

移動対象の協調的追跡のための観測可能領域モデル生成・更新法

浮田 宗伯[†] 松山 隆司[†]

本論文では、複数の視覚を備えた自律システム(シーンを観測するためのアクティブカメラと、ネットワーク接続された計算機から構成される Active Vision Agent, 略して AVA)によって実時間対象追跡を行う際に、シーンの観測可能領域モデルを用いることによって、各 AVA の協調性を向上させる手法を提案する。複数の自律システムが協調動作を行うためには、タスクが何であったとしても、相互に相手の能力や現在の状況に関する知識を持ち合わせる必要がある。特に移動物体の追跡を行う際には、AVA は協調相手である他の AVA がシーン中のどの領域を観測できるかを把握し、相互の状態を考慮した上で各 AVA 間で役割分担を行うべきである。このような協調動作を実現するために、本論文で提案する追跡システムは、追跡を実行する過程で獲得される各 AVA に関する観測可能領域情報を集めて、シーンの観測可能領域モデルを生成・更新する。そして、この観測可能領域モデルを用いることにより、シーンの構造と対象の動きの両方を考慮にいたした協調追跡を実現する。

Incremental Observable-Area Modeling for Cooperative Tracking

NORIMICHI UKITA[†] and TAKASHI MATSUYAMA[†]

In this paper, we propose an observable-area model of the scene for real-time cooperative object tracking by multiple cameras. The knowledge of partners' abilities is necessary for cooperative action among multi-agents whatever task is defined. In particular, for the tracking a moving object in the scene, every Active Vision Agent (AVA), a rational model of the network-connected computer with an active camera, should therefore know the area in the scene that is observable by each AVA. Each AVA should then decide its target object and gazing direction taking into account other AVAs' actions. To realize such a cooperative gazing, the system gathers all the observable-area information to incrementally generate the observable-area model at each frame during the tracking. Hence, the system cooperatively tracks the object by utilizing both the observable-area model and the object's motion estimated at each frame. Experimental results demonstrate the effectiveness of the cooperation among the AVAs with the help of the proposed observable-area model.

1. はじめに

本論文では、複数の能動視覚エージェント(Active Vision Agent, 略して AVA)¹⁾によって構成される、実世界を対象とした実時間分散協調視覚システムについて述べる。AVA とは、シーンを観測するためのアクティブカメラと、相互にネットワーク接続された計算機から構成される自律システムの論理モデルである。分散協調視覚システムは、

動作の柔軟性: 各エージェントの相互作用により、多様なイベントに適応的に対処可能。

頑健性: 多角的情報の統合により、観測画像に含まれてしまう誤差や誤りなどに対する頑健性を向上。

システム構成の柔軟性: エージェント数の増減によ

り、容易にシステムの規模を変更可能。

耐久性: 故障に対する相互補償性。

多角的観測: 広域観測や多方向からの観測が可能。など、多くの利点を備えている。故に、文献 2) に見られるような関連研究が、近年数多く報告されている。

こうした分散協調視覚システムの利用により、様々な実世界を対象とした視覚システムの実現が可能である。中でも、移動対象の追跡システムは、

- 入退室管理などの広域監視システム³⁾
- ITS (Intelligent Transport System)⁴⁾
- 対話型遠隔会議・講義システム⁵⁾

などの応用システム実現のための重要な基盤技術の一つである。

本論文では、多様な実世界の状況下における移動対象の実時間追跡を研究の目的として、システム全体として効率的な対象追跡を実現するために必要な機能について述べる。即ち、分散協調視覚システムに基づい

[†] 京都大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Kyoto University

た対象追跡システムにおいては、各エージェント間の協調性の優劣がシステムの性能に大きな影響を与え、実世界で有効に機能するシステムの実現のためには、この協調性の向上が必要である。そこで本論文では、

- (1) 各 AVA におけるシーン中の観測可能領域（即ち、各 AVA の能力）。
- (2) 追跡対象の移動軌跡。

に関する知識を AVA 間で共有し、対象追跡時の各 AVA の協調性を向上させることにより、システムの性能を向上させる手法を提案する。

本手法では、協調追跡を行いつつシーンの観測可能領域情報と追跡対象の 3 次元情報を逐次獲得、蓄積する。そして、蓄積された全 AVA の観測可能領域間の関係と追跡対象の状況を考慮に入れ、効率的な対象追跡とシーン観測を行うように各 AVA に対して役割を動的に割り当てる。実時間処理システムが必要とする即応性を保ちながら、全 AVA に関する情報を効率的に参照するために、追跡システムは全ての AVA の観測可能領域に関する情報を集め、シーンの観測可能領域モデルとして一括管理する。

以下では、2 章でまず従来の協調追跡法とその問題点について述べ、3 章で従来法の問題の解決を目的として用いられるシーンモデルについて説明し、4 章でこのシーンモデルを有効利用するために必要な通信のプロトコルを紹介する。5 章では、提案モデルを用いた複数 AVA の協調動作の有効性を、実験によって示す。

2. 協調追跡

2.1 協調追跡時の AVA の動作記述

これまでに我々が開発した協調追跡システム⁶⁾では、相互にネットワーク接続された複数の AVA が一つのグループを形成して、障害物に妨げられることなく、ある一つの対象物体を追跡し続けることが可能であった。このシステムは、以下に示す特徴を持っている。

- 各 AVA は、視点固定型パン・チルト・ズームカメラ⁷⁾を備えている。
- 全カメラに関して外部パラメータ、即ちカメラ間の相対的な位置関係はキャリブレーション済である。
- 各 AVA はユニークな ID を持っている。

各 AVA は、視点固定型パン・チルト・ズームカメラの特性を利用することによって、予め撮影された画像数枚から任意のパン・チルト・ズームの組み合わせで撮影される背景画像を生成可能である。それゆえ、AVA は適応的にズームを変更させながら、視線方向を変えて広範囲を観測する過程で、背景差分によって異常物体を検出できる。その後、検出された対象領域が画像

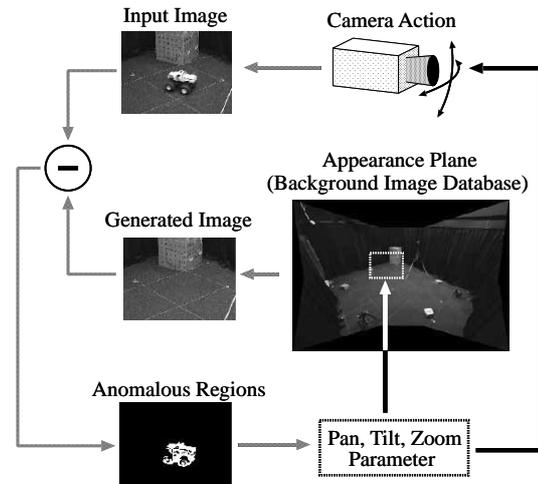


図 1 視点固定型パン・チルト・ズームカメラを用いた対象の単独追跡システム

Fig. 1 Object tracking system by a single fixed-viewpoint pan-tilt-zoom camera

中の中心付近、且つ適当な大きさとで観測されるように、カメラのパン・チルト・ズームパラメータを制御することによって、一台のカメラによる移動対象の単独追跡が可能となる（図 1）⁹⁾。

