

# カメラと無線タグのフュージョンによる移動体位置推定

Mobile Target Tracking Based on Sensor Fusion of Camera and Radio Tag

山上 勝義  
Katsuyoshi Yamagami

谷川 徹  
Toru Tanigawa

## 要 旨

本稿では、カメラと無線タグによる移動体トラッキングシステムの実現を目的とした、センサフュージョンによる移動体位置推定方式について述べる。カメラから移動体の識別情報が出力されない条件では、物体位置推定精度が悪化するが、センサフュージョン処理の計算過程においてカメラに対する識別情報を近似的に生成することで位置推定精度を改善した。さらに、従来の移動体トラッキング方式で位置推定が失敗しやすい状況に対してロバストな位置推定ができることを示す。

## Abstract

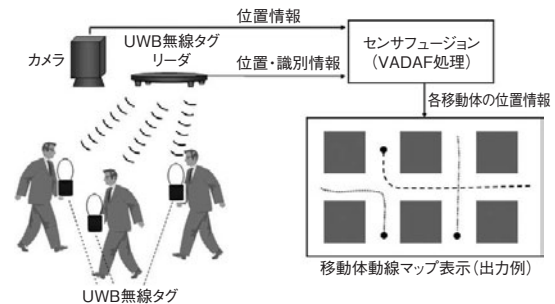
In this paper, we describe a method of object location estimation based on sensor fusion, aiming for a mobile object tracking system with a camera and a radio tag. If the camera doesn't provide information to identify the mobile object, the estimation accuracy becomes poor. We improved the accuracy by approximating camera's identification in sensor fusion calculation. In addition, we show the robustness of the estimation method particularly in situations in which the conventional method may easily fail.

## 1. はじめに

セキュリティ分野におけるニーズとして人の動線管理がある。カメラの監視範囲にある人の位置をトラッキングして動線として記録し、かつ、各動線と写っている個人の識別情報 (ID) を対応づけるものである。オフィスへの入退室管理や、工場内での作業動線分析への用途展開、さらには、物流現場でのトレーサビリティ管理への用途展開が有望である。

従来の動線管理システム[1]では、監視カメラとUHF (Ultra-High Frequency) 帯のRFID (Radio Frequency Identification) タグを組み合わせ、カメラ映像から分析した人の動線に対して、人が所持するRFIDタグで識別した個人IDを対応づけるようにしている。しかし、UHF帯のRFIDタグは検知範囲を狭い空間に限定してRFIDタグの検知位置を特定する仕組みであるため、RFIDタグ検知範囲外では人の動線と個人IDとの対応づけが直接できない。そのため、画像処理による動線接続の処理を行っているが、動線と個人IDの対応づけ性能が、動線接続処理のエラーに影響されるという欠点がある。

一方、われわれは第1図に示すような、1点計測のUWB (Ultra Wide Band) 無線タグ[2]とカメラを組み合わせた移動体 (人) トラッキングシステムの開発を行っている。目的とする機能は、同じく監視領域の人の動線管理である。1点計測のUWB無線タグ (以下、無線タグと記す) は、10 m半径程度の検知範囲をもっており、検知範囲内の任意の位置にある無線タグの位置と個人ID情報を計測可能である。無線タグがもつ個人ID情報と



第1図 カメラとUWB無線タグのフュージョンによる移動体トラッキングシステム

Fig. 1 Mobile object tracking system with camera and UWB radio tag

各移動体の動線との対応づけが常時可能であり、従来システムの動線接続処理が不要でロバストに動線管理ができるメリットがある。ただし、複数の移動体の位置をトラッキングしつつ、おのおのの移動体のID識別を行うために、無線タグの観測情報 (位置・ID情報) と、カメラの観測情報 (位置) を融合する仕組みが必要である。

われわれはVADAF (Variational Approximation Data Association Filter) [3]を応用し、無線タグとカメラのセンサ融合 (センサフュージョン) 方式を開発した。VADAFによるセンサフュージョンの仕組みでは、センサから得られる観測値と観測された移動体の対応関係を確率モデル化したアソシエーション値を求める必要がある。個々の移動体を区別しつつ精度よく位置トラッキングを行うためには、このアソシエーション値が適切に計算できることが要件となる。しかし、想定する移動体ト

