

## 低解像度赤外線センサアレイを用いた複数点熱源の位置推定

細野 峻司<sup>†</sup> 高橋 友和<sup>††,†</sup> 出口 大輔<sup>†††</sup> 井手 一郎<sup>†</sup> 村瀬 洋<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 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

<sup>††</sup> 岐阜聖徳学園大学, 〒 500-8288 岐阜県岐阜市中鶯 1-38

<sup>†††</sup> 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: <sup>†</sup>hosonot@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp, <sup>††</sup>takahashi@gifu.shotoku.ac.jp, <sup>†††</sup>ddeguchi@nagoya-u.jp,  
<sup>††††</sup>{ide,murase}@is.nagoya-u.ac.jp

**あらまし** 低解像度赤外線センサアレイは、プライバシーの問題を回避できるといったメリットから、CCD カメラの設置が困難であった家庭やオフィス等における人体の行動解析等への応用が期待されている。しかし、少数の赤外線センサから構成されているため、熱源の大まかな位置しかわからず、移動軌跡の解析等に用いるのに十分な情報が得られているとは言えない。本報告では、4×4 個の赤外線センサで構成された低解像度赤外線センサアレイを用いた複数点熱源の位置推定について提案する。提案手法では、事前処理として赤外線センサの空間的な特性を計測することで、実際に観測することなく任意の点熱源の配置におけるセンサ出力を生成する。これにより、事前にさまざまな点熱源配置におけるセンサ出力を低コストに収集できる。熱源位置推定処理では、事前に生成したセンサ出力データベースから入力されたセンサ出力に近いものを探索することで、高精度な位置推定を実現する。また、実データを用いた実験により、提案手法の有効性を確認した。

**キーワード** 赤外線センサアレイ, 熱源位置推定, 空間的特性

## Localization of point heat sources using a low resolution infrared sensor array

Takashi HOSONO<sup>†</sup>, Tomokazu TAKAHASHI<sup>††,†</sup>, Daisuke DEGUCHI<sup>†††</sup>,

Ichiro IDE<sup>†</sup>, and Hiroshi MURASE<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science, Nagoya University  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8601 Japan

<sup>††</sup> Faculty of Economics and Information, Gifu Shotoku Gakuen University  
Nakauzura 1-38, Gifu-shi, Gifu, 500-8288 Japan

<sup>†††</sup> Information and Communications Headquarters, Nagoya University  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8601 Japan

E-mail: <sup>†</sup>hosonot@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp, <sup>††</sup>takahashi@gifu.shotoku.ac.jp, <sup>†††</sup>ddeguchi@nagoya-u.jp,  
<sup>††††</sup>{ide,murase}@is.nagoya-u.ac.jp

**Abstract** A low resolution infrared sensor array is expected to be applied for the analysis of human behaviors in various places, because it can circumvent privacy problems. However, it cannot localize heat sources with high accuracy, because it consists of a very small number of infrared sensors. Accordingly, it is difficult to obtain sufficient information for analyzing human behaviors from a low resolution infrared sensor array. This report proposes a method to localize heat sources with high accuracy by using a low resolution infrared sensor array. The proposed method uses spatial characteristics of the infrared sensors which are measured beforehand to create sensor array outputs for various locations of heat sources with a low cost. To localize the heat sources, the method searches for the nearest sensor outputs in the sensor outputs database. We report the validity of the method through an experiment using actual sensor data.

