

赤外線センサアレイを用いた温度と空間の絞り込みによる 手振り動作認識に関する検討

鳥山 千智[†] 細野 峻司[†] 高橋 友和^{††,†} 出口 大輔^{†††,†}
井手 一郎[†] 村瀬 洋[†]

[†] 名古屋大学 大学院情報科学研究科, 〒 464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町
^{††} 岐阜聖徳学園大学 経済情報学部, 〒 500-8288 岐阜県岐阜市中鶯 1-38
^{†††} 名古屋大学 情報連携統括本部, 〒 464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町
E-mail: [†]{toriyamac,hosonot}@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp, ^{††}ttakahashi@gifu.shotoku.ac.jp,
^{†††}, [†]ddeguchi@nagoya-u.jp, [†]{ide,murase}@is.nagoya-u.ac.jp

あらまし 本報告では、赤外線センサアレイを用いた手振り動作認識手法を提案する。赤外線センサアレイは熱源から放射される赤外線を検知し空間の大きな温度分布を取得する装置であり、個人のプライバシーを保護しつつ人体の位置や動きをとらえることができるという利点を持つ。しかし、このセンサから取得できる温度画像は低解像度であるため、ジェスチャの認識は困難である。そこで、提案手法では手振り動作を認識対象とし、動作領域をもとに参照データ系列と入力データ系列を照合する領域を空間的に絞り込むことで手振り動作認識を行なう。このとき、他の熱源の影響を抑制するため、人体らしい温度に重み付けを行なうことで温度の絞り込みも行なう。また、提案手法の有効性を確認するために手振り動作の認識実験を行なった結果および考察についても報告する。

キーワード 赤外線センサアレイ, ジェスチャ認識

A study on hand waving gesture recognition by thermo-spatial restriction using a far-infrared sensor array

Chisato TORIYAMA[†], Takashi HOSONO[†], Tomokazu TAKAHASHI^{††,†}, Daisuke DEGUCHI^{†††,†},
Ichiro IDE[†], and Hiroshi MURASE[†]

[†] Graduate School of Information Science, Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8601 Japan

^{††} Faculty of Economics and Information, Gifu Shotoku Gakuen University
Nakauzura 1-38, Gifu-shi, Gifu, 500-8288 Japan

^{†††} Information and Communications Headquarters, Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8601 Japan

E-mail: [†]{toriyamac,hosonot}@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp, ^{††}ttakahashi@gifu.shotoku.ac.jp,
^{†††}, [†]ddeguchi@nagoya-u.jp, [†]{ide,murase}@is.nagoya-u.ac.jp

Abstract We propose a hand waving gesture recognition method using a far-infrared sensor array. A far-infrared sensor array captures the spatial distribution of temperature as a thermal image by detecting far-infrared waves emitted from heat sources. It has an advantage of being able to capture the human position and movement while protecting the privacy of the target individual. However, it is difficult to recognize a gesture from the thermal images due to its low-resolution. Therefore, the proposed method matches a reference and an input data only in a restricted gesture area. Also, to reduce the influence of other heat sources, the proposed method weights images according to human body temperature. We demonstrate the effectiveness of the method through an experiment and discuss its result.

