

サーモグラフィを用いる着衣下における体表面温度推定

Estimation of Body Surface Temperature under Clothing Using Thermography

○ 佐野 祐士, 水谷 孝一, 善甫啓一, 若槻尚斗(筑波大), 小笠原 英子(防衛大)

Yuji SANO, Koichi MIZUTANI, Keiichi ZEMPO, Naoto WAKATSUKI, University of Tsukuba, and Hanako OGASAWARA, National Defense Academy

Abstract: The purpose of this research is to estimate one's clothing insulation from thermographs. If the clothing insulation could be estimated by thermography, we can calculate Predicted Mean Vote (PMV) which indicates the thermal comfort, without using Thermal-mannequin. We devised the estimation of clothing insulation using thermal resistance value of garment. In this research, we proposed the estimation of skin temperature in garments based on the assumption that skin temperatures of body part have correlation, because the estimation method of clothing insulation requires surface temperature of garment and skin temperature in garment. We calculated the correlation between the temperatures of face, neck, upper arm, hand, breast and stomach, and we found the correlation between breast and upper arm, and between stomach and face in the significance level of 5%. From the result of calculation, we derived regression lines of those pairs, and their coefficients of determination are about 70%.

Key Words: Clothing Insulation, Thermography, Predicted Mean Vote, Skin Temperature, Radiant Temperature

1. 序 論

予測温冷感申告 (Predicted Mean Vote, 以下 PMV) は, 人体の熱負荷と人間の温冷感を結びつけた温熱環境評価指数として ISO 7730⁽¹⁾に定められており, 人間の熱的快適感を評価する指標として建築などの分野で用いられている⁽²⁾. PMV をはじめとするこのような快適性評価は人間の生活環境をより良くするものとして必要なものである⁽³⁾.

PMV の導出に必要なパラメータとそれらの関係図を Fig. 1 に示す. PMV を求めるためには 6 つのパラメータ (空気温度, 相対湿度, 平均放射温度, 平均風速, 着衣量, 代謝量) が必要となるが, 着衣量を除くパラメータは多様な測定方法が存在する一方で, 着衣量は衣服ごとに発熱量を測定できる装置 (サーマルマネキン) によってのみ測定されている⁽⁴⁾. この着衣量は着衣の熱抵抗値のことで単位は clo であり, SI 単位では Eq. (1) のように表される⁽⁵⁾.

$$1[\text{clo}] = 0.115 [\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}] \quad (1)$$

サーマルマネキンは高精度に着衣量を測定できる一方で, 非常に高価であり平易な測定方法とは言いがたい. また, サーマルマネキンはマネキンの着ている着衣量を測定するので, 人間の着衣量を直接測定することはできない.

人間の着衣量を測定することができれば, PMV の活用は建築物の設計段階に留まらず, オフィスでの空調などその場にいる人の快適性評価に則したフィードバックを実現で

き, この指標の活用の幅が大きく広がると考えられる. また, 被測定者に負担を与えることなく非接触に測定することができれば, 更に PMV の汎用性が高まると考えられる.

先行研究では熱画像を用いる特徴量ベクトルによる着衣量推定⁽⁶⁾があるが, 予めデータセットが必要であり, 着衣量が多くなると誤差が大きくなる欠点がある. 本研究ではデータセットが不要であり, 着衣量の大小にかかわらず着衣量の定義より推定が可能な手法として, サーモグラフィを用いる着衣の熱抵抗値推定手法を考案し, 本手法に必要な着衣下の体表面温度の推定手法について検討を行う.

2. 着衣下体表面温度推定手法

人の体の各部位の体表面温度には相関があると仮定し, 露出した部位の体表面温度を用いる着衣下の体表面温度推定手法を提案する.

体の各部位の体表面温度の相関行列を作成し, 最も相関係数の高い部位の相関に対して統計的な手法を用いて評価を行う. 評価の高かった組について最小二乗法により求めた回帰直線を推定に用いる.

