

## 相対距離を用いた移動物体の追跡手法

佐野 渉二<sup>1\*</sup>・義久 智樹<sup>2</sup>・寺田 努<sup>3, 4</sup>・塚本 昌彦<sup>3</sup>

<sup>1</sup>自然科学研究科情報・電子科学専攻

<sup>2</sup>大阪大学サイバーメディアセンター

<sup>3</sup>工学研究科電気電子工学専攻

<sup>4</sup>科学技術振興機構さきがけ

(受付:October 5, 2011 受理:January 23, 2012 公開:February 8, 2012)

キーワード: 追跡手法, 相対距離, 移動物体, センサネットワーク

近年のロボット技術, センサ技術の発達により, 移動できる端末を用いた研究が盛んに行われている。これらの研究の中に他の移動物体を追跡するものがあるが, 追跡を行うために GPS による絶対位置や電波強度による相対位置(相対距離と方向)を用いており, 装置が大きくなるなどの問題があった。そこで, 本研究では, 相対距離のみを用いた移動物体の追跡手法を提案する。相対距離のみを用いるため, センサなどの小型移動端末でも追跡が可能となる。提案手法では, 相対距離と過去の移動位置, 相対距離を用いて追跡目標位置を決定する。提案手法の評価実験を行った結果, 移動端末が不規則に移動する場合, 移動端末の移動にある仮定を設定して追跡する手法が有効であることを確認した。

### はじめに

近年のロボット技術, センサ技術の発達により, 移動できる計算端末を用いたユビキタスコンピューティングシステムに関する研究が盛んに行われている<sup>1), 2), 3), 4)</sup>。これらの研究では, 移動端末の移動方向として, あらかじめ設定された経路に従って移動する場合<sup>5), 6)</sup>やランダム移動する場合, 追跡して移動する場合<sup>7), 8)</sup>が想定されている。追跡して移動する場合について, 例えば以下の応用が考えられる。

- ・センサネットワークにおいて, 無線基地局が近くにある幾つかのセンサノードからデータを受信する。広い範囲をセンシングするため, センサノードは移動しながらセンシングを行う。無線基地局はセンサノードを追跡しながらデータを受信し続ける。
- ・生態調査のための動物の追跡や迷子の追跡, 犯人追跡において, それらの位置情報を取得するために小型発信機を取り付ける。小型発信機は, 通信距離が短いことが多い。長距離の通信を行うために, 小型発信機を取り付けられた動物や人を長距離通信可能な移動端末や計算端末を持った人が追跡する。
- ・介護ロボットが, 小型発信機を取り付けた介護者を追跡する。介護者本人が操作する必要がない。

移動端末が設定された経路にしたがって移動する場合やランダムに移動する場合は特に移動先を計算する必要がない。しかし, 移動端末が他の移動物体を追跡する場合には, 追跡を続けられるように適切な移動方向を決める必要がある。本

研究では, このような追跡する移動端末を対象とし, 相対方向を用いずに相対距離のみを用いた追跡方法を提案する。提案手法では, 相対距離のみを用いるため, 距離センサだけで追跡が可能となり, 小型の移動端末を用いて追跡を行える。

## 1. 相対距離情報を用いた追跡

### 1.1 関連研究

移動端末の追跡のために, 移動端末の位置を推定して追跡することが多い。まず, 位置推定手法の関連研究として, 相対位置を用いて位置情報を推定する手法<sup>9), 10)</sup>では, 移動端末間の相対距離と方向を利用する。相対距離は, 超音波や赤外線, 無線電波などの強度または伝播時間を利用することで測定され, 方向は相対距離を異なる地点で同時に測定することで決定できる。方向はできるだけ多くの地点で同時に測定することにより, 精度を高めることができるが, 相対距離が大きい場合, 各地点での方向の精度が悪くなるため, 相対的な方向を決定するのは容易ではない。

次に, 追跡手法の関連研究を紹介する。追跡手法として, カルマンフィルタ<sup>11)</sup>や $\alpha\beta$ フィルタ<sup>12)</sup>といった平滑化フィルタ<sup>13)</sup>を用いた手法が研究されている。カルマンフィルタは移動端末の位置を推定する際に, 座標軸の各軸の値が互いに干渉する干渉フィルタ(例えば, 2次元直交座標系の場合, x軸の値を算出するのにy軸の値も利用する)であり, 追跡精度は高いが, 演算負荷がかかる。一方,  $\alpha\beta$ フィルタは位置情報の予測値を各座標軸に対して独立に各軸で算出できる非干渉系フィルタ(例えば, 2次