**Key words** Infrared sensor array, point heat detection, spatial characteristic

## 1. まえがき

照明やエアコンなどの省エネスイッチ、セキュリティシステムや街灯の自動点灯など、赤外線センサを用いた人体検知はさまざまな用途に用いられている [1]。CCD カメラを用いて人体を検知することも可能であるが、赤外線センサには、個人を特定しないためプライバシーの問題を回避できる、暗闇でも検知ができるといったメリットがある [2]。しかし、1 個の赤外線センサでは人体など熱源の有無を判定することしかできないため、用途が限られる。そこで、少数の赤外線センサをアレイ状に配置した低解像度赤外線センサアレイの開発が行なわれている。低解像度赤外線センサアレイは、個人を特定しないというメリットを活かしたまま、熱源の大まかな位置や動き、概形がわかるため、家庭やオフィス等今までプライバシーの観点から CCD カメラの設置が困難だった環境における人体の行動解析等への応用が期待されている。しかし、少数の赤外線センサから構成されているため、移動軌跡の解析等に用いるのに十分な情報を得ることは難しい。低解像度赤外線センサアレイを用いて高精度に熱源の位置を推定することができれば、室内における人体の位置や移動軌跡を室温と同時に計測することができ、空調の制御にも役立てることができる。そのため、低解像度赤外線センサアレイを用いて高精度に熱源の位置を推定する技術が求められている。本稿では、4×4 個の赤外線センサで構成された低解像度赤外線センサアレイ [4] を用いた複数点熱源の位置推定について報告する。

これまでに行なわれてきた、低解像度赤外線センサアレイを用いた熱源位置推定に関する研究について述べる。高畑ら [5] は、アレイを構成する赤外線センサのうち、高い温度を観測したものの観測範囲内に熱源があると考えて、熱源位置を推定する低解像度赤外線センサアレイを開発している。しかし、この手法は、各赤外線センサの観測範囲より細かい精度で熱源の位置を推定することができない。また、アレイを構成するある一つの赤外線センサの観測範囲内に複数の熱源が存在する場合の位置推定について考慮していない。河本ら [6] は、隣接する赤外線センサの計測範囲に重複部分を設けることにより、アレイを構成する各赤外線センサの観測範囲より細かい精度で位置推定を行なう手法を提案している。観測範囲に重複部分を設けることにより、赤外線センサアレイの観測範囲を重複部分と非重複部分に分けることができる。これにより、赤外線センサアレイの観測範囲を、アレイを構成する赤外線センサの数よりも多くの領域に分割し、より細かい精度での位置推定を実現している。しかし、この手法では分割された領域以上の精度での位置推定については考慮されておらず、精度の向上には限界がある。また、この手法も複数の熱源について考慮していない。

そこで我々は、低解像度赤外線センサアレイを用いて複数の点熱源を高精度に位置推定することを目的とする。この目的を達成するために、本稿では、赤外線センサの空間的な特性を利用した複数点熱源の位置推定手法について検討する。提案手法は、事前計測によって獲得した赤外線センサの空間的な特性を利用することで、赤外線センサの観測範囲より細かい精度での

位置推定を実現する。以下、2 節で提案手法について述べ、3 節で提案手法の有効性を確認するための実験方法について述べ、4 節で実験結果および考察を述べる。最後に、5 節で検討課題を整理し本報告をむすぶ。

## 2. 提案手法

提案手法における処理の流れを図 1 に示す。提案手法は大きく分けて、(1) センサの空間的な特性の獲得、(2) センサ出力データベースの作成、(3) 熱源位置推定の 3 つの処理からなる。このうち (1) と (2) は事前処理である

(1) センサの空間的な特性の獲得では、ある位置に 1 個点熱源がある場合のセンサ特性の獲得と複数の点熱源が同時に存在する場合のセンサ特性を獲得する。

(2) センサ出力データベースの作成では、(1) で獲得したセンサ特性を利用して、複数の点熱源のさまざまな配置におけるセンサ出力を生成する。

(3) 熱源位置の推定では、センサ出力データベースの中から、入力されたセンサ出力に近いセンサ出力を探索することによって複数点熱源の位置推定を行なう。

以下、各処理について述べる。

### 2.1 センサの空間的な特性の獲得

センサの空間的な特性の獲得としてまず、1 個の点熱源がある場合のセンサ特性の獲得を行なう。この計測は、赤外線センサアレイと正対している平面上に格子点を置き、各点に対する赤外線センサアレイの出力を記録することにより行なう。

