

赤外線センサーネットワークによる人物追跡

Multi-Person Tracking with Infrared Sensor Network

本田誠一*1 福井健一*2 森山甲一*2 栗原聡*2 沼尾正行*2
 Seiichi Honda Ken-ichi Fukui Koichi Moriyama Satoshi Kurihara Masayuki Numao

*1 大阪大学大学院 情報科学研究科 情報数理学専攻

Department of Information and Physical Sciences, Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

*2 大阪大学産業科学研究所

The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

We believe that a multi-person tracking system is necessary for Ubiquitous computing. We have built an infrared sensor network capable of tracking people's whereabouts in a wide area. Though this small sensor is cheap and easy to install, the kind of data it produces is discrete and insufficient to distinguish the presence of several individuals. Consequently, in the event of two sensor ignitions, there is the necessity to judge whether one or more individuals are present. By applying maximum likelihood estimation to the data, we estimate a time-lag, which is the necessary time for a person to pass in front of one sensor and reach another sensor. Even if two sensors are not adjacent to each other, the time-lag can be estimated using Dijkstra's algorithm. Employing this approach, we are able to obtain 86.1% accuracy for multi-person tracking.

1. はじめに

近年、センサの小型化や各種通信技術の発展に伴い、ユビキタスコンピューティングの研究が広く行われている。今後のユビキタス環境には、コンピュータが人間の行動を学習し、的確なサービスを行うことが期待されており、その実現には人間の位置情報が必要不可欠である。現在、カメラや床圧力センサといった各種センサーによる人物追跡 [Murakita 04] が研究されており、高精度の追跡が可能となっている。

しかし、それらの追跡システムの多くは追跡範囲が狭く、複数の部屋で人間が活動する環境での使用には課題がある。また大学の研究室、オフィスのような場所では、複数人が同時に移動する頻度に比べ、単独で移動する頻度の方が多い（例えば昼食に行く機会とコピー機に向かう機会）。そのため、長期間のデータの大部分を単独行動に起因したデータが占め、このデータから ID を持たない複数人の行動を分離することが可能であると考えた。

我々は、安価で設置が容易な赤外線センサに着目し広範囲をカバーする赤外線センサネットワーク (図 4) を構築した。広範囲を追跡できるだけでなく ID なしで複数人の同時追跡を行うことで、ID ありの場合 (RFID による人物追跡 [Want.R 97]) に比べユーザーへの負担を大幅に軽減することができる。また、赤外線センサデータは、カメラの軌跡データのような連続的データと異なり離散的である。そのため、行動経路をラベル付けしやすく行動学習などの際に利用しやすい。

本研究の目的は、広範囲赤外線センサネットワークを構築し、離散的で、発火漏れや複数人による発火を含む赤外線センサデータを用いて ID なしで人物追跡を行うことである。図 4 のテストコースを研究室内に設け、追跡精度の測定を行った結果、一人の場合、複数人の場合ともに高い追跡精度を持つことが確認できた。

連絡先: 本田誠一, 大阪大学

産業科学研究所沼尾研究室,

〒 567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1,

Tel:06-6879-8426 Fax:06-6879-8428

E-mail:hs1023@ai.sanken.osaka-u.ac.jp

2. 人物追跡における問題

2.1 リンク不正接続

赤外線センサからの情報は空間的に離散的である。そこで各赤外線センサをノードとすれば、通過したノードにリンクを順次接続していくことで移動経路を表現できる。しかし、単独に発火したノード順にリンクを接続すると次のような問題がある。

1. センサの隣接関係が反映されず、壁を通過するような実際には存在しない経路にリンクを接続する。
2. 他の人間による発火を区別できず人が通過していない経路にリンクを接続する。

本研究では、各赤外線センサの配置を既知とした状態で人物追跡を行う。そのため 1 はセンサの隣接関係から解決できる。2 を、リンクの不正接続 (問題点 1) と呼ぶことにする。この問題を改善するためには、2 つのノードのリンク接続の場合に応じて制限する必要がある。

2.2 リンクの接続漏れ

リンクを接続する上でもう一つの問題の原因となるのは、赤外線センサの発火漏れである。今回使用した赤外線センサは、反射物までの距離が小さいほど大きな数値を、大きいほど小さな数値をデータとして一秒間に 3 回ずつ出力する。そこで各赤外線センサごとに閾値を定め、人が近くを通過し、その閾値を超える数値を感知した場合にセンサは発火したと考える。一般的にセンサは、反応範囲に限界や特性があり、感知ミスを起こすことがある。本研究で使用した赤外線センサも、その出力特性が原因となり場合によっては発火漏れを起こした。発火漏れが起こると、人が移動した経路にリンクが正しく形成されないという問題が起こる。この問題をリンクの接続漏れ (問題点 2) と呼ぶことにする。この問題を改善するためには、非隣接ノード間に発火が起こったときに、移動経路上で発火に失敗したと考えられるノードにリンクを接続し補間する必要がある。

