

## FPGA 化による高速画像解析技術

○柳沢俊史、黒崎裕久、藤田直行（JAXA）

宇宙航空研究開発機構(JAXA)ではデブリ問題解決のためにデブリの観測技術を研究開発している。その一環として、未踏技術研究センターではカタログにない暗い静止デブリを検出する技術、重ね合わせ法の開発を行っている。これまで実際にソフトウェアの開発を実施し小惑星や静止デブリの観測を通してその有効性が証明されたが、移動量が大きくその動きが予測不可能である物体にたいしては解析時間が膨大にかかるという弱点があった。今回、解析時間を大幅に短縮し、さらに重ね合わせ法とほぼ同様の効果をもたらすアルゴリズムを開発した。また、そのアルゴリズムを FPGA ボードに実装しさらなる解析時間の短縮が可能になることを示した。これにより従来の解析時間を約 1200 分の1に短縮することに成功した。図に我々が開発した FPGA ボードシステムを示す。



第4回スペースデブリワークショップ

## FPGA化による高速解析手法

宇宙航空研究開発機構  
未踏技術研究センター

柳沢俊史、黒崎裕久、藤田直行



## 序論

宇宙航空研究開発機構 未踏技術研究センターでは、スペースデブリを光学的に観測する技術の研究を進めており、未知デブリの検出や軌道決定をし、JAXA独自のカタログの生成及び静止軌道付近のデブリ状況の把握を目標にしている。

1枚の画像では検出できない非常に暗い静止デブリを検出する技術“重ね合わせ法”の開発をしている。重ね合わせ法の弱点である、膨大な解析時間を大幅に短縮するアルゴリズムを開発しその実用化に成功した。



## にゅうかさやま JAXA 入笠山光学観測所

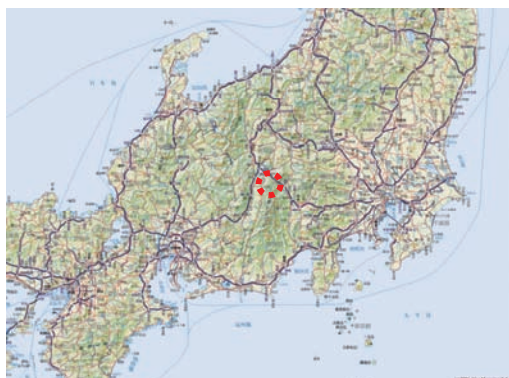
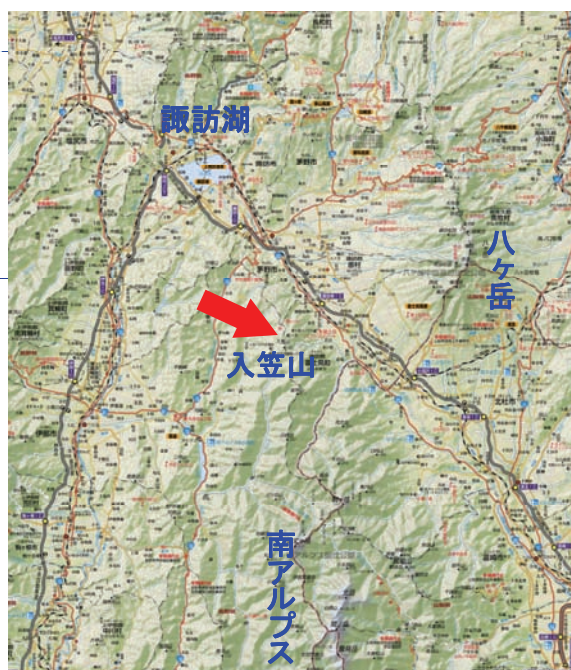
長野県伊那市高遠町芝平大沢山

経度 東経138度10分18秒

緯度 北緯 35度54分05秒

標高 1870m

MPCコード 408 Nyukasa



## JAXA入笠山光学観測所



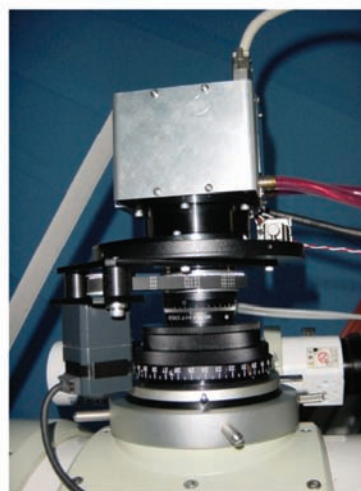
35cm望遠鏡と25cm望遠鏡を設置



## 観測装置：35cm望遠鏡と2K2KCCDカメラ



望遠鏡 タカハシ  $\epsilon$ -350  
口径355mm  $f=1248\text{mm}$   $F/3.6$   
赤道儀 昭和機械製 フォーク式 25EF



カメラ N.I.L製  
2K2K裏面照射型 (e2v)  
視野角 1.27deg.



