

赤外線センサアレーを用いた人体追跡——温度と空間に関する局所
鋭敏性ヒストグラムの提案——

細野 峻司^{†*a)} 高橋 友和^{††,†b)} 出口 大輔^{†††,†c)} 井手 一郎^{†d)}
村瀬 洋^{†e)} 相澤 知禎^{†††} 川出 雅人^{†††}

Human Tracking Using Far-Infrared Sensor Array——Proposal of a Thermo-
Spatial Sensitive Histogram——

Takashi HOSONO^{†*a)}, Tomokazu TAKAHASHI^{††,†b)}, Daisuke DEGUCHI^{†††,†c)},
Ichiro IDE^{†d)}, Hiroshi MURASE^{†e)}, Tomoyoshi AIZAWA^{†††}, and Masato KAWADE^{†††}

あらまし 本論文では、赤外線センサアレーを用いた人体追跡手法を提案する。赤外線センサアレーは空間的な温度分布を低解像度熱画像として捉えることができる装置である。このセンサを用いて人体追跡を行う場合、出力画像が低解像度であるため形状特徴や単純なしきい値処理を用いて高精度に人体を追跡することは困難である。そこで本論文では、低解像度熱画像中の人体の見えを表現するための画像特徴量として、温度と空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムを提案する。このヒストグラムを追跡に用いることにより、遮蔽や姿勢変動、複雑な背景に頑健な人体追跡を実現する。このヒストグラムでは、注目画素との距離と、参照温度との温度差により重みづけされた値をヒストグラムに投票する。これにより、他の熱源や背景の影響を抑制した複数のヒストグラムで追跡対象を表現する。提案手法の有効性を確認するために、赤外線センサアレーで撮影された様々な熱画像系列を用いて評価実験を行った。実験の結果から、可視光カメラを用いた人体追跡のために提案された手法を熱画像系列に適用した場合に比べ、提案手法では追跡成功率が約 10%向上することを確認した。

キーワード 赤外線センサアレー、低解像度熱画像、人体追跡、ヒストグラム特徴

1. ま え が き

人体追跡は、ジェスチャ認識、人体行動解析、監視

カメラ映像解析等の要素技術として広く用いられている。多くの人体追跡システムには可視光カメラが用いられているが、可視光カメラは、得られた画像から容易に個人を特定できてしまい、見られているという威圧感や不安感を利用者に与えてしまうことがある。また、家庭内や事業所内等、利用者のプライバシーを考慮すべき場所への設置も困難なことがある。この問題は、フロアセンサ [1], [2] や赤外線センサネットワーク [3], [4] を用いた人体追跡システムによって回避できる。前者は感圧センサを床に敷き、足跡を検出することによって人体を追跡する。また後者は、人体の有無を判定できる単一素子の赤外線センサを分散させ、ネットワークを構築することによって、人体を追跡する。しかし、これらのシステムはプライバシーの問題を回避することは可能であっても、人体の形状を捉えることが困難であるため、ジェスチャ認識等のインタラクティブなシステムに用いることができない。

そこで、プライバシーの問題を回避しながら人体の

[†] 名古屋大学大学院情報科学研究科, 名古屋市
Graduate School of Information Science, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8601 Japan

^{††} 岐阜聖徳学園大学経済情報学部, 岐阜市
Faculty of Economics and Information, Gifu Shotoku Gakuen University, 1-38 Nakauzura, Gifu-shi, 500-8288 Japan

^{†††} 名古屋大学情報連携統括本部情報戦略室, 名古屋市
Information Strategy Office, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8601 Japan

^{††††} オムロン株式会社技術・知財本部技術開発センタ, 木津川市
Corporate R&D, OMRON Corporation, 9-1 Kizugawadai, Kizugawa-shi, 619-0283 Japan

* 現在, 日本電信電話株式会社

a) E-mail: hosonot@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp

b) E-mail: ttakahashi@gifu.shotoku.ac.jp

c) E-mail: ddeguchi@nagoya-u.jp

d) E-mail: ide@is.nagoya-u.ac.jp

e) E-mail: murase@is.nagoya-u.ac.jp

DOI:10.14923/transinfj.2015JDP7031

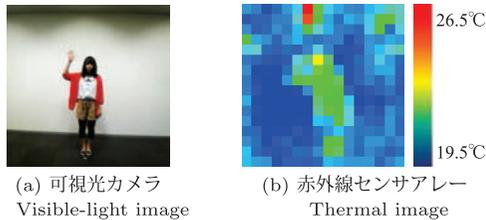


図 1 可視光カメラと 16×16 画素の赤外線センサアレーの出力例

Fig. 1 Example of an output of a 16×16 far-infrared sensor array.

大まかな形状を捉えることができる新たな装置として、赤外線センサアレーが注目されている [5]。赤外線センサアレーは、少数の赤外線センサを格子状に集約した装置であり、ある領域内の温度分布を計測することができる。図 1 に人体を可視光カメラで撮影した場合の画像と 16×16 画素の赤外線センサアレーで撮影した場合の画像例を示す。赤外線センサアレーによって撮影された熱画像から個人を特定することは困難であるため、赤外線センサアレーは、プライバシーの問題から可視光カメラの設置がためらわれるような家庭内や事業所内等に設置することが可能である。また、人体の大まかな形状を観測することができることから、ジェスチャ認識等のインタラクティブなシステムにも利用することができる [6], [7]。更に、赤外線センサアレーは人体から発せられる熱を観測するため、照明変動の影響を受けず、暗所でも人体を観測することが可能である。以上のことから、赤外線センサアレーを用いた人体追跡技術に対する需要が高まっている。

今日までに、可視光カメラを用いた様々な人体追跡手法が提案されてきた。多くの追跡手法では、追跡対象の見えを少数の特徴的な点により表現するために、特徴点ベースの追跡手法が用いられている [8], [9]。これらの手法では、追跡対象から追跡に有効なエッジやコーナ等の特徴点を抽出して追跡することで、正確かつ高速な追跡を可能にする。しかし、赤外線センサアレーを用いる場合は、出力画像が低解像度熱画像であるため、エッジやコーナ等の特徴点を抽出することは困難である。また、追跡対象領域に出現する輝度値の頻度により追跡対象を表現する、輝度ヒストグラムを用いた追跡手法も提案されている。輝度ヒストグラムは、追跡対象の姿勢変動の影響を受けにくいから、人体のような移動に伴い姿勢が変動する対象を追跡するのに適している。更に、エッジやコーナのような詳

