

修正 Radon 変換の小惑星検出への応用

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

Application of Modified Radon Transform to Asteroid Detection

Kazuyuki ITAGAKI and Noriaki MIURA

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

We propose a method using modified Radon transform for detecting faint asteroids that move between bright stars. An asteroid trail appears on collinear positions in images observed at different times with a same field of view. However, it is difficult to detect such an asteroid trail with the conventional Radon transform because of the influence of bright stars. We, therefore, modify the conventional Radon transform so that Radon transform values for asteroids become larger than those for bright stars. An advantage of our technique is that values of the modified Radon transform are available for the index of assurance in asteroid detection. We apply the technique to observed asteroid images, and show that our method is capable of clearly detecting asteroids.

1. はじめに

近年、小惑星の地球衝突問題が大きな関心を集めている(例えば、The Spaceguard Foundation home page: <http://spaceguard.ias.rm.cnr.it/SGF/>)。そのため、現在世界各国の天文台で小惑星の検出が精力的に行われている。小惑星のサーベイ観測では、広視野の画像が大量に得られるため、小惑星検出の自動化は不可欠である。

従来の小惑星自動検出方法の発想はどれも類似している¹⁻⁴⁾。まず、適当に時間をおいて同一視野を観測した数枚の画像から各画像で星像を検出し、それらの座標値を記録する。このとき、小惑星は画像中において移動しているため同じ位置には存在していない。そこで、記録された座標値を比較して位置がずれている星像を検出し、それを小惑星候補として出力する、というものである。これらの手法の問題点として、閾値処理をするため暗い天体を落としてしまう危険性があることと、検出された天体が小惑星としてどれだけ確からしいのかという指標がないことなどが挙げられる。このため観測者による確認作業が必要となる。そこで本研究では、小惑星検出の確からしさを定量的に評価し、それを提示することで観測者を支援する新しい

方法を提案する。

本研究では、同一視野を時間間隔をあけて観測した3枚の画像を使用することを想定する。小惑星の視野速度に対して、適切な露光時間、および撮影間隔で観測することにより、画像中での小惑星は同一直線上に飛び飛びになって現れる。したがって、小惑星を検出することは、画像中における小惑星軌跡の直線の方程式を導き出すことに相当している。パターン認識の分野では、そのような飛び飛びの直線を検出するのに最適な方法として Hough 変換⁵⁾が知られている。Hough 変換は Radon 変換⁶⁾の特別な場合であり^{7,8)}、Radon 変換を用いても直線検出が可能であると考えられる。そこで、ここでは直線の式を求めめるため、Radon 変換を用いることにする。しかしながら、観測画像は小惑星よりも明るい星を多数含んでいるため、通常 Radon 変換を用いた直線検出では、明るい星からの Radon 変換への寄与が大きく、小惑星検出は非常に難しい。

このため本手法においては、まず適切な画像の前処理を行い、画像中における明るい星の影響を極力取り除く。次に残った明るい星やノイズ成分よりも、小惑星成分に対して大きな Radon 変換値を与えるように、通常 Radon 変換の修正を行う。これを以降、修正 Radon 変換とよぶ。

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

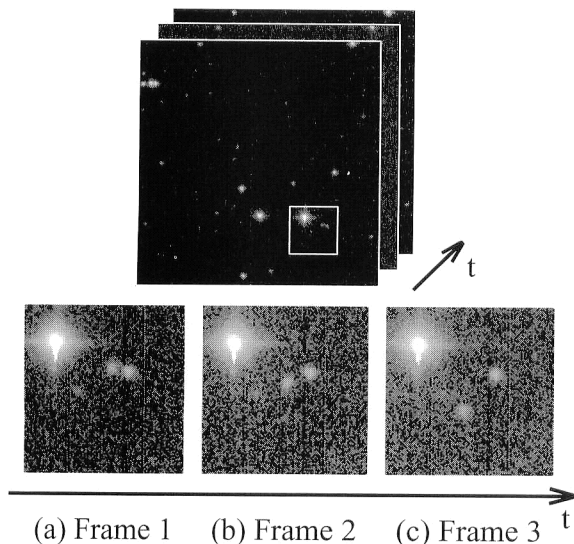


Fig. 1 Observed images: full images (upper) and partial images including an asteroid (lower). The exposure times of three images are 60 [s]. The exposure time intervals between (a) and (b) and between (b) and (c) are 51 and 140 [s], respectively.

