

分散協調型対象追跡システムの設計に関する考察

中澤 篤志^{†1,†2} 日浦 慎作^{†3} 加藤 博一^{†4}

カメラが結合された複数の画像処理装置を地理的に分散配置し、ネットワークを用いて結合する形の分散協調による対象追跡システムは、分散協調視覚の中で最も重要な研究の1つということができ、今日までいくつかのシステムの提案がなされてきた。各々のシステムでは、個別の画像処理装置における画像処理レベルや画像処理装置間の情報の流れ、制御ルールや解の抽出方法、自律性等において互いに異なった点があり、これらを整理してその特性を考察することが必要であると考えられる。本論文では分散協調型対象追跡システムを設計するうえでの各種構成要素とその効果を整理し、提案されてきた各種システム、および我々が提案したシステムを評価しそれらの特性の考察を行う。これにより、今後の同類システム設計における設計指針について論じる。

A Survey of the Cooperative Distributed Visual Tracking Systems

ATSUSHI NAKAZAWA,^{†1,†2} SHINSAKU HIURA^{†3} and HIROKAZU KATO^{†4}

This paper shows the introduction and survey of the Cooperative Distributed Vision (CDV) systems that consist of many image processor and cameras connected through a computer network. Nowadays, some systems that is based on the idea of CDV systems have been proposed. We evaluate the difference between each systems according to their image processing hierarchy, communication procedure, control rules, their independency and resulting features. These survey is expected for the designing new CDV based image recognition systems.

1. はじめに

近年の映像コンテンツ等における高度な映像利用やセキュリティの自動化等の用途に対して、複数カメラを用いた多視点映像取得・処理システムは特に高い注目を集めている¹⁾。カメラ台数の増加による撮影範囲の拡大やオクルージョンの減少、画像の高解像度化等に対して大きな効果がある。一方、より多くの画像を扱うことによるシステムの複雑化や計算量の増大等の問題が生じるため、これを解決したシステムを構築するための方法論が求められている。

このような背景のもと、集中的にこのようなシステムの実現に向けて取り組んだ試みとして、松山らが5年間にわたり行った分散協調視覚に関する研究プロジェ

クトがある²⁾。分散協調視覚システムとは、カメラが結合された複数の画像処理装置(観測ステーション)を地理的に分散して配置し、ネットワークによって結合したシステムである。このような構成を用いて広域環境中を移動する対象を追跡する研究は、同プロジェクトでの研究例を中心に数多く提案されてきた^{3)~9)}。これらの先例をもとに本論文では、広域環境における対象追跡タスクを目的としたシステムを設計するうえで生じる要点を整理し、分類・考察を行うことで、今後の設計における指針を示すことを目的としている。

2. マルチエージェントとしての分散協調視覚

分散協調視覚による対象観測タスクでは、環境を複数の観測ステーションで分散観測し、その間のコミュニケーションによって一貫した観測を実現する。すなわち、多数の自律した知能的処理機構(マルチエージェント)として成り立っていると考えられる。ここで、一般にマルチエージェントシステムの設計においては、以下のような項目が基本的な構成基準となると考えられる¹⁰⁾。

(1) 言語行為：エージェントの内部状態および獲得した情報によって、メッセージ発信や様々な行

†1 科学技術振興事業団

Japanese Science and Technology Corporation

†2 東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

†3 大阪大学大学院基礎工学研究科

Faculty of Engineering Science, Osaka University

†4 広島市立大学情報機械システム工学科

Faculty of Information Sciences, Hiroshima City University

動を行う。

- (2) 情報共有モデル：複数エージェント間の情報共有。
- (3) 分散問題解決：システム全体で矛盾のない結論を導出する。
- (4) マルチエージェントプランニング：目的を達成するための行動計画の立案。

分散協調視覚システムに対してこのフレームワークを適用すると、以下のような要素技術が関連すると考えられる。

- (1) 言語行為：入力画像の処理と認識、他の観測ステーションへのメッセージ。
- (2) 情報共有モデル。
- (3) 分散問題解決：観測ステーションから送られた情報の統合処理による矛盾の解消。
- (4) マルチエージェントプランニング：観測ステーション間での対象観測戦略。

分散協調視覚システムにおける言語（入出力情報）行為とは、カメラから得られる画像を各々のステーションでどの程度まで認識処理し、抽象表現し、他のステーションに伝達したり動的にセンサを制御したりするかを意味する。観測ステーション間の情報共有モデルとしては、黒板モデル¹¹⁾等いくつかの選択肢が考えられるが、リアルタイムに変化する外界の観測に適した他の手法も提案されている、また、視覚センサの共有問題も重要な課題である。分散協調視覚システムにおけるマルチエージェントは、限られたカメラによって複数の対象を観測しなければならないという物理的制約がある。このため、エージェント間で限られたカメラをどのように用いて対象を観測するかという問題が生じる。分散問題解決とは、複数のエージェントからの情報を統合し首尾一貫した解を得ることである。複数の観測ステーションによる対象観測タスクの場合、各ステーションから得られた情報の統合、すなわち対象のマッチングや統合解の検出アルゴリズムがこれに該当する。マルチエージェントプランニングに類する点としては、観測ステーション群が対象を観測するために立案する対象観測戦略があげられる。複数のステーションにより広域を観測する場合に、その間であらかじめ観測戦略を立てておくこと等が含まれる。

