

回転型全方位カメラとその応用

和田俊和

京都大学 大学院情報学研究科

回転型全方位カメラは、パン、チルト、ズーム、露光時間などのカメラパラメータを変更しながら撮影した複数枚の画像情報を、ある視点から見た方位毎に蓄積・統合するためのセンサとして位置づけられる。このような回転カメラにより、1) 高い視点位置精度、2) 高い空間分解能、3) 広いダイナミックレンジ、4) 高いS/N比、を満足する全方位画像を撮影することができる。回転カメラを用いて全方位画像を撮影するには、物理的な回転が必要であるため時間的な応答性は良くない。しかし、特定の対象を追跡撮影するアクティブカメラとして見ると、時間的な応答性に関しても特に問題はなく、特に、視点位置が移動しない光学系を用いれば、1) 回転撮影を行いながら背景差分を行ったり、2) エゴモーションの解析を簡単に行うことができる、などの特長も有している。本稿では、これらに関して議論を行い、全方位画像センサの将来について展望する。

Rotational Cameras for Omnidirectional Imaging and Their Application

Toshikazu Wada

Graduate School of Informatics Kyoto University

A rotational camera can be regarded as a sensor that accumulates and integrates multiple image information acquired by changing the camera parameters, i.e., pan, tilt, zoom, exposure, and so on. The accumulation and integration should be performed for each view direction from a single view point. By using a rotational camera, we can realize 1) precise viewpoint calibration, 2) high spatial resolution, 3) wide dynamic range of pixels, and 4) high S/N ratio. As for the omnidirectional imaging, a rotational camera must rotate to observe multiple view directions, i.e., an omnidirectional image cannot be captured at once. However, as an active camera, its time response is equivalent to that of an ordinary video camera. Especially, a specially calibrated rotational camera whose projection center coincides with its rotation center has advantages that 1) background subtraction can be performed for the captured images by a rotating camera, 2) simple egomotion analysis can be applied, because camera action will not cause motion parallax. In this paper, all above topics are discussed.

1 はじめに

コンピュータビジョンの分野で、全方位画像という言葉が使われるようになって久しい。本稿では、この全方位画像の撮影方法として、回転光学系を用いた撮影方法について、その特性や用途などについて議論する。

以下、まず全方位画像センサの目的と条件について検討を行い、これに基づいて、回転光学系全方位画像センサがどのように位置づけられるかについて、検討を行うとともに、それらの応用の可能性について議論を行う。

2 全方位画像センサの目的と条件

ここでは「全方位画像」が何故必要であり、どのような条件を満足する全方位画像センサが求められているのかについて述べる。

2.1 全方位画像

ここでは、単にある地点から周辺の画像を撮影するセンサを全方位画像センサと見なすことにする。このようなセンサが提案された背景には、3次元物体のモデリングなどでしばしば用いられる画像撮影法、つまり特定の対象を周囲から撮影することではなく、ある地点から見た周辺の画像を獲得することが意味を持つアプリケーションが存在することを示唆している。典型的な例としては、以下のようなものがある。

- VR システム、特に没入型 VR システムのための環境情報獲得
- 移動ロボットの位置・姿勢計測

では、コンピュータビジョンにとって、「中心から周辺を見ること (diverging view)」と、「周辺から中心を見ること (converging view)」の間にある本質的な違いは何であろうか。周辺から中心を見ることは、ステレオや視体積交差法などのように三次元情報の獲得を目的とするケースがほとんどであることは言うまでもない。しかし、中心から周辺を見ることによって得られる情報が何に役立ち、どのようなアルゴリズムに適しているかについては必ずしも自明ではない。以下、この問題に関する考察を行う。

一例として、移動ロボットの位置・姿勢推定について考えてみる。これまで、移動ロボットの位置姿勢推定では、ランドマークの対応付けによって、移動後のロボットの位置を算出するという方法がしばしば用

