

広域分散首振りカメラ群における 確率的連結関係推定法の効率化

寺下 訓史 浮田 宗伯 木戸出 正継^{†1}

広域における対象追跡への利用を目的として、首振りカメラを用いた分散カメラシステムの確率的連結関係を効率的に推定する手法を提案する。確率的連結関係とは、各カメラの撮影可能領域内のどの点から対象が出現・消失しやすいか、またそれらの点の間に経路が存在するか、および経路が存在する場合は各経路をどの程度の確率で使用するかを示すものである。首振りカメラを利用することで固定カメラに比べて広範囲・高解像度の撮影が可能となるが、各瞬間には首振り方向しか観測できないために対象の出現・消失情報を取得しにくくなるという問題がある。提案手法では、対象の出現・消失が観測されるたびに連結関係を逐次推定し、推定された経路の不確かさや各経路を対象が移動する確率を考慮して各カメラを首振り制御することで、効率的に対象の出現・消失情報を取得する。シミュレーション実験により提案手法の有効性を確認した。

Efficiency Improvement of Probabilistic-Topological Calibration of Widely Distributed Active Cameras

KUNIHITO TERASHITA, NORIMICHI UKITA and MASATSUGU KIDODE^{†1}

We propose a method for estimating the topology of distributed pan-tilt cameras and its probabilistic model, which are useful for multi-target tracking in a wide area. In our framework, the probabilistic model of the topology gives us (1) objects' routes between/within the FOVs of the cameras and (2) the possibility of appearance/disappearance of objects at end points of the routes. This model is acquired based on the analysis of observed appearance/disappearance data. If only one object can be observed by a camera, it should point towards the object. However, if there are multiple objects, cameras should be controlled so that objects that go through unreliable routes in which enough number of appearance/disappearance data have not been observed for establishing the reliable model as soon as possible. While tracking with the reliable model, on the other hand, the camera should be directed towards the route with the biggest possibility of next appearance. Our method therefore controls the pan-tilt cameras depending on the reliability of the routes. Simulation experiments demonstrated the efficiency of our camera control scheme for establishing the topology model.

1. はじめに

近年、ビデオサーベイランスのための監視カメラの導入が拡大している。カメラによる従来の監視システムは、各所に設置されたカメラによって撮影された映像を人間が見ることで内容を理解し、異常発生の検知や不審者の監視などを行うことが多かった。しかし、観測したい範囲が広域化するとカメラの設置台数が増加するために人間の負担が大きくなるという問題がある。また、従来は各カメラがそれぞれ独立に動いており、複数のカメラから得られた情報を人間が統合することで、広範囲にわたる対象の移動や行動のような、

カメラ1台の映像だけではわからない情報を推測していた。しかし、各カメラの映像をコンピュータで自動的に解析し、そこから得られた情報を統合・共有するシステムを構築できれば、人間による監視だけでは難しい観測範囲の広域化が実現できる。このような分散カメラシステムにおいて観測範囲の広域化を目指した場合、各カメラの設置の方法には次の二通りの方法が考えられる。ひとつは、図1(a)のように各カメラの視野が重なるようにカメラを配置する方法(重畳視野)であり、もうひとつは、図1(b)のように各カメラの視野が重ならないように配置する方法(孤立視野)である。広範囲にわたる対象の行動を解析する際に最も基盤となる技術のひとつは対象追跡である。重畳視野の場合、追跡対象が常にいずれかのカメラに映っているために複数カメラ視野をまたいだ広域での対象

^{†1} 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科
Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

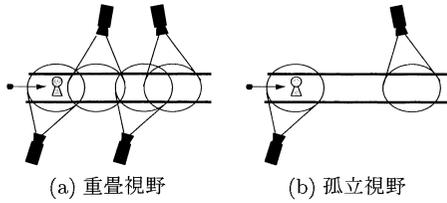


図1 分散カメラシステムの観測視野

追跡が行いやすい。しかし、対象が映りうる範囲を網羅的に撮影するようなカメラ配置が必要になるため、コストや管理の面で問題が発生する。この問題に対応するため、カメラの効率的な配置を求める手法¹⁾²⁾³⁾が提案されているが、観測範囲がさらに広域化するにつれ、現実問題としてどうしてもカメラは重要な地点にしか配置されず、各カメラは孤立視野の状態に配置されることになる。しかし、孤立視野では不可視領域が存在するためにカメラ視野間をまたいだ対象追跡が困難である。