以降各章では、これらの基準から見た既存システムの特徴について論じる。3章では、実世界からの言語獲得である観測ステーションの画像認識処理について述べ、4章では観測ステーション間の情報共有や観測センサ共有問題について論じる。また同時に対象に対する観測情報統合の核となる、観測ステーション間の

対象共有アルゴリズムについて述べる。5章では、ステーション間のメッセージによる相互制御、およびそれによる分散問題解決アルゴリズムについて述べる。6章では、広域を観測するために観測ステーション間で行うプランニング（観測戦略設計）について述べる。

3. 実世界からの言語獲得：観測ステーションにおける画像認識

視覚センサから得られる動画像の情報量は膨大である。一般的なVGA解像度（640×480pixel）、ビデオレート（30Hz）の動画を扱う場合、モノクロ画像（256階調、1byte/pixel）程度であっても約9.2MByte/sec程度の帯域幅が必要となる。N台のカメラを用いた分散視覚システムではそれがN倍されることとなり、この問題はさらに顕著となる。複数のカメラから得られた画像をスイッチャ等で切り替えながら単一CPUで処理した研究等もあるが¹²⁾、現実的な速度で動作させることは難しい。分散協調視覚システムでは、カメラと画像処理システムを1対1に割り当てて処理することでこの問題を解決する。これは、カメラから得られた画像を何らかの抽象的な情報にリダクションし、伝送することを意味する。この抽象化をどの程度行うかが、システムの構成を決定する第1段階であるといえる。

現在提案されているシステムでは、各ステーションで視野内のオブジェクト1つ1つを認識し、その位置情報等の情報量に変換することで抽象化しているものが多い^{3),5)}。この場合、ステーション間の情報統合のために交換する情報量が削減され、効率的な情報統合および情報伝送を行うことができる。一方で、ステーションでオブジェクトの認識を誤るとその復帰が困難になるという問題がある。これに対して和田らの提案¹³⁾は、画像から何らかの特徴量（差分・ラベル画像等）を抽出しそれをステーション間で組み合わせることによってシーンを認識する。これはコンピュータシミュレーションのみの提案であり、通信帯域や組合せの爆発を生じる可能性が考えられるが、多様な認識結果を生成するという意味で興味深い。

一方、観測ステーションでオブジェクトの認識を行うが、個々の観測ステーションで認識を確定させることはなく、認識の信頼度を用いることで後の情報統合処理段階の多様性を持たせようとする試みもある⁸⁾。我々はこの機構を取り入れ、観測ステーションにおいて個々の対象の抽出を行うが対象の認識を行うことはせず、その特徴量（位置、速度、色分布）を抽出するのみにとどめた機構とした⁷⁾。この情報をステーション

ン間で交換し保持することで、システム全体での対象認識処理に用いる。

Nishio らのシステム⁹⁾では、屋外環境における車両のリアルタイム追跡・認識を目的としている。ここでは各観測ステーションでは他のステーションから与えられた情報をもとに対象を検索し、その情報に近い存在の情報返す機構により実現されている。ここでは、画像に対して与えられた仮説を検証するトップダウンの処理が行われている。この長所は、システム全体で一貫した対象認識結果を持つことができるという点であり、システム構成としてシンプルになることである。一方で、仮説が与えられない新たな対象が出現した場合の処理が難しくなることが予想される。

4. 観測ステーション間の情報・対象・センサ共有

次に、ステーション間での情報、観測対象および観測に用いる計算機資源に関する共有モデルについて述べる。

4.1 情報共有

黑板モデル (blackboard model)¹¹⁾ はマルチエージェントシステムにおける情報共有手法として有名である。これは複数のエージェントが共通のメモリ空間を用いて情報交換をするというアイデアであり、Raoらの複数ステーションによる対象識別システムでは、ステーション間でブロードキャスト通信を使うことで、仮想的にこのモデルを実現している⁸⁾ (図1上)。しかし厳密に考えれば、時々刻々と移動する対象を観測し、通信遅延のあるネットワークでつながれた状況にある分散視覚システムでは、スタティックな情報交換手法である黑板モデルを直接用いることはできず、何らかの工夫が必要となる。ダイナミックメモリ¹⁴⁾は、ネットワーク上でステーションが共有できるメモリであるとともに、対象の移動や通信遅延を補償する機構を持つことでこれを解決している