元直交座標系の場合、 $x$ 軸、 $y$ 軸に対して独立にそれぞれの予測値を算出できる)であるために、演算負荷が軽い。追跡性能については等速直線運動する物体に対しては安定した追跡精度を示すが、急激に移動方向を変える移動物体には追跡の遅れが生じやすい問題がある。これらの手法を用いるためには追跡する移動端末の位置情報(2次元直交座標系の場合は $(x, y)$ 、2次元極座標系の場合は $(r, \theta)$ )を取得する必要があるが、本研究では、相対距離しか取得できない環境を想定するためにこれらのフィルタを利用できない。実環境において追跡を行う手法としては、奥迫らによりレーザーレンジファインダを用いた追跡手法が提案されている<sup>14)</sup>。距離センサとしてレーザーレンジファインダを搭載した移動ロボットに人を追跡させている。しかし、レーザーレンジファインダを用いることで、コストが高くなる、装置が大型化してしまうことに加え、追跡対象を見失うと追跡を行えないため、先述の利用例で用いることはできない。

### 1. 2 相対距離のみを用いる理由

追跡を行う位置情報として、絶対位置や相対距離と相対方向を利用した手法があるが、本研究では相対距離のみを用いる手法を考える。これは、1.1節で述べたように、他の方法では、環境によっては問題があるためである。他にも、相対距離を用いることで以下の利点がある。

#### ・小型化

赤外線や超音波、無線電波などを発することができる装置であればよいため、追跡を行うための発信機を小型化できる。犯人追跡、動物の生態調査の例のように追跡する対象に意識されることなく、発信機を取り付けられる。

#### ・通信電波の利用

無線LANやBluetoothといった無線データ通信で用いられる電波や赤外線と相対距離を取得できるため、データを通信しながら追跡を行える。センサネットワークで使用するセンサノードのように、センサデータを送るセンサノードを無線基地局が追跡する場合、無線基地局はセンサデータなどを受信しながら追跡を行える。

#### ・コストの軽減

一般的な計算端末の多くは、他の計算端末にデータを送るために無線通信を行うため、その電波を利用することで既存の計算端末をそのまま用いて追跡を行える。追跡のために新たな計算端末を開発する必要がないため、コストの軽減につながる。

### 1. 3 想定環境

本稿では、追跡される移動端末を被追跡ノード、追跡する移動端末を追跡ノードと呼ぶ。被追跡ノードからは定期的に電波や音波などが発射されており、追跡ノードはその強度を測ることで被追跡ノードとの相対距離を把握することを想定する。以降、相対距離測定のための電波や音波などをビーコンと呼ぶ。あらかじめ被追跡ノードから発射するビーコンの強度を固定することや発射した電波などで発射元の強度の情報をのせてビーコンを発射することで相対距離を把握できる。ビーコンに被追跡ノードの移動距離の情報をのせることで追跡の精度を高められると考えられるが、先述の基地局が追跡する例では可能であるが、小型の発信機を取り付ける場合の例では難しい。このため、ビーコンに被追跡ノードの移動距離の情報を追跡のための情報として付加することは考えない。

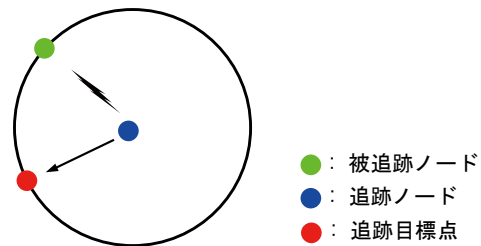


Fig. 1 An example of a tracking method

本研究では以下の環境を想定する。

- ・被追跡ノードの数は1つである。
- ・追跡ノードの数は特に規定しないが、1つの追跡ノードでも追跡できるように、複数の追跡ノードで協調して追跡することは考えない。
- ・追跡ノードは、被追跡ノードからのビーコンを受信することで、被追跡ノードとの相対距離を定期的に取得できる。
- ・追跡ノードは、被追跡ノードの位置を把握できておらず、被追跡ノードとの相対距離を取得することで追跡を開始する。
- ・追跡を行うために用いる被追跡ノードの情報は相対距離のみであり、追跡ノードは被追跡ノードの移動に関する情報(被追跡ノードの速さ、移動方向)を把握できない。ただし、被追跡ノードと追跡ノードの移動する速さには上限があり、既知とする。
- ・被追跡ノードがビーコンを発射してから追跡ノードに到達するまでに要する時間や追跡ノードが移動する方向を決定するために計算する時間は、追跡ノードの移動時間に比べ非常に短いため、無視する。
- ・被追跡ノードと追跡ノードの物理的な移動の制約は設けない。これは迷子の追跡のように、人が発信機を取り付けた子供を追跡する場合も考慮するためである。

