

# 分散視覚エージェントを用いた複数人物追跡システム

中澤 篤 志<sup>†</sup> 日浦 慎 作<sup>††</sup>  
加藤 博 一<sup>†††</sup> 井口 征 士<sup>††</sup>

本論文では、複数の観測エージェントによって環境の観測を行う「分散観測システム」を用いて、複数対象の同時追跡を可能にする手法を提案する。本システムは画像入力・処理機能および通信機能を持つ複数の「観測ステーション」から構成されており、その上には自律的に画像認識を実行するプログラム（観測エージェント）が並列動作する環境が実装されている。観測エージェントは各観測ステーションにおいて観測可能な対象と1対1に対応し、自律して対象の追跡・位置計測・色情報の取得を行う。複数の観測ステーションによって複数対象を効果的に観測するためには、複数の観測ステーションで観測している対象の対応付けが不可欠である。本システムでは、同一対象を注視する観測エージェントが「エージェンシー」と呼ぶエージェントの集団を形成することでこの問題を解決する。このエージェンシーの形成は、観測エージェントが互いの観測結果を相互評価することにより行われる。実験では複数台の観測ステーションが存在する広域において、複数人物が歩き回るタスクを行った。人物領域の重なりなど対象の同定が困難になる状況が生じたが、正しく対象を追跡することが可能であった。また、計算機上のシミュレーション実験によって本アルゴリズムと従来の情報集中型アルゴリズムとの違いを明らかにした。

## Tracking Multiple Persons Using Distributed Vision Systems

ATSUSHI NAKAZAWA,<sup>†</sup> SHINSAKU HIURA,<sup>††</sup> HIROKAZU KATO<sup>†††</sup>  
and SEIJI INOKUCHI<sup>††</sup>

This paper shows the multiple targets watching method using the Distributed Vision Systems (DVS). DVS is constructed with some “watching stations” that consist of a camera and an image processor and a computer network connects them. On each watching stations, visual perception programs (called “seeing agents”) works in parallel and they correspond with targets one-to-one. Each seeing agent tracks a target and measures its position and typical colors. The target matching between watching stations is necessary to realize effective distributed observation. In our systems, this method is achieved by grouping agents into ‘agency’ that are watching same targets. This grouping is done according to their measurement results. We tested this algorithm on two experiments. One is run on the real scene and another is a computer simulation. The former experiment shows our method is effective for multiple target tracking tasks on real scene, and later show the difference between our algorithm and conventional information-centralized algorithm.

### 1. はじめに

環境中に視覚機能と通信機能を持つ観測ステーションを複数設置し、リアルタイムに環境の観察を行う

「分散協調視覚システム」が研究されている<sup>1),2)</sup>。このようなシステムが実現可能になれば、福祉や ITS などの場で必要とされている広域分散システムによる多目的監視や、ネットワークメディアのコンテンツとして応用する可能性など、様々な用途が考えられる<sup>3)~5)</sup>。この枠組みに入る研究は様々なものがあるが、シーン中の特定の対象を注視（追跡）し、対象に関する知識の獲得・認識を行う研究はその中核をなすものである<sup>6)</sup>。複数の視覚センサを用いることで、観測の精度やロバスト性の向上、単眼のカメラでは実現不可能な広域シーンの観察などが可能になる。しかしこの類のシステムによる目的の1つである「複数対象の同時追跡」を行うためには、1) 複数対象の観測を可能にす

<sup>†</sup> 東京大学生産技術研究所, 科学技術振興事業団 (JST)  
Institute of Industrial Science, The University of  
Tokyo, Japanese Science and Technology Corporation  
(JST)

<sup>††</sup> 大阪大学大学院基礎工学研究科システム人間系専攻  
Department of Systems and Human Science, Graduate  
School of Engineering Science, Osaka University

<sup>†††</sup> 広島市立大学情報科学部情報機械システム工学科  
Department of Information Machines and Interfaces,  
Faculty of Information Sciences, Hiroshima City  
University

るシステム構成，2) 観測ステーション間での対象の対応付け，といった問題が解決されなければならない。

一方，我々は従来から複数の視覚システムによって広域環境中で人物を追跡するシステムを構築してきた<sup>7)</sup>。このシステムの観測ステーションは単独で複数の人物を追跡することが可能なため，複数の人物を同時に追跡することが可能である。しかし，複数対象の安定した追跡を実現する「観測ステーション間の対象の対応付け手法」は実装されておらず，画像上で人物像が近接するなどのイベントにより，ステーション間で観測対象の対応付けミスが生じることが確認されていた。このため，多視点から観測した同一対象の情報を統合するという分散視覚システムの長所を生かすことができなかった。

本論文ではこのシステムを拡張し，前述した2つの技術的課題を解決する手法について述べる。システム構成としては，観測ステーション上で複数の観測プログラム（観測エージェント）を並列に実行し，1台の観測ステーションで複数の対象を同時観測可能にした。観測ステーション間の観測対象の対応付け手法としては，同一対象を観測する観測エージェントが追跡対象の特徴情報を基に「エージェンシー」というグループを作る仕組みを実装した。このグルーピング処理は，観測エージェントどうしの相互評価に基づいて自律的に行われ，集中管理的な存在を持たない。このため，従来の「情報集中型の認識システム」と異なる特徴を持つ。

以降，2章ではアルゴリズムの概要を述べ，3章には実装したシステムの概要，4章以降では複数人物を対象にした追跡実験および考察を行う。

## 2. アルゴリズムの概要とその特長

本章ではシステムの構成，および観測ステーション間の対象対応付けアルゴリズムの概要を述べる。

### 2.1 システムの構成とアルゴリズムの概要

本システムの構成を図1に示す。観測ステーションはカメラが結合された計算機であり，環境中の複数の地点に配置される。対象の観測を行うプログラム（観測エージェント）は，1台のステーション上で複数並列動作し，各々が自律して対象を観測する能力を持っている。それぞれの観測ステーションにおいて，観測エージェントは観測可能な対象に対して1対1に生成され，対象を観測しその画像特徴を計測する。

ある対象が複数ステーション上のエージェントで同時観測される場合，同一対象を観測するエージェントどうしは「エージェンシー（agency）」と呼ぶエージェ

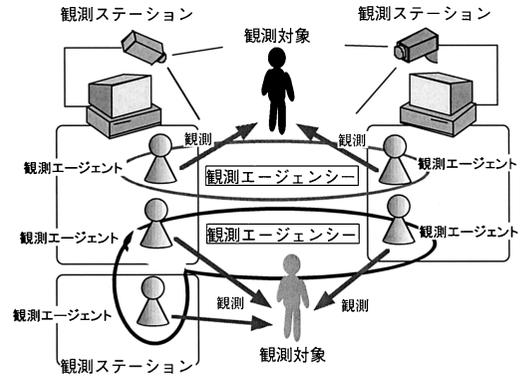


図1 システムの構成

Fig. 1 The system's overview.

