

## 住宅内に設置した人感センサを用いた 住人の移動推定手法

村尾和哉<sup>†1</sup> 藤堂智史<sup>†1,\*1</sup> 寺田 努<sup>†1,†2</sup>  
矢野 愛<sup>†3</sup> 松倉隆一<sup>†3</sup> 塚本昌彦<sup>†1</sup>

近年, 建物内にセンサを配置したスマートホームやスマートオフィスが出現し, あるいは人の移動を検出することで入室管理や位置推定を行い, ログの生成や室内灯の制御などを実現している. 従来研究における人の移動検出方法として, RFID タグを用いる手法が提案されているが, 一般家庭などで移動推定のために部屋を移動するたびにタグをかざす作業はユーザの負担になる. 一方, 人はデバイスをもたない例として環境に設置されたカメラによる画像認識を用いる方法が存在するが, 人の移動を追うには家中にカメラを設置しなければならず設置コストが高く, 必要以上の情報を取得してしまうためプライバシーの面で適さない. 本研究では蛍光灯のために既に設置されている赤外線人感センサを利用して, 一般家庭における住人に移動検出および動線推定を行う. 住人の移動を把握することで家電の効率的な制御による家の省電力化が実現できる.

### Detecting Human Movement by Passive Infrared-red Sensors installed in Home

KAZUYA MURAO,<sup>†1</sup> SATOSHI TOUDOU,<sup>†1,\*1</sup>  
TSUTOMU TERADA,<sup>†1,†2</sup> AI YANO,<sup>†3</sup>  
RYUICHI MATSUKURA<sup>†3</sup> and MASAHIKO TSUKAMOTO<sup>†1</sup>

In this paper, we introduce the simultaneous tracking problem, which exploits the synergy between location and movement to provide the information necessary for intelligent home appliance control. Our goal is to perform accurate movement estimation for multiple people in a home environment. We propose an approach that uses information gathered by passive Infrared-Red sensors only commonly found in lighting control system. People are not forced to equip devices, and video camera is not used. We evaluate our approach with experiments in a real instrumented home.

### 1. はじめに

2005年に我が国の二酸化炭素排出量を1990年比で2008年から2012年の間に6%削減することを約した京都議定書が発効され, 二酸化炭素排出量削減は国民全体の社会問題として認識されている. このような背景による国民の省電力・省エネに対する意識の向上と情報科学技術の発展から, センサデバイスを用いて家庭内や事務所内の電力消費を最適化するHEMS (Home Energy Management System) やBEMS (Buildig Energy Management System) に注目が集まっている<sup>1)</sup>. これらのシステムは家庭やオフィスに設置されたセンサデバイスを用いて機器のON/OFF制御を行うものである. 例えば, テレビや照明に人感センサを設置して人の不在検出を行い, 誰もいないときは自動的に電源を切ることで電力・二酸化炭素消費を削減する. しかしながら, 現状では「誰もいなければ電源を切る」や「誰か現れたら電源を入れる」といった単純な制御しか行えず, エアコンなどの空調設備を単純に制御して頻繁にON/OFF制御を行うと, 便所へ行くために一時的に部屋を離れただけで暖房が切れて温度が下がり, 再び暖めなくてはならず無駄な電力が生じる. 同様に, 起動や効果があらわれるまでに時間を要する機器は人がその場所に現れる前に制御すべきである.

このような高度な制御には屋内での人物の移動に関する情報を取得する必要がある. これまでにカメラやRFIDタグなどを用いた屋内人物位置推定および移動推定手法が提案されているが, プライバシーの問題やユーザが追加的な作業を行う必要がある. 一般的な普及を考えた場合, ユーザは一切の機器をもたず, 操作をせず, ユーザに対して監視されている感覚を与えないシステムにする必要がある.

本研究では, ユーザは一切の機器を装着することなく, 既に蛍光灯の制御に用いられ広く普及している赤外線人感センサのみを用いて, 誰が, どのように移動したかを判定する手法を提案する. 本研究で用いる人感センサは人間が発する赤外線を検知して検出範囲内の人間

†1 神戸大学大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, Kobe University

†2 科学技術振興機構さきがけ  
PRESTO, Japan Science and Technology Agency

†3 株式会社富士通研究所  
Fujitsu Laboratories Ltd.