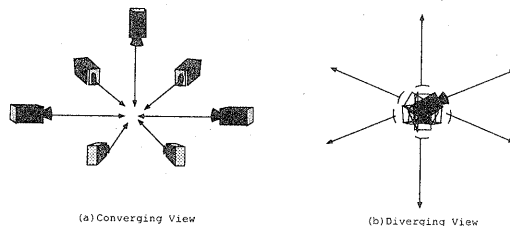


図 1: Converging View と Diverging View

いられてきた。この場合にも、本質的にはステレオ視と同様に3角測量によって移動距離測定が行われると考えると、2つのランドマークを結んだ底辺と視点を頂点とする3角形の頂角が大きいほど位置の推定精度は向上するはずである。すなわち、画角が広がれば広いほど位置・姿勢の推定精度は向上する。これは、被写体であるランドマークをカメラ、視点を物体表面上の点と考えればステレオ視と同じ数理的構造が内包されていることを意味しており、diverging view と converging view は双対な関係にあることを示唆している。

全方位画像のこのような特徴は、人間の視覚にも関係していると思われる。例えば、目隠しをして人間を移動させた後に目隠しを取り、ここがどこかを質問すると、視線方向を変えて自分をとりまく環境を把握しようとする。このことは、人間の位置同定タスクにとっては、通常のカメラで撮影した狭い視野角の画像では不十分であり、広い視野が必要であることを示唆している。したがって、VR システムにおける全方位画像の提示は、人間の視覚による位置同定機構を「だます」ために活用されていると見なせる。また、人間にとっては自己位置の同定だけでなく、対象位置の同定にも周辺画像は必要であり、Mozaicing を用いて入力画像を周辺画像に埋め込むことは、実シーンで起きている事象を人間に分かりやすく伝えるためには欠かせない。

もう一つの特徴は、全方位画像には周期性があることである。2つの全方位画像間でステレオ視を行う際に、この周期性を利用すれば、周期性を利用した端点のない DP マッチングアルゴリズムを使うことができ、反復計算により、位相ずれを吸収したマッチングが実現できることが示されている [1]。また、静的な環境下では、画像の位相情報がセンサの方位に対応しており、パワーが環境内でのセンサ位置に対応していることを利用したロボットの位置・姿勢推定法 [2] も提案されている。また、全方位画像には基本的に画像枠はなく、ステレオ視における共通視野を拡大するためにも有効である。

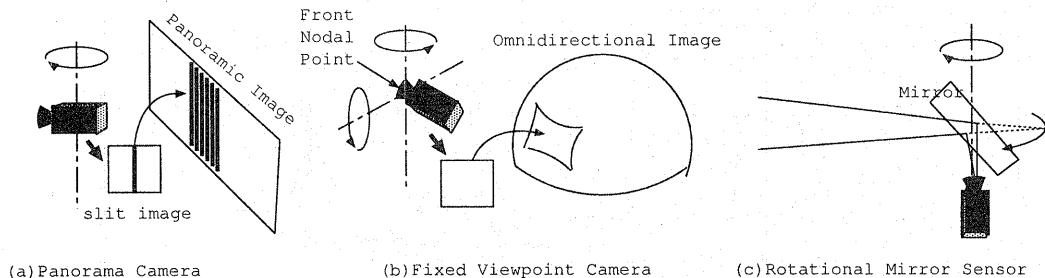


図 2: 回転光学系を用いた全方位センサの種類

2.2 全方位画像が満たすべき条件

全方位画像を撮影する際に問題になるのは、次の条件を全て満足する画像を撮像系を作ることが困難なことである。

条件 1: 高い時間分解能

条件 2: 高い視点位置精度

条件 3: 高い空間分解能

条件 4: 広いダイナミックレンジと高い S/N 比

例えば、静止環境のモデリングなどには空間分解能やダイナミックレンジ、視点位置精度などは必須であるが、時間分解能については特に高い必要はない。一方、自律ロボットの視覚系としては、まず時間分解能と視点位置の精度が重要であるが、他の条件の優先度はそれらよりも低くとらえられる傾向が強い。このように、上記の条件はタスクに応じて重要度が異なるため、用途に応じて全方位センサを使い分けるといことが一般的に行われている。