一方、カメラ視野間をまたいだ対象追跡を実現するためには、異なる時刻に異なるカメラに映った対象が同一対象であるに対応づける必要がある。このとき、カメラ視野内のある位置から視野外に出た対象は、不可視領域に存在する通路を経て別のカメラのある位置に出現しやすいという情報を元にして対象同定の精度を向上させる方法が考えられている⁴⁾⁵⁾。このような視野間の空間的位置関係を表したものを本稿では連結関係と呼ぶ。視野間の連結関係を人手で与えることも可能であるが、カメラ台数が増加するにもなるとすべての連結関係を人手で与えることが困難になる。そこで、各カメラの映像を解析することで自動的に連結関係を推定する技術が必要となる。この問題に対し、視野内での対象の出現・消失情報を大量に取得した後にオフラインで連結関係を推定する手法⁶⁾⁷⁾が提案されており、これらの手法をオンライン処理に拡張した手法⁸⁾も提案されている。また、事前に与えたカメラの位置関係を基に視野間の連結関係を高精度に推定する手法⁹⁾があるが、カメラ台数が増加するにもなるとすべての情報を人手で与えることが困難になるといふ問題は残っている。

これまでの研究の多くは固定カメラを用いた分散カメラシステムを想定していた。固定カメラの場合には、カメラ1台あたりの観測範囲を広げようと高所に設置するなどしてカメラを引いた状態にすると追跡対象の細部が確認しづらくなり、逆に、追跡対象の細部を確認しようとしてカメラを寄せた状態にするとカメラ1台あたりの観測範囲が狭くなるという二律背反の問題があった。しかし、この問題は首振りカメラを用いることで解決できる。なぜなら、首を振ることでカメラ1台あたりの観測範囲が固定カメラよりも広くなると同時に、多くの首振りカメラに搭載されているズーム

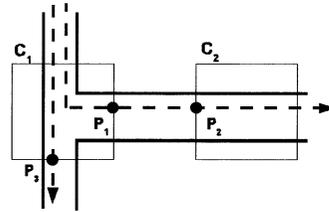


図2 経路の例

機能を利用することで対象の細部を確認することができるようになるからである。そこで本稿では、首振りカメラを用いた分散カメラシステムを実現する。

2. 固定カメラ間の確率的連結関係推定法

本節ではまず、従来の固定カメラを用いた分散カメラシステムのように、視野全体が1枚の画像で表される場合の連結関係推定法について述べる。「視野外にいた対象が視野内に入ってきた」というイベントを対象の出現、「視野内で追跡していた対象が視野外に出て行った」というイベントを対象の消失と呼ぶ。このとき、各カメラで対象の出現・消失が観測された座標点群のうち時系列的に連続した2点の組を経路と呼ぶ。また、この2点のうち先に観測された点を始点、後に観測された点を終点と呼ぶ。各カメラ間の連結関係は、それぞれのカメラ視野を結ぶ経路として表される。例として図2の場合を考える。図2において2つの四角の枠を固定カメラの視野、点線で示した矢印を対象の移動軌跡であるとする。この場合、カメラ C_1 の座標 P_1 から消失した対象がカメラ C_2 の座標 P_2 で出現したという区間がひとつの経路である。経路情報には始点と終点の座標のほかにも2つの情報が検出された時刻差も含まれ、これを通過時間と呼ぶ。

2.1 経路推定の原理

同一対象の連続した出現・消失情報のペアを正対応と呼ぶ。また、連続した出現・消失情報ペアであっても、別の対象同士を組み合わせた場合を誤対応と呼ぶ。複数の対象が同時に検出されている場合、単純に時系列的に連続した出現・消失情報が正しい経路の始点・終点を構成しているとは限らない。ここで、出現・消失情報を大量に取得してそれらを仮に組み合わせる経路として見た場合、正対応において次の2つの均一性が見られる。この均一性に着目することで正対応を抽出することができる。

空間的均一性 各経路における始点・終点の周辺では多数の出現・消失情報が観測される。

時間的均一性 ある種類の対象が同じ経路を通過する際にはその時間がほぼ同一になる。

図2の例において、2体の対象の出現・消失がシーン全体で「 P_1 で消失 → P_3 で消失 → P_2 で出現」とい

う順序で起こったとすると、 C_1 と C_2 の 2 つのカメラを結ぶ経路として $P_1 \rightarrow P_2$ と $P_3 \rightarrow P_2$ の 2 通りが得られる。しかし、 C_1 と C_2 の間の出現・消失情報のペアを多数観測してそれらを組み合わせると、正しい経路の構成情報群においては通過時間の分散が小さくなり、間違った経路の構成情報群においては通過時間の分散が大きくなるはずである。したがって、多数の組み合わせにおける C_1 と C_2 の間の通過時間のピークを検出することで $P_1 \rightarrow P_2$ という正しい経路を推定することができる。このとき、ある時点で出現情報が得られた場合にそこからどの程度まで過去にさかのぼって消失情報と組み合わせるかという問題がある。長時間間隔をあけて観測された出現・消失情報の組み合わせでは、観測される通過時間の分散が大きくなりすぎることによって連結関係推定が正しく行えない可能性がある。したがって、出現・消失情報の観測時刻の差がある閾値 T 以下の場合についてのみ組み合わせを考えればよい。出現・消失情報が多数得られたら、任意の 2 台のカメラ間での出現・消失情報のペア集合をクラスタ成長法によりクラスタリングする。そして、多数のペアが振り分けられたクラスでの平均値を視野間の連結関係とみなす。