ラッキングシステムの仕様の制約から、カメラが移動体を区別するためのID情報を出力できないことを前提にしなければならないため、アソシエーション値が適切に計算されず、アソシエーション値が表す観測値と移動体の対応関係が曖昧（あいまい）になり、移動体の位置推定精度の悪化が生じた。この問題に対して、同一の観測対象（移動体）を連続して観測しているか否かの情報をカメラが出力できることに着目し、カメラが出力しない識別情報を近似的に求める方式を考案した。この方式により、アソシエーション値の計算が適切に行われ、観測値と移動体の対応関係が明確になり、移動体の位置推定性能が改善する。

## 2. VADAFによる位置推定方式の実装

### 2.1 VADAFによる物体位置推定の概要

まず、VADAFによる物体位置推定の枠組みについて説明する。VADAFはオンラインバイズ推定手法の一種であり、複数の物体の位置推定分布（物体位置の確率分布）を、物体自身の運動モデルを考慮しながら、物体の位置情報とID情報を含む観測値がセンサから得られるたびに、物体の位置推定分布を更新することで物体の位置推定を逐次的に行う。処理は次の3つのステップを繰り返す形で構成される。

#### [1] 予測ステップ

時刻 $t-1$ の物体位置推定分布（事前分布） $p(x_{i,t-1}|Y_{1:t-1})$ から物体の運動モデル $p(x_{i,t}|x_{i,t-1})$ に従って、時刻 $t$ の物体位置推定分布（予測分布） $p(x_{i,t}|Y_{1:t-1})$ を求める（(1)式）。

$$p(x_{i,t}|Y_{1:t-1}) = \int p(x_{i,t}|x_{i,t-1})p(x_{i,t-1}|Y_{1:t-1})dx_{i,t-1} \dots \dots \dots (1)$$

$x_{i,t}$ は物体 $i$ の時刻 $t$ の位置の確率変数

$Y_{1:t}$ は時刻1から $t$ までの全観測値

を表す。

#### [2] データアソシエーションステップ

時刻 $t$ の観測値 $y_{i,t}$ がどの物体を観測したかの確率（アソシエーション値）を求める（(2)式）。

$$q(r_{i,t}=i;X_t^*) = p(y_{i,t}|x_{i,t}^*, r_{i,t}=i) \cdot p(r_{i,t}=i|x_{i,t}^*) \cdot \eta \dots \dots \dots (2)$$

(2)式の $r_{i,t}$ は観測値 $y_{i,t}$ がどの物体を観測して得られたのかを表現する変数である。 $r_{i,t}=i$ の場合、観測値 $y_{i,t}$ が物体 $i$ を観測して得られたという事象を表す。 $q(r_{i,t}=i;X_t^*)$ はその事象の確率（アソシエーション値）を表す。 $x_{i,t}^*$ は物体 $i$ の予測分布 $p(x_{i,t}|Y_{1:t-1})$ の最尤（さいゆう）推定値であり、 $X_t^*$ は全物体に関する予測分布の最尤推定値である。

(2)式の $p(y_{i,t}|x_{i,t}^*, r_{i,t}=i)$ は位置尤度（ゆうど）であり、最尤推定値 $x_{i,t}^*$ と観測値 $y_{i,t}$ の位置の相対距離から求まる確率値（尤度）である。(2)式の $p(r_{i,t}=i|x_{i,t}^*)$ はID尤度であり、観測値 $y_{i,t}$ がもつID情報（どの物体を観測したかの情報）

の確率値（尤度）である。 $\eta$ は正規化定数である。

#### [3] 分布更新ステップ

予測分布 $p(x_{i,t}|Y_{1:t-1})$ に対して、得られた観測値の尤度 $p(y_{i,t}, r_{i,t}=i|X_t)$ をアソシエーション値 $q(r_{i,t}=i;X_t^*)$ で重みづけして積算することで、観測値で更新した物体の位置推定分布を得る（(3)式）。

$$p(x_{i,t}|Y_{1:t}) \approx \left\{ \prod_{j=1}^l p(y_{i,t}, r_{i,t}=i|X_t)^{q(r_{i,t}=i;X_t^*)} \right\} \cdot p(x_{i,t}|Y_{1:t-1}) \dots \dots (3)$$