2.3 2つの問題とそのトレードオフ

問題点 1(リンクの不正接続) と問題点 2(リンクの接続漏れ) の改善には、トレードオフが存在している。それはリンクの接続漏れを減らすために、非隣接ノード間を多く補間すればその不正接続が増加し、逆にリンクの不正接続を減らすため、非隣接ノードの接続を減らせば、リンクの接続漏れが起こるといふものだ。従って、2つの問題を同時に改善しなければ高い追跡精度の実現は困難である。

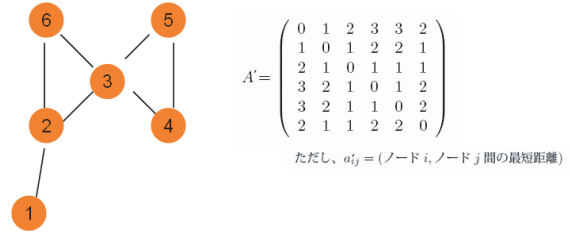


図 1: 拡張隣接行列の例 (ノード数 6)

3. 提案手法

3.1 センサ間移動時間の最尤推定

問題の解決に向け、あるセンサが発火してから隣接するセンサが発火するまでのセンサ間の移動に要する時間に注目した。隣接する 2 つのセンサが発火したとき、それには一人による連続発火によるものと、複数人によるものの 2 種類がある。歩く速さに違いがあるためセンサデータからセンサ間移動時間を求めるとばらつきを持つ分布を形成する。今回想定している環境においては、隣接ノードの連続発火の主な原因は一人の人間の行動であると仮定している。そこでサンプルが十分に多い場合、センサ間移動時間分布は一人の行動によるセンサ間移動時間を平均とする正規分布になると仮定した。

ここで正規母集団に対して、標本平均 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ および標本分散 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ はそれぞれ母平均 μ 、母分散 σ^2 の最尤推定量である [Wada 02]。したがってセンサ間移動時間分布は $N(\mu, \sigma^2)$ と表すことができる。過去のセンサデータから最尤推定したセンサ間移動時間分布の平均値 $\pm 2\sigma$ の範囲 (全体の 95.44%) に、2 つのセンサの発火タイムラグが入った場合のみリンクを接続する。また範囲外の場合は、一人の一連の行動ではなく他の人間による発火と判断し、リンクを接続しない。このようにリンク接続を条件付きで行うことにより、問題点 1(リンクの不正接続) が改善できる。

3.2 拡張隣接行列と拡張センサ間移動時間行列の定義

赤外線センサネットワークはグラフによる抽象化に適している。そこで、実際のセンサの位置情報を用いて赤外線センサネットワークをグラフで表現する。グラフ G はノードの有限集合 V 、およびリンクの有限集合 E を用いて、 $G = (V, E)$ で表現される。リンクはノードのペアであり、順序のない組 (u, v) または順序列 $\langle u, v \rangle$ で表される。赤外線センサネットワークは V が全赤外線センサーに対応し、リンクが順序のないノードのペアで表される無向グラフである。

ノードの個数を $|V| = p$ とすると、グラフ $G = (V, E)$ の隣接行列 A は $p \times p$ の正方行列で表すことができる。赤外線センサネットワークは無向グラフであるので、各リンク $(v_i, v_j) \in E$ に対応して行列 A の (i, j) 成分および (j, i) 成分を 1 に設定する。それ以外は 0 とする。

問題点 2(リンクの接続漏れ) を改善するためには、通常の隣接行列ではリンクがない非隣接ノードについても必要に応じてリンク接続を行う必要がある。そこで全てのリンクの重みを 1 としたグラフにおいて、ノード間の最短距離を 0 の代わりに代入した隣接行列を拡張隣接行列 A' と定義する。ノード数 6 の場合の A' の例を図 1 に示す。ノード間最短距離を計算する際には単純かつ実用的にうまく機能することが多いダイクストラのアルゴリズム [Yuda 02] を使用する。

隣接するノード i 、ノード j のセンサ間移動時間を最尤推定し求めた平均 μ を (i, j) 成分を持つ行列をセンサ間移動時間平均行列 B_1 、分散 σ^2 を (i, j) 成分を持つ行列をセンサ間移動時間分散行列 B_2 と定義する。そしてこれら 2 つをまとめて、