### 1. 4 簡単な追跡手法の例

簡単な例により相対距離を用いた追跡手法を説明する。ある時間において被追跡ノードと追跡ノードが Figure 1 に示すような位置関係にある場合を考える。被追跡ノードがビーコンを発射すると、追跡ノードはビーコンを受信して被追跡ノードとの距離を取得できる。取得した距離から追跡ノードは Figure 1 に示す円周上の一点に被追跡ノードが存在することが分かる。簡単な追跡手法では追跡ノードはこの円周上の任意の点を選択し、その点に被追跡ノードが存在するものとして追跡を行うものが考えられる。ここで、追跡ノードが追跡するために決定する移動目標位置を追跡目標点と呼ぶ。追跡ノードは、ビーコンを受信した地点から追跡目標点に向かって最高速度で移動する。被追跡ノードが静止する場合以外は、追跡ノードが移動する間に被追跡ノードも移動するが、追跡ノードは被追跡ノードの移動方向を把握していない。被追跡ノードが任意の方向に等距離移動する場合を考えてその平均をとると、被追跡ノードがビーコンを発射した地点に等しくなるため、追跡ノードはビーコンを受信した時点での被追跡ノードの位置を目標として移動するものとする。追跡目標点に到達すると、次のビーコンを受信するまで待つ。追跡目標点に到達する前に次のビーコンを受信すると、追跡ノードはビーコンを受信した地点で次の追跡目標点を算出し、新たな追跡目標点に向かって移動する。

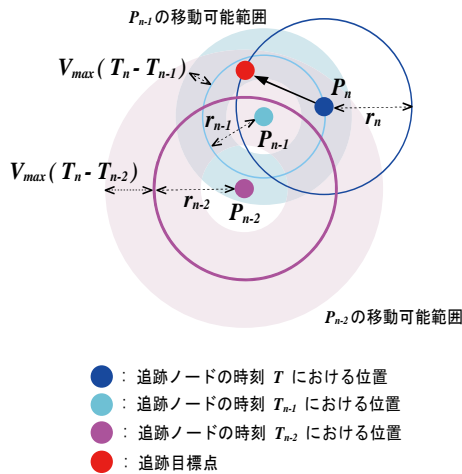


Fig. 2 A restricting moving range method

## 2. 提案手法

追跡を開始してから  $n$  回目に追跡ノードと被追跡ノードの相対距離を計測した時刻  $T_n$  での追跡ノードの位置を  $P_n$  とし、その被追跡ノードと追跡ノードの相対距離を  $r_n$  とする。被追跡ノードの移動する速さの最大値を  $v_{max}$  とする。本稿では、時刻  $T_n$  における追跡ノードの追跡目標点を決定する手法として過去の被追跡ノードとの相対距離とそのときの追跡ノードの位置を用いる移動範囲制限法と最短移動仮説法を提案する。

### 2.1 移動範囲制限法

移動範囲制限法は、過去の相対距離の情報から被追跡ノードがあると考えられる範囲を絞り込み、その中で追跡目標点を設定する手法である。移動範囲制限法では、過去数回分の被追跡ノードとの相対距離と追跡ノードの位置を使用する。Figure 2 に過去 2 回分の相対距離と追跡ノードの位置を使用して追跡目標点を決定する場合の例を示す。被追跡ノードは  $T_{n-1}$  でビーコンを放射してから  $T_n$  でビーコンを放射するまでに最大で距離  $v_{max} \cdot (T_n - T_{n-1})$  進む。同様に  $k$  回前にビーコンを放射した  $T_{n-k}$  から  $T_n$  で相対距離が計測されるまでには最大で距離  $v_{max} \cdot (T_n - T_{n-k})$  進む。  $T_n$  における被追跡ノードの位置は、  $T_{n-k}$  における相対距離情報を利用することで、中心  $P_{n-k}$ 、半径  $r_{n-k}$  の円周の各点を中心とし、半径  $v_{max} \cdot (T_n - T_{n-k})$  の円内に当たる部分に限定できる。そこで、移動範囲制限法では、  $k = 0, 1, 2, \dots, n$  に対して、その部分の共通する範囲を求め、その範囲の中からランダムに一点をとり、それを追跡目標点とする。測定する相対距離の誤差を考慮しない場合は、上記の手法で追跡目標点を定めることが可能であるが、測定距離の誤差を考慮する場合は、過去の相対距離情報から算出した被追跡ノードの移動可能範囲と中心  $P_n$ 、半径  $r_n$  の円周のすべてに共通する範囲がない可能性がある。この場合は、すべてに共通する範囲ができるまで、被追跡ノードが移動すると考えられる範囲を一定割合ずつ広げながら、追跡目標点を決定する。

