

# 疎に配置された赤外線人感センサを用いた 住宅内人物移動推定

村尾 和哉<sup>1</sup> 寺田 努<sup>2,3</sup> 矢野 愛<sup>4</sup> 松倉 隆一<sup>4</sup>

**概要:** 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において、人の存在あるいは人の移動を検出することで入退室情報の取得や位置推定を行い、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などのタグを用いる手法が提案されているが、家庭などで移動推定のために部屋間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。人がデバイスを保持しない例として、環境設置型カメラによる画像認識処理を用いる方法が存在するが、人の移動を追うには環境内に至る所にカメラを設置しなければならず設置コストが高く、また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。本研究では照明制御などを目的として既に多くの環境で設置されている赤外線人感センサを利用して、家庭内における住人の移動推定を行う。本研究で想定している赤外線センサの密度は一般的な天井照明と同程度 ( $5m^2/sensor$ ) で、センシング領域に死角がある疎な環境である。提案手法で得られる住人の移動情報を利用することで、家電の効率的な制御や予測制御が実現できる。

## 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 [1]。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ぬ無駄な電力が生じる。離席時にテレビの電源を切ることもできるが、衛星放送チューナの電源を同じように切ると、

戻ってきた時の起動に時間を要する。このように、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、既に天井照明の制御など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、移動人物および移動経路を推定する手法を提案する。赤外線センサを利用する利点としては、1) 赤外線人感センサは比較的安価 ( $\approx 3USD$ ) である、2) 赤外線人感センサは既に多くの住宅やオフィスに導入されている、3) 赤外線センサは在/不在の情報のみを取得するためプライバシーを侵害しない、の3点が挙げられる。

提案手法では赤外線人感センサから得られる、時刻、場所、在/不在情報のみから複数人が同時に移動するような状況で、各住人の移動経路を推定する。本研究で使用する赤外線人感センサは、天井照明の制御のために設置されているものを2次的に利用し、密度は一般的な天井照明の密度と同等 ( $5m^2/sensor$ ) の比較的疎なものを想定している。また、提案手法ではフロアマップから移動可能経路を

<sup>1</sup> 立命館大学情報理工学部  
<sup>2</sup> 神戸大学大学院工学研究科  
<sup>3</sup> 科学技術振興機構さきかけ  
<sup>4</sup> 株式会社富士通研究所

作成することで、事前のトレーニングデータの収集は不要である。

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[2]。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[3]。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[4]。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[5]。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[6]。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[7]。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、従来研究ではベイ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[8]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[7]。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個の赤外線人感センサが配置されている。部屋以外の箇所では1階ホール、1階廊下、1階側階段、2階側階段、2階廊下に赤外線人感センサが設置されており、住宅内に合計25個のセンサが設置されている。部屋の間取りおよびセンサ設置箇所を図1に、センサの設置の様子および外観を図2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。センサの仕様を表1に示す。各センサは図3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ミリ秒毎にセンシングし、センサコントローラにセンサ値を送信する。センサコントローラは人物の在・不在判定を行い、サーバに通知した直近の状態と異なる状態が1秒間(2サ

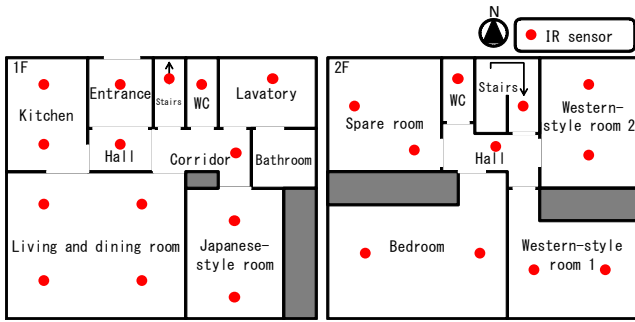
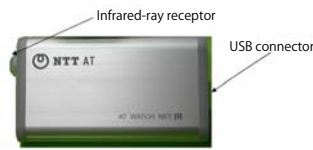


図 1 実験家屋の間取りとセンサ設置箇所（灰色部分はクローゼットおよび物置きであり，人は入らない）



(a) センサ設置の様子



(b) センサ外観

図 2 赤外線人感センサ

ンプル) 継続すれば，サーバに現在の状態を通知する．具体的には，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．