細な画像特徴を必要としないため、遠方から撮影された低解像度の人体を追跡するためにも用いられている [10]。しかし、追跡対象を一つのヒストグラムで表現する場合、追跡対象が遮蔽された際に、ヒストグラムが大きく変化してしまい、追跡が困難になるという問題がある。そこで、この手法を改良した部分ヒストグラムを用いた手法が多く提案されている [11]~[13]。部分ヒストグラムを用いる手法では、まず追跡対象を複数の領域に分割し、各領域から個別に輝度ヒストグラムを作成する。これにより、追跡対象の一部の領域が遮蔽された場合でも、遮蔽されていない領域の輝度ヒストグラムを用いて、追跡を行うことができる。しかし、部分ヒストグラムを低解像度熱画像に適用すると、分割された各領域が小さくなり、十分な特徴を抽出できなくなってしまうため、高精度な追跡が困難になる。以上のように、可視光カメラのための人体追跡手法をそのまま赤外線センサアレーに適用した場合には、十分な精度が得られないと考えられる。

そこで本論文では、低解像度熱画像中の人体の見えを表現するための画像特徴量として、温度と空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムを提案する。このヒストグラムを追跡に用いることにより、遮蔽や姿勢変動、複雑な背景に頑健な人体追跡を実現する。このヒストグラムでは、注目画素との距離と、参照温度との温度差により重みづけされた輝度値の頻度をヒストグラムに投票する。このとき、位置が異なる複数の画素に注目することにより、対象物体を複数のヒストグラムで表現し、部分ヒストグラム同様、遮蔽に対して頑健に追跡対象を表現する。また、人体の温度を参照温度にすることにより、人体以外の熱源や背景の影響を抑制したヒストグラムを作成する。

以降、2. で、提案する赤外線センサアレーを用いた人体追跡について述べる。3. では、提案手法の有効性を確認するために行った評価実験について述べ、4. で実験結果に対する考察を加える。最後に、5. で検討課題を整理し、本論文をむすぶ。

2. 赤外線センサアレーを用いた人体追跡

2.1 処理の概要

提案手法の処理の流れを図 2 に示す。提案手法に対する入力、赤外線センサアレーにより撮影された熱画像系列であり、各フレームに対して人体を囲う矩形を追跡結果として出力する。ただし、入力系列の初期フレームには人体を囲う矩形がテンプレートの人体領

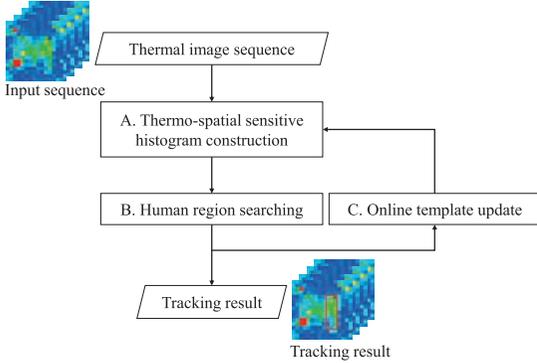


図2 提案手法の処理の流れ
Fig.2 Process flow of the proposed method.

域として与えられるものとする。提案手法は、初期フレームの人体領域から温度と空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムをテンプレートとして作成した後に、大きく三つの処理を行う。まず、A. 温度と空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムの作成処理において、入力フレームから人体候補領域を複数切り出し、温度と空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムを作成する。次に、B. 人体領域探索処理において、人体候補領域に対してテンプレートマッチングを行うことにより、最も類似する領域を追跡結果の人体領域として出力する。そして最後に、C. テンプレートの更新処理において、追跡結果を用いてテンプレートを更新する。このA., B., C. の処理を繰り返すことによって、人体領域を追跡する。

2.2 温度と空間に関する局所鋭敏性ヒストグラム

一般的な輝度ヒストグラムの場合、ある画像におけるヒストグラム \mathbf{H} のビン b_j ($j = 1, \dots, J$) の値は、

$$\mathbf{H}(b_j) = \sum_{i=1}^N Q(T_{\mathbf{x}_i}, b_j) \quad (1)$$

となる。ここで N は画像中の画素数であり、 $T_{\mathbf{x}_i}$ は i 番目の画素の位置 \mathbf{x}_i における輝度値である。また $Q(t, b_j)$ は輝度値 t がビン b_j に属する場合に 1、それ以外の場合に 0 を返す関数であり、

$$Q(t, b_j) = \begin{cases} 1 & (b_{j-1} < t \leq b_j) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2)$$

のように定義する。このヒストグラムを追跡に用いる場合には、追跡対象領域からヒストグラムを作成することで追跡対象を表現する。この際に、追跡対象を一つのヒストグラムのみで表現するため、追跡対象が遮

蔽された場合、ヒストグラムが大きく変化してしまうという問題がある。

この問題を解決するため、He らは空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムを提案している [14]。ある注目点 \mathbf{x}_p に対して、空間に関する局所鋭敏性ヒストグラム $\mathbf{H}_{\mathbf{x}_p}$ を作成する場合、ビン b_j の値は、

$$\mathbf{H}_{\mathbf{x}_p}(b_j) = \sum_{i=1}^N \alpha_1^{|\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_i|} Q(T_{\mathbf{x}_i}, b_j) \quad (3)$$

となる。ここで、 $0 < \alpha_1 < 1$ はある画素 \mathbf{x}_i と注目点 \mathbf{x}_p の距離による重みを制御するパラメータである。これにより、ヒストグラムに空間情報を含めることができる。このヒストグラムで追跡対象を表現する際には、複数の注目点 \mathbf{x}_p ($p = 1, \dots, P$) を用いることで、追跡対象を複数のヒストグラムで表現する。

空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムは、注目点との距離により重み付けされた輝度値の頻度をヒストグラムに投票することにより、背景画素の影響を抑制している。追跡を行う場合、追跡対象の移動に伴い背景が変化するため、背景画素の影響の抑制は重要である。そこで本論文では温度と空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムを提案し、参照温度との温度差により投票値を重み付けすることにより背景画素の影響を抑制する。可視光カメラの場合、人体は、服装や姿勢変動等の影響によって、様々な輝度値で観測されるが、赤外線センサアレーの場合は、観測される人体の温度は服装や姿勢変化の影響を受けにくい、おおむね様な温度で観測される。つまり、このヒストグラムにおいて参照温度を人体の温度にすることにより、背景や人体以外の熱源の影響を抑制したヒストグラムを作成することができる。ある参照温度 T_m において、温度に関する局所鋭敏性ヒストグラム \mathbf{H}^{T_m} を作成する場合、ビン b_j の値は、

$$\mathbf{H}^{T_m}(b_j) = \sum_{i=1}^N \alpha_2^{|T_m - T_{\mathbf{x}_i}|} Q(T_{\mathbf{x}_i}, b_j) \quad (4)$$