3 回転光学系を用いた全方位センサの特徴

全方位画像センサは、カメラあるいはカメラの前に置いたミラー等の光学系が回転するタイプのものと、回転双曲/放物面や多角錐等のミラーや魚眼レンズを用いたもののように光学系自体が固定であるものの 2 種類に大別される。本稿では、前者のみを対象として議論を進める。

回転光学系を用いた全方位センサは、図 2 のように 3 種類に分類される。

最初に提案されたものは、同図 (a) のパノラマカメラである [1]。この場合、パン回転して撮影した画

像の中の 1 次元スリット上の画像を回転角に応じて横に並べたものが全方位画像となる。この種のセンサの変種としては、2 本のスリット上の画像を利用して全方位のステレオ計測を行うセンサ [4] や、2 台のカメラを同じ回転軸上に並べてステレオ計測を行うもの [3] がある。この種のセンサは、物理的なキャリブレーションを特に行う必要がなく簡便である反面、1) 1 次元画像を用いているため、カメラの回転角を細かく制御する必要があり、撮影時間が長くなってしまう、2) パノラマ画像と三次元シーンの投影モデルが単純な透視投影では表現できない、3) 2 軸の回転撮影が行えない、などの問題点がある。

この問題点を克服するために、同図 (b) のように回転中心と投影中心を物理的に一致させた視点固定型カメラ [8] が提案されている。このカメラには、1) 二次元の画像を全方位画像の一部として張り込むことができるため、撮影時間の短縮が可能である、2) 2 軸の回転撮影が行える、3) 三次元から二次元への投影モデルはピンホールカメラと等価であると見せる、等の特長がある。

また、時間応答性を改善するためにカメラではなくカメラの前に配置した平面ミラーを回転させて撮影するセンサ [6] (同図 (c)) も提案されている。しかし、この方法は、原理的に投影中心と回転中心を一致させることができないため、視点の移動が起ってしまう。また、2 軸の回転撮影が行えないため、撮影できる範囲にも制限が生じる。

上述のように、回転光学系を用いた全方位センサの中では、視点固定型カメラが優れた特性を持っているとすることができる。しかし、いずれの場合にも回転という物理的な制約があるため、前述の条件 1 の時間分解能をある程度以上高くすることはできないのが実情である。但し、これはあくまで全方位画像を撮る場合の話であり、特定の対象をカメラの方位を変えながら追跡撮影する場合には、特に時間分解能が問題になることはない。その他の条