ントの集合にグルーピングされる。つまり本システムにおける観測ステーション間の対象の対応付けとは，このグルーピング処理を行うことと同義である。同様に，観測ステーション間の対象の対応付けエラーの解消は，“エージェントが既存のエージェンシーから離脱し他のエージェンシーへ参加する”といった「エージェンシーの再構成」を行うことで実現できる。

### 2.2 エージェントのグルーピング

エージェントのグルーピング（エージェンシー形成）を行う基準としては，各エージェントが持つ「確信度」パラメータが用いられる。これは各エージェントが与えられた対象を正しく観測している可能性を示す値であり，0以上1以下の値をとる。エージェントは自身の観測結果に応じてこの値を逐次更新する。システム内では，同一の対象に関する確信度の高いエージェントがグルーピングされ，エージェンシーを形成する。確信度が低下ししきい値以下になったエージェントは，エージェンシーから離脱し単独で観測を行う。

### 2.3 確信度の更新

前述したようにエージェントは，自らの観測結果を基に確信度を逐次更新する。すなわち，与えられた対象を正しく観測している場合には確信度を上げ，異なった対象を観測している可能性がある場合には確信度を下げる処理を行う。エージェントがこの可能性を知ることのできる情報として以下の要素があげられる。

#### 1) 画像上のイベント

追跡中に注視対象の画像領域が他の対象の領域と交わるなどのイベントが生じた場合，対象の対応付けミスが生じる可能性が高い。この場合には確信度を下げる操作を行う。

#### 2) 他のエージェントの観測結果との比較

複数ステーション間で複数対象をマッチングさせるために，各ステーションでの観測条件によって変動を

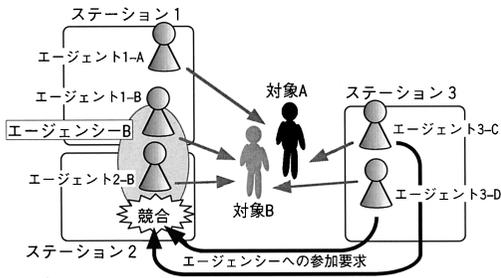


図 2-A エージェントの競合

Fig. 2-A The conflict between agents.

受けることが少ない観測特徴量を選択し対応付けに用いる。このような特徴量の場合、同一対象を観測しているエージェント（同一エージェントに属するエージェント）の観測結果は、ある程度の計測誤差は含まれるものの特徴空間上の距離は近くなる。逆に、他のエージェントに比べ大幅に異なった観測結果が得られた場合、そのエージェントは異なった対象を観測している可能性が高い。ゆえに、エージェントの観測結果と（同一エージェント内の）他のエージェントの観測結果との差がしきい値以上である場合には確信度を下げ、しきい値以下の場合には確信度を上げる操作を行う。

### 3) 過去の観測結果との比較

正しい対象を追跡している可能性が高い（確信度が高い）状態において、観測結果から得られる対象の特徴量を蓄積しておき、確信度が低い状況では、過去に蓄積された特徴量と現在の観測結果を比較することで、正しい対象を観測しているかを判断し確信度を更新する。

### 2.4 メディエータ

単独で観測するエージェントを既存エージェントに参加させる操作や、単独で観測するエージェントどうしを組み合わせさせてエージェントを生成する操作などは、観測エージェント間のやりとりのみでは競合が生じる場合がある。

図 2-A の状況では、観測ステーション 1 上のエージェント（1-B）と、観測ステーション 2 上のエージェント（2-B）が、対象 B を観測するエージェント B を作っている状況である。一方ステーション 3 から見ると、対象 B とそれに近接する対象 A は近接しており、それぞれを区別することは困難である。この状態において、ステーション 3 上のエージェント 3-C、3-D は単独で対象を追跡する状況となっていた場合、エージェント 3-C あるいは 3-D が個々にグルーピング処理を実行しようとする、双方がエージェント

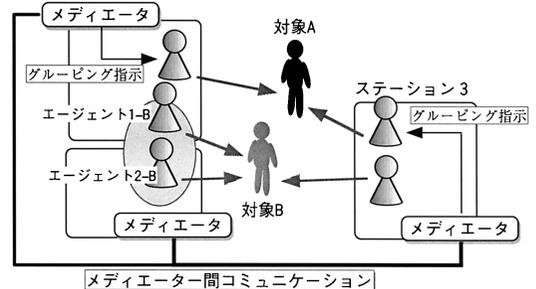


図 2-B メディエーター間コミュニケーションによるグルーピング

Fig. 2-B The grouping of agents using the mediator's communication.

B に参加要求を起こすため競合が生じる。

この問題を解決するため、各ステーション上に「メディエータ」というエージェントをおき、単独で観測するエージェント間の仲介処置を行う。すなわち、図 2-A のように対象の対応付けの判断が困難な状況ではグルーピング処理は行わず、図 2-B のように対象が分離できる状況においてエージェントの再構築を行うなどの処理を行う。

### 2.5 本構成の特長

本構成の特徴として以下の点があげられる。

- 1) 1 台のステーションで多数の対象を同時観測可能  
1 台の観測ステーションの視野内に複数の対象が存在する状況を想定した場合、「特定の対象を詳しく観察する」タスクであれば、パンチルト可能なカメラなどを用いて単一の対象を拡大・注視する構成<sup>6)</sup>が適当である。しかし、「視野内の多くの対象を同時観測する」といったタスクの場合、この構成では観測不能対象が生じる。本構成では後者のタスクに対処するため、1 台のステーション上で対象を観測する「観測エージェント」を複数個並列して動作させる構成とした。
- 2) エージェントの自律的動作

観測エージェントの対象の追跡・観測動作は自律的に行われ、集中管理サーバなどからの指示に従ったシステム<sup>8)</sup>ではない。このことは、2 つの意味でのロバスト性に寄与する。第 1 に、ステーションの障害などに対するロバスト性があげられる。各々のエージェントの観測は自律して行われるため、一部のエージェントの動作停止が他の存在に影響を与えない。第 2 に、観測のロバスト性の向上があげられる。観測対象が複数の観測ステーションの視野に入った場合、各ステーション上の観測エージェントで同時に観測が行われることになる。観測には誤差が生じるため各エージェントの観測結果はノイズを含んだものになるが、本システムではそれらを統合して唯一の解を導出・共有する

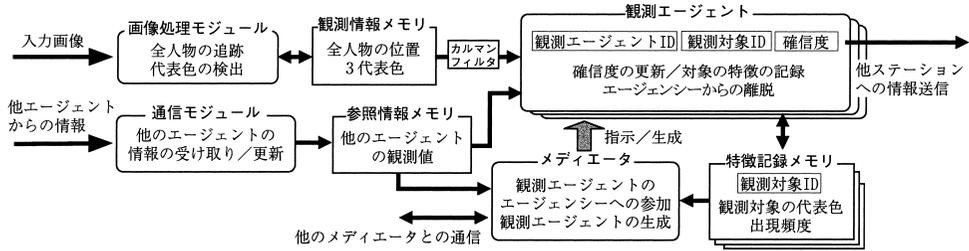


図3 観測ステーションの構成

Fig. 3 The architecture of the camera station.