また同時に、Radon 変換値が小惑星らしさの指標となる評価方法を提案する。なおここでは、想定した小惑星の速度・位置から求められる理想的な小惑星軌跡と、実際の観測像から得られるものとの類似性を小惑星らしさと表現することにする。

2. 観 測

本研究で使用する画像を Fig. 1 に示す。画像データは 8 bit の 512×512 画素のサイズであり、これは約 $5' \times 5'$ の視野に相当している。これらは木曾天文台 105 cm シュミット望遠鏡に冷却 CCD カメラを取り付けて観測したもので、同一視野を異なる時刻に撮影したものである。なお、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たものである。ここでの小惑星の、その左上に存在する明るい星に対する強度比は、およそ 100 分の 1 (等級差では 5 等) である。

今回使用した画像の画素値には、星が写っていない空の領域の明るさに相当するバイアス値が含まれている。この値は観測時刻により変動するため、あらかじめゼロにする必要がある。この処理は、星のない領域が視野の大部分を占めることから、画像の最頻値を求め、それを画像全体から引くことで実現できる。その際、負となる部分はノイズによって生じていると考えられるため、強制的にゼロとする。これにより画像間の引き算 (3 章 2 節 [Step 2]) を行う際、結果として得られる画像に、この負のノイズが混入することを防ぐことができる。また、各画像は望遠鏡の

ガイドエラーなどで微妙にずれている。ここでは各画像間の相関からずれを検出し、あらかじめ画像をシフトする。

3. 前 処 理

3.1 星の除去方針

観測画像 (Fig. 1) 中には小惑星を検出する際、支障となる星々が多数存在している。小惑星はこれらの星よりもはるかに暗いので、明るい星を除去してからでなければ小惑星を検出することは難しい。

ここで注目すべきことは、画像中では小惑星以外は移動していないということである。そこでこのことを利用した、明るい星の除去方法を以下で提案する。

3.2 星の除去方法

ここでは 3 枚の画像を処理することによって、明るい星の除去を行い、1 枚の合成画像を作成する。画像中では小惑星以外移動していないため、前後の画像の引き算を行うことにより移動していない星は同じ位置にあるため打ち消しあい、小惑星だけが抽出される。具体的には以下のような手順となる。

[Step 1] 3 枚の各画像を、 $I_1(x, y)$, $I_2(x, y)$, $I_3(x, y)$ とする。

[Step 2] 前後の画像の引き算を行った結果をそれぞれ、 $S_1(x, y)$, $S_2(x, y)$, $S_3(x, y)$ とする。

$$S_1(x, y) = I_1(x, y) - I_2(x, y)$$

$$S_2(x, y) = I_2(x, y) - I_3(x, y) \quad (1)$$

$$S_3(x, y) = I_3(x, y) - I_1(x, y)$$

[Step 3] 3 枚の差分画像の各画素値をそれぞれ比較し、その中の最大値を出力画素値とする。

$$\text{Output}(x, y) = \text{Max}[S_1(x, y), S_2(x, y), S_3(x, y)] \quad (2)$$

このようにして、3 枚の画像から、小惑星軌跡を得ることができる。しかしながら、式(1)、式(2)では 3 枚の差分画像の各画素値がすべてゼロでない限り、出力画素値がゼロになることはない。したがって、出力画像のいたるところで、わずかながら値をもっていることになる。このようなノイズがあることによって、小惑星検出の計算量が増大してしまう。閾値処理を行ってこれらの値を切り捨てるアプローチもあるが、前述したように小惑星は非常に暗く、小惑星成分も消し去られてしまう可能性が高い。そこでここでは、出力画像における小惑星像の広がりに基づいたノイズの除去を行った。