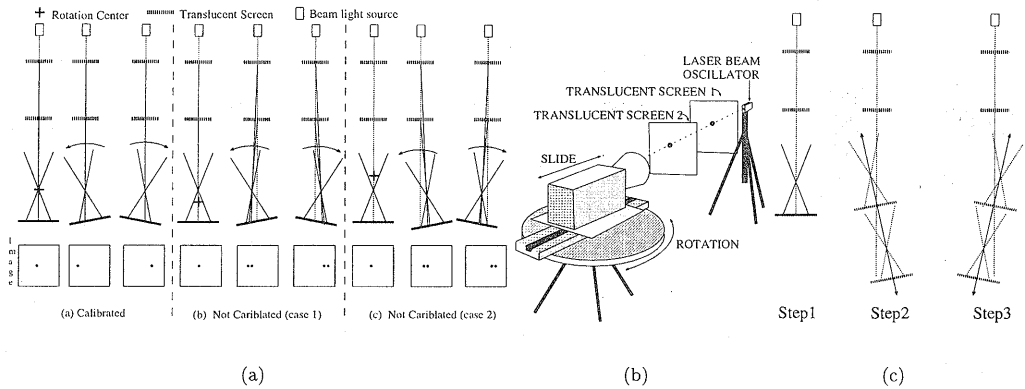


図 4: 視点位置のキャリブレーション: (a) キャリブレーションの原理, (b) 実験装置の例, (c) キャリブレーションの手順

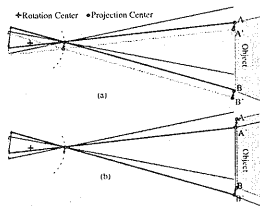


図 3: 投影中心と回転中心のずれによる見え方の変化

件 2 から 4 までに関しては、これら全てをカバーすることは可能である。

以下、条件 2 から 4 までがどのようにして達成できるかについて述べる。

3.1 視点位置精度

全方位センサを設計する際に、視点の位置を決定する問題が挙げられる。これは、回転光学系を用いたセンサに限らず、カメラと曲面ミラーを用いたセンサでも同様に問題になることである。視点位置精度が低い場合には、方位による視点位置移動が生じてしまう。このことが問題となるケースは、

- 近距離物体を撮影する場合
- 全方位センサでステレオを行う場合

などであり、広角レンズで遠距離物体のみを撮影する場合には、特に大きな問題は生じない [8]。これは、図 3 に示すように、視点位置移動は、視点位置が移動しないと仮定した場合、視点移動量と同じだけ物体を移動させるのと同じ効果を持つためである。

視点方位によって変化することが問題となるのは、1) 近距離物体を含むシーンを撮影する場合、2) 異なる地点で撮影した複数の全方位画像を用いてステレオを行う場合、等である。ステレオ視を行う場合、視点移動によって、基線長の変化も生じるが、方位によって基線の傾きも生じる。これらによって、最終的な距離計測結果に大きな誤差が含まれてしまうことになる。

以下、視点固定型カメラの、視点位置を物理的に回転中心位置に合わせる一方法を説明する [8]。

カメラの投影中心を回転軸に合わせるには、以下の性質を利用することができる (図 4(a))。

1. ある光線が投影中心を通過していれば、その光線上の全ての点は、画像上の 1 点に投影される。
2. 投影中心が回転軸に乗っていれば、投影中心を通過する光線はカメラを回転させても投影中心を通過するため、その光線上の全ての点は、画像上の 1 点に投影される。

すなわち、1 の性質を満足するようにカメラと光線の位置関係を合わせた後に、2 のテストを行い、これら 2 条件が同時に成立するようにカメラを移動させることにより、投影中心をカメラの回転軸位置に合わせる事ができる。

実際にパン軸位置のキャリブレーションを行う場合は、図 4(b) に示すような回転台と直進ステージからなるカメラ台、レーザービーム発振器及び半透明スクリーンを用いて、以下の手順で行う。

- レーザー光が投影中心を通過するように調整する。調整は、2 枚の半透明スクリーン上のビー

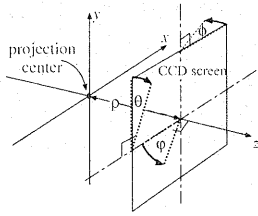


図 5: CCD スクリーンの傾斜角

ム像の位置が画像上で一致するようにレーザーの向きを変更する (図 4(c), Step 1) .

- カメラを左右に同じ角度だけ回転させ、直進ステージをスライドさせながら、半透明スクリーン上のビーム像間の距離を画像上で計測する (図 4(c), Step 2,3).
- 画像上の 2 つのビーム像の間隔を最小にする位置を最適なステージ位置とする.

チルト軸位置についても同様の調整が可能である。この方法の利点としては、

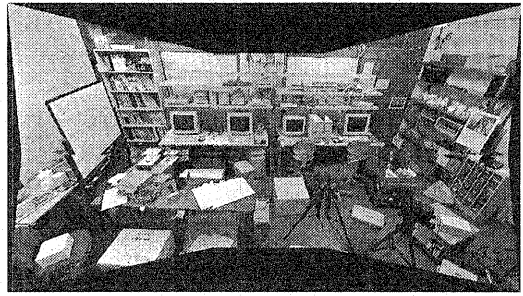
- カメラの投影中心、すなわち「物体側レンズ節点」の位置を物理的に示すことができること
 - カメラの内部パラメータに依存せず、レンズに歪曲収差などがある場合にも適用できること
- などが挙げられる。一方、問題点としては、
- 画角が小さい望遠レンズを装着したカメラの視点位置を同定しにくいこと

