

複数焦電センサを利用した室内人位置推定装置の提案

Proposal for Indoor Location Estimation Devices with Multiple Pyroelectric Sensors

下坂正倫 (東京大学) ○ 石野嵩人 (東京大学) 福井類 (東京大学) 佐藤知正 (東京大学)

Masamichi SHIMOSAKA, the University of Tokyo
Takahito ISHINO, the University of Tokyo
Rui FUKUI, the University of Tokyo
Tomomasa SATO, the University of Tokyo

Abstract: We propose indoor location estimation devices as an observation system for elderly people living alone. On the device, multiple pyroelectric sensors are attached to detect human motion and location. All the sensors are placed to face different direction and at different position each other. When a person walks across the reaction zone of the sensors, each sensor outputs different signal with respect to location and direction of the sensor. We focus on the difference of the signal and utilize this characteristic for the human location estimation. First of all, this paper presents the example of placement of multiple sensors and signal processing algorithms to detect the accurate timing that human enters the reaction zone. We adopt the sensor placement that each sensor is placed at equal angular intervals and the region of each sensor is equally overlapped. This method reduces the number of the sensors compared with other location estimation devices. Second, we present a simple human tracking algorithm and evaluate the accuracy of the method.

Key Words: pyroelectric sensor, indoor location estimation, elderly activity monitoring

1. 緒論

近年、少子高齢化により独居高齢者が増加し、独居高齢者の孤独死防止や認知症の早期発見の必要性が高まっている。これに対し、カメラやセンサを用いて独居高齢者の生活を見守るサービスに関する研究が盛んに行われているが、サービスの普及に際しては、見守りシステムの設置コスト削減や、監視されることによるプライバシー侵害に対する抵抗をどのように取り除くかが大きな課題となっている。

この課題に対し、安価かつプライバシー侵害に関する抵抗が少ないとされる焦電センサを用いた生活見守りシステムが提案されている。このようなシステムの例として、住居内の各部屋や廊下に1個ずつ、住居全体に数個のセンサを設置し、各部屋のセンサの反応の有無から人が存在する位置を推定する研究が行われてきた^{(1),(2)}が、一箇所に1個のセンサを設置しただけでは、人の存在の有無や漠然とした「活発さ」等の大局的な情報しか得られないため、導入は容易であるものの具体的な室内行動の推定を行うには限界があった。そこで本研究では、一部屋に複数個のセンサを配置し、各センサから得られる情報を組み合わせ、室内における行動の理解に必須といえる人位置を推定することで、よりの確かな生活見守りシステムを実現することを目的とする。

複数の焦電センサを組み合わせた室内人位置推定システムには大きく分けて2通りの方法が存在する。複数のセンサを天井から床面に向けて格子状に配置し、真下を通過する人の動きを検出して室内の人位置を推定する研究⁽³⁾⁻⁽⁵⁾と、壁面や部屋の隅などに床面と平行に多数のセンサを配置し、各センサの検出範囲を人が横切る際の反応を利用して人位置を推定する研究⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾の2種類である。前者の利点としては、検出範囲への進入の検知が容易で、検出アルゴリズムが直感的であることが挙げられるが、反面、天井に設置する際に工事等の労力を要する他、床面を動く人の身長等、高さ方向の情報を取得しにくいという欠点がある。センサの出力電圧値の大きさから歩行者の大きな身長を推定する研究も存在する⁽⁵⁾が、人間がセンサの検出範囲の中心を通過する場合のみ適用可能な研究であり、天井設置型の研

究では高さ方向の情報を取得するのは困難であるといえる。これに対し、床面と平行にセンサを設置する後者の手法では、設置高さを変えた複数のセンサを設置することにより高さ方向の情報を比較的容易に取得することが可能である。また、天井設置型に比べ設置しやすく、家庭への導入が容易である。本研究では、家庭への導入のしやすさという観点から、床面と平行にセンサを設置する手法を採用する。ただし、この方法は設置箇所が家具や部屋の間取りに左右されやすい他、部屋の各所に設置したセンサの反応の重なりから人位置を推定するための検出アルゴリズムの複雑さを解決することが課題となる。

本論文は次のような構成をとる。まず、第2節で焦電センサの特性および複数の焦電センサを組み合わせることで実現可能な人位置推定手法の原理を述べる。第3節では提案する人位置推定手法を実現するためのセンサ出力信号の処理方法に関する実験、および人位置推定の精度評価実験の結果と考察を行う。第4節では結論と将来課題を述べる。