センサ間移動時間行列 B と呼ぶことにする。 B_1, B_2 の (i, j) 成分は次のようになる。

$$B_1(i, j) = \begin{cases} \mu_{ij} & (A(i, j) = 1) \\ 0 & (A(i, j) = 0) \end{cases}$$

$$B_2(i, j) = \begin{cases} \sigma_{ij}^2 & (A(i, j) = 1) \\ 0 & (A(i, j) = 0) \end{cases}$$

問題点 2 を改善するために、センサ間移動時間行列 B を拡張し、非隣接ノードに対応するセンサ間についてもセンサ間移動時間を求め、拡張センサ間移動時間行列 B' を定義する。なお、拡張センサ間移動時間平均行列 B'_1 、拡張センサ間移動時間分散行列 B'_2 をまとめて、拡張センサ間移動時間行列 B' と呼ぶものとする。各センサ間移動時間分布を正規分布と仮定すれば、再生性の定理 [Wada 02] を用いることができ、 B'_1, B'_2 の (i, j) 成分が次のように計算される。

- $a'_{ij} > L$ ならば

$$B'_1(i, j) = 0$$

$$B'_2(i, j) = 0$$

- $0 < a'_{ij} \leq L$ ならば

$$B'_1(i, j) = \mu_{n_1 n_2} + \mu_{n_2 n_3} + \dots + \mu_{n_{(k-1)} n_k}$$

$$B'_2(i, j) = \sigma_{n_1 n_2}^2 + \sigma_{n_2 n_3}^2 + \dots + \sigma_{n_{(k-1)} n_k}^2$$

ただし、 n_1, n_2, \dots, n_k は $G = (V, E)$ の v_i, v_j 間の最短経路上のノード列であり、これらはダイクストラ法で A' を求める際に求まる。

ここでリンク数 L は定数とする。2 ノードの最短距離の上限 L を定め、2 ノードが遠く離れた場合にはリンク接続を考えないことで、リンクの不正接続と計算量を低減することができる。

以下、例を使って隣接しない 2 つのセンサのセンサ間移動時間分布を求める手順を説明する。図 1 のグラフのノード 1 とノード 6 の間のセンサ間移動時間分布は、2 つのノードを結ぶ経路の一つである 1-2-6 に着目すれば

$$N_{16}(\mu_{16}, \sigma_{16}^2) = N_{16}(\mu_{12} + \mu_{26}, \sigma_{12}^2 + \sigma_{26}^2)$$

となる。

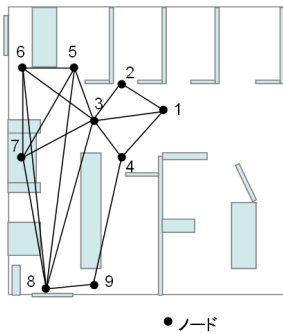
非隣接の 2 つのセンサの発火には、2 つの場合が考えられる。一つは、一人の人間の行動経路上のセンサに発火漏れを含む場合、2 つ目は複数人の行動による独立した発火である。そこで、隣接ノードの場合と同様に非隣接ノードについてもセンサ移動時間分布を求め、その分布の 95.44% 以内にセンサの発

火タイムラグが入った場合には一人の行動の場合と考えリンク接続を行う。そのタイムラグがその範囲外ならば、複数人の行動とみなし、リンクを接続しない。以上により、問題点1、問題点2の改善を試みる。

図1のように、隣接しない2つのノードを結ぶ経路は1-2-6だけでなく、1-2-3-6, 1-2-3-4-5-3-6, など多数存在する。 $A'(i, j) \leq L$ での $B'(i, j)$ を定義するにあたり、それらの経路のうち最短経路を使用した。これは、発火漏れにより非隣接ノードが連続発火した場合、最短経路で補間することを意味する。最短経路で補間する理由は構築した赤外線センサネットワークのグラフ構造が以下の特徴を持つためである(図2)。

- 非隣接ノード間にリンク数 L 以下の複数の経路を持つものが数箇所しかない
- 最短経路以外の経路を通る頻度が最短経路の場合に比べ圧倒的に少ない

従って、リンク数 L 以下の経路を多く含むグラフ構造の場合には注意が必要である。



例) ノード1, ノード8が発火
 リンク数3以下の全経路
 $\langle 1, 2, 3, 8 \rangle, \langle 1, 4, 9, 8 \rangle, \langle 1, 4, 3, 8 \rangle$
 $\langle 1, 3, 5, 8 \rangle, \langle 1, 3, 6, 8 \rangle, \langle 1, 3, 7, 8 \rangle,$
 $\langle 1, 3, 8 \rangle$ (←最短経路)