ダイナミックメモリを含む黑板モデルの欠点は、すべてのステーションが単一のメモリにアクセスするためにその負荷および通信帯域が増大するという点である (図1下)。この問題を回避するため、我々は観測ステーションの観測領域に応じた部分的データ共有手法を用いている⁶⁾。すなわち、広域を観測する複数のステーションが存在する場合、その情報共有は地理的に隣接するステーション間のみでよい。これに着目し、必要なステーション間のみユニキャスト通信を用いて情報を共有することで、通信帯域および負荷の問題を回避している。またこの間ではダイナミックメ

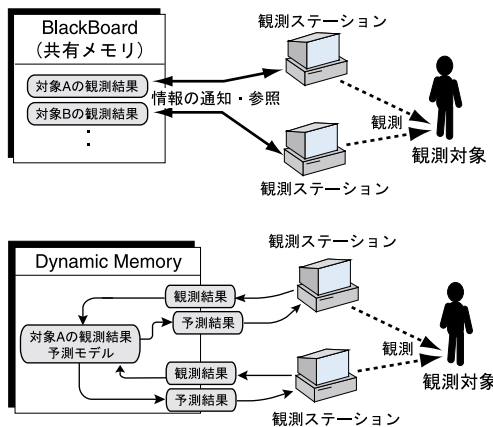


図1 blackboard モデルと dynamic memory
Fig. 1 Two kinds of information sharing architecture, upper: blackboard model, lower: dynamic memory.

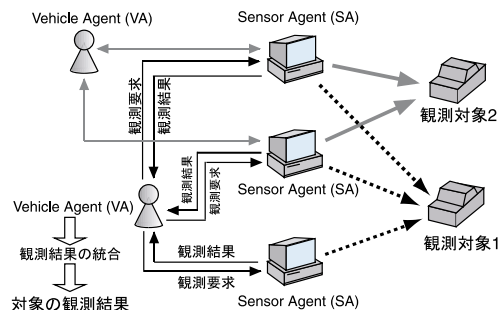


図2 西尾らのシステムにおける対象およびセンサ共有モデル
Fig. 2 The Nishio's system's architecture for sharing objects and resources.

モリと同様に、通信遅延や対象の運動モデルを考慮した情報補償機構を設けている。

4.2 対象およびセンサの共有

対象およびセンサの共有問題は、複数の観測対象をどのようにして複数の観測ステーションに割り当てるかを解決する問題であり、後の情報統合とも密接に関わる。同一対象を複数の視点で観測することによって、より正確・詳細な観測ができるだけでなく、観測の頑健性の向上も図ることができる。また、有限個のカメラを複数対象観測にどのように割り当てるかという問題も、これに付随して生じる。

西尾らの交差点車両追跡システム (図2) は、トップダウン的観測を実現することで、最もシンプルな対象共有モデルを有している。観測対象の情報は観測システム全体の中で唯一存在する VA (Vehicle Agent) によって管理され、このエージェントがすべての観測システム (Sensor Agent: SA) に観測が発行される。これにより複数の観測ステーションで複数の対象を観測

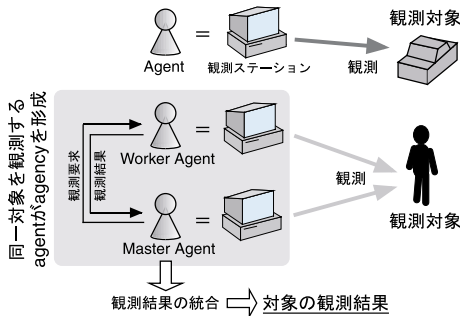


図3 松山らのシステムにおける対象およびセンサ共有モデル
Fig. 3 The Matsuyama's system's architecture for sharing objects and resources.

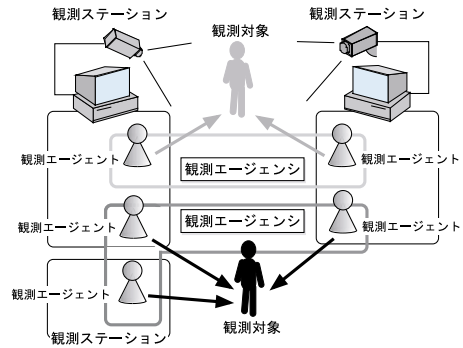


図4 提案する対象およびセンサ共有モデル
Fig. 4 The proposed system's architecture for sharing objects and resources.