のではなく、分散された各エージェントが独自の観測結果を保持する。このことにより、一部のエージェントにおいて大きな観測誤差が生じてても、システム全体ではいずれかのエージェントが正しい観測結果を得ている可能性が高く、その情報を基に誤りを訂正できる。このように複数のエージェントに異なる解を持たせることで、システム全体での観測のロバスト性に寄与するものと考えられる。

### 3. システムの実装

以上のアルゴリズムを観測ステーションに実装した。その構成を図3に示す。システム内のモジュールやエージェントは、UNIX スレッドによって並列動作している。このうち、各モジュールはシステムが動作する間つねに動作しているが、観測エージェントの個数はそのステーションで観測している対象数に応じて変化する。また、モジュール・エージェント間の情報のやりとりは3種の共有メモリによって行われる。

各々の観測エージェントには、システム内でユニークな値を持つエージェントIDが付けられている。また、各エージェントには観測対象IDも与えられているが、これによりエージェントが現在観測している対象を識別する。観測対象IDは0以上の値を持つが、エージェントが与えられた対象を見失い単独追跡を行っている場合にはこの値が0となる。同一の観測対象ID(>0)を持つエージェントどうしは、複数の観測ステーション間でエージェントを形成し、互いの情報を比較しあう。

#### 3.1 画像処理モジュール

画像処理モジュールでは、楕円体モデルを用いた追跡・位置検出手法<sup>9)</sup>を用いて人物の追跡や位置の計測を行う。この手法は背景差分画像と、人物の3次元楕円体モデルをカメラパラメータによって投影した画像を比較することによって、リアルタイム(10~30 frames/sec)のトラッキングを可能にしている。本手法ではモデルの生成を環境座標系中で行っているた

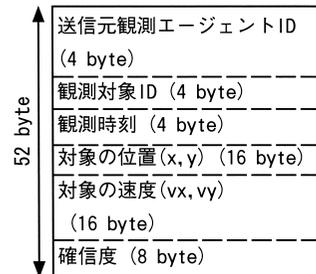


図4 通信パケットのフォーマット

Fig. 4 The packet format.

め計測結果も環境座標系で得られ、その計測精度は誤差平均で約0.1~0.3m程度である。本モジュールは以下の操作を、観測可能な全人物に対して逐次行うことで人物位置を更新する。

- (1) 観測情報メモリから人物の現在情報を読み出す。
- (2) 読み出した位置を初期位置として追跡処理を行う。
- (3) 追跡結果を観測情報メモリに書き戻す。追跡処理中のエラーが発生や他の追跡対象と画像領域が重複した場合にはフラグを立てる。それ以外の場合は、追跡対象領域の3代表色(色相・彩度成分)を観測情報メモリに記録する。

#### 3.2 通信モジュール

通信モジュールは、他のエージェントからネットワークを通じて送られる情報をすべて受け取り、参照情報メモリに格納する。通信モジュールが受信する通信パケットを図4に示す。通信パケットの先頭部分には送信元のエージェントIDおよび観測対象IDが付けられている。通信モジュールはパケットを受け取ると、この2種のIDを基に分類して参照情報メモリへ格納する。

#### 3.3 観測エージェント

観測エージェントには観測エージェントID、観測対象ID、および確信度(初期値1.0)が与えられている。観測エージェントの構造を図5に示す。以下では、

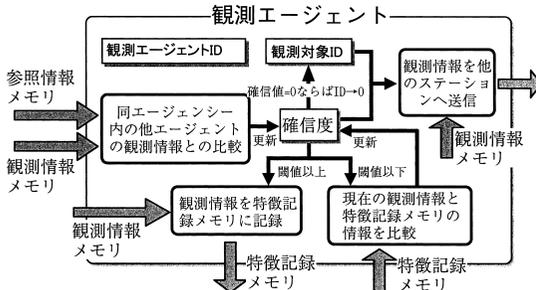


図5 観測エージェントの構成

Fig. 5 The architecture of the seeing agent.

観測エージェントが行う動作について述べる．

### 1) 確信度の更新

5.4.3 項で述べた要素を基準に，確信度  $c$  を更新する．これは以下のように定式化できる．

$$c_t = c_{t-1} + k_1 \times eval\_event + k_2 \times eval\_other\_agent + k_3 \times eval\_knowledge \quad (1)$$

$k_1, k_2, k_3 : const. (> 0)$

各評価値は，以下のようにして求める．

(a)  $eval\_event$ : 画像上のイベントの有無による評価値  
画面上で他の追跡対象と交差するイベントがあった場合には  $-1$  とし，それ以外の場合には  $0$  とする．すなわち，画像による人物追跡処理の中で「人物の対応付けが不安定になる状況」が生じた場合において確信度を下げる役割を果たす．

(b)  $eval\_other\_agent$ : 他のエージェントの観測結果との比較による評価値

参照情報メモリ内に，同じ観測対象 ID を持つエージェント（同じエージェントに属するエージェント）の情報が存在し，その確信度が自分の確信度よりも高い場合，その検出位置と自分の検出位置の差を計算し確信度に反映する．この評価値  $eval\_other\_agent$  は以下のように計算できる．

$$eval\_other\_agent = k_{21}(dist\_diff - dist\_thresh) + k_{22}(color\_diff_0 - color\_thresh_0)$$

ただし，

$dist\_diff$ : エージェント間の位置検出結果の差異

$dist\_thresh$ :  $dist\_diff$  のしきい値

$color\_thresh_0$ :  $color\_diff_0$  のしきい値

(c)  $eval\_knowledge$ : 過去の観測結果との比較による評価値

エージェントの観測対象 ID と同じ ID を持つ特徴記録メモリを参照し，観測された代表色の過去の出現頻度を求める．これは以下の式で表される．

$eval\_knowledge$

$$= k_{31}(color\_diff_1 - color\_thresh_1)$$

ただし，

$color\_diff_1$ : 過去に観測された代表色と現在の代表色の差

$color\_thresh_1$ :  $color\_diff_1$  のしきい値

$color\_diff_1$  を求めるためには様々な方法があるが，今回は代表色の出現頻度から ( $color\_diff_1 - color\_thresh_1$ ) の値を決定した．すなわち現在の 3 代表色のうち 2 色以上の出現頻度がしきい値以上であれば  $+1$ ，1 色であれば  $0$ ，0 色であれば  $-1$  を与えることとした．

### 2) しきい値の決定

確信度更新で用いられる各特徴量のしきい値は，各観測ステーションでの計測誤差に依存している．本システムでは位置の差および色（色相）の差を用いているが，前者のしきい値 ( $diff\_thresh$ ) に関しては，各観測ステーションによる位置誤差範囲が床面上の各方向に対して  $\pm 0.3$  m 程度のため，対象人物のミスマッチが生じている場合ステーション間の検出位置の差は計測誤差の 2 倍以上の差があるものと考え，その 2 倍程度 ( $0.6$  m) をしきい値とした．一方色相のしきい値 ( $color\_thresh_0$ ) は複数のステーション間での色相計測誤差によって決定するが，本システムでは経験的に  $\pm 20$  度を用いた．