となる。ここで、 $0 < \alpha_2 < 1$ はある画素 \mathbf{x}_i の温度 $T_{\mathbf{x}_i}$ と参照温度 T_m の温度差による重みを制御するパラメータである。本論文では更に、これら二つのヒストグラムを組み合わせ温度と空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムも提案する。注目点が \mathbf{x}_p 、参照温度が T_m の場合の温度と空間に関する局所鋭敏性ヒストグラム $\mathbf{H}_{\mathbf{x}_p}^{T_m}$ のビン b_j の値は、

$$\mathbf{H}_{x_p}^{T_m}(b_j) = \sum_{i=1}^N \alpha_1^{\|x_p - x_i\|} \alpha_2^{|T_m - T_{x_i}|} Q(T_{x_i}, b_j) \quad (5)$$

となる．これにより，背景の影響に頑健な複数のヒストグラムで追跡対象を表現できるようになる．

2.3 人体追跡

2.3.1 温度と空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムの作成

追跡対象を表現するために，人体領域から図 3 に示すように温度と空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムを作成する．このとき，追跡対象領域中の複数の画素を注目点としてヒストグラムを作成することで，追跡対象を複数のヒストグラムで表現する．また，注目点の位置は，人体若しくは人体候補領域を囲む矩形内の画素に対して一定の間隔で，矩形内に均等に分布するように設定する．更に，式 (5) における参照温度 T_m はテンプレート中の画素値（温度）の中央値を用いる．これにより，テンプレート中に存在する背景画素の影響を受けずに人体の温度を参照温度とすることができる．

2.3.2 人体領域の探索

人体領域の探索では，切り出し枠をずらしながら走査することにより，入力フレームからテンプレートと同じ大きさの人体候補領域を切り出していく．このとき，人体候補領域を入力フレーム全体から網羅的に切り出すのではなく，1 フレーム前の追跡結果の周辺のみから作成することで，探索範囲を絞り込む．次に，切り出された各人体候補領域から温度と空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムを作成する．ヒストグラムを作成する際の矩形に対する注目点の相対位置と参照温度はテンプレートと同じのものを用いる．

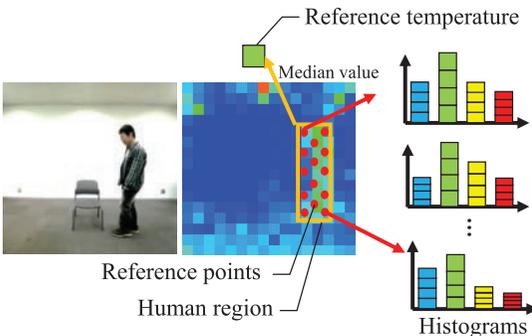


図 3 温度と空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムの作成
Fig.3 Construction of thermo-spatial sensitive histograms.

ある点 x を基準に切り出された人体候補領域とテンプレートの類似度 $S(x)$ は，

$$S(x) = \sum_{p=1}^P \phi(\tilde{\mathbf{H}}_{x_p}^{T_m}, \mathbf{H}_{x+x_p}^{T_m}) \quad (6)$$

により求める．ここで， P は注目点の数であり， $\tilde{\mathbf{H}}_{x_p}^{T_m}$ と $\mathbf{H}_{x+x_p}^{T_m}$ はそれぞれテンプレートと人体候補領域における p 番目の注目点から作成されたヒストグラムを表す．更に，各ヒストグラムにおける類似度を計算する関数 $\phi(\cdot, \cdot)$ はヒストグラムインタセクション [15] であり，

$$\begin{aligned} \phi(\tilde{\mathbf{H}}_{x_p}^{T_m}, \mathbf{H}_{x+x_p}^{T_m}) \\ = \sum_{j=1}^J \min(\tilde{\mathbf{H}}_{x_p}^{T_m}(b_j), \mathbf{H}_{x+x_p}^{T_m}(b_j)) \end{aligned} \quad (7)$$

により定義される．全ての人体候補領域についてテンプレートとの類似度 $S(x)$ を計算した後，類似度が最も高くなる人体候補領域を，入力フレームにおける追跡結果の人体領域とする．

2.3.3 テンプレートの更新

追跡を行う際，人体の見えは刻々と変化していく．これに対応するために，テンプレートの更新を逐次的に行う．これは，He らが用いているテンプレート更新方法 [14] を提案手法の温度と空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムに適用したものである．具体的には，遮蔽による影響を削減するため，各注目点のヒストグラムに対して更新を行うか否かを選択的に決定する．ヒストグラム間の類似度が高い場合は，テンプレートとの差異がほとんどないため，更新を行う必要がない．また，ヒストグラム間の類似度が著しく低い場合も，遮蔽が発生していると考えられるため，更新を行う必要がない．そこで，ヒストグラム間の類似度が一定の範囲内の場合は姿勢変動の影響による変化とみなし，更新を行うことで見えの変化に対処する．各ヒストグラムの更新は，

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{H}}_{x_p}^{T_m} &= \mathbf{H}_{x+x_p}^{T_m} \\ \text{if } F_1 M < \phi(\tilde{\mathbf{H}}_{x_p}^{T_m}, \mathbf{H}_{x+x_p}^{T_m}) < F_2 M \end{aligned} \quad (8)$$

によって判定を行う．ここで $\mathbf{H}_{x+x_p}^{T_m}$ は追跡結果から作成されたヒストグラムであり， M は各注目点に対して作られたヒストグラム間の類似度の平均である．また， F_1 ， F_2 はテンプレートの更新されやすさを表すパラメータである．

3. 実 験

提案手法の有効性を確認するために、赤外線センサアレーで人体を撮影した熱画像系列を用いて実験を行った。実験を行うに当たり、 16×16 画素の赤外線センサアレーを用いてデータセットを構築した。図 4 に実験で使用した赤外線センサアレー (OMRON 社製 Thermal sensor D6T-1616L) を示す。以下、実験で使用したデータセット、比較手法、評価指標、実験結果について述べる。