$X_t$ は時刻 $t$ における全物体の位置

$l$ は観測値の総数

を表す。

## 2.2 無線タグとカメラによるVADAF実装

次に実際に無線タグとカメラをセンサに用いたVADAFの実装について説明する。無線タグの観測値はID情報を含み、どの物体を観測したのかが確実に分かるため、無線タグの観測値 $j$ が物体 $k$ を観測して得られた場合には、ID尤度は(4)式となる。

$$p(r_{i,t}=i|x_{i,t}^*) = \begin{cases} 1 \dots (i=k \text{ のとき}) \\ 0 \dots (i \neq k \text{ のとき}) \end{cases} \dots \dots \dots (4)$$

(4)式を(2)式に適用すると無線タグの観測値 $j$ のアソシエーション値は、物体 $k$ 以外に対して0となるので、観測値 $j$ は観測した物体 $k$ の位置推定分布の更新にのみ寄与する。

一方、カメラの観測値はID情報を含まないため、どの物体を観測して得られた観測値かが分からない。カメラの観測値とすべての物体とのID尤度は等確率となり(5)式で表される。

$$p(r_{i,t}=i|x_{i,t}^*) = \frac{1}{N} \dots (N \text{ は物体数}) \dots \dots \dots (5)$$

(5)式を(2)式に適用するとカメラの観測値 $j$ のアソシエーション値は、すべての物体に対して0でない値をもつので、観測値 $j$ が物体 $k$ を観測して得られた観測値であったとしても観測値 $j$ は物体 $k$ 以外の位置推定分布の更新にも寄与する。観測値が本来観測している物体以外の位置推定分布の更新に作用するため、物体の位置推定誤差を増大させる原因となる。

## 2.3 カメラの制約による位置推定精度悪化の課題

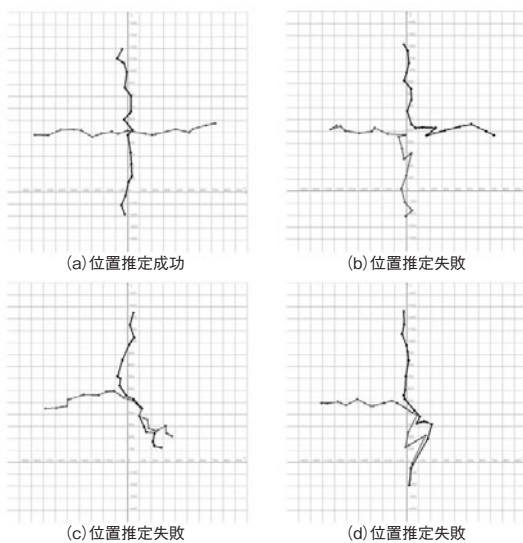
カメラの観測値がID情報を含まないことを前提とする理由は、カメラの撮影映像に基づいたID情報の取得は、画像認識などでの個人の識別が必要で困難だからである。

第1図に示す移動体（人）トラッキングシステムの場合では、観測対象の人の服装や髪型が日々変化するなどの問題や、顔など個人識別に有利な画像特徴であっても、

特定の撮像方向に依存するといった問題があり、広範囲で安定的に識別を行うことが事実上困難である。

カメラがID情報を出力しない場合の例として、2人の人が、1人が左から右へ、もう1人が上から下へ移動して直角にすれ違う場面のシミュレーションでの人の位置推定結果の例を、第2図に示す(図の1目盛りは1m)。第2図(a)は、2人が本来移動したとおりに正しく位置が推定された結果の例である。第2図(b)は、2人が本来移動した経路とは異なり2人が入れ違って推定された結果の例である。第2図(c)は、2人の移動経路がすれ違い付近から以降、互いの中間位置に位置推定分布が引き寄せられて位置推定に失敗した結果の例である。第2図(d)は、2人の移動経路がすれ違い付近から以降、1人の移動経路に位置推定分布が引き寄せられて位置推定に失敗した結果の例である。