今、出力画像における小惑星像の広がりを 3×3 画素以上であると想定する。Fig. 2 の右上の図は、 $\text{Output}(x, y)$ の画素値が S_1 , S_2 , S_3 のいずれからのものであるのかを

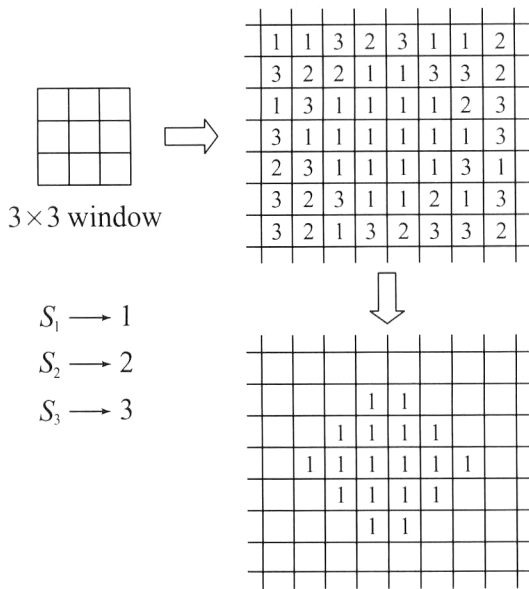


Fig. 2 Extraction of cluster.

模式的に示した図である。この画像上で、 3×3 のウィンドウを走査し、そのウィンドウ内の画素値がすべて同じ差分画像 (S_1 , S_2 , または S_3) から得られている点を検出する。その点を起点にして4連結で膨張処理を行い、 3×3 以上の連結成分を抽出する。このようにして得られた連結成分のみ出力画像に残し、それ以外はすべて広がりのないノイズであるとして除去を行った。

これらの方法を観測画像に適用した結果を Fig. 3 に示す。なおこの画像は、ガンマ値を調整し暗い部分を強調して表示したものである。

3.3 星の除去結果に関する考察

得られた画像には、多くの除去しきれなかった部分が残っており明るい星の影響が取り除かれていない。これは大気ゆらぎが原因で、観測時刻の異なる画像間では画素値が同一にならないため、引き算を行った際に残差が生じてしまうためである。このような残差がなくなれば、通常の Radon 変換法でも容易に小惑星を検出できる。しかしながら注意しなければならないことは、このようなノイズの除去を追及していくにしたがって、暗い小惑星をも除去してしまう可能性があることである。したがって、本研究での星の除去処理はこれで十分とし、修正 Radon 変換による直線検出の際に、そのようなノイズの影響を受けにくい方法を提案することにする。

4. 直線検出

4.1 通常の Radon 変換を用いた直線検出

一般に、 x - y 空間の直線の式は式(3)で与えられる。

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (3)$$

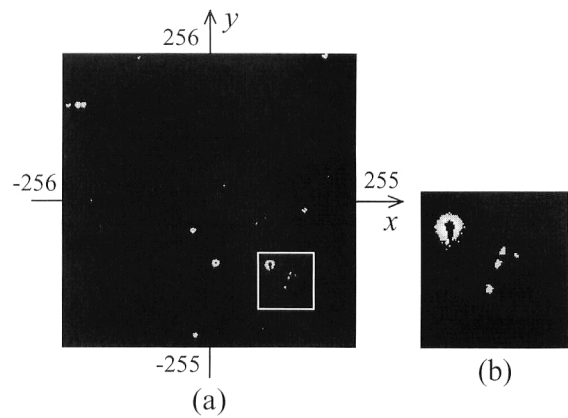


Fig. 3 Removal result of stars: (a) full image, and (b) partial image with an asteroid trail.