図2: 非隣接ノード間経路の例

3.3 リンク接続判定アルゴリズム

2つの問題点(2.3節)にはトレードオフが存在するため2つを同時に改善する必要がある。そこで拡張隣接行列 A' と拡張センサ間移動時間行列 B' を用いて、リンク接続判定アルゴリズム(図3)を提案する。時刻 t^{*1} において、発火したノードの集合を D_t とする。なお実際は、ほとんどが要素数が1つか2つの少数の集合である。時刻 t から時刻 $t-l$ までに発火したノード全体の集合を D とする。ただし、同一ノードは D 内に1つしか存在できないものとする。

このアルゴリズムでは、 D_t に含まれるノード j と D に含まれるノード i の最短経路長が L 以内であり、かつノード i 、ノード j のセンサ間移動時間 T_{ij}^* が、 B' から求めた範囲に含まれる場合にのみノード i 、ノード j 間にリンクを接続する。

4. 提案システムの検証

4.1 実験方法

提案システムの人物追跡性能を検証するに当たり、研究室内に図4のテストコースを設定した。テストコースは全長31mで、スタートからゴールまでの間には16個のセンサがあり、正確な人物追跡が行えた場合には15本のリンクができる。通

*1 ここでの時間は、1秒間が3ステップに対応する「ステップ数」を単位とする。

```

for each  $j \in D_t$  do
   $D = D_{t-l} \cup \dots \cup D_{t-k} \dots \cup D_{t-2} \cup D_{t-1}$ 
  for each  $i \in D_{t-k}$  ( $k = 1; k \leq l; k++$ ) do
    if ( $1 \leq a'_{ij} \leq L$ )
       $min = B'_1(i, j) - 2B'_2(i, j)$ 
       $max = B'_1(i, j) + 2B'_2(i, j)$ 
       $T_{ij}^* = k$ 
      if ( $min \leq T_{ij}^* \leq max$ )
        remove  $i$  from  $D$ 
        return  $\langle i, j \rangle = 1$ 
      else return  $\langle i, j \rangle = 0$ ;
    else return  $\langle i, j \rangle = 0$ 
    
```

図3: リンク接続判定アルゴリズム

過したにもかかわらずリンクができない場合、通過していない経路にリンクが不正に作られた場合を追跡エラーとしてカウントし、(追跡精度) = $\frac{15 - (\text{エラー数})}{15}$ を測定した。

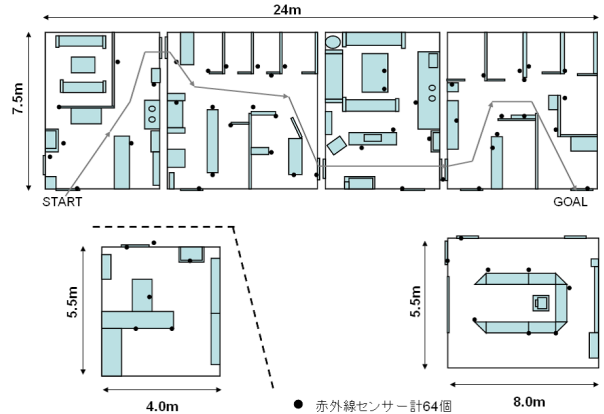


図4: 赤外線センサネットワーク (追跡範囲 246m²)

提案システムでは、センサ発火漏れに起因したリンク接続漏れ、別の人間のセンサ発火によるリンク不正接続の2つの問題に対して、ダイクストラのアルゴリズムと各センサ間移動時間の併用で問題解決を目指す。この2つの有効性を確認するために、次の3つの実験条件を設定した(表1)。条件1はテスト用アルゴリズム1、条件2はテスト用アルゴリズム2、そして条件3はリンク接続判定アルゴリズム(提案手法)を元にリンク接続を行う。

表1: 実験条件

	センサ間移動時間	ダイクストラ
条件1	-	-
条件2	-	-
条件3	-	-

テスト用アルゴリズム1(図5)は、各センサ間移動時間を考慮せず、非隣接ノード発火についてはリンク接続を行わない。テスト用アルゴリズム2(図6)は、各センサ間移動時間は考慮しないが、非隣接ノード発火がリンク数 L 以下で起きた場合、最短経路で補間しリンク接続を行う。

```

for each  $j \in D_t$  do
   $D = D_{t-l} \cup \dots \cup D_{t-k} \dots \cup D_{t-2} \cup D_{t-1}$ 
  for each  $i \in D_{t-k}$  ( $k = 1; k \leq l; k++$ ) do
    if ( $a_{ij} = 1$ )
      remove  $i$  from  $D$ 
      return  $\langle i, j \rangle = 1$ 
    else return  $\langle i, j \rangle = 0$ ;