カメラ観測値にID情報が含まれないことに起因する物体位置推定誤差の増大により、第2図(b)、(c)、(d)に示すような移動軌跡の推定の失敗が多発する。



第2図 位置推定の成功例と失敗例

Fig. 2 Example of correct tracking and error tracking

### 3. 同一物体の追跡尤度によるID尤度の近似

上記の課題を解決するために、無線タグとカメラを用いたVADAF実装において、以下の2点に注目した。

- 1) カメラのID情報出力がない場合でも、対象物が観測された時点で画像特徴を学習し、観測フレーム間で同一の対象物体を観測したか否かの判別を行うことは可能である。
- 2) VADAFで算出されるアソシエーション値は、ある観測時点での観測値と物体位置推定分布の対応の確からしさを表しており、観測時間間隔が短い場合、次の観測時点での同一物体に対するカメラ観測値のID尤度をアソシエーション値から近似することが可能である。

ここで、1)の点から、観測時刻 $t-1$ でのカメラ観測値と、観測時刻 $t$ でのカメラ観測値の2つの観測値が、同一物体を観測して得られたものかどうか判断できるとする。

2つの観測値が同一物体を観測した観測値である場合、2)の点を考慮して、観測時刻 $t-1$ でのカメラ観測値から得た各物体に対するアソシエーション値 $q(r_{t-1,j}=i; X_{t-1}^*)$ を、(6)式に示すように観測時刻 $t$ でのカメラ観測値の各物体に対するID尤度として割り当てる。

$$p(r_{t,j}=i|x_{t,i}^*) = q(r_{t-1,j}=i; X_{t-1}^*) \cdots \cdots \cdots (6)$$

一方、観測時刻 $t$ で得られたカメラ観測値が観測時刻 $t-1$ で観測したどのカメラ観測値の物体とも同一物体ではない場合は、観測時刻 $t$ のカメラ観測値はどの物体を観測して得られたかが不明であるので、(5)式に示すように観測時刻 $t$ のカメラ観測値の各物体に対するID尤度を一様分布とする。

実際のカメラでは観測間隔( $t-1 \sim t$ )前後で同一の物体を観測したかどうかを確実に判断できる訳ではない。そこで、カメラが同一物体を観測したことの信頼度に相当する同一物体の追跡に成功する確率を追跡尤度 $PT_{j,t}$ として導入する。追跡が成功した場合のID尤度を表す(6)式と追跡が成功しない場合のID尤度を表す(5)式を(7)式に示す形で線形結合しカメラ観測値のID尤度として近似する。

$$p(r_{t,j}=i|x_{t,i}^*) = PT_{j,t} \cdot q(r_{t-1,j}=i; X_{t-1}^*) + (1-PT_{j,t}) \cdot 1/N \cdots \cdots (7)$$

カメラ観測値に対するID尤度の近似により、ID情報を含まないカメラ観測値に対しても、各物体に対して直前の観測時刻でのカメラ観測値と物体の対応関係を反映した(一様分布ではない)ID尤度確率分布が得られるため、カメラ観測値と物体との対応関係の曖昧さに起因する位置推定誤差の増大の緩和が期待できる。

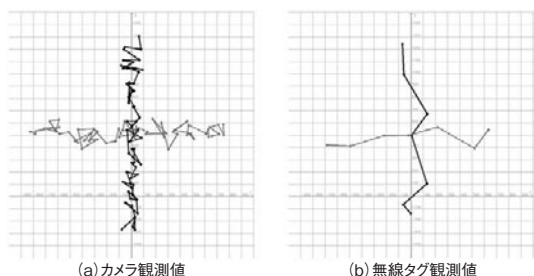
## 4. 移動体位置推定精度評価

### 4.1 シミュレーションモデル

カメラ観測値のID尤度近似の効果を評価するためシミュレーション実験を行った。シミュレーションのシーンは、2人の人が、1人は左から右へ移動し、もう1人が上から下へ移動して直角にすれ違うよう設定した。人は1 m/sの速度で15 m移動する。