2. 複数焦電センサを利用した人位置推定

2-1 焦電センサの原理

焦電センサは生体をはじめとした熱源の動きを検出するセンサで、照明変化やオクルージョンに強い性質から防犯センサ等の用途に利用されることが多い。焦電センサは温度分布の変化に反応して出力電圧を変化させる焦電素子により構成される。焦電素子は、検出範囲を人間等の動体が横切った時、検出範囲の温度分布の変化に対応して、検出範囲の温度が前の状態よりも上昇すれば正の電圧変化を、低下すれば負の電圧変化を示す微分センサである。焦電素子単体では動体の通過による温度分布だけでなく気温の変化などを誤検出してしまうため、極性を逆にした2つないしは4つの焦電素子を直列につなぎ、移動以外の反応を打ち消す工夫がなされている。本研究で用いるのは焦電素子を2つ持つデュアル素子タイプのセンサ(株式会社村田製作所 IRA-E700ST1)である。デュアル素子タイプのセンサの前を人が通過する際には、原理的にはFig. 1(a)に示すような正負逆の電圧が連続して出力されると考えられるが、

後述するフレネルレンズの仕様上、実際の利用においては一度目の反応が減衰し定常状態になる前に二度目の反応が生じるため、出力波形は Fig. 1(b)のように両者の出力を重ね合わせた形になる。このように、デュアル素子タイプのセンサを用いることで、検出範囲を通過する向きに応じて出力変化の正負が逆転する性質を利用し、動体の通過方向を正負の2方向のいずれかに特定することが可能である⁽⁹⁾。

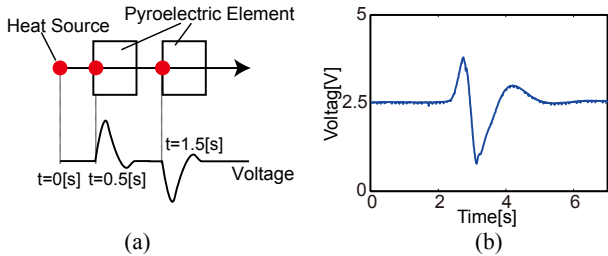


Fig. 1 (a) Theoretical signal of dual element sensor.
(b) Signal of dual element sensor in actual use.

焦電センサは防犯用途で利用されることが多いため、通常、焦電素子の検出範囲を拡散させ、より広範囲の検知を可能にするフレネルレンズと組み合わせて利用される。多くのフレネルレンズは、複数の焦点を持ち焦電センサの検出範囲を拡散させるよう設計されているが、本研究においては、焦電素子の極性を利用して移動体の移動方向を特定することができる可能性を考慮し、センサ上の焦電素子と検出範囲が一对一に対応した単焦点タイプのフレネルレンズ(株式会社村田製作所 IML-0637)を利用する。水平方向の視野角は約30度で、センサの検出範囲は Fig. 2 のようになる。水平方向の図で2つに分かれた各領域は、極性の正負が逆の2つの焦電素子の検出領域に対応している。

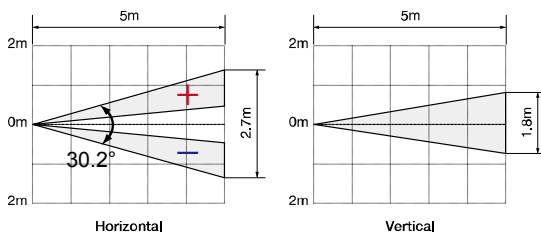


Fig. 2 Field of view of the Fresnel lens IML-0637.
(<http://www.murata.co.jp/>)

2-2 複数焦電センサの組み合わせによる人位置推定

Fig. 1(b)に示したように、焦電センサの反応領域を人が横切った際のセンサの反応において、一旦人を検知したのち、センサの反応領域の温度変化が定常化し、センサの出力が安定するまでには一定の時間を要する。このような出力の特徴により、人が反応領域を通過する際、領域内に「進入した」という情報をセンサ出力から得るのは比較的容易だが、センサ単体の出力から「領域から出た」という情報を得ることは難しい。そのため、「人がある反応領域を通過した」という情報を得るためには、複数のセンサを反応領域が隣接するよう設置し、「自センサの領域に進入したのち、隣接する他のセンサの領域に進入した」ことを確認する必要がある。Hao らの研究^{(7),(8)}では、検出範囲を一定の角度に絞ったセンサを、互いの反応領域が重ならないように等角度で設置した焦電センサデバイスを利用し、これを実現している。本研究では、検出角約30度のフレネルレンズを装着したセンサを一箇所に10度間隔で設置したセンサユ