\*1 現在, 株式会社ケイ・オプティコム  
Presently with K-opticom Corporation

の有無のみを出力する一般的で安価なセンサであり、蛍光灯に設置されているものを2次的に利用するため少数のセンサでも稼働するシステムを想定している。ある時点にある場所で未知のユーザが移動しているという情報のみから複数人が同時に移動するような状況で、各ユーザの移動情報を推定する。

以下、2章で関連研究を紹介し、3章で想定環境について述べ、4章で提案手法について説明し、5章で評価実験とその考察を示し、6章で本研究をまとめる。

## 2. 関連研究

センサを用いた人物移動検出手法はこれまでに複数行われており、カメラ画像を用いた人物検出手法では取得できる情報量の多さから人物や異常者、動線などを高精度で検出できる。カメラを用いたシステムの目的は主に外部からの侵入者の検知や工場での労働者の監視などであり、住宅内の住人に対しては常に監視されている感覚を与え、プライバシー保持の面でも望ましくない<sup>2)</sup>。また、RFID 端末を用いて移動箇所やモノのタグに接触することで移動情報を取得する手法が提案されている<sup>3)</sup>。接触を忘れない限り移動経路と移動人物を確実に検出できるのが特徴であり、オフィスなどで部屋の入退室用の鍵としてICカードを利用している環境であれば容易に適用可能であるが、住宅内では住人がデバイスを常時身につけ、移動時に毎回機器とのインタラクションをしなければならないという制約は厳しい。さらに、慣性センサを用いたデッドレコニングによる移動推定手法も存在する<sup>4)</sup>。これは屋外で建物や樹木の影、地下に入ってGPSが位置情報を取得できないときに補完的に用いられるものであり、基本的に歩行や停止など想定する行動が制限されている。住宅のようにその場での方向転換など細かな動作が多く、移動範囲も狭い環境では誤差が大きくなると考えられ、さらにセンサを決まった箇所に決まった方向で常に装着しなければならず現実的には適用困難である。

ユーザは一切のデバイスをもたずに、環境に設置したセンサから得られる情報から位置や移動を推定する手法も提案されている。特殊なデバイスを用いている例としては、HVAC (Central heating, ventilation, and air conditioning) と呼ばれる家庭内の空調を一括管理するシステムのエアフィルタに気圧センサを設置して部屋移動やドア開閉時に生じる圧力差を利用した移動検出手法が提案されている<sup>5)</sup>。このシステムではエアフィルタ1か所だけにセンサを設置するだけで住宅内の移動を検出でき、導入や維持が容易であるという特徴があるが、移動検出の精度は65%程度と低く、部屋の形状にも大きく依存する。また、HVACの普及率は1997年時点でアメリカやカナダで約66%、欧州やオーストラリアで55%であ

り現在も増加中であるが、住宅が比較的小さい日本や韓国では普及していない。住宅が小さい場合はセンサを分散的に設置する手法が有効であると考えられる。

安価なセンサを複数配置する手法としては、Wrenらが赤外線人感センサを大量に設置したオフィス内の人物動作検出を行っている<sup>6)</sup>。センサを数メートル間隔で格子状に配置し、隣接するセンサノードの反応順序から直進移動や方向転換、2人の交差などを検出している。しかし、設置するセンサ数が数百個と多く、設置や維持コストが高い。一方、Wilsonらは天井に設置した赤外線人感センサやドアに設置した接触センサを用いた複数人の移動検出手法を提案している<sup>7)</sup>。人感センサは1部屋に1個程度、接触センサは全ての部屋のドアに設置しており設置個数は少数であり現実的であるが、接触センサは移動検出が主目的であり、一般的に住宅には設置されていないため追加的に設置しなければならない。筆者らは既に別の目的のために屋内に設置されているセンサを二次的に利用し、追加的なセンサの設置を最小限にして住人の移動検出を行うことを目的としており、本研究では照明の制御のために既に設置されている人感センサのみを用いる。

また、従来研究ではページアンネットワークやパーティクルフィルタなどの確率ベースの手法<sup>8)</sup>が用いられているが、これらは事前に生活して大量のデータを収集し、正解の移動情報を付与しなければならない。家の間取りは家によってさまざまであり、他の家のモデルを利用することはできない。実際に対象とする家のデータを採取するには複数人が生活しているとデータの分離が困難であるため、住人が1人で移動情報を記録しながら数日間生活する必要がある<sup>7)</sup>。建築後に家主に引き渡す前にシステム構築者がデータ収集できるが、家主が住む前に他人が数日間生活することは考えにくい。そのため、本研究では学習データとして実際のデータを用いずに移動情報の検出を試みる。

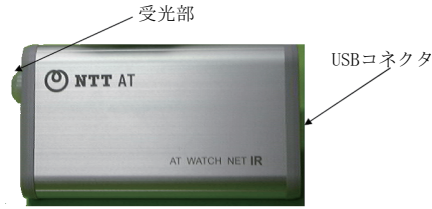
## 3. 想定環境

本稿において提案手法を適用するために用意した実験用家屋は2階建て一軒家4LDKで、12部屋で構成される。1階には玄関、リビング、台所、洗面所、浴室、和室、便所(1階便所)、2階には洋室2部屋(洋室1、洋室2)、主寝室、予備室、便所(2階便所)がある。本研究では便宜上便所や洗面台も部屋と定義する。浴室以外の各部屋には少なくとも1個のセンサが配置されている。部屋以外の設置箇所は1階ホール、1階廊下、1階側階段、2階側階段、2階廊下である。建物内にセンサは合計25個設置されている。センサの設置の様子および外観を図1に示す。

人感センサはNTTアドバンスドテクノロジー株式会社製SN-MP13を使用した。センサの



(a) センサ設置の様子



(b) センサ外観

図 1 人感センサ  
Fig. 1 Passive IR sensor.

