

視点固定型パン・チルトステレオカメラ を用いた対象追跡

常谷 茂之 和田 俊和 松山 隆司

京都大学大学院情報学研究科 知能情報学専攻

視点固定型カメラは、視線方向が変化しても投影中心が移動しないため、撮影された画像間には運動視差や光学的变化を生じない。このことを利用すれば、シーンの広角背景モデルが生成できる。この背景モデルを用いれば、首振りカメラを用いた場合にも背景差分による対象の検出・追跡システムを容易に構成できる。このシステムで用いられている背景差分には、対象のモデルを持つ必要がなく任意の対象を検出できる利点があるが、背景が変化してしまうと対象を検出できないという問題がある。背景の変化の原因としては、背景が動く場合の他に、照明の変化が挙げられる。本論文では後者に焦点を当て、シーンの明るさを表した明度画像ではなく、照明の変化によって変化しない視差画像を使うことで、この問題を解決する方法について述べ、試作システムを用いた比較実験により、システムの照明変化に対する頑健性を示す。

Object Tracking with Fixed-Viewpoint Pan-Tilt Stereo Camera

S.Tsunetani T.Wada T. Matsuyama

Department of Intelligence Science and Technology

Graduate School of Informatics, Kyoto University

Fixed Viewpoint Stereo Camera (FVSC) is a rotational stereo camera which rotates around the optical center of its reference camera. This property guarantees that depth images at different view directions do not include motion parallax. By using FVSC, we developed a depth subtraction based active tracking system that operates under variable illumination conditions. Intuitively, this is because depth information obtained by a stereo camera is basically independent of illumination intensity. This paper presents a robust depth subtraction method for this system, and the experimental results demonstrate that our system is less affected by the illumination change than intensity subtraction based system.

1 はじめに

3次元空間内を移動する対象を能動カメラで追跡することを計算機によって自動的に行う技術は、自動監視システム、知的テレビスタジオ、遠隔講義システム等多数の実用システムを実現するための基本となる技術である。

能動カメラを用いて対象追跡を行う方法として、文献 [1] では視点固定型パン・チルト・ズームカメラ (FV-PTZカメラ) を使い、背景差分によって対象検出・追跡するシステムが提案されている。通常、能動カメラを用いて対象追跡を行う場合、カメラの視線方向、すなわちパン・チルト・ズームを変化させることによって、撮影された画像間には幾何学的変化 (運動視差) や光学的変化 (ハイライトの変化など) が生じる。このため能動カメラを用いて観測された画像間に背景差分を適用するためには、観測画像間でのカメラパラメータの変化が十分小さいといった条件が必要であった。この問題に対し、カメラパラメータを変化させたとき、カメラの投影中心の位置が変化しなければ観測された画像間には幾何学的変化や光学的変化は生じない。このようなカメラを FV-PTZ カメラといい [2], この FV-PTZ カメラを用いた場合、カメラのパン・チルト・ズームを変えて撮影された複数の画像は、Appearance-Plane (APP) と呼ばれる共通の仮想的な一枚の平面に投影することができる。このとき異なるパン・チルト・ズームで撮影された画像を APP に投影した投影像は重なり部分で完全に一致し、継ぎ目のない1枚のパノラマ画像が合成できる。逆に、APP 上の画像があれば、逆投影によって、任意のパン・チルト・ズームでシーンを撮影した際に得られる画像が生成できる (図 1)。この性質を用いれば能動カメラを用いる場合にも、背景差分による対象の検出・追跡システムを容易に構成できる [1]。

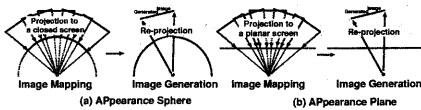


図 1: Appearance Sphere と Appearance Plane

この対象追跡システムで用いられている背景差分は対象のモデルを持つ必要がなく、任意の移動対象を検出できるという利点があり、背景が変化しない環境では、非常に有効な方法である。しかし、背景が動かないような場合であっても、照明条件が変化するだけでシーンの明るさが変わってしまい、背景が変化したことになり、対象を検出できなくなるという問題がある。これは、背景差分を行う画像としてシーンの明るさを画素値とする明度画像を用いているため、照明条件の変化に伴い画像が変化してしまうことが原因である。

