

サーモパイルアレイセンサによる廊下での通行判定方式

秦淑彦^{†1} 鹿田隆太^{†1} 小田章弘^{†1}

ビル利用者の行動に基づき、安全、快適、便利、省エネな空間を提供するスマートビルシステムを実現するため、ビル内に設置した多数のセンサから構成されるセンサネットワークにより、タグ等を持たない人も含めた行動情報を抽出する研究を行っている。イメージセンサやレーザセンサを用いた従来の人数計測装置は費用、設置場所、プライバシー等の問題があり、高い空間粒度で人流を測定するために、これらの装置を多数設置することはできない。そこで、低解像度の赤外線アレイセンサを用いて、廊下を通行する人の向きと数を計測する方式を考える。通路と直交する向きに2つの1次元アレイセンサを天井に設置する。各センサの空間的な温度分布から人数を検出し、各センサの検出結果を時系列で比較することにより通行方向と人数を判定する。判定方式と実験結果について報告する。

Counting Pedestrians Walking through a Hallway with Thermopile Array Sensors

TOSHIHIKO HATA^{†1} RYUTA SHIKADA^{†1} AKIHIRO ODA^{†1}

It is very effective to extract human behavior and control building facilities based on the behavior in smart buildings that should provide safe, comfortable and convenient environment with energy saving. We have been doing research on extracting the human behavior with sensor networks consisting of many sensors that detect numbers and directions of pedestrians. Existing people counters using image sensors and laser sensors have some problems such as expensiveness and privacy, and we could not deploy many such counters to get people flow data with high spatial granularity.

We propose a novel method to detect numbers and directions of pedestrians walking through a hallway using low resolution infrared array sensors. A pair of sensors with a single dimension array is installed orthogonally to the hallway direction on a ceiling. Each sensor detects the number of pedestrians walking under it based on spatial distribution of temperature. The numbers and directions (two-way) of pedestrians are determined by comparing the headcount data detected from each sensor in chronological order. We describe the method and show some experimental results.

1. はじめに

ビル利用者の行動に基づき、安全、快適、便利、省エネな空間を提供するスマートビルシステムを実現するため、ビル内に設置した多数のセンサから構成されるセンサネットワークにより、タグ等を持たない人も含めた行動情報を抽出する研究を行っている。人物を検知し追跡や人数計測を行う装置として、従来からイメージセンサやレーザセンサが用いられている。しかし、費用、設置場所、プライバシー等の問題があり、高い空間粒度で人流を測定するために、これらの装置を多数設置することはできない。そこで、プライバシーの問題がなく、暗闇でも使え、安価に製造可能な低解像度の赤外線アレイセンサであるサーモパイルアレイセンサを利用する。

本研究では廊下を通行する人の向きと数を計測する方式を考える。通路と直交する向きに2つの1次元アレイセンサを天井に設置する。各センサの空間的な温度分布から人数を検出し、各センサの検出結果を時系列で比較することにより通行方向と人数を判定する。

本報告では、まず関連研究と赤外線アレイセンサについて説明する。次に廊下での通行判定の提案方式の基本アイデアと判定方法の詳細を述べ、提案方式を実装したプロト

タイプによる実験結果と評価について報告する。

2. 関連研究

人物を検知し追跡や人数計測を行う装置として、一般にイメージセンサ、すなわち監視カメラが用いられる。[1] イメージセンサは低価格化が進んでいるが、照明変化の影響を受け、精度よく検知するには処理量が大変大きい。また、プライバシーの問題があり、設置できる場所が制約される。

レーザを用いたレンジセンサやレーザスキャンセンサによる方式では、プライバシーや照明変化の問題はないが、価格や設置場所の制約がある。[2]

人物と背景の温度差を利用して人物を検知する赤外線センサによる方式は、暗闇でも検知でき非常に安価であるため、広く普及しているが、単一センサでは人物の有無しか検知できない。そこで、複数のセンサ、あるいはセンサアレイを用いて人物追跡や人数計測を行う研究がおこなわれている。受光する赤外線量が変化すると電流が発生する焦電型赤外線センサを利用し、その信号波形のピークの符号や振幅などの特徴量から通行者の人数や方向を判定する研究がある。[3] 焦電型赤外線センサは広く普及し非常に安価であるため、通行判定への応用が期待されるが、立ち止まって動きがなくなると判定できなくなるため、運用上