```

図 5: テスト用アルゴリズム 1

```

for each  $j \in D_t$  do
   $D = D_{t-l} \cup \dots \cup D_{t-k} \dots \cup D_{t-2} \cup D_{t-1}$ 
  for each  $i \in D_{t-k}$  ( $k = 1; k \leq l; k++$ ) do
    if ( $1 \leq a'_{ij} \leq L$ )
      remove  $i$  from  $D$ 
      return  $\langle i, j \rangle = 1$ 
    else return  $\langle i, j \rangle = 0$ 

```

図 6: テスト用アルゴリズム 2

テストコースを 7 人が一人 5 回ずつ任意の速さで歩き、計 35 個のサンプルデータを集め、同じデータに対し 3 つの条件で追跡精度を測定した。条件 3 での追跡の様子を図 7 に示す。

赤外線センサは同一センサを複数人が発火した場合、識別が不可能である。そこで複数人が同一センサではなく隣接するセンサを発火させたときに、複数の発火を各々の発火系列として分離できている場合は、複数人の同時追跡が行えているものと判断した。

複数人の同時追跡精度は次の方法で検証した。まず、テストコースに隣接する 3 箇所のセンサーが、乱数に従ってランダムなタイミングで発火するようにプログラムを用意した。これは、テストコースに隣接するセンサを実際にランダムに人が動いて発火させる状況を仮想的に再現するためである。そして一人の場合と同じサンプルデータを使用し、複数人による発火というノイズを含む状態でテストコースがどの程度正確に追跡できているのかを測定した。

なお各センサ間移動時間は、事前に 17 日分のセンサデータ (標本数計 7701 個) から求めたものを使用し、それぞれのリンクのセンサ間移動時間は平均 142.6 個の標本から最尤推定した。また、パラメータ L, l は $L = 3, l = 30$ と設定した。

4.2 実験結果と考察

表 2 に一人・複数人の場合の追跡精度を示す。一人の場合の追跡精度低下の原因は、赤外線センサの発火漏れである。そのために発火漏れを補間し、リンクの接続漏れを減少させることができる条件 2, 3 で追跡精度が条件 1 より大きく増加した。そして 3 つの条件の中では、条件 2 の方法が最も高い追跡性能を記録した。これは、条件 2 は条件 3 と異なり発火タイムラグにかかわらずにリンク接続を行うことが要因である。事前に推定していたセンサ間移動時間と大幅に異なる時間で通過した場合、条件 3 では一人の行動ではなく複数人の行動と判断しリンク接続を行わず、リンクの接続漏れが起き条件 2 より精度が下がったと考えられる。

複数人の同時追跡の際には、センサ発火漏れと、複数人による発火が起こる。テストコース上のセンサの発火データに無関係なノイズが増えるため全ての条件で精度の低下が起きた。特に発火ノードに順次リンクを接続する条件 2 は、リンクの不



図 7: 人物追跡画面 (一人)

表 2: 正しく追跡できた割合

	一人	複数
条件 1	0.630	0.533
条件 2	0.971	0.680
条件 3	0.956	0.861

正接続が多数発生し一人の場合に比べ精度が大幅に減少した。条件 3 は、各センサ間移動時間を考慮し、明らかに発火のタイムラグが小さすぎる連続発火や、大きすぎる連続発火に対してはリンクを接続しない。そのためリンクの不正接続が条件 2 に比べ減少し、精度の減少が押さえられたと考えられる。

5. まとめ

本研究では、赤外線センサ発火系列を元にした、ID なしの複数人の追跡システムを構築した。今後、このシステムから得られる位置情報と開閉・照度・温度センサといった様々なセンサからの情報を組み合わせて使用することにより、習慣的行動パターンの抽出や行動予測など行う予定である。

参考文献

- [Murakita 04] Takuya Murakita, T.Ikeda, and H.Ishiguro "Multisensor Human Tracker based on the Markov Chain Monte Carlo Method." *Proc. 2nd International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems*, 2004
- [Want.R 97] Want, R., Hopper, A., Falcao, V., Gibbons, J."The Active Badge Location System." *ACM Transactions on Information Systems*, Vol.4, Vol.5, October 1997, pp.42-47
- [Wada 02] 和田秀三, "基本演習確率統計", (サイエンス社, 2002)
- [Yuda 02] 湯田幸八, 伊原充博, "アルゴリズムとデータ構造", (コロナ社, 2002)