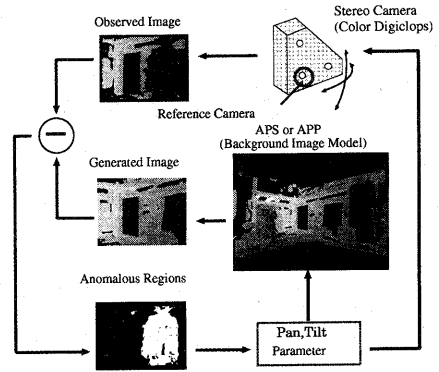


図 2: FV-PT ステレオカメラを用いた対象追跡システム

そこで本論文では、FV-PTZ カメラを用いた対象追跡システムを照明条件の変化に対して頑健にする方法として、視点固定型パン・チルトステレオカメラ (FV-PT ステレオカメラ) を用いた対象追跡システムを提案する。このシステムでは背景差分を行う画像として、FV-PT ステレオカメラによって生成した視差画像を用いる。視差は奥行きの情報であり、照明条件によって変化しない。したがって、視差画像を用いることで追跡システムの照明条件の変化に対する頑健性は向上する。

以上のような考え方もとづいて対象追跡システムを構成すると図 2 のようになる。具体的には以下のことを行う。

- (1) あらかじめ対象の写っていないシーンの全体像を FV-PT ステレオカメラで撮影し、APP 画像として記録しておく。
- (2) 画像撮影時のパン・チルト・ズームの値から APP 画像から現在の観測画像と一致する画像を逆投影によって生成し、そのときの背景画像とする。
- (3) 観測画像と背景画像の差を計算し、変化領域の有無により対象の存在を判断する。
- (4) 対象が存在する場合は、変化領域の重心を求め、これから対象の位置を求める。これを時間的に連続する 2 枚の画像について行い、対象の位置の変化から対象の移動角速度を求める。
- (5) 得られた対象の位置・大きさ・運動情報を基にパン・チルト・ズームを制御し、(2) からの処理を繰り返す。

このような視差画像を用いた対象追跡システムを構成することは、一見容易な問題のように思われる。しかし、実際は視差画像を生成するステレオ画像対が明度画像であることからいくつかの問題が生じる。

以下では、2章で視差画像を用いた対象検出法について述べ、3章で試作システムの構成について説

明する。4章では、実験結果によって試作システムの有効性を示す。

2 視差画像を用いた対象検出法

2.1 視差画像の時間的不安定性

視差画像を用いる上での大きな問題点として、その不安定性が挙げられる。この問題点は、視差画像はステレオ視によって生成されるため、視差が安定に計測できないような場合には、フレーム毎に計測された視差が大きく変化し、時間的に不安定となるために生じる。ステレオ視によって安定に視差が求められない主な理由として以下の点が挙げられる。

- ステレオ視はステレオ画像対から対応点をテンプレートマッチングによって求める方法である。したがって、テクスチャ情報が希薄な領域では間違っ

てマッチングをする可能性が高く、正確な視差を求めることは難しい。

図3は実際に視差画像において、視差が時間経過とともにどのように変化しているか観測した結果である。視差画像を200フレーム撮影し、同一点の各フレームでの視差の値を時間軸に沿ってプロットした。このとき照明条件は一定にしておき、カメラの視線方向は固定して撮影している。この図から分かるようにステレオ視によるマッチングがうまくできないような点ではフレーム毎に視差の値が大きく変化している。逆にマッチングが正確に行えている点では、視差の値はほぼ一定となっている。以下では視差の計算結果がフレーム毎に大きく違った値になるような点を不安定点と呼び、逆にフレーム毎の視差に変動がなく安定して視差が求まるような点を安定点と呼ぶことにする。