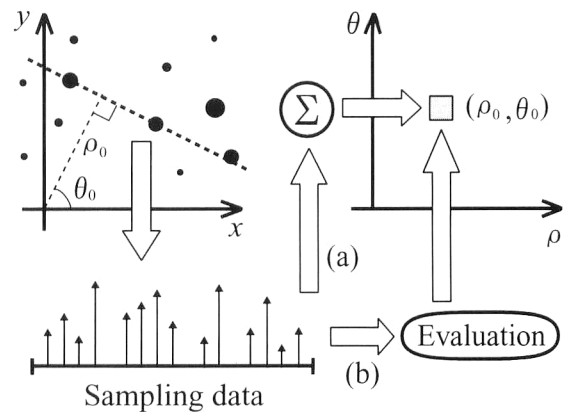


Fig. 4 Radon transform. Paths (a) and (b) correspond to conventional and modified Radon transforms, respectively.

ここで ρ は、原点から直線までの距離で、 θ は直線の垂線と x 軸とのなす角度である。これを用いて、 x - y 空間での分布 $f(x, y)$ の Radon 変換は式(4)で定義される。

$$\text{Radon}(\rho, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - \rho) dx dy \quad (4)$$

ここで、 $\delta(\cdot)$ は Dirac のデルタ関数である。すなわち ρ - θ 空間の1点の値というのは、その ρ と θ から決定される x - y 空間での直線上のサンプル点(画素値)の総和にほかならない (Fig. 4, 経路 (a))。

通常の Radon 変換を用いた直線検出法として考えられるのは、Hough 変換の場合と同様に、 ρ - θ 空間において最大値をもつセルのパラメーター ρ と θ を検出し、 x - y 空間での直線の方程式を求めるといものである。しかしながら、この方法を小惑星検出に直接適用しても良好な結果を得ることは難しい。なぜなら、単に Radon 変換をした場合、明るい星に対応する値の大きな画素値を ρ - θ 空

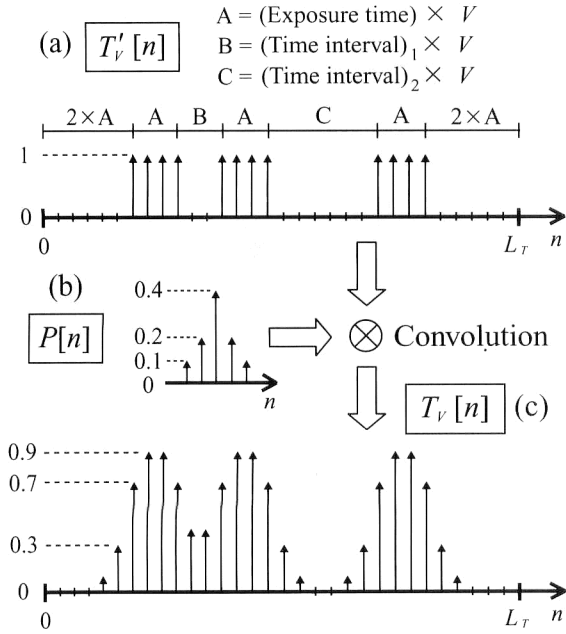


Fig. 5 Template for asteroid detection: (a) binary template, (b) supposed point spread function, and (c) template under the consideration of atmospheric turbulence, which is convolution of (a) and (b).

間のセル値に加えることによって、それらが検出されてしまう可能性が非常に高くなるためである。また、小惑星軌跡は非常に暗く短い線分であるため、小惑星に対応する Radon 変換値が周りと比べてあまり大きくならないのである。ゆえに小惑星検出に関していえば、通常の Radon 変換を適用することは得策ではない。

4.2 小惑星検出のための Radon 変換の修正

前節で述べた問題を克服するためには、Radon 変換の対象となる点の小惑星なのか、あるいは単なるノイズであるのかを区別し、それを Radon 変換値に反映させるようにすればよい。

すなわち、単に直線上のサンプル点の総和をとる (Fig. 4, 経路 (a)) のではなく、小惑星と思われる点があるならば大きい値をもつように評価し、その値を ρ - θ 空間のセル値とすることにより、小惑星らしさを評価した Radon 変換値を得ることが可能になる (Fig. 4, 経路 (b))。ここで直線上のサンプリング間隔は 1 とし、点の値は最近傍 4 点を用いた線形補間により求めることにする。