3.1 データセット

評価実験に用いるために、赤外線センサアレーを用いて様々な熱画像系列を撮影することでデータセットを作成した。2名の被験者に対して、撮影時期、撮影場所、服装を変化させることで様々な状況下における熱画像系列を撮影した。10 fps のフレームレートで 13 系列、合計 1,729 フレームの熱画像系列を撮影した。全ての熱画像系列において追跡対象人物は 1 人であるが、追跡対象以外の人物が含まれる系列もある。それぞれの系列には、姿勢変動、遮蔽、複雑な背景といった追跡を困難とする要因が含まれており、それらの具体的な例を図 5 に示す。ここで、熱画像における複雑な背景とは、追跡対象以外の人物や、PC のディスプレイ、空調設備等、追跡対象以外の熱源が多く観測される状況である。また、全ての系列について、初期フレームでは遮蔽を含まないように人体を観測し、テンプレートとなる人体領域を人手で与えた。

3.2 比較手法

提案手法である温度と空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムによる人体追跡の有効性を確認するため、比較手法として、空間のみに関する局所鋭敏性ヒストグラム [14]、温度のみに関する局所鋭敏性ヒストグラム、部分ヒストグラム [11] を用いた人体追跡手法を用いた。空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムと温度に関する局所鋭敏性ヒストグラムについては、2.2 で述べた方法により作成した。ヒストグラム作成方法以外の



図 4 16×16 画素赤外線センサアレー
Fig. 4 16×16 far-infrared sensor array.

追跡処理については、全て 2.3 で述べた方法を用いた。ただし、温度に関する局所鋭敏性ヒストグラムについては、一つの矩形から一つのヒストグラムしか作成できないため、テンプレートの更新は行わなかった。また、各ヒストグラムを作成する際に用いたパラメータを表 1 に、追跡処理で用いたパラメータを表 2 に示す。なお表 1 中の注目点の密度とは、人体若しくは人体候補領域を囲う矩形内の画素数に対する注目点の数である。また注目点は、矩形内に等間隔で配置した。表 1、表 2 における各パラメータは、各手法で最も精度が高くなる値を実験により求めたものである。

3.3 評価指標

人体追跡の精度を評価するため、評価指標として追跡成功率 [16] と矩形の位置誤差 [17] を用いた。

追跡成功率では、系列中の全フレームに対する追跡が成功したフレームの割合を求めた。追跡成功の条件は、

$$\frac{|B^i \cap G^i|}{|B^i \cup G^i|} \geq 0.5 \quad (9)$$

とした。ここで、 B^i は i 番目のフレームにおける追跡結果の領域であり、 G^i は i 番目のフレームにおける人体領域の真値である。また、 $|\cdot|$ は領域の画素数を表す。

矩形の位置誤差は、追跡結果と真値の矩形における中央の画素間の L_2 距離として求めた。

表 1 各ヒストグラム作成で用いたパラメータ
Table 1 Parameters used for constructing each histogram.

| ヒストグラム | パラメータ | 値 |
|----------------------|--------------------|---------------------------|
| 温度と空間に関する局所鋭敏性ヒストグラム | α_1 | 0.4 |
| | α_2 | 0.6 |
| 空間に関する局所鋭敏性ヒストグラム | 注目点の密度 | 1/4 |
| | α_1 | 0.5 |
| 温度に関する局所鋭敏性ヒストグラム | 注目点の密度 | 1/4 |
| | α_2 | 0.1 |
| 部分ヒストグラム | 分割数 | 水平方向に 2 分割、 垂直方向に 4 分割 |
| 全ヒストグラム共通 | ヒストグラムの ビンのカット幅 | 1.0°C |

表 2 追跡処理で用いたパラメータ
Table 2 Parameters used for the tracking step.

| 処理 | パラメータ | 値 |
|-----------|-------|---------------------------|
| 人体領域の探索 | 探索範囲 | 前フレームの 追跡結果 ± 3 画素 |
| テンプレートの更新 | F_1 | 0.98 |
| | F_2 | 1.02 |

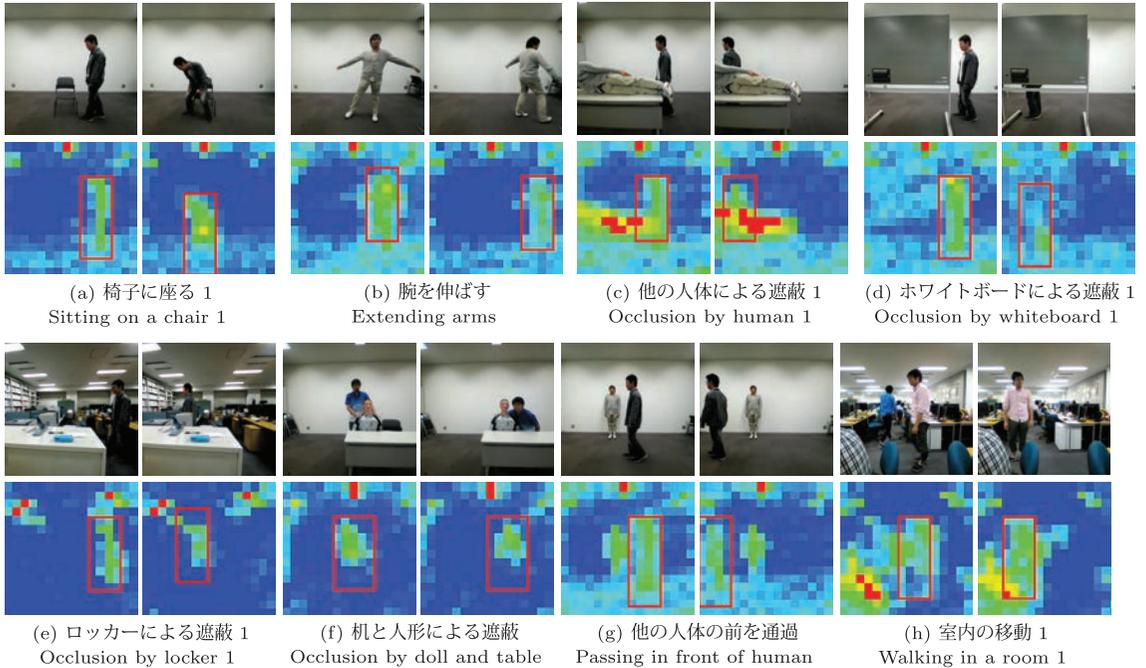


図 5 実験で用いたデータセット例。熱画像中の赤い矩形は真値の人体領域である。
 Fig. 5 Examples of sequences from the dataset used in the experiment. Red rectangles in the thermal images represent the ground-truth regions.