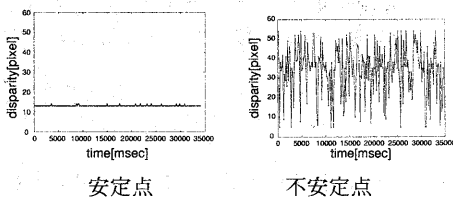


図3: 視差の時間的变化

このように不安定点が視差画像中に存在する場合、その画像を用いて背景差分を行っても、得られた差分画像には誤った検出結果が含まれてしまい、正しく対象を検出できない。この問題の解決法として、安定点と不安定点を区別して取り扱う方法について述べる。

まず、安定点であるか不安定点であるかを判断するために以下の処理を行う。

テクスチャバリデーション (Texture Validation)

ステレオ視でテンプレートマッチングを行う際に、テンプレート内の画像領域の微分値を計算し、その値が設定した閾値以下ならば、テクスチャ情報が十分でないと判断し、その点では視差が算出不可能であるとする。

この処理によって視差の算出が不可能であると判断された点を計測不可能点、算出できるとされた点を計測可能点と呼ぶことにする。テクスチャバリデーションによって分けられた二つの点のうち、計測可能点にはその点の視差の値を与え、計測不可能点には計測可能点と区別して扱うことができるような一律の値を与える。図4は同じ条件で撮影された画像に対し、テクスチャバリデーションを適用した場合の視差画像と、適用していない場合の視差画像である。ここで計測不可能点は白で表示している。この画像からテクスチャバリデーションによって、不安定点がほぼ計測不可能点とされていることがわかる。このようにほとんどの不安定点を計測不可能点とし、一律の値を与えることによって視差画像の不安定性を解消することができる。

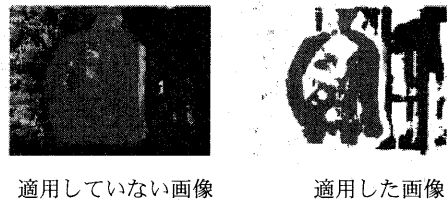


図4: テクスチャバリデーションの効果

2.2 照明変化による視差画像の変化

視差は照明が変化しても変わらないはずである。しかし、それはステレオ視によって視差が安定して求められる範囲においてのみ成り立つことであり、照明変化によってテクスチャが画像上で希薄になってしまう場合には、2.1節に述べたように不安定な視差が得られてしまう。このような問題は、任意の照明条件においてシーン内のどこでも生じ得る。

図5は異なる照明条件における視差画像を示したものである。この実験では照明としてスポットライトを用い、その電源電圧を20[V]から80[V]まで変化させて撮影している。このように、視差はシーンの明るさが変化しても変わらないはずであるが、視差を求めるためのステレオ画像対が明るさによって変化するため、視差画像も照明条件によって変化してしまうという特性を持つ。このため、照明変化に伴って視差画像も部分的に変化することになり、背景差分によって対象を検出できないという問題が生じる。以下ではこの問題を解決する背景差分の方法について述べる。

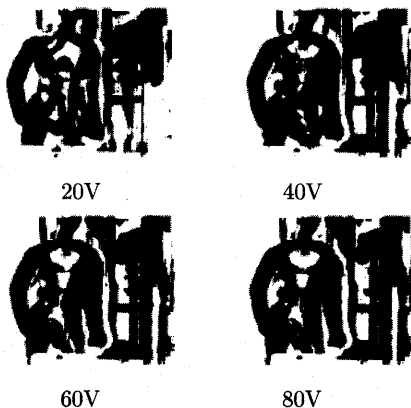


図 5: 照明変化による視差画像の変化

2.3 背景画像の生成法

前節で述べた問題から、背景画像としてある決まった照明条件で撮影された画像を用いると、観測画像の照明条件が変化した場合、対象を検出できなくなってしまう。そこで、背景画像をある決まった照明条件で撮影されたものを用いるのではなく、各照明条件で撮影された複数の画像を用いて、以下の二種類の背景画像を生成する。

最大視差画像

すべての照明条件において一定時間、視差の値の変動を観測する。この観測中に一度でも観測可能点とされた点にその点での視差の最大値を記録しておく。観測中一度も計測可能点とならなかった点には計測不可能点の値を記録しておく。

