

尤度評価に基づいた微弱な移動天体検出

板垣 和幸・三浦 則明

北見工業大学情報システム工学科 〒090-8507 北見市公園町 165

Likelihood-Based Detection of Faint Moving Astronomical Object

Kazuyuki ITAGAKI and Noriaki MIURA

Department of Computer Sciences, Kitami Institute of Technology, 165 Koen-cho, Kitami 090-8507

We propose a new method using likelihood evaluation for detecting faint moving astronomical objects. A major problem in the detection of such objects is that they are hardly distinguishable from noise. To cope with the problem, we introduce a probabilistic interpretation of pixel values and likelihood evaluation in the detection. In our definition of likelihood, statistical processing is done both over the extent of an object and over some images with different observational times. Our method produces two-dimensional distribution of likelihood, the value of which is useful as the index of assurance in the detection. We apply our method to observed images, and show its effectiveness in the detection of faint moving astronomical objects.

Key words: Likelihood evaluation, faint moving astronomical object, poisson stochastic process, astronomical image processing

1. はじめに

小惑星の地球衝突を未然に防ぐためには小惑星の早期発見が重要であり、そのため地球から遠く離れている段階で検出することが望ましい。また太陽系外縁部に存在し、太陽系形成初期の情報をもつと考えられるエッジワース・カイパーベルト天体^{1,2)}の探索から詳しい知見を得るためには、なるべく遠くにある、より小さな天体を発見することが重要となる。いずれの場合にも共通して、暗い天体を検出する画像処理技術が必要である。

太陽系内の天体はすべて背景の恒星に対して移動しているため、同一視野を異なる時刻で撮像した複数のフレーム間を比較することでそれらを検出することができる。比較的明るい移動天体の場合、目視により容易にそれらを検出することが可能である。しかしながら暗い移動天体の場合に、なおかつ広視野の画像に対して、目視で探索を行うことは観測者への負担が非常に大きくなってしまふ。そのため、移動天体を自動的に検出し、観測者の支援を行う手法を開発する必要がある³⁾。

自動化のための方法はすでにいくつか提案されてい

る⁴⁻⁷⁾。これらの手法の多くは、移動天体も含めて視野中の星像をすべて記録し、同一視野の複数のフレーム間で位置がずれている天体を候補として示す、といった手法である。その際の星像検出処理はバックグラウンドと星像とを区別する閾値処理によって実現されるが、ここに大きな問題がある。たとえば、検出の感度を高め、暗い星を認識するよう閾値を下げた場合、ノイズを拾うことになり誤検出が生じることとなる。また閾値を高くすると、目的である暗い移動天体をも落としてしまう危険性を含んでいる。

本論文で検出の対象とする移動天体（小惑星）は、非常に暗く、バックグラウンドと同程度の明るさをもつものである。この場合、バックグラウンドの画素値と移動天体に対応する領域の画素値とに明確な差がなくなる。したがって、たとえ移動天体が画像中に含まれていたとしても、それが移動天体であるのかを識別することは難しい。これは個々の画素値を観点とした画像処理（星像検出処理において用いられる閾値処理等）を行っている限りは克服できない問題であると考えられる。そこで本論文では、確率・統計的観点から移動天体検出を行う手法を提案する。

E-mail: itagaki@infmd2.cs.kitami-it.ac.jp

2. 方 針

まず、移動天体の位置・速度・等級をパラメーターとして表現し、それらに適当な値を設定することによって、ノイズのない場合の移動天体輝度分布を想定する。次に想定した移動天体輝度分布と実際の観測量とを用いて、光子検出がポアソン確率過程に従うと仮定し、ある位置における両者の整合性を尤度として計算する。この計算を速度・等級のパラメーターを変えながら繰り返し、最大の尤度およびそれを与えるパラメーターを求める（この過程を本論文では最大尤度探索とよぶ）。こうして得られた最大の尤度をその位置における移動天体存在尤度とする。この際、同一視野で観測時刻の異なる3枚の画像を用いることを想定する。以上の処理をすべての位置で行うことにより、二次元的な尤度分布を得ることができる。