ここで，赤外線人感センサの特性について簡単に説明する．赤外線人感センサは物体が放射する赤外線を検出する受動型とセンサが赤外線を放射してその反射を検出する能動型があるが，本研究で用いるセンサは安価で，一般的に天井照明の制御に用いられている受動型である．赤外線センサは検出範囲内の赤外線の変化を検出するため，人が存在していても寝ていたり，座ったまま動いていないと「NotFound」が出力されることが頻繁に発生する．そのため本研究では「Found」の情報のみを利用する．また，検出範囲ぎりぎり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体の一部が入ったために誤反応する場合がある．さらに，センサが検出できるのは移動物体の有無のみであり，移動人物を直接的に検出することはできない．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タには複数の移動のセンサデータが混在する．他にも，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，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．

#### 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経路および移動人物を推定する手法を述べる．一般的にセンシングデータから検出や認識処理を行う場合，センサ値を入力と

表 1 センサの仕様

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)

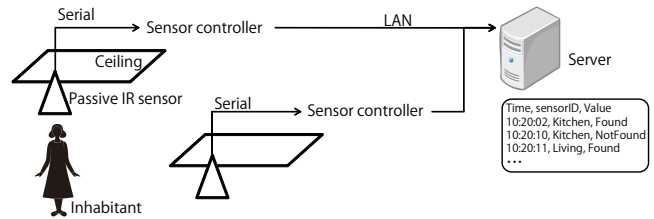


図 3 センサの構成

して SVM[9] や K-NN などの機械学習アルゴリズムを適用することが多いが，人感センサが出力する値は在・不在の 2 値であり，移動経路の違いによって特定のセンサの出力パターンが変化するものではない．移動経路によって異なるのは反応するセンサの ID であるため，本研究ではセンサの出力値ではなく反応したセンサの ID のみに着目する．また，本研究ではセンサの配置は疎であるため，移動途中などで移動人物がどのセンサの検出範囲にも存在しないことがある．また，未反応や誤反応も一定量含まれるため，反応したセンサを繋げることで移動経路とすることは困難である．

提案手法は 2 段階の処理から構成されており，まずセンサの ID 列から部屋間の移動情報を検出する．その後，部屋間の移動情報を結合して移動経路推定を行う．また，本論文で述べる提案手法はオフライン処理であるが，容易にオンラインで処理へ適用できる．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 部屋間移動検出

提案手法では図 4 に示すように，センサ ID をユニークな文字とすることで，サーバで受信したセンサ ID 列を文字列に変換する．図の例では母と子が移動しており，移動が時間軸上で重複している．このとき，各移動によって反応するセンサ ID は，サーバ側ではどちらの移動由来か判断できず，まとめてタイムスタンプ順に並べられる．

部屋間移動検出では，時刻  $t$  において過去  $W$  秒間に出力された ID 列と正解データとの一致率を計算する．正解データは正しいセンサの ID 列と対応する部屋間移動のラベルの組から構成され，事前に作成しておく．正解データは図 1 に示すようなフロアマップとセンサ設置箇所から部屋間移動経路上のセンサを通過順に並べて機械的に作成する．一致率の計算を時刻 0 から  $T$  まで行い，最も一致率の

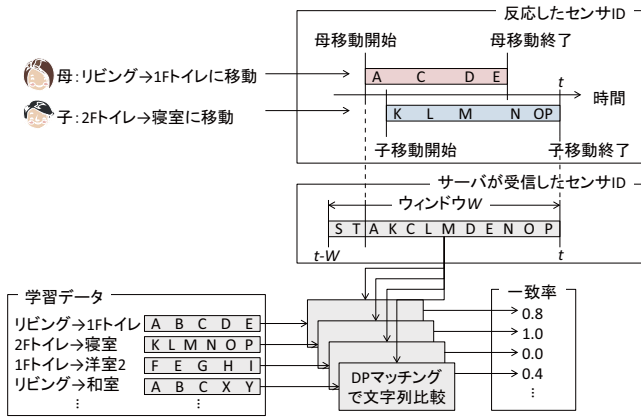


図 4 部屋間移動検出アルゴリズム

高い移動と時刻を探索する。ただし、 $T$  は ID 列の長さとする。一致率が閾値以上であれば該当する部屋間移動情報を出力し、一致した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、再び全ての時刻で一致率を計算し、最大の一一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移動から検出できる。ただし、最大となる一致率の移動が複数ある場合は、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。