また、全カメラの外部パラメータがキャリブレーション済なので、複数カメラの観測画像上で検出された対象領域情報から、その対象の位置・方向などの 3 次元情報を復元できる。

上記の仮定の下で、以下のようにシステムの動作（以降、協調追跡基本方式と呼ぶ）を設計した⁶⁾。

- (1) 全 AVA は、自律的に対象探索を行う（図 2 中の 1.）。
- (2) ある AVA（以降、 AVA_m ）が異常物体を検出すると、これを追跡対象とみなす。そして、他の AVA の視線をこの追跡対象へ向けるために、この対象が存在する方向を他の AVA に対してブロードキャストする。この対象方向は、カメラの投影中心と画像中の検出領域の重心によって決定される 3 次元直線 L_m によって表される。この瞬間、ある特定の対象を追跡対象と見なす AVA のグループ（エージェント）が生成される（図 2 中の 2.）。
- (3) ブロードキャストされた視線方向を受信した AVA は、その視線方向に沿って対象を探索する。探索の結果対象を検出した AVA（以降、 AVA_w ）は、

この追跡法を実世界で有効に機能するシステムに適用するためには、照明変動や木々の揺らめきなどの背景変化がシーンに含まれていても頑健に動作する背景差分法が必要である。この問題に関しては、文献 8) など数多くの関連研究がなされている。

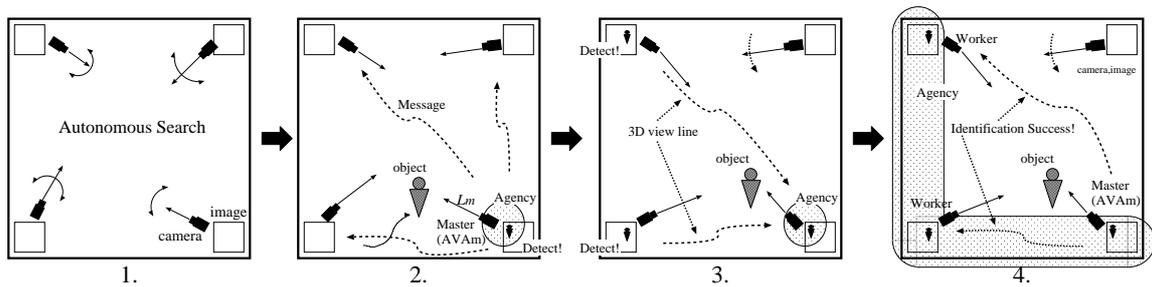


図 2 複数 AVA による対象の協調追跡システム
Fig. 2 Object tracking system by multiple AVAs

検出された対象方向を表す 3 次元直線 L_w を AVA_m に対して返信する (図 2 中の 3) .

(4) AVA_m は、返信されたメッセージを受信後、 L_m と L_w の間の距離を求める . そして、その距離が閾値以下であれば、AVA_w で検出された対象領域と AVA_m 自身の検出領域が同じ対象を観測した領域であると判断する . こうして対象同定された全 3 次元直線からの距離の平均が最も短い点 (最近点) を求め、その点の座標を対象の 3 次元位置とみなす .

(5) AVA_m は、復元した対象の 3 次元位置をブロードキャストすることにより、他の AVA が同じ対象を注視することを可能にする . これを、AVA_m による視線誘導と呼ぶ . 対象同定が成功した AVA はエージェントに組み込まれ、以降 AVA_m からのメッセージに従って動作し、この対象の協調追跡に従事する (図 2 中の 4.) . エージェント内の各 AVA は、AVA_m からブロードキャストされる対象方向もしくは対象の 3 次元位置を通知するメッセージを受信した直後にカメラ制御と画像取り込みを連続して実行する . 即ち、全 AVA の撮影タイミングは、このブロードキャストメッセージにより制御されているため、ほぼ同期している .

(6) 対象同定が全て失敗し、対象の 3 次元位置が復元できなかった場合には、AVA_m は単一カメラによる単独追跡を実行し、各フレームにおいてその検出結果から求める L_m をブロードキャストし続ける .

(7) 上記の「各 AVA の対象検出結果の送受信」、対象の 3 次元位置・方向の計算」と「視線誘導」の繰り返しにより、対象追跡が実現される .

(8) 全ての AVA が追跡対象を見失うと、各 AVA で自律対象探索が再開される .

ある一つのエージェントにおいて、AVA_m をマスタと呼び、その他の AVA をワーカと呼ぶ (図 2 中の 4.) . マスタの持つ権限は、対象追跡の安定性の維持のために必要に応じてワーカに対して委譲される . マ

スタ権限は、対象検出結果の信頼性が高いワーカに対して委譲される . このワーカが新たなマスタに遷移すると同時に、先のマスタはワーカへと遷移する .

以上のように、マスタによる視線誘導によって、シーンの 3 次元情報 (障害物の位置・形状など) が未知であっても、全 AVA が障害物などに遮られることなく単一対象を注視し続けることが可能である .

しかし、協調追跡基本方式において、マスタによる視線誘導は強制的なものであり、その結果として観測される情報の有効性とは無関係に、ワーカはその視線誘導に従う . そのため、障害物により遮られることによって追跡対象を観測できない、即ち追跡タスクを実行する上で有効な情報が得られない状況に陥っても、強制的な視線誘導が実行され続ける . これは、シーンの 3 次元幾何情報が未知であるため、観測画像中から対象物体を検出できない原因が、1. 障害物によって遮られている、2. 画像処理 (背景差分による対象検出) の失敗、のどちらであるのかを判断することができないことに起因している .

2.2 様々なタスクに応じた適応的なシーン観測

1 章で述べたように、対象追跡システムは、シーンの観測を行う各種応用システム実現のための重要な基盤技術である . また、各応用システムやユーザの要求によって、対象追跡システムが獲得すべきシーンやシーン中の対象に関する情報の種類は異なる . よって、様々な応用システムに対してある対象追跡システムを適用するためには、その追跡システムにはあらゆるタスクに適応可能な動作の柔軟性が求められる .