3. 光子検出

光子検出のプロセスは基本的にランダムで確率的に行われ、ポアソン確率過程に従っていることが知られている⁸⁾。すなわち、像面上のある画素 (x, y) における入射強度が $r(x, y)$ のとき、画素値 $o(x, y)$ が得られる確率は、ポアソン確率過程によって式 (1) で与えられる。

$$P[o(x, y)|r(x, y)] = \frac{\{r(x, y)\}^{o(x, y)}}{\{o(x, y)\}!} \exp[-r(x, y)] \quad (1)$$

いま、筆者らは「観測された $o(x, y)$ に対して、想定した $r(x, y)$ がどれだけ尤もらしいのか」を評価したいので、 $P[r(x, y)|o(x, y)]$ を求める必要がある。ここで、ベイズの定理より、

$$P[r(x, y)|o(x, y)] = \frac{P[o(x, y)|r(x, y)] \cdot P[r(x, y)]}{P[o(x, y)]} \quad (2)$$

という関係がある。ここで、 $P[o(x, y)]$ とは画素 (x, y) において $o(x, y)$ という画素値を得る確率である。これは検出器の特性に依存している量であり、測定することが可能である。通常天体観測では、検出器 (CCD) の素子ごとの感度のばらつきを flat field データとして測定し、それを用いて観測データを補正する。このため、 $o(x, y)$ がすでに flat field 補正されたデータである場合には、 $P[o(x, y)]$ を定数として扱うことができる。一方、 $P[r(x, y)]$ とは画素 (x, y) における入射強度が $r(x, y)$ になる確率である。これは望遠鏡の光学系を含む伝搬路の特性に依存している。たとえば、斜入射による光量の損失や浮遊している塵などによる光線の遮断などの影響が考えられる。このうち前者については、前述の flat field 補正によって

対処できるが、後者については、その影響を無視するしかない。よってここでは、flat field 補正が行われている場合には $P[r(x, y)]$ を定数とみなすことにする。結局、

$$P[r(x, y)|o(x, y)] \propto P[o(x, y)|r(x, y)] \quad (3)$$

となる。なお本論文にて用いる観測データはすべて flat field 補正済みである。そのため、本論文では尤度計算の際には、式 (1) をそのまま用いて計算することにする。

4. 最大尤度探索

4.1 移動天体存在尤度

いま、移動天体の位置 (x, y) ・速度 (v) ・等級 (m) をパラメーターとしてその値を適当に設定することにより、想定した移動天体の輝度分布 $r'_{v,m}(x, y)$ を決定することができる (Fig. 1(a))。しかしながら、観測像は大気ゆらぎの影響を受けているため、 $r'_{v,m}(x, y)$ と大気ゆらぎの点像分布関数 $h(x, y)$ とをコンボリューションして得られる輝度分布 $r_{v,m}(x, y)$ を尤度計算に用いなければならない (Fig. 1(b))。

$$r_{v,m}(x, y) = r'_{v,m}(x, y) * h(x, y) \quad (4)$$

ここで、 $*$ はコンボリューションを表す。なお $h(x, y)$ は、観測時に大気ゆらぎの状態を測定することによって容易に決定できる。

ここで、得られた観測量が $o(x, y)$ のとき、ある位置 (x, y) における尤度 $f(x, y; v, m)$ を、

$$f(x, y; v, m) = \prod_{(x, y) \in D} P[r_{v,m}(x, y)|o(x, y)] \quad (5)$$

と定義する。ここで定義した尤度は、ある領域 D に含まれるすべての画素における事後確率の積である。 D としては移動天体の大気ゆらぎによる広がりよりも広い範囲にとる必要がある。ここでは経験的に、4連結の膨脹処理を3回繰り返すことで D を決定した (Fig. 1(c))。また、式 (5) は積の計算を多く含むことから、対数尤度を使用することによって計算の高速化をはかることができる。すな