次に、複数の点熱源が同時に存在する場合のセンサ特性を獲得する。複数の点熱源が同時に存在する場合のセンサ出力を 1 個の点熱源が存在する場合と同様に、格子点上のさまざまな点に点熱源を配置し、赤外線センサアレイの出力を記録することで網羅的に計測することも可能である。しかしその場合、配置パターン数は指数関数的に増加するため、それらすべてを計測することは現実的ではない。そこで本手法では、複数の点熱源が同時に存在する場合の赤外線センサアレイの出力が、1 個の点熱源が存在する場合の出力がどのように統合されて形成されているのかを調査し、それをもとに任意の配置パターンにおける赤外線センサアレイの出力を生成する。

図 2 に計測方法の概要を示す。1 個の点熱源がある場合のセンサ特性を獲得するときと同様に、赤外線センサアレイと正対している平面上に点熱源を置いて計測する。アレイ中のある赤外線センサの観測範囲内に、点熱源を 1 個配置したときの出力  $P_1$  と、別の位置に点熱源を 1 個配置したときの出力  $P_2$  を記録する。さらに  $P_1, P_2$  を記録した位置に同時に点熱源を置いたときの出力  $P_{1,2}$  を記録する。これを、さまざまな  $P_1, P_2$  において計測する。点熱源の個数が 3 個の場合についても、同様に  $P_1, P_2, P_3, P_{1,2,3}$  について計測を行なう。

実際に計測を行った結果を図 3 に示す。図 3 の (a), (b) は同じグラフを別の視点から見たものである。この図より、点熱源の個数が 2 個の場合、 $P_{1,2}$  と  $P_1, P_2$  の間に線形性が見られたため、計測結果について線形回帰を行ない、熱源個数が 2 個の場合の係数  $w^{(2)}, \alpha^{(2)}$  を算出する。本研究では、 $P_1, P_2$  は