マーキング画像

最大視差画像を生成するときと同様に、照明条件を変え、各照明条件について一定時間視差の変動を観測し、一度でも計測不可能点となった点をマーキングしておく。

ここで一定時間、視差の変動を観測しているのは、以下の理由による。2.1節で述べたように、テクスチャパレディーションを行えば視差画像の不安定性はほぼ解消される。しかし実際には、計測可能点であっても、点によっては時間的に多少の変動が生じている。この問題を軽減させるために一定時間、視差の変動を観測している。

また、最大視差画像において視差の最大値を記録しておくのは、以下の通りである。視差を用いる場合は「検出可能な対象は必ず背景よりもカメラに近い位置に現れる」ので「対象の領域の視差は背景の視差よりも必ず大きな値になる」ということが成り立つ。ことから、背景画像の画素値として時間的に変化する

る視差の最大の値を保持しておき、観測画像でその値よりも大きな値が得られた場合に、対象として検出すればよいことになる。このため背景画像として視差の最大値を記録している。

2.4 検出法

前節で述べた二種類の背景画像を用いて計測可能点と計測不可能点を区別して扱対象を検出する方法について述べる。

観測画像中の計測可能点では、最大視差画像を用いる。最大視差画像において計測不可能点でなければ、その点は照明条件によっては計測可能点なることを意味する。また、その点は計測可能点であるときの視差の値を保持しているのも、もし対象が現れていれば、観測画像中での値は最大視差画像中の値よりも大きくなる。同様に、逆ならば対象は現れていないことになる。最大視差画像において計測不可能点であれば、その点は照明条件が変化しても、一度も計測可能点となることがなかった点であるので、そのような点が、観測画像中において計測可能点となることは、対象が現れた場合以外に考えられない。

観測画像中の計測不可能点では、マーキング画像を用いる。マーキング画像においてマーキングされていない点は、照明条件によらず計測可能であることを意味している。そのような点が、観測画像中において計測不可能となることは、対象が現れた場合意外に考えられない。また、マーキングされている点が、観測画像中において計測不可能点となるのは、照明条件の変化によるものとする。

以上のような考え方で対象を検出する。具体的なアルゴリズムは以下ようになる。

アルゴリズム

1. 観測画像において計測可能点である場合
 - (a) 最大視差画像において計測可能点である場合
 - i. 得られた視差の値が最大視差画像の値よりも大きければ、対象として検出する。
 - ii. 得られた視差の値が最大視差画像の値以下であれば、対象として検出ししない。
 - (b) 最大視差画像において計測不可能点である場合
 - i. 対象として検出する。
2. 観測画像において計測不可能点である場合
 - (a) マーキング画像においてマーキングされていれば、対象として検出ししない。
 - (b) マーキング画像においてマーキングされていなければ、対象として検出する。

このアルゴリズムに従い、背景差分を行うことで、2.2節で述べた問題を解決し、照明変化に頑健に対象を検出することができる。

3 試作システム

3.1 ステレオカメラの構成

試作システムではステレオカメラとして、Point Gray Research 社の DIGICLOPS を用いた。これは、図 6 に示すように直角三角形の形をしており、三角形の直角の位置にあるカメラを基準カメラとする 3 眼カメラである。DIGICLOPS では基準カメラで撮影された基準画像と、その他の 2 つのカメラで撮影された比較画像との間でステレオマッチングを行い、マルチベースラインステレオ法 [3] によって視差画像を生成する。