ニットを用い、角度分解能10度の検出を実現している。センサの反応領域を重ねて設置する理由は、第一に、独立した検出範囲を持つセンサを等間隔に並べた場合に比べ、両端の2個のセンサの分だけセンサ個数を削減できる点、第二にフレネルレンズの視野を金属テープで遮蔽するなどして調節せずとも、市販のレンズをそのまま用いることができる点にある。

このように、一箇所に等角度で設置した焦電センサユニットを用いれば、ユニットから見た人の存在する方向を特定することが可能である。しかし、焦電センサは一方向からの観測では奥行き方向の情報を得ることが難しい⁽⁹⁾。関連研究では、部屋の四隅や廊下の両側の壁など複数箇所にセンサを設置し、各箇所のセンサの反応の有無に関する情報を機械学習等の統計学的手法で処理することによって人位置のトラッキングを行っているが⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾、本研究ではFig. 3に示すように、2箇所に設置したセンサユニットの反応から各ユニットに対する人の存在方向を推定し、2つの存在領域が重なる領域に人が存在するとみなす人位置推定手法をとる。センサユニットの配置を2か所としたのは、2つのユニットを一定の距離で接続した1つの装置として実装することで、実際の家庭に導入する際に、センサユニット同士の相対的な位置関係に関するキャリブレーションを不要にするためである。また、このように2つの視野から見える情報を複合して位置推定を行う手法は、画像処理におけるステレオ視の考え方に相当する。

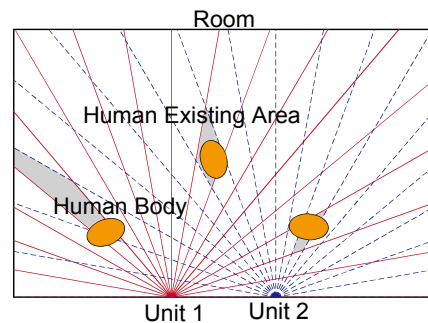


Fig. 3 Location estimation with two sensor units.

2-3 進入検知アルゴリズム

焦電センサの出力波形から人の進入を検知するには、人の通過を検出した時に生じる出力信号の特徴を抽出する必要がある。Fig. 4(a)に示す典型的な焦電センサの反応では、人の通過を検知した後出力が定常状態に戻る間に、センサの検出範囲を人が通過していないにもかかわらず、緩やかだが+0.5V程度の比較的大きな電圧値の上昇がみられる。定常状態に対する出力電圧の振れ幅に閾値を設け、一定以上の振れ幅を示した瞬間を検知状態とみなすような単純な閾値処理ではこのような誤検知を排除することができないため、出力波形の形状や出力の微分値等に注目して人の進入を的確に検知する必要がある。ただし、何らかの信号処理によって人の進入の有無を判断する場合には、Fig. 4に示すように、実際の進入の瞬間から進入を検知するまでに一連のセンサ出力値を取得するためのタイムラグが生じる。

以上を踏まえると、検出領域内への人の進入を検知するためのアルゴリズムは、

1. センサの出力信号から人進入時に特有のデータ特徴を抽出する。
2. センサ信号から人の進入を検知した時刻と実際に人が検出領域に進入した時刻を同期するために、センサの信号から求めた検出時刻にオフセットをかけ、時刻を

一定時間戻す。

という2つの手順を踏むことになる。本研究では、手順1として現在時刻の電圧値と微小時間前の電圧値の差を計算する一種の微分処理を行い、反応の開始後に現れる出力電圧の急激な変動を閾値処理によって検知する(Fig. 4(b))。変動が一度閾値を超えた後、0.1V以下になるまで閾値判定を止め、変動が0.1V以下となった後、処理を再開する。実際に領域に人が進入してから、急激な出力電圧変動により人進入を検知するまでにはタイムラグが生じるため、手順2として進入を検知した時刻から適切なオフセット値だけ減算を行い、その値をセンサの検出領域に対する人の進入時刻とする。この手法に関する評価は第3-1節にて行う。