仕様を表 1 に示す。各センサは図 2 に示すようにセンサコントローラを介して住宅内にあるサーバに接続されている。センサは 500 ミリ秒おきにセンシングし、センサコントローラに情報を通知する。センサコントローラは人物の在・不在判定を行い、前回サーバに通知した状態と異なる状態が 1 秒間 (2 サンプル) 続けばサーバに現在の状態を通知する。センサの検出範囲内に動いている物体が現れると「Found」、その後範囲内から動いている物体が消えると「NotFound」が検出時刻および反応したセンサ ID とともにサーバに通知される。ただし、「Found」および「NotFound」は人の有無でなく、範囲内の移動物体の有無であり、人が存在していても動いていない場合は「NotFound」が出力される場合がある。そのため本研究では「Found」の情報のみを利用する。また、検出範囲外を移動したためにセンサが反応しない場合や隣接するセンサの検出範囲に入ったために誤反応する可能性がある。さらに、センサは移動物体の有無のみを検出するため、人物が誰であるかを直接検出することはできない。そのため、複数の住人が同時に移動する場合、サーバが受信したセンシングデー

表 1 センサの仕様  
Table 1 Sensor specifications.

検出距離	最大 5m
検出範囲	水平方向 38°
	垂直方向 22°
検出ゾーン数	24 個
価格	5,900 円 (税込)

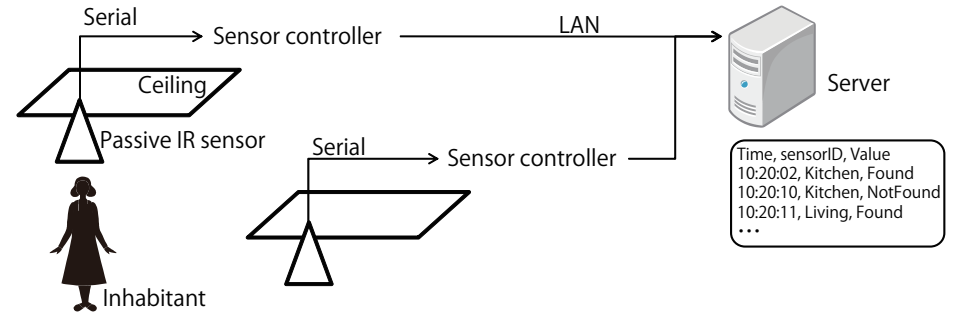


図 2 センサの構成  
Fig. 2 Sensor configuration.

タに複数の移動から発生するデータが混在する。これらの理由により、単純に反応したセンサが設置されている場所を接続して移動経路を検出することは困難である。住宅内では住人は自由に活動するため、同時刻に別の場所を移動、住人同士の交差、移動経路の重複、出発地や目的地の重複などが考えられるため、このような移動も検出しなければならない。ただし簡単のため、住人は異なる 2 部屋間の移動のみを行うとする。便所を出て廊下で長時間静止したり、リビングを出て何かを思い出して再びリビングに戻るような移動は考えない。

#### 4. 提案手法

本章ではサーバが受信したセンサ列から移動情報を推定する手法を述べる。温度や加速度などの物理量を計測するセンサと異なり、本研究で扱う人感センサは得られるデータが異なる。前者はある特定のセンサ値が周囲の環境に応じて変化し、その変化を見ることで環境の変化や異常を検知できる。一方、後者は特定のセンサが出力する値は 2 値で、人の移動に応じて変化するのは反応するセンサの ID である。そのため、一般的な物理センサを用いた認

識で用いられているようなセンシング値の変化量などの特徴量を抽出して SVM<sup>9)</sup> や K-NN などの認識アルゴリズムをそのまま適用することはできない。そこで本研究ではセンサの出力値ではなくセンサの ID のみに着目する。また、本研究では可能な限りセンサを疎に配置するため、一度に反応するセンサの数も数個と少なく、隣接するセンサの反応順序などから直接「誰がどのような移動を行っているか」を推測することは困難である。そこで、本研究ではセンサの ID 列から移動情報を検出し、その後移動情報を結合して動線検出を行うボトムアップでのアプローチを試みる。