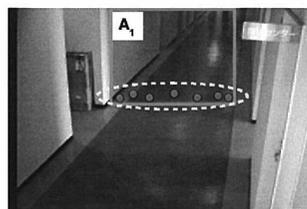
3. 首振りカメラ間の確率的連結関係推定法

3.1 パノラマ画像の生成

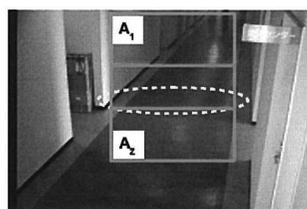
前節の図 2 では固定カメラを例にとって説明した。しかし、本稿の目標は首振りカメラ間での連結関係推定である。首振りカメラでは様々なパン・チルト角に応じた異なる画像を取得できる。ここで、本研究ではカメラの首振りを滑らかに行うのではなく、決まった数種類のパン・チルト角のみ利用する。このそれぞれの画像において前節のアルゴリズムを適用することで連結関係推定を実行することは可能である。しかしこの場合、カメラ 1 台が複数の画像を持っているということは、画像の枚数だけ固定カメラが存在することと同義であるので処理が煩雑になる。そこで、固定カメラの場合と同様にカメラ 1 台につき 1 枚の画像という状態を作り出すために、首振りカメラが首を振って観察することのできる範囲を 1 枚のパノラマ画像にする¹⁰⁾。このとき、パノラマ画像を構成する部分画像の数は、ある部分画像と隣接する部分画像との重なり部分（以下、マージンと呼ぶ）の大きさを設定することで決められる。このことについては次節で詳述する。

3.2 部分画像同士の重なり領域における出現・消失情報の誤検出の除去

各撮影画像における対象の出現・消失情報からパノラマ画像における出現・消失情報を得る方法について、実画像を例にして説明する。図 3(a)(b) をパノラマ画像と仮定し、実線枠を部分画像領域、丸印を対象の出現・消失が観測された座標とする。すると、図 3(a) の



(a) A_1 での出現・消失情報



(b) A_2 での出現・消失情報

図 3 各部分画像での出現・消失情報

ように部分画像の周縁部で出現・消失情報が得られることが予想される。パノラマ画像の周縁部で得られた、もしくは実際に障害物等があるために得られた出現・消失情報を真の情報と呼び、図 3(a) のように障害物等が存在しないにもかかわらず部分画像の周縁部だという理由で得られた出現・消失情報を偽の情報と呼ぶ。パノラマ画像間での経路推定をする際には、部分画像の周縁部に集まった出現・消失情報がすべて偽の情報なのか、それとも真の情報も混じっているのかを判断し、偽の情報だけからなる集合を除去する処理が必要となる。なぜなら、偽の情報を残したままにしておくことで経路推定に悪影響を及ぼす可能性があるからである。図 3(a) の部分画像 A_1 の周縁部で得られた出現・消失情報に真の情報が含まれているのであれば、図 3(b) のように隣接する部分画像 A_2 においても、点線で囲った A_1 の周縁部で出現・消失情報が得られるはずである。ただし、異なる部分画像における出現・消失はすべて統一パノラマ画像座標において行われる。逆に、 A_1 周縁部の情報がすべて偽の情報であれば、 A_2 内では出現・消失情報が観測されないはずである。したがって、ある部分画像の周縁部に集まった出現・消失情報は、隣接する部分画像においてパノラマ画像上で同じ座標となる領域で対象の出現・消失が観測されたかを調べることで真偽判定をすることができる。

このような真偽判定は、マージンの大きさを適切に設定することで可能となる。結論から先に述べれば、マージンの大きさは対象が画面上を 1 フレームで移動する距離の 2 倍以上が望ましい。図 4 は、隣接する 2 枚の部分画像 A_1 , A_2 を重ねて 1 枚のパノラマ画像を作る様子を示している。ここで、図 4 上段の A_1 右端、および A_2 左端の色をつけた領域を対象が画面上