が挙げられる。

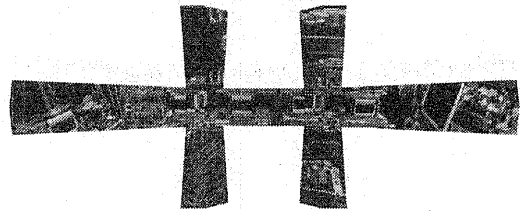
3.1.1 内部パラメータのキャリブレーション

視点位置を正確に回転中心に合わせた回転光学系 (視点固定型カメラ) では、カメラの内部パラメータが分かっているならば回転撮影した複数の画像から継ぎ目のない 1 枚のパノラマ画像を生成することができる。この性質を逆に利用すれば、継ぎ目のない 1 枚のパノラマ画像を生成することができるように、内部パラメータを推定することもできる [8]。

Tsai の手法 [7] に代表される従来のカメラキャリブレーションでは、座標が既知である複数の 3 次元空間中の点と、それらが画像平面上に投影された位置を計測しておき、カメラの投影パラメータ (内部パラメータ) と、カメラと物体との位置関係を表す



(a)



(b)

図 6: 初期値を用いて合成したパノラマ画像: (a) 張り合わされた画像, (b) 重なり部分での差分画像

パラメータ (外部パラメータ) を同時に求めていた。これに対して、視点固定型パン・チルト・ズームカメラを用いたキャリブレーションでは、カメラの回転軸位置の調整さえ行っておけば、

- 内部パラメータだけを独立に求めることができる。
- 3 次元および 2 次元の点の座標データの計測は不要であり、観測画像のみからキャリブレーションを行うことができる。

という利点がある。以下、この内部パラメータのキャリブレーション方法を説明する。

通常のカメラキャリブレーションでは、カメラの内部パラメータとして、投影中心とスクリーンの距離 ρ 、レンズ歪み係数 κ 、画像の歪み中心 (x_0, y_0) 、画面の縦横比 α などがしばしば用いられる。ここでは、レンズの光軸に対する CCD 面の取り付け精度は一般に高くないことを考慮して、上記パラメータに加えて図 5 に示すように、光軸に垂直な平面に対するスクリーンの傾き角 (θ, ϕ) 、スクリーンの光軸回りの回転角 φ 、を内部パラメータとする。

上述のパラメータを変更しながら、画像の重なり部分での正規化相互相関値に重なり部分の面積を乗

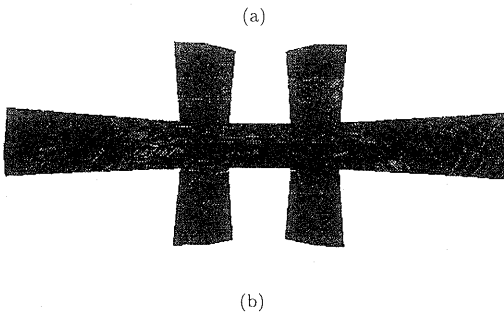
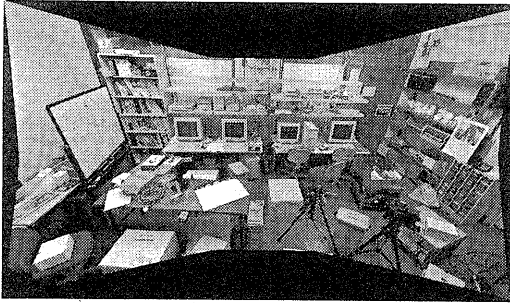


図 7: 最適化後のパノラマ画像: (a) 張り合わされた画像, (b) 重なり部分での差分画像

じた値の和を目的関数とした非線形最適化によって、内部パラメータの推定を行うことができる。

図 6, 7 は、6 枚の画像を張り合わせたパノラマ画像が最適化前と後でどのように変化するかを示した図であり、明らかに最適化後のパノラマ画像の方がスムーズであることが分かる。