次節では、この直線上のサンプリングデータに施した小惑星評価方法を提案する。

4.3 小惑星像のテンプレート

前節の方法によって得られた、直線上のサンプリングデータを $D[k]$ ($0 \leq k \leq L_s$) とする。この中に小惑星が含まれているか評価するため、小惑星のテンプレートを作成

し、それと $D[k]$ との類似性を評価する。通常、露光時間および撮影間隔は観測者が指定するものであり既知であるので、小惑星速度 V をパラメータで表現することにより、その速度に応じたテンプレート T'_v を生成することができる (Fig. 5(a))。このテンプレートは長さ L_T で、小惑星の値がある点は +1、その他の点は 0 の値をもつ。

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、本来の小惑星像は小惑星の存在する点を中心になだらかなピークを形成していると考えられる。したがって、Fig. 5(a) の T'_v のように、矩形のものをを用いたのでは、テンプレートの山の端の部分で高い誤差が生じてしまう。ここでは、大気ゆらぎの点像分布関数 P を Fig. 5(b) に示すような、擬似ガウス関数型に仮定し、それと T'_v とのコンボリューションを求めることにより得られる T_v を、大気ゆらぎを考慮した小惑星像のテンプレートとして使用することにした。実際の応用にあたっては、 P の形は観測時の大気ゆらぎ状態を測定することにより、容易に決定できる。

4.4 小惑星の評価方法

(1) 通常の Radon 変換

単にサンプリングデータ $D[k]$ の総和を求めると、本来の Radon 変換に相当する。

$$\text{Radon}(\rho, \theta) = \sum_{k=0}^{L_s} D[k] \quad (5)$$

これは、以下の提案方法との比較のため使用する。

(2) 正規化相互相関を用いる方法

類似性の尺度としては、一般に正規化相互相関がよく用いられる。ここでも、以下のような手順で正規化相互相関を利用できる。

[Step 1] D 上での T_v の始点が k であるときの、正規化相互相関を評価値 $R_1(\rho, \theta, k, V)$ とする。

$$R_1(\rho, \theta, k, V) = \frac{\sum_{n=0}^{L_T} D[k+n] \times T_v[n]}{\sqrt{\sum_{n=0}^{L_T} (D[k+n])^2 \times \sum_{n=0}^{L_T} (T_v[n])^2}} \quad (6)$$

[Step 2] 始点 k と小惑星速度 V のパラメータをそれぞれ順に変えていき、そのときに応じた $R_1(\rho, \theta, k, V)$ を求め、その中の最大値を Radon 変換値とする。

$$\text{Radon}(\rho, \theta) = \text{Max}_{k,V} [R_1(\rho, \theta, k, V)] \quad (7)$$

(3) 提案する方法

類似性の尺度として、小惑星像の平均ピーク高に合わせた T_v を作成し、それと D の絶対値誤差の累積値を評価する。これは次のような手順で計算する。

[Step 1] T_V がゼロより大きな点 (すなわち, 小惑星が存在すると想定される点) に対応する D の総和 A を求める.

$$A(\rho, \theta, k, V) = \sum_{n=0}^{L_T} D[k+n] \quad \text{if } T_V[n] > 0 \quad (8)$$

[Step 2] 小惑星像の平均ピーク高に合わせた T_V と, D との誤差の累積値 B を求める.

$$B(\rho, \theta, k, V) = \sum_{n=0}^{L_T} \left| D[k+n] - \left(A(\rho, \theta, k, V) / \sum_{n=0}^{L_T} T_V[n] \right) T_V[n] \right| \quad (9)$$

[Step 3] D での始点が k で, 小惑星速度が V のときの評価値を $R_2(\rho, \theta, k, V)$ とする.

$$R_2(\rho, \theta, k, V) = (A(\rho, \theta, k, V) - B(\rho, \theta, k, V)) / A(\rho, \theta, k, V) \quad (10)$$