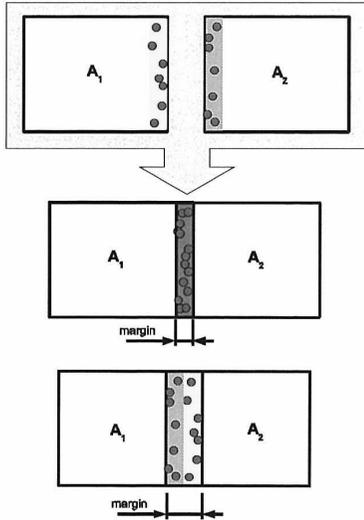


図4 マージンの大きさによる違い

を1フレームで移動する距離とする。また、 A_1 、 A_2 内にある丸印をそれぞれ A_1 、 A_2 における対象の出現・消失座標であるとする。

このとき、図4中段に示したように、マージンの大きさが画面上を対象が1フレームで移動する距離と同程度であったとする。たとえば、 A_1 の右端領域で得られた出現・消失情報の真偽を判定するためには、その右端領域とパノラマ座標上で同じ場所になる A_2 内領域での出現・消失情報の有無を調べればよい。しかし、 A_2 内でのこの条件に該当する領域は、 A_2 左端の出現・消失情報が集まっている領域と一致するため、 A_1 内の情報は常に真の情報と判断されてしまう。この問題を回避するためには、図4下段のようにマージンを十分に大きくとる必要がある。マージンを大きくとった状態で、 A_1 右端領域とパノラマ座標上で同じ場所になる A_2 内領域を見てみる。すると、少なくとも A_2 左端領域に集まった情報は先の例と異なり検出されることはない。したがって、 A_2 内の該当領域で出現・消失情報が検出されているのであれば、それは障害物等の存在により発生した情報であり、 A_1 右端領域の情報に真の情報が含まれていると判断できる。

4. 連結関係推定効率化のための首振りカメラの制御法

首振りカメラによる観察では、ある時点においては観察可能領域の一部分しか観察することができない。そのため、対象がカメラの観察可能領域に存在していても、対象が存在する部分を注視していなかったために出現・消失情報を取得できず、経路の推定に時間がかかってしまうという問題が発生する。この問題を解

決するには、対象の出現・消失情報を効率よく取得できるような首振り制御を行う必要がある。本研究では、次の3つの制御方法を提案する。

制御法1 パノラマ画像内で対象が出現・消失しやすい領域を重点的に観察する。

制御法2 ある領域で新規に対象を検出した場合、その対象を見失うまで追跡する。

制御法3 経路の推定時に経路の不確かさや対象がある経路を使用する確率を求め、その情報に基づいて不可視領域をまたいだ追跡を行う。

4.1 制御法1：各観察領域の観察時間の設定

パノラマ画像上で対象の出現・消失が発生しやすい領域がわかっているならば、その領域を重点的に観察することで出現・消失情報を取得しやすくなる。しかし、システム起動直後は対象の出現・消失情報が全く取得されていない。そのため、まずは対象の出現・消失が発生しやすい領域の傾向を調べる期間が必要となる。このような、首振りカメラを用いて対象をなるべく効率よく観察するための手法が河口らによって提案されている¹¹⁾。ここでは、各観察領域 A_i での観察時間 d_i を同一の値にし、 d_i だけ観察したら次の領域の観察に移行するという処理を行う。パノラマ画像全体を見渡す時間を D とし、観察領域数(部分画像数)を N とすると、各領域の観察時間 d_i は次式で表される。

$$d_i = \frac{D}{N} \quad (1)$$

観測が進むと、どの観察領域で対象が出現・消失しやすいかがわかってくる。そこで、対象が出現・消失しやすい領域ほど観察時間を長く、そうでない領域の観察時間を短くすることで効率的に出現・消失情報を取得できるようになる。各観察領域 A_i で過去に取得した出現・消失情報の合計数を n_i とする。このとき、各領域の観察時間 d_i を次式で計算する。

$$d_i = (D - ND_0) \frac{n_i}{\sum_{k=1}^N n_k} + D_0 \quad (2)$$

D_0 は観察時間を0秒にしないための定数である。

4.2 制御法2：パノラマ画像内での対象追跡

3.2節で説明したように、マージン部分で検出された出現・消失情報は、その情報が偽の情報であったときに削除される。そのため、大量に出現・消失情報を収集しても偽情報が多ければ有効な情報にはなり得ない。そこで、ある領域を観察中に新規に対象を検出した場合、その対象を見失うまでパノラマ画像上を追跡することで確実に対象の消失情報を取得できるようにする。この制御を行うことで少なくともマージン部分に消失情報が集まることを回避できる。加えてパノラマ画像上で対象の追跡限界、つまりパノラマ画像の周縁部や脇道への入り口、障害物の境目などといった場所に消失情報を集めることができるようになる。

3.1節冒頭で述べたように、カメラはいくつかの決まったパン・チルト角方向のみを向く。この条件で観

察可能領域内での対象追跡を実行するためには、部分画像内での対象座標を基に追跡するよりも、パノラマ画像座標を基にしたほうがより正確な追跡ができる。なぜなら、パン・チルト角が変化して部分画像内での対象の見た目の位置が大きく変化しても、パノラマ画像上での対象座標は変化しないからである。ある部分画像内で追跡していた対象がマージン部分に差し掛かったときに隣接する部分画像を映すようにカメラのパン・チルト角を制御することで、観察可能領域全域にわたって対象を追跡することができる。