一致率の計算方法を具体的に述べる。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、 $x_i = y_j$  であれば  $d_{ij} = 0$  で、 $x_i \neq y_j$  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。

(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  $j = 1, 2, \dots, n$

$$Cost(i, j) = d_{ij} + \min \begin{cases} Cost(i-1, j-1) \\ Cost(i-1, j) \\ Cost(i, j-1) \end{cases}$$

(3) Lowest-cost path search:

$k = 0, i = m, j = n, p_k = (i, j)$   
While  $i \neq 1 \& \& j \neq 1$ :

表 2 部屋間移動情報の例

時刻	移動元	移動先
08:00	Western 1	Living room
08:10	Western 2	Living room
08:16	1F WC	Living room
08:25	Wash	Japanese-style room
⋮	⋮	⋮

```

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)
end

```

(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  $y_j$  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。

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、最大の一一致率をラベルを検出された部屋間移動情報として出力し、一致した文字をオリジナルの ID 列から削除する。この作業を最大の一一致率がしきい値を下回るまで繰り返す。このようにして表 2 に示すような部屋間移動情報を得る。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いでいる。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。

予備実験の結果より、一致率の閾値あ 0.8 の時に部屋間移動検出精度 (F 値) が最大をしめしたため、本論文では一致率の閾値を 0.8 と設定する。

4.2 移動経路抽出

4.1 節で述べた部屋間移動検出によって表 2 に示すような部屋間移動情報  $M_i = (T_i, O_i, D_i) (1 \leq i \leq N_M)$  が得られる。ただし、 $T_i$  は検出時刻 (厳密には、移動先の部屋に到着した時刻)、 $O_i$  は移動元の部屋、 $D_i$  は移動先の部屋、