移動情報を機器の制御などに用いる場合にはリアルタイムで処理しなければならないが、生活パターンを就寝後に解析して知識化するような場合は一日のデータをオフラインで処理する方法も有効であるため、本研究では、オフラインでの処理を考える。オンラインでの処理は今後の予定である。オフライン処理では全てのセンシングデータが与えられている状態で処理を行うため、オンライン処理よりも精度の良い結果が得られると考えられる。

#### 4.1 移動情報検出

提案手法では図 3 に示すように、センサ ID を 1 つの文字とし、サーバで受信したセンサ信号列を文字列に変換する。得られたセンサ ID 列の全ての時点においてその時点から過去  $W$  秒までに出力された部分 ID 列と全ての正解データとの一致率を計算し、最も一致率の高い移動と時刻を探索する。その一致率が閾値以上であれば移動情報を出力し対応する文字をオリジナルのセンシングデータから削除する。その後、再び全ての時点全ての正解データに対して一致率を計算し、最大の一致率が閾値以下になるまで繰り返す。これにより最も正解のパターンに一致する部分から検出できる。ただし、閾値を上回る一致率の移動が複数ある場合は、一致率が最も高い移動のうち正解データ長が最も長いものを選択する。正解データ長も同じ移動が複数ある場合は時刻が最も若いものを選択する。

具体的な一致率の計算方法を述べる。各文字はタイムスタンプを保持しており、ある時刻  $T = t$  においてウィンドウと呼ばれる  $T = t - W$  から  $T = t$  までに出力された文字列を抽出する。考えられる 2 部屋間の移動とその際に出力されるセンサ ID の文字列 (正解データ) を事前に保持しておき、ウィンドウ内の文字列と全ての正解データで一致度を計算する。一致度の計算には以下に示す DP マッチングを応用した手法を用いる。長さ  $m$  と  $n$  の文字列  $X = (x_1, \dots, x_m)$  と  $Y = (y_1, \dots, y_n)$  を比較する際、 $m \times n$  行列  $d_{ij}$  を定義する。ただし、 $x_i = y_i$  であれば  $d_{ij} = 0$  で、 $x_i \neq y_i$  であれば  $d_{ij} = 1$  である。次に  $X$  および  $Y$  のインデックスのペアから成るパス  $P = (p_1, \dots, p_k)$  を以下の手順で探索する。

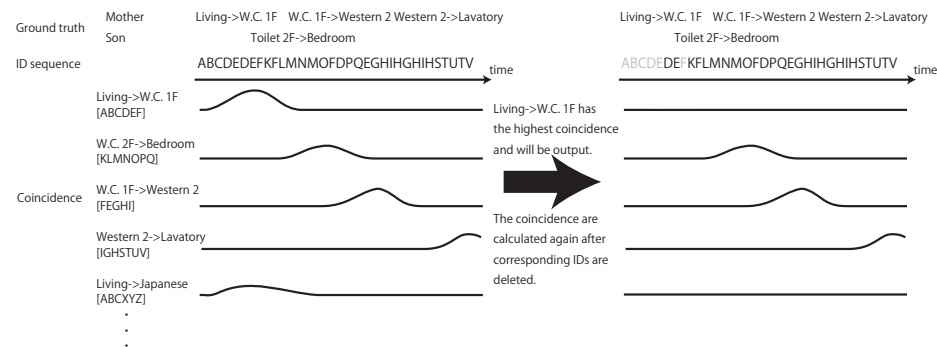


図 3 移動検出  
Fig. 3 Movement detection.

#### (1) Initialization:

$$\begin{aligned} Cost(0, 0) &= 0 \\ Cost(i, 0) &= \infty \text{ for } i = 1, \dots, m \\ Cost(0, j) &= \infty \text{ for } j = 1, \dots, n \end{aligned}$$

#### (2) Cost calculation:

Do for  $i = 1, 2, \dots, m$   
Do for  $j = 1, 2, \dots, n$

$$Cost(i, j) = d(x_i, y_j) + \min \begin{cases} Cost(i-1, j-1) \\ Cost(i-1, j) \\ Cost(i, j-1) \end{cases}$$