### 3) 係数の決定

以上の各評価値の計算式より，式 (1) は以下のように書き換えられる．

$$c_t = c_{t-1} + k_1 \cdot eval\_event + k \{ k_{21}(dist\_diff - dist\_thresh) + k_{22}(color\_diff_0 - color\_thresh_0) \} + k \{ k_{31}(color\_diff_1 - color\_thresh_1) \} \quad (2)$$

これらの係数に対しては，以下のように決定できる．まず  $k_1$  および  $k$  は，画像上のイベントに対するペナルティとエージェント形成のダイナミクスを制御するパラメータである．前者は画像のイベントがどの程度誤対応を生じさせる可能性があるかを示しているが，本システムの場合 2~3 人が画面中で交差することが想定されるため，誤対応する確率から考えて  $0.4$  の値を与えている．また，後者はエージェントの形成および解消のスピードの早さを制御する．この値が大きい場合そのスピードは速くなり，小さいと遅くなるが，これは目的とするタスクや状況に依存するといえる．短いインターバルで人物領域が交差するイベン

トが生じる場合などでは、この値を大きくして対応付けを早めに解消・再決定することも考えられるが、逆に少しのノイズなどによってエージェントの対応付けが解消されてケースも想定できる。このパラメータは、実験において経験的に 0.01 ~ 0.05 までの値を与えることとする。

また  $k_{21}$  と  $k_{22}$  は、ステーション間で対象を対応付ける際に用いる各特徴量の重要度を決定するパラメータである。本システムでは経験的に距離 1 m の誤差が色相で 100 度に対応するように設定している。この重要度に対しては、各特徴量が対象シーンに対してどの程度有効かに依存する。対象の識別に対して「位置情報」を用いることが有効であればその重み付けを大きくすべきであり、また他の特徴量が有効であればその重みを大きくすることが有効であると考えられる。全体を通してこれらの係数は、

- (1) 複数人物間における人物像色分布の散らばり (分散)、
- (2) 環境条件 (環境光やカメラ特性がどの程度統一されているか?)、
- (3) 各特徴量の観測誤差、
- (4) 対象シーンにおいて識別に有効な特徴量、
- (5) 複数対象の動きのスピードや、画像上の交差イベントの頻度、

によって決定することができる。

4) 観測対象に関する代表色出現頻度の更新

特徴記録メモリには、観測対象 ID に対応する対象の代表色出現頻度が記録されている。エージェントの確信度が高い状態において、観測された代表色を特徴記録メモリに記録し出現頻度を更新する。

5) 観測結果の通知

エージェントがいずれかのエージェントに属しており (観測対象 ID  $\neq 0$ )、かつ追跡に成功している場合、現在の観測結果および確信度を他のステーションに送信する。送信には図 4 で示した通信パケットを用いるが、この中には観測が行われた時刻およびカルマンフィルタによって予測した人物移動速度も記述しておく。また送信先ステーションとしては、文献 7) で示した方法を用いて「観測領域の重なるステーション」に限定し、必要とする通信帯域を小さくする。

6) 追跡失敗時の処理

画像処理モジュールが対象の観測に失敗した場合、同一エージェント内の他エージェントの観測結果を参照情報メモリから読み出し、対象の位置情報を観測情報メモリに書き出す。画像処理モジュールではこの値を基に観測をやり直す。この位置情報は、エージェ

ンシー内で最も確信度の高いエージェントの情報を基にしており、その観測時刻と現在の時刻・対象の移動速度から予測した位置を用いる。一定時間この処理を繰り返しても発見できなかった場合、対象が観測視野外に出たと判断し観測エージェントを消滅させる。

7) エージェントからの離脱

確信度が 0 となった場合、現在参加中のエージェントから離脱して単独で追跡を続ける。これは、自らの観測対象 ID を 0 に設定することで行われる。

3.4 メディエータ (mediator)

メディエータは観測ステーション内に 1 つずつ動作しており、新たな観測エージェントの生成や単独で観測中のエージェントからのエージェント形成など、観測エージェントを管理する役割を果たす。メディエータの役割を以下に列挙する。

1) 観測エージェントの生成

参照情報メモリ中に現在ステーション内で観測していない対象が記述され、それが視野内に存在すれば新たな観測エージェントを生成する。対象の追跡対象 ID および初期位置、初期確信度は参照情報メモリに従う。

2) 単独観測エージェントのエージェントへの組み入れ・複数の単独観測エージェントによるエージェントの生成

ステーション内に単独で観測しているエージェントが存在する場合、以下の操作を行う (図 6)。

(a) エージェントの観測結果と、全対象の過去の特徴情報、他の観測エージェントで得られた観測結果を比

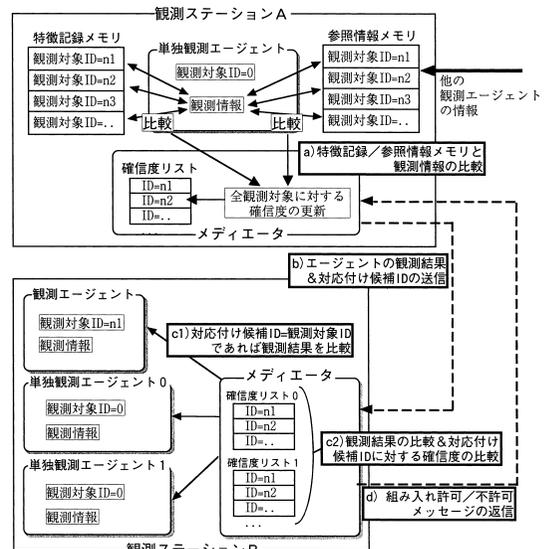


図 6 メディエータによる対象の対応付けアルゴリズム  
Fig. 6 The object matching algorithm between camera stations achieved by the 'mediator'.

較し, その結果をメディアータ内の「確信度リスト」に記録する. この比較処理は, エージェントがエージェントに属している場合の確信度更新アルゴリズムと同様である.

(b) 確信度リストのいずれかの値がしきい値以上であり, その ID と同一の観測対象 ID を持つエージェントがステーション内に存在しない場合, 確信度リスト内の ID を対応付け候補 ID とする. 次に, 他ステーションのメディアータにエージェントの観測結果および対応付け候補 ID をメッセージとして送信する.

(c1) メッセージを受信したメディアータは, ステーション内に対応付け候補 ID と等しい観測対象 ID を持つエージェントが存在するかを確認する. 存在した場合, メッセージ内の観測結果とエージェントの観測結果の相関を評価する.

(c2) c1 にあてはまるエージェントが存在しなかった場合, ステーション内の全単独追跡エージェントに対し以下の比較を行う.

- i. 観測結果の差が小さいか?
- ii. ステーション内の単独追跡エージェントに対応する確信度リストをチェックし, 送信された対応付け候補 ID に対する確信度が最も高いか?