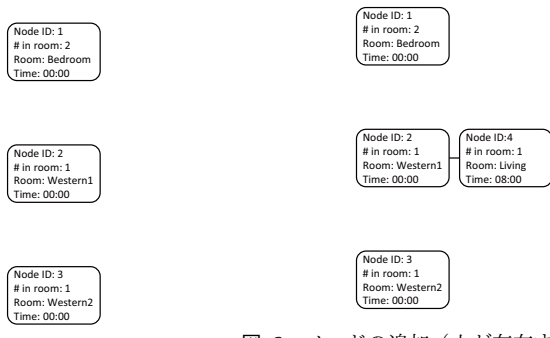


図 5 根の生成

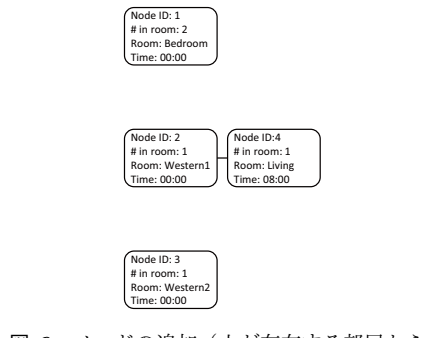


図 6 ノードの追加（人が存在する部屋から、人が存在しない部屋へ移動する場合）

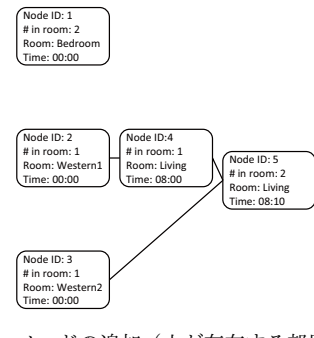


図 7 ノードの追加（人が存在する部屋から、人が存在する部屋へ移動する場合）

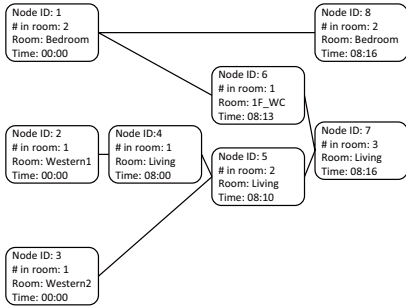


図 8 ノードの追加（人が存在しない部屋から、人が存在する部屋へ移動する場合）

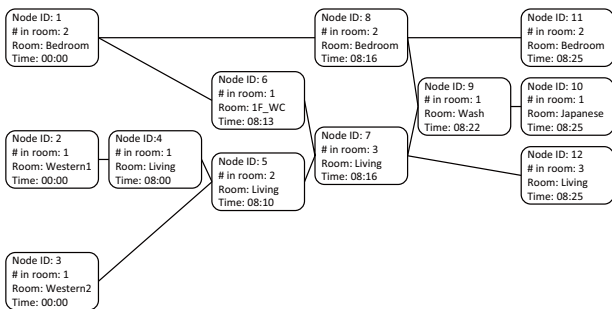


図 9 ノードの追加（人が存在しない部屋から、人が存在しない部屋へ移動する場合）

$N_M$  は検出された部屋間移動の数である。この部屋間移動情報には移動人物の情報は含まれていない。また、赤外線人感センサはセンサの設置されている箇所を人が通過しても反応しない場合があったり、移動せずに部屋の中で動くだけで反応するため、部屋間移動情報には移動したにもかかわらず情報が含まれていないことや、移動していないにもかかわらず情報が含まれていることがある。そのため、部屋間移動情報を移動元の部屋と移動先の部屋で単純に接続するアプローチで移動経路を抽出しようとする、接続できない箇所や人が存在していない部屋から移動してくる場合がある。提案手法では、得られた部屋間移動情報をもとに、ノード  $V_j(Room_j, people_j, Time_j, *Next_j)$  からなる木  $G$  を作成し、その木を網羅的に探索して、各住人に対して尤もらしい移動を抽出する。 $j$  は通し番号、 $Room_j$  は部屋、 $people_j$  は在室人数、 $Time_j$  は到着時刻、 $Next_j$  は子ノードへのポインタ配列である。

ただし、本研究では住人の数は既知であり、また夜は各住人はそれぞれの寝室で就寝しているため住人の移動は各自の寝室を初期配置とする。図 1 に示す住宅における父、母、姉、弟の 4 人家族を例にして、表 2 に示す部屋間移動情報を用いて具体的なアルゴリズムを以下に示す。例では、父、母、姉、弟の寝室（初期配置）をそれぞれ主寝室、主寝室、洋室 1、洋室 2 とする。

### 1) 根の生成

各住人の初期配置を根としてノードを作成する。根は部屋ごとに作成し、同じ部屋を初期配置とする複数の住人がいる場合は、当該ノードの在室人数に人数を格納する。例えば、父、母、姉、弟の寝室（初期配置）をそれぞれ主寝室、主寝室、洋室 1、洋室 2 とすると、図 5 に示すように、主寝室、洋室 1、洋室 2 の 3 つの根が生成され、主寝室のノードの在室人数が 2 となっている。時刻は 00:00 としている。

### 2) ノードの追加

$i = 0$  から  $N_M$  まで順番に  $M_i$  を読み込む。読み込んだ部屋間移動情報は人の存在する部屋からの移動であることが理想的であるが、移動情報の欠落により、移動元の部屋に人が存在しない場合がある。以下に示す、移動元の部屋および移動先の部屋に人が存在する場合と存在しない場合の 4 通りの場合分けでノードの追加を行う。

**2-a)**  $O_i = Room_j$  を満たす葉ノード  $J$  が存在し、 $D_i = Room_j$  を満たす葉ノードが存在しない場合

これは人が存在している部屋から、誰もいない部屋に移動する場合である。この場合は、図 6 に示すように、ノード  $V_{N_v+1}$  を作成し、 $Time_{N_v+1} = T_i$ 、 $Room_{N_v+1} = D_j$ 、 $People_{N_v+1} = 1$  とし、ノード  $J$  の子とするために  $Next_J$  に  $V_{N_v+1}$  へのポインタを追加する。ただし、 $N_v$  は  $M_i$  を読み込んだ時点でのグラフ  $G$  を構成するノード  $V$  の数である。図の例では、図 5 の状態において洋室 1 からリビングへの移動を追加している。