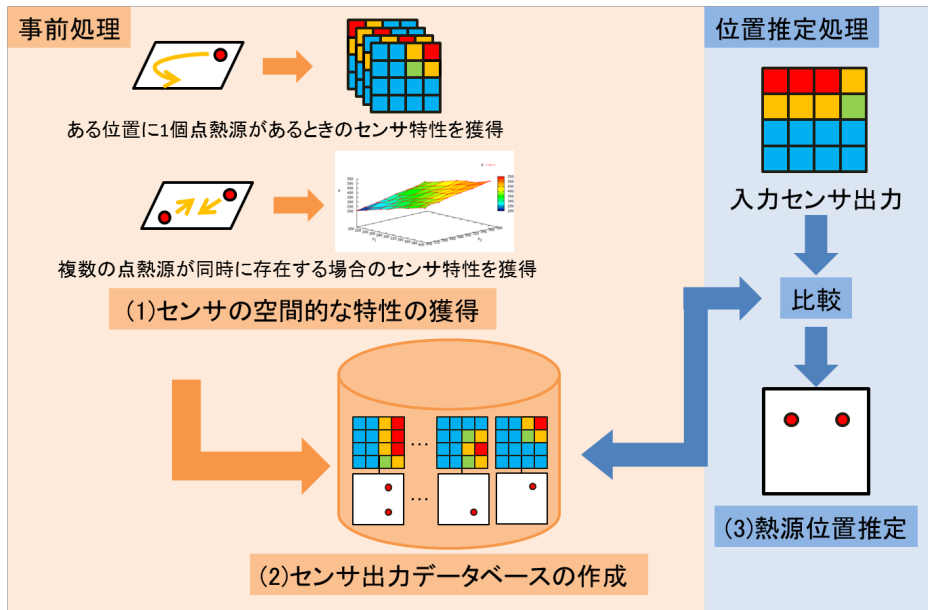


図 1 提案手法の流れ

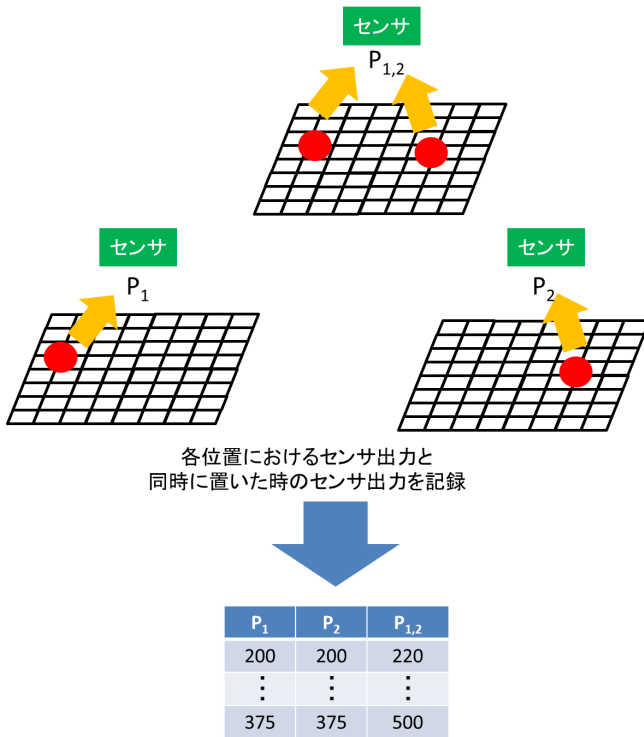


図 2 複数の点熱源が同時に存在する場合のセンサ特性の獲得

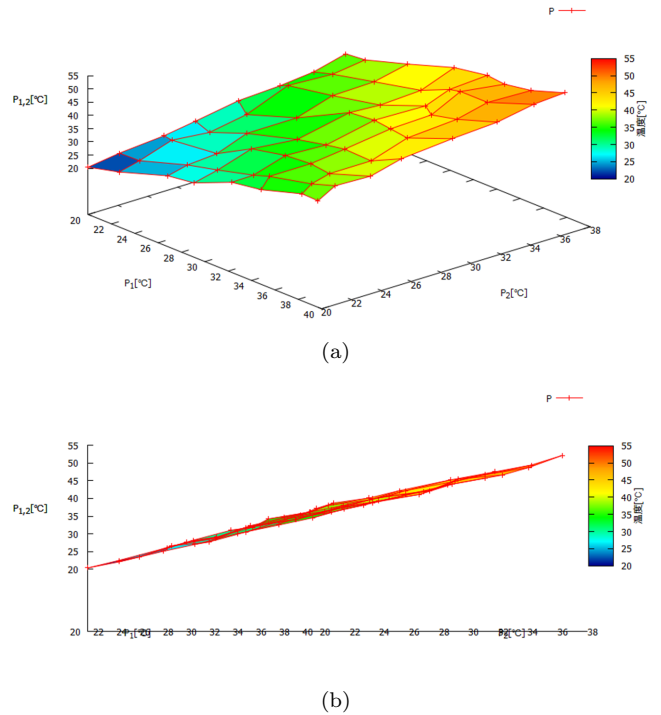


図 3 2 個の点熱源をそれぞれ単独で設置したときのセンサ出力と同時に設置したときのセンサ出力の関係

可換であると仮定し,  $P_1, P_2$  にかかる重みは同一とする.

$$P_{1,2} = w^{(2)}(P_1 + P_2) - \alpha^{(2)} \quad (1)$$

また,  $P_{1,2,3}$  についても同様に線形回帰を行ない係数  $w^{(3)}, \alpha^{(3)}$  を算出する.

## 2.2 センサ出力データベースの作成

センサ出力データベースには, 任意の点熱源の配置における赤外線センサアレイの出力を生成し, その配置と共に記録する. センサ出力の生成方法の大まかな流れを図 4 に示す. まず, 複数の点熱源がそれぞれ単独で存在する場合のセンサ出力を生成

する. ある位置  $\mathbf{x}$  に 1 個点熱源が存在する場合の  $i$  番目の赤外線センサを  $f_i(\mathbf{x})$  とする. この値は, 1 個の点熱源がある場合の赤外線センサの出力から算出する.  $\mathbf{x}$  が計測済みの位置だった場合は, 計測したセンサ出力をそのまま利用し, 未計測の位置だった場合には, バイリニア補間により周辺の計測された位置における値から計算する.