4.3 制御法 3：不可視領域をまたいだ対象追跡

対象の出現・消失情報が集まるにつれて経路が推定できるようになる。出現・消失情報を十分に収集した後で推定した経路は信頼できる情報である可能性が高い。しかし、出現・消失情報が少ない状態で推定した経路には実際には存在しないはずの間違った経路も含まれていることが考えられる。そこで、ある時点で経路が推定されたらその情報を用いて実際に対象追跡を試みる。追跡に成功すれば推定された経路は正しい経路である可能性が高いと考えられる。対象の消失が観測された際に、その消失座標付近を始点とする経路が複数ある場合どの経路の情報を用いて対象追跡を行うかは、各経路の不確かさと、追跡したい対象の各経路における移動確率を考慮して決定される。

4.3.1 経路の不確かさ

推定された経路が確かなものであるほど不可視領域をまたいだ対象追跡が成功する可能性が高くなる。経路情報は始点座標と終点座標および2点間の通過時間によって定義され、推定された経路は多数収集された経路情報の平均として定義されている。このことから、出現・消失座標や通過時間の分散が大きいくほど不確かな経路であるといえる。また、交通量が多く出現・消失情報を収集しやすい経路は確かな経路であり、逆に交通量が少なく出現・消失情報を収集しにくい経路は不確かな経路であるということもできる。したがって、経路 R_i の不確かさ U_i は次式のように表すことができる。

$$U_i = \frac{\sigma_x^{2B} + \sigma_y^{2B} + \sigma_x^{2E} + \sigma_y^{2E} + \sigma_t^2}{N_i} \quad (3)$$

ここで、肩付き文字 $B \cdot E$ は、ある情報がそれぞれ経路の始点と終点に関する情報であることを表す。 σ^{2B} と σ^{2E} はそれぞれ経路の始点と終点を構成している出現・消失座標値の分散であり、 σ_t^2 は経路の通過時間の分散である。また、 N_i は経路を構成している出現・消失情報のペア数である。

4.3.2 対象の移動確率

出現・消失情報の収集により、カメラ C^B の観察可能領域内に始点を持ついくつかの経路が推定されているとする。この場合、対象が C^B の観察可能領域から消失した際、その対象が C^B の観察可能領域内に終点を持つ経路を使用する確率を次の手順で求める。

Step1 対象の消失が検出された座標 P^B が C^B の観察可能領域内に存在するどの経路の始点に近いかを正規分布を仮定した次式で求める。

$$Q(\mathbf{P}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^d \sqrt{|\boldsymbol{\Sigma}|}} \exp\left(-\frac{(\mathbf{P} - \boldsymbol{\mu})^T (\mathbf{P} - \boldsymbol{\mu})}{\boldsymbol{\Sigma}}\right) \quad (4)$$

ここで、 $\boldsymbol{\mu}$ は経路の端点を構成している出現・消失点群の平均座標、 $\boldsymbol{\Sigma}$ は経路の端点を構成している出現・消失点群の座標の共分散行列である。

Step2 $Q(\mathbf{P}^B, \boldsymbol{\mu}_i^B, \boldsymbol{\Sigma}_i^B)$ に、その経路を構成している出現・消失情報のペア数 N_i を重みとして掛けた値の総和を S とすると、対象の消失座標 P^B が経路 R_i の始点である確率は

$$P(\mathbf{P}^B, R_i^B) = \frac{Q(\mathbf{P}^B, \boldsymbol{\mu}_i^B, \boldsymbol{\Sigma}_i^B) N_i}{S} \quad (5)$$

と表すことができる。 R_i^B は、 C^B 内に始点を持つ経路を表している。

Step3 C^B 内に始点を持つ経路の中で、 C^E 内に終点を持つ全経路について、当該経路の終点で対象が観測される確率 $Q(\mathbf{P}^E, \boldsymbol{\mu}_j^E, \boldsymbol{\Sigma}_j^E)$ を式(4)により求める。

Step4 経路 r を構成する出現・消失情報ペアの時間差の平均 μ_r と分散 σ_r^2 を求め、式(4)に基づいてある経路を T 秒で移動する確率 $Q(T, \mu_r, \sigma_r^2)$ を計算する。

Step5 step2, step3, step4の結果を同一経路について掛け合わせる。

ここまでの操作で得られた結果が「 C^B 内の P^B で消失した対象が T 秒後に C^E 内の P^E 付近で出現する確率」となる。これを対象の移動確率として定義する。

4.3.3 対象追跡アルゴリズム

経路が推定されだして間もないときには、各経路はまだ不確かさが高いと考えられる。したがって、効率よく経路の推定を行うには各経路の不確かさを減少させるようにカメラを制御すればよい。

あるカメラのパノラマ画像上の点 P から n 本の経路 $R_1 \sim R_n$ が伸びているとき、点 P 付近で対象の消失情報が観測されたとする。なお、この時点で各経路が正しい経路であるかどうかはわからない。このとき、カメラの制御方法は次のようにして決定される。