しかし、前節で述べた協調追跡基本方式では、一旦

例えば、1. 画像中の検出領域の大きさ、2. 画像中の検出領域の重心と画像中心間の距離、3. シーン中での対象物体とカメラの間の 3 次元距離、4. 撮影時刻、などの要素によって決定される尺度であり、各要素を引数とする評価関数によって与えられる . 引数とする要素の種類や評価関数の中で各要素に与えられる重みなどは、追跡システムに与えられたタスクに従い、ユーザによって与えられる .

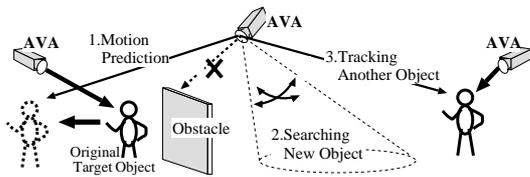


図 3 AVA の動的な役割変化
Fig. 3 Dynamic role assignment to AVA

エージェントが生成されると全 AVA はある特定の対象を協調監視し続ける。よって、様々なタスクに適応するための動作の柔軟性は存在しない。

対象追跡システムが、様々な要求に応じて適応的なシーンの観測を行うためには、対象を含めたシーンの動的状況を理解することが有効である。協調追跡システムにおいて、シーンの状況理解のために効率的な観測を行うということは、有限の資源であるカメラを有効に利用し、各カメラに対して最適な役割を割り当てるという行動に相当する。

協調追跡基本方式に従った強制的視線誘導の問題点を例に挙げると、シーンの効率的な観測を行うためには、障害物により対象を観測できない AVA は自身の役割を変更する、というような動作の適応性がシステムに求められる。このような AVA に対する有効な役割分担として、以下の例が考えられる。

- 次に追跡対象が現れる位置を予測し、その AVA が予測位置を観測可能であれば、その方向へ視線を向けて対象を待ち伏せる (図 3 中の 1.)。
- 他のどの AVA も観測していない領域を、新たな追跡対象を求めて探索する (図 3 中の 2.)。
- 他エージェントの追跡対象を観測可能な場合、そのエージェントに加わる (図 3 中の 3.)。

このように、様々なシーンの状況において、各 AVA に対して適切な役割を動的に割り当てるためには、シーン観測のための各 AVA の能力、即ちシーンの観測可能領域に応じた役割分担が有効である。

そこで本論文では、各 AVA におけるシーン中の可視・不可視領域を特定し、視線誘導の際にこの可視・不可視領域情報を利用するように協調追跡基本方式を拡張したシステムを提案する。提案システムでは、従来の協調追跡基本方式では考慮していなかった「全カメラによる特定対象の集中的な協調追跡以外のタスク」を実行可能になるだけでなく、ユーザの要求に応じて適切な役割を各 AVA に対して割り当て可能となる。

複数対象を追跡するシステムでは、それぞれの追跡対象に対して一つのエージェントが形成される。

3. 観測可能領域モデル

3.1 動的役割分担のための観測可能領域モデル

提案システムでは、マスタが各 AVA への視線誘導時に、可視・不可視領域情報と復元された対象の 3 次元位置を相互参照することにより、各 AVA が対象を観測可能であるか否かを調べる。その結果に基づいて、マスタは常にある特定の対象の方向への視線誘導を実行するだけでなく、各 AVA に対してその他の適切な役割分担を行うタイミングを判断することができる。

可視・不可視領域情報を参照する際、システム全体として効率的な協調追跡を実現するためには、マスタは異なるエージェントに属する AVA も含めて全 AVA に関する情報を相互参照する必要がある。そこで、全 AVA に関する情報を効率的に参照できるように、全ての AVA の可視・不可視領域情報を一括してシーンのモデルとして管理する。このシーンモデルを観測可能領域モデルと呼ぶ。

3.2 観測可能領域モデルのデータ構造

観測可能領域モデルのデータ構造には Octree 表現¹⁰⁾を採用した。Octree 表現では、空間全体を一つの立方体で表現している。この立方体を再帰的にオクタントと呼ばれる 8 個の立方体に分割して、各オクタントにラベルを与えることによって、空間中の各領域が持つ情報を表現する。一つの立方体の分割によって生じる各オクタントのラベルが一つでも異なる場合に、その立方体は 8 分割される。

シーンの観測可能領域モデルのデータ構造に Octree 表現を用いることによって、以下の利点が得られる。

- 通常、可視・不可視領域は、それぞれシーン中で集中しているため、Octree 表現によってデータの総量を減少させることが可能である。
- Octree 内の任意の場所の立方体をオクタントに分割することによって単位領域のサイズ変更が容易になり、観測可能領域モデルの解像度を局所的に設定することができる。

図 4 は、あるシーン・カメラ配置における観測可能領域モデルの例である (a) は、隣接している可視領域、不可視領域をそれぞれまとめて簡易に表示している。白色、灰色の領域が、それぞれ可視領域、不可視領域に対応している (b) は、観測空間がどのように可視領域と不可視領域に八分割されているのかを示している (b) を見ると、立方体が再帰的に八分割されている様子が確認できる。また (b) 中で不可視領域に相当する各立方体に添付した数字は、観測空間全体に対応するサイズ最大の立方体の一辺の長さを 1 とし

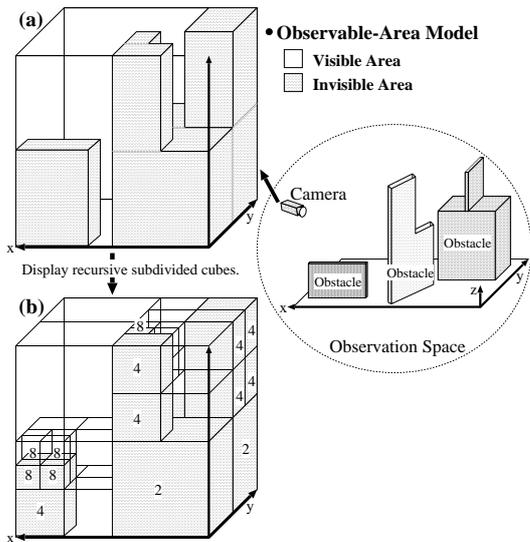


図 4 観測可能領域モデルのデータ構造
Fig. 4 Data structure of observable-area model

たときの、各分割立方体の一辺の長さの逆数である。

Octree 内の各立方体には、各 AVA 毎の可視・不可視ラベルが代入される。代入される可視・不可視ラベルには、以下の三種類がある。

- UNDEFINE 可視か不可視であるかが不明な領域。
- VISIBLE 可視領域。
- INVISIBLE 不可視領域。

各立方体に記録されている可視・不可視ラベルが、空間をオクタントへ再帰的に分割する判断基準となるラベルに相当する。

3.3 可視・不可視領域情報の生成法

2.1 節で述べたように、協調追跡基本方式では、マスタは各 AVA において求められた検出対象方向を示す 3 次元直線間の距離の大小により対象同定を行い、対象同定成功した 3 次元直線間の最近点を対象の 3 次元位置とみなしている。しかし、本論文で提案する手法では、各 AVA が検出した対象領域とそのカメラの投影中心によって決定される視体積 (Visual Cone) の交わりを求め、交わりが存在するならばそれらの検出領域は同一対象の検出結果であると判断する。また、こうして求められた視体積の交わりは対象の体積を表しており (視体積交差法による 3 次元体積復元)、その体積の重心を対象の 3 次元位置と見なす。図 5 に示す例では、同一対象を検出している AVA1, 2, 3 の視体積に交わりが存在することから、対象同定が成功すると同時に対象の体積領域が復元されている。