3. 検証実験

推定手法の仮定を検証するために, 健康成人男性 15 名 (21~24 歳) の上半身に対して, サーモグラフィによる熱画像の撮影と温度センサによる体表面温度の測定を行った. 実験系を Fig. 2 に示す. 体幹部から末梢までの各部位をサーモグラフィにより測定し, 着衣下体表面温度はサーモグラフィでは測定不可であるため温度センサにより測定する. サーモグラフィは FLIR 社の E4 (熱分解能: 0.15 °C, 画角: 55° × 35°, 解像度: 80 × 60), 温度センサはセイコーエプソン社の S8100B (動作温度 -40 °C ~ +100 °C, 再現性 ±0.3%) を用いた. 環境温度を 25 °C に保った室内で, 同種の半袖 T シャツを 1 枚着用した状態の成人男性の熱画像の撮影及び着衣下体表面温度の測定を行った. 本実験では 2 つの機器により温度測定を行うが, 計測機器による誤差を抑えるよう, 実験前にサーモグラフィと温度センサのキャリブレーションを行った.

実験より得られた各部位の体表面温度を用いた相関係数

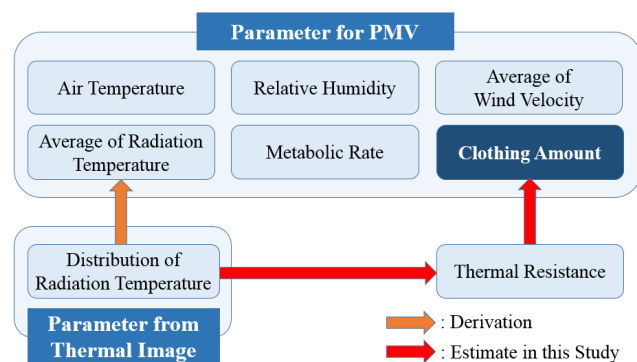


Figure 1 Relationship between Parameters for PMV

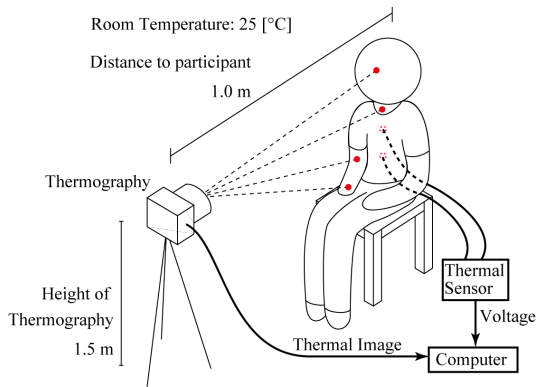


Figure 2 Experiment system

と P 値を **Table 1, 2** に示す. Table 1 で各部位の相関係数 R を見ると, Breast の温度を T_B , Upper arm の温度を T_U , Stomach の温度と T_S , Neck の温度を T_N として,

$$R_{T_B, T_U} = 0.8209, R_{T_S, T_N} = 0.8354 \quad (2)$$

となり, Breast は Upper arm と, Stomach は Neck と強い相関があることがわかる. Table 2 において上記の組の P 値を見ると, これらの相関は有意水準 0.01 で有意であると言える. それぞれの組に対して最小二乗法により求めた回帰直線を **Fig. 3** と **Eq. (3)** に示す.

$$T_B = 0.440T_U + 20.271, T_S = 0.721T_N + 9.018 \quad (3)$$

Eq. (3) によるサーモグラフィから得た熱画像を用いる着衣下体表面温度推定の妥当性について検討を行う. Eq. (4), で表される回帰直線の当てはまりの良さを示す決定係数 R^2 は, Eq. (2) の相関係数 R を 2 乗することで求められ,

$$R^2_{T_B, T_U} = 0.6979, R^2_{T_S, T_N} = 0.6738 \quad (4)$$

となる. 従って Eq. (3) に示す回帰直線は元のデータのおよそ 7 割を説明することができることとなる. また, Eq. (3) における元データの推定の標準誤差 S を **Eq. (5)**, 標準誤差を含む着衣下体表面温度推定式を **Eq. (6)** に示す.

$$S_{BU} = 0.343, S_{SN} = 0.405 \quad (5)$$

$$T_B = 0.440T_U + 20.271 \pm 0.343,$$

$$T_S = 0.721T_N + 9.018 \pm 0.405 \quad (6)$$

Figure 3 において直線とよくフィットしないデータが幾つか見られるが, 今回の実験では被験者の上半身着衣のみを所定の着衣にしたことや, 測定日が各データで異なり環境に対する生理的反応に差が生じたことなどが原因として考えられる. 以上の結果より, サーモグラフィを用いる着衣下体表面温度の推定は可能であると考えられる.