次に, 各点熱源に対して生成されたセンサ出力を統合することにより, 複数の点熱源が  $\mathbf{X} = (\mathbf{x}_n | n = 1, \dots, N)$  に同時に配置されたときのセンサ出力  $\mathbf{F}(\mathbf{X}) = (F_i(\mathbf{X}) | i = 1, \dots, p)$  を生

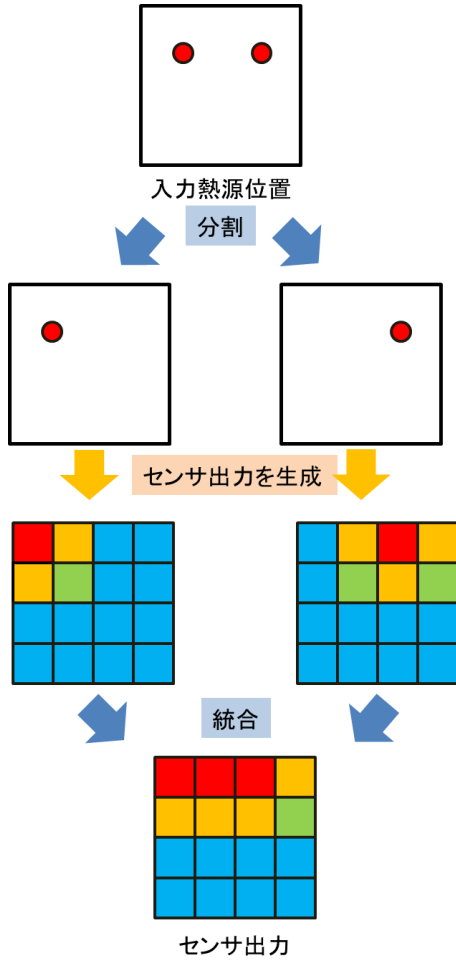


図 4 センサ出力の生成の流れ

成する。(  $p$  は赤外線センサアレイを構成するアレイの数) 点熱源の個数が  $N$  個のとき、それらの点熱源の位置をと、統合後の  $i$  番目の赤外線センサの出力  $F_i(\mathbf{X})$  を以下の式によって求める。

$$F_i(\mathbf{X}) = w^{(N)} \sum_{n=1}^N f_i(\mathbf{x}_n) + \alpha^{(N)} \quad (2)$$

ここで、 $w^{(N)}$  と  $\alpha^{(N)}$  の値には複数の点熱源が同時に存在する場合のセンサ出力の変化の計測において回帰分析を行なった結果を用いる。

### 2.3 熱源位置の推定

点熱源位置の推定は、赤外線センサアレイから得られた入力センサ出力  $\mathbf{I} = (I_i | i = 1, \dots, p)$  と、生成された温度分布  $\mathbf{F}(\mathbf{X}) = (F_i(\mathbf{X}) | i = 1, \dots, p)$  を比較し、最も近いものを探索することによって行なう。ただし、 $p$  は赤外線センサアレイを構成する赤外線センサの数であり、点熱源の個数  $N$  はあらかじめ与えられているものとする。つまり、以下の式によって、位置推定結果  $\hat{\mathbf{X}}$  を得る。

$$\hat{\mathbf{X}} = \arg \min_{\mathbf{X} \in \mathcal{A}_N} \|\mathbf{F}(\mathbf{X}) - \mathbf{I}\|^2 \quad (3)$$

ここで、 $\mathcal{A}_N$  は  $N$  個の点熱源によってセンサ出力を生成した際に用いた熱源配置  $\mathbf{X}$  の集合である。本研究では、膨大なセ

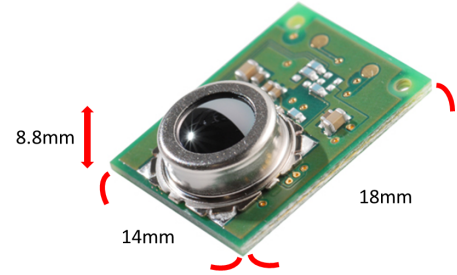


図 5 実験に使用した赤外線センサアレイ



図 6 実験に使用したなつめ球

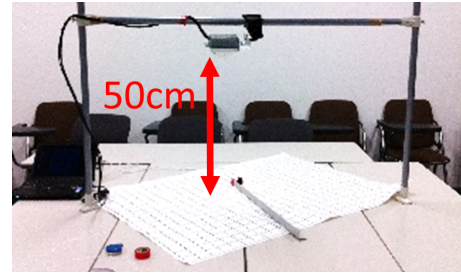


図 7 実験風景

ンサ出力データベースの中から高速に探索を行なうため、高速に近似最近傍探索が可能な LSH [7] を用いる。これにより、点熱源の個数に伴い指数関数的に増加するデータベース探索時間の軽減を図る。