(d) c1, c2 での比較において該当するエージェントが発見できた場合は, 送信元エージェントに組み入れ許可メッセージを返し, 発見できなかった場合には不許可メッセージを返す.

#### 4. 実験および結果

本手法の有効性を確認するため, 実環境を対象にした実験, および計算機上でのシミュレーション実験を行った.

##### 4.1 実環境を対象にした実験 (実験 1)

3 台の観測ステーションが観測する屋内環境において, その視野内を歩き回る 2 人を追跡する実験を行った.

##### 4.1.1 実験環境

観測ステーションは視点固定型の CCD カラーカメラと PC (Intel Pentium III-500 MHz dual) で構成され, カメラからのビデオ信号は  $240 \times 180$  pixel の大きさで取り込まれ処理される. 各カメラは屋内環境に斜め上方から見下ろす角度で設置され, 図 7 に示す観測視野を持っている. カメラ 1 は部屋の入り口付近を観測し, 入室する人物を捕捉する. このため, この観測エージェントには入り口付近から人物が出現するという情報をあらかじめ与えておき, エージェントは与えられた情報と自らが持つ環境マップに基づき, 入り

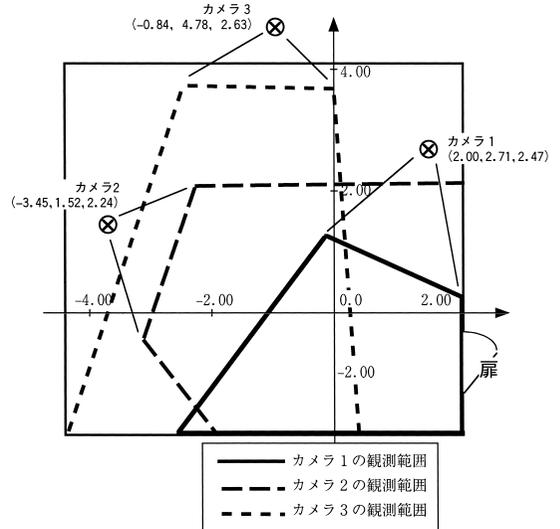


図 7 実験環境とカメラ配置 (実験 1)

Fig. 7 The experiment environment and camera positions and viewing areas.

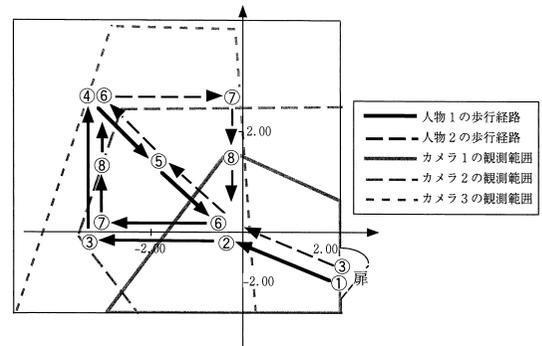


図 8 人物の歩行軌跡 (実験 1). 数字は 2 人の同時通過点を示す  
Fig. 8 Two persons' walks on the showing trajectories. Each number shows the point that two persons located at the same time.

口部分で初期的に人物を捕捉する動作を行う. また, 3 台のカメラのキャリブレーションとして, 環境中の 1 点に座標原点を設定し, 環境中のマーカと入力画像中の点を手動で対応付けることでカメラパラメータを得ておく. また, 各ステーションの内部時計は NTP<sup>10)</sup> を用いて補正しておく.

##### 4.1.2 実験結果

2 人の通過軌跡を図 8, 実験中の画像を図 9 に示す. 各観測エージェントの人物の検出位置, 確信度の変化およびエージェントの形成状況を図 10, 図 11, 図 12 に示す. なお, 図中の人物通過点①~⑧は図 8 のものと対応している. 実験を通して観測されたイベントを列挙すると以下ようになる.

- (1) 出現を待機する観測ステーション 1 で入室する

2人が順次捕捉され、他のステーションにその位置情報が伝えられる(人物1①~②,人物2③~④)。

- (2) ステーション2,3で人物が捕捉され,追跡が行われる。
- (3) 地点⑤において2人が交差する状況(図9-b)が生じた。ステーション2では交差前後の人物とエージェントの対応関係は同一(同じエージェントが連続して同じ人物を追跡する)であったが,ステーション3では人物・エージェント間の対応関係が入れ替わる状況が観測された。
- (4) 両ステーションは人物の観測を続け,地点⑧ではステーション2において人物領域が交差する状況が生じた。

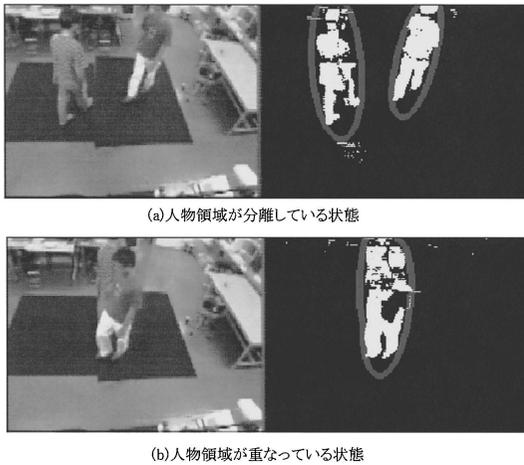


図9 実験中の画像(実験1,ステーション2).左:入力画像,右:差分画像と追跡結果(楕円体)  
 Fig.9 Pictures acquired at station 2. Left: Input image, Right: Background subtraction images overlapped with the edges of ellipsoid-human-model.

確信度変化(図11)から見ると,画像中での対象の重なる状況(地点⑤)において,ステーション2,3上のエージェントの確信度に大きな影響が生じていることが確認できる。これは,画像中での対象領域が交差するイベントが生じたためであるが,その後ステーション2では確信度が上昇傾向にあるのに対し,ステーション3では逆に下がり,単独観測エージェントに移行している。これは前述したように,ステーション2では対象の交差前後において同一の人物・エージェントが対応付けられたのに対し,ステーション3では誤対応が生じたためである。このことは,各エージェントの人物位置検出結果(図10)からも確認できる。ステーション2では人物の通過軌跡を連続して検出できているのに対し,ステーション3では⑤の地点で人物の軌跡を誤って検出している。

しかしその後,ステーション3上のエージェントも

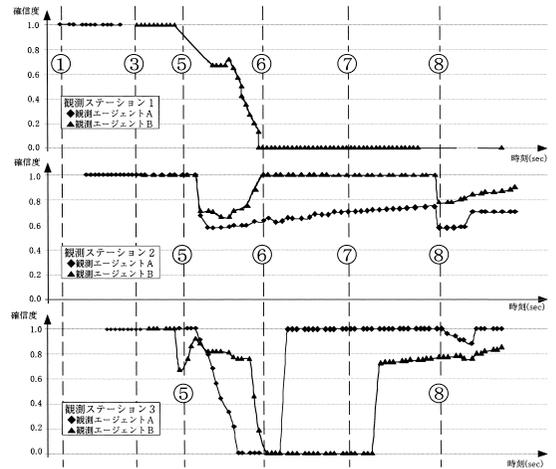


図11 エージェントの確信度変化(実験1)  
 Fig.11 The confidence value of seeing agents.