Key words Far-infrared sensor array, gesture recognition

1. はじめに

機器への入力インタフェースとしてジェスチャインタフェースが注目されている [1]。ジェスチャは自身の体を動かして表現するため、直観的に行なうことができる手軽なインタフェースとして需要がある。多くのジェスチャインタフェースには、加速度センサのような接触型の機器 [2] や、RGB-D カメラ [3] や可視光カメラ [4] のような非接触型の機器が用いられている。しかし、接触型の機器を用いる場合、センサが搭載された機器を装着しなければならないため、機器が手元にない場合は利用することができない。一方、非接触型の機器を用いる場合、ユーザは機器を装着する必要がなく、可視光カメラや RGB-D カメラの撮影範囲内にいれば自分の体のみで利用できる。しかし、可視光カメラや RGB-D カメラには利用できる場所が限られるという問題がある。例えば、可視光カメラは暗闇で人体を検知することができないため、灯りのない場所では利用できない。また、可視光カメラと RGB-D カメラは撮影画像から個人を特定可能であり、ユーザに対して常に撮影されているという心理的負荷がかかるという問題があるために、寝室や浴室への設置は難しい。これらの問題点に対する一つの解決策として赤外線センサアレイの利用が考えられる [5], [6]。赤外線センサアレイは熱源から放射される赤外線を検知し、空間の大まかな温度分布を取得することができるセンサである。図 1 に可視光カメラと赤外線センサアレイで人物を撮影した例を示す。このように、可視光カメラでは人物の顔や性別、体型などの個人情報取得できてしまう。一方、赤外線センサアレイでは撮影画像にテクスチャは現れず、人体の形状も詳細まではわからない。そのため、個人のプライバシーを保護しつつ人体の位置や動きをとらえることができる。そこで本稿では、赤外線センサアレイを用いた手振り動作検出手法について報告する。手振り動作はジェスチャの中でも単純かつ直観的なものであり、機器の入切のような操作を行なうことができると考えられるため、手振り動作を認識対象動作とした。

これまでに行われているジェスチャ認識の研究に関して述べる。Fuji ら [7] は腕の 3 次元的な向きの情報を用いたジェスチャ認識手法について提案している。腕の向きを推定するために Kinect [8] を用いて人体の関節点を取得している。新妻ら [9] は、色情報から手領域を検出し追跡する手法を提案している。追跡した軌跡を事前に取得した軌跡パターンと照合することでジェスチャ認識を行なっている。しかし、赤外線センサアレイは解像度が低いため人体の形状を正確にとらえることができない。また、物体のテクスチャも取得することができないため色情報は取得できない。そのため、これらのようなジェスチャ認識手法をそのまま適用することはできない。

そこで、我々は赤外線センサアレイに適したジェスチャ認識手法を提案する。赤外線センサアレイは熱源の大まかな形状しかとらえることができないため、手領域と腕領域を区別することは困難である。そのため、腕領域も含めた手振り動作部分全体を手振り動作領域として、認識処理に用いる領域を空間的に絞り込む。この手振り動作領域を、事前に取得した参照データ

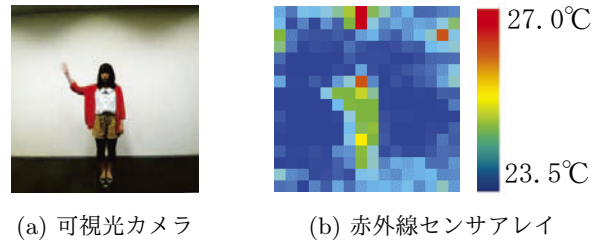


図 1 人体を可視光カメラと 16×16 画素の赤外線センサアレイで撮影した例。

系列と入力データ系列において照合することで手振り動作を認識する。入力データ系列の手振り動作領域は、事前に与えられた参照データ系列の手振り動作領域をもとに決定する。その際、背景に人体以外の熱源が存在すると人体との区別がつかなくなり、手振り動作領域の決定が失敗する可能性がある。そこで、人体らしい温度に重みを付けることで温度の絞り込みを行う。重み付けされた手振り動作領域同士で相違度を算出することで、背景の影響に頑健な手振り動作認識を行なう。

以下、2. で温度と空間の絞り込みによる手振り動作認識について述べ、3. で提案手法の有効性を確認するための実験およびその結果、考察について述べる。最後に 4. で今後の課題について検討し、本報告を結ぶ。