対象の同定と 3 次元位置計算を目的として、協調追跡基本方式では「対象の存在する方向を表した 3 次元

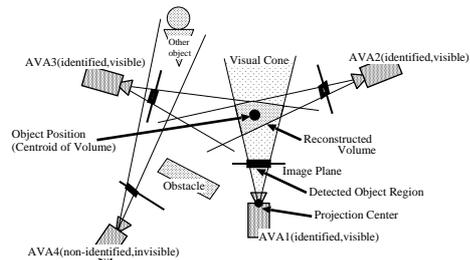


図 5 視体積交差法による対象の体積・位置の復元と可視・不可視領域情報の生成
Fig. 5 Volume and position reconstruction of the object and generating the visible/invisible area information by the volume intersection method

直線」がワーカからマスタに送信されていた。しかし、提案手法では視体積を求めるに必要な「観測画像中の検出領域」が送信される。

以上のように、協調追跡を実行中は、視体積交差法によって対象の体積が復元されている。もし、ある AVA の観測画像中の検出領域が実際に体積復元に関与しているのであれば、復元された対象の体積領域は、この AVA にとって可視であることが分かる。逆に、対象方向を観測しているにも関わらず、この体積復元に関与していない AVA にとって、この領域は不可視であるということも分かる。図 5 に示す例では、AVA1, 2, 3 の検出結果から対象体積が復元されているが、AVA4 の観測画像中にはその対象が検出されていない。よって、復元された対象体積領域は、AVA1, 2, 3 にとっては可視領域であり、AVA4 にとっては不可視領域であるということが分かる。この結果に基づいて、この体積領域に対する可視・不可視ラベルが生成される。

よって、システムは追跡を行う過程でマスタによって行われる対象の体積復元時に、観測可能領域モデルの生成に必要な可視・不可視領域情報を獲得できる。従って、提案システムは、

- (1) まず、協調追跡基本方式に従い、強制的な視線誘導による協調追跡を実行。
- (2) 協調追跡実行時に得られる可視・不可視情報から観測可能領域モデル (シーンの 3 次元情報) を生成・更新。
- (3) 逐次更新されていく観測可能領域モデルを用いて、各 AVA に対して適応的に役割分担を行う。のように振る舞いを変化させ、モデルの更新に伴ってシステム全体としての対象追跡の効率を向上できる。

3.4 可視・不可視領域情報を用いた観測可能領域モデルの更新

マスタは、可視・不可視領域情報を獲得すると、観

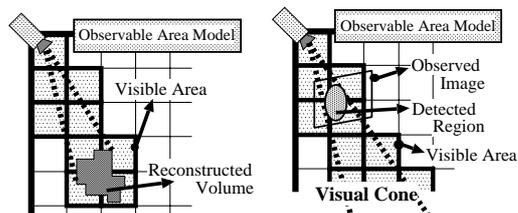


図 6 可視領域の伝搬 (左: 対象の体積の復元成功時, 右: 対象の体積の復元失敗時)

Fig. 6 Visible area propagation (Left: Volume reconstruction success, Right: Volume reconstruction failure)

測可能領域モデルを更新するために, 可視・不可視領域情報中の全ラベルを観測可能領域モデル中の各ラベルと比較する. 比較の結果, 新しく生成された可視・不可視領域情報と観測可能領域モデルの間で同じ領域中のラベルが異なれば, その領域に対応する観測可能領域モデル中の立方体は八分割される. この分割は, 以下の条件が共に満たされる限り実行され続ける.

- (1) 新しい可視・不可視領域情報と観測可能領域モデル中のラベルが異なっている.
- (2) 不等式

$$\frac{distance}{focallength} < \frac{constant}{2^{depth}} \quad (1)$$

が真である. 但し, $distance$ はカメラから対象までの距離, $focallength$ はカメラの焦点距離, $depth$ は Octree におけるそのオクタントの深さ, $constant$ は定数 (空間解像度定数) である. 視体積交差法により復元された対象の体積の精度は $distance$ と $focallength$ に依存するので, 上記の不等式によって Octree を分割する回数が定義される.

分割終了後, 各立方体に対応した可視・不可視ラベルが代入される. また分割・代入終了後に, ある一つの立方体が分割されてきたオクタントの全ラベルが等しくなった場合には, これらのオクタントは統合されて一つの立方体に戻る.

更に, 観測可能領域モデルの更新を促進させるために, 以下の方法により観測可能領域モデル内で可視領域を伝搬させる.

対象の体積の復元成功時 (図 6 左) 復元された体積領域と対応する観測可能領域モデル中の各立方体は, 可視であると判定される. また, 体積領域とカメラ間の領域も同様に可視であることは自明である. よって, この領域に対応する観測可能領域モデル中の立方体も VISIBLE に更新される.

対象の体積の復元失敗時 (図 6 右) 1 台のカメラのみから対象が観測されている場合には, 対象の位

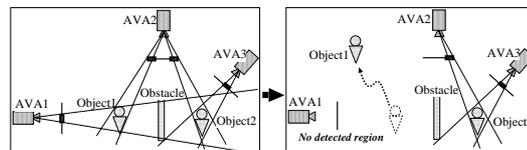


図 7 可視・不可視領域情報の訂正

Fig. 7 Renewal of the visible/invisible area information

置が分からないので, カメラから伸ばされる視体積中のどの領域までが可視領域であるかを判別できない. しかし, シーン中の障害物の配置状況のせいで, 物理的に 1 台のカメラからしか観測できない領域についても可視・不可視を判別することを目的として, 視体積に含まれる開領域全体 (但し, 既に不可視であると判定されている領域を除く) を可視領域として更新する.