**2-b)**  $O_i = Room_j$  を満たす葉ノード  $J$  および  $D_i = Room_j$  を満たす葉ノード  $J'$  が存在する場合

これは人が存在している部屋から、既に人が存在する部屋に移動する場合である。この場合は、図 7 に示すように、移動後の部屋の状態としてノード  $V_{N_v+1}$  を作成し、 $Time_{N_v+1} =$

$T_i$ ,  $Room_{N_v+1} = D_{J'}$ ,  $People_{N_v+1} = People_{J'} + 1$  とし、ノード  $J$  およびノード  $J'$  の子とするために、 $Next_J$  および  $Next_{J'}$  に  $V_{N_v+1}$  へのポインタを追加する。図の例では、図 6 の状態において洋室 2 からリビングへの移動を追加している。

**2-c)**  $O_i = Room_j$  を満たす葉ノードが存在せず、 $D_i = Room_j$  を満たす葉ノード  $J'$  が存在する場合  
 これは誰も存在しない部屋から、既に人が存在する部屋に移動する場合であり、部屋  $O_i$  へ移動した部屋間移動情報が検出されなかったと推察される。一方、当該部屋間移動情報  $M_i$  が誤りであるということも考えられるため、提案手法では人が存在しているすべての部屋から部屋  $O_i$  を経由して部屋  $D_i$  へ移動する経路および各部屋に存在する人がそのままその部屋にとどまる経路を表現するようにノードを追加する。具体的には、図 8 に示すように、移動先である  $V_{J'}$  を除いて  $Time_j < T_i - 3[min]$  を満たす葉ノードを探索することで人が存在しているすべての部屋を探索し、葉ノードの集合を  $J \in J_k$  とする。 $Time_j < T_i - 3[min]$  を条件としている理由は、部屋  $O_i$  を経由して移動するには少なくとも 3 分程度の時間が必要であると考えたためである。次に、部屋  $O_i$  への移動を補完するために、ノード  $V_{N_v+1}$  を作成し、 $Time_{N_v+1} = T_i - 3[min]$ ,  $Room_{N_v+1} = O_i$ ,  $People_{N_v+1} = 1$  とする。そして、移動後の部屋の状態としてノード  $V_{N_v+2}$  を作成し、 $Time_{N_v+2} = T_i$ ,  $Room_{N_v+2} = D_{J'}$ ,  $People_{N_v+2} = People_{J'} + 1$  とする。そして、ノード  $Next_{N_{Jk}}$  に  $V_{N_v+1}$  へのポインタを追加し、ノード  $Next_{N_v+1}$  に  $V_{N_v+2}$  へのポインタを追加する。最後に、人が移動せずに留まる経路として、各  $Jk$  に対してノード  $V_{N_v+2+k}$  を作成し、 $Time_{N_v+2+k} = T_i$ ,  $Room_{N_v+2+k} = Room_{Jk}$ ,  $People_{N_v+1} = People_{Jk}$  とし、 $Next_{Jk}$  に  $V_{N_v+2+k}$  へのポインタを追加する。図の例では、図 7 の状態において 1 階便所からリビングへの移動を追加している。

**2-d)**  $O_i = Room_j$  を満たす葉ノードおよび  $D_i = Room_j$  を満たす葉ノードが存在しない場合  
 これは誰も存在しない部屋から、誰もいない部屋に移動する場合である。具体的には、図 9 に示すように、2-c) と同様に  $Time_j < T_i - 3[min]$  を満たす葉ノードを探索することで人が存在しているすべての部屋を探索し、葉ノードの集合を  $J \in J_k$  とする。次に、部屋  $O_i$  への移動を補完するために、ノード  $V_{N_v+1}$  を作成し、 $Time_{N_v+1} = T_i - 3[min]$ ,  $Room_{N_v+1} = O_i$ ,  $People_{N_v+1} = 1$  とする。そして、移動後の部屋の状態としてノード  $V_{N_v+2}$  を作成し、 $Time_{N_v+2} = T_i$ ,  $Room_{N_v+2} = D_{J'}$ ,  $People_{N_v+2} = 1$  とする。そして、ノード  $Next_{N_{Jk}}$  に  $V_{N_v+1}$  へのポインタを追加し、ノード  $Next_{N_v+1}$  に  $V_{N_v+2}$  へのポインタを追加する。最後に、人が移動せずに留まる経路として、各  $Jk$  に対してノード  $V_{N_v+2+k}$  を作成し、 $Time_{N_v+2+k} = T_i$ ,