する機構が実現されている．ここでは，各観測ステーションでの観測結果の相違は観測フレームごとに統合され，その相違は消滅する．つまり，観測ステーションごとに生じる多様な計測結果が失われてしまうことを意味する．

松山らのシステムでは，屋内環境での対象の能動的観測を実現するため，パン・チルト・ズーム制御可能なカメラを持つ観測ステーションが用いられている³⁾．このため，ズーム等を用いた対象の注視を行うことが可能になり，詳細な対象観測を行うことができる．特定の同一対象を注視している観測ステーション間には「エージェンシー（agency）」と呼ばれるグループが構築される（図3）．エージェンシーの中には，対象をメインで観測するマスタエージェント（master agent）と，それに付随して観測を行うワーカエージェント（worker agent）が存在する．エージェンシー内では対象に関する解はマスタエージェントによって統一され，ワーカエージェントはマスタエージェントの要求に従って観測動作を行う．ここでは，1つのエージェンシーが1つの観測対象と対応しており，観測対象は1台以上の観測ステーションから注視される関係にある．このため，特定対象に対する詳細な観測が実行できる．一方で，広域中に存在する多数の対象を同時に観測するタスクでは，観測不能な対象が存在することが考えられる．また，観測結果は逐次マスタエージェントによって統合されている．

我々のシステムは屋内環境におけるセキュリティ用途を目標とし，固定カメラによる観測ステーションを用いた．多数の対象を同時観測するため，単一のステーション上では対象を観測するプログラム（観測エージェント）を複数個並列して動作させることで，複数対象の同時観測に拡張するアーキテクチャを提案した⁷⁾（図4）．観測エージェントは観測対象と1対

1に対応し対象の観測を行う．観測ステーション上では，その観測視野中に存在する対象と同数のエージェントを並列に動作させ，全対象の同時観測を行うことができる．同一対象を観測する観測エージェント間にはエージェンシーが構築され，情報が密に交換される．この構成は複雑であるが，単一のカメラを複数対象の同一観測に配分するには有効な手法である．また，各々のステーションで動作する観測エージェントは独立して動作し，マスタエージェントのような存在によって情報統合や制御がなされているわけではない．これにより，同一対象に対してシステム内で複数の観測解が存在するという特徴を持つ．

なお，特定の対象を詳しく観測すべきか多くの対象を同時に観測すべきかという問題は，そのシステムに与えられた状況によって変化する．これに関して浮田らは，パラメータを変化させることによって動的に観測ステーションの動作を変化させる手法を提案している¹⁵⁾．

5. 観測ステーション間でのコミュニケーションと情報統合

観測ステーション間のコミュニケーション（言語行為）とそれによる情報統合手法について述べる．分散エージェント間のコミュニケーションフレームとしては，契約ネットプロトコル（contract net protocol）¹⁷⁾ や多段交渉プロトコル（multistage negotiation protocol）¹⁸⁾ 等がよく知られている．前者はエージェント間のタスク割当て手続きをタスクの公開・契約とするプロトコルであり，後者はそれに観測資源の割当て機構を含めたものである．これらのプロトコルでは，個々のエージェント間の通信手続きを規定しているが，システム全体としてどのような制御構成が結ばれるべきかを規定したのではなく，同しプロトコルを用い

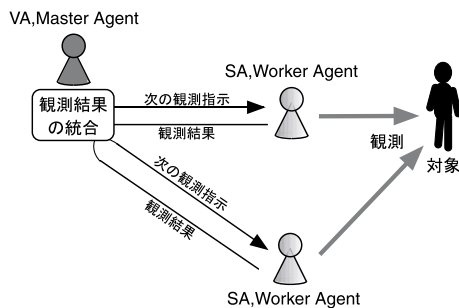


図 5 統合解がエージェントにフィードバックされるシステム
 Fig. 5 The systems that the coordination result is feed back to each seeing agents.

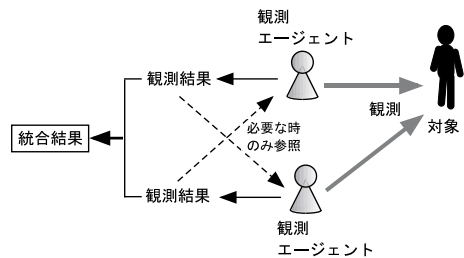


図 6 提案システムにおける情報の流れ．統合解は必要時のみ参照される
 Fig. 6 The proposed system in which the agents have independently works.