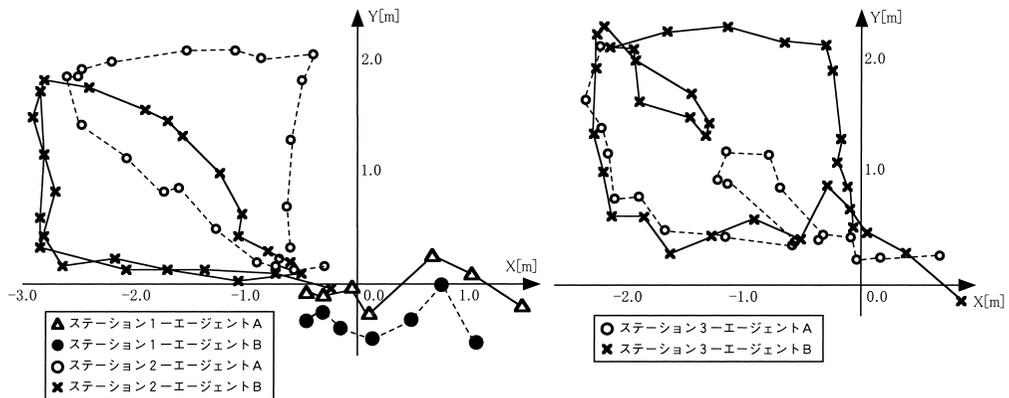


図10 観測ステーションでの人物位置検出結果(実験1)  
 Fig.10 The measurement result of two persons' trajectory using 3 camera stations.

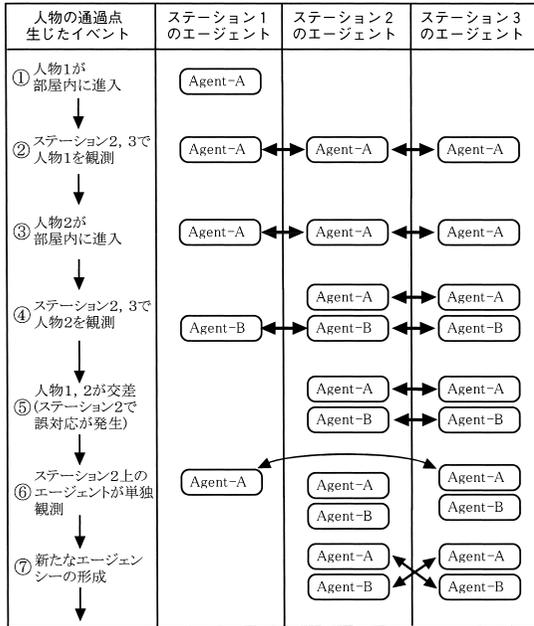


図 12 エージェンシーの形成状態 (矢印で結ばれた間でエージェンシーが形成されている)

Fig. 12 The transition of agency formations. (Arrows between agents indicate agency formations.)

メディアータによって正しい対象と対応付けられ、ステーション 2 のエージェントとエージェンシーを形成することが確認できる。その後、地点⑧においてもカメラ 2 において人物領域の交差イベントが生じ、確信度の低下が生じているが、最終的には正しい対応付けが得られた。

同様の実験を異なる人物で 10 回試行したが、8 回の試行において正しい結果を得ることができた。特に、地点⑤での交差においてステーション 2, 3 で同時に誤対応が生じるケースもあったが、この場合でも最終的には正しい対応付けと対象識別が行われることが確認できた。一方で複数人物の着衣色が似通った場合には、対象の識別に失敗する場合は見られた。しかし、対象の追跡やステーション間での対応付けに関しては、対象の位置情報を用いることで正しく行われることが確認された。

#### 4.2 シミュレーション実験 (実験 2)

より大規模な環境を想定した計算機上でのシミュレーション実験を行った。ここでは本アルゴリズムの大規模環境での振舞いを確認するとともに、本アルゴリズムと従来型の集中制御型アルゴリズムを比較し、本アルゴリズムの特性を把握することを目的としている。

##### 4.2.1 実験環境

PC 上に複数の観測システムの動作をシミュレート

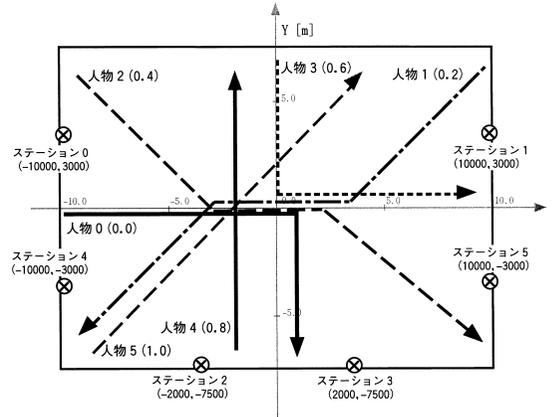


図 13 実験環境および人物移動軌跡 (実験 2). ステーションの括弧内はカメラ位置、人物の括弧内は属性値を表す

Fig. 13 The experiment environment and trajectories of 6 people in experiment 2.

する仮想環境を構築し、その中で 6 台の観測ステーションを配置した。この環境中で 6 人物が移動し、観測ステーション上のエージェントが人物を観測する。観測ステーションの位置および人物の移動軌跡を図 13 に示す。人物はすべて同時に歩き始めるものとし、人物 0, 1, 2, 3 はそれぞれ Y 軸付近を近接して進む状態がある、また人物 2, 4, 5 についても同様に、Y 軸付近において位置的に近接する状態が存在する。すべての観測ステーションは環境全体を見渡せるものとし、観測ステーション上には初期的に対象人物と 1 対 1 対応する観測エージェントが生成されている。すなわち、各観測ステーションには 6 つの観測エージェントが動作している。

観測エージェントの対象追跡アルゴリズムは、実際の画像処理による追跡アルゴリズムの特性を模倣させるために以下のような性質を持たせる。

- エージェントは観測フレームごとに、対象の現在位置から半径 1 m 以内の範囲で移動する対象を追跡することが可能である。
- エージェントが得る対象の計測位置は、エージェントの視線方向に大きくその垂直方向に小さい分布を持つランダムな誤差が含まれる。
- 追跡対象の属性 (代表色) 情報は 0~1 までの値で表され、その観測結果には一定範囲のランダムな誤差が含まれる。
- 対象の現在位置から追跡可能範囲内 (半径 1 m) に複数の対象が存在する場合、後述する情報統合アルゴリズムに従った基準で対象を選択する。また、その計測結果は通常よりも大きな誤差が含まれる。

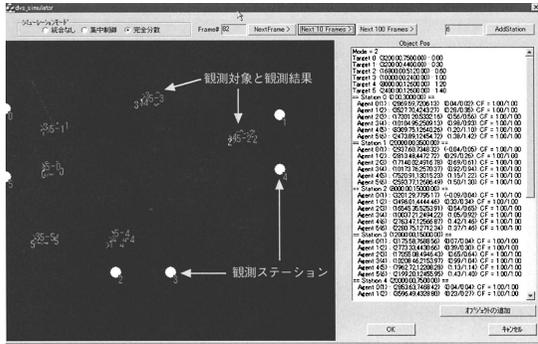


図 14 シミュレータの画面  
Fig. 14 The DVS simulator.

