

微小スペースデブリ検出のための地上観測技術

柳 沢 俊 史

Ground-Based Observational Technologies for Faint Space Debris

Toshifumi YANAGISAWA

JAXA is developing analysis technologies “the stacking method” and “line-identifying technology” which are able to detect faint GEO objects that are not on the catalog provided by U.S. These technologies have been shown to be useful for detection of faint objects, so far. However, the stacking method has the disadvantage that is time-consuming to detect objects whose movements are unpredictable. In order to overcome this, a new algorithm and a FPGA board system are being developed. In this paper, details of the technologies are described.

Key words: space debris, optical observation

1957年のスプートニクの打ち上げ以来、人類は多くの人工物体を宇宙空間に放出しており、その数は年々増加している。スペースデブリといわれるこれらの人工物体や衝突や爆発によって発生した無数の破片は、人類の宇宙活動や運用中の人工衛星に深刻な影響を及ぼす。現在、1 mm以上のサイズのデブリは約400万個存在すると考えられ、そのうち軌道のわかっているものは1万数千個程度である。より多くのデブリを検出、カタログ化することが急務である。

CCD画像中の雑音に埋もれた微弱な信号を検出する技術は、これまで不可能であった微小サイズのスペースデブリ、小惑星等の検出を可能にするため、スペースデブリ問題の解決に大きく貢献するはずである。宇宙航空研究開発機構(JAXA)は、未知スペースデブリの自動検出、軌道決定、観測の各技術の向上を目指した地上観測施設を2006年11月に長野県入笠山に設置し、各種技術開発に従事している。特に、この観測施設の口径35 cmの望遠鏡から得られるCCD画像を利用した、微小デブリ検出を目的とした画像処理技術の開発を重点的に行っている。

われわれは微小デブリ等移動物体検出用の画像処理法として、「重ね合わせ法」「線分検出技術」を開発している。重ね合わせ法は静止デブリのような移動物体の検出に適し

ており、小惑星や彗星の検出にも有効である。重ね合わせ法では、数十枚から数百枚に及ぶ多数のCCD画像を利用し、移動物体の動きに合わせた画像の切り取りを行い、切り取られたすべての画像の中央値画像を作成する。この過程により恒星の影響を除去し、1枚のCCD画像では検出が不可能な非常に暗い移動物体の検出が可能になる¹⁾。線分検出技術は10数枚の画像から直線状に移動する物体を検出する。重ね合わせ法ほど暗い物体の検出はできないが、解析時間がかからないという利点がある。

第1章において、重ね合わせ法の詳細について述べる。われわれはこの手法の有効性を確かめるため、小惑星の試験観測を実施した。第2章において、小惑星の試験観測とその結果、およびこの手法の可能性を述べる。第3章においてはこの手法に関して現在進めている、解析時間短縮のための研究開発について紹介する。第4章において線分検出技術について説明する。

1. 重ね合わせ法

静止デブリ、小惑星、彗星は天球上を低速で移動している。例えば、静止デブリは地上の観測者に対してほぼ静止しているため、1時間に約15°天球上を移動する。また、メインベルト小惑星は、1日に約15′移動する。