Step1 $R_1 \sim R_n$ の各経路の不確かさを計算する。

Step2 $R_1 \sim R_n$ の各経路における対象の移動確率を計算する。

Step3 同一経路における不確かさと移動確率の重み付き和を計算する。このとき、不確かさと移動確率のそれぞれにおいて最も尤もらしい経路は、不確かさ0の経路、および移動確率1の経路である。したがって、重み付き和を計算するときは(1-不確かさ)の

値と移動確率の値とで計算する。

ここまでの操作で、対象が消失した $T[\text{sec}]$ 後にどの経路の終点の観察を最も重視するかが決定する。注視する終点は、最も確率が低い経路の終点とする。このとき、各経路の通過時間の分散を考慮し、最も可能性の高い通過時間を基準に \pm 数秒の幅を持たせた時間だけ各経路の終点を観察する。

上記処理で選択された経路を点 P 付近で消失した対象が利用したのならば、Step3で経路の終点を映しているカメラに同一対象が観察される可能性が高い。対象が映った場合には、式(3)の不確かさの定義により、選択した経路の不確かさは減少する。対象が映らなかった場合には、選択した経路を推定するとき用いた出現・消失ペアをいくつか削除することで不確かさを増加させる。不確かさを増加させると、次回に点 P 付近から対象が消失したときに再び同じ経路が選択される可能性が高くなるが、注目した経路が間違った経路であった場合には出現・消失ペアの数が逐次減少していき、最終的にその経路を推定できなくなると考えられる。つまり、間違った経路が推定されても、時間とともに間違いが修正されるということになる。

4.4 各制御の衝突が起こった場合の対処法

3つの制御法を同時に実行していると、処理の衝突が起こることが考えられる。そのため、衝突が起こった場合にどの制御を優先するのかを決定しなければならない。ここで、制御法1は観察領域内に対象が存在しておらず、かつ、不可視領域の追跡も行わない状態で実行される。つまり、3つの制御法の中では優先順位は最も低いため、以下では制御法2と制御法3の衝突についてのみ述べる。制御法1と制御法3の衝突は次の問題として表される。

- カメラ C^B において制御法2により対象Aを画像内で追跡している最中に、別のカメラ C^B から制御法3により対象Bの追跡命令がきた場合、どちらの対象の追跡を優先するか。

このような追跡対象の優先順位は、経路の不確かさを比較して決定される。このとき、 C^B の可視領域内に存在する経路を考慮に入れる。具体的には、 C^B で消失した対象が通過しているであろう経路と C^B の可視領域内に存在する経路との不確かさを比較し、不確かさの高い経路を優先する。つまり、 C^B と C^E の間の不可視領域に存在する経路の不確かさが最も高ければ、対象Bの追跡を優先する。逆に、 C^B 内の可視領域に存在する経路の不確かさのほうが高ければ、対象Aの追跡を優先する。

5. 実験

固定カメラは常に同じ映像(背景)を撮影できるが、首振りカメラは首振り制御の違いにより毎回異なった映像が撮影される。また、制御方法を固定しても、対

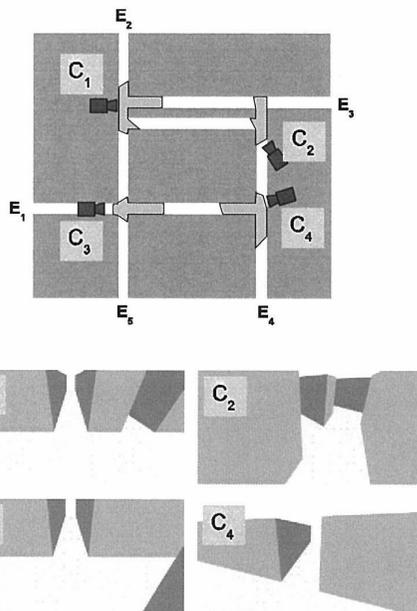


図5 作成したシーンの俯瞰図と、各カメラから得られる画像

象の出現頻度や移動位置などの違いにより同一対象でも観察できたりできなかったりといった違いが起こるため、同じ条件の下に各手法を比較することはオンライン実験では困難である。したがって、シミュレーション実験によって各手法を評価することにした。

作成したシミュレーション空間を図5に示す。壁と通路を作成して通路中にカメラ $C_1 \sim C_4$ を設置し、通路上をオブジェクトが移動するようにした。 $E_1 \sim E_5$ は通路と外界との出入り口である。オブジェクトはこの5つの出入り口から入り口と出口をランダムに選択した後、選択された組み合わせに対してあらかじめ決められたルートを利用して入り口から出口まで移動する。また、通路上を移動するオブジェクトは通路の中央付近を高頻度で利用し、通路の端(壁)に近づくにつれて正規分布に従い利用頻度が小さくなるようにした。さらに、オブジェクトの移動速度は、ある基準値を正規分布に基づいて変化させた値を与えた。この値は対象が入り口に出現するたびに新たな値が設定される。オブジェクトの平均移動速度は、 $E_2 \rightarrow E_5$ の最短ルートを約12秒で通過する程度である。ここで、移動速度の分散は1とした。