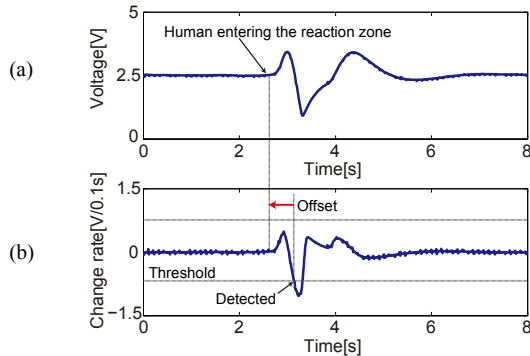


Fig. 4 (a) Raw signal of pyroelectric sensor
(b) Difference of the voltage (a) in 0.1[s]

3. 実験

3-1 領域進入検知実験

第2-3節で述べた人進入検知アルゴリズムを用いたセンサの反応領域内への人の進入検知実験を行い、位置の推定誤差を最小にするためのパラメータに関する調査を行った。具体的には、第2-3節の手順2にあたる、検出時刻に対するオフセットの最適値を求める実験を行った。Fig. 5(a)のように、向きを10度ずつずらして設置した焦電センサ装置を用い、センサからの距離約0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 [m]の距離を装置の向きに直交するよう歩行し(Fig. 5(b))、6つのセンサの出力電圧の解析を行った。

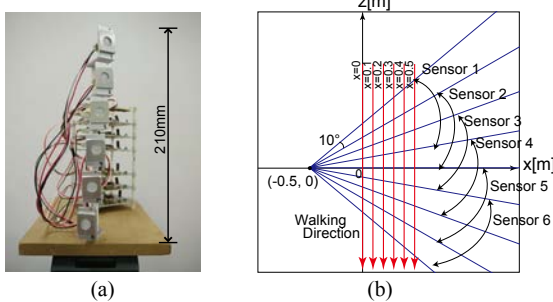


Fig. 5 (a) Prototype of human direction detecting unit.
(b) Condition of the experiment in chapter 3-1.

実験により得られるセンサの出力波形の例をFig. 6に示す。図中下側のグラフは、上側のグラフのようなセンサ反応が見られた時の人位置の推移を表す。歩行速度は高速(0.9~1.0m/s)、低速(0.5~0.7m/s)の2通り、各距離、歩行速度に関して5回ずつ試行し、人位置の正解データはモーションキャプチャにより取得した腰部の座標とする。座標系についてはFig. 5(b)に示した通りである。本実験では人の平面上の位置を求めることが目的なので、鉛直方向上向きを正とするy座標の値については考慮しない。

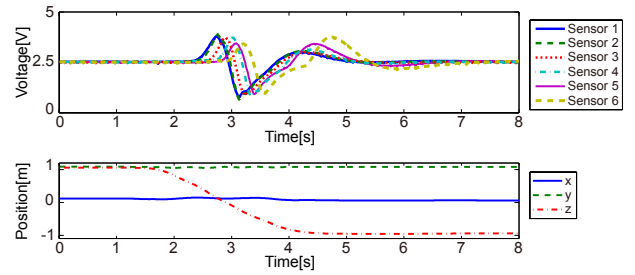


Fig. 6 Typical output signal in experience 3-1.

評価手法は以下の通りである。まず、センサの設置位置、角度から算出される各センサの検出領域の理論的な境界線と、直線に近似される歩行軌道との交点の座標を人進入位置の真値とする。これに対し、センサの信号から計算した人の各領域への進入時刻に、実際に人が存在していた位置の座標を求め、各試行における真値との位置誤差を全センサについて足し合わせた値が最小となるような、出力信号から人の進入を検知した時刻を実際の領域への進入時刻へと補正するためのオフセット値を求める。出力電圧の微分値(ある時刻の値と、その時刻から0.1s後の値の差)に対する閾値は、歩行速度毎に全てのセンサの進入を検知可能な値を調べ、高速歩行時に0.8、低速歩行時に0.87とした。