## 3. 実験

提案手法の有効性を確認するため位置推定実験を行なった。実験に使用した  $4 \times 4$  個の赤外線センサから構成された赤外線センサアレイを図 5 に示す。アレイを構成する赤外線センサは、物体から放射される赤外線を受け、そのエネルギー量を電力に変えるサーモパイル型赤外線センサである。また、点熱源として用いたなつめ球を図 6 に示す。

センサの空間的な特性の獲得は、図 7 のように、赤外線センサアレイと正対し、50cm 離れた平面上に、赤外線センサアレイの計測範囲をカバーするように 42mm 間隔で  $16 \times 16$  個の格子を設置し、各格子点に点熱源を配置することで行なった。

テストデータの作成は、先と同じ平面上の計測範囲の中心付近に 21mm 間隔で  $19 \times 19$  個の格子を設置し、格子点上に 1~3

表 1 提案手法と比較手法の位置推定誤差と推定に要した処理時間

| 熱源個数 [個] | 比較手法     |           | 提案手法 (全探索) |           | 提案手法 (LSH) |           |
|----------|----------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|
|          | 角度誤差 [°] | 推定速度 [ms] | 角度誤差 [°]   | 推定速度 [ms] | 角度誤差 [°]   | 推定速度 [ms] |
| 1        | 3.19     | 0.00043   | 0.82       | 0.088     | 0.84       | 0.0019    |
| 2        | 3.97     | 0.00056   | 0.92       | 16        | 0.93       | 0.50      |
| 3        | 2.39     | 0.00060   | 1.97       | 1892      | 2.16       | 10        |