3.2 空間分解能

前述のカメラキャリブレーションによって、視点位置と回転軸を合わせた全方位画像センサを構築することができる。このセンサによって撮影できる画像は、複数枚の画像を張り合わせて作ったものであるため、単位立体角当りの画素密度は通常のカメラと同様である。これは、全方位画像としては十分に高い空間分解能であるが、カメラ制御が可能である場合には、ズームパラメータを変更することも可能であり、非常に詳細な画像を撮影することができる。

さらに、カメラの回転角を隣接する画素間の角度差よりも細かい精度で制御できる場合には、静止カメラで撮影する場合よりも高い空間分解能の画像が得られる。すなわち、視線方向を細かく変化させて撮影した画像を 1 つの仮想スクリーンに投影すると、

使用するカメラの空間解像度よりも詳細な画像が得られる。しかし、個々の CCD 素子は一定の面積を持っているため、この面積よりも細かいカメラの回転をしても、得られる画像の実質的な空間解像度は変わらず、この方法で達成できる空間解像度には限界がある。

3.3 ダイナミックレンジと S/N 比

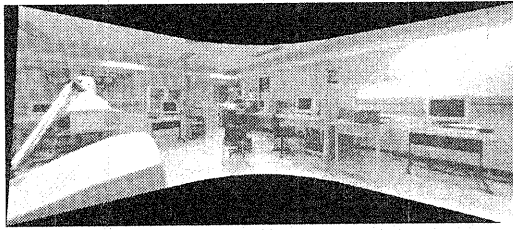
画像の輝度値のダイナミックレンジは、1 画素に割り当てられるビット数により制限される。通常良く用いられるのは、モノクロの場合 8-bit, カラーの場合は 24-bit という値である。全方位画像を撮影する場合、照明や太陽などの光源を直接撮影してしまう場合があると同時に、影のように非常に暗い部分も撮影してしまうことが一般的である。その結果、画素値のオーバーフロー/アンダーフローが起きてしまい、画像の陰影や色の解析に基づくアルゴリズムが適用できなくなるといった問題が生じる。

この問題は、カメラのパン・チルト・ズームとともに、シャッタースピードを変えて撮影すれば、解決することができる。すなわち、光源などの明るいものを撮影する場合にはシャッタースピードを上げて撮影し、暗い部分を撮影する場合にはシャッター速度を下げた撮影すれば、撮影された画像でのオーバーフローやアンダーフローを押さえることができ。これらの画像を張り合わせる際には、シャッタースピードに応じた倍率を乗じた上で画素値を計算すれば良い。

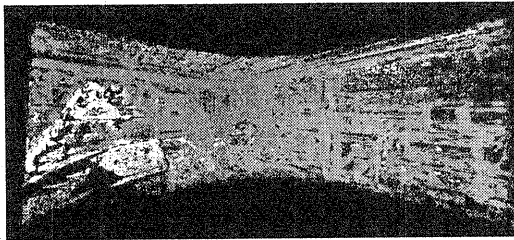
また、画像の質を決定するのはダイナミックレンジだけでなく、CCD や AD 変換器の質に起因する S/N 比も問題になる。この問題に関しては、同じカメラパラメータで撮影した N 枚の画像の平均値を求めれば、雑音レベルを $1/\sqrt{N}$ にすることができる [5]。また、平均値ではなく、中央値を求めることによって、運動物体を外れ値として除去した画像の撮影もできる。この両者を同時に達成するためには、トリム平均等のロバスト統計の手法が有効であると考えられる。

4 視点固定型カメラの変種

回転光学系を用いた全方位センサは、視点を中心に回転撮影を行うという単純なアイデアに基づくものであり、使用するカメラを変更すれば異なるタイプの全方位センサを実現することができる。ここでは、このうちのいくつかを紹介する。



(a)



(b)