^{†1} 広島工業大学
Hiroshima Institute of Technologies

の制約がある。

一方、受光する赤外線量に応じた電位を出力するサーモパイルアレイセンサを利用し、空間的な温度分布に基づいて人物の位置を検知する研究がある。[4] [5] 文献 [4] では 4×4 素子のセンサを天井に設置し、各素子の検知範囲に人が存在するか否かを、現在の温度と 1 タイムスロット前の温度を入力としてファジィ推論により判定し、人物領域をラベリングすることにより、人物の位置を検出し追跡している。文献 [5] は素子数以上の空間粒度で複数物体の位置を推定するため、事前に複数の点熱源を配置して温度を測定し空間特性を求め、複数物体の位置と温度分布を記述したデータベースを作成する。そして、測定した温度分布とマッチする物体位置をデータベースから検索することにより、複数物体の位置を推定する。

提案方式は、同様に天井に取り付けたサーモパイルアレイセンサで測定した温度分布に基づき通行判定を行うが、廊下通行に限定し、検知範囲を一方方向に幅広くとれる 1 次元アレイセンサを利用する。

3. サーモパイルアレイセンサ

サーモパイルは熱型赤外線センサの一つである。[6] 熱型赤外線センサは、物体が放射する赤外線を受光素子が吸収することによって発生する温度変化を電気信号に変換する。光エネルギーによる電気現象を利用する量子型赤外線センサに比べ感度や応答性が劣るが、波長帯域が広く常温で使えるため小型で安価な装置が製造できる。サーモパイルは、接触している異なる材料の間に温度差があると起電力を生じるゼーベック効果を利用するものであり、表面温度計や人物検知などに広く利用されている。複数のサーモパイル素子を 1 次元あるいは 2 次元に配列した半導体がサーモパイルアレイセンサであり、線的あるいは面的な温度測定が可能である。人物検知のために、応答性向上と小型軽量化を目指した開発も行われている。[7]

本研究で用いたサーモパイルアレイセンサの外観と温度測定例を図 3.1、仕様を表 3.1 に示す。

表 3.1 サーモパイルアレイセンサの仕様

Table 3.1 Specifications of the thermopile array sensors

項目	D6T-8L-06	D6T-44L-06
素子	1 x 8	4 x 4
視野角	$\theta_x = 62.8^\circ$ $\theta_y = 6.0^\circ$	$\theta_x = 44.2^\circ$ $\theta_y = 45.7^\circ$
検出温度	検出範囲 5~50°C, 精度 ±1.5°C 以内	
データ出力	測定温度デジタル値, シリアル出力	
電力	DC4.5~5.5V Typ. 5mA	

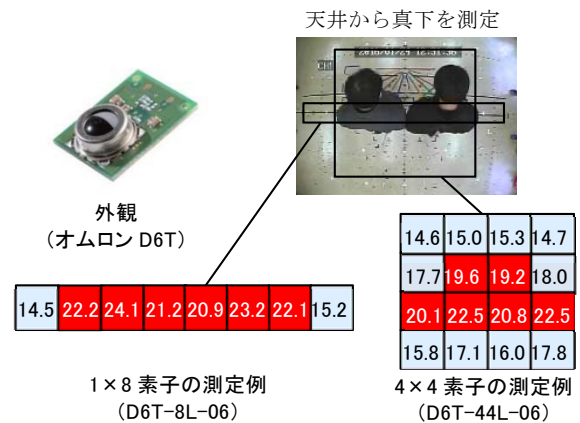


図 3.1 サーモパイルアレイセンサ
Figure 3.1 Thermopile Array Sensor

4. 提案方式

4.1 廊下通行

廊下を横切ることなく、通路方向に沿って、1 人または複数人が横並びで通行する場合を対象とする。実際には、通常のオフィスビルや病院などにおける幅 2~5m 程度の廊下で、交差点や出入り口付近以外の天井に設置して判定することを想定する。歩行速度は 0.5m/s (非常にゆっくり) ~ 3m/s (小走り)、通行方向は通路方向 ±30°, 横並びは肩が触れ合う程度、縦並びは歩行速度に応じて接触しない程度の距離 (1m/s であれば 30cm) を判定対象とする。また、当面、検知範囲で立ち止まらないものとする。