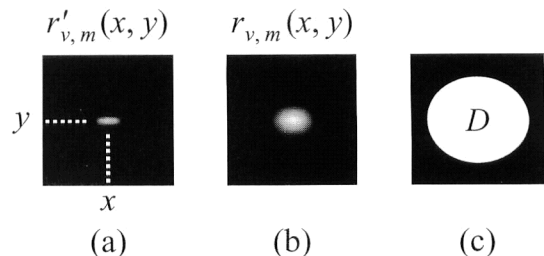


Fig. 1 Simulated images of a moving object (a) with and (b) without atmospheric turbulence. Region D in (c), which is used in Eq. (5), is determined through expanding three times non-black region in (b).

わち、

$$g(x, y; v, m) = \ln\{f(x, y; v, m)\} \\ = \sum_{(x,y) \in D} \ln\{P[r_{v,m}(x, y) | o(x, y)]\} \quad (6)$$

となる。本論文では以降、単に尤度といった場合には、対数尤度を示すことにする。

次に、速度・等級を変えながら最尤法により尤度を求め、ある位置 (x, y) における移動天体存在尤度 $L'(x, y)$ を決定する。

$$L'(x, y) = \text{Max}_{v, m} [g(x, y; v, m)] \quad (7)$$

この処理を画像のすべての位置において行うことにより、二次元的な移動天体存在尤度分布を得ることができる。

4.2 ノイズの抑制

本論文で対象としている暗い移動天体の場合、移動天体に対応する領域の輝度分布は、バックグラウンド部に存在するノイズ分布と明瞭な区別がつかない。したがって、式(7)で得られた移動天体存在尤度分布 $L'(x, y)$ は当然ノイズに対しても反応するため、この尤度分布には移動天体に対応するピークのほかに、ノイズに対応するピークも含まれている。

そこで本手法では、ノイズに対応するピークを抑制するため、前節の最大尤度探索の際に異なる時刻に同一視野を観測した3枚の画像を用いる。通常、観測画像の露光時間および露光間隔は観測者が指定することから既知である。したがって、任意の画像の移動天体位置および速度のパラメーターが決まれば、その他の画像での移動天体位置を容易に導くことができる。本論文では、そのようにして導いた n 枚目の画像での移動天体の位置を、 (x_n, y_n) として表すことにする (Fig. 2)。

よって想定した移動天体輝度分布を $r_{v,m}(x, y)$ とし、 n 枚目の画像の観測量を $o_n(x, y)$ とすると、位置 (x_n, y_n) での尤度 $g_n(x_n, y_n; v, m)$ は式(8)となる。

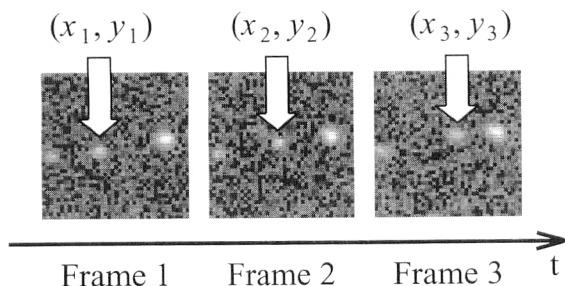


Fig. 2 The positions (x_2, y_2) and (x_3, y_3) of a moving object in frame 2 and 3 can be derived from its position (x_1, y_1) in frame 1 and a supposed velocity.

$$g_n(x_n, y_n; v, m) = \sum_{(x,y) \in D} \ln\{P[r_{v,m}(x, y) | o_n(x, y)]\} \quad (8)$$

本手法では得られた3つの尤度を、1枚目の画像における尤度として(対数尤度であることから)足し合わせ、最大尤度探索の処理を行う。そうすると、それらの位置に移動天体が存在していれば、3枚の画像のすべてで大きな尤度となるので、足し合わせた場合にも高い尤度値を得ることができる。一方ノイズの場合には、ランダムに発生していることから、3枚の画像の対応位置すべてに移動天体に似たノイズパターンが現れる可能性は低く、得られる尤度は移動天体の場合より低い値となる。