宇宙航空研究開発機構(〒182-8522 調布市深大寺東町7-44-1) E-mail: yanagisawa.toshifumi@jaxa.jp

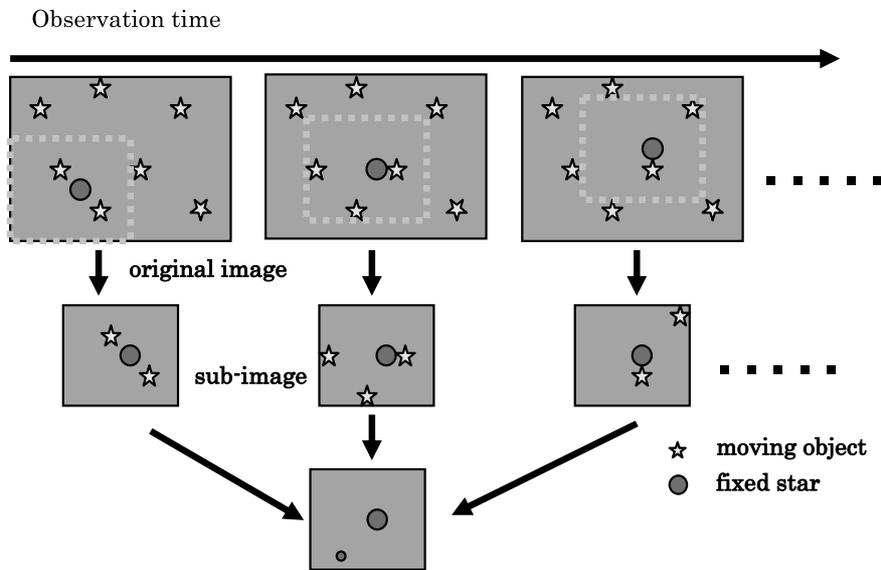


図1 重ね合わせ法.

通常の光学望遠鏡を用いた静止デブリの観測は、望遠鏡を固定し、CCDカメラによる短時間露出(数秒)の撮影を行い、画像中の点源を静止デブリとして探索する。この際、恒星は線像を形成している。暗い静止デブリを検出するために露出時間を延ばすと、恒星による線像が画像上を覆い、静止デブリの検出を妨げる。また、通常の光学望遠鏡を用いた小惑星等の観測は、ある時間間隔をおいた天球上の同位置の CCD 画像数枚を撮影し、恒星の間を移動していく移動天体を探索する。小惑星等は天球上を移動してしまうため、露出時間は5分程度が限界である。

これらの観測法は、1枚の画像における検出限界以下の暗い移動天体を検出することは不可能である。重ね合わせ法は多数の CCD 画像を使用し、画像1枚における検出限界以下の移動天体の検出を可能にする。図1に示すように、多数の CCD 画像から移動天体の動きに合わせた画像を切り取ってくる。その後、すべての切り取り画像の中央値画像を作成する。この過程において、移動天体からの光子はすべての切り取り画像上の同じ画素に蓄積される。また、恒星は切り取り画像上では移動しているため、中央値画像を作成することにより、ほぼ完全に除去することができる。図2(a)は CCD 画像1枚の一部分である。図2(b)は同じ領域の40枚の画像に対し重ね合わせ法を実行した際の最終画像で、小惑星が検出されている。図2(a)中の点線で示す円内に小惑星が存在するはずであるが、確認は不可能である。一方、図2(b)においては小惑星が明確に認識され、恒星は完全に除去されている。図3に重ね合わせた CCD 画像の枚数に対する重ね合わせ後の画像における背景雑音の変化を示す。横軸に重ね合わせた CCD 画像

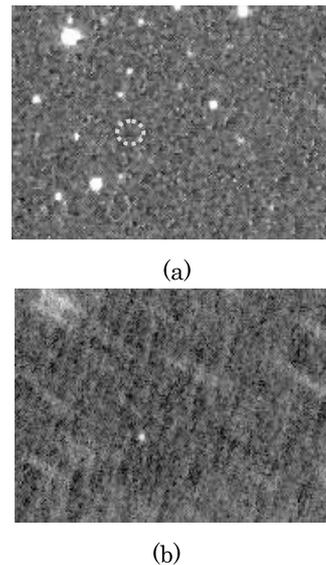


図2 重ね合わせ法で検出された小惑星.

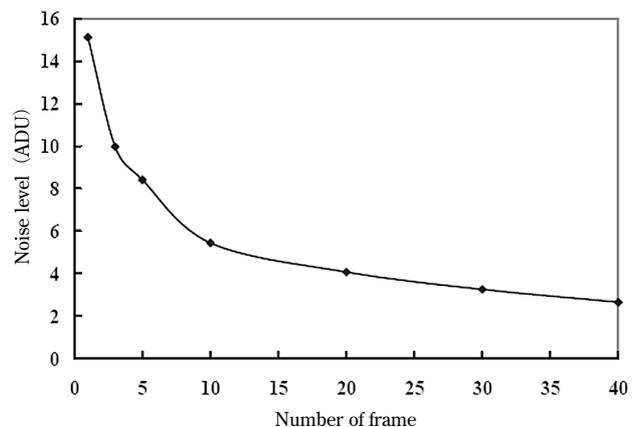


図3 重ね合わせた CCD 画像の枚数に対する背景雑音の変化.