3. 結 論

本研究では, サーモグラフィから得られた熱画像を用いることで, 着衣下の体表面温度の推定を目的とした. 提案手法では, 人の体の各部位の体表面温度には相関があると仮定し, 相関行列の作成と直線近似の回帰分析を行う. 提案手法の仮定を検証するため, 熱画像の撮影と温度センサによる着衣下の体表面温度測定を行った. その結果を元に体の各部位の温度を変数とした相関行列を作成したところ, 着衣下の腹部と首元, 着衣下の胸部と上腕部の温度との間にそれぞれ 0.05, 0.01 水準で有意な相関が見られた. 以上

Table 1 Correlation matrix

	Breast	Stomach	Face	Neck	Upper arm	Hand
Breast	1.0000	0.7299	0.3693	0.5250	0.8209	0.5515
Stomach	0.7299	1.0000	0.5585	0.8354	0.6972	0.5019
Face	0.3693	0.5585	1.0000	0.8231	0.6414	0.6691
Neck	0.5250	0.8354	0.8231	1.0000	0.6765	0.5176
Upper arm	0.8209	0.6972	0.6414	0.6765	1.0000	0.7644
Hand	0.5515	0.5019	0.6691	0.5176	0.7644	1.0000

Table 2 P- value matrix

	Breast	Stomach	Face	Neck	Upper arm	Hand
Breast	1.0000	0.0020	0.1755	0.0445	0.0002	0.0331
Stomach	0.0020	1.0000	0.0305	0.0001	0.0039	0.0566
Face	0.1755	0.0305	1.0000	0.0002	0.0100	0.0064
Neck	0.0445	0.0001	0.0002	1.0000	0.0056	0.0482
Upper arm	0.0002	0.0039	0.0100	0.0056	1.0000	0.0009
Hand	0.0331	0.0566	0.0064	0.0482	0.0009	1.0000

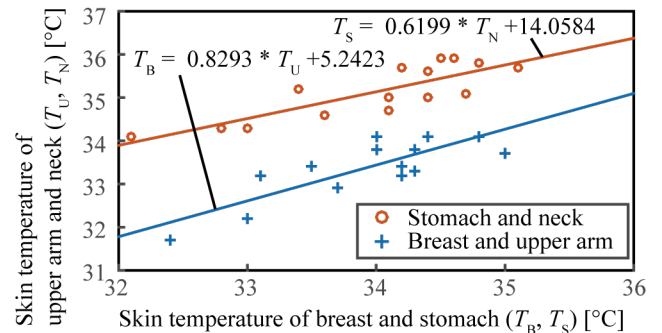


Figure 3 Regression line

からサーモグラフィを用いる着衣下体表面温度の推定は可能であると考えられる.

参考文献

- (1) ISO7730: 2005(E): Ergonomics of thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, ISO, 2005.
- (2) 成瀬哲生, 梶井宏宣, 事務所建築における温冷感と熱的要素の季節変動について: 室温と温冷感と着衣量との関係について, 人間-熱環境系シンポジウム報告集, vol. 1, pp. 51-54, 1977.
- (3) 小笠原英子, 藪田豊, 水谷孝一, 石川幸雄, 温熱画像を用いた生活空間の温熱快適性評価法, バイオエンジニアリング講演会講演論文集, vol. 2004, no. 16, pp. 197-198, 2004.
- (4) 三平和夫, 多屋秀人, サーマルマネキンによる着衣の熱抵抗の測定, 空気調和・衛生工学会論文集, vol. 6, pp. 19-25, 1978.
- (5) ASHRAE Standard 55-2004, Thermal environmental conditions for human occupancy, American society of heating, refrigerating, and air-conditioning engineers, Atlanta (2004)
- (6) 佐野祐士, 水谷孝一, 善甫啓一, 若槻尚斗, 小笠原英子: "人体表面の放射温度分布を特徴量とするコサイン類似度を用いる着衣量推定," 生活生命支援医療福祉工学系連合大会2014 講演論文集CD-ROM, GS9-1