すなわち、1枚目の画像のある位置 (x_1, y_1) における移動天体存在尤度 $L(x_1, y_1)$ を、以下のように定義する。

$$L(x_1, y_1) = \text{Max}_{v, m} \left[\sum_{n=1}^3 g_n(x_n, y_n; v, m) \right] \quad (9)$$

式(9)の計算をすべての位置について行うことにより、二次元的な移動天体存在尤度分布 $L(x, y)$ を得る。

5. 尤度増加率による規格化

前節で得られた移動天体存在尤度分布 $L(x, y)$ を直接二次元画像として表示するのは意味がない。なぜなら、 $L(x, y)$ を与える等級 m の値が画素ごとに異なっており、尤度の絶対値がこの m に依存しているためである。したがって何らかの規格化を行う必要がある。

このため本論文では、尤度増加率という量を新しく導入する。まず、何も天体がないとした場合の尤度を求める。したがって、移動天体の輝度値がゼロであり、バックグラウンド部の輝度値のみと想定した輝度分布を用いて尤度計算を行う必要がある。よってここでは、等級が大きくなるにつれ輝度値がゼロに近づくことから、 $m = \infty$ として表現し尤度計算を行うことにする。すなわち、何も天体がないとした場合の尤度 $\hat{L}(x_1, y_1)$ は次のように定義できる。

$$\hat{L}(x_1, y_1) = \sum_{n=1}^3 g_n(x_n, y_n; v, \infty) \quad (10)$$

式(10)の計算をすべての位置について行うことにより、何も天体がないと想定した場合の二次元的な尤度分布 $\hat{L}(x, y)$ を得る。これを用いて、尤度増加率 $I(x, y)$ を次のように定義する。

$$I(x, y) = \frac{\hat{L}(x, y) - L(x, y)}{\hat{L}(x, y)} \quad (11)$$

いま、 $L(x, y)$ 、 $\hat{L}(x, y)$ ともに正ではないため、 $L(x, y) > \hat{L}(x, y)$ のとき $I(x, y)$ は正、逆の場合には負となる。ここでは、移動天体が存在する場合(すなわち $L(x, y) > \hat{L}(x, y)$) に興味があるので、負の値はゼロにする。

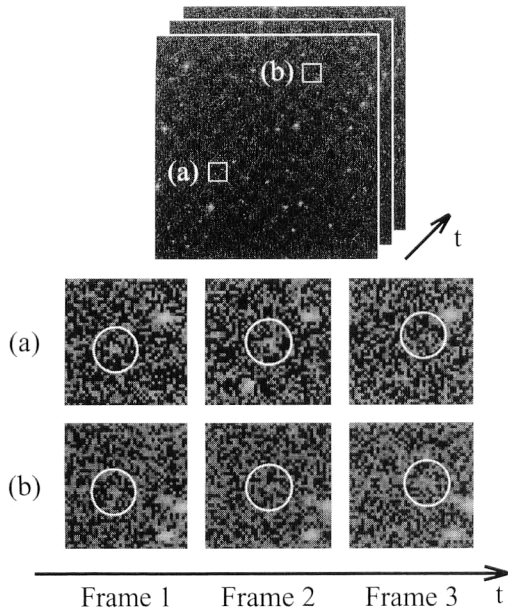


Fig. 3 Observed images for experiment 1. The upper part shows full images. The lower part shows two series of enlarged partial images in regions (a) and (b). The exposure time is 150 [s] for all images. The exposure intervals between frames 1 and 2 and between frames 2 and 3 are 1186 [s] and 1101 [s], respectively.