4.2 基本アイデア

例えば図 4.1 に示す配置で、2 つのセンサを天井に設置して真下方向の温度を測定し、図 4.2 に示すような考え方で通行する人数と方向を判定する。

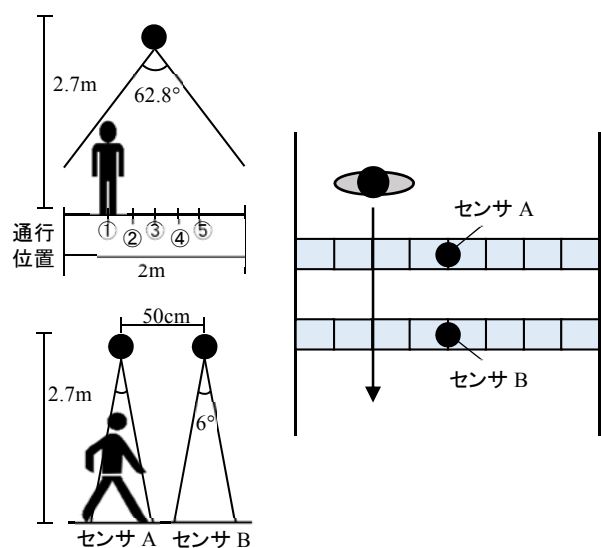


図 4.1 センサの配置と測定範囲
Figure 4.1 Sensor placement and sensing areas

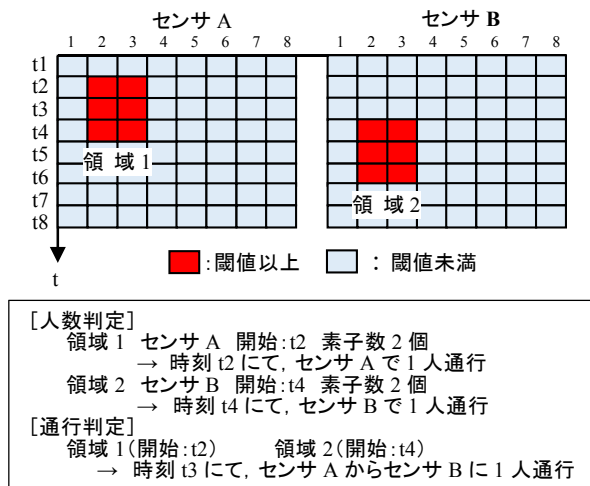


図 4.2 人数と方向を判定する基本アイデア
Figure 4.2 Basic idea to detect numbers and directions

閾値以上の温度を有する素子の中で、空間的に隣接する素子の集合を領域として抽出し、その素子の数から人数を推定する。通路方向に沿って通行するのであれば、通路方向と直交する向きで線的に測定すればよく、2次元ではなく1次元のアレキセンサを使用できる。

通行速度とサンプリング間隔の関係で、1人の通行であっても閾値以上の温度の領域が時間的に連続して発生し、通り過ぎた後に閾値を下回り、領域が消滅する。このタイミングでその領域を通過した人数を判定する。

近接して設置した2つのセンサの人数判定の結果を時間軸上で突合せて、検知範囲への進入と退出のペアを見つけることにより、通行方向を推定する。これにより、面的に人を追跡する場合に比べ、処理量の低減が期待できる。

4.3 判定方法

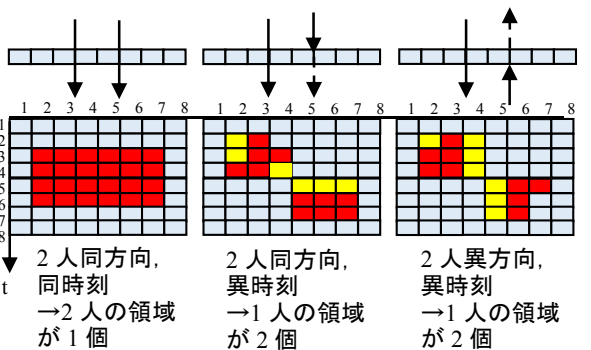
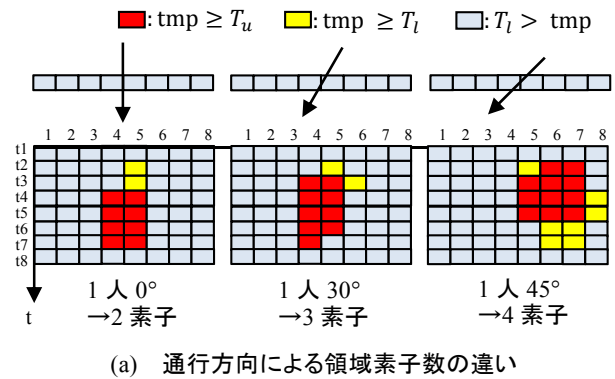
図 4.1 に示すように、幅 2m の廊下で、高さ 2.7m の天井にセンサを取り付け、1~3 人が通行した際の温度の空間分布と時間変化を測定し、具体的な判定方法を検討した。