2. 温度と空間の絞り込みによる手振り動作認識

本手法では、参照データ系列を事前に 1 つ取得し、その系列と入力データ系列の相違度を算出することで手振り動作の認識を行なう。提案手法における処理の流れを図 2 に示す。提案手法は大きく分けて事前処理と認識処理に分けられる。事前処理では、参照データ系列に人体らしい温度を基準とした重み付けを行ない、フレーム間差分値を算出する。さらに、手振り動作領域を時空間的に切り出すことで空間の絞り込みを行なう。これにより、背景に含まれる熱源やノイズの影響を抑制できる。このとき、参照データにおける手振り動作領域は人手で与えられたものを用いる。認識処理では参照データ系列と入力データ系列において DP マッチング [10] を用いて相違度を算出することで照合を行ない、手振り動作認識を行なう。相違度の算出は、参照データ系列における手振り動作領域と入力データ系列における手振り動作領域の間のみで行なう。入力データ系列における手振り動作領域は、事前処理で切り出された参照データ系列の手振り動作領域をもとに探索することで決定する。以降、各処理について詳しく述べる。

2.1 事前処理

2.1.1 温度の絞り込み

図 3(b) のように、動作する人物の背景に他の熱源が存在すると、人体と他の熱源の区別がつきにくくなる。そのため、人体らしい温度に重み付けを行なうことで温度を絞り込み、人体を強調させる。参照データ系列 R に対する重み付けは、

$$R_x^{(j)} = \exp\left(-\frac{|R^{(j)}(\mathbf{x}) - T_r^{(j)}|^2}{2}\right) R_x^{(j)}, \quad (1)$$

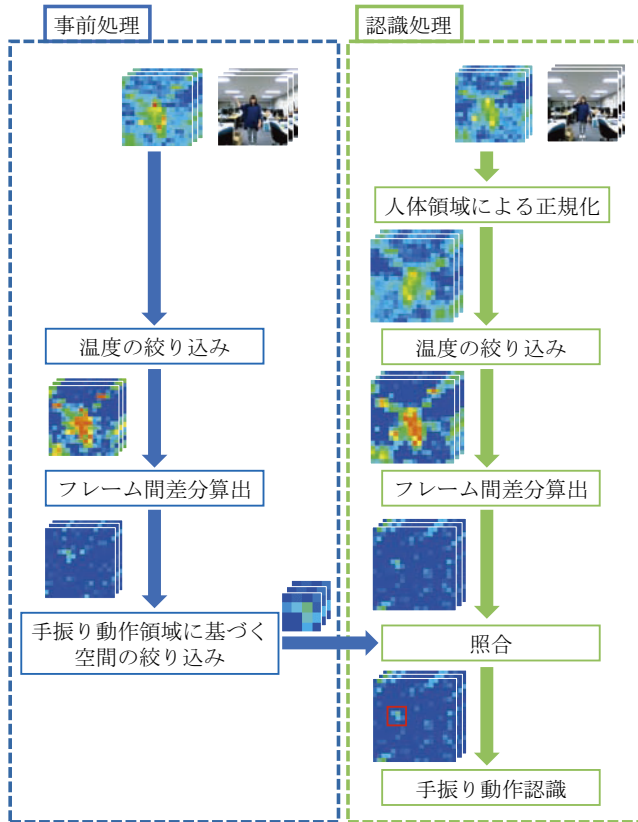


図2 提案手法の処理流れ

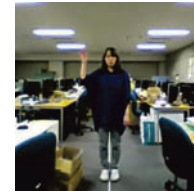
により行なう。ここで、 $R_{\mathbf{x}}^{(j)}$ は参照データ系列の j 番目のフレームにおける画素 \mathbf{x} の値である。また、 $T_r^{(j)}$ は i 番目のフレームにおける人体領域内の画素を昇順に整列した時の上側ヒンジの値である。上側ヒンジとは上側四分位数である。参照データ系列の人物領域は事前に矩形で与えられており、人体領域内において上側ヒンジの値を人体らしい温度とすることにより、人体矩形内に含まれる背景画素の影響を受けることなく、人体らしい温度を選択することができる。この値を基準温度として、Gauss 分布に従って重み付けを行ない温度を絞りこむことで、人体以外の熱源の影響を抑制する。図 3(c) に、式 (1) により重み付けされた温度画像の例を示す。温度画像中の背景と人体との温度差がより明確になっていることがわかる。