たとしても様々なシステム構成(エージェントの関係)をとることができる．本論文では、これらのプロトコルよりも上位のコミュニケーションフレームについて論じる．すなわち分散協調視覚システムにおいて、ステーションどうしがどのような関係を持ち、どのような情報のフローや統合が行われるかについて例証し、比較・検討する．

5.1 解の多様性とフィードバック

同一対象に対する観測を複数の視覚システムで行った場合、それらの解はある程度の誤差を含んでいる．この解の差異をどのように取り扱うかによって、システムの性質が変化する．

Nishio らのシステム⁹⁾ および松山らのシステム³⁾ においては、単一の観測対象に対する情報はシステム内で唯一保持される(図5)．複数の視覚システムによって得られた解は、観測フレームごとに統合されて唯一の解となり、前者のシステムでは VA、後者のシステムではマスタエージェント内で保持される．ここで統合された解は各 SA や観測ステーションにフィードバックされ、次観測フレームの初期値として用いられる．

我々の提案システムでは⁷⁾、複数のステーションに存在する観測エージェントが保持する解は独立しており、統合処理を行って同一性を保つことはない(図6)．このためシステム内では、同一対象に対する複数の解が存在することになる．これらから得られる統合解はシステムの出力として用いられるが、各々のエージェントにフィードバックすることはない．観測エージェントは通常、自らの観測解のみに基づいて対象の観測処理を行う．

統合解の取扱いの相違はシステムが保持する解の多様性を意味し、観測の頑健性に対して影響を与える．前者の方式では、対象に対する観測結果はシステム内で唯一であるため、一部の観測エージェントのノイズや

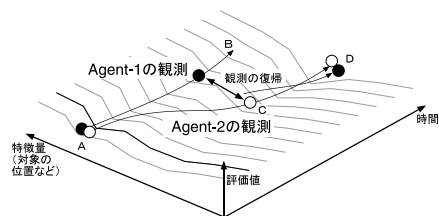


図 7 複数の解を保持することによる観測の頑健性

Fig. 7 Keeping different results takes good effects for the observation's robustness.

観測ミス等で統合結果にエラーが生じると、次フレームにおけるすべてのエージェントの観測要求に対してエラーがフィードバックされるため、以降の観測への影響が大きくなる．一方後者の構成ではすべての観測エージェントが独自の解を保持し、次の観測方針も独自に決定されるため、一部のエージェントにエラーが生じた場合でもシステム全体に対して影響を及ぼさず、結果的に観測の頑健性を向上させることになる．

この相違を概念的に示したものを図7で示す．対象観測における真値とは、何らかの評価関数を最小にする特徴量となるはずであり、分散視覚による観測は時系列的にこの関数を探索する行為であると考えることができる．ここで、同一対象に対する解がシステム内で唯一存在する場合(図中 Agent-1のみ)、局所解に陥った場合その後の観測を続けることが難しくなる(図中 Case-B)のに対し、複数の解を共存させる(図中 Agent-1, 2)ことによって、一部のエージェントが局所解を探索したとしても、その後正しい解探索に復帰することができ、頑健な観測が可能である．

我々はこの違いを、実環境における実験およびシミュレーション実験によって示した⁷⁾．シミュレーション実験では、6台の観測ステーションが存在する環境下で6対象が移動する場合を想定し、統合結果を観測ステーションにフィードバックするアルゴリズムとフィードバックしないアルゴリズムを実装し実験を行った．観

観測ステーションの対象計測においては、視線方向に大きい誤差が存在する状況を想定した。観測誤差が小さい場合においては相違がなかったのに対し、誤差が大きくなるにつれ後者のアルゴリズムの頑健性が高いことが示された。

5.2 観測ステーションの制御と自律性

観測ステーションの動作は、他のステーションからのメッセージに制御される場合と、自律的判断に基づく場合がある。前者の場合、あらかじめ設定された特定のホストが制御を行う場合と、動的に変化する場合がある。特定のホストが他のステーションを制御する例で典型的なものが、Nishio らのシステム⁹⁾である(図2)。ここでは、システムで観測する全対象の情報(VA)を集中的に管理するホストが1台存在し、他のセンサエージェント(SA)は完全に制御される。この方式の利点は、観測情報の取扱いと同様、構成がシンプルであり通信負荷が比較的小さいという点である。逆に欠点としては、対象が増加した場合の負荷分散(スケーラビリティ)と、集中管理するホストの障害に対して弱いという点である。制御ホストが動的に変化するケースとしては松山らのシステム³⁾が代表的である(図3)。このシステムでは前述したように、観測対象に対応するステーションがエージェントを構築する。エージェント内のステーションを制御するのは、その中の特定のステーション(マスタエージェント)である。同じエージェント内の他のステーションは、基本的にマスタエージェントの観測命令に従って観測を実行する。

これらのシステムでは、いずれも観測ステーション間に「制御—被制御」という階層関係が存在する。我々の提案するシステムでは、すべての観測ステーション(エージェント)が対等の立場として存在する⁷⁾(図4)。各エージェントでの観測は各々が自律的に行い、基本的に他のエージェントの制御命令に従うことはない。同一対象を観測する観測エージェント間では、観測情報の交換が行われるが、通常の観測プロセスではこの情報は用いられず、自らの観測に失敗した場合のみ参照される。観測に失敗したエージェントは、自らの観測情報とは異なる他のエージェントの観測情報をもとに観測を試みることで、再度観測を再開することが可能になる。この「動作の自律性」は前述した解の多様性と密接に関連しているといえる。本システムでは、エージェントがの自律的動作を行い他の存在による制御に依存しないため、一部ステーションの故障に対しても頑健であることが実験的に示されている⁶⁾。一方、次節で述べるエージェント間の「対象の対応付