● 人が存在する温度の閾値

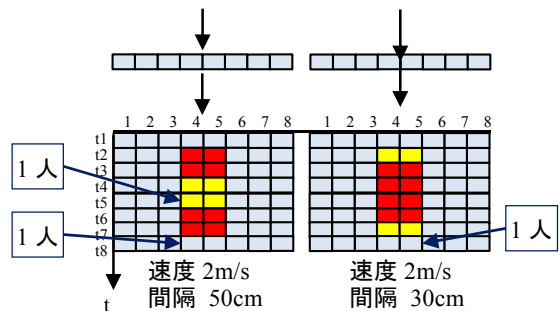
測定温度は室温の影響を受けるため、文献[4]と同様に、測定温度から人が通行していない時の温度（床の温度）を差し引いた値を用いる。①~⑤の通行位置を速度 0.5~3m/s で通行した際の温度を測定し、通行した（検知範囲に人が存在する）と判定する閾値を $T_l = 2.5^\circ\text{C}$ とした。被験者による個体差や室温による変化については実験できておらず、今後の課題である。

● 人数推定のための領域の素子数

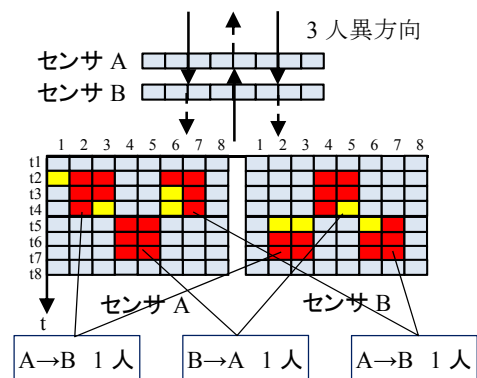
通路方向 $\pm 30^\circ$ 内の通行に対して、領域の素子数は、1人は1~3個、2人は4~6個、3人は7~8個とした。通行方向が 30° を超えると1人通行でも素子数が4個となり、2人と区別できない。（図 4.3(a)）



(b) 時空間の温度分布における4連結での領域抽出



(c) 人数判定のタイミング



(d) 通行方向の判定

図 4.3 人数と方向の判定方法
Figure 4.3 How to detect numbers and directions

● 抽出する領域

複数人が空間的、時間的に接近して通行すると、個々の通行に起因する領域が融合されて、1つの大きな領域となる。正確に分離するのは困難であり、人数判定ではそこまで必要ないが、通行方向の判定を考えると、少なくとも逆方向の通行は1つの領域とすべきではない。(図4.3(b))実験の結果、時空間の温度分布において、4連結の領域として抽出すればよいことがわかった。

● 人数判定のタイミング

領域を構成する全ての素子の温度が $tmp < T_l$ となった際に人数の判定を行う。2人が縦に並んで近接して通行した場合、通行速度が早く、2人の間隔が狭いと、途中で温度が閾値 T_l より低くならないことがある。(図4.3(c))そこで、2つの閾値 $T_l < T_u$ を使い、温度 $tmp \geq T_l$ ならば人が存在すると判断するとともに、温度が $tmp \geq T_u \rightarrow T_u > tmp \geq T_l \rightarrow tmp \geq T_u$ と時間的に変化した場合、その極小点においても判定を行う。

● 通行方向の判定

2つのセンサにおいて閾値以上の温度を観測していない状態から、1つあるいは2つのセンサで閾値以上の温度を観測した時点を開始とし、予め設定した時間、閾値以上の温度を観測しなかった時点を終了とする判定区間を考える。判定区間において、各々のセンサで人数判定を行った際、その領域の開始時刻(領域を構成する素子が $tmp \geq T_l$ となった時刻)と判定した人数を記録する。