## 観測装置：25cm望遠鏡と4K4KCGDカメラ



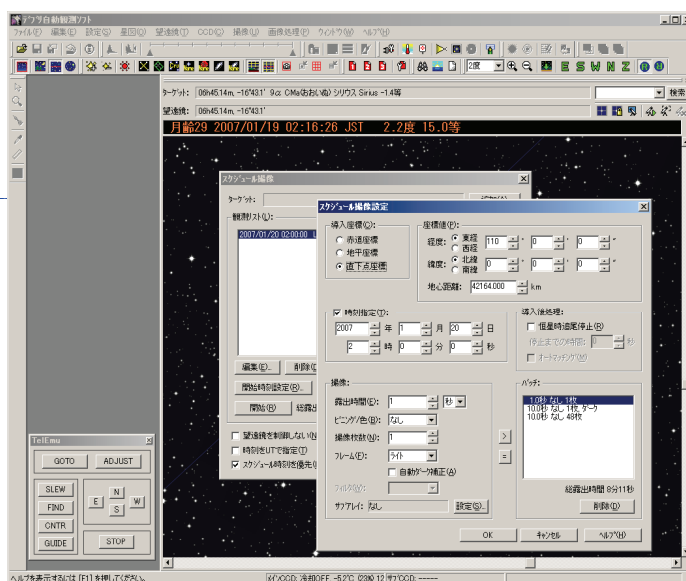
望遠鏡 BRC-250 (2台まで同架可能)  
口径250mm f=1268mm F/5.1  
赤道儀 昭和機械製 エキセントリックエルボ式 25EL

カメラ N.I.L.製  
2K4K裏面照射型(e2v) × 2チップ  
視野角 2.78deg.



## 観測ソフト

それぞれの赤道儀、望遠鏡、CGDカメラは1つのソフトウェア(デブリ自動観測ソフト)で制御されている。指定した時刻に指定した視野に望遠鏡を向け、指定した撮影を連続で行うことが可能。スケジュール設定後は全て自動で観測が行われる。

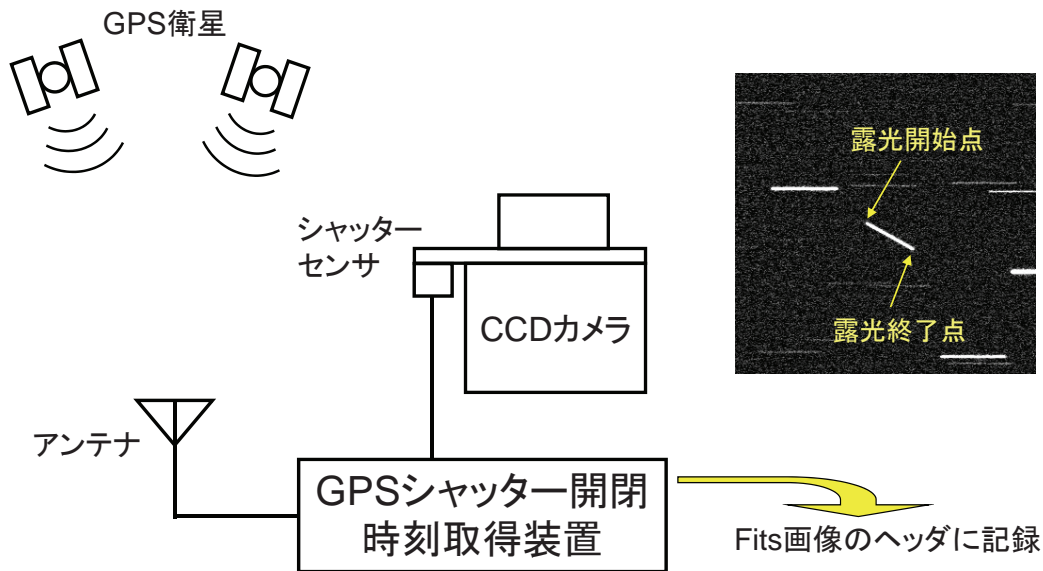


デブリ自動観測ソフトのスケジュール設定



## GPS時刻取得装置

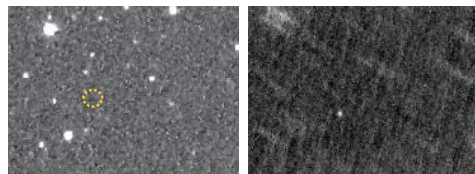