[Step 4] 始点 k と小惑星速度 V のパラメータをそれぞれ順に変えていき, そのときに応じた $R_2(\rho, \theta, k, V)$ を求め, その中の最大値を Radon 変換値とする.

$$\text{Radon}(\rho, \theta) = \text{Max}_{k, V} [R_2(\rho, \theta, k, V)] \quad (11)$$

本方法では, T_V と D が一致していなければ, その分誤差として評価値を下げることになる. このため, 入力データのテンプレートからの形の逸脱に対して相互相関より敏感に反応する. 逆に相互相関では, T_V と D が多少形が異なっても比較的高い評価値が出力されてしまい, 誤った小惑星候補が現れてくる可能性がある.

なお, 修正 Radon 変換法 (2), (3) での Radon 変換値の最大値は 1 であり, 1 に近いほど類似性が高く, 小惑星である可能性が高いといえる. よって, この値を小惑星らしさの指標として用いることができる.

5. 実験

5.1 実験 1

Fig. 3 の画像に, 前章で述べた Radon 変換法 (1), (2), (3) を適用した結果を Fig. 6 に示す. ここでの ρ - θ 空間

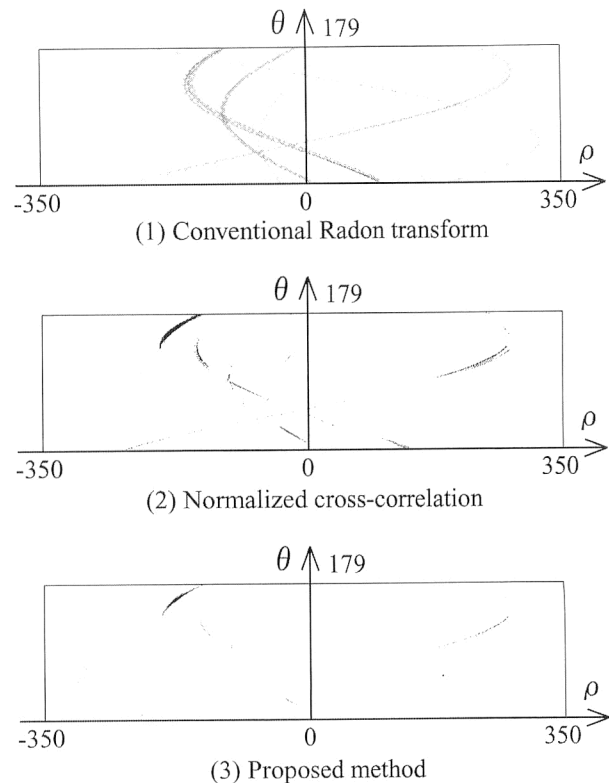


Fig. 6 Radon transform results of Fig. 3.

でのサンプリング間隔はそれぞれ, $\Delta\rho=1$, $\Delta\theta=1$ である. これは画像中のすべての画素を走査するのに十分な値となっている. また小惑星速度 V [pixels/min] は $-20 \leq V \leq 20$ の範囲において, 0.5 刻みで増加させ, サンプリングデータ $D[k]$ の刻みは $\Delta k=1$ とする. ここでは, ρ - θ 空間で最大値を与えるパラメーター ρ と θ から, 小惑星軌跡の直線を求める. その際に得られたパラメーターおよび Radon 変換値を Table 1 に示す. また, 求められた直線を小惑星軌跡に照らし合わせた結果を Fig. 7 に示す.

5.2 実験 1 の考察

通常の Radon 変換法では, Fig. 7(1) からわかる通り, 小惑星軌跡の検出は失敗している. これは通常の Radon 変換法では, 直線上の画素値の総和が, ρ - θ 空間の 1 点に対応しており, そのため直線上に大きな値がいくつか存

Table 1 Experimental results: (1) conventional Radon transform, (2) the method using normalized cross-correlation, and (3) the proposed method.

