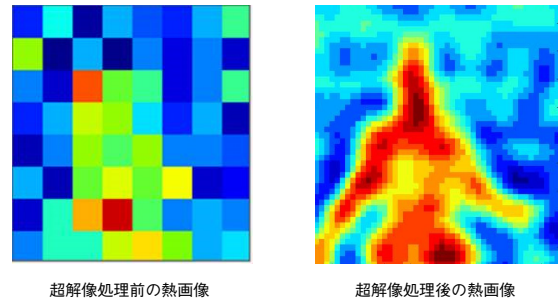
対象とするサーモカメラのレンズの点拡（ひろ）がり関数（PSF）から $B$ を求め、サーモカメラの性能の実測値から $nsr$ を求めて上記を計算し、 $W$ を求める。

3.2節で説明したサブサンプリングにより生成した熱画像を周波数領域に変換し、 $W$ によりフィルタリング演算、さらに空間領域に変換することで、超解像処理が可能となる。

### 3.4 超解像処理結果

サーモカメラのノイズやステッピングモータの回転精度にもよるが、超解像処理により解像度は縦横それぞれの方向で約3.4倍に改善する。

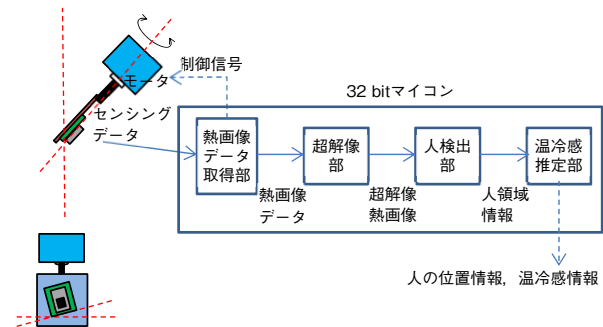
着座した人物を測定した、超解像処理前と超解像処理後の熱画像を第7図に示す。超解像処理することで人体輪郭が明確となり、人体領域の平均温度 $T_{cl}$ と周囲の平均温度 $T_r$ が算出可能となる。



第7図 超解像処理結果  
Fig. 7 Result of the super-resolution process

## 4. 温冷感センシングシステム

前章で説明した技術を実装し、温冷感センシングシステムを開発した（第8図）。ステッピングモータ、サーモカメラ、超解像処理および人領域抽出処理などのデータ処理を行う32 bit組み込みマイコンでシステムを構成した。



第8図 システム構成  
Fig. 8 System configuration

10 frames/s、8×8画素、上下視野角60°のサーモカメラを左右方向に走査することで、左右170°、上下60°の視野角を確保することができた。約24秒でサーモカメラの回転は終了し、データ処理を含めて30秒未満で1回の温冷感推定値を出力可能である。

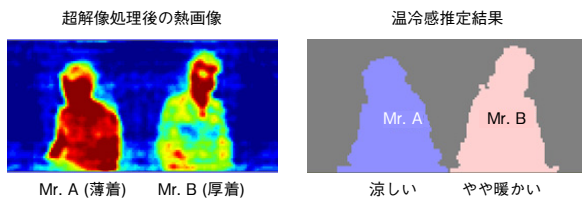
### 4.1 人領域検出処理

通常、室内環境において人は壁や床より温度が高いため、背景よりも一定以上温度が高い領域を人領域として抽出した。テレビなどの家電製品も背景より高温となるが、長時間静止しているものは人ではないと判定できる。抽出された人領域の平均温度 $T_{cl}$ と人領域以外の背景の平均温度 $T_r$ を求め、(4)式によって放熱量を求めることで温冷感を推定する。

## 4.2 システム性能

前記したセンシングシステムについて、気温22℃の環境下において性能試験を行った。床上2.1 mの位置に設置したサーモカメラを使用し、一般的なりビングとダイニングの広さであるセンサからの距離6 mの範囲において、被験者に位置を移動しながら温冷感を申告させた。結果は、すべての位置において、温冷感申告値と温冷感推定結果の差異は±1の範囲内であった。