#### (3) Lowest-cost path search:

$k = 0, i = m, j = n, p_k = (i, j)$

While  $i \neq 1 \&\& j \neq 1$ :

if  $Cost(i-1, j-1) < Cost(i-1, j) \&\& Cost(i-1, j-1) < Cost(i, j-1)$

$i--, j--, k++, p_k = (i, j)$

else if  $Cost(i-1, j) < Cost(i, j-1)$

$i--, k++, p_k = (i, j)$

else

$$j--, k++, p_k = (i, j)$$

#### (4) Output:

Return  $P$

このように(2)で全てのパスに対してコストを計算した後、(3)で  $Cost(m, n)$  から  $Cost(1, 1)$  まで最小のコストを示す経路を辿ることで文字列  $X$  と  $Y$  が最も一致する経路を探索し、その経路上で  $x_i$  と  $y_i$  を比較することでウィンドウ内の文字列のうち正解データと一致する文字を発見する。正解データの文字列のうちウィンドウに含まれていた文字の割合を一致率として算出する。正解データの文字列長が 10 であるとき、その文字列すべてが順序の入れ替わりがなくウィンドウに出現する場合は一致率は 1 となり、5 文字しか一致しない場合は一致率は 0.5 となる。

このようにしてサーバで受信した ID 列の全ての時刻において全ての正解データとの一致率を計算し図 3 に示す操作を繰り返す。移動情報を出力して対応する文字列をオリジナルのセンシングデータから削除することで、一度検出された移動が再び検出されることを防ぐ。また、複数の住人が同時に移動した場合でも、異なる移動に対応する ID 列は互いに削除されないため全ての移動を検出できる。

#### 4.2 動線検出

移動情報検出によって移動情報  $M = (m_1, \dots, m_l, \dots, m_L)$  が検出される。ただし、 $L$  は検出された移動情報数、 $m_l = (t_l, o_l, d_l)$  は移動情報で、 $t$  は検出時刻、 $o$  は出発部屋、 $d$  は到着部屋である。この移動情報には移動人物の情報は含まれていないため、複数人が住宅内に存在する場合は移動を住人に割り当てて動線を検出しなければならない。

本研究では検出された移動情報は閾値ベースで確度の高いものから選ばれたものであるため基本的に正しいものとして各住人の現在位置に基づいて移動情報を割り当てる。ただし簡単のため、各住人の初期位置および人数は既知とし、人数は途中で変化しないものとする。住人が 1 人の場合は、得られた移動情報の持ち主はその住人であるため、連結すれば動線が得られる。 $T = t(< t_l)$  の時点で部屋 A において、 $m_l = (t_l, B, C)$  の移動情報が得られた場合は、A から B への移動が何らかの理由によって検出されなかったとし、 $A \rightarrow B \rightarrow C$  と移動したとする。

しかし、住人が 2 人以上の場合は、移動情報が誰のものかを考慮して連結しなければならない。本研究では住人の部屋存在確率分布や移動遷移確率などの事前知識は用いないため、移動情報が得られた時刻までの位置情報から判断する。具体的には図 4 に示すような木を

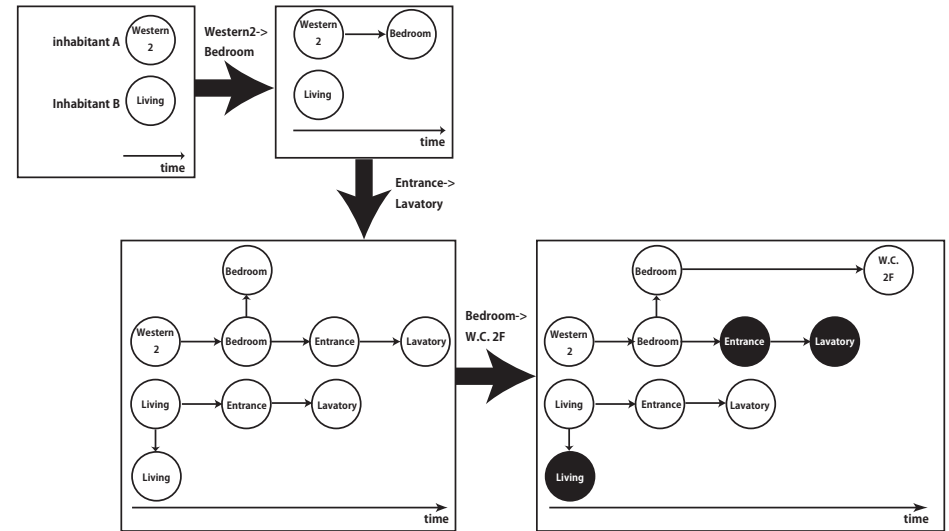


図 4 動線検出処理  
Fig. 4 Flow detection.