2.1.2 フレーム間差分算出及び手振り動作領域に基づく空間の絞り込み

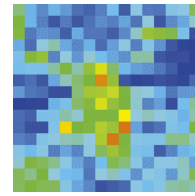
重み付けされた参照データ系列のフレーム間差分値 R'' を、

$$R_{\mathbf{x}}''^{(j)} = R_{\mathbf{x}}^{(j)} - R_{\mathbf{x}}^{(j-1)}, \quad (2)$$

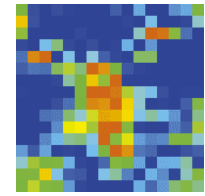
のように算出する。これにより、動作部分のみから値を得ることができるため、動作部分のみを考慮することができる。また、背景や人体の温度は季節などの周辺環境により変化するため、フレーム間差分値をフレーム毎に平均 0、分散 1 となるように標準化する。この系列から、事前に与えられている手振り動作領域を切り出すことで空間の絞り込みを行ない、認識処理に用いる。



(a) 可視光カメラ



(b) 温度の重み付け前



(c) 温度の重み付け後

図3 温度の絞り込み例

2.2 認識処理

2.2.1 人体領域による正規化

参照データ系列取得時と入力データ系列の取得時でセンサから人体までの距離が異なる場合、取得できる温度画像上の人体領域の大きさが変化する。そのため、参照データ系列と入力データ系列の人体領域の大きさが等しくなるように、空間方向に入力データ系列を拡大・縮小することにより正規化する。参照データ系列に比べて人体領域が小さい場合は、バイキュービック補間を用いて入力データ系列を拡大する。参照データ系列に比べて人体領域が大きい場合は、入力画像を十分な大きさに拡大してから、ダウンサンプリングすることで目的の大きさに入力データ系列を縮小する。これにより、縮小時に発生するエイリアシングを抑制する。

2.2.2 照合

事前処理により参照データ系列から切り出された手振り動作領域のみの系列と入力データ系列との相違度を計算することにより照合を行なう。このとき、入力データ系列に対しても同様に、参照データ系列と同じ大きさの手振り動作領域のみの系列を切り出し、相違度計算を行なう。これにより、手振り動作領域以外の影響を抑制した相違度計算をすることができる。入力データ系列における手振り動作領域を決定するため、複数の手振り動作領域候補を入力データ系列から切り出す。手振り動作領域候補を人体領域周辺から切り出すことにより、入力データ系列と参照データ系列の手振り動作位置のずれに対応する。その後、各手振り動作領域候補において参照データ系列から切り出された手振り動作領域との相違度を計算することにより照合を行なう。算出された相違度のうち、最も相違度が小さくなる手振り動作領域候補とその相違度を、入力データ系列における手振り動作領域と相違度とする。

各手振り動作領域候補における相違度は DP マッチングにより計算する。このとき、事前処理同様、入力データ系列においても、フレーム間差分の算出と標準化を行なう。DP マッチングでは参照データ系列と入力データ系列の動作候補領域における相違度 $D(R'', I'')$ を求める。ここでは参照データ系列の長さを J 、入力データ系列の長さを K とする。ある候補領域 c に

における DP マッチングにおけるコスト $g_c(R''^{(j)}, I''^{(k)})$ は、

$$g_c(R''^{(j)}, I''^{(k)}) = \min \begin{cases} g_c(R''^{(j-1)}, I''^{(k)}) + d(R''^{(j)}, I''^{(k)}) \\ g_c(R''^{(j-1)}, I''^{(k-1)}) + d(R''^{(j)}, I''^{(k)}) \\ g_c(R''^{(j)}, I''^{(k-1)}) + d(R''^{(j)}, I''^{(k)}), \end{cases} \quad (3)$$

により計算される。このとき、画像間の距離 $d(R''^{(j)}, I''^{(k)})$ は、

$$\begin{aligned} d(R''^{(j)}, I''^{(k)}) &= \sum_{n=0}^N \|R''_{\mathbf{x}_n^{(j)}} - I''_{\mathbf{x}'_n^{(k)}}\|^2 \\ &= \sum_{n=0}^N (\|R''_{\mathbf{x}_n^{(j)}}\|^2 - 2R''_{\mathbf{x}_n^{(j)}} I''_{\mathbf{x}'_n^{(k)}} + \|I''_{\mathbf{x}'_n^{(k)}}\|^2), \end{aligned} \quad (4)$$