一方、各エージェント間で得られた情報を統合するアルゴリズムは、以下の 2 種類を用意する。

- A) 本論文で提案するアルゴリズム (完全分散アルゴリズム)
- B) 同一対象を観測するエージェント (エージェントシー) の情報を各観測フレームで統合し、各エージェントの次観測フレームではその情報を基に観測を行う (集中的アルゴリズム)

エージェントの追跡可能範囲内に複数の対象が存在した場合、A) では、ランダムに対象を選択し追跡する。B) のアルゴリズムでは与えられた観測対象に対して最も近い属性値を持つ対象を追跡し、一定値以上近い属性値を持つ対象がない場合は追跡を中止する。つまり、A) のアルゴリズムでは対象の観測結果がエージェントシー内部で複数存在する構成となっているのに対し、B) のアルゴリズムでは同一対象を観測した結果が、各観測フレームにおいて 1 つの情報に統合されるアルゴリズムとなっている。

#### 4.2.2 実験結果

本実験に用いたシミュレータの画面を図 14 に、完全分散アルゴリズムによる観測結果を図 15 に、集中的アルゴリズムによる観測結果を図 16 に示す。なお実験に用いた誤差範囲は、計測位置誤差としてエージェントの視線方向に  $\pm 0.6$  m、視線と垂直方向に  $\pm 0.3$  m、属性値としては  $\pm 0.15$  とし、対象が近接した場合の誤差範囲は通常 の 2 倍の誤差範囲とした。

実験結果から、完全分散アルゴリズムでは全対象の軌跡がすべて得られているのに対し、集中的アルゴリズムでは人物 2 の軌跡が  $Y=0$  付近で途切れており、人物 4 の軌跡も人物 3 との交差後正しく得られない (人物 3 の軌跡が同一視されてしまう) 現象が確認できる。

この原因としては、集中的アルゴリズムにおいては各観測ごとにその結果を統合するという機構が影響し

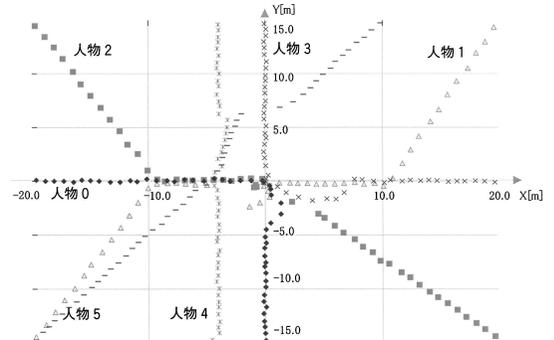


図 15 完全分散アルゴリズムによる追跡結果 (実験 2)  
Fig. 15 The measurement result of 6 people using the decentralized algorithm.

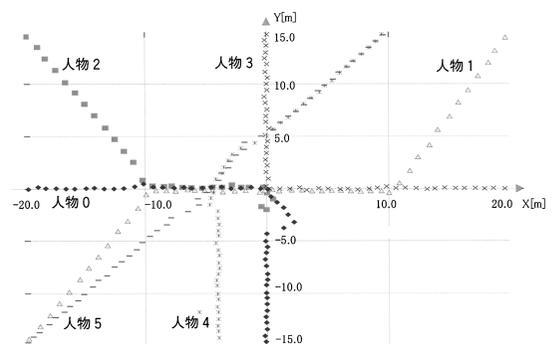


図 16 集中的アルゴリズムによる追跡結果 (実験 2)  
Fig. 16 The measurement result of 6 people using the centralized algorithm.

ているものと考えられる。複数対象が近接して移動している場合、観測結果には単独で対象を観測しているときよりも大きな計測誤差が含まれる。そのため、一部のエージェントが誤った対象を観測する可能性があるため、それを統合した計測結果はより大きなノイズを含んだものとなる。集中的アルゴリズムではこの統合結果が各エージェントにフィードバックされてしまうため、次の観測フレームにおいて観測が失敗する可能性が高くなるものと考えられる。一方、人物 3 と 4 の誤対応に関しても同様の状況が生じるが、人物 3 と 4 の属性値は近いため人物 4 を追跡するエージェントは人物 3 を誤って追跡してしまい、誤対応が生じたものと考えられる。

一方、追跡軌跡の検出結果から見ると、集中的アルゴリズムでは、正しく追跡を行っている対象に関してはつねに正しい追跡結果が得られているのに対し、完全分散アルゴリズムでは対象の近接が生じた後において大きな計測誤差が生じていることが確認できる。これは完全分散アルゴリズムにおいては、一部のエージェントに追跡対象の誤対応が生じてても一定時間では

そのままの対応関係が維持されるため、統合した計測位置結果にも大きな誤差が含まれるためである。

#### 4.3 検 討

複数の実験を通じて、複数観測ステーション間での対象の対応付けを行う本システムの機構が有効に働くことを確認できた。実環境を対象にした実験 1 では、人物像が画像中で完全に重なるといった状況が生じ観測エージェントが一時的に異なった人物を観測する場合もあったが、エージェントの解消、再構築によって正しい対応付けが行われることが確認された。処理速度としては、2 人の場合 10~15 frames/sec、3 人の場合 7~12 frames/sec で可能であり、通常で歩行する複数人物を追跡することが可能であった。

計算機上のシミュレーションを行った実験 2 では、本アルゴリズムと従来型の情報集中型アルゴリズムとの特性を明らかにした。本アルゴリズムでは個々のエージェントの追跡が独立しているため、すべてのエージェントが異なった値を保持している。このため、一部のエージェントが追跡不能になっても他に追跡をしているエージェントがあれば追跡を再開することが可能である。また、追跡対象とエージェントの誤対応が一時的に生じた場合でも、前述したアルゴリズムで対応関係を再構築することができる。一方、集中的アルゴリズムでは、エージェントの観測フレームごとにその結果を統合・再分配するため、一部エージェントが誤った対象を観測している場合、統合結果のノイズも大きくなり、その対象を観測する全エージェントで追跡不能となることがある。計測結果に関しては、集中的アルゴリズムでは対象が正しく観測できる場合にはより正しい計測結果を得ることができるのに対し、提案アルゴリズムでは対象が近接する状況後に検出結果の乱れが生じることが確認された。

実験 1 において見られた現象として、人物の着衣の代表色が近い場合、エージェントの形成(対象の対応付け)は正しく行われるものの過去に蓄積された特徴量との対応付けが成功せず、誤った観測対象 ID を与えてしまうケースもあった。これは、実験システムが対象識別を行う特徴量として代表色のみを用いている以上、取扱いのできないタスクだと考えられるが、他の特徴量・比較手法を導入することで解決することができる。前述したように、本システムでは新たな識別特徴量を導入することは可能だが、その際には以下の点を考慮しなければならない。