これにより、 $I(x,y)$ の値域は 0 から 1 までとなる。この値は、移動天体が存在しないと想定した場合と比較して、存在すると想定した場合の尤度の増加率を表しており、値が大きいほどその位置に移動天体が存在する可能性が高いことを意味する。 $I(x,y)$ を用いると、それを二次元画像として視覚化し、画素値の大小を比較して移動天体検出を行うことができるようになる。

6. 実験

ここでは実観測画像に対して本手法を適用し、性能および有効性を検証する。

6.1 実験 1

観測画像を Fig. 3 に示す。これは美星スペースガードセンター 25 cm 反射望遠鏡に冷却 CCD カメラを取り付けて撮像した画像である。この画像は階調が 8 bit で、サイズは 512×512 画素であり約 $19' \times 19'$ の視野に相当する。画像中には、18.6 等級 (Fig. 3(a)) および 18.9 等級 (Fig. 3(b)) の既知小惑星が 2 つ存在している。これらの画像を交互に表示 (ブリンク) させ、移動天体検出を試みたが、小惑星を判別することは非常に難しい明るさであった。なおここに示した等級は過去のデータからの予測値であり、実際には ± 1 等級程度の誤差があると考えられる。またこれらの画像はガンマ値を調整し、暗い部分を強調して表示している。

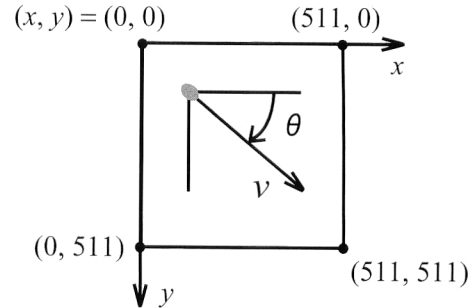


Fig. 4 The coordinate system. A parameter θ specifies the direction of the velocity v .

Table 1 Experimental parameters.

Parameter	Range	Interval
x [pixel]	0-511	1
y [pixel]	0-511	1
u [arcsec/min]	0.50-0.80	0.05
θ [deg]	0-359	1
m	16.0-21.0	0.5

実験に用いた座標系を Fig. 4 に、パラメータを Table 1 に示す。ここでは、移動天体速度 v の方向を角度 θ (Fig. 4)、速度の大きさには u を用いて表現する。 u と θ のパラメータ範囲は、観測対象と観測条件から決定できる。たとえば、メインベルト (火星と木星の間にある小惑星帯) の小惑星やエッジワース・カイパーベルト天体を観測する場合には、移動方向や移動量がほぼ決まっているので、パラメータ範囲を比較的狭い範囲に設定することができる。それに対して、地球に接近してくる小惑星などの場合は、さまざまな移動方向と移動量をもっているため、パラメータ範囲をかなり広く設定しなければならない。このとき u の範囲については、検出したい小惑星の速度に合わせてユーザーが設定することになる。ここでの実験に用いた画像に含まれる小惑星はメインベルトにある小惑星なので、移動方向および移動量はほぼ一定である (Fig. 3 および Fig. 7 を参照)。このため本来は、 u と θ の範囲は Table 1 の範囲よりも狭く設定できる。しかしここでは手法の性能調査のため、あえて広く設定した。パラメータの範囲を広く設定したほうがノイズを拾いやすく、厳しい実行条件である。

等級の範囲についてはユーザーが検出したい移動天体の明るさを設定する。また刻み幅については、比較的粗めに設定しておき、可能性のある場所のみ刻み幅を細かくして計算し直すのが効率を考えた場合望ましい。このとき、どの程度まで粗くとれるかについては、実験を重ねて決定しなければならない。筆者らのこれまでの経験では、刻み幅 0.5 であれば検出漏れはない。

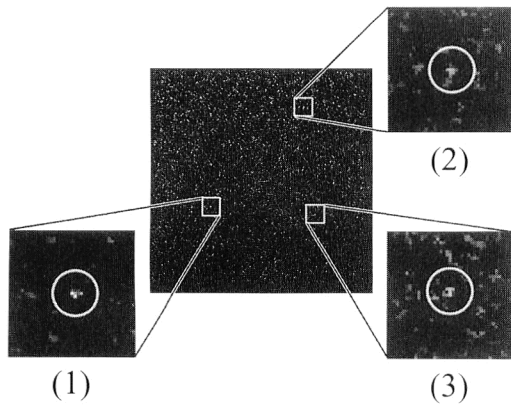


Fig. 5 Detection results from Fig. 3. Numbers (1), (2) and (3) correspond to those of detection order in Table 2 (Experiment 1).