実験結果をFig. 7に示す。この結果が示すように、人とセンサの距離が遠く、歩行速度が遅い程、正確な領域進入位置を求めるためのオフセット値が大きくなるのが分かる。すなわち、オフセット値は各センサの検出領域に人が留まっている時間が長い程大きくなる。出力の微分値に関してもオフセット値を定数とする場合、装置を設置する部屋の広さに応じて、部屋の中心を既定の速度で通過した際の最適なオフセット値をあらかじめ取得しておけば、センサ出力信号の微分値を利用した人進入検知において最適な精度を得ることができると考えられる。本実験においては、全試行での位置推定誤差を最小とするオフセット値は0.74秒、その際の平均誤差は高速歩行時で0.11m、低速歩行時で0.074mであった。オフセット値と検出領域内に人が留まっている時間の関係に関する調査は将来課題とする。

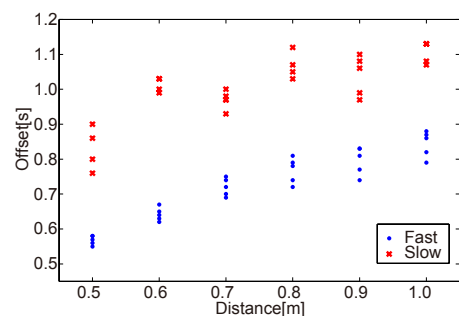


Fig. 7 Optimal offset for each distance from detecting unit.

3-2 人位置推定精度評価

一箇所に10度ずつずらしてセンサを3つ配したセンサユニットを2つ、Fig. 8(a)のような位置、方向に設置し、図中に示すような軌道を約0.94m/sで歩行した際の人位置の推定を行い、モーションキャプチャによって取得した実際の歩行軌道との誤差を評価する。人位置推定手法は以下の通りである。2つのセンサユニットにより作られる、Fig. 8(b)に灰色の領域で示したセンサ1, 2, 4, 5で囲まれた領域のように、各センサの検出領域の境界線によって囲まれる領域のそれぞれについて重心を求める。各センサユニットに

関する人存在領域の推定は、第 2-3 節のアルゴリズムを用いて行う。ユニット内の 1 つのセンサの反応領域への進入を検知した時刻から、隣り合ったセンサの反応領域への進入を検知した時刻までを、その領域に人が存在した時間とする。各センサユニットにより推定された人存在領域が重なった領域の重心を人がその領域に進入した際の座標とする。すなわち、人の移動をセンサの検出境界によって囲まれた領域の重心の座標間の遷移に近似する。2 つの領域間の遷移が起こる間の位置については、各領域の重心座標をもとに線形補間を行う。

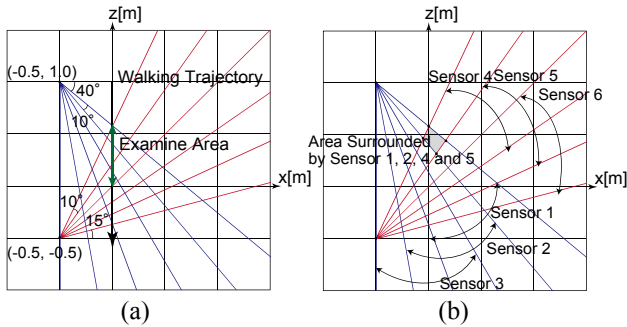


Fig. 8 (a) Sensor position and walking trajectory in experiment 3-2.
(b) The area surrounded by FOV of each sensor.

人位置推定の精度評価は次のように行った。Fig. 8(a) 中の太矢印で表される移動軌跡上で、2 つのセンサユニットの検出領域が最初に重なる位置($z=0.58[m]$)から $z=0[m]$ までの区間の座標データを切り出し、同時刻における人位置の推定値との平均二乗偏差(RMS)を求める。正解となる x , 座標, z 座標はモーションキャプチャにより取得する。第 2-3 節で述べた人進入検出アルゴリズムのパラメータは、出力電圧の微分値に対する閾値を 0.45 とし、検出の時間遅れに対するオフセット第 3-1 節の実験におけるセンサと人の距離 0.5m での最適オフセットである 0.57s とした。

実験により得た、人位置の真値と推定値の対応を表すグラフを Fig. 9 に示す。Fig. 9(a) は時系列での座標毎の真値と推定値の関係を、Fig. 9(b) は実際の歩行経路と推定された歩行経路を示す。このように、真の位置に対する誤差が z 方向について最大 0.3m 程度存在するなど、改善の余地はあるものの、相対的な移動方向に関しては比較的正しく検知できているといえる。5 回の試行を行い、平均二乗偏差は x 方向で 0.054m, z 方向で 0.15m であった。位置推定の改善方法としては、人の移動を等速直線運動と仮定する等、時系列的な制約をアルゴリズムに適切に組み込むことや、領域内への人の進入をよりの確にとらえる手法の考案などが挙げられる。