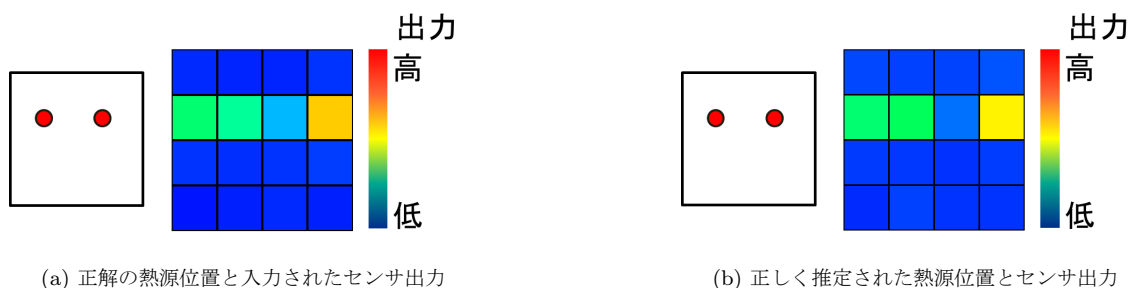


図 8 正しく位置推定されたときのセンサ出力の例

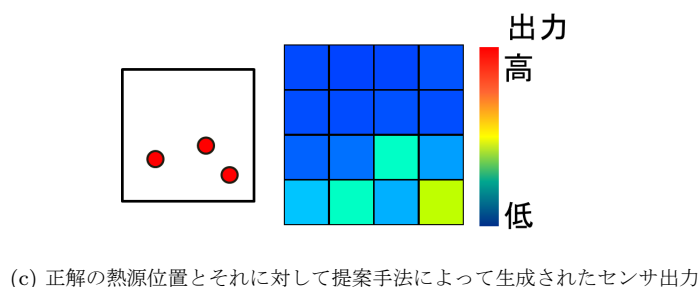
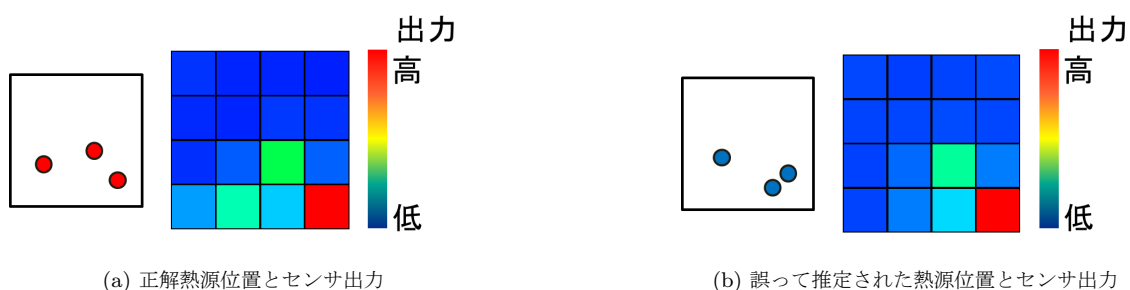


図 9 誤って位置推定されたときのセンサ出力の例

個の点熱源をさまざまに配置したときのセンサ出力を入力として位置推定精度評価に用いることで、センサの空間的な特性の獲得時よりも細かい精度での位置推定が可能であるか検証した。テストデータは、点熱源の個数が 1 個の場合は 361 通り、2 個の場合については 30 通り、3 個の場合については 60 通り用意した。

センサ出力データベースは、テストデータを計測した各格子点上に点熱源を 1~3 個置いたすべての場合についてセンサ出力を生成した。つまり、点熱源が 1 個の場合は  $(19 \times 19 C_1 =)$  361 通り、2 個の場合は  $(19 \times 19 C_2 =)$  64,980 通り、3 個の場合には  $(19 \times 19 C_3 =)$  7,775,940 通りのセンサ出力を生成した。

比較手法としてセンサアレイの計測結果のピークの情報のみを用いて熱源位置を推定する手法を用いた。すなわち、高い温度を計測した順に点熱源の個数分だけ赤外線センサを選択し、それらの観測範囲の中心（出力がピークとなる熱源の絶対位置）を位置推定結果とする。これにより、アレイを構成する赤外線

センサの数よりも細かい精度で位置推定が可能であるか検証した。また、センサ出力データベースからの探索を行なう際に、LSH ではなく全探索を行なう手法も用いた。これにより、LSH を利用することで最近傍探索を近似で行ったことによる高速化と精度低下の度合いを確認した。

実験結果に対する評価は、推定精度の評価指標として赤外線センサアレイを中心とした正解位置と推定位置の間の角度誤差を用いた。ここで  $1^\circ$  の推定誤差は、赤外線センサアレイから 3m 離れた点熱源の位置を約 5.2cm 誤って推定することに相当する。また、1 つのテストデータを位置推定するのに要する処理時間も計測した。

#### 4. 実験結果・考察

提案手法と比較手法における位置推定誤差の平均と位置推定するのに要した処理時間を表 1 に示す。観測範囲の中心を用いた手法と比べると、点熱源の個数によらず高精度に推定できてい

ることがわかる。また、センサ出力データベースからの探索を全探索で行なう比較手法と比べると、大きく精度を落とすことなく、高速に位置推定できていることがわかる。

提案手法によって正しく位置推定されたときの入力されたセンサ出力と生成されたセンサ出力を可視化した例を図 8 に示す。図 8 (a) は正解の熱源位置と入力されたセンサ出力である。また、図 8 (b) は提案手法により正しく推定された熱源位置とその時に生成されたセンサ出力である。図 8 (a), (b) 2 つのセンサ出力の差が少ないことから、提案手法によって入力センサ出力に近いセンサ出力が生成されていることがわかる。