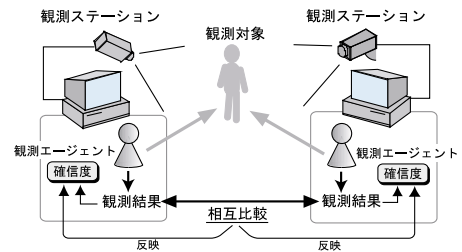


図8 観測ステーション間の対象対応付け機構の例

Fig. 8 The object matching algorithm between seeing stations.

け」機構が必要になり、機構的に複雑になるという問題がある。

5.3 対象の対応付け

前節で述べた「制御—被制御」関係の存在は、システム内で同一対象を観測するエージェントをグループ化することを意味する。すなわち、対象に対する情報を保持する存在をシステム内に唯一存在させ、それが他のエージェントを制御することによって観測を実現する。

一方、対象の観測情報がエージェントごとに多様に存在し、それぞれが自律的に観測するシステムの場合、システム内で同一対象を観測するエージェントをグルーピングする新たな機構が必要となる。このため我々は、各々のエージェントが持つ「確信度」に基づいた自律的グルーピング機構を使って実現する機構を提案した⁷⁾。ここでは、同じ観測対象を観測しているエージェントは自律的に寄り集まり、新たなエージェントを構築する。エージェント内では密に情報を交換し、情報の統合やエラーからの復帰において相互協力が行われる。一方、エージェントに属する一部エージェントの観測にエラーが生じたり、誤った対象を観測したりした場合には、エージェントから離脱し単独観測に移行するという機構である(図8)。

エージェント構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属しているエージェントに対応する対象を正しく観測している可能性を示す値であり、前述した「画像認識処理における確信度」と、「エージェントどうしの観測結果の相互評価による評価値」の線形和で表される。すなわち、以下のようなパラメータを観測フレームごとに評価することで実現される。

(1) 画像認識処理における確信度

対象観測中に注視対象の画像領域が他の対象の領域と交わる等のイベントが生じた場合、対象の対応付けメ

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) エージェントどうしの観測結果の相互比較
複数ステーション間で複数対象を対応付けるために，観測ステーションでの観測条件によって変動を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閾値以上である場合には確信度を下げ，閾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．システム内では，エージェント間を仲介する「メディアータ」により，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トを形成する．確信度が低下し閾値以下になったエージェントは，エージェントから離脱し単独で観測を行う．

この機構では，対象の対応付け問題を観測フレームごとに行うのではなく，ある一定時間での連続的観測によって結果的に正しい対応付け結果を得ることができる．観測状況によって一時的に対象の誤対応が生じたり，同一の対象が別のオブジェクトとして識別されたりする可能性がありうるが，先に述べた解の多様性と疎な情報結合方式により，これらの影響を受けることなく最終結果を導出できる．ここでは，階層関係を持たないエージェントどうしの自律的グルーピングが実現されている．

6. 観測戦略設計

複数の観測ステーションが広域中の異なる領域を観測する場合，その間で連続的に人物を観測するための戦略設計が必要となる．この問題に関しては分散協調視覚プロジェクト初期から松山ら¹⁶⁾，和田ら¹³⁾によって指摘されており，地形情報と観測ステーションの視野情報からグラフ理論的なトポロジーを導き出し実現する理論が提案されている．

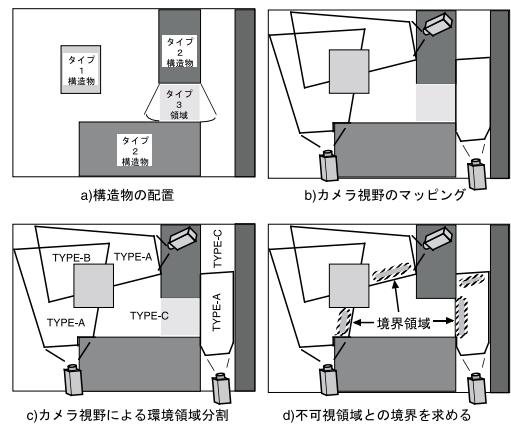


図9 観測ステーションのカメラ視野に基づく環境解析
Fig.9 The environment analysis according to seeing stations' viewing areas.