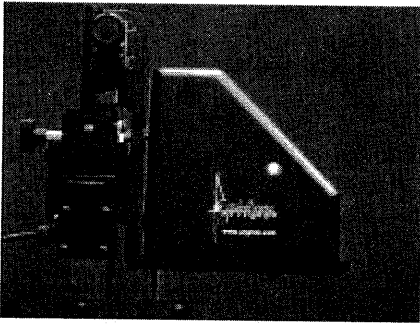


図 6: DIGICLOPS

この 3 眼ステレオカメラでは、焦点距離が等しい 3 台のカメラが、光軸が互いに平行で、かつ各々の画像面が同一平面上にのるように 2 次元的に配置されている。この 3 眼ステレオカメラにおいて、図 7 のようにカメラ座標系 (X, Y, Z) を基準カメラの光学中心を原点とし、基準カメラの視線方向に Z 軸、水平方向に X 軸、垂直方向に Y 軸を設定する。また、基準カメラの画像における画像座標系を、画像中心を原点とし、水平方向に x 軸、垂直方向に y 軸となるように定める。この時、ある点 $P(X, Y, Z)$ が基準画像上 (x, y) に投影されたとすれば、点 $P(X, Y, Z)$ は次式のように表せる。

$$(X, Y, Z) = \left(\frac{bx}{d}, \frac{by}{d}, \frac{bf}{d} \right) \quad (1)$$

ここで b は基線長、 f は焦点距離であり、 d は視差である。

3 眼カメラの場合、マルチベースラインステレオ法は式 2 で表される。

$$d = \frac{d_{max}}{\min} \left(\sum_{i=-\frac{m}{2}}^{\frac{m}{2}} \sum_{j=-\frac{m}{2}}^{\frac{m}{2}} \left| I_{right}[x+i][y+j] - I_{left}[x+i+d][y+j] \right| \right) \quad (2)$$

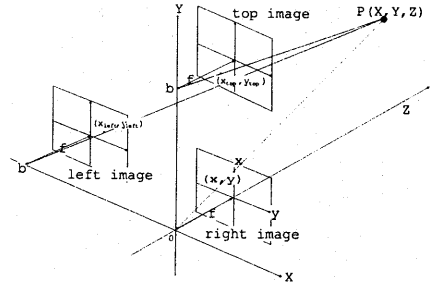


図 7: DIGICLOPS における座標系

$$+ \sum_{i=-\frac{m}{2}}^{\frac{m}{2}} \sum_{j=-\frac{m}{2}}^{\frac{m}{2}} \left| I_{right}[x+i][y+j] - I_{top}[x+i+d][y+j] \right| \quad (2)$$

ここで d_{min} , d_{max} は走査する視差の最小値と最大値、 m は走査するときのテンプレートの大きさ、 I_{right} は基準画像、 I_{left} , I_{top} は他の二つの比較画像を意味している。

3.2 ステレオカメラのキャリブレーション

試作システムで用いる 3 眼ステレオカメラの場合にも以下に示すように、同様のキャリブレーションが可能である。

DIGICLOPS には 3 つのカメラがあるが、試作システムで用いる視差画像は、その内の基準カメラについて生成されるので、左画像と上画像に幾何学的変化や光学的変化が生じて何ら問題はない。このことからこの 3 眼ステレオカメラを視点固定型パン・チルトステレオカメラとして使うためには基準カメラについてのみキャリブレーションすれば良い。具体的には基準カメラで撮影された画像を用いて文献 [2] の方法を用いてキャリブレーションをすれば良い。

試作システムでは、このカメラをパン・チルトカメラとして用いるために、専用のカメラ台とパン・チルトコントローラーを組み合わせた雲台を用意した。この雲台にカメラを取り付け、基準カメラの投影中心と、パン・チルトコントローラーの回転中心が一致するようにキャリブレーションを行った。このカメラ台には、直進ステージが動かせるように作られており、これを調整することで、DIGICLOPS を視点固定型パン・チルトステレオカメラとした。

3.3 APP 画像の生成法

3.1 節で述べたように、任意の点 $P(X, Y, Z)$ は式 1 で表される。基線長 b 、焦点距離 f は既知であるので、この式から分かるように点 P の奥行き Z は視差 d の

みから算出することができる。このことは、視差には以下のような特性があることを意味する。

- 視差 d は視差を求めたい点 P の奥行き Z のみに依存し、カメラの視線方向に垂直な面上で同じ値となる。

ここで、カメラ座標系の Z 軸はカメラの視線方向であるので、カメラの視線方向が変化すると、当然カメラ座標系も変化する。このことと、上で挙げた視差の特性から、3次元空間中における任意の点の視差は、カメラの視線方向によって異なる値となる。