### 2.2 最短移動仮説法

最短移動仮説法は、  $T_{n-1}$  から  $T_n$  の間に被追跡ノードが最短移動すると仮定して追跡を行う手法である。最短移動仮説法

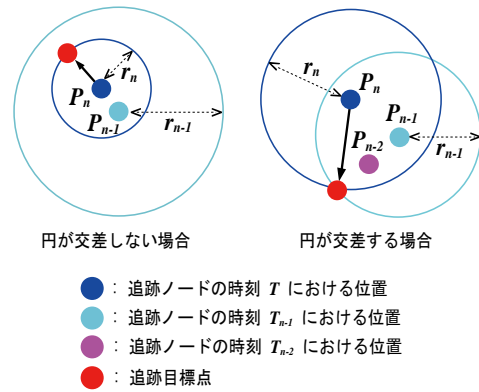


Fig. 3 A shortest route assumption method

では、  $T_n$ 、  $T_{n-1}$  における被追跡ノードとの相対距離と、  $T_n$ 、  $T_{n-1}$ 、  $T_{n-2}$  における追跡ノードの位置を使用する。Figure 3 (左) のように、追跡ノードが  $T_n$  でビーコンを受信した際に、中心  $P_n$ 、半径  $r_n$  の円  $P_n$  と中心  $P_{n-1}$ 、半径  $r_{n-1}$  の円  $P_{n-1}$  が交差しない場合には、円  $P_n$  上の点で円  $P_{n-1}$  との距離が最小の点として、点  $P_n$  と点  $P_{n-1}$  を結ぶ直線と円  $P_n$  の交点のうち、2 つの円  $P_n$ 、  $P_{n-1}$  との距離が短い点を追跡目標点とする。2 つの円が交差する場合は、  $T_{n-1}$  から  $T_n$  の移動量が最小の 0 である 2 つの円  $P_n$ 、  $P_{n-1}$  の交点を追跡目標点に決定する。Figure 3 (右) のように、この交点が 2 つある場合には、2 つ前に相対距離を計測した位置  $P_{n-2}$  に近い方を選ぶ。

## 3. 評価実験

提案手法の有効性を示すため、コンピュータシミュレーションにより追跡性能の評価実験を行った。シミュレータは、Windows XP 上で Visual Studio C++.NET 2005 を用いて独自に作成した。実環境に即した評価実験を行うため、追跡ノードが測定する相対距離に誤差を与えている。測定距離の誤差は、相対距離を計測するためにビーコンとして用いるものや環境により大きく異なるが、評価実験では各追跡手法の特性を調べることを目的として、測定する相対距離に一定の誤差率を乗じた範囲でランダムにとるという簡単な誤差モデルを用いる。例えば、測定距離の誤差率を 0.40 とする場合、実際の相対距離が 300 のときはその 40% の範囲で誤差が生じるものとし、追跡ノードが計測する相対距離は 180～420 の範囲のいずれかの値とする。

追跡手法の比較対象として、追跡ノードが静止し続ける場合、および以下に示すランダム法、 $\alpha\beta$  フィルタを用いた手法を考える。 $\alpha\beta$  フィルタを用いた手法では、被追跡ノードの位置を把握できる必要があるため想定環境から外れるが、被追跡ノードの位置を把握できる場合と比べて、提案手法の追跡性能にどれほどの差があるのかを調べるために用いる。

### ・ランダム法

1.4 節で述べた簡単な追跡手法である。追跡ノードから  $r_n$  離れた位置に被追跡ノードがあるため、ランダム法では中心  $P_n$ 、半径  $r_n$  とする円周上の一点をランダムに選択し、その点を追跡目標点とする。

### ・ $\alpha\beta$ フィルタを用いた手法

$T_n$  における被追跡ノードの測定位置を  $Q_n$ 、予測位置を  $E_n$ 、被追跡ノードの速さを  $v_n$ 、追跡ノードが  $T_{n-1}$  と  $T_n$  でビーコンを取得した時間間隔  $(T_n - T_{n-1})$  を  $t$  とするとき、  $T_n$  における

**Table. 1** Moving scenarios for a tracked node

移動シナリオ	方向	速さ
(i) 等速直線移動	一定	$v_{\max}$
(ii) 変速直線移動	一定	$v_{\max} \cdot p \sim v_{\max}$
(iii) 等速ランダム移動	ランダム	$v_{\max}$
(iv) 変速ランダム移動	ランダム	$v_{\max} \cdot p \sim v_{\max}$

**Table. 2** Evaluation parameters

パラメータ	基本値
被追跡ノードに対する追跡ノードの最大速度比	10
追跡ノードが測定する相対距離の誤差	相対距離の10%
被追跡ノードがビーコンを発射する時間間隔	1ステップに1回
P	0
移動範囲限定法で使用する過去の距離情報の数	3

被追跡ノードの平滑位置  $S_n$  は以下の3式から導かれる。

$$\begin{cases} S_n = E_n + \alpha \cdot (Q_n - E_n) \\ v_n = v_{n-1} + \beta \cdot (Q_n - E_n) / t \\ E_n = S_{n-1} + t \cdot v_{n-1} \end{cases}$$