生成する。時刻  $T = t(< t_l)$  において住人 A が洋室 2 にいて、住人 B がリビングにいる場合、 $m_l = (t_l, \text{洋室 2}, \text{主寝室})$  の移動情報が検出されたとする、現在位置が洋室 2 である住人 A に連結する。ここで、 $m_{l+1} = (t_{l+1}, \text{玄関}, \text{洗面所})$  の移動情報が検出されたとする、現在玄関にいる住人はおらずどちらの移動情報から不明のため、図のように現在位置を葉として複製し、オリジナルの現在位置に移動情報を連結する。その後、 $m_{l+2} = (t_{l+2}, \text{主寝室}, \text{2階便所})$  の移動情報が検出されると、住人 A の主寝室の葉に連結し、もう一方の枝から先を削除して住人 B のものとする。そのため住人 B のリビングの葉も削除する。このようにして  $l = 1$  から  $L$  までの移動情報をもとに各住人の動線を検出する。

## 5. 評価

評価で用いるデータは、3 章で紹介した 2 階建ての住宅において収集した。本研究では住人が 1 人の場合と 2 人の場合で評価を行う。1 人の場合は表 2 に示すように浴室を除く 11 部屋間の可能な全ての移動を含む経路を移動した。ただし、リビングから移動する場合、直接 1 階廊下に出る経路と台所を経由する経路があるため、リビングを起点あるいは終点と

表 2 1 人移動時のシナリオ  
Table 2 Scenario for one person

玄関	→	リビング	→	玄関	→	台所	→	玄関	→	和室	→
玄関	→	洗面所	→	玄関	→	洗面所	→	玄関	→	1 階便所	→
玄関	→	洋室 1	→	玄関	→	洋室 2	→	玄関	→	主寝室	→
玄関	→	予備室	→	玄関	→	2 階便所	→	玄関	→	台所	→
リビング	→	1 階便所	→	リビング	→	和室	→	リビング	→	洗面所	→
リビング	→	洗面所	→	リビング	→	洋室 1	→	リビング	→	洋室 2	→
リビング	→	主寝室	→	リビング	→	2 階便所	→	リビング	→	予備室	→
リビング	→	台所	→	1 階便所	→	台所	→	和室	→	台所	→
洗面所	→	台所	→	洗面所	→	台所	→	洋室 1	→	台所	→
洋室 2	→	台所	→	主寝室	→	台所	→	2 階便所	→	台所	→
予備室	→	台所	→	1 階便所	→	和室	→	1 階便所	→	洗面所	→
1 階便所	→	洗面所	→	1 階便所	→	洋室 1	→	1 階便所	→	洋室 2	→
1 階便所	→	主寝室	→	1 階便所	→	2 階便所	→	1 階便所	→	予備室	→
1 階便所	→	和室	→	洗面所	→	和室	→	洗面所	→	和室	→
洋室 1	→	和室	→	洋室 2	→	和室	→	主寝室	→	和室	→
2 階便所	→	和室	→	予備室	→	和室	→				

表 3 2 人移動時のシナリオ  
Table 3 Scenario for two persons

	出発時刻	出発部屋	到着時刻	到着部屋
	15:46:54	洋室 2	15:47:05	主寝室
	15:47:54	主寝室	15:48:09	2 階便所
	15:49:54	2 階便所	15:50:13	1 階便所
	15:50:54	1 階便所	15:51:04	洗面所
	15:51:34	洗面所	15:51:46	和室
住人 A	15:52:14	和室	15:52:31	玄関
	15:52:54	玄関	15:53:07	台所
	15:53:34	台所	15:53:54	洋室 2
	15:54:29	洋室 2	15:54:36	洋室 1
	15:54:54	洋室 1	15:55:05	予備室
	15:55:29	予備室	15:55:52	リビング
	15:56:29	リビング	15:56:51	主寝室
	15:47:54	リビング	15:48:05	洗面所
	15:48:54	洗面所	15:49:15	主寝室
	15:50:24	主寝室	15:50:34	予備室
	15:51:24	予備室	15:51:36	洋室 2
住人 B	15:52:24	洋室 2	15:52:34	2 階便所
	15:53:24	2 階便所	15:53:36	洋室 2
	15:54:24	洋室 2	15:54:39	リビング
	15:55:24	リビング	15:55:31	台所
	15:56:24	台所	15:56:36	和室

するすべての移動は 2 通り採取した. 2 人の場合は表 3 に示すように 2 人の住人が各自の判断で自由に 10 分程度住宅内を移動した. 自由に移動したため, すれ違いや同じ部屋に 2 人がいる場面もある.

移動とセンサ ID 列の関係を示す学習データは事前に手作業によって作成した. 具体的には始点と終点を結ぶ経路上に存在するセンサが順番に反応するとして全ての移動のデータを生成した. 部屋には複数のセンサが設置されているため, 部屋の反応するセンサは全ての組合せを含めた. 例えばリビングは 4 個のセンサが設置されているため  $2^4 - 1 = 15$  通りである. このようにして事前に作成した学習データを用いて移動検出および動線検出処理を行い検出精度を評価する. センシングデータを切り取るウィンドウサイズ  $W$  は 25 秒とした. これは一回の移動にかかる時間が最長 25 秒であったためである. ここで, 移動が正しく検出されたかの判断基準について述べる. データ収集時に記録した移動開始および終了時刻に基づき, 移動終了後 25 秒以内に正しい移動が検出された場合のみ正解とし, それ以外の検出結果は不正解とする. 動線が正しく検出されたかの判断については, ある部屋に移動終了後 25 秒以内にその部屋に移動したと検出された場合のみ正解とする.