試作システムでは、背景差分を用いて対象追跡を行うために、背景を APP として記録しておく方法をとる。しかし、上記の視差の特性から、違う視線方向で撮影した複数の画像を APP 上に投影したとき、投影像の重なり部分でその視差の値は互いに一致しない。このため、視差画像では APP を合成することができない。この問題が解決されなければ、視差画像を用いた背景差分による対象追跡において、視線方向を変えることができないことになる。

この問題は、視差を距離に変換して、APP における距離画像を合成することによって解決することができる。背景視差画像を生成する際には、逆投影によって背景画像を得るときに距離から視差に変換し直す処理を行う。ここでの距離は、カメラの投影中心からの距離を意味する。3次元中の任意の点において、カメラの視線方向が変化しても、カメラの投影中心からの距離は変化しない。この性質を用いることで、奥行き情報を失うことなく APP を合成することが可能となる。任意の点 P の投影中心からの距離 L は、3.1節で設定した座標系を用いると、次式のように表せる。

$$L = \frac{b\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}}{d} \quad (3)$$

カメラのパン・チルトを変化させる場合にも、背景画像を生成する際には、APP における距離画像から逆投影によって背景画像を得るときに、距離から視差に変換し直す処理を行う。これにより、視差画像を用いた背景差分による対象追跡が可能となる。

3.4 カメラの絞りとシャッタースピードのコントロール

視差画像を用いる場合、カメラの絞りとシャッタースピードを照明条件によって変化させても、カメラ間での画像の明るさの整合性が保たれていれば、生成される視差画像には影響しない。したがって、これらのカメラパラメータをコントロールすることで、視差画像を生成するステレオ画像対において、テクスチャ情報を読み取れる照明条件の幅が広くなり、システムの追跡可能な照明条件の幅が広がる。このことから、試作システムでは、カメラの絞りとシャッタースピードを照明条件に応じてコントロールすることにした。以下の実験ではすべて、明度画像の撮影は絞り

とシャッタースピードは固定とし、視差画像の場合はコントロールしている。

3.5 システムの構成

試作システムとして、3.1節で述べた FV-PT ステレオカメラを用いて、画像サイズが 320×240 の視差画像を生成することにし、これまで述べてきた方法を用いて、図2の対象追跡システムを構成した。具体的な内容は、1章で述べた通りである。

以上のようにシステムを構成した結果、試作システムの観測時間間隔は1秒程度となった。

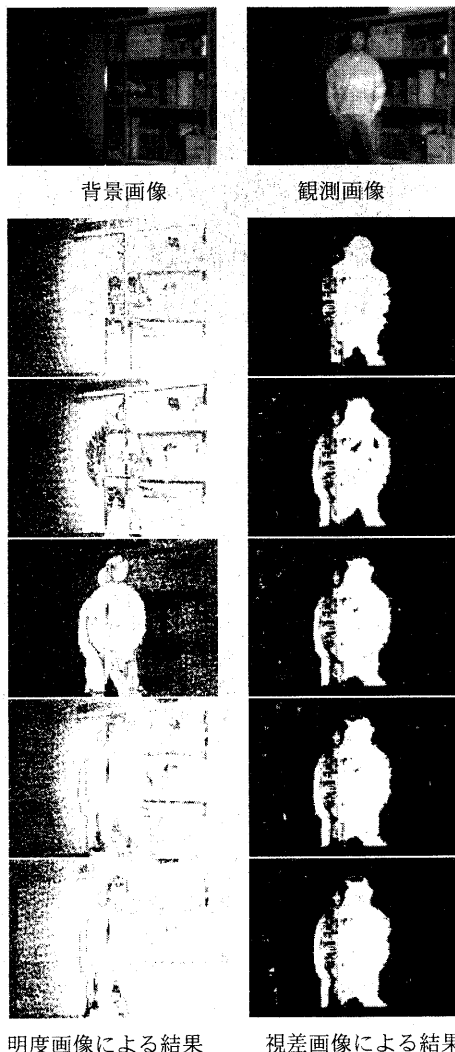


図 8: 検出結果の比較 (上から順に 20[V]~100[V])