$\alpha\beta$  フィルタを用いた手法では、この平滑位置  $S_n$  を追跡目標点として追跡を行う。評価実験では、追跡ノードが測定する被追跡ノードの相対距離については他の追跡手法と同様に誤差を考慮するが、相対方向は正確に把握できるものとし、相対距離と相対方向を合わせた測定位置として与える。また、測定位置の位置情報の重みを大きくするため、パラメータ  $\alpha$ ,  $\beta$  をともに 1.0 とした。

### 3. 1 評価実験環境

評価実験では、被追跡ノードはある移動目標点を設定して、その移動目標点に向かって一定の速さで移動する。移動目標点に到達すると次の目標点と速さを決定して移動する。

被追跡ノードの移動方向と速さに関しては、Table 1 に示す移動シナリオを考える。移動シナリオ(i), (iii) は先述のセンサネットワークの例を想定しており、シナリオ(ii), (iv) は生態調査の例を想定している。p は  $0 \leq p \leq 1$  の値をとる定数であり、一様な確率で決定する。被追跡ノードの平均の速さはその範囲の平均をとり、 $v_{\max} \cdot (1+p) / 2$  とする。ランダム移動の場合は被追跡ノードの移動の方向と移動する距離を一様な確率でランダムに決定する。

被追跡ノードの最大速度  $v_{\max}$  を 100 とし、単位時間（ステップ）あたり 100 単位距離移動する。単位時間や単位距離は任意に決定できるため、一般性のある評価が可能になる。被追跡ノードと追跡ノードの初期位置の相対距離は 1 単位距離とした。

本研究で考慮するパラメータを Table 2 に示す。3.2 節以降で記述されていないパラメータについてはこの Table 2 の値を用いる。

### 3. 2 追跡の推移

時間の経過による相対距離の変化を調べる評価実験を行った。評価実験の結果を Figure 4 (左列) に示す。(i)～(iv) は 3.1 節で述べた移動シナリオである。縦軸は被追跡ノードと追

跡ノードの相対距離、横軸はステップである。横軸の値が大きくなるほど時間が経過することを表す。

Figure 4 (左列) のグラフより、追跡ノードが静止し続けると、被追跡ノードが直線移動する場合には時間の経過とともに相対距離が大きくなり発散するが、ランダム移動する場合には発散しないことが分かる。これは、被追跡ノードがランダム移動する場合、一様な確率でその移動方向が決定されるようにしたため、時間が経過しても初期位置からあまり大きく変化しないからである。 $\alpha\beta$  フィルタを用いた手法は、測定距離の誤差を考慮しても被追跡ノードの位置をほぼ正確に把握できるため、相対距離を一定に保ちながら追跡できる。一方、ランダム法についてはどのシナリオにおいても相対距離が発散することが分かる。移動範囲制限法、最短移動仮説法については、近づいたり離れたりを繰り返しながら、どのシナリオでも発散せずに継続して追跡できている。

この評価実験により、移動範囲限定法、最短移動仮説法、 $\alpha\beta$  フィルタを用いた手法、および被追跡ノードがランダム移動する場合は追跡ノードが静止し続けても相対距離が発散しないことが分かった。そこで、以降の評価実験では追跡性能の評価値として、シミュレーションを 1000 ステップまで行った相対距離の平均値を用いる。なお、ランダム法はどのシナリオにおいても発散することが確認されたので、以降の評価実験の結果では記載しない。

### 3. 3 相対距離の誤差

実際には、ビーコンの指向性や反射の影響で発生する測定距離の誤差は、周囲の環境や距離の測定方法により異なる。そこで、追跡ノードが測定する相対距離の誤差率に関する評価実験を行った。測定距離の誤差率以外のパラメータは Table 2 の値を用いた。評価実験の結果を Figure 4 (中列) に示す。縦軸は被追跡ノードと追跡ノードの平均相対距離であり、横軸は追跡ノードが測定する相対距離の誤差率を表す。

Figure 4 (中列) のグラフから、提案手法はどのシナリオにおいても測定距離の誤差率が大きくなると平均相対距離も大きくなり、測定距離の誤差の影響を受けやすいことが分かる。これは 3.2 節で述べたように、提案手法では近づいたり離れたりしながら追跡を行うため、離れた時に測定する相対距離の誤差が大きくなるのが原因であると考えられる。特に過去の相対距離情報から範囲を限定する移動範囲限定法は測定距離の誤差に影響を受けやすい。提案手法では、どのシナリオにおいてもある一定以上誤差率がある場合は、平均相対距離が非常に大きくなり十分に追跡を行えない。