表 3 各系列における追跡成功率 [%]. 太字は各系列の最大追跡成功率

Table 3 Success rates [%] of each sequence. The highest value among the methods for each sequence is shown in bold.

| 系列名 (最大遮蔽率 [%]) | 温度と空間 | 空間 | 温度 | 部分 |
|---------------------|------------|------------|----|-----------|
| 椅子に座る 1 (0) | 58 | 85 | 53 | 88 |
| 椅子に座る 2 (0) | 99 | 64 | 91 | 78 |
| 腕を伸ばす (0) | 92 | 42 | 52 | 60 |
| 他の人体による遮蔽 1 (63) | 32 | 35 | 11 | 54 |
| 他の人体による遮蔽 2 (50) | 44 | 34 | 40 | 12 |
| ホワイトボードによる遮蔽 1 (55) | 99 | 99 | 85 | 68 |
| ホワイトボードによる遮蔽 2 (55) | 97 | 99 | 58 | 97 |
| ロッカによる遮蔽 1 (50) | 100 | 100 | 44 | 93 |
| ロッカによる遮蔽 2 (50) | 58 | 48 | 8 | 8 |
| 机と人形による遮蔽 (56) | 97 | 84 | 25 | 37 |
| 他の人体の前を通過 (0) | 63 | 26 | 37 | 29 |
| 室内の移動 1 (30) | 59 | 74 | 56 | 47 |
| 室内の移動 2 (22) | 81 | 80 | 60 | 12 |
| 平均 | 75 | 67 | 48 | 53 |

表 4 各系列における矩形の平均位置誤差 [画素]. 太字は各系列の最小誤差であり, 下部に全系列の平均と標準偏差も示した.

Table 4 Average location errors [pixels] of each sequence. The smallest error among the methods for each sequence is shown in bold. The average and the standard deviation of all sequences are shown at the bottom.

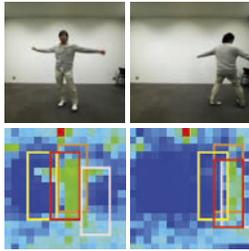
| 系列名 (最大遮蔽率 [%]) | 温度と空間 | 空間 | 温度 | 部分 |
|---------------------|----------------|------------|---------|------------|
| 椅子に座る 1 (0) | 1.7 | 1.2 | 1.8 | 1.1 |
| 椅子に座る 2 (0) | 0.8 | 1.8 | 1.3 | 1.8 |
| 腕を伸ばす (0) | 1.2 | 2.2 | 2.2 | 1.9 |
| 他の人体による遮蔽 1 (63) | 2.3 | 2.2 | 2.2 | 1.3 |
| 他の人体による遮蔽 2 (50) | 1.7 | 1.6 | 2.6 | 3.3 |
| ホワイトボードによる遮蔽 1 (55) | 0.5 | 0.7 | 1.1 | 1.2 |
| ホワイトボードによる遮蔽 2 (55) | 0.5 | 0.6 | 1.7 | 1.4 |
| ロッカによる遮蔽 1 (50) | 0.9 | 0.7 | 2.5 | 1.4 |
| ロッカによる遮蔽 2 (50) | 1.5 | 1.7 | 6.2 | 5.1 |
| 机と人形による遮蔽 (56) | 1.0 | 1.2 | 3.3 | 3.3 |
| 他の人体の前を通過 (0) | 1.6 | 2.8 | 2.0 | 3.0 |
| 室内の移動 1 (30) | 1.3 | 1.0 | 1.6 | 2.1 |
| 室内の移動 2 (22) | 0.7 | 0.7 | 1.4 | 3.8 |
| 平均 | 1.2±0.8 | 1.4±0.8 | 2.4±1.4 | 2.4±1.3 |

これら二つの評価指標により, 追跡精度を離散値, 連続値により評価した.

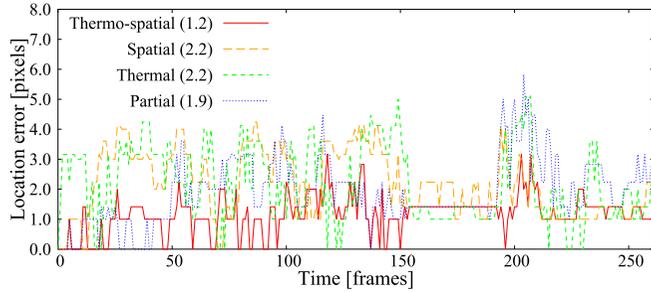
3.4 実験結果

提案手法と比較手法による人体追跡精度を表 3, 表 4 に示す. 表 3 は各系列における追跡成功率を, 表 4 は各系列における矩形の位置誤差を示している. これ

らの結果より, 追跡成功率, 矩形の位置誤差とともに, 提案手法が平均として最も高い精度を示した. また, 表 3, 表 4 において, 各系列で発生した最大遮蔽率も示した. 更に, 図 6 と図 7 に一部の系列中における, 人体追跡結果例と矩形の位置誤差の時間推移を示す. 人体追跡結果における赤い矩形は提案手法による人体



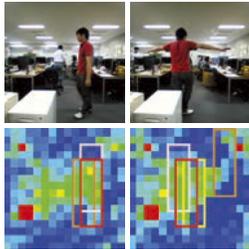
(a) 追跡結果例
Example of tracking results



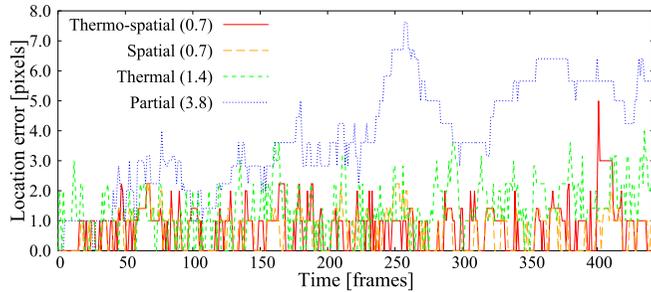
(b) 位置誤差の時間推移
Time transition of the position error

図 6 「腕を伸ばす」系列における追跡結果. 凡例内の括弧内の数値は各手法のその系列における平均位置誤差 [画素] である.

Fig. 6 Tracking results of the “extending arms” sequence. The average location error [pixels] of each method is shown in the parentheses of the legend.



(a) 追跡結果例
Example of tracking results



(b) 位置誤差の時間推移
Time transition of the position error

図 7 「室内の移動 2」系列における追跡結果. 凡例内の括弧内の数値は各手法のその系列における平均位置誤差 [画素] である.

Fig. 7 Tracking results of the “walking in a room 2” sequence. The average location error [pixels] of each method is shown in the parentheses of the legend.