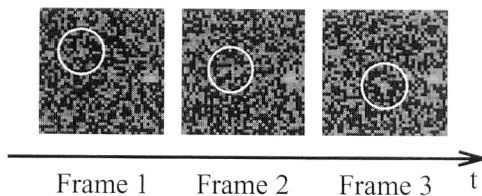


Fig. 6 Observed images with the same region as Fig. 5 (3). A noise pattern similar to that of a moving object appears in frame 3.

6.2 実験 1 の結果と考察

Fig. 3 の画像に本手法を適用して得られた尤度増加率 $I(x,y)$ を Fig. 5 に示す。ここでは $I(x,y)$ の上位 3 つの移動天体候補を Fig. 5(1)~(3) に示す (図の通し番号 (1), (2), (3) が尤度増加率の大きいほうからの順位に相当する)。またその際に得られたパラメーターを Table 2 に示す。

尤度増加率の上位 2 つが、Fig. 3(a) および (b) の小惑星に対応しており、検出に成功していることがわかる。また Fig. 5(3) に対応する位置での観測像を Fig. 6 に示す。この移動天体候補は、Fig. 6 の Frame 3 に移動天体の輝度分布に似たノイズが発生したために出力されたと考えられる。しかし、こうしたノイズに対する応答は、尤度計算に用いる観測画像を 3 枚からさらに増やすことによって抑制することが可能であると考えられる。

6.3 実験 2

ここでは、別の観測画像 (Fig. 7) を用いて実験を行った。観測状況等は実験 1 と同様である。この画像中には、16.4 等級 (Fig. 7(a)), 17.4 等級 (Fig. 7(b)) および 19.2 等級 (Fig. 7(c)) の小惑星が存在している。Fig. 7(a) の小惑星は、目視による検出が可能なる明るさであるが、Fig. 7(c) は非常に暗く、目視ではノイズとの識別が難しい状態である。なお検出の際のパラメーターは実験 1 と同様で

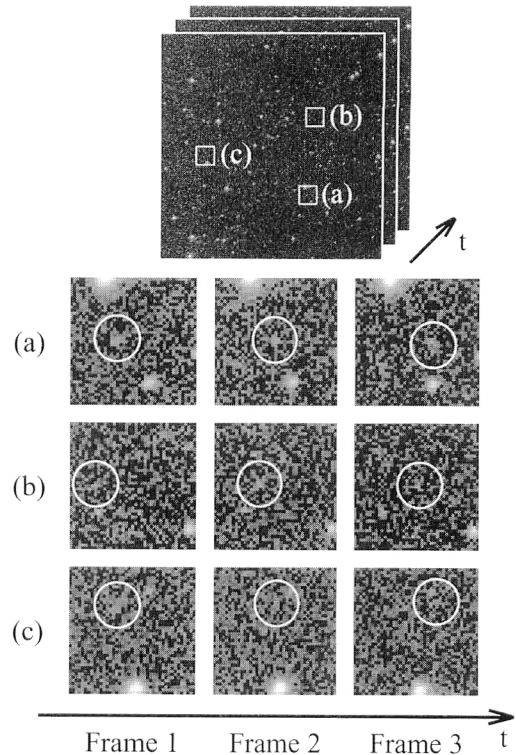


Fig. 7 Observed images for experiment 2. The upper part shows full images. The lower part shows two series of enlarged partial images in regions (a) and (b). The exposure time is 150 [s] for all images. The exposure intervals between frames 1 and 2 and between frames 2 and 3 are 1181 [s] and 1281 [s], respectively.