### 3. 4 被追跡ノードと追跡ノードの最大速度比

被追跡ノードの最大速度に対する追跡ノードの最大速度の比率をパラメータとして、提案手法の追跡性能に関する評価実験を行った。最大速度比以外のパラメータは Table 2 の値を用いた。評価実験の結果を Figure 4 (右列) に示す。縦軸は被追跡ノードと追跡ノードの平均相対距離、横軸は被追跡ノードに対する追跡ノードの最大速度比である。例えば、最大速度比が2の場合、追跡ノードは被追跡ノードより2倍の速さで移動可能であることを示す。

Figure 4 (右列) のグラフより、被追跡ノードの移動シナリオにより性能のよい手法が異なることが分かる。被追跡ノードが直線的に移動する場合、追跡ノードの最大速度が小さいときは移動範囲制限法が有効であるが、最大速度が大きい場合では最

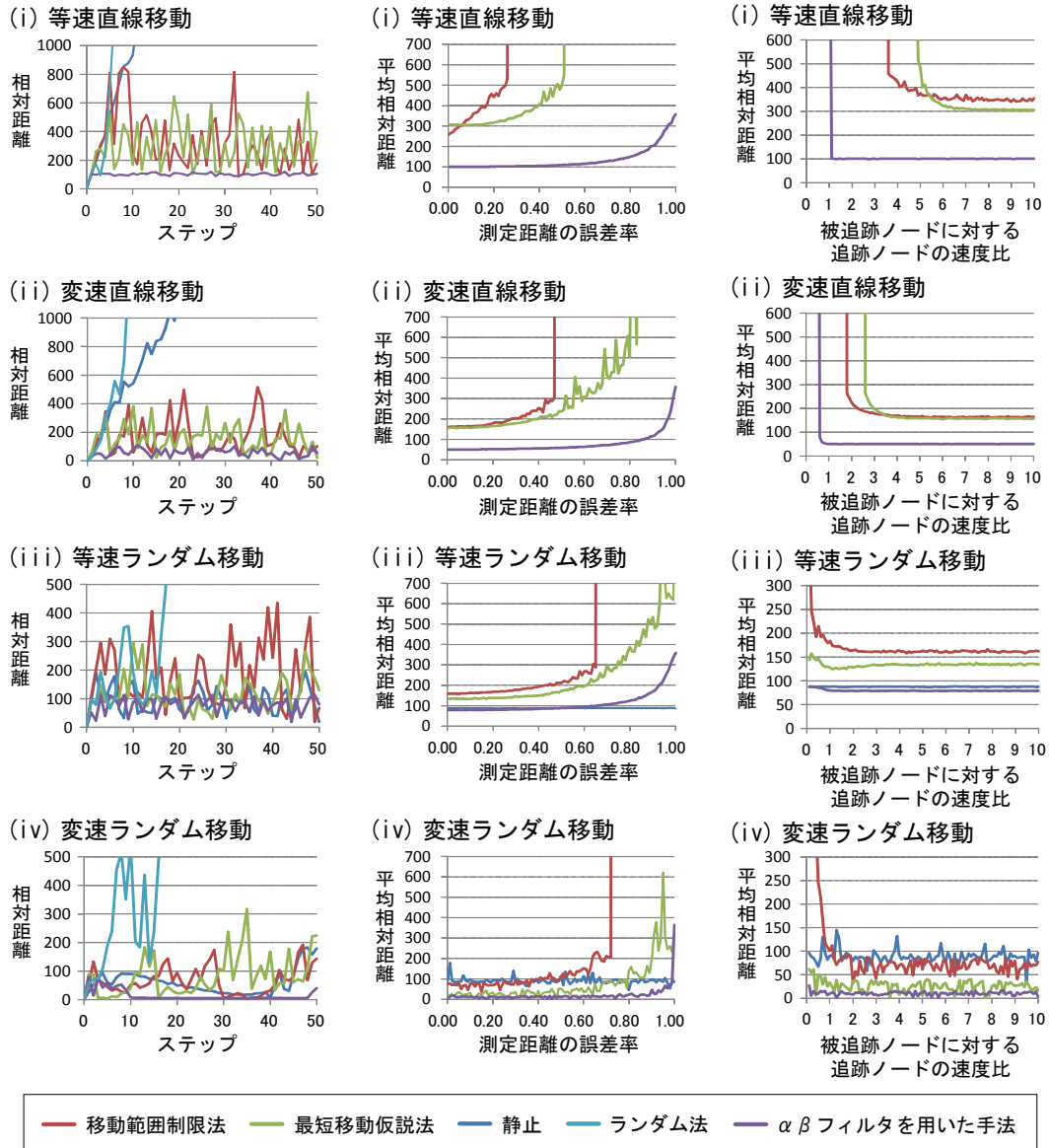


Fig. 4 Result of evaluation experiments

短移動仮説法が有効なことが分かる。また、被追跡ノードの移動がランダム移動のように不規則になると最短移動仮説法が有効なことが分かる。

### 3. 4 移動範囲制限法で用いる過去の相対距離の数

移動範囲制限法では異なる場所における過去数回分の相対距離を用いて追跡目標点を決定するが、何回分の過去の情報を考慮すべきかについて評価実験を行った。移動範囲制限法で使用する過去の相対距離情報の数以外のパラメータは Table 2 の値を用いた。評価実験の結果を Figure 5 に示す。