対象の体積が復元できていない際に行われる可視領域の伝搬により「カメラ位置から見て対象位置よりも奥にあり, 且つ, その時点では未確定であったが実際には不可視である領域」に誤って VISIBLE を代入してしまう, 即ち不可視領域を可視領域と判断してしまう可能性がある. 後のモデル更新でこの誤判別を訂正できるようにするためには, 観測可能領域モデル内でラベルの上書きを行う必要がある. そこで, ラベルの代入に際して, VISIBLE よりも INVISIBLE に対して高い優先順位を与える. よって, 観測可能領域モデルと新たな可視・不可視領域情報内の同じ領域に対応するラベルがそれぞれ VISIBLE, INVISIBLE の場合, VISIBLE は INVISIBLE により上書きされる.

INVISIBLE による VISIBLE の上書きは, 視体積交差法による複数対象の体積復元の誤りの訂正の際にも行われる. 図 7 (左) の状況において, AVA1 は障害物に遮られて対象 2 を観測不可能である. しかし, 対象 1 の検出領域に対応する視体積と AVA2 と AVA3 が対象 2 を検出している 視体積間に交差領域が存在するため, AVA1 にとって対象 2 が存在する領域も可視であると誤って判断されてしまう. しかし, その後図 7 (右) のようにシーン状況が変化すると, AVA1 は対象 2 の体積復元に関与できなくなるため, 実際は対象 2 の存在領域は AVA1 にとって不可視領域であることが明らかになる. このように, ラベルの上書きには, 視体積交差法により同時に複数対象の体積を復元する方法の限界を補うという利点も存在する.

また, 誤差や単純な画像処理の失敗が原因となり体積の復元に失敗した結果, 誤ってラベルが代入してしまうのを防ぐために, 次の処理を加える. まず, モ

デル内の各立方体には、現在のラベルと観測ラベルが異なった回数を記録しておく。そして、全観測回数に対する観測ラベルの異なった回数の比が閾値を越えた際に、立方体の分割とラベルの代入が行われるようにする。

従って、ラベル代入の優先順位は INVISIBLE > VISIBLE > UNDEFINE と定義される。観測可能領域モデルは、全体が UNDEFINE で占められている初期状態から開始して、この優先順位に従って逐次可視・不可視ラベルが代入されることにより更新される。

3.5 観測可能領域モデルの管理

観測可能領域モデルは、各 AVA への視線誘導時に参照されるので、この参照を行う AVA はマスタに限定される。しかし、追跡の安定性向上を目的として、マスタとなる AVA はエージェンシー内で動的に入れ替わる。よって、各エージェンシーのマスタだけが観測可能領域モデルを持つようにシステムを設計すると、マスタが変わるたびにネットワークを介して観測可能領域モデルを送受信する必要があり、システムの即応性の維持、ネットワーク負荷の抑止という点で望ましくない。また、エージェンシーが複数存在する場合には、各エージェンシーのマスタが新しい可視・不可視領域情報を求めるたびに、全マスタ間で可視・不可視領域情報を送受信する必要もある。

しかし、新旧マスタ間やエージェンシー間で観測可能領域モデルを送受信する必要性を無くすために、全 AVA が観測可能領域モデルを持つようにシステムを設計しても、各マスタが新しい可視・不可視領域情報を求めるたびに、観測可能領域モデルの更新のためにマスタから全 AVA に対して可視・不可視領域情報が送信する必要がある。よって、この方式においてもネットワーク負荷の問題は解決できない。加えて、各 AVA の持つ観測可能領域モデル間で不整合が生じる可能性も発生してしまう。

そこで、提案システムでは、マスタが行う

- 観測可能領域モデルの更新と一括管理。
- 観測可能領域モデルを参照した、各 AVA への動的役割分担の案の決定。

を専用のモジュールに委任する。このモジュールを観測可能領域モデルマネージャと呼ぶ。各マスタは、新しい可視・不可視領域情報を獲得すると、この情報を観測可能領域モデルマネージャに送信する。

観測可能領域モデルマネージャの利用により、ネットワークの負荷だけでなく、観測可能領域モデルの管理に関する AVA の負担が削減され、AVA は協調追跡基本方式による対象注視に専念できるため、システムの安定性や即応性の向上が実現できる。

4. 観測可能領域モデルを用いた協調追跡

本章では、1. 観測可能領域モデルの更新と、2. このモデルを用いた各 AVA への動的な役割分担、のために必要な観測可能領域モデルマネージャと AVA 間の通信(図8)のプロトコルについて述べる。

4.1 マスタから観測可能領域モデルマネージャへのメッセージ

各フレームにおいて、マスタは次のメッセージを観測可能領域モデルマネージャに対して送信する。

- **VISIBLE/INVISIBLE MAP:** マスタで生成された可視・不可視領域情報が含まれている。これを受信した観測可能領域モデルマネージャは観測可能領域モデルを更新する。
- **OBJECT POSITION:** マスタで計算された追跡対象の3次元位置が含まれている。観測可能領域モデルマネージャは受信した対象の3次元位置を記録し、対象の移動軌跡を推定する。

観測可能領域モデルマネージャは、更新された観測可能領域モデルと対象の移動軌跡を参照して、1. 対象が可視領域から不可視領域に近づいていれば他対象の追跡などの他の役割を与える、2. 対象が不可視領域内から可視領域に近づいていればその対象方向へ視線を向ける、3. 対象が停止しているならば見失う可能性が小さいので、対象の詳細を捉えるためにズームインさせる、など各 AVA の役割分担を決定する。

4.2 観測可能領域モデルマネージャからマスタへのメッセージ

観測可能領域モデルマネージャが AVA に対して新たな役割の分担を決定した際には、次のメッセージがマスタに対して送信される。

- **ASSIGNMENT:** 1. 新しい役割が分担される AVA の ID, 2. 役割の内容、が含まれている。

但し、マスタとなる AVA は動的に変化しているので、実際にはメッセージはブロードキャストされる。そして、このメッセージはマスタにのみ受理される。

マスタが ASSIGNMENT を受信し、そのメッセージが有効であると判断すれば、そのメッセージ内容に従って新たな視線誘導方向や役割分担を対象となるワーカに対して送信する。メッセージの有効性は、メッセージの受信にかかった時間の遅れメッセージを受信した瞬間の各 AVA の最新の状態とメッセージ内容との間のずれ、などによって決定される。