広域環境を取り扱った我々の研究例^{6),7)}では，あらかじめ与えられた環境情報と観測ステーションが持つカメラのパラメータから，環境を3種類の領域に分割し行動計画を立てる手法を提案している．観測ステーションはあらかじめ与えられた環境マップ（観測対象の通過可能領域やオクルージョン領域等）を保持し，動作が始まると自らのカメラキャリブレーションパラメータおよび他の観測ステーションが持つパラメータを，ネットワークを通じて獲得する．これを，図9の手続きに従って解析する．これにより，環境マップは以下の3種の領域に分割される．

TYPE-A) 単独のステーションの観測可能領域

TYPE-B) 複数のステーションの観測可能領域（共同観測領域）

TYPE-C) 不可視領域

この情報は，システム内のすべての観測ステーションに保持され，以下のようなルールで行動計画が生成される．

(1) 対象がステーション A に単独で観測されている領域からステーション A, B の共同観察領域に進入する場合（図10上），ステーション A はステーション B に現在の対象の位置情報を格納したメッセージを送る．これによりステーション B は新たな対象を観測できる．

(2) 観測対象が共同観測領域にいる場合（図10上）複数の観測ステーションが検出した人物位置を交換しながら追跡を行う．複数視点から同時に対象人物の位置計測を行うことになるため，計測結果を統合することでより正確な人物位置を推定することができる．

(3) 図10下は対象が複数ステーション間の不可視領域に進入した状況である．この場合対象が不可視領域

表 1 代表的な分散協調型対象追跡システムとその特性

Table 1 The comparison of the cooperative distributed visual tracking systems.

項目/研究例	Rao, et al. (1980)	Nishio, et al. (1992)	Matsuyama, et al. (1998)	Nakazawa, et al. (2001)
タスク	対象識別 (屋内)	車両追跡 (屋外)	能動的对象観測 (屋内)	人物追跡 (屋内)
画像処理による獲得情報	対象位置, 特徴量	対象位置, 特徴量	対象位置	対象位置, 特徴量
情報共有モデル	黒板モデル	単一ホスト上メモリ	Dynamic Memory	黒板モデル (変形)
対象・センサ共有モデル	-	対象とセンサは多対多	対象とセンサは 1 対 1	対象とセンサは多対多
エージェント制御モデル	独立動作	集中制御	制御・被制御は動的変化	完全分散
観測解の多様性	あり	なし	なし	あり
広域観測戦略設計	なし	なし	あり	あり
特徴・制約	対象識別に特化	構成がシンプル	パン・チルト・ズームカメラ	固定カメラのみ, 複雑に適用可

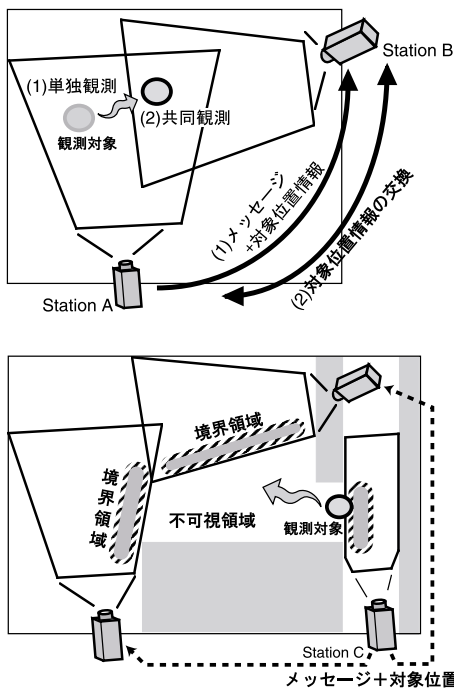


図 10 環境解析に基づく観測ステーションの行動計画

Fig. 10 The object tracking algorithm between seeing stations.

に進入したことを判断したステーションが、この領域に隣接するすべてのステーションにメッセージを送ることで対象の出現を監視する。

このように、地理的に隣接するステーション間でのみ通信し情報共有を行うため、システム全体の必要通信帯域も小さく抑えることが可能になっている。

ここで記述した観測ステーションの行動計画生成ルールは、視覚センサ(カメラ)の視野や内部パラメータが固定されたものを想定している。浮田らは、パン・チルト・ズームカメラのように動的に変化する

カメラを持つ観測ステーションにおける行動制御アルゴリズムを提案している¹⁵⁾。

7. ま と め

本論文では、分散協調型対象追跡システムの中で特徴的なシステム構成を持つ研究をとりあげ、それらをマルチエージェントシステムとしての観点から整理することで、各々の手法の持つ特徴を論じた(表 1)。

西尾らの研究は交差点での車両追跡を複数のカメラにより行うシステムであるが、複数の視覚システムを高機能なセンサとしてとらえ、集中制御システムからのトップダウンアプローチによって対象の追跡を行う。この機構はシンプルであり、センサ数および地理的にある程度の規模で収まる場合は有効な手段であるといえる。