移動検出および動線検出の Recall, Precision, F 値を表 4 に示す. 移動検出の結果より一致率の閾値を下げるにつれて判定結果の出力回数が増えるため Recall が上昇し, Precision が低下している. 住人が 1 人の場合は閾値 0.8 で最大の F 値 0.635, 住人が 2 人の場合は

閾値 0.7 で最大の F 値 0.390 が得られた.

さらに検出された移動情報を接続することで滞在していた部屋の遷移情報である動線を検出する. 結果より, 1 人の場合は閾値 0.8 で最大の F 値 0.730 を得た. 動線検出の精度が移動情報の精度を上回っている理由は, 移動情報は始点と終点が一貫していなければ正解とみなしていないが, 動線では滞在している部屋のみ注目しているためである. つまりリビングから和室に移動した際に, 検出結果がリビング→台所, 台所→和室であった場合, 動線は両方とも不正解であるが, 移動経路はリビング→台所→和室となるため, リビングと和室は正しく検出されるためである. 一方, 住人が 2 人の場合はいずれの閾値においても F 値が 0.5 を下回っており, その際の移動情報を用いて動線検出を行ったとしても正しく接続されず両住人の動線が同一かつ多数の可能性を含むものとなるため評価が困難である.

そこで, 手動で作成した学習データではなく, 評価で用いた移動住人が 1 人の場合のデータを学習データとして用いて移動検出および動線検出を行った. 住人が 1 人の場合は評価

表 4 動線検出精度結果

Table 4 Results of movement detection.

人数	閾値	移動検出				動線検出			
		Recall	Precision	F 値	移動数	Recall	Precision	F 値	部屋数
1 人	1.0	0.421	0.577	0.487	111	0.713	0.665	0.688	175
	0.9	0.421	0.577	0.487	111	0.713	0.665	0.688	175
	0.8	0.625	0.646	0.635	147	0.823	0.640	0.730	210
	0.7	0.625	0.638	0.631	149	0.823	0.634	0.716	212
	0.6	0.743	0.496	0.595	228	0.957	0.456	0.618	343
2 人	1.0	0.190	0.308	0.235	13	移動情報の精度が低いため動線が確定不能			
	0.9	0.190	0.308	0.235	13				
	0.8	0.333	0.412	0.368	17				
	0.7	0.381	0.400	0.390	20				
	0.6	0.524	0.262	0.349	42				

データと正解データが同一であるため Recall, Precision, F 値ともに 1 となり, シナリオと同じ移動情報を検出した. それによって検出した動線の精度もシナリオと完全に一致した. 次に, 住人が 2 人の場合の移動検出の結果は閾値 0.7 で最大の F 値 0.550 となり, 開始時に住人 A は洋室 2 に, 住人 B はリビングにいる情報は既知であるとして動線を検出すると表 5 に示す動線が得られた. ここで, 表 3 に示すシナリオでは住人 A は 15:53:54 に洋室 1 に到着し, 住人 B は 15:53:36 に同じく洋室 1 に到着しておりその後 2 分程度同室していることが分かる. そのため両住人の動線は洋室 2 に到着したところまで検出されているが, その後検出された 2 本の動線 A および B がどちらのものであるかは不明となった. 正しくは住人 A の動線の続きは動線 B で, 住人 B の動線の続きは動線 A であり, 正しく動線が接続された場合の精度の結果は住人 A は Recall=0.667, Precision=0.500, F 値=0.572, 住人 B は Recall=0.889, Precision=0.615, F 値=0.727 となった. このことから, 動線検出において途中で移動情報が正しく検出されなくなったり, 住人が同時に同じ場所にどどまった場合, それ以降の動線を接続するには外部からによる住人の正しい位置情報か, 各住人の住宅内の移動に関する事前知識が必要であることが分かった. このような現象は既存研究でも確認されており, 帰宅時や外出時に鍵の認証を行って移動体情報を取得したり, 寝室など利用者が限定される部屋に入った時点で人物を特定するなどの方法で対処している<sup>7)</sup>. また, 手作業で作成した人工的な正解データを用いた場合の検出精度が低いことから, センサは人の移動に対して順序どおりに反応しないため, 少量の実データを学習データとして利用する必要があることが分かった.

表 5 動線検出結果

Table 5 Results of movement detection.