このグラフより、移動範囲制限法では2回前までの相対距離を利用すると十分なことが分かる。これは、3回より前の相対距離から限定される範囲は、1回前と2回前の相対距離から限定される範囲にほぼ含まれているためであり、ある一定以上の過去の相対距離情報は意味をなさなくなると考えられる。この考慮すべき過去の相対距離情報の数は、被追跡ノードの最大速度と平均相対距離に依存すると考えられる。

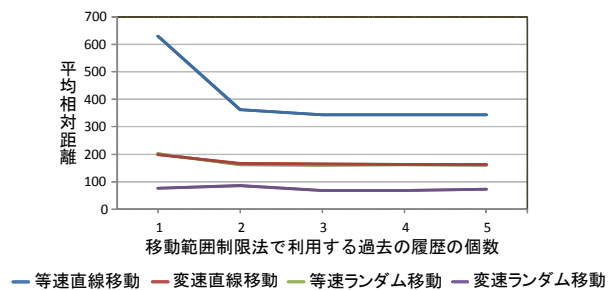


Fig. 5 Evaluation result of the restricting moving range method

## 4. 考察

### 4. 1 相対距離を用いた追跡手法

相対距離情報のみを用いた追跡の特性を評価するためのシミュレーション実験において、ランダム法のような単純な方法で

は追跡を行えないことを確認し、Figure 4 (左列) より提案手法では各ステップにおいては近づいたり離れたりを繰り返すものの、Figure 4 (中列, 右列) より、追跡ノードの速さが遅い場合や測定する相対距離の誤差が大きい場合を除いては、全体として被追跡ノードと追跡ノードの距離が収束することが分かった。また、追跡性能に差はあるが、パラメータの変化に応じて、相対距離と相対位置を把握して追跡を行う $\alpha\beta$ フィルタを用いた手法と同様の傾向を示すことが分かった。

次に、追跡性能について、相対距離の測定誤差が小さいとき、被追跡ノードに対して追跡ノードの速さが十分速いとき、被追跡ノードが直線移動する場合の平均相対距離について、 $\alpha\beta$ フィルタを用いた手法では、ビーコンを発射する合間に被追跡ノードが移動する平均距離とほぼ同じである。これは、追跡ノードは、被追跡ノードがビーコンを発射した位置を追跡目標点としたため、追跡ノードが追跡目標点に到達する間に被追跡ノードも移動するためである。提案手法における平均相対距離は、相対距離の測定誤差が小さく、被追跡ノードに対して追跡ノードの速さが十分速いとき、 $\alpha\beta$ フィルタを用いた手法の3倍程度であった。一方、被追跡ノードがランダム移動する場合は、 $\alpha\beta$ フィルタを用いた手法と比べて、提案手法の追跡性能は劣るが、特に最短移動仮説法の被追跡ノードが変速ランダム移動する場合は、大きな変化はない。

#### 4. 2 提案手法の特徴

提案した2手法を比べると、Figure 4 (右列) で示されるように、被追跡ノードが直線移動する場合で追跡ノードの最大速度が小さい場合は、移動範囲制限法が有効であるが、その他についてはほぼ最短移動仮説法が有効であることが分かる。これは3.3節で述べたように移動範囲制限法は測定距離の誤差に大きく影響を受けてしまうためである。また実際に移動端末を用いて実装する場合を考えると、移動範囲制限法は過去数回分の位置情報を蓄えておき、それらから追跡目標点を計算するため負荷が大きいが、最短移動仮説法ではそれほど負荷が大きくない。相対距離を用いた追跡手法としては、過去の相対距離情報から単純に被追跡ノードの位置を限定しながら追跡を行う手法よりも、最短移動仮説法のように過去の相対距離情報からある仮定をして追跡を行う手法が有効な場合が多いと考えられる。最短移動以外の仮定を行う追跡手法については、今後、検証する予定である。

### おわりに

本稿では、相対距離を用いて移動物体を追跡する方法として移動範囲制限法、最短移動仮説法を提案した。これらの手法の評価実験を行った結果、移動端末が不規則に移動する場合、相対距離を把握する間に移動端末が最短移動したと仮定する最短移動仮説法の性能がよいことが明らかになった。