	Method	Radon transform value	ρ [pixels]	θ [degs]	k	V [pixels/min]
Experiment 1 (Fig. 6)	(1)	3.167×10^5	68	15	—	—
	(2)	0.9809	-170	162	98	-5.0
	(3)	0.8001	-174	160	99	-5.0
Experiment 2 (Fig. 9)	(1)	1.225×10^4	-126	90	—	—
	(2)	0.9514	43	51	205	-5.0
	(3)	0.6738	43	51	205	-5.0

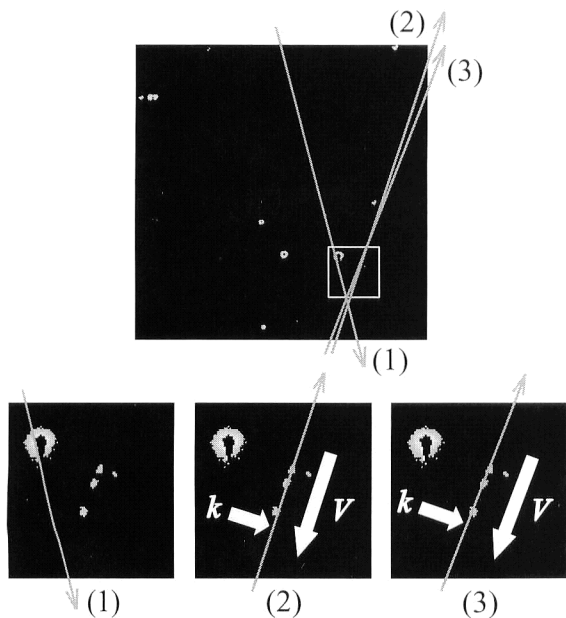


Fig. 7 Lines detected by (1) conventional Radon transform, (2) the method using normalized cross-correlation, and (3) the proposed method.

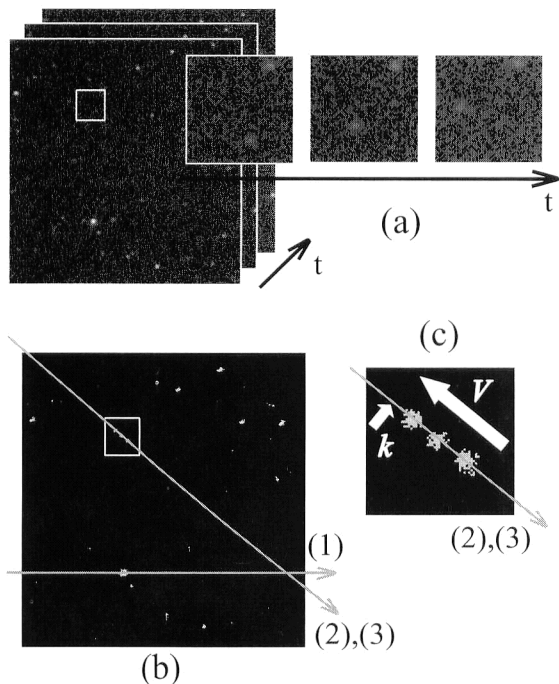


Fig. 8 Another example of asteroid detection: (a) observed images, (b) result of stellar removal and line detection, and (c) partial image of (b). The exposure times of three images are 30 [s]. The exposure time intervals are 180 [s]. In (b) and (c), methods used are (1) conventional Radon transform, (2) the method using normalized cross-correlation, and (3) the proposed method.