シミュレーション空間は3次元で作成されており、通路中に設置したカメラからはそれぞれ図5下段のような映像が取得できる。実際のカメラでは、首振りカメラで得られた部分画像からパノラマ画像を作成するところである。だが、ここでは処理の簡略化のため、カメラの首を振って観察できる範囲とほぼ同じ範

表 1 対象の同時観測数と経路推定成功回数

同時出現数	1	2	4	8
推定成功回数	15	13	1	0

困を観察できる広角カメラで撮影した画像をパノラマ画像の代わりとした。この画像の一部分を切り出したものを、実際の首振りカメラが一度に観察することのできる範囲（部分画像）とした。ここで、各パノラマ画像を構成する部分画像数は、縦方向 3 枚、横方向 4 枚の計 12 枚とし、パノラマ画像全体の観察時間を $D = 60[\text{sec}]$ とした。

対象の検出は、単純な背景差分によって得られた前景画素の近接性に基づいて行った。また、各対象領域の重心を対象が存在する座標とみなした。さらに、画像中での対象追跡は、対象領域のサイズの類似性と座標の近接性に基づいて行った。

5.1 視野間の連結関係の推定

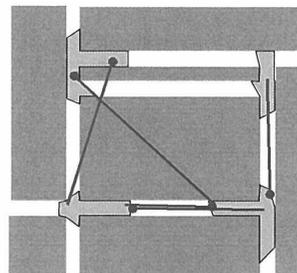
まず、提案手法で正しく経路が推定できるかを実験した。ここでは、各カメラ視野間の最長の経路（図 5 の C_1, C_2 間）の通過時間を考慮し、閾値 $T = 10[\text{sec}]$ とした。シーン中に同時に現れる対象の数を変化させたとき、それぞれの場合について 15 回ずつ経路推定を実行し、そのうち正しい経路を推定できた回数を調べた。結果を表 1 に示す。この結果を見ると、同時出現する対象が 4 体を超えたとき経路推定が破綻していることがわかる。これは、対象の数に対してシーンの大きさ（視野間の距離）が小さく、正対応よりも誤対応がはるかに多く観測されたためであると考ええる。

また、同時出現対象数が 2 のときの時間経過による経路推定の変化の様子を図 6 に示す。図中の実線の線分が推定された経路であり、●が経路の始点を表している。推定開始から 30 分では間違っただけの経路も見られるが、十分な時間が経過すると正しい経路を推定できるようになっていることがわかる。

5.2 不可視領域をまたいだ追跡による経路推定の時間短縮効果

不可視領域をまたいだ対象追跡を試みた場合とそうでない場合を比較して、経路の推定完了までにどれほどの時間差が出るのかを調べた。経路推定が開始されるまでの出現・消失情報を収集するだけの期間中のデータは同一のものを用い、それ以後のカメラ制御に 4.3 節で述べた処理を実行した場合としなかった場合の双方について、正しい経路が推定され終わるまでの時間を計測した。それぞれの場合について 10 回ずつ計測を行い、それらの平均値の差を調べた。なお、前節の結果より、同時出現対象数が 1 体と 2 体の場合についてのみ調べた。その結果、追跡を試みた場合はそうでない場合に比べ 1.3 ~ 1.4 倍ほど早く経路推定が完了した。このことから、提案手法を用いたほうが効率よく情報収集と経路推定ができているといえる。

30min



120min

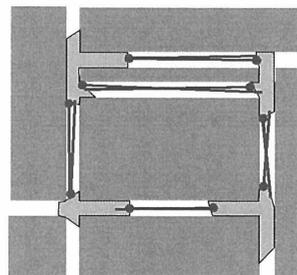


図 6 経路推定結果

5.3 別シーンでの経路推定

システム側から見てまったく別の状況になるように図 5 のシーンのカメラ配置を変え、図 7 のような配置にした。図 5 との違いは次の通りである。

- ひとつのカメラ視野の 1 点から、別のカメラ視野内の 2 点へ繋がる経路が存在する。
- ひとつのカメラ視野の 1 点から、別のカメラ 2 台へ繋がる経路が存在する。

加えて、図中の拡大図に示したようにカメラ C_3 の前に障害物を設置し、カメラから見て障害物の裏側を対象が通過するようにした。この状態で同時出現対象数を 2 体として経路推定を行った結果を図 8 に示す。図を見ると、 C_3 の障害物周辺で正しい経路推定ができていない。ここでの正しい経路は、(1) C_3 の視野の最も外側と別のカメラ視野が繋がる、(2) C_3 視野内で障害物による不可視領域の両端が繋がる、という状態である。正しい経路推定が行われていないのは、障害物の裏に対象が消失した後に、障害物の裏から現れる同一対象の出現を観察できていないことが原因であると考えられる。正しい経路を推定するためには、障害物裏を通る対象の消失 → 出現を連続して観察しなければならない。そのためには、パノラマ画像の周縁部以外で対象の消失が観察されたら、その直前数フレームの対象の動きを基に対象がパノラマ画像内で現在いるであろう場所を予測し、今後出現が観測されるかもしれない領域を撮影するような処理が必要であると考えられる。この場合、視野内で消失した対象がそのまま完全に視野外に出て行くことも考えられるが、このような