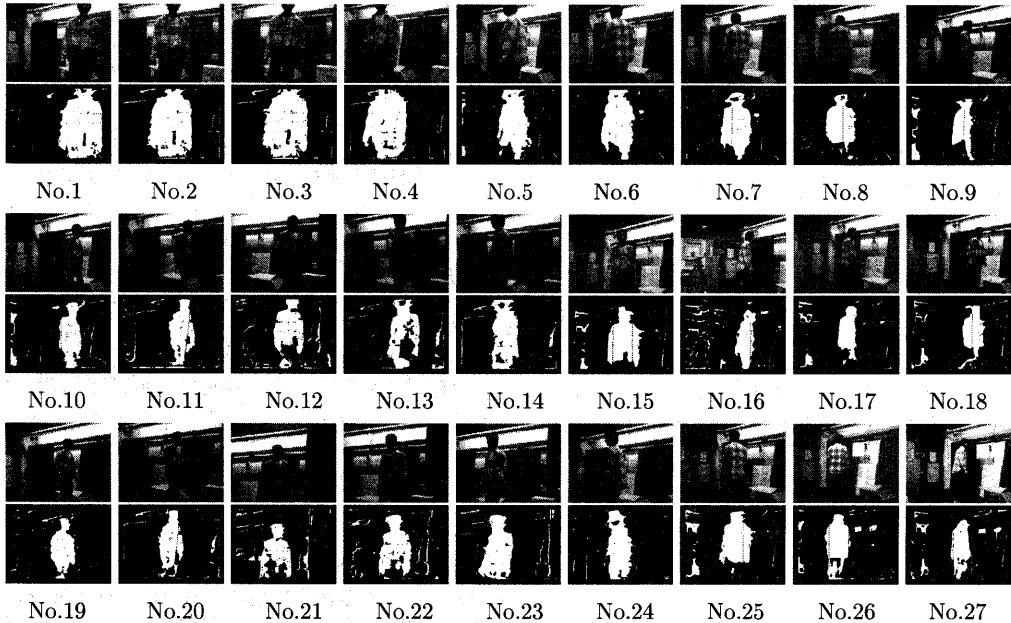


図 9: 対象の追跡実験 (上段: 入力画像 下段: 差分画像)

4 実験

4.1 背景差分の手法による差分結果の違い

実際に 2 章で述べた方法を用いて照明条件を変化させ、検出能力について従来の背景差分の方法と比較する実験を行った。実験環境は以下の通りである。

- 照明としてスポットライトを使い、その電源電圧を変化させることで照明条件を変化させた。
- 差分を行う画像は前もって撮影した同じ画像を用いる。
- 最大視差画像、マーキング画像は、各照明条件につき約 270msec 間隔に 50 フレーム撮影して生成した。
- 明度画像の背景画像は、照明電圧を 60[V] にして撮影し、最大視差画像とマーキング画像は、照明電圧を 20[V] から 100[V] まで 20[V] 毎に変化させて生成した。
- 対象は、カメラから約 3m 離れた位置で撮影した。
- 観測画像は、照明電圧を 20[V] から 100[V] まで 20[V] 毎に変化させて撮影した。

実験結果は図 8 のようになった。これから分かるように、明度画像での背景差分では、照明を 20[V] 変化させただけで対象を検出できていない。これに比べ視差画像を用いた方法では、明らかに照明変化に対して頑健に対象を検出している。この方法で検出されない部分や雑音のような誤検出が生じているのは、テキストチャバリデーションの結果、計測可能と判断されてしまう不安定点が存在することが原因となっ

ていると考えられる。

4.2 試作追跡システムによる追跡実験

2 章で述べた背景差分の方法を用いて追跡システムを試作し、実際に対象追跡実験を行った。実験環境は以下の通りである。

- 照明は高周波点灯の蛍光灯を用い、その明るさを変化させながら追跡を行った。
- 背景の最大視差画像、マーキング画像は、蛍光灯の強さを変化させ各照明条件につき約 500[msec] 間隔に 50 フレーム撮影して生成した。