追跡結果であり、黄色、桃色、茶色の矩形は、それぞれ空間に関する局所鋭敏性ヒストグラム、温度に関する局所鋭敏性ヒストグラム、部分ヒストグラムによる人体追跡結果を示している。

4. 考 察

4.1 比較手法との比較

表 3, 表 4 や追跡結果画像である図 6, 図 7 より、提案手法が姿勢変動、遮蔽、複雑な背景に対して頑健に人体を追跡できたことがわかる。

図 6 は姿勢変動を多く含む系列における追跡結果であるが、提案手法は多くのフレームにおいて小さい誤差で人体を追跡できた。これは、温度と空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムが、追跡対象を複数のヒストグラムで表現するため、姿勢変動によって一部のヒストグラムの値が変化した場合でも、残りのヒストグラ

ムを用いて高精度な追跡を行うことができたためであると考えられる。また、これらの系列においては、提案手法である温度と空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムは、空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムよりも高精度に追跡できた。これは、背景と人体との温度差が約 4°C と大きかったため、温度に関する局所鋭敏性ヒストグラムにおける温度差による重みが強く働き、背景画素の影響を効果的に抑制することができたためであると考えられる。

図 7 は追跡対象が複雑な背景の前を移動する系列における追跡結果であるが、この系列においても提案手法は多くのフレームにおいて高い精度で追跡ができた。この系列では、空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムとの精度の差が小さいが、これは高い室温の影響により、背景温度と人体温度の差が 1°C 以下となるような画素が多く存在し、提案手法における温度差による重

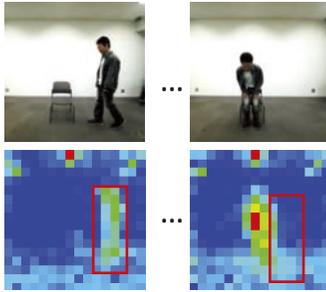


図 8 姿勢変動により追跡対象の温度が変化する例
Fig. 8 Example of the target's temperature change due to posture change.

みの効果が小さくなったためであると考えられる。

表 3, 表 4 より, 遮蔽が発生する多くの系列では, 提案手法が比較手法に比べ高い精度で追跡ができていることが分かる. 特に, ホワイトボードによる遮蔽を含む系列, ロッカによる遮蔽を含む系列, 机と人形による遮蔽を含む系列では 50%程度の遮蔽が発生しているが, 人体と遮蔽物の温度差が大きいため, 提案手法が比較手法と同等かそれ以上の精度で追跡できている. 一方, 他の人体による遮蔽を含む系列では遮蔽物と人体の温度差が少なく, 人体と遮蔽物との区別が困難であったため提案手法, 比較手法共に高い精度が得られなかった.

4.2 提案手法による人体追跡が失敗した例

提案手法による人体追跡が失敗する例も存在した. 図 8 に, 姿勢変動に伴う温度変化に対応できず, 追跡に失敗した例を示す. この例では観測者が椅子に座るために前かがみになった際に, センサとの距離が変化していた. 赤外線センサアレイには, センサと熱源の距離が遠いほど, 観測される温度が低くなるという性質がある. そのため, 赤外線センサアレイと追跡対象の距離が変化したことで観測される温度が変化し, 追跡に失敗したと考えられる. 本実験では, 温度と空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムを作成する際の参照温度は初期フレームにおける人体領域から算出したものを使用した. そのため, 追跡対象の温度変化に対応することができなかつたと考えられる. このような問題に対処するためには, 参照温度の更新方法や選択方法を更に検討する必要があると考えられる.

4.3 温度と空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムを用いた人体追跡のパラメータと精度の関係

実験で設定したパラメータの中でも, 本論文で提案する温度と空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムを用

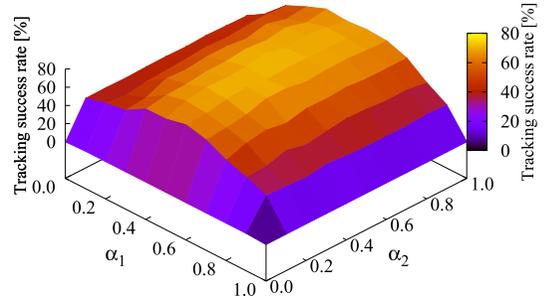


図 9 温度と空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムの重み α_1, α_2 と追跡成功率の関係

Fig. 9 Relationship between thermo-spatial sensitive histogram parameters α_1, α_2 and the tracking success rate.

いた人体追跡のパラメータと精度の関係について調査し, 考察する. 精度評価のために, 実験データとして, 3. で用いた 13 系列の動画を用いた. また, 評価指標としては全系列に対する追跡成功率の平均を用いた.

4.3.1 温度と空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムにおける重みパラメータと精度の関係

温度と空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムの重み α_1, α_2 と精度の関係を調査するために, α_1, α_2 について 0.1 刻みで 0.0~1.0 の範囲の全組み合わせ 121 通りについて精度を調査した. 調査の結果, $\alpha_1 = 0.4, \alpha_2 = 0.6$ で追跡成功率が 75%と最も高くなることがわかった. 図 9 に α_1, α_2 と追跡成功率の関係を示す. 調査結果より, $\alpha_1 = 0.4, \alpha_2 = 0.6$ を中心とする広い範囲で高い追跡成功率が得られることを確認した. また, 空間に関する重み, 温度に関する重みが双方とも高精度な人体追跡に有効であることも確認した.

4.3.2 温度と空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムにおける注目点の密度と精度の関係

温度と空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムにおける注目点の密度と精度の関係を調査するために, 注目点の密度を 1/4, 1/2, 1 と変化させた場合の追跡成功率について調査した. 表 5 に調査の結果を示す. 注目点の密度が 1/4 のときに追跡成功率が最も高くなった. また, 注目点の密度を下げても, 精度に大きな影響を与えないことを確認した.