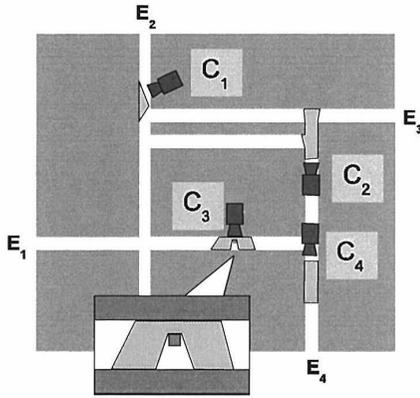


図7 シーン2の俯瞰図

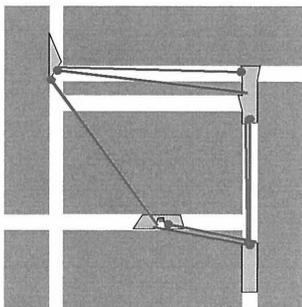


図8 シーン2での経路推定結果

ときには予測先の領域においてある程度の時間だけ対象の出現が検出できなければ、その対象を追うことをやめるという処理を導入すればよいと考える。

6. おわりに

本稿では、首振りカメラを分散カメラシステムに利用した場合に確率的連結関係の推定時間を短くすることを目的として、推定途中の経路情報を基にした首振りカメラの制御法を提案した。過去に得られた対象の出現・消失情報を考慮して各カメラを首振り制御することで、情報を効率よく収集することが可能である。また、推定された経路の不確かさや対象が各経路を利用する確率を考慮して首振り制御することで不可視領域をまたいだ対象追跡を試み、カメラ間の連結関係を効率的に推定可能であることをシミュレーション実験により確認した。

本稿ではシステム起動から連結関係を推定するまでの段階に重きを置いて述べた。しかし、現実のシステムでは正しい連結関係が推定された後に何らかの対象追跡（例えば不審者追跡のような）を実行することが考えられる。その場合には、追跡したい対象の重要度

が何らかの方法で与えられたとすると、対象が各経路を利用する確率のみを考慮することで本稿で述べたフレームワークと全く同様のフレームワークで対象追跡をすることが可能となる。

今後の課題として、5.3節で述べたような処理の導入や、現在は単純に各分散値を足した値になっている不確かさの計算式（式（3））において各値に何らかの重み付けをすることで連結関係推定のパフォーマンス向上を図ることなどが挙げられる。

参考文献

- 1) Y. Yao, C.-H. Chen, B. Abidi, D. Page, A. Koschan, and M. Abidi, "Sensor Planning for Automated and Persistent Object Tracking with Multiple Cameras", CVPR2008, Jun. 2008.
- 2) Y. Yao, C.-H. Chen, B. Abidi, D. Page, A. Koschan, and M. Abidi, "Sensor Planning for PTZ Cameras Using the Probability of Camera Overload", ICPR2008, Dec. 2008.
- 3) U.M. Erdem, S. Sclaroff, "Automated camera layout to satisfy task-specific and floor plan-specific coverage requirements", CVIU2006, Vol.103, No.3, pp. 156-169, Sep. 2006.
- 4) V. Kettner and R. Zabih, "Bayesian Multi-camera Surveillance", CVPR1999, pp.253-259, 1999.
- 5) H. Pasula, S. Russell, M. Ostland, and Y. Ritov, "Tracking Many Objects with Many Sensors", IJCAI1999, pp.1160-1171, 1999.
- 6) N. Ukita, "Probabilistic-Topological Calibration of Widely Distributed Camera Networks", Machine Vision and Applications Journal, Vol.18, No.3-4, pp.249-260, 2007.
- 7) D. Makris, T. Ellis, and J. Black, "Bridging the Gaps between Cameras", CVPR2004, Vol.2, pp.205-210, 2004.
- 8) 野田 周平, 島田 敬士, 有田 大作, 谷口 倫一郎, "撮影領域に重なりのないカメラ群の逐次的連結関係推定に基づく実時間物体追跡", 画像の認識・理解シンポジウム 2007, pp.845-850, 2007.
- 9) K.-W. Chen, C.-C. Lai, Y.-P. Hung, and C.-S. Chen, "An Adaptive Learning Method for Target Tracking across Multiple Cameras", CVPR2008, June 2008.
- 10) 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 D-II, Vol.J81-D-II, No.6, pp.1182-1193, 1998.
- 11) 河川 裕治, 島田 敬士, 有田 大作, 谷口 倫一郎, "広域映像サーベイランスのための能動カメラによる物体軌跡の取得", 画像の認識・理解シンポジウム 2008, pp.1306-1311, 2008.