により計算される。このとき、 N は手振り動作領域の総画素数である。また、入力データ系列と参照データ系列は標準化されているため、式 (4) はフレーム間の正規化相互相関 $S(R''_{\mathbf{x}_n^{(j)}}, I''_{\mathbf{x}'_n^{(k)}})$ を用いて、

$$d(R''^{(j)}, I''^{(k)}) = \sum_{n=0}^N 2(1 - S(R''_{\mathbf{x}_n^{(j)}}, I''_{\mathbf{x}'_n^{(k)}})), \quad (5)$$

と変形できる。つまり、相違度 $d(R''^{(j)}, I''^{(k)})$ は画像内における均一な温度変化に頑健であることがわかる。このとき、正規化相互相関 $S(R''_{\mathbf{x}_n^{(j)}}, I''_{\mathbf{x}'_n^{(k)}})$ は、

$$S(R''_{\mathbf{x}_n^{(j)}}, I''_{\mathbf{x}'_n^{(k)}}) = \frac{\sum_{n=0}^N R''_{\mathbf{x}_n^{(j)}} I''_{\mathbf{x}'_n^{(k)}}}{\sqrt{\sum_{n=0}^N (R''_{\mathbf{x}_n^{(j)}})^2 \times \sum_{n=0}^N (I''_{\mathbf{x}'_n^{(k)}})^2}}, \quad (6)$$

と定義される。以上のように、参照データ系列の手振り動作領域と入力データ系列の手振り動作候補領域間のコスト $g_c(J, K)$ を算出し、その時の経路長を L とする。最後に、候補領域の中から最小コスト

$$D(R'', I'') = \min_c \frac{g_c(J, K)}{L}, \quad (7)$$

を持つ候補領域を入力データ系列における手振り動作領域として位置合わせを行なう。この時算出された $D(R'', I'')$ を、参照データ系列と入力データ系列の相違度とする。算出された相違度にしきい値処理を行い、しきい値以下であれば手振り動作として認識する。

3. 実験

提案手法の有効性を確認するために、赤外線センサアレイ (OMRON 社製 Thermal sensor D6T-1616L) で手振り動作をしている人物を撮影し、その動画を用いて実験を行なった。実験には、図 4 のような、16×16 画素のサーモパイル型赤外線センサアレイを用いた。撮影した動画のフレームレートは 10 fps である。以下、実験で使用したデータセット、実験条件、実験結果とその考察について述べる。