協調追跡基本方式と同様に、各 AVA へ直接命令を与えることができるのはマスタだけであり、単なるデータベースである観測可能領域モデルは他のエー

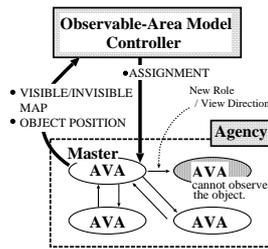


図 8 メッセージフロー
Fig. 8 Message flow

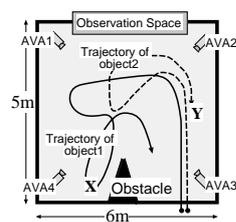


図 9 実験環境
Fig. 9 Experimental Environment

ジェントの行動を操作することはできない．このように，エージェント内のワーカに対する指示システムをマスタに限定することにより，あるワーカに対して同時に異なる命令を送ってしまう混乱を回避する．

5. 実験結果

協調追跡に対する提案モデルの有効性を検証するための実験を行った．

実験は，図 9 の環境で行った．各 AVA は，PC (Pentium600MHz) と視点固定型カメラ (SONY EVI-G20) によって構成されており，全ての PC はネットワークによって接続されている．また，各カメラは床から約 2.8 (m) の高さに設置されている．

上記の環境下で，まず対象 1 が観測空間に侵入して図 9 中の軌跡に沿って移動した後，地点 X において暫く停止する．対象 1 が地点 X にいる時には，AVA3 からは観測不可能であることに注意しておく．次に，対象 2 が観測空間に侵入して図 9 中の軌跡に沿って移動した後，地点 Y で停止する．この後，対象 1 が再び軌跡に沿って移動をはじめめる．

本実験では同様の環境下で，以下の三種類のシステムを実行し，その振る舞いを比較した．

- システム 1 協調を行わない独立追跡⁹⁾．
- システム 2 観測可能領域モデルを利用しない協調追跡 (協調追跡基本方式)⁶⁾．
- システム 3 観測可能領域モデルを利用した協調追跡 (提案方式)．

本実験における，追跡システムに対する要求を以下のように設定する．

- 全 AVA は最初に検出する対象 1 を協調注視する．
- 但し，対象 1 が観測できない AVA は，その他の対象の探索を行う．探索の結果，新たな対象を検出した場合は，その対象を独立に追跡する．
- 対象の詳細な情報を得るために，対象を見失わない範囲でカメラのズームインを行う．

よって，システム全体が与えられたタスクを満たすた

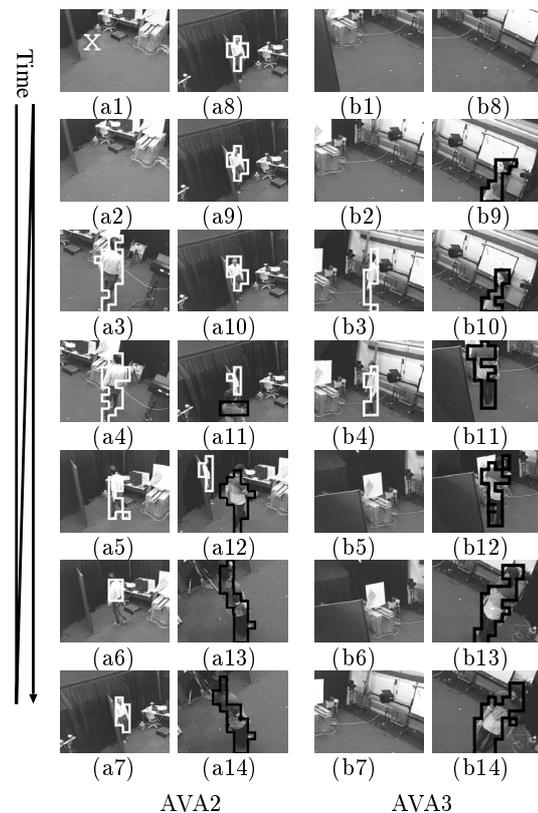


図 10 システム 1 の観測画像の一部
Fig. 10 Partial images of system 1

めに効率的に振る舞うためには，各 AVA の振る舞いの優先順位は，1. 対象 1 の観測，2. 対象 1 以外の観測，3. 対象の探索，の順序で与えられる．

各 AVA によって撮影された画像系列の一部を，図 10, 11, 12 に示す．図 10, 11, 12 は，それぞれシステム 1, 2, 3 を実行した際に AVA2, AVA3 によって撮影された画像である．画像のサイズは $320 \times 240 [pixel]$ である．また，画像中の黒線と白線で囲まれた領域は，それぞれ対象 1, 対象 2 の検出結果を，a1, c1, e1 中の X は，撮影画像中の地点 X を示している．各 AVA は，平均 0.5 秒 間隔で画像撮影を行う．

システム 1 (メッセージ交換を行わない独立追跡) では，自律探索 (a1, a2 と b1, b2) の後，対象 1 を検出，これを追跡対象とみなして，各 AVA は独立追跡を開始した (a3, a4 と b3, b4)．しかし，AVA3 は障害物に遮られて対象を観測不能になると，対象を見失ったものと判断して対象探索を開始した (b7, b8)．その後，対象 2 を検出し，以降は対象 2 の追跡を継