カメラの観測周期は300 ms、無線タグの観測周期は1 sである。センサの観測値の位置誤差特性をカメラの観測値が $1\sigma=50$  cm、無線タグの観測値が $1\sigma=70$  cmとして、ガウス分布での位置誤差を重畳した観測値を生成した。これらセンサに関する設定値は、開発中の移動体トラッキングシステムで用いる予定の実センサの想定スペックに合わせている（文献[1]で無線タグの誤差は1 m以内という結果を得ているが、無線タグとアンテナの間に人体が存在する場合の誤差増大を加味して、誤差1 m以内の確率が85 %となる $1\sigma=70$  cmに設定した）。

第3図にシミュレーションで生成した人の観測値のデータ例を示す（1目盛は1 m、観測データが生成された時間順序を反映し、第2図と同様に折れ線で表示）。第3図(a)はカメラの観測値の生成データ例、第3図(b)は無線タグの観測値の生成データ例である。

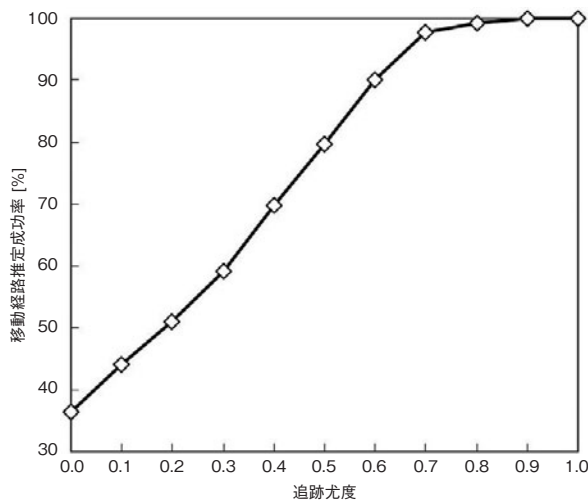


第3図 カメラと無線タグの生成した観測データ例  
Fig. 3 Example of generated sensing data

### 4.2 評価結果

第2図(a)のように正しく2人の移動経路を推定した場合を成功、第2図(b), (c), (d)のように2人の移動経路を誤って推定した場合を失敗として、1000回のシミュレーション試行により移動経路の推定成功率を求めた。

第4図にカメラの追跡尤度の値と移動経路の推定成功率をプロットしたグラフを示す。第4図で追跡尤度が0の場合が、カメラ観測値のID尤度近似を用いない場合に相当する。ID尤度近似を用いない場合は、移動経路の推定誤りが多発し移動経路の推定成功率は36 %と低



第4図 追跡尤度の変化に対する移動経路推定成功率  
Fig. 4 Tracking accuracy in variable following rate

い。一方で、ID尤度近似を用いる場合は、追跡尤度の値が大きくなるにつれて、つまり、カメラの観測間隔間での画像特徴による同一人物の追跡処理の信頼度が上がるにつれて、移動経路の推定成功率は大幅に向上した。

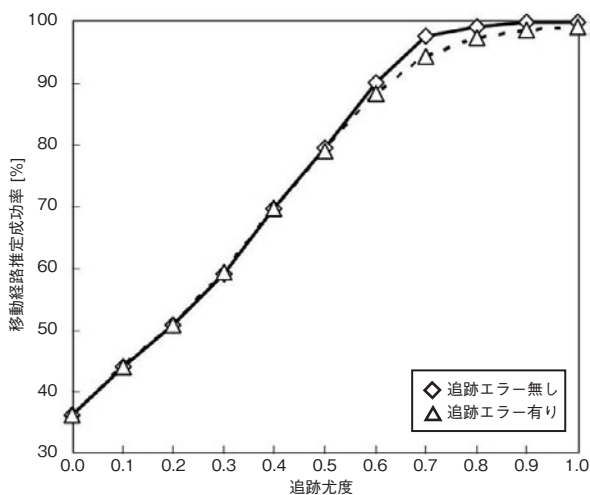
このシミュレーション結果から、VADAFの枠組みにアソシエーション値によるカメラ観測値のID尤度近似を導入する方式が有効であることが分かる。観測値と物体の対応関係が明確になり、位置推定精度悪化の問題が改善されている。ただし、追跡尤度の値が大きくなるほど、移動経路の推定成功率が上がることに限っては、ID尤度近似が有効に働く場合には、事前に想定できる結果である。