4.4 追跡処理における人体領域の探索範囲と精度の関係

追跡処理における人体領域の探索範囲と精度の関係を調査するために, 探索範囲を $\pm 2, \pm 3, \pm 4$ と変化させた場合の追跡成功率について調査した. 表 6 に探索範囲と成功率の関係を示す. 探索範囲が ± 3 のとき

表 5 注目点の密度と追跡成功率の関係

Table 5 Relationship between density of reference points and the tracking success rate.

| 注目点の密度 | 追跡成功率 [%] |
|--------|-----------|
| 1/4 | 76 |
| 1/2 | 70 |
| 1 | 73 |

表 6 探索範囲と追跡成功率の関係

Table 6 Relationship between search region and the tracking success rate.

| 探索範囲 | 追跡成功率 [%] |
|------|-----------|
| ±2 | 73 |
| ±3 | 75 |
| ±4 | 71 |

表 7 テンプレートの更新されやすさ F_1 , F_2 と追跡成功率 [%] の関係

Table 7 Relationship between the ease of updating F_1 , F_2 and the tracking success rate.

| | F_2 | | | |
|------------|-------|------|------|----------|
| | 1.00 | 1.02 | 1.04 | ∞ |
| 0.96 | 70 | 73 | 65 | 58 |
| F_1 0.98 | 69 | 75 | 66 | 63 |
| 1.00 | 69 | 72 | 74 | 60 |

に追跡成功率が最も高くなった。また、今回のデータセットでは探索範囲を変化させても、精度に大きな影響を与えなかったが、このパラメータは追跡対象となる人体の移動速度の影響を受けると考えられる。そのため、人体の移動速度に応じ探索範囲を逐次変化させる方法の検討が必要であると考えられる。

4.5 テンプレートの更新されやすさと精度の関係

テンプレートの更新されやすさと精度の関係を調査するために、式 (8) におけるテンプレートの更新されやすさを表すパラメータ F_1 , F_2 ($F_1 < F_2$) を変化させた場合の追跡成功率について調査した。 F_1 については 0.96, 0.98, 1.00, F_2 については 1.00, 1.02, 1.04, ∞ と値を変化させて調査した。表 7 にテンプレートの更新されやすさ F_1 , F_2 と追跡成功率の関係を示す。 $F_1 = 0.98$, $F_2 = 1.02$ のときに最も精度が高くなった。 F_1 , F_2 の値によっては、精度が大きく低下する例が見られた。これは、テンプレートの更新に失敗し、テンプレートに人以外のヒストグラムが登録され追跡が失敗し、それ以降のフレームにおいて追跡が全て失敗したためであった。

次に、式 (8) におけるテンプレートの更新を、

$$\tilde{\mathbf{H}}_{x_p}^{T_m} = \beta \mathbf{H}_{x+x_p}^{T_m} + (1 - \beta) \tilde{\mathbf{H}}_{x_p}^{T_m}$$

$$\text{if } F_1 M < \phi(\tilde{\mathbf{H}}_{x_p}^{T_m}, \mathbf{H}_{x+x_p}^{T_m}) < F_2 M \quad (10)$$

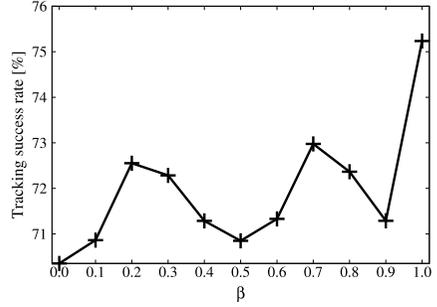


図 10 テンプレートの更新率 β と追跡成功率の関係
Fig. 10 Relationship between the template updating rate β and the tracking success rate.

のように重み付き和で更新する場合の追跡精度を調査した。具体的には、0.0~1.0の範囲を0.1刻みで β を変化させることで評価した。図 10 に β と追跡成功率の関係を示す。今回の調査では、 $\beta = 1.0$ (式 (8) と等価) のときに最も高精度となったが、テンプレートの更新は追跡精度に大きな影響与える場合があるので、今後も検討が必要であると考えられる。

5. むすび

本論文では、赤外線センサアレーから得られた低解像度熱画像から人体を追跡する手法について述べた。そのなかで、低解像度温度画像中の人体を表現するために、温度と空間に関する局所鋭敏性ヒストグラムを提案した。このヒストグラムは投票する輝度値の頻度に対して、注目画素との距離と参照温度との温度差を用いて重みづけることで、背景や遮蔽の影響を抑制するものであり、その有効性を実験により確認した。今後は、より大規模なデータセットを用いて提案手法の有効性を評価し、複数の人体が画像中に含まれる場合への対処や、赤外線センサアレーと人体の距離が変化することによるスケールの変化に対応できる手法の検討を行っていききたい。また、追跡精度の更なる向上のために、低解像度熱画像中の人体表現手法だけでなく、人体領域の探索方法や、テンプレートの更新方法についても検討を行っていききたい。更に、本論文では初期フレームで人体領域の矩形が与えられていたが、低解像度熱画像中の移動物体や人体を検出する手法について検討することで、より実用的な人体追跡システムの開発を目指していききたい。

謝辞 日頃より熱心に御討論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、JSPS 科研費 24240028 の助成を受けたものである。本論文は、

2014年11月に開催されたUCCV (2nd Workshop on User-Centred Computer Vision)で報告した内容[18]を発展させて論文化したものである。