の枚数、縦軸に重ね合わせ後の背景雑音の値を ADU (analog to digital unit) で表している。重ね合わせる枚数を増やすことにより、背景雑音が低下していく様子がわかる。40枚の画像を利用することにより、背景雑音は約6分の1に抑えられていることがわかる。背景雑音は式(1)のように減少する。

$$\sigma_{\text{median}} = \frac{1.2}{\sqrt{N}} \sigma_{\text{individual}} \quad (1)$$

ここで、 N は中央値画像作成に使用された切り取り画像の枚数である。この式より、使用する枚数が多いほど背景雑音が軽減され、暗い移動天体の検出が可能であることがわかる。係数の1.2は、モンテカルロシミュレーションで導かれた値である²⁾。中央値でなく平均値を用いれば、式(1)の係数1.2は1.0となり、ノイズ減少の割合は1.2倍向上する。しかしながら、平均値は宇宙線や恒星など非常に高い値を示す画素の影響をうけるため、重ね合わせ後の画像で非常に暗い移動物体を検出するには中央値のほうが有利である。一枚の画像では背景雑音に埋もれて認識できないような暗い天体を検出するためには、図1に示したような手順をあらゆる移動量を想定して行う必要がある。

図1は本手法に関する大まかな概念図であるため、実際の解析手順は図1のように単純に切り取り画像の中央値を計算するのではなく、非常に複雑なものとなる。特に1枚の画像を平坦にしたり、恒星の影響をあらかじめ除去するためのプロセスが最後の移動天体の検出能力を大きく左右する。本手法に関するより詳しい情報は、他の論文を参照されたい³⁾。

2. 小惑星の試験観測および結果

われわれは重ね合わせ法の有効性を確かめるため、小惑星を対象とした試験観測を実施した。小惑星はさまざまな明るさのものがすでに多数発見されており、重ね合わせ法の能力を調査する上で有効である。2002年3月12日、13日の2晩、JAXA 光学観測施設に設置されている観測装置を用いて小惑星帯3か所の試験観測を実施した。観測装置は、高橋製の口径35 cmの反射望遠鏡 e350N、昭和機械製のフォーク式赤道儀 25EF、ナカニシイメージラボ製の裏面照射型 CCD カメラ FCC-104B からなる。図4にこれらの観測装置の概観を示す。CCD カメラの観測可能領域は $0.61^\circ \times 0.61^\circ$ である。観測された各領域の座標は、(RA, Dec) = (11:09:30, +05:24:55), (12:18:00, -01:56:40), (12:20:30, -02:12:46) である。各領域において、露出時間3分で40枚の画像を連続で取得した。1枚の画像の限界等級は18.7等であった。



図4 JAXA 入笠山光学観測施設観測装置。昭和機械製フォーク式赤道儀に高橋製35 cm反射望遠鏡が設置されている。焦点にナカニシイメージラボ製 CCD カメラがとりつけられている。

重ね合わせ法で解析した結果、17.4等級から20.9等級の既知小惑星11個、未知小惑星5個を検出した。これらの小惑星の詳細を表1に示す。1列目は検出した天体名で、NAL015~NAL019がこの観測で新たに発見された小惑星である。2列目が観測日時、3, 4列目が検出した天体の座標である。5列目に検出した天体の明るさを等級で表わしている。未知小惑星5個に関しては、国際天文学連合 (IAU) に報告し仮符号を取得した。発見された5個の未知小惑星はいずれも20等級より暗いもので、口径35 cmの望遠鏡でこれほど暗い小惑星を検出できたのは世界で初めてである。40枚の画像を使用することにより、重ね合わせ法は通常の見出しと比較して約2等級(6倍)暗い移動天体を検出できることが示された。

この観測結果から、さまざまな観測装置から得られた画像を重ね合わせ法で解析した際に検出可能な静止デブリのサイズを見積もることができる。日本宇宙フォーラムは、岡山県美星町にスペースデブリおよび地球接近天体の観測のみを行う観測施設、美星スペースガードセンター (BSGC) を2000年に設立した。高度40000 kmに存在する反射率 (albedo) 0.1、直径10 cmの静止デブリの明るさを23.5等とすると、BSGCの1 m望遠鏡と裏面照射型 CCD カメラを使用した際に検出できる静止デブリのサイズは約10 cmである。現在までにこの手法で約350個の小惑星が発見され、また多数の未知静止軌道物体を確認している。

表 1 発見された小惑星の詳細.