先に開始した領域の通行人数は、必ずもう一方のセンサにおいて、それ以降に開始した領域が存在するはずである。

(図4.3(d))そこで、2つのセンサにおける人数判定結果を開始時刻順に並べ、開始時刻の早い判定結果に対応する、開始時刻の遅いもう一方のセンサの判定結果を見つけ、対応する人数を差し引く。開始時刻の早い判定結果の人数に対応する判定結果が全て見つければ、まだ人数が0になっていない次の判定結果の処理を行い、全ての判定結果の人数が0になるまで繰り返す。この対応付けは、必ずしも個々の通行とは一致しない場合もあるが、判定区間内の通行方向別の人数は正しく求めることができる。

5. 実験評価

5.1 実験方法

幅2mの廊下を想定した通行実験を行い、提案方式の評価を行った。図5.1に実験システムの構成、図5.2に実験風景、図4.1にセンサの配置と検知範囲、表5.1に通行判定装置の仕様を示す。通行判定装置は1次元サーモパイルアレイセンサの基板と、4.3の判定方法を実装したマイコンボードから構成される。人数判定と通行判定を行う主装置と、人数判定のみ行う副装置、表示や記録を行うサーバはWiFiで接続される。

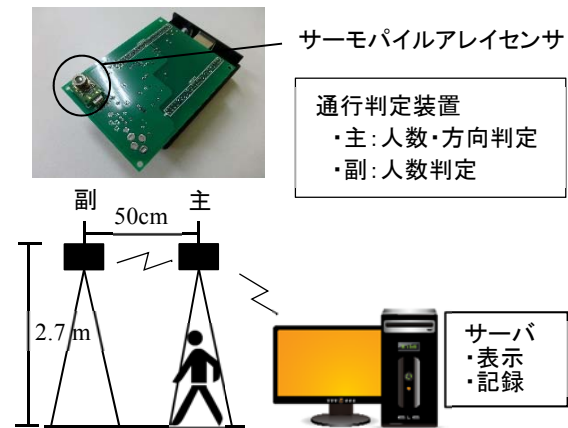


図 5.1 実験システムの構成
Figure 5.1 Experimental system

通行判定装置



(a) 天井に設置した装置 (b) 通行の様子

図 5.2 実験風景

Figure 5.2 Experimental scenes

表 5.1 通行判定装置の仕様

Table 5.1 Specifications of the prototype

項目	仕様
センサ	サーモパイルアレイセンサ D6T-8L-06(オムロン)
マイコン	Beagle Bone Black (BeagleBoard.org) CPU AM3358, RAM 512MB, OS Debian
通信	Wi-Fi (USB ドングル), Ethernet
電源	5VDC, USB 給電
サイズ	113×76×42mm

表 5.2 に通行動作、図 5.3 に複数人通行を説明する図を示す。表 5.2 の通行位置①～⑤は、図 4.1 に記載する廊下での位置である。複数人の通行において、縦列は同じ位置を近接して歩く動作であり、横列は異なる位置を同じ時刻あるいは少し時間をずらして歩く動作である。1m/s と 2m/s の各速度に対して、41 パターンの通行動作を往復 5 回実施した。

表 5.2 通行実験における通行動作

Figure 5.2 Passing actions in the experiment

人数	1	2	3
速度	1m/s, 2m/s		
角度	0°, 15°, 30° -15°, -30°	0°	
複数動作	-	縦列 4 横列・同方向 11 横列・異方向 2 (間隔 0~50cm 10cm 刻み)	横列・同方向 16 横列・異方向 3 (間隔 0~50cm 10cm 刻み)
位置	③	③ ①_⑤ ③_⑤ ②_④	①_③_⑤ ①↓_③↓_⑤↑ ①↓_③↑_⑤↓ ①↑_③↓_⑤↓