第4図のシミュレーション結果では、シミュレーション中の追跡尤度を固定としているが、実際にカメラでの同一人物追跡機能を実装した場合は、物体を観測し同一物体の追跡処理が行われるたびに0～1.0の信頼度値が割り当てられる。特に2人の人がすれ違う付近では、追跡処理が失敗する可能性が高い（追跡尤度が0になる）。

追跡処理の失敗の影響の評価として、第5図に2人の人がすれ違う前後でカメラの追跡処理が失敗して追跡尤度が0となる場合の経路推定成功率のグラフを示す。第5図の追跡エラー無しのプロット結果は、第4図のプロット結果と同じである。

追跡エラー有りの場合でも、追跡エラー無しのプロット結果に比べ経路推定成功率がわずかに低下するのみであり、追跡処理の失敗に対してロバストである。

この追跡処理の失敗は、従来システム[1]における動線接続処理の失敗に相当する。同じ条件のシーン設定で



第5図 すれ違い時の追跡エラー有りの移動経路推定成功率

Fig. 5 Tracking accuracy with crossing tracking error

従来システム[1]の方式で経路推定を行った場合は、2人がすれ違う前後で動線接続処理が失敗すると、最終的な経路推定成功率は少なくとも50%程度まで低下すると考えられる（動線接続が失敗すると経路推定の成功・不成功がチャンスレベル以下となるため）。

## 5. まとめ

本稿では、逐次ベイズ推定の枠組みに基づく複数物体位置推定方式（VADAF）を応用したカメラと無線タグのセンサフュージョンによる移動体トラッキング方式について述べた。カメラがID情報を出力できないという前提において、移動体の位置推定精度が悪化する課題に対して、カメラが出力できないID情報をVADAFの計算過程で算出されるアソシエーション値で近似する方式を開発した。この方式の適用により位置推定精度が改善されることをシミュレーションにより確認した。また、従来の動線管理システムでは動線管理に失敗しやすい条件において、本方式ではロバストに移動体位置推定できることを確認した。

今後の課題として、カメラに同一物体の追跡機能を実装して、実環境での評価を行うことがある。同一物体の追跡処理としては、パーティクルフィルタ[4]を用いた手法[5]の適用を検討していく。また、追跡尤度が高い場合でも移動経路推定に失敗するケースへの対策も課題である。物体の位置推定分布と観測値の位置が離れすぎてしまうと、位置推定誤差がさらに広がることから生じる問題である。VADAFの逐次位置推定の方角を、部分的に時間逆方向に遡（さかのぼ）る方向で行うことで、

位置推定分布と観測値の位置ずれの拡大を抑える方式を検討する。

## 参考文献

- [1] 原田典明 他, “人物行動を把握する画像解析技術と適応例,” NEC技報, vol.63, no.3, pp.39-43, 2010.
- [2] 中川洋一 他, “マイクロ波UWBの一点測位技術開発,” パナソニック技報, vol.57, no.1, pp.54-59, 2011.
- [3] H. Kanazaki et al., “Variational approximation data association filter,” 15<sup>th</sup> European Signal Processing Conference, EUSIPCO, 2007.
- [4] M. Isard et al., “CONDENSATION - conditional density propagation for visual tracking -,” Intl. J. of Computer Vision, vol.29, no.1, pp.5-28, 1998.
- [5] 圓田直樹 他, “AdaBoostとパーティクルフィルタによる移動物体追跡の効率化,” 第6回情報科学フォーラム, pp.13-16, FIT, 2007.

## 執筆者紹介



山上 勝義 Katsuyoshi Yamagami  
R&D本部 クラウドソリューションセンター  
クラウドサービス開発室  
Cloud Service Development Office, Cloud  
Solutions Center, R&D Div.



谷川 徹 Toru Tanigawa  
R&D本部 クラウドソリューションセンター  
クラウドサービス開発室  
Cloud Service Development Office, Cloud  
Solutions Center, R&D Div.