検出天体	観測日時 (UT)	赤経 (h m s)	赤緯 (° ′ ″)	等級 (V)
18564	2002/3/12.52135	11 08 37.92	+05 40 05.5	18.7
	2002/3/13.50961	11 07 52.79	+05 44 48.2	18.7
2000SM104	2002/3/12.52135	11 10 15.88	+0516 05.6	19.8
	2002/3/13.50961	11 09 19.16	+05 21 39.7	19.8
2002DK02	2002/3/12.52135	11 08 32.76	+05 22 58.5	20.0
	2002/3/13.50961	11 07 40.30	+05 33 35.9	20.0
2002EO03	2002/3/12.52135	11 09 46.39	+05 32 01.9	21.0
	2002/3/13.50961	11 08 51.46	+05 39 07.3	21.0
2002EH50	2002/3/12.52135	11 08 39.45	+05 36 08.0	21.3
	2002/3/13.50961	11 07 38.43	+05 38 37.9	21.3
1999VG142	2002/3/12.62863	12 18 32.10	-01 57 38.0	19.9
	2002/3/13.62017	12 17 51.10	-01 53 17.8	19.9
2002EG70	2002/3/12.62863	12 18 28.62	-01 55 00.0	20.5
	2002/3/13.62017	12 17 41.87	-01 48 32.5	20.5
2000WH39	2002/3/12.62863	12 17 07.02	-01 50 00.5	20.7
	2002/3/13.62017	12 16 18.30	-01 42 46.5	20.7
NAL015	2002/3/12.62863	12 17 19.39	-01 48 01.2	21.6
	2002/3/13.62017	12 16 31.26	-01 39 51.8	21.6
40491	2002/3/12.73567	12 19 33.75	-02 09 57.5	20.5
	2002/3/13.71926	12 18 50.47	-02 04 46.1	20.5
NAL016	2002/3/12.73567	12 20 44.75	-02 13 03.3	20.9
	2002/3/13.71926	12 20 05.12	-02 03 57.4	20.9
2000SG225	2002/3/12.73567	12 21 13.49	-02 02 48.9	21.2
	2002/3/13.71926	12 20 25.02	-01 56 36.4	21.2
2002ED72	2002/3/12.73567	12 19 37.37	-02 09 43.8	21.4
	2002/3/13.71926	12 19 04.80	-02 08 27.5	21.4
NAL017	2002/3/12.73567	12 21 07.04	-02 08 34.3	21.6
	2002/3/13.71926	12 20 15.44	-02 04 20.2	21.6
NAL018	2002/3/12.73567	12 19 52.71	-02 04 19.7	21.5
	2002/3/13.71926	12 19 26.74	-02 00 29.9	21.5
NAL019	2002/3/12.73567	12 20 47.09	-01 55 10.3	21.7
	2002/3/13.71926	12 19 59.49	-01 51 46.5	21.7

3. 解析時間短縮に向けた研究開発

3.1 新アルゴリズムの開発

第1章でも述べたように、本手法は1枚のCCD画像では背景雑音に埋もれて確認できないような移動物体を検出するため、図1に示すプロセスをあらゆる移動方向を仮定して行わなくてはならない。小惑星帯の小惑星や軌道の概略がわかっている静止軌道物体を検出する場合は、移動物体の移動方向がある程度推定できるためプロセス回数は少なくすむが、動きの全く予想できない未知宇宙デブリや地球接近天体を検出しようとした場合、膨大な数のプロセスを実施しなくてはならない。多数の計算機を設置しそれぞれの計算機にプロセスを分配することで、計算機の台数分、解析時間を短縮することができるが、将来のCCDカメラの大型化、読み出し時間の高速化を考えた場合、新たな技術的躍進が望まれる。