実験に使用したシステムで，カメラパラメータの変更，画像撮影，画像処理，通信に必要な時間である．

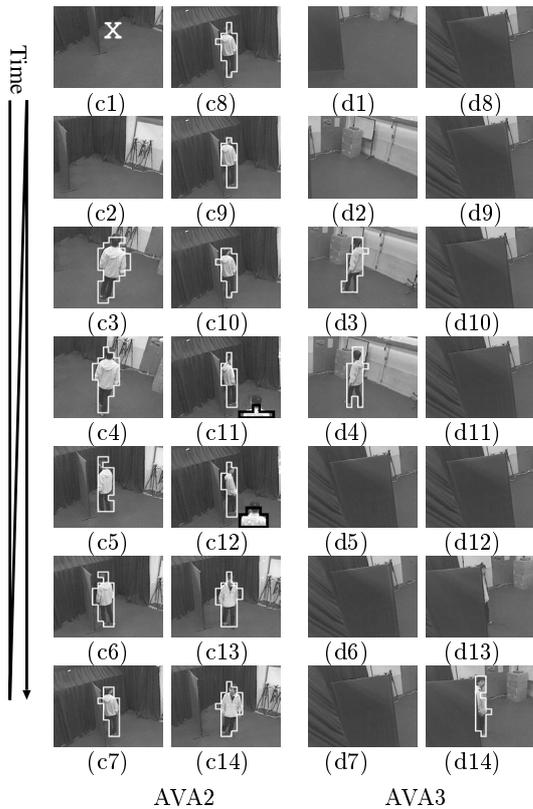


図 11 システム 2 の観測画像の一部
Fig. 11 Partial images of system 2

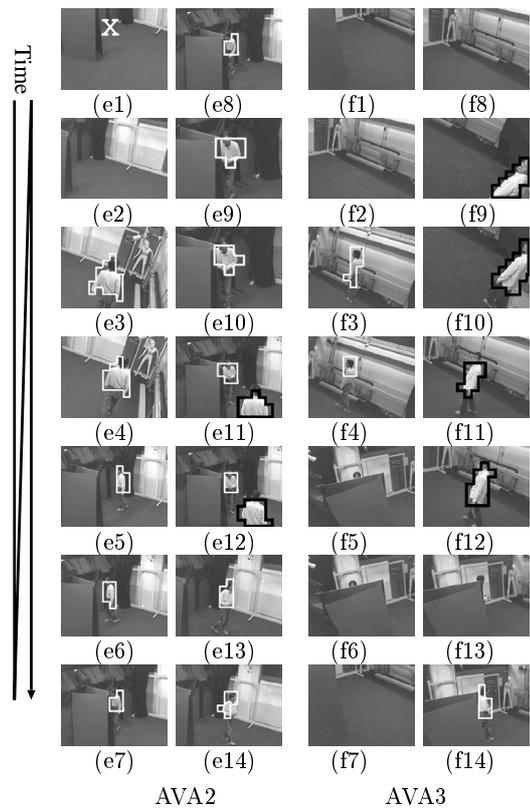


図 12 システム 3 の観測画像の一部
Fig. 12 Partial images of system 3

続した (b9 ~ b14)。また、対象 1 の追跡を行っていた AVA2 も、観測画像内で対象 1 と対象 2 が交差した際に (a11, a12)、対象 2 を追跡対象と判断してしまった結果、以降は対象 2 の追跡を行ってしまった (a13, a14)。この後、対象 1 が AVA3 の可視領域に移動しても、AVA3 はその移動に関して知る術を持たないので、対象 2 の追跡を続けてしまった。

システム 2 (観測可能領域モデルを利用しない協調追跡) では、自律探索 (c1, c2 と d1, d2) 後、対象 1 を検出して協調追跡を開始した (c3, c4 と d3, d4)。しかし、AVA3 は障害物に遮られて対象 1 を観測不能になった後も、マスタから知らされる対象方向を注視し続けた (d5 ~ d13)。それゆえこの間、AVA3 は対象 1, 2 のどちらに関するも有益な情報を獲得することができなかった。一方、他の AVA は追跡対象とみなした対象 1 を追跡し続けていた (c5 ~ c14)。

また、複数対象が観測画像中に映っている場合でも、対象同定が成功しているため、エージェントとして

本独立追跡システムでは、背景差分による対象検出の結果、画像中心に最も近い検出領域を追跡対象と見なしてカメラコントロールを行う。

追跡対象とみなしている対象 1 が観測画像中心付近に捉えられるように観測が行われている (c11, c12)。このように追跡対象の注視ができていているのは、各 AVA の検出結果から計算される追跡対象の三次元位置の軌跡を参照することにより、容易に時系列的な対象同定が実現可能であるためである。

システム 3 (観測可能領域モデルを利用した協調追跡) でも、まず自律探索 (e1, e2 と f1, f2) の後、対象 1 を検出して協調追跡を開始した (e3, e4 と f3, f4)。しかし、観測可能領域モデルマネージャが対象の移動軌跡と観測可能領域モデルを参照して、AVA3 が対象を観測不可能であると判断すると (f5, f6)、AVA3 の新たな役割として他対象の探索を提案するメッセージ ASSIGNMENT をマスタに対して送信した。これを受信したマスタは、AVA3 に対して他対象の探索を新たな役割とする命令を送信した。AVA3 は、この命令に従い再度シーンの探索を開始して (f7, f8)、図 9 中の地点 Z において新たに対象 2 を検出した後、対象 2 を追跡対象として単独追跡を開始した (f9 ~ f12)。

また、対象 1 が地点 X で停止している際には、観測可能領域モデルマネージャは、対象 1 が AVA3 以

外の AVA に対する可視領域内 (地点 X) で停止しているため、カメラの画角を小さくしても対象を見失いにくいと判断する。そして、各 AVA が対象の詳細を捉えた画像を得るためにズームパラメータを調整させるように提案するメッセージ ASSIGNMENT をマスタに対して送信した。このメッセージを受信したマスタは、ズームパラメータを調整する命令を AVA3 以外の AVA に対して送信し、各 AVA はその命令に従った (e9, e10) 。

また、システム 2 と同様、協調追跡基本方式に従うことにより、複数対象観測時にも対象 1 の注視が行われている (e11, e12) 。

この後、対象 1 が移動を再開し AVA3 から観測可能である領域に近づく、そのことを観測可能領域モデルマネージャが察知し、対象 1 の共同注視に AVA3 を再参加させるように提案するメッセージ ASSIGNMENT をマスタに対して送信する。このメッセージを受信したマスタは、対象 1 の協調追跡に再び加わるように AVA3 の視線方向を誘導した (f13) 。その結果 AVA3 は、対象 2 の単独追跡を中止して、対象 1 の追跡を再開した (f14) 。

最終的に獲得された観測可能領域モデルから AVA3 に関する可視・不可視情報だけを抽出した様子を図 13 に示す。左側、右側の図は、それぞれシーンを鉛直上向き、水平方向から観測した様子である。図中の P, Q は、それぞれ可視領域、不可視領域を示している。また、R の領域が障害物領域に相当することも確認できる。本実験では、モデル中の最小領域 (立方体) の一辺が約 16 (cm) になるように空間解像 (3.4 節を参照) を設定した。

次に、各システムがタスクを達成している尺度を定量的に評価するために、次の評価関数 $eval(f)$ を用いて、各システムのタスクの達成度を評価する。

$$eval(f) = \sum_{n=1}^4 obj(n, f) \times area(n, f) \quad (2)$$

$obj(n, f)$ は、 $AVAn$ が f フレーム目において追跡対象と見なしている対象の種類によって変化する重みである。本実験ではこの重み $obj(n, f)$ として、対象 1 に対して 1.0、対象 2 に対して 0.5 を与えた。 $area(n, f)$ は、 $AVAn$ の f フレーム目の観測画像における追跡対象領域の検出面積 (検出画素数) である。システム動作中の評価関数値の遷移を図 14 に示す。

図 14 から、全フレームにおいて提案システムの評価値が優れていることが確認できる。全フレームにおける各システムの評価値の平均値は、システム 1, 2,

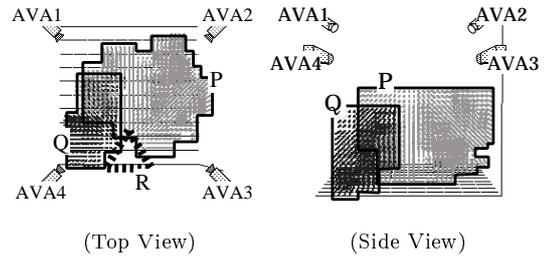


図 13 最終的に獲得された AVA3 に関する観測可能領域モデル
Fig. 13 Accumulated Observable-Area Model for AVA3