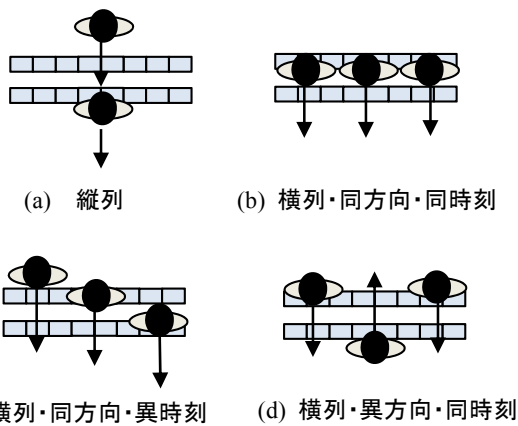


図 5.3 通行動作の例

Figure 5.3 Examples of passing actions

5.2 実験結果

表 5.3 に実験結果を示す。ここで、正答率は各通行動作において正しく判定した回数を試行回数で除算した値である。結果のポイントを以下に述べる。

- 間隔の狭い 2 人縦列以外は、ほぼ 100% の正答率であり良い結果が得られた。
- 正答率が 100% でない間隔の狭い縦列は、人同士が接触しそうな間隔であり、通常の運用ではかなり頻度は低いと思われる。
- 間隔の狭い縦列で正しく判定できない原因は、2 人の通行の間で温度があまり変化せず、 $tmp < T_u$ とならないためである。
- 3 人の同時刻・横列・異方向において 1 回誤っているのは、人が通行したにもかかわらず想定される温度変化が起こらなかったためである。原因は不明であり、今後調査する。

表 5.3 実験結果

Figure 5.3 Experimental results

通行	間隔	1m/s	2m/s
1 人	-	100%	100%
2 人縦列	20cm	40%	-
	30cm	70%	20%
	40cm	100%	70%
	50cm	100%	100%
2 人横列 同方向	-	100%	100%
2 人横列 異方向	-	100%	100%
3 人横列 同方向	-	100%	100%
3 人横列 異方向	-	100%	97%

5.3 考察

通行実験を始めた段階であり、通行動作パターンを増やし、測定条件（気温、場所、被験者）を変えて行う必要がある。焦電型赤外線センサと異なり、サーモパイルセンサは立ち止まった状態であっても、人の存在を検知できる可能性があり、立ち止まりや引き返しへの対応を検討したい。

センサの時間応答の制約のため、早い速度で近接して縦列通行すると正しく判定できないことがわかった。今回は 1 次元アレイを用いたが、2 次元アレイを用いて確認する。

今回は、実験毎に適切な人検知の閾値を手動で設定したが、気温や場所により結構変化することがわかった。環境が変化しても、システムが動的に適切な閾値を設定する機能が必要である。

実用化を考えると、より幅の広い廊下、天井の高い廊下への対応が必要である。今回用いたセンサを天井高 2.7m に設置する場合は、廊下幅 2m が限界である。複数のセンサを横並びに設置する案もあるが、検知範囲を相互に重複させる必要があるかもしれず、単純な組み合わせでは対応できない。

6. まとめ

通路と直交する向きに 2 つの 1 次元サーモパイルアレイセンサを天井に設置し、各センサの空間的な温度分布から人数を検出し、各センサの検出結果を時系列で比較することにより通行方向と人数を判定する方式を提案した。種々の通行動作に対する実験を行い、初期段階として良好な結果が得られた。

今後は、通行動作を増やし、環境を変えて通行実験を行って課題を洗い出すとともに、温度閾値の動的変更や幅広の廊下への対応を検討していく。

参考文献

- 1) 大網亮磨, 石寺永記, 植木一也, 宮野博義, 藤田光洋, 伊原康行, "監視カメラ映像に基づく人物行動・属性の抽出とその応用," 電子情報通信学会誌, Vol.95, No.5, pp.452-456, 2014
- 2) 帷子京市郎, 中村克行, 趙卉菁, 柴崎亮介, "レーザセンサを用いた歩行者通過人数の自動計測手法," 情報科学技術レターズ, 5, pp.145-148, 2005
- 3) 秦淑彦, 室中菜緒, 中西柚花, 藤井貴久, "焦電型赤外線セン

- サによる通行判定方式 -1人用出入口での通行判定-,” 情報処理学会研究報告, Vol.2015-UBI-45, No.7, pp.1-7, March, 2015
- 4) 丸鬼正人, 中嶋宏, 土屋直樹, 田中純一, 畑豊, ”サーモパイルアレイセンサを用いた屋内用の人モニタリングシステム,” システム制御情報学会論文誌, Vol.27, No.4, pp.149-159, 2014
- 5) 岡田遼太郎, 矢入郁子, ”赤外線グリッドセンサを用いた屋内位置・行動推定の粒度と精度の検討,” 人工知能学会全国大会論文集 28, 1-4, 2014
- 6) “赤外線基礎知識,” 日本赤外線学会学生会,
<http://jsirgakuseikai.jimdo.com/>
- 7) J. Tanaka, M. Shiozaki, F. Aita, T. Seki, and M. Oba, "Thermopile Infrared Array Sensor for Human Detector Application," IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), pp.1213-1216, January 2014