図1の重ね合わせ法でもっとも計算時間を要する部分は、中央値を計算する箇所である。中央値の計算は複数ある値を値の高い順に並べ替え、中央の値を採用するという

もので、加算や平均と比較すると高い値を示す雑音の影響をうけなくてすむので、重ね合わせ法にとっては必要不可欠であり、肝となる部分である。われわれは、画像をある閾値(閾値A)で二値化し、中央値の計算部分を計算速度の速い加算にして最終画像においてある閾値(閾値B)以上の値を示すものを移動天体とすることで、図1の重ね合わせ法とほぼ同じ結果を示し、かつ解析時間を飛躍的に短縮できることを発見した。

移動天体検出方法において利用する画像は、通常各画素が65536階調の16ビットの画像データを使用するが、本発明において利用するすべての画像データを、ある閾値(閾値A)以上は1、それ以下を0という二値データに変換する(図5参照)。閾値Aの決定については後で述べる。移動物体の移動量を仮定して切り取ってきた画像については、そのまま加算する。できあがった画像についてある値以上を示すものが、その移動量を有する移動物体と判断する。

この手法の利点を以下に述べる。まず、16ビットデータ

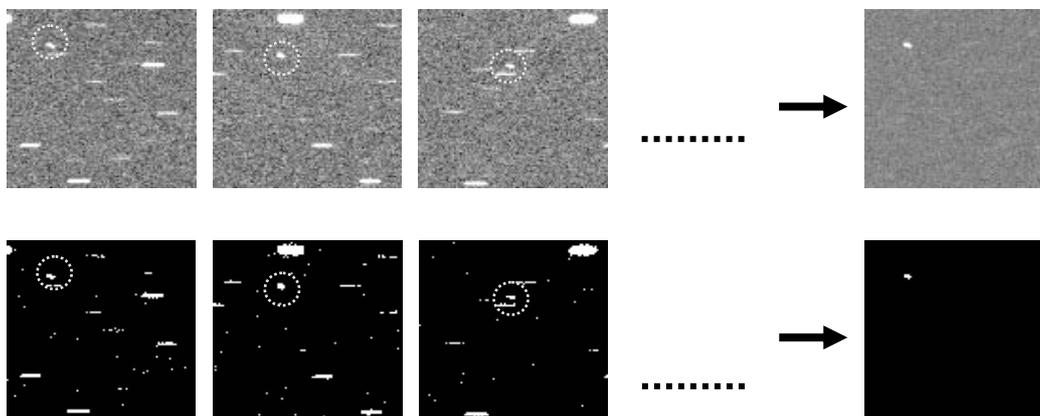


図5 (上) 16ビットの画像，複数枚を利用して中央値画像を作成している様子. (下) 16ビットのデータを二値化し，その加算データのうちある閾値（閾値B）以上を示す画素を表示したもの.

を1ビットデータに変換したことで，扱うデータ量が16分の1と大幅に軽減された．次に二値化した画像の切り取り画像すべての中央値画像を作成するのではなく，加算画像を作成することにより，最も時間を要していた中央値の計算をする必要がなくなった．

なぜ中央値の計算の必要がなくなったかを述べる．移動天体検出方法では雑音となる恒星等の影響を除去するために中央値の計算を実施している．中央値は非常に大きな値を示す雑音（恒星や検出器の熱雑音）の影響を除去する目的において加算平均や加算より有効であるため，移動天体検出方法で採用されている．しかし画像の二値化によって各画像における雑音の大小は関係なくなり，そこに移動物体もしくは雑音があるかないかのみ情報になる．また，二値化画像の切り取り画像を加算した結果は，その移動量をもつ物体もしくは雑音が，その最終加算画像の示す位置に該当する各画像の位置に何回現れたかを示す．最終加算画像の示す値は0から利用した画像の枚数になるが，この値が利用した枚数の値に近ければ，雑音が偶然仮定した移動量の場所に多数回出現する可能性は低く，移動物体である可能性が高い．つまり，ここで最終加算画像についてある閾値（閾値B）を設定し，その値より大きいものを移動物体とすることが可能になる．このような操作により，16ビット画像の中央値画像をつくったときとほぼ同じ結果を出すことが可能になる．