第9図に、薄着の被験者 (Mr. A) と厚着の被験者 (Mr. B) の2名を、本システムによって温冷感推定した結果の例を示す。両名ともに本人申告による温冷感(9段階尺度)と同等の推定結果が得られ、厚着の被験者がやや暖かく、薄着の被験者が涼しいと推定されている。このように、着衣差による温冷感の違いも推定が可能となる。



第9図 温冷感推定結果

Fig. 9 Result of estimation of thermal sensation

## 5. まとめ

温冷感推定技術、および、サーモカメラの超解像技術を開発し、人の温冷感を非接触で推定するシステムを実現した。本システムは、個人ごとの温冷感を推定し、暑い人に冷風、寒い人に温風を送るなどの空調制御を可能とする。

これにより、個々人に合わせたパーソナル空調を実現する。また、暖めすぎ、冷やしすぎを防ぐことで空調の省エネルギー化も可能となる。家庭内のルームエアコン、車室内のカーエアコン、オフィスなど多様な人が集う空間で使用される業務用エアコンなど、人々の生活のさまざまなシーンで、省エネ&個々人に合わせた快適空調の両立を実現する重要なセンシング技術として活用されると考える。

## 参考文献

- [1] 武川博三 他, “赤外線放射計での皮膚温計測に基づく温冷感推測,” 空気調和衛生工学会・近畿支部学術研究発表会論文集B-19, pp.185-188, 1995.
- [2] 梶井宏修 他, “頭部と身体の温熱環境条件が異なる時の足部温冷感および生理的応答,” 空気調和衛生工学会・近畿支

部学術研究発表会論文集, B-5, pp. 85-88, 2004.

- [3] 野中麻由 他, “中立的な温冷感、快適感が得られる平均皮膚温と身体各部位皮膚温の差: 若年女子における夏期と冬期の比較,” 人間と生活環境, vol. 16, no. 2, pp. 91-97, 2009.
- [4] Koichi Kusakame et al., “A new proposal of estimation method for thermal sensation using infrared thermography,” Proceedings of ICHES2016, 2016, no.20111.
- [5] 式井慎一 他, “夏期におけるサーモグラフィを用いた温冷感推定,” 空気調和衛生工学会・近畿支部学術研究発表会論文集, A-55, 2014.
- [6] 楠亀弘一 他, 熱画像サーモカメラを用いた非接触温冷感センシング～生体データ活用の最前線～, 板生清 (編), サイエンス&テクノロジー (株), 東京, 2017, pp. 380-386.
- [7] Sung Cheol Park et al., “Super-Resolution Image Reconstruction: A Technical Overview,” IEEE Signal Processing Magazine, pp. 21-36, May, 2003.

## 執筆者紹介



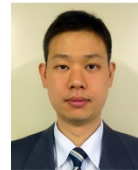
楠亀 弘一 Koichi Kusakame  
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 技術本部  
Engineering Div.,  
Automotive & Industrial Systemes Company



米田 亜旗 Aki Yoneda  
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 技術本部  
Engineering Div.,  
Automotive & Industrial Systemes Company



式井 慎一 Shin-ichi Shikii  
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 技術本部  
Engineering Div.,  
Automotive & Industrial Systemes Company



シラワン ナワット Nawatt Silawan  
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 技術本部  
Engineering Div.,  
Automotive & Industrial Systemes Company



野坂 健一郎 Ken-ichiro Nosaka  
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 技術本部  
Engineering Div.,  
Automotive & Industrial Systemes Company



久保 博子 Hiroko Kubo  
奈良女子大学 研究院 生活環境科学系  
生活健康学領域  
Department of Health Sciences, Faculty of Human Life and Environment, Nara Woman's University  
博士 (学術)