図 4 16 × 16 画素赤外線センサアレイ

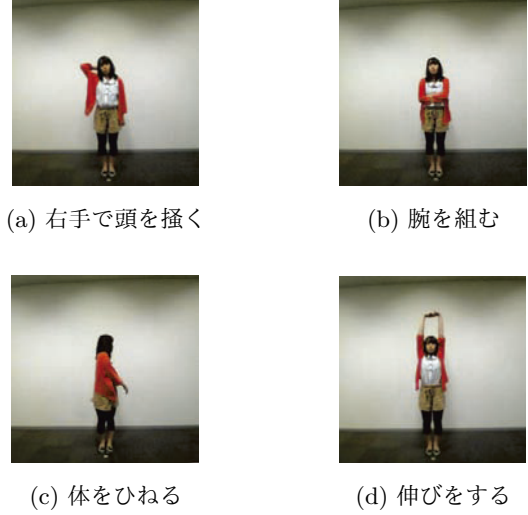


図 5 負事例の系列の動作

3.1 データセット

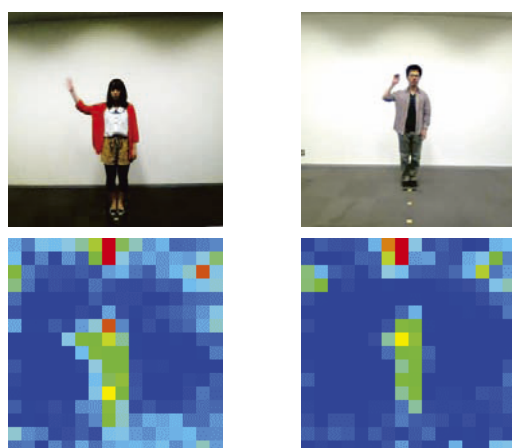
本実験における認識対象動作を「4 秒程度で右手を 2 回振る」という手振り動作としてデータセットを構築した。データセット撮影時の条件として、赤外線センサアレイと人物は正対しているものとした。データセットは同一人物、同環境における参照データ系列 1 つと複数の入力データ系列を 1 組として、計 8 組のデータセットを構築した。参照データ系列は、赤外線センサアレイと人物の距離が 150 cm の位置で認識対象動作のみをしている系列である。入力データ系列は、赤外線センサアレイと人物の距離が 90 cm から 270 cm の間 30 cm 刻みで撮影を行なった。正事例は認識対象動作のみをしている系列、負事例は認識対象動作以外の動作、(a) 右手で頭を掻く (b) 腕を組む (c) 体をひねる (d) 伸びをするの中の、いずれかの動作を行なっている系列である。図 5 に負事例データに含まれる動作の例を示す。撮影人数は 4 人、撮影環境は背景に熱源がない場合とある場合の両方を用いた。図 6(a) は背景に熱源がない場合、図 6(b) は背景に熱源がある場合の例である。背景に熱源がない場合は、観測人物のみが温度が高く観測されるような最も単純な場合を想定している。また、背景に熱源がある場合は、パソコンや動いている人物など様々な熱源が人体とともに観測されており、より実環境に近い場合を想定している。

3.2 実験条件

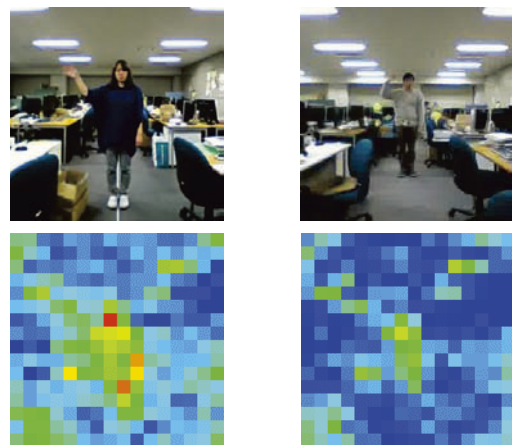
提案手法の有効性を確認するために比較実験を行なった。比較手法には (1) 温度の絞り込みは行なわず手振り動作領域の絞り込みのみ行なう手法 (2) 温度の絞り込みは行なうが手振り動作領域の絞り込みは行なわない手法 (3) 温度の絞り込みも手振り動作領域の絞り込みも行わない手法を用いた。手振り動

表 1 実験結果 (F 値). 太字は各データセットで最も精度が高かった数値を表している.

データセット	背景熱源	温度と空間の絞り込み (提案手法)	空間のみ絞り込み	温度のみ絞り込み	絞り込みなし
A	なし	1.00	1.00	0.77	0.82
B	なし	0.83	0.92	0.74	0.79
C	なし	1.00	1.00	0.74	0.71
D	あり	0.91	0.83	0.88	0.82
E	あり	0.88	0.90	0.85	0.86
F	あり	0.98	0.93	0.95	0.85
G	あり	0.88	0.79	0.81	0.77
H	あり	0.91	0.91	0.89	0.85
平均	-	0.92	0.91	0.82	0.82



(a) 背景熱源なし



(b) 背景熱源あり

図 6 撮影環境の例

作領域を絞り込まない場合は, 手振り動作領域を含む人体領域で照合を行なう. 図 7 に手振り動作領域と人体領域の例を示す. これにより, 温度と空間それぞれの絞り込みによる有効性を調査した. また, 評価指標には F 値を用い, 手振り動作認識時におけるしきい値はデータセットごとに最良の結果が得られるように設定した.