図 8: 全方位ステレオセンサの観測結果の一部: (a) 濃淡画像, (b) 視差画像

4.1 視点固定型全方位ステレオセンサ

通常のステレオカメラは、複数台のカメラから構成されているため、視点固定の設定は困難であると考えられがちである。しかし、視差や奥行き情報は基準カメラの方位情報に合わせて計算されるのが常であり、この基準カメラの投影中心を回転に対して不変に保てば、図 8 に示すように、全方位の奥行き情報を合成することが可能である。このようなセンサは、精密な距離測定には必ずしも適さないが、後述する背景差分によるアクティブトラッキングに用いれば、照明光の変化の影響を受けにくいトラッキングシステムが構成できる。

4.2 視点固定型分光放射輝度センサ

プリズムによって 1 次元スリット上の光を分光して、横軸を波長、縦軸が空間軸に対応した二次元画像を得るラインスペクトルカメラを用いて、回転撮影し各画素について高次元の分光スペクトル画像を得ることができる [9]。この場合、必ずしも視点固定型である必要はないが、2 軸回転による広範囲の撮影、二次元画像と三次元シーンの間での投影・逆投

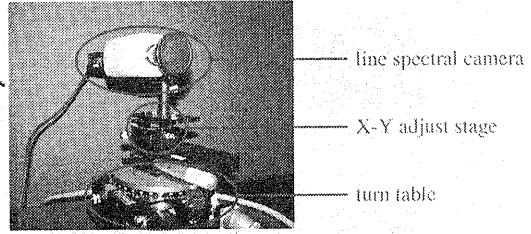


図 9: パン回転分光スペクトルカメラ

影計算、などが行えるよう、視点固定の調整を行うことができる。(図 9)

5 回転光学系を用いた全方位センサの応用

これまで見てきたように、回転光学系を用いた全方位センサは質の高い全方位の画像を得ることに適しており、各時刻の全方位画像を得る目的には適さない。では、実時間性が要求される用途に向かないかということ、全方位と実時間性が同時に達成できないだけであり、対象追跡などの用途には十分利用することができる。図 10 は、視点固定型カメラによる背景差分を用いた対象検出/追跡システムの概要である。このシステムでは、全方位（あるいは広視野の）背景画像から、現在のカメラパラメータに相当する背景画像を計算し、それを背景画像として用いることにより、背景差分を行う。背景差分の結果得られた対象シルエットの方位にカメラをコントロールすることにより、対象の追跡を行うことができる。

視点固定型カメラには背景差分が行えること以外にも優れた特性がある。これは、カメラアクションによって生じるオプティカルフローパターンが事前に計算可能なことである。これを利用すると、回転撮影しながら個々の画像の正確なパンチルト値の推定を行いつつ、運動対象と静止背景の分離が行える [10]。

視点位置精度が高く、空間解像度が高いことを利用すれば、静止背景を対象としたステレオ¹などにも利用できる。

また、監視システムなどの用途では、単に人が居ることが分かるだけでなく、誰が居るのかも分かるシステムの需要も高い。これは、回転光学系を用いた全方位センサの空間解像度の高さが生かせる用途

¹ここで言うステレオとは、多地点で撮影した全方位画像から三次元形状の復元を行うステレオのことであり、ステレオカメラ自体を回転させる「視点固定型全方位ステレオセンサ」とは異なる。

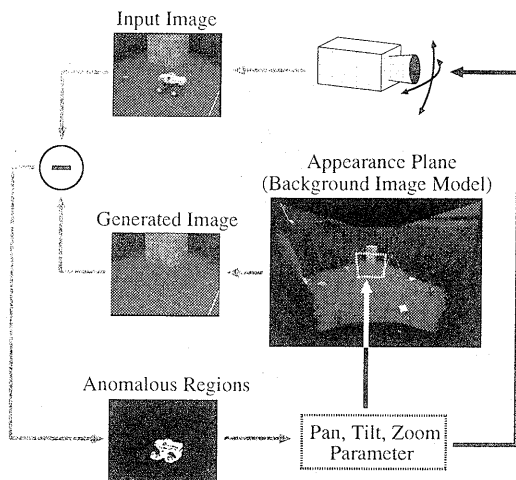


図 10: 背景差分による対象の検出と追跡

であると言える [6]. また、ズームカメラを用いた回転光学系では、パンチルトに加えてズームのコントロールも行えるため、監視者が興味のある部分を大写しにして観測することが可能である。