提案手法において、点熱源が 3 個のとき、2 個以下のときと比べて精度が大きく低下した。図 9 に位置推定を大きく誤ったときの入力されたセンサ出力と提案手法によって生成されたセンサ出力の例を示す。図 9 (a) は正解の熱源位置と入力されたセンサ出力である。また、図 9 (b) は提案手法により誤って推定された熱源位置とその時に生成されたセンサ出力である。さらに、図 9 (c) は正解の熱源位置をもとに提案手法に生成されたセンサ出力である。図 9 (a), (b) 2 つのセンサ出力に差があることから、位置推定に有効なセンサ出力が生成されていないことがわかる。実際に、図 9 (a) と図 9 (b), 図 9 (a) と図 9 (c) のセンサ出力の差をそれぞれ SSD (Sum of Squared Difference) で計算すると、 $25.1[{}^{\circ}\text{C}^2]$ 、 $68.4[{}^{\circ}\text{C}^2]$  となっており、誤った推定に利用されたセンサ出力に比べ、正しい熱源配置により生成されたセンサ出力のほうが大きく実際のセンサ出力と離れている。

この例では、3 個の熱源がそれぞれ単独で存在する場合は正しく推定できていたが、それらを統合した 3 個の場合に位置推定誤差が大きくなった。そのため、提案手法のセンサ出力の生成における統合処理に問題があったと考えられる。このことから、点熱源の個数が増えたときのセンサ出力の生成方法を改善する必要があると考えられる。

## 5. ま と め

本研究では、赤外線センサアレイを用いた複数点熱源の位置推定を行なう手法を提案した。提案手法では、事前計測によって獲得した赤外線センサの空間的な特性を利用することで位置推定精度の向上を図った。提案手法は大きく分けて、(1) センサの空間的な特性の獲得、(2) センサ出力データベースの作成、(3) 熱源位置推定の 3 つの処理からなるものであった。センサの空間的な特性の獲得では、ある位置に 1 個点熱源がある場合のセンサ特性の獲得と複数の点熱源が同時に存在する場合のセンサ特性を獲得した。これにより、複数点熱源の任意の配置におけるセンサ出力を実際に計測することなく生成することができた。熱源位置推定では、作成したセンサ出力データベースから入力センサ出力に近いものを探索することで複数点熱源の位置を推定した。熱源位置推定実験では、センサアレイの観測結果の中心の情報のみを用いて推定する手法、センサ出力データベースから全探索で探索を行なう手法と比較することによって、提案手法が高速かつ高精度に位置推定を行なえることを確認した。

本研究ではセンサ特性を獲得する際、点熱源は赤外線センサアレイとの距離が一定である平面上に存在し、またその点熱源の温度を一定とした。今後は、さまざま距離にあるさまざまな温度の点熱源についても温度分布を生成できるよう、点熱源の距離や温度も考慮したセンサ特性の獲得手法を検討したい。

**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、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] Q. Hao, F. Hu, and Y. Xiao, "Multiple human tracking and identification with wireless distributed pyroelectric sensor systems," *IEEE Systems Journal*, vol.3, no.4, pp.428–439, Dec. 2009.
- [2] 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," *日本建築学会学術講演梗概集*, vol.A-2, pp.417–418, Jul. 2008.
- [3] 木股 雅章, "赤外線センサの開発動向," *映像情報メディア学会技術報告*, vol.35, no.6, pp.67–76, Feb. 2011.
- [4] 大平 真琴, 森口 誠, 佐々木 昌, 大場 正利, 高畑 智之, 下山 勲, 木股 雅章, "マイクロミラーアレイを用いた高感度サーモパイル型赤外線アレイセンサの開発," *電子情報通信学会論文誌 (C)*, vol.J94-C, no.11, pp.433–440, Nov. 2011.
- [5] A. Takahata, Y. Shimada, F. Yoshioka, M. Yoshida, M. Kimata and T. Ota, "Infrared Position Sensitive Detector (IRPSD)," *Proceedings of the SPIE*, vol.6940, pp.694031-1–694031-11, Apr. 2008.
- [6] 河本 満, 池田 剛, 幸島 明男, 車谷 浩一, "焦電型赤外線センサアレイを用いた一測位手法," *情報処理学会研究報告*, vol.2010, no.6, pp.1–8, May 2010.
- [7] P. Indyk and R. Motwani, "Approximate nearest neighbors: Towards removing the curse of dimensionality," *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, pp.604–613, May 1998.