閾値AおよびBの選定について述べる．閾値Aにより画像中の何%が二値（0か1）のうち1を示すかを決定される．すなわち閾値を背景雑音レベルの 1σ とした場合，それ以上の値を示す画素が1となるため，画像全体の16%が1となる． N 枚の画像を利用してある移動量の仮定をした場合，各画像の 1σ 以上の雑音が偶然その移動量で並ぶ確率は 0.16 の N 乗になる．図6に用いるCCDの画素数を

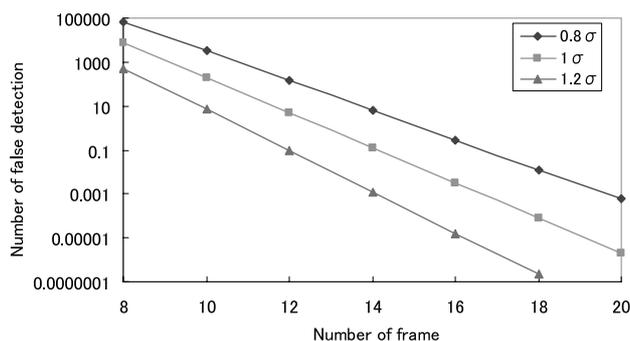


図6 仮定した移動量に沿って1を示す画素数と誤検出の関係.

1024×1024 ，仮定する移動量を16384通りとしたときに，偶然雑音が仮定した移動量のように並んで検出される（誤検出）回数の様子を，3通りの閾値A（ 0.8σ ， 1σ ， 1.2σ ）について示す．横軸は，利用した複数枚の画像のうち仮定した移動量に沿って1を示す画素がいくつあったかを示す．つまり閾値Bということになる．図6から以下のことがわかる．1の数が増えれば，それぞれの閾値で雑音による誤検出の数が減る．また，閾値が 0.8σ のように低い場合は移動物体を検出するために，より多くの1を示す画素が必要になる．つまり，より多くの画像を利用する必要がある．一方，閾値が 1.2σ のように高くなると，より少ない画像数で検出できる．当然 0.8σ では 1.2σ より暗い移動物体が検出できる．より暗い移動物体を検出するためには，より多くの画像を利用する必要がある．移動物体を雑音と区別して検出するために，閾値Aを低くすれば閾値Bは多めに設定しておく必要があり，閾値Aを高くとおけば閾値Bは少なくてすむ．図6から閾値Aが 0.8 ， 1.0 ， 1.2σ のそれぞれの場合，閾値Bが18，15，13あたりであれば，雑音による誤検出をすることなく移動物体の検出が可能となることがわかる．この新しいアルゴリズムを用いることにより，中央値を計算していた従来の重ね合わせ法

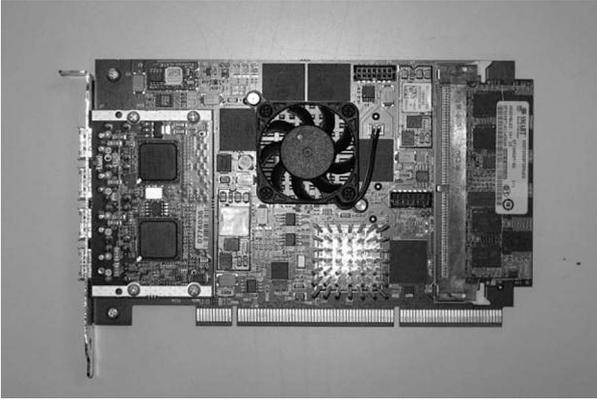


図7 Nallatech 社製 FPGA ボード H101-PCIXM.

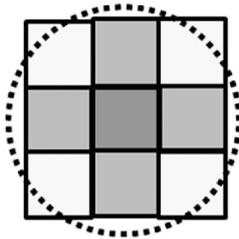


図8 星像候補の輝度分布.