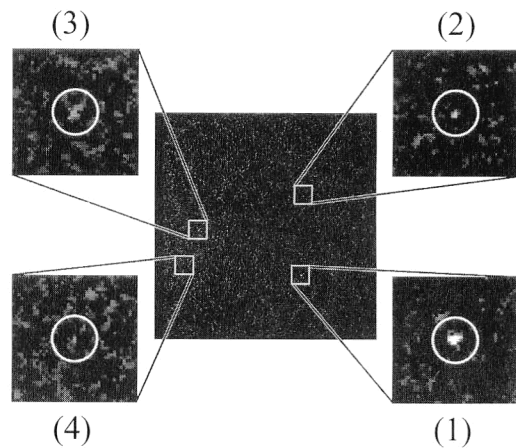


Fig. 8 Detection results from Fig. 7. Numbers (1), (2), (3) and (4) correspond to those of detection order in Table 2 (Experiment 2).

ある。

6.4 実験 2 の結果と考察

得られた尤度増加率 $I(x,y)$ を Fig. 8 に示す。ここでは $I(x,y)$ の上位 4 つの移動天体候補を Fig. 8(1)~(4) に、得られたパラメーターを Table 2 にそれぞれ示す。

実験 1 と同様に、尤度増加率の上位が小惑星成分に対応

Table 2 Experimental results.

	Detection order	$I(x, y)$	x [pixel]	y [pixel]	u [arcsec/min]	θ [deg]	m
Experiment 1 (Fig. 3)	(1)	0.3812	141	315	0.70	336	18.5
	(2)	0.2812	355	88	0.55	334	18.5
	(3)	0.2698	382	333	0.75	55	19.0
Experiment 2 (Fig. 7)	(1)	0.5821	336	366	0.55	5	17.5
	(2)	0.3622	341	186	0.75	356	18.0
	(3)	0.2868	100	265	0.65	346	18.0
	(4)	0.2696	69	346	0.65	128	18.0

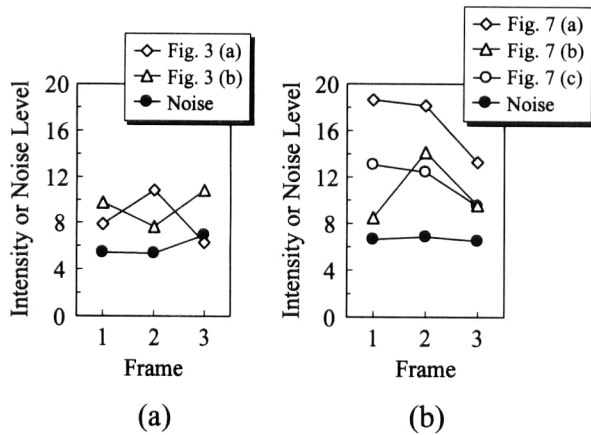


Fig. 9 Comparisons of the intensities of moving objects with noise level. Graphs (a) and (b) correspond to Fig. 3 and Fig. 7, respectively.

しており、検出に成功していることがわかる。また尤度増加率は、明るく検出しやすい小惑星ほど大きな値となることも確認できる。このため、得られた尤度増加率 $I(x, y)$ を移動天体検出の確からしさの評価値として用いることができると考えられる。しかしながら、暗い移動天体の尤度増加率の値は、ノイズのそれと近い値になってしまう。本手法を実用化するには、確実に移動天体であるといえる尤度増加率の値、または間違いなくノイズであるといえる尤度増加率の値を、空の明るさ・大気ゆらぎ・移動天体速度などの異なるさまざまな条件下の観測を通して、それぞれ見つけ出す必要がある。