図 9 は追跡時の入力画像と、そのときの差分画像である。この図から照明条件が変化しても、対象の追跡が行えていることが分かる。この差分画像において、対象以外に誤検出が生じている原因として、

- カメラのパン・チルトと APP から切り出してきた背景画像のパン・チルトの間に誤差が生じているため。
- 4.1 節の場合と同様に、計測可能と判断された不安定点が存在するため。

の二つが考えられる。

4.3 視差画像の距離分解能

1 式からわかるように、奥行き Z は視差 d と反比例の関係がある。このことから、視差の距離分解能は、奥行き Z が大きくなるにつれて低くなるので、対象の検出が難しくなる。この視差の特性から、試作システムの検出能力として距離分解能を調べた。この

とき、照明条件は変化させず、安定に視差が求まる対象物をカメラからの距離を変え、その距離での視差を求めた。この結果から以下の近似曲線が得られた。ただし、 Z の単位は[m]、 d の単位は[pixel]である。

$$Z = 44.33778261/d \quad (4)$$

この近似曲線から、試作システムで用いた視差画像の距離分解能は、図10の(1)の曲線ようになった。実際の追跡システムでは、差分の閾値を2としたため、距離分解能は図10の(2)の曲線となった。

図11は観測画像の中に対象が約6[m]程離れた壁に張り付いている状況で背景差分を行った結果である。このとき、照明条件は変えず、明度画像による背景差分と、視差画像による背景差分を行った。この結果から、視差画像を用いた方法では、距離分解能の問題によって、対象は変化領域として検出できていないことが分かる。

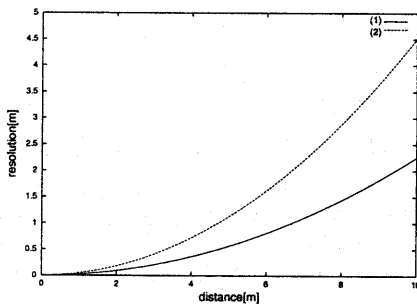


図10: 距離分解能

5 結論

本論文では、照明条件が変化するような環境下においても、頑健に対象追跡を行うために、視点固定型ステレオカメラによって視差画像を生成し、その視差画像を用いて背景差分により対象を検出し、追跡する方法を試みた。本来、視差の値はシーンの明るさによらず一定のはずであるが、ステレオカメラで得られる実際の視差画像は非常に不安定であり、そのように不安定な視差画像を用いた対象検出は、単純な背景差分では実現できない。

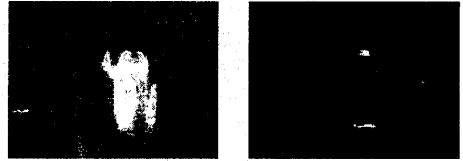
本論文では、このような視差画像の不安定さによって生じる問題を解決し、照明条件が変化するような環境下においても、頑健に対象を検出し、追跡する方法を示し、プロトタイプシステムの試作を行った。

今後の課題としては、計測可能点と判断される不安定点のために生じた誤検出を取り除き、より正確



背景画像

観測画像



明度画像による検出結果

視差画像による検出結果

図11: 距離分解能の問題により検出されない例

な対象検出を可能とすることが挙げられる。試作システムでは、背景画像を生成する際に、計測可能点、計測不可能点となる回数が1回でも記録及びマーキングするようにしていたが、この条件について改良を加えることで、計測可能点と判断される不安定点の影響を軽減できると考えている。また、本論文では照明変化に対する頑健さに焦点を当てたため、追跡の頑健さの一つの要因である実時間性については深く追求しなかった。これに対する課題として、対象追跡の実時間性の向上のために各処理の高速化が挙げられる。

参考文献

- [1] 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, (1999).
- [2] 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).
- [3] 奥富 正敏: コンピュータビジョン 技術評論と将来展望, 第8章, ステレオ視, 新技術コミュニケーションズ, 1998.