と比べて解析時間を60分の1に短縮することが可能になった。

3.2 専用 FPGA ボードの製作

3.1章で示したアルゴリズムは、複数の二値化データの一部を加算して閾値を設けて移動物体を検出するというもので、比較的単純なアルゴリズムである。そこで、図1に示した解析においてこの部分を専用に実行するFPGA (field programmable gate array) ボードを製作した。FPGAはこのような単純な計算を大量に高速で処理するのに適している。図7に製作したFPGAボードを示す。Nallatech社製のH101-PCIXMでC言語によるアルゴリズムの実装が可能である。3.1章のアルゴリズムのFPGA化により、さらに解析時間を20分の1に短縮することが可能になった。3.1章の結果とあわせると、従来の重ね合わせ法と比べて解析時間を1200分の1に短縮したことになる。これは大きな進歩であり、今後、宇宙デブリや地球接近天体の発見に大きく貢献するはずである。

4. 線分検出技術

重ね合わせ法を補完する検出技術として「線分検出技術」を開発している。本技術の基本的な概念を紹介する。重ね合わせ法と同様に複数枚の画像を利用することは同じであるが、本技術では画像中の星像候補をまず検出する。星像候補の検出は次のようなアルゴリズムを用いる。

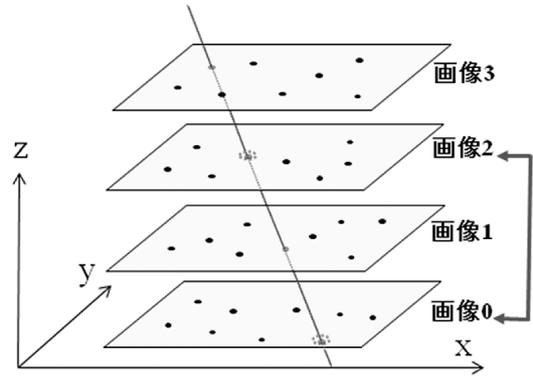


図9 線分検出技術の概念図.

CCD 画像上の天体は雑音とは異なり、図8に示すような最も高い値を示す画素を中心に、ある程度明るさの勾配をもった画素値分布を示す。そこで、形状パラメータとして、図8に示すような9画素の値の合計を、中央の最も高い画素値で割ったものを定義する。形状パラメータが1に近ければ、それはその画素だけが突発的に高い値を示す雑音のようなものであるし、形状パラメータが大きくなれば、それは図8に示すような天体からの光度分布であろう。そこで①ある閾値、②ある形状パラメータを設定し、③まわりの8画素が自身の値以下であるという条件を満たす画素を、星像候補として探す。当然、閾値を下げる、または形状パラメータを1近くに設定すれば、星像候補数は飛躍的に増加する。星像の候補数については後で記述する。

このような操作によって各画像の星像候補を検出しておく。次に、図9に示すように各画像の星像候補の画像上の位置を x, y とし取得された画像番号 z とするような三次元空間を仮定し、そのなかで直線にならぶような星像候補のグループを探す。具体的には、複数の画像の中から2枚の画像対を決め、その画像中でそれぞれの星像候補の対について、その2点を結ぶ直線上に、注目している2枚の画像以外の画像上で星像候補がないかを探す。これをすべての場合について行う。これによって星像候補がある個数以上含まれるようであれば、それは画像中で等速で移動している物体を捉えたことになるであろう。

この手法を用いることにより、画像中でさまざまな動きをするデブリや地球接近小惑星の検出が可能である。重ね合わせ法と異なり、移動方向はあらゆる場合を想定する必要がなく、星像候補の位置によって決まるため、単純に星像候補の数に依存する。たとえば市販のPC (DELL Precision 450) で1枚の画像の星像候補数を400 (図9中の黒丸の1画像あたりの数)、使用する画像枚数を17枚とすると、解析にかかる時間はおおよそ7分であり、きわめて現実