表 3 移動経路の例

#	経路
1	Bedroom
2	Bedroom→Wash→Japanese
3	Bedroom→1F WC→Living→Wash→Japanese
4	Bedroom→1F WC→Living
5	Western 1→Living→Wash→Japanese
6	Western 1→Living
7	Western 2→Living→Wash→Japanese
8	Western 2→Living

表 4 住人ごとのスコアの例

人物	時間帯	加減点	減点
母	朝・夜	寝室	洋室 1, 洋室 2
	昼	寝室, 洋室 1, 洋室 2, 予備室	
父	朝・夜	寝室	洋室 1, 洋室 2
	昼	玄関 (外出)	すべての部屋
姉	朝・夜	洋室 1	寝室, 洋室 2
	昼	玄関 (外出)	すべての部屋
弟	朝・夜	洋室 2	寝室, 洋室 1
	昼	玄関 (外出)	すべての部屋

$Room_{N_v+2+k} = Room_{Jk}$ ,  $People_{N_v+1} = People_{Jk}$  とし、 $Next_{Jk}$  に  $V_{N_v+2+k}$  へのポインタを追加する。図の例では、図 8 の状態において洗面所から和室への移動を追加している。

### 3) グラフの探索

上記手順にしたがって木を作成し、各根から深さ優先探索によって部屋間移動情報から考えられる経路を網羅的に探索できる。図 9 の木からは表 3 に示すように、8 本の移動経路が抽出される。

### 4.3 移動人物推定

抽出される移動経路の候補は生成される木の深さや枝分かれの数に依存するが、通常は膨大な数となるため、抽出された各移動経路を評価し、移動経路の選択および移動人物の推定を行う。しかしながら、事前知識を用いずに移動経路および移動人物を評価することは困難であるため、表 4 に示すような各住人の主な利用部屋を事前に作成することを考える。表 4 の例では、朝・夜は各住人の寝室 (自室) に滞在すると滞在時間に応じたスコアを加点する一方、他人の寝室に滞在するとスコアを減点する。昼の時間帯は父は出勤、姉と弟は学校で不在であるため、玄関に滞在するとスコアを加点する。本研究では玄関への滞在は外出として扱う。一方、不在であることを想定しているため、玄関以外の部屋に滞在するとスコアを減点する。母は昼の時間帯は各部屋を掃除するため、他人の寝室に滞在したときにスコアを加点する。

抽出された経路の 1 つを  $R = r_1, \dots, r_i, \dots, r_{NR}$  とし、 $R$  のスコアは以下の式によって求められる。

表 5 実験シナリオ 1

時刻	父	母	姉	弟
6:00		起床 【1 階トイレ】 【洗面所】 【リビング】		
6:30	起床 【1 階便所】 【リビング】	【台所】 料理 【リビング】	起床 【1 階便所】 【洗面所】 【リビング】	起床 【1 階便所】 【洗面所】 【リビング】
7:00	食事	食事 【台所】 【リビング】	食事	食事
7:30	【寝室】 出勤準備 【玄関】 外出			
8:00			【洋室 1】 登校準備 【玄関】 外出	【洋室 2】 登校準備 【玄関】 外出
8:30		【洗面所】 洗濯機 ON		
9:00		掃除 【すべての部屋】		
9:30		【洗面所】 洗濯物を干す 【リビング】		
11:30		【台所】 料理 【リビング】 食事		
14:30		【玄関】 外出 買い物		