在していると、Radon 変換値が大きくなるためである。Fig. 3 には、明るい星の影響が残っているため、この方法では小惑星を検出することは難しい。

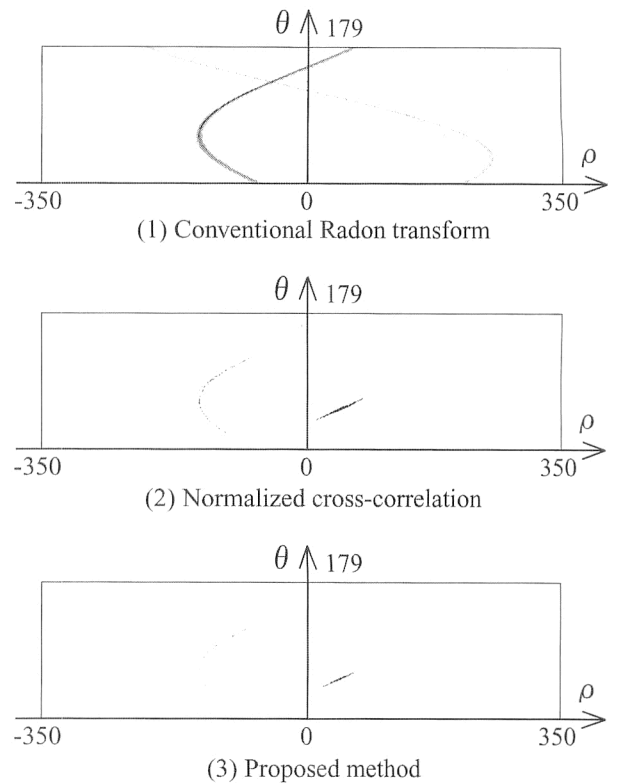


Fig. 9 Radon transform results of Fig. 8 (b).

一方、修正 Radon 変換法 (2), (3) では、Fig. 7(2), (3) のように小惑星軌跡を検出することに成功している。また、求めた直線上での小惑星の存在する位置 k 、および小惑星速度 V も求めることができる。

ただし、相互相関を用いた Fig. 6(2) では、Fig. 6(3) と比べて、その他の小惑星候補にあたる箇所がいくつか現れている。これは前述したように、相互相関では多少形が変形しても比較的高い数値を示すためである。

5.3 実験 2

ここでは、別の観測画像 (Fig. 8(a)) を用いて実験を行った。この画像は、美星スペースガードセンターの 50 cm 望遠鏡で撮影された画像で、8 bit, 512×512 画素である。ここで、画像中における最も明るい星に対する小惑星の強度比はおよそ 30 分の 1 (等級差では 3.7 等) である。Fig. 8 (b) は星の除去後の画像である。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。Radon 変換結果を Fig. 9 に、得られたパラメーターおよび Radon 変換値を Table 1 に示す。

5.4 実験 2 の考察

実験 1 と同様に、通常の Radon 変換法 (1) では、小惑星軌跡は検出できていないが、修正 Radon 変換を用いた場合は検出に成功している。ここでの Radon 変換値は実験 1 と比較して低い値となっている。これは、小惑星が非

常に暗いためノイズの影響をより強く受けているためと考えられる。

6. ま と め

本論文では、小惑星検出のため Radon 変換を修正した直線検出法を提案した。本手法の最大の特徴は、従来の小惑星検出法にはなかった小惑星らしさの定量的な評価を Radon 変換値として観測者にもたらすことができることと、星の除去の際に閾値処理をしていなく、暗い小惑星を落とす危険性がない点である。

本手法の観測画像への適用結果では、画像中の明るい星の影響により、通常 Radon 変換では検出することができなかった小惑星軌跡を検出することに成功していることが確認できる。

本研究を進めるにあたり、貴重な観測データを提供していただいた、国立天文台磯部瑋三助教授、ならびに日頃議論していただく、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) 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.
- 2) D. L. Rabinowitz: "Detection of earth-approaching asteroids in near real time," *Astron. J.*, **101** (1991) 1518-1529.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) P. V. C. Hough: U. S. Patent No. 3069654 (1962).
- 6) A. Rosenfeld and A. C. Kak: *Digital Picture Processing*, 2nd ed. (Academic Press, Orland, 1982).
- 7) G. R. Gindi and A. F. Gmitro: "Optical feature extraction via the Radon transform," *Opt. Eng.*, **23** (1984) 499-506.
- 8) 松山隆司, 興水大和: "Hough 変換とパターンマッチング," *情報処理*, **30** (1989) 1035-1046.