6.5 ノイズレベルとの比較

ここでは、実験に用いた観測画像中のノイズレベルと移動天体が存在する領域の輝度レベルとを比較して本手法の性能を考察する。

まず画像のヒストグラムを求め、その最頻値をバックグラウンド値とする。次に、観測画像中の（任意に選んだ）星が存在しない領域中で、バックグラウンド値を基準にした画素値の標準偏差 σ を求め、それをノイズレベルと定義する。また、移動天体領域（大気ゆらぎによって広がった像領域）で画素値の平均を求め、それとバックグラウンド値との差を移動天体輝度レベルとした。観測画像 Fig. 3

および Fig. 7 に対してノイズレベルと移動天体輝度レベルを算出したグラフを、それぞれ Fig. 9(a), (b) に示す。

従来の移動天体検出法では、星像検出のために閾値処理が行われる。その際に重要となるのが適切な閾値の設定である。通常、ここで求めた σ の定数倍を閾値とするのが一般的である。Fig. 9(a) では Frame 3 において、Fig. 3(a) の移動天体輝度レベルがノイズレベルよりも低い値となっている。したがって閾値を σ という比較的小きな値に設定した場合でも、従来の移動天体検出法では、本手法で検出されたような暗い移動天体は候補にさえもあげられず検出不可能である。またノイズによる誤検出を防ぐため、閾値を 2σ に設定したとすると、Fig. 7(a) の小惑星以外は検出できないことがわかる。本手法ではノイズレベル付近の輝度レベルをもつ移動天体が存在したとしても、それを複数枚の画像にわたる統計処理をすることによって検出が可能になっている。

7. ま と め

本論文では、尤度評価を用いた微弱な移動天体検出法を提案した。本論文で対象としている暗い移動天体の場合、観測で得られる画像ではノイズの影響が相対的に大きくなる。このため本手法では、得られた画素値分布をそのまま検出に用いるのではなく、確率的に解釈を行った。そして移動天体像の空間的広がり、観測時刻の異なる複数枚の画像にわたって統計処理を行い、それを尤度分布に変換し移動天体の検出を試みた。

本手法の観測画像への適用結果では、従来法では検出が困難であると考えられる暗い移動天体を検出することに成功している。また得られる尤度増加率は、移動天体検出の確からしさの指標として用いることが可能である。この値を提示することによって、観測者を支援することができる。

今後、さまざまな条件下で本手法を適用し、限界等級などの性能を明らかにする必要がある。

本研究を進めるにあたり、多大なご協力を頂いた、宇宙

科学研究所吉川真助教授，ならびに国立天文台磯部琇三助教授に深く感謝いたします。また日頃議論していただき、北海道大学工学研究科馬場直志教授に深く感謝いたします。

文 献

- 1) K. E. Edgeworth: "The origin and evolution of the solar system," *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **109** (1949) 600-609.
- 2) G. P. Kuiper: "On the origin of the solar system," *Astrophysics*, ed. J. A. Hynek (McGraw-Hill, New York, 1951) pp. 357-424.
- 3) 板垣和幸，三浦則明：“修正 Radon 変換の小惑星検出への応用”，*光学*, **30** (2001) 187-193.
- 4) H. F. Levison and M. J. Duncan: "A search for protocomets in the outer regions of the solar system," *Astron. J.*, **100** (1990) 1669-1675.
- 5) D. L. Rabinowitz: "Detection of earth-approaching asteroids in near real time," *Astron. J.*, **101** (1991) 1518-1529.
- 6) M. Irwin, S. Tremaine and A. N. Zytzkow: "A search for slow-moving objects and the luminosity function of the Kuiper belt," *Astron. J.*, **110** (1995) 3082-3092.
- 7) C. Trujillo and D. Jewitt: "A semiautomated sky survey for slow-moving objects suitable for a pluto express mission encounter," *Astron. J.*, **115** (1998) 1680-1687.
- 8) グッドマン，J. W.：グッドマン統計光学，第1版（武田光夫訳，丸善，1992）pp. 89-102.