松山らの研究では、観測対象に相当する概念として「エージェント」を導入し、対象を観測するステーションがグループを作ることで観測を行う手法を提案した。これにより、パン・チルト・ズーム機構を備えた注視機構を持つ分散協調型対象追跡システムが可能になり、対象に対して能動的に観測するための仕組みが完成されたといえる。また、動的対象を扱うための情報共有機構、タスクに応じた観測ステーションの制御機構、広域観測のための制御アルゴリズムも実装され、より大規模なシステムへの基礎が開発されたといえる。

我々の一連の研究では、カメラの外部・内部パラメータが固定されたシステムを想定し、この上での複数対象と複数観測ステーションの割当て機構、自律的对象対応付け機構、広域観測のための制御プランニングの自動生成手法を提案した。特に、観測ステーションが持つ計測結果の多様性に注目し、これを生かすことにより対象観測の頑健性を向上させるシステム設計を行っ

た．ここではシステムを完全自律型にすることで，障害に対する頑健性やスケーラビリティの向上を図った．

今後解決すべき問題としては，観測対象の出現・消滅イベントの取扱いがあげられる．対象観測における観測エラーは不可避な問題であり，観測エラーと観測対象の出現・消滅イベントとの違いを判断することは難しい．4.3節で述べた自律的对象対応付け機構は，一部の視覚システムにおける観測エラーの影響を軽減すべく設計されたが，完全に解決されたとはいいがたく，依然として残る問題といえる．視覚以外のセンサの利用も含めた解決手法を開発する必要があると考えられる．

参 考 文 献

- 1) 東京・新宿広場に防犯カメラ設置計画，毎日新聞 2002年3月6日(2002).
- 2) 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).
- 3) 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)，pp.I-365-370(1998).
- 4) 和田俊和，浮田宗伯，松山隆司：視点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(D-II)，Vol.J81，No.6，pp.1182-1193(1988).
- 5) 加藤文和，向川康博，尺長 健：安定な顔認識のための分散協調登録，電子情報通信学会論文誌(D-II)，Vol.J84-D-II，No.3，pp.500-508(2001).
- 6) 中澤篤志，加藤博一，井口征士：分散カメラエージェントを用いた広域人物位置検出システム，情報処理学会論文誌，Vol.41，No.10，pp.2895-2906(2000).
- 7) 中澤篤志，加藤博一，日浦慎作，井口征士：分散視覚エージェントを用いた複数人物追跡システム，情報処理学会論文誌，Vol.42，No.11，pp.2699-2710(2001).
- 8) Rao, B.S. and Durrant-Whyte, H.: A Decentralized Bayesian Algorithm for Identification of Tracked Targets, *IEEE Trans. Man and Cybernetics*, Vol.23, No.6, pp.1683-1698(1993).
- 9) Nishio, S. and Ohta, Y.: Tracking of Vehicles at an Intersection by Integration of Multiple Image Sensors, *IAPR Workshop on Machine Vision Applications (MVA92)*, pp.321-324(1992).
- 10) 石田 亨，片桐恭弘，桑原和宏：分散人工知能，コロナ社(1996).
- 11) Erman, L.D., Hayes-Roth, F., Lesser, V.R. and Reddy, D.R.: The Hearsay-II Speech Understanding System: Integrated Knowledge to Resolve Uncertainty, *Comput. Surveys*, Vol.12, pp.213-253(1980).
- 12) Maeda, T., Kato, H. and Inokuchi, S.: Image Fusion System for Object Tracking, *Proc. Japan U.S.A. Symposium on Flexible Automation*, pp.365-368(1992).
- 13) 和田俊和，田村牧也，松山隆司：広域分散監視システムにおける分散協調型対象同定法，画像の認識・理解シンポジウム(MIRU'96)，pp.I-103-108(1996).
- 14) 日浦慎作，村瀬健太郎，松山隆司：ダイナミックメモリを用いた実時間対象追跡，情報処理学会論文誌，Vol.41，No.11，pp.3082-3091(2000).
- 15) 浮田宗伯，松山隆司：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，情報処理学会論文誌，Vol.42，No.7，pp.1902-1913(2001).
- 16) 松山隆司，浅田 稔，美濃導彦，和田俊和：分散協調視覚プロジェクト—分散協調視覚研究システム開発の概要，情報処理学会研究報告 97-CVIM-103，pp.25-37(1997).
- 17) Smith, R.G.: The contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver, *IEEE Trans. Comput.*, Vol.29, No.12, pp.1104-1113(1980).
- 18) Conry, S.E., Kuwabara, K., Lesser, V.R. and Meyer, R.A.: Multistage Negotiation for Distributed Constraint Satisfaction, *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, Vol.21, No.6, pp.1462-1477(1991).

(平成 14 年 4 月 2 日受付)

(平成 14 年 9 月 12 日採録)

(担当編集委員 和田 俊和)



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年同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．博士（工学）．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．