6 まとめ

全方位画像センサという立場から見ると、回転光学系を用いたセンサは、視点位置精度、空間解像度の高さ、ダイナミックレンジの広さ、視野角の広さなどの点においては優れた特性を持ち得、追跡などのタスクに限れば時間応答性も十分実用的なレベルで使用することができることについて述べた。

もともと、回転光学系を用いたセンサは、

- 様々な方位の画像を撮影し、それらの結果を1枚の画像に張り合わせる

という基盤技術によって支えられている。このことは、モザイクと混同されがちであるが、特に視点固定型カメラの場合、あくまで回転によって移動しない視点位置で撮影した画像集合が持つ性質に拘った点に特殊性があると言える。その結果、撮影に用いたカメラの内部パラメータのキャリブレーションが行え、空間解像度やダイナミックレンジを上げることができるなどの副次的な効果が得られる。これらは全て、カメラパラメータを変更しながら撮影した複数枚の画像を解析することによって得られており、上述の基盤技術は以下のように拡張してとらえることができる。

- 様々なカメラパラメータで画像を撮影し、それらの結果を1枚の画像に張り合わせる技術

この観点から見ると、方位毎に複数の画像情報を蓄積・統合することこそが回転光学系を用いた全方位センサの基本コンセプトであると言える。極論をすれば、視野角の広さや空間解像度の高さ、ひいては全方位であることすらこのセンサにとっては本質的な中身ではないとする見方もできる。

また、アクティブカメラとして見たときには、視点位置が移動しなければ、回転カメラであっても背景差分を行うことができ、正確にエゴモーションの除去が行える、シーンの三次元的な解析をせず「見え」に基づく解析が適用できる、などの特長を持っている。

以上のように、回転光学系、特に視点固定型カメラは、全方位ビジョン、アクティブビジョン、多重画像統合、などの各分野で用いることができるセンサであると言える。今後このセンサが発展するとすれば、複数カメラの視点位置を完全に一致させて物理的な回転を伴わない、したがって高い時間分解能を持つセンサとして発展し得ると思われる。

参考文献

- [1] J.Y. Zeng and S. Tsuji, "Panoramic Representation of scenes for route understanding", Proc. of ICPR, pp. 161-167, 1990
- [2] H. Ishiguro and S. Tsuji, "Image-Based Memory of Environment", Proc. of ICIRS, pp.634-639, 1996.
- [3] K.B. Salachik, "Characterizing an Indoor Environment with a Mobile Robot and Uncalibrated Stereo", Proc. of ICRA, pp. 984-989, 1989
- [4] H.Ishiguro, M. Yamamoto and S. Tsuji, "Analysis of Omni-directional Views at Different Location", Proc. of ICIRS, pp. 659-664, 1990
- [5] 松山, 浅田, "多重画像の統合による多機能高精度画像計測", 松山, 久野, 井宮編「新技術コミュニケーションズ, コンピュータビジョン-技術評論と将来展望-」第2章, pp.26-36, 1998
- [6] 中尾, 柏谷, 兼吉, "回転鏡を用いた広視野カメラの試作", CVIM115-16, 1999
- [7] R.Y. Tsai, "An efficient and accurate camera calibration technique fro 3D machine vision", {\bf CVPR}, pp.364-374, 1986.
- [8] 和田, 浮田, 松山, "視点固定型パン・チルト・ズームカメラとその応用", 信学論 D-II, Vol. J81-D-II, No.6, pp. 1182-1193, 1998
- [9] 大西元大, "分光スペクトルカメラの実現とその応用", 京都大学大学院情報学研究科平成 11 年度修士論文, 2000 年 2 月
- [10] 村瀬, 和田, 松山, "回転を伴うカメラによる移動物体の検出", 画像の認識・理解シンポジウム MIRU'98, 1998.7