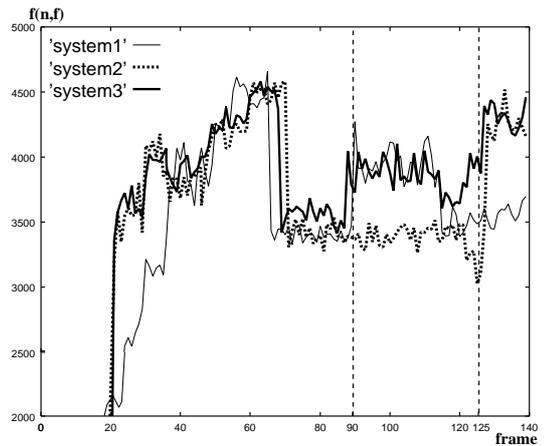


図 14 システムのタスク達成度を評価した関数
Fig. 14 Evaluation Function

3 についてそれぞれ、3026, 3143, 3403 であった。システム 2, 3 実行後の評価値の上昇がシステム 1 と比較して急である理由は、システム 2, 3 では最初に対象を検出した AVA がその他の AVA の視線を検出対象方向へと誘導した結果、全 AVA の対象追跡開始のタイミングが早められたためである。フレーム 90 ~ フレーム 125 においてシステム 1, 3 の評価値がシステム 2 よりも高い理由は、システム 2 が障害物方向を注視し続けているのに対して、システム 1, 3 は対象 2 の観測を行っているためである。また、フレーム 125 ~ フレーム 140 においてシステム 2, 3 の評価値がシステム 1 よりも高い理由は、システム 1 が優先度の低い対象 2 の観測を行っていないのに対して、システム 2, 3 は対象 1 の観測を行っているためである。

以上のように、各システムの振る舞いの比較から、提案システムは協調追跡基本方式の利点を残したまま、各 AVA がそれぞれの能力を活かすことが可能な役割を動的に分担できていることが確認できた。また、与えられたタスクの達成度を評価関数として定量的に評価した結果からも、提案モデルにより対象追跡に関するシステム全体の効率を向上できることを確認できた。

6. ま と め

本論文では、シーンの観測可能領域モデルを用いた移動対象の協調的追跡を提案した。提案手法では、協調追跡タスク実行時に得られる情報のみから生成可能である観測可能領域モデルを利用することによって、システム全体が与えられたタスクを実行するための各AVAの振る舞いを決定する。そしてその結果に基づいて、各AVAに対して適応的に役割分担を行うことができる。

本論文で提案したモデルは、視覚を持ち合わせたマルチエージェントシステムにあわせて設計されたものである。しかし、複数自律システムの協調動作のためには協調相手の能力や現在の状況に関する知識が必要であるという基本的な考えは、協調を伴う様々なタスクに応用可能である。

今後は、以下の点を中心に研究を進める予定である。

- より柔軟且つ適応的な振る舞いが可能な複数対象追跡システムへの拡張。
- ダイナミックメモリ¹¹⁾を利用した情報交換による各エージェントの自律性と動作の柔軟性の向上。

謝辞 本研究は、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業 (JSPS-RFTF 96P00501) の補助を受けて行った。また、本研究の開始に際して有益な助言を頂いた京都大学の棚橋和也氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) T. Matsuyama: Cooperative Distributed Vision - Dynamic Integration of Visual Perception, Action and Communication -, Image Understanding Workshop *Proceedings*, pp. 365-384(1998).
- 2) T. Kanade, *et al.*: Cooperative Multisensor Video Surveillance, Image Understanding Workshop *Proceedings*, pp. 3-10 (1997).
- 3) A. Nakazawa, H. Kato, S. Inokuchi: Human Tracking Using Distributed Vision Systems, 14th ICPR *Proceedings*, pp.593-596(1998).
- 4) 小沢慎治: ITS 道路画像における認識と理解, 電子情報通信学会研究会資料, PRMU98-105, pp.99-104(1998)
- 5) 宮崎英明, 吉吉健太郎, 亀田能成, 美濃導彦: 複数カメラを用いた講義映像の実時間作成法, 画像の認識理解シンポジウム (MIRU'98), Vol.I, pp.123-128(1998).
- 6) 松山隆司, 和田俊和, 丸山昌之: 能動視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), Vol.I, pp.365-

370(1998).

- 7) 和田俊和, 浮田宗伯, 松山隆司: 視点固定型パン・チルト・ズームカメラとその応用, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J81-D-II, No.6, pp.1182-1193(1998).
- 8) C. Stauffer, E. Grimson: Adaptive background mixture models for real-time tracking, *CVPR99 Proceedings*, Vol.II, pp.246-252(1999).
- 9) 松山隆司, 和田俊和, 物部祐亮: 視点固定型パン・チルト・ズームカメラを用いた実時間対象検出・追跡, 情報処理学会論文誌, Vol.40, No.8, pp.3169-3178(1999).
- 10) N. Ahuja, J. Veenstra: Generating Oc-trees from Object Silhouettes in Orthographic Views, *IEEE Trans. on PAMI*, Vol2, No.2, pp. 137-149(1989).
- 11) T. Matsuyama, *et al.*: Dynamic Memory: Architecture for Real Time Integration of Visual Perception, Camera Action, and Network Communication, *CVPR2000 Proceedings*, Vol.II, pp.728-735(2000).

(平成?年?月?日受付)

(平成?年?月?日採録)



浮田 宗伯 (学生会員)

平8岡山大工学部卒業。現在、京都大学大学院情報学研究所博士後期過程在学中。コンピュータビジョン、分散協調処理に関する研究に従事。1999年電子情報通信学会論文賞。



松山 隆司 (正会員)

1976年京都大学大学院工学研究科修士過程修了。京都大学工学部助手、東北大学工学部助教授、岡山大学工学部教授を経て、1995年より京都大学工学院工学研究科教授、現在同大学大学院情報学研究所知能情報学専攻教授。工学博士。画像理解、人工知能、分散協調処理の研究に従事。1980年情報処理学会創立20周年記念論文賞、1990年人工知能学会論文賞、1993年情報処理学会論文賞、1994年電子情報通信学会論文賞、1995年ICCV David Marr賞、1996年国際パターン認識連合フェロー、1999年電子情報通信学会論文賞、2000年画像センシングシンポジウム優秀論文賞。人工知能学会評議員、情報処理学会理事、同学会フロンティア領域委員会委員長