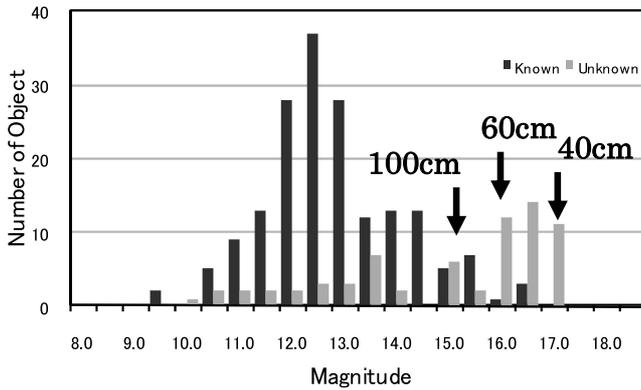


図 10 線分検出技術で検出された静止軌道物体の明るさ分布。JAXA 入笠山光学観測施設 35 cm 望遠鏡を利用。

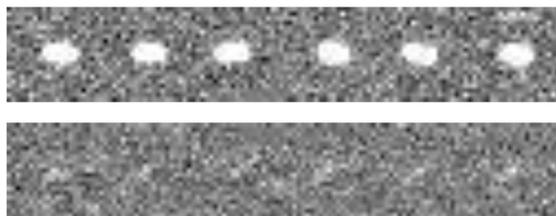


図 11 線分検出技術で検出されたカタログ物体（上）と未知物体（下）。カタログ物体の明るさは 12 等級、未知物体の明るさは 17 等級であった。

的である。計算機の能力や観測可能な画像枚数に応じて、各画像における星像候補の検出数を調整すればよい。計算機の能力が高ければ画像の星像検出の閾値を下げ、多くの星像候補を検出することが可能となり、より暗いデブリ等の検出が可能になる。

図 10 に、JAXA 所有の入笠山光学観測施設の口径 35 cm 望遠鏡で取得された画像を線分検出技術で解析して検出した静止軌道物体の明るさ分布を示す。15 日間のサーベイ観測結果を表したもので、横軸に明るさを等級で示し、縦軸は検出した個数を示す。濃色の棒グラフはカタログに載っている物体を示し、淡色の棒グラフは未知物体を示す。静止軌道上では 16.5 等級および 17.5 等級の物体のサイズは、およそ 60 cm および 40 cm である。図 11 に線分検出技術で検出した静止軌道物体の例を示す。上はカタログに載っている物体で、明るさは 12 等級であった。下は未知物体で明るさは 17 等級であった。図 11 からわかるよう

に、重ね合わせ法の能力にはかなわないが、線分検出技術においてもかなり暗い物体の検出が可能である。

宇宙航空研究開発機構が開発した重ね合わせ法による微小物体検出技術を紹介した。重ね合わせ法は静止デブリや小惑星、彗星などの移動天体の検出に有効な手法で、数十～数百枚の画像に対し、移動天体の動きを仮定して画像の切り取りを行い、すべての切り取り画像の中央値画像を作成する。この手法において背景雑音を効率的に軽減させ、1枚の観測画像では検出できない非常に暗い移動天体を検出することが可能である。35 cm クラスの小口径望遠鏡に 1 m クラスの望遠鏡に匹敵する検出能力を持たせることができる。35 cm 望遠鏡を用いて、これまで 350 個の未知小惑星、100 個程度の未知静止軌道物体を検出している。1 m クラスの望遠鏡に本手法を適用することにより、さらに大きな成果を得ることが期待できる。また、将来の CCD 素子の大型化、読み出し時間の高速化を見越し、FPGA を利用した解析時間短縮のためシステムを開発した。これまでの解析時間を 1000 分の 1 程度に短縮するもので、実用化にむけて研究開発を進めている。また、線分検出技術は候補数の調整によって解析時間を変更できるため、現在ほぼ実用化の段階にきており、その成果があらわれている。これらの技術は今後、宇宙デブリ問題の解決や地球接近天体発見システムの構築、太陽系天文学の新たな知見を得ることに大きく貢献するであろう。

文 献

- 1) T. Yanagisawa, A. Nakajima, T. Kimura, T. Isobe, H. Futami and M. Suzuki: "Detection of small GEO debris by use of the stacking method," Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci., **44** (2002) 190-199.
- 2) G. Pennycook: *Modification of the Boller and Chivens Telescope to f/6.25 and Photometry of IC5249's Halo* (MS thesis, Univ. Auckland, 1998).
- 3) T. Yanagisawa, A. Nakajima, K. Kadota, H. Kurosaki, T. Nakamura, F. Yoshida, B. Dermawan and Y. Sato: "Automatic detection algorithm for small moving objects," Publ. Astron. Soc. Jpn., **57** (2005) 399-408.

(2011 年 2 月 10 日受稿)