表 6 実験シナリオ 2

15:30		帰宅 【玄関】 【リビング】		帰宅 【玄関】 【リビング】 【洋室 2】
16:00				帰宅 【玄関】 【リビング】 【洋室 1】 【玄関】 外出 塾
16:30				帰宅 【玄関】 【洋室 1】 【リビング】
17:30				【台所】 料理
18:30				帰宅 【玄関】 【リビング】 料理修了 【リビング】 食事 食事
19:00				【洗面所】 風呂 【リビング】
19:30				【台所】 片付け 【リビング】
20:00				【洗面所】 風呂 【リビング】 【洋室 2】
22:30				【洗面所】 風呂 【リビング】 【洋室 1】
23:00				【寝室】 就寝 就寝
23:30				就寝

$$score = \sum_{i=1}^{N_r} (Time_{i+1} - Time_i) * weight(Room_i) \quad (1)$$

ただし、 $r_i$  は移動経路上のノードの ID、 $weight()$  は表 4 に示す重みであり、加点の場合 +1、減点の場合 -1 とする。また、最後の訪問した部屋に滞在した時間は不明であるため、 $Time_{N_r+1} = Time_{N_r} + 10[sec]$  とすることで 10 分間滞在するものとした。

各移動経路ごとに各住人のスコアを算出し、各住人ごとに最もスコアの高い移動をその住人の移動経路として決定する。

## 5. 評価実験

### 5.1 実験環境

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。本研究では住人は母、父、姉、弟の 4 人である。4 人の住人は表 5 と表 6 に示す 2 つのシナリオに沿って起床から就寝までの活動を行った。移動のおおよその時刻はシナリオによって定められているが、移動の

タイミングは各住人の判断で行った。また、シナリオに記載されている行動は必ず行うものとし、それ以外のトイレや洗面所、キッチンとリビングの行き来は被験者の自由である。

### 5.2 学習データの生成

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。

表 7 各住人の移動経路推定結果 (シナリオ 1)

住人	経路
父	Bed→Living→1F WC→Wash→Kitchen→Living→1F WC→Wash→Living→Kitchen→Living→Bed→Living→Kitchen→Living→Western 1→Entrance
母	Bed→Living→1F WC→Wash→Kitchen→Living→1F WC→Wash→Living→Kitchen→Living→Bed→Living→Kitchen→Living→Wash→Western 2→Western 1→Spare→Living→Kitchen→Living→Entrance
姉	Western 1→1F WC→Wash→Kitchen→Living→1F WC→Wash→Living→Kitchen→Living→Western 1→Entrance
弟	Western2→1F WC→Wash→Living→Kitchen→Living→Western 2→Living→Kitchen

表 8 各住人の移動経路推定結果 (シナリオ 2)

住人	経路
父	Entrance→Living→Kitchen→Living→1F WC→Living→Kitchen→Living→Living→1F WC→Entrance→Living→Kitchen→Living→Wash→1F WC→Living→Bed
母	Entrance→Living→Kitchen→Living→1F WC→Living→Kitchen→Living→1F WC→Entrance→Living→Kitchen→Living→Wash→1F WC→Living→Bed
姉	Entrance→Living→Kitchen→Living→1F WC→Living→Western 1→Living→Kitchen→Living→1F WC→Entrance→Living→Kitchen→Living→Wash→Living→Western 1
弟	Entrance→Living→Kitchen→Living→Western 2→Living→Kitchen→Living→1F WC→Entrance→Living→Western 2

### 5.3 評価結果

父, 母, 姉, 弟の移動経路推定結果を表 7 と表 8 に示す. 結果より, 各住人の開始と終了の部屋はシナリオと一致していることが分かる. これは各住人の寝室を含む経路のスコアが高くなるように設計認めである. その間の移動経路について見ると, おおよそその移動はシナリオと合致している. また, 表 7 で 2 回便所が出現していたり, 表 8 でシナリオにない便所が 1 回出現しているが, これは実験中の動画像を確認すると確かに便所に行っており, 正しく検出できている. さらに, Kitchen と Living の移動が複数見受けられるが, これはシナリオにはなく移動で住人が冷蔵庫に飲み物を取りに行ったりする際の正しい移動とリビングを移動する際に誤って台所のセンサが反応した際の誤った移動の両方が含まれる.

## 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 4 人家族の 1 日の生活シナリオをもとに活動したデータを用いて移動経路を推定した. 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.

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, 科学研究費補助金若手研究 (B)(24700066) の支援によるものである. 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).