- (1) 特徴量が異なるステーション間で比較可能か？
- (2) 特徴量の比較時に用いるしきい値と観測誤差の関係。

#### (3) 確信度の更新パラメータ。

(1) は特徴量の性質に関する事項である。対象に関する知識が得られた場合、それが観測ステーションを通じて不変であるか、あるいは観測条件による影響が大きいために直接の比較が困難であるかを考慮する必要がある。今回の実験システムでは、人物の観測位置情報を前者(直接比較可能)、人物の代表色出現頻度を後者(直接比較不可能)であると考え、前者に関してはエージェント間での比較を行うが、後者はエージェント内で用いるにとどめた。これは、今回の実験環境の照明環境、設置環境の条件によりステーション間の比較が困難であると判断したためだが、これらの条件が異なれば、代表色の比較も可能になると考えられる。

(2) は、エージェント間の特徴量の比較に用いるしきい値をどの程度に設定すべきかという問題だが、これはその特徴の観測によって生じる誤差の程度に依存する。実験システムでの位置の比較を例にとると、今回の位置検出アルゴリズムでは  $\pm 0.3\text{m}$  程度の誤差が生じることが確認されているため、エージェント間の検出位置の差が  $0.6\text{m}$  以内であれば対象が一致していると判断し、 $1.2\text{m}$  以上であれば異なっていると判断している。この値は用いる特徴量や特徴抽出方法に依存する問題であり、システムの実装時に考慮すべきパラメータである。

(3) は、特徴量比較の結果が一致・不一致であった場合に、どの程度の値でエージェントの確信度を加減するかという問題である。これはエージェントの解消・再構築のダイナミクスに影響を与える。一般にこの値が大きいほどエージェントの解消・再構築は頻繁になるが、逆に正しいエージェントを構築していても一時的な観測ノイズなどの影響によりエージェントが解消されてしまうといった欠点があるため、タスクに応じた値を設定することが重要である。

## 5. ま と め

本論文では、分散観測システム上で複数対象の同時観測を可能にする手法を提案した。システム構成上の特徴として、単一の対象を観測できる観測エージェントを、観測ステーション上で複数並列動作させる仕組みを導入した。また、複数視点間の対象の対応付けをエージェントの観測結果の相互評価によって行う手法を提案した。これにより広域観測やロバストな観測を可能にする分散観測システムを、より可用性の高いデバイスとして拡張したといえる。

謝辞 本研究を行うにあたり、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業(JSPS-RFTF 96P00501)お

よび文部省科学研究費(基盤研究(A)(2)07558047)の補助を受けた。

### 参 考 文 献

- 1) 松山隆司: 分散協調視覚—視覚・行動・コミュニケーション機能の統合による知能の開発, 画像の認識・理解シンポジウム( *MIRU'98* ), pp.I-343-352 (1998).
- 2) Haritaoglu, I., Harwood, D. and Davis, L.S.: Hydra: Multiple people detection and tracking using silhouettes, *2nd International Workshop on Visual Surveillance*, pp.6-13 (1999).
- 3) 丹 康雄, 日比野靖: 位置情報ブローカの提案とそのアーキテクチャ, 情報処理学会研究報告 97-MBL-2, pp.7-12 (1997).
- 4) 清水孝一: 徘徊者定位システムの開発—バイオテレメトリによる在宅医療支援, 日本 ME 学会雑誌, Vol.10, No.5, pp.3-10 (1996).
- 5) 小泉寿男: ITS と情報処理技術, 情報処理, Vol.40, No.10, pp.978-981 (1999).
- 6) 松山隆司, 和田俊和, 丸山昌之: 能動知覚エージェントによる移動対象の協調的追跡, 画像の認識・理解シンポジウム( *MIRU'98* ), pp.I-365-370 (1998).
- 7) 中澤篤志, 加藤博一, 井口征士: 分散カメラシステムによる人物の追跡, 画像の認識・理解シンポジウム( *MIRU'98* ), pp.II-1-6 (1998).
- 8) 西尾秀一, 大田友一: 複数画像センサの統合による交差点車両追跡, 画像の認識・理解シンポジウム( *MIRU'92* ), pp.I-169-176 (1992).
- 9) 加藤博一, 中澤篤志, 井口征士: 楕円体モデルを用いたリアルタイム人物追跡, 情報処理学会論文誌, Vol.40, No.11, pp.4087-4096 (1999).
- 10) Mills, D.: Network Time Protocol (Version 1) Specification and Implementation, IETF RFC 1059 (1988).

(平成 12 年 8 月 4 日受付)

(平成 13 年 9 月 12 日採録)



中澤 篤志 (正会員)

1974 年生。1997 年大阪大学基礎工学部システム工学科卒業, 1999 年同大学院基礎工学研究科修士課程, 2001 年同大学院博士課程修了。現在, 科学技術振興事業団研究員(東京大学生産技術研究所)。博士(工学)。画像計測, 分散視覚システム, 動作解析の研究に従事。日本ロボット学会, ヒューマンインタフェース学会, IEEE 各会員。



日浦 慎作 (正会員)

1972 年生。1993 年大阪大学基礎工学部制御工学科飛級中退。1995 年同大学院修士課程, 1997 年同大学院博士課程修了。同年京都大学工学部リサーチアソシエイト。1999 年大阪大学大学院基礎工学研究科助手。博士(工学)。三次元動画像計測・処理とその応用に関する研究に従事。1993 年電気関係学会関西支部連合大会奨励賞, 2000 年画像センシングシンポジウム優秀論文賞受賞。電子情報処理学会会員。



加藤 博一 (正会員)

1963 年生。1986 年大阪大学基礎工学部制御工学科卒業。1988 年同大学院修士課程修了。1989 年大阪大学基礎工学部助手, 1996 年講師。1998 年ワシントン大学客員研究員。1999 年より広島市立大学情報科学部助教授。工学博士。ヒューマンインタフェース, 画像計測の研究に従事。ヒューマンインタフェース学会, 電子情報通信学会, 計測自動制御学会, ACM 等各会員。



井口 征士 (正会員)

1940 年生。1962 年大阪大学工学部電気工学科卒業。1964 年同大学院修士課程修了。1965 年大阪大学基礎工学部助手。1969 年助教授。1984 年教授(現大学院基礎工学研究科システム人間系)(財)イメージ情報科学研究所関西研究センター所長兼任。1966~67 年フランス・サクレ原子力研究所, 1979~80 年南カリフォルニア大学画像処理研究所客員。工学博士。専門はパターン計測, 特に三次元画像・音響信号等の計測。感性情報処理。著書「三次元画像計測」「感性情報処理」等。電子情報通信学会, 計測自動制御学会, システム制御情報学会, 人工知能学会, 日本ロボット学会, IEEE 各会員。