3.3 実験結果および考察

実験結果を表 1 に示す. これは, それぞれのデータセットに

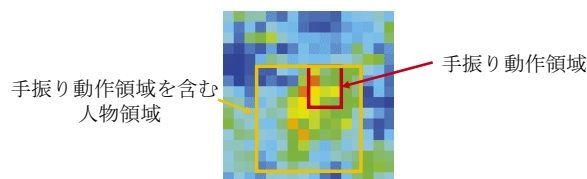


図 7 相違度計算に用いる領域

表 2 データセット C における手振り動作領域の絞り込みを行なった場合と行なわなかった場合の相違度

	絞り込みあり		絞り込みなし	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
正事例	0.78	0.12	1.71	0.24
負事例	1.31	0.07	1.91	0.07

における各手法の精度を示しており, 平均では提案手法による手振り動作認識が最も精度がよいことがわかる. また, 手振り動作領域の絞り込みが特に有効であることが分かった. 赤外線センサーアレイで撮影した温度画像には熱源以外にも外気温の揺らぎなどから温度変化が生じ, それがノイズになる場合がある. そのため, 手振り動作領域に基づいて空間を絞り込むことでノイズの影響が軽減され精度が向上したと考えられる. 表 2 にデータセット C における空間のみ絞り込みを行なった場合とそうでない場合の相違度の平均と標準偏差を示す. 空間の絞り込みを行なうことにより, 全体的に相違度が低くなっていることがわかる. また, 正事例と負事例の相違度の差が大きくなっている. このことから, ノイズの影響が軽減されたことで相違度が低くなり, また, 手振り動作とそれ以外が分離しやすくなったと考えられる.

図 8 に温度の絞り込みが有効であった場合の例を示す. 背景に熱源がある場合, 温度の絞り込みは有効であった. これは, 温度を人体温度周辺に絞り込んだことにより, 背景温度の影響や他の熱源の影響を削減できたためと考えられる. また, 人体が強調されたことで手振り動作領域が正しく決定されたことも要因の一つと考えられる. 背景の熱源と人体の温度が似ている場合, 動作領域の際に背景の熱源の位置に位置合わせされてしまう場合がある. 図 8(b) では温度の絞り込みにより手振り動

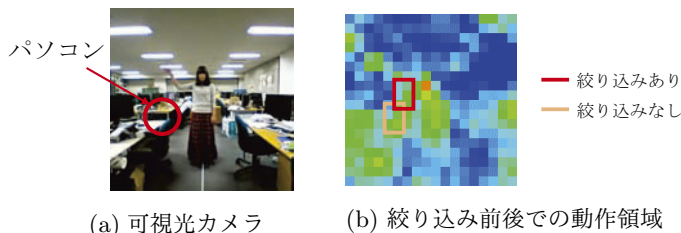


図 8 温度の絞り込みにより手振り動作領域が正しく決定された例

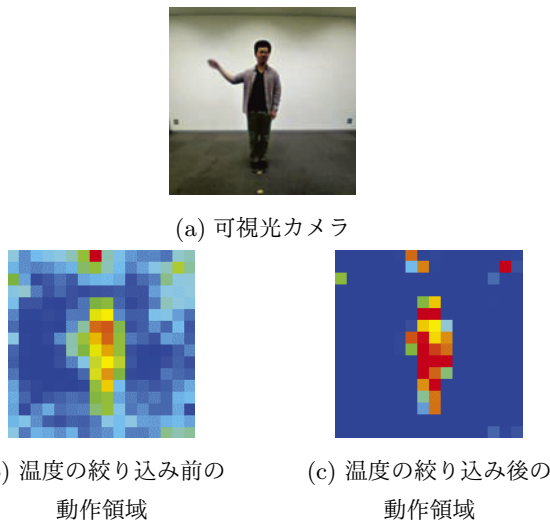


図 9 温度の絞り込みにより手振り動作領域が見えなくなった例

作領域が正しく決定されていることがわかる。絞り込みなしでは背景にあるパソコンの位置に手振り動作領域が決定されている。これは、人体温度を基準として重みづけを行い、人体温度付近の温度変化の影響を大きくすることで、手振り動作が行なわれている部分のフレーム間差分値がより明確になったと考えられる。