今後は、最短移動仮説法以外の仮定を行った手法、被追跡ノードの動きを予測しながら追跡を行う手法、被追跡ノードが曲がるときにビーコンを出すといったビーコンの出し方が異なる場合の手法などを考える予定である。

[謝辞] 本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究(A) 23240010の研究助成によるものである。ここに記して、謝意を表す。

### Literature Cited

- 1) Hightower, J. and Borriello, G.; "Location Systems for Ubiquitous Computing," IEEE Computer, 34, 57-66 (2001)
- 2) Suzuki, R., Makimura, K., Saito, H. and Tobe, Y.; "Prototype of a Sensor Network with Moving Nodes," Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, E-S-1, 1, 52-57 (2006)
- 3) Sibley, G.T., Rahimi, M.H. and Sukhatme, G.S.; "Robomote: A Tiny Mobile Robot Platform for Large-Scale Sensor Networks," Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2002), 2, 1143-1148 (2002)
- 4) Miura, J., Morita, H., Hild, M. and Shirai, Y.; "A View-Based Outdoor Localization using Object and Location Recognition Based on Support Vector Learning" (in Japanese), Journal of the Robotics Society of Japan, 25, 5, 792-798 (2007)
- 5) Nagatani, K. and Yuta, S.; "Path and Sensing Point Planning for Mobile Robot Navigation to Minimize the Risk of Collision" (in Japanese), Journal of the Robotics Society of Japan, 15, 2, 197-206 (1997)
- 6) Irie, M., Nagatani, K., and Gofuku, A.; "Path Evaluation for a Mobile Robot Based on a Risk of Collision," Proceedings of the IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA 2003), 1, 485-490 (2003)
- 7) Steiner, I., Burgi, C., Werffeli, S., Dell'Omo, G., Valenti, P., Troster, G., Wolfner, D.P., and Lipp, H.P.; "A GPS logger and software for analysis of homing in pigeons and small mammals," Physiology and Behavior, 71, 589-596 (2000)
- 8) Nagumo, Y. and Ohya, A.; "Human Following Behavior of an Autonomous Mobile Robot using Light-Emitting Device," Proceedings of the IEEE International Workshop on Robot and Human Communication (ROMAN 2001), 225-230 (2001)
- 9) Nakamura, Y., Namimatsu, Y., Miyazaki, N., Matsuo, Y. and Nishimura, T.; "Topology Based Position and Direction Estimation using Relative Relationships of Infrared ID Tags" (in Japanese), IPSJ Journal, 48, 3, 1349-1360 (2007)
- 10) Takashima, M., Zhao, D., Yanagihara, K., Fukui, K., Fukunaga, S., Hara, S. and Kitayama, K.; "Location Estimation using Received Signal Power and Maximum Likelihood Estimation Method in Wireless Sensor Networks" (in Japanese), Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers B, J89-B, 5, 742-750 (2006)
- 11) Jazwinski, A.H.; "Stochastic Processes and Filtering Theory," Academic Press (1970)
- 12) Blackman, S.S.; "Multiple Target Tracking with Radar Applications," Artech House (1986)
- 13) Kosuge, Y., Kameda, H. and Mano, S.; "Kalman Filter and  $\alpha$ - $\beta$  Filters for Radar Tracking" (in Japanese), Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers B, J79-B-2, 7, 414-421 (1996).
- 14) Okusako, S. and Sakane, S.; "Human Tracking with a Mobile Robot using a Laser Range-Finder" (in Japanese), Journal of the Robotics Society of Japan, 24, 5, 605-613 (2006)

## Tracking Methods of Mobile Object using Relative Distances

Shoji SANO<sup>1</sup>, Tomoki YOSHIHISA<sup>2</sup>, Tsutomu TERADA<sup>3,4</sup>  
and Masahiko TSUKAMOTO<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Graduate School of Science and Technology, Department of Informatics and Electronics*

<sup>2</sup>*Cybermedia Center, Osaka University*

<sup>3</sup>*Graduate School of Engineering, Department of Electrical and Electronic Engineering*

<sup>4</sup>*PRESTO, Japan Science and Technology Agency*

**Key words:** Tracking Method, Relative Distance, Mobile Object, Sensor Network

Due to the recent development of robotics and sensing technology, many researchers are focusing on movable computers. Some of them consider tracking other movable computers and use their absolute position by GPS or relative position by electronic wave. Unfortunately, there are problems on the size of equipments for recognizing these positions. Hence, in this paper, we propose tracking methods of a movable computer using only relative distance. Since the methods only use the distance information, our methods enable compact computers such as sensors to follow another computer. In our methods, we use relative distance and the past relative distance and tracking point to decide the next tracking point. As a result of our evaluation, we confirmed that a method that uses an assumption gives better performance when the movement of a tracked node is random.