文 献

- [1] M. Sousa, A. Techmer, A. Steinhage, C. Lauterbach, and P. Lukowicz, "Human tracking and identification using a sensitive floor and wearable accelerometers," Proc. 11th IEEE Int. Conf. on Pervasive Computing and Communications, pp.166–171, March 2013.
- [2] A. Steinhage and C. Lauterbach, "Monitoring movement behavior by means of a large area proximity sensor array in the floor," Proc. 2nd Workshop on Behaviour Monitoring and Interpretation, pp.15–27, Sept. 2008.
- [3] Q. Hao, D.J. Brady, B.D. Guenther, J.B. Burchett, M. Shankar, and S. Feller, "Human tracking with wireless distributed pyroelectric sensors," IEEE Sensors Journal, vol.6, no.6, pp.1683–1696, Dec. 2006.
- [4] P. Zappi, E. Farella, and L. Benini, "Tracking motion direction and distance with pyroelectric IR sensors," IEEE Sensors Journal, vol.10, no.9, pp.1486–1494, Sept. 2010.
- [5] 木股雅章, "赤外線センサの開発動向," 映像学技報, IST2011-9, Feb. 2011.
- [6] 鳥山千智, 細野峻司, 高橋友和, 出口大輔, 井手一郎, 村瀬 洋, "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," 信学技報, PRMU2014-87, Jan. 2015.
- [7] P. Wojtczuk, A. Armitage, T.D. Binnie, and T. Chamberlain, "PIR sensor array for hand motion recognition," Proc. 2nd Int. Conf. on Sensor Device Technologies and Applications, pp.99–102, Aug. 2011.
- [8] S. Baker and I. Matthews, "Lucas-Kanade 20 years on: A unifying framework," Int. J. Comput. Vis., vol.56, no.3, pp.221–255, Feb. 2004.
- [9] Y. Yan, J. Wang, C. Li, and Z. Wu, "Object tracking using SIFT features in a particle filter," Proc. 3rd IEEE Int. Conf. on Communication Software and Networks, pp.384–388, May 2011.
- [10] 片岡裕雄, 青木義満, "単眼カメラを用いたサッカー戦術解析のための複数選手とボールの追跡," 画像電子学誌, vol.41, no.2, pp.152–159, Feb. 2012.
- [11] A. Adam, E. Rivlin, and I. Shimshoni, "Robust fragments-based tracking using the integral histogram," Proc. 2006 IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, vol.1, pp.798–805, June 2006.
- [12] J. Kwon and K.M. Lee, "Tracking of a non-rigid object via patch-based dynamic appearance modeling and adaptive Basin Hopping Monte Carlo sampling," Proc. 2009 IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.1208–1215, June 2009.
- [13] S.M.S. Nejhum, J. Ho, and M.-H. Yang, "Visual tracking with histograms and articulating blocks," Proc. 2008 IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.1–8, June 2008.
- [14] S. He, Q. Yang, R.W.H. Lau, J. Wang, and M. Yang, "Visual tracking via locality sensitive histograms," Proc. 2011 IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.2427–2434, June 2013.
- [15] A. Barla, F. Odono, and A. Verri, "Histogram intersection kernel for image classification," Proc. 2003 IEEE Int. Conf. on Image Processing, vol.3, pp.513–516, Sept. 2003.
- [16] A. Smeulders, D. Chu, R. Cucchiara, S. Calderara, A. Dehghan, and M. Shah, "Visual tracking: An experimental survey," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.36, no.7, pp.1442–1468, July 2014.
- [17] F. Yin, D. Makris, and S.A. Velastin, "Performance evaluation of object tracking algorithms," Proc. 10th IEEE Int. Workshop on Performance Evaluation of Tracking and Surveillance, pp.17–24, Oct. 2007.
- [18] T. Hosono, T. Takahashi, D. Deguchi, I. Ide, H. Murase, T. Aizawa, and M. Kawade, "Human tracking using a far-infrared sensor array and a thermospatial sensitive histogram," Computer Vision — ACCV 2014 Workshops, Singapore, Singapore, Nov. 1–2, 2014, Revised Selected Papers, Part II, Lecture Notes in Computer Science, vol.9009, pp.262–274, Springer-Verlag, May 2015.

(平成 27 年 3 月 29 日受付, 8 月 20 日再受付,
10 月 2 日早期公開)



細野 峻司 (正員)

平 25 名大・工・情報卒。平 27 名大情報科学研究科博士前期課程了。修士(情報科学)。同年日本電信電話(株)入社。画像処理, パターン認識に興味をもつ。



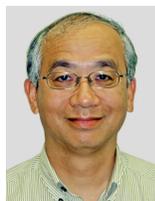
高橋 友和 (正員)

平 9 茨城大・工・情報卒。平 12 同大院理工学研究科博士前期課程了。平 15 同研究科博士後期課程了。博士(工学)。同年より 2 年間名古屋大学大学院情報科学研究科 COE 研究員。平 17 より 3 年間日本学術振興会特別研究員。平 20 より岐阜聖徳学園大学経済情報学部准教授, 現在に至る。平 25 から 1 年間米国コロンビア大客員研究員。画像認識の基礎研究並びにその応用に興味をもつ。画像電子学会会員。



出口 大輔 (正員)

平 13 名大・工・情報卒。平 18 同大学院情報科学研究科博士後期課程修了。博士(情報科学)。平 16~18 まで日本学術振興会特別研究員。平 18 名大大学院情報科学研究科研究員, 平 18 名大大学院工学研究科研究員, 平 20~24 まで同大学院情報科学研究科助教, 平 24 より同大情報連携統括本部情報戦略室准教授。現在に至る。主に画像処理・パターン認識技術の開発とその ITS 及び医用応用に関する研究に従事。CARS2004 Poster Award, CADM2004 大会賞, 平 18 日本医用画像工学会奨励賞, 平 18 日本コンピュータ外科学会講演論文賞。IEEE 会員。



川出 雅人 (正員)

昭 56 名工大・工・計測卒。同年立石電機(現オムロン)入社。平 2 から 3 年 3 ヶ月間米国カーネギーメロン大訪問研究員。現在, オムロン株式会社技術・知財本部技術開発センタ画像センシング技術領域リーダー。コンピュータビジョン, 機械学習の研究に従事。



井手 一郎 (正員:シニア会員)

平 6 東大・工・電子卒。平 8 同大学院工学系研究科情報工学専攻修士課程了。平 12 同研究科電気工学専攻博士課程了。博士(工学)。同年国立情報学研究所助手。平 16 名古屋大学大学院情報科学研究科助教, 平 19 より准教授。この間, 平 14~16 総合研究大学院大学数物科学研究科助手併任, 平 16~22 情報・システム研究機構国立情報学研究所客員助教・准教授兼任, 平 17, 18, 19 フランス情報学・統計システム研究所(IRISA)招聘教授。平 22~23 オランダアムステルダム大学情報学研究所上級訪問研究員。パターン認識技術の実応用や映像メディア処理全般に興味をもっている。情報処理学会シニア会員, 映像情報メディア学会, 人工知能学会, 言語処理学会, IEEE, ACM 各会員。



村瀬 洋 (正員:フェロー)

昭 53 名大・工・電気卒。昭 55 同大学院修士課程了。同年日本電信電話公社(現 NTT)入社。平 4 から 1 年間米国コロンビア大客員研究員。平 15 から名古屋大学大学院情報科学研究科教授。現在に至る。文字・図形認識, コンピュータビジョン, マルチメディア認識の研究に従事。工博。昭 60 電子情報通信学会学術奨励賞, 平 6 IEEE-CVPR 最優秀論文賞, 平 7 情報処理学会山下記念研究賞, 平 8 IEEE-ICRA 最優秀ビデオ賞, 平 13 高柳記念奨励賞, 平 13 本会ソサエティ論文賞, 平 14 本会業績賞, 平 15 文部科学大臣賞, 平 16 IEEE Trans. MM 論文賞, 平 22 前島密賞, 平 24 紫綬褒章, 他受賞。IEEE フェロー, 情報処理学会会員。



相澤 知禎

平 7 北大・工・電子卒。平 9 同大学院工学研究科修士課程了。同年オムロン入社。現在, 技術・知財本部技術開発センタにて文字認識, 物体検出・追跡の研究に従事。