4. 結論と将来課題

多数の焦電センサを用いた装置により、室内における人位置を推定する手法を提案した。本手法は、多数の焦電センサを一箇所に集約し、一定の角度ずつ向きをずらして設置した装置を複数用いて、各装置に対する人の存在角度を計算することで人位置推定を行うことを特徴とする。多数のセンサを、検出角が重なるように等角度間隔で設置することで、従来手法に比べ必要なセンサ総数を削減可能なセンサ配置方法を提案し、その実現可能性を示した。また、焦電センサの出力信号から、センサの検出領域内への人の進入タイミングを正確に検知するための手法を提案すると

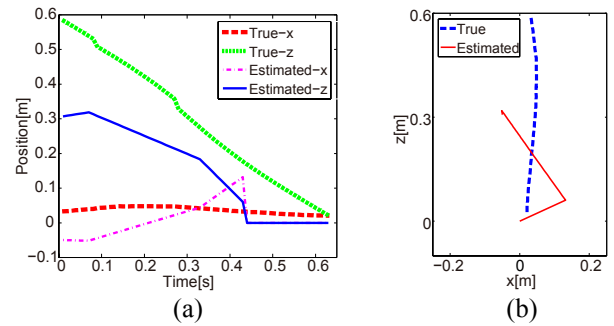


Fig. 9 (a) Comparison between true coordinates and estimation.
(b) Comparison between true coordinates and estimation.

ともに、この手法を用いた人位置トラッキング実験を行い、本手法による人位置推定の可能性を示した。

将来課題としては、人の移動速度の仮定や、人の現在位置、速度に対応する領域間の遷移確率など、時系列要素に着目した人位置トラッキング手法の確立が挙げられる。また、これに関連して、センサの検出範囲への人の進入を的確に検知するための、より詳細なセンサデータ解析が必要である。さらに、より広範囲での位置推定を可能とするためのセンサ配置方法の工夫や、「立っている」「寝ている」等の姿勢情報を取得するための装置開発などを進めていく予定である。

参考文献

- (1) T. Mori et al, "Anomaly Detection Algorithm Based on Life Pattern Extraction from Accumulated Pyroelectric Sensor Data," in *Proc. of IROS 2008*, pp. 2545–2552.
- (2) K. Oshima et al, "Behavior Labeling Algorithms from Accumulated Sensor Data Matched to Usage of Livelihood Support Application," in *ROMAN*, 2009, pp. 822–828.
- (3) X. Luo, B. Shen et al, "Human Tracking Using Ceiling Pyroelectric Infrared Sensors," in *2009 IEEE International Conference on Control and Automation*, 2009, pp. 1717–1721.
- (4) K. Ha, K. Lee et al, "Development of PIR sensor based indoor location detection system for smart home," in *SICE-ICASE International Joint Conference 2006*, pp. 2162–2167.
- (5) 奥田晋也, 金田重郎, 芳賀博英, "アナログ型焦電センサによる人間の室内位置・身長判別法の提案," 情報処理学会研究報告, UBI, [ユビキタスコンピューティングシステム], no.112, 2004.
- (6) T. Liu, Y. Chu, J. Liu et al, "Distributed Infrared Biometric Sensing for Lightweight Human Identification Systems," in *Proc. of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2010, pp. 6969–6974.
- (7) Q. Hao, D. J. Brady, B. D. Guenther, et al, "Human tracking with wireless distributed pyroelectric sensors," *IEEE Sensors Journal*, vol. 6, no. 6, 2006, pp. 1683–1696.
- (8) Q. Hao, F. Hu, and Y. Xiao, "Multiple Human Tracking and Identification with Wireless Distributed Pyroelectric Sensors," *IEEE Systems Journal*, vol. 3, no. 4, 2009, pp. 428–439.
- (9) P. Zappi, E. Farella, and L. Benini, "Tracking Motion Direction and Distance with Pyroelectric IR Sensors," *IEEE Sensors Journal*, vol. 10, no. 9, 2010, pp. 1486–1494.