住人 A	洋室 2	→	主寝室	→	2 階便所	→	1 階便所	→	和室	→
	玄関	→	台所	→	玄関	→	1 階便所	→	洋室 2	
住人 B	リビング	→	玄関	→	洗面所	→	主寝室	→	予備室	→
	洋室 2	→	2 階便所	→	1 階便所	→	洋室 2	→		
動線 A	洋室 2	→	2 階便所	→	台所	→	和室			
動線 B	洋室 2	→	洋室 1	→	予備室	→	和室	→	台所	→
	和室									

## 6. まとめ

本研究では住宅に設置された人感センサを用いて住人の移動推定を行う手法を提案した. 評価では 2 階建て 4LDK の実験用住宅で収集したデータを用いて 1 人および 2 人の移動情報を抽出し, 1 人では F 値で 0.635 の精度で移動情報を抽出し, F 値で 0.730 で滞在した部屋を特定した. 2 人では F 値 0.550 で移動情報を抽出し, 平均 F 値 0.650 で滞在した部屋を特定した. 本研究では, 既に蛍光灯の ON/OFF 制御に用いられる人感センサを二次的にするような環境を想定しており, 移動情報を抽出するためだけに設置するデバイスは移動判定を行うサーバおよびケーブル以外一切なく, 住人は一切の機器を把持したり身につける必要はない.

移動情報を検出するための学習データとして移動情報と反応するセンサ ID 列を用いた. 学習データは経路上に存在するセンサが全て通る順序に反応するという想定で手作業で作成したものと, 実際に移動して反応したデータを用いたが, 実際に反応するセンサの順序は必ずしも通った順序でなく, 経路上にない近隣のセンサが反応することがあるため, 手作業で作成した学習データでは検出精度が劣った. また, 人感センサが疎であるため, センサの未反応や誤反応が検出精度に与える影響が大きい. このことから, 学習データには実際の移動でのセンサの振る舞いを考慮しなければならないことが分かった. また, 複数の住人が同時に一か所に存在した場合, それ以降に出力される移動情報が誰のものであるかを判断するには住人毎の部屋存在確率分布や部屋間移動遷移確率など追加の情報が必要である.

住人の移動情報を得ることで, 家電機器の高度な制御や予測的な制御による電力消費の削減, 家庭内での互いの位置情報共有の実現が期待される. 現在は住宅内に蛍光灯と同じ程度の数の人感センサを配置しているが, 便所や洗面所などを除いては全ての蛍光灯に人感センサを設置することは一般的でなく導入や維持の面からも現実的ではないため, 必要最小限の



センサ配置について研究を行う予定である。また、人感センサ以外にも既に家庭内に存在するようなデバイスがあれば積極的に利用することを考えている。

**謝辞** 本研究の一部は、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業(さきがけ)および文部科学省科学研究費補助金基盤研究(A)(20240009, 23240010)によるものである。ここに記して謝意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) 青木忠一, “IT によるエネルギー消費の動向と IT 利用によるエネルギー削減,” 電子情報通信学会会誌, Vol. 90, No. 3, pp. 170–175 (2007).
- 2) 神尾 崇, “画像認識を応用した高度映像セキュリティシステム,” パナソニック技報, Vol. 54, No. 4, pp. 13–17 (2009).
- 3) 楓 仁志, 山原裕之, 野口豊司, 島田幸廣, 島川博光, “接触物体から個人の行動を認識するための確率的手法,” 情報処理学会論文誌, Vol. 48, No. 3, pp. 1479–1490 (2007).
- 4) 上坂大輔, 村松茂樹, 岩本健嗣, 横山浩之, “手に保持されたセンサを用いた歩行者向けデッドレコニング手法の提案,” 情報処理学会論文誌, Vol. 52, No. 2, pp. 558–570 (2011).
- 5) Patel, S. N., Reynolds, M. S., and Abowd, G. D., “Detecting Human Movement by Differential Air Pressure Sensing in HVAC System Ductwork: An Exploration in Infrastructure Mediated Sensing,” in *Proceedings of International Conference on Pervasive Computing (Pervasive 2008)*, pp. 1–18 (2008).
- 6) Wren, C. R. and Munguia-Tapia, E., “Toward Scalable Activity Recognition for Sensor Networks,” in *Proceedings of the International Workshop in Location and Context-Awareness (LoCA 2006)*, pp. 168–185 (2006).
- 7) Wilson, D. H. and Atkeson, C. G., “Simultaneous Tracking and Activity Recognition (STAR) Using Many Anonymous, Binary Sensors,” in *Proceedings of International Conference on Pervasive Computing (Pervasive 2005)*, pp. 62–79 (2005).
- 8) Doucet, A., Freitas de, N., and Gordon, N., “Sequential Monte Carlo Methods in Practice,” Springer (2001).
- 9) Vapnik, V., “The Nature of Statistical Learning Theory,” Springer (1995).