温度の絞り込みが有効ではなかった例も存在した。データセット B において温度の絞り込みを行なった結果、精度が低下した。これは、データセット B の観測者の胴体の温度と腕の温度の差が、他の観測者に比べて大きかったことが原因だと考えられる。図 9 にデータセット B 内のあるフレームにおける温度の絞り込みを行なった場合とそうでない場合の例を示す。図 9(a) では手振り動作部分が見えるが、図 9(b) では温度の絞り込みによって手振り動作部分の影響が背景同様小さくなってしまった。これは、腕の胴体に対する相対温度が他の観測者に比べて低いことが原因である。そのため、腕が背景に近い温度となってしまう、手振り動作を認識できなくなったと考えられる。

4. む す び

本報告では、赤外線センサアレイを用いた手振り動作認識の手法について述べた。提案手法では、参照データ系列を事前に取得し入力データ系列と照合することにより手振り動作の認識を行なった。また、赤外線センサアレイから取得した動画に対して温度と空間を絞り込むことにより認識精度の向上を図った。認識実験では、提案手法の有効性を確認するために空間のみ絞り込む手法、温度のみ絞り込む手法、絞り込みを行わない手法

と比較した。空間の絞り込みはさまざまな環境において有効であることを確認した。温度の絞り込みは、人体とそれを区別することができることから、背景に他の熱源がある場合に有効性を確認した。

今後は、本報告では既知とした人物領域の検出方法や動作領域の検出方法について検討する。

謝辞 日頃より、数多くの御助言を頂く名古屋大学村瀬研究室諸氏に深く感謝する。本研究の一部は科学技術研究費補助金による。また、赤外線センサアレイを提供していただいたオムロン株式会社に感謝する。

文 献

- [1] 楠見 孝, “インタフェースデザインにおけるメタファ,” デザインと記号論, vol.10, no.1, pp.64–73, Sept. 2002.
- [2] 村尾和哉, 寺田 努, “加速度センサの常定性判定による動作認識手法,” 情処学論, vol.52, no.6, pp.1968–1979, June 2011.
- [3] U. Mahbub, H. Imtiaz, T. Roy, M.S. Rahman, and M.R. Ahad, “A template matching approach of one-shot-learning gesture recognition,” Pattern Recognition Letters, vol.34, no.15, pp.1780–1788, Nov. 2013.
- [4] H.-K. Lee and J.H. Kim, “An HMM-based threshold model approach for gesture recognition,” IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.21, no.10, pp.961–973, Oct. 1999.
- [5] 木股雅章, “赤外線センサの開発動向,” 映像情報メディア学技報, IST2011-9, Feb. 2011.
- [6] 長谷川沙織, 山下典久, 三田 彰, “焦電型赤外線センサを用いた室内生活空間における人間の行動把握,” 日本建築学 2008 年度大会学術講演梗概集, vol.A-2, pp.417–418, July 2008.
- [7] T. Fujii, J.H. Lee, and S. Okamoto, “Gesture recognition system for human-robot interaction and its application to robotic service task,” Proc. of the Int. MultiConference of Engineers and Computer Scientists, vol.1, pp.63–68, March 2014.
- [8] J. Shotton, R. Girshick, A. Fitzgibbon, T. Sharp, M. Cook, M. Finocchio, R. Moore, P. Kohli, A. Criminisi, A. Kipman, and A. Blake, “Efficient human pose estimation from single depth images,” IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.35, no.12, pp.2821–2840, Dec. 2013.
- [9] 新妻佑記, 松崎 隆, 矢口勇一, 岡 隆一, “時空間連続 DP を用いた動画からの空中文字認識,” 信学技報, PRMU2012-222, March 2013.
- [10] 内田誠一, “DP マッチング概説:基本と様々な拡張,” 信学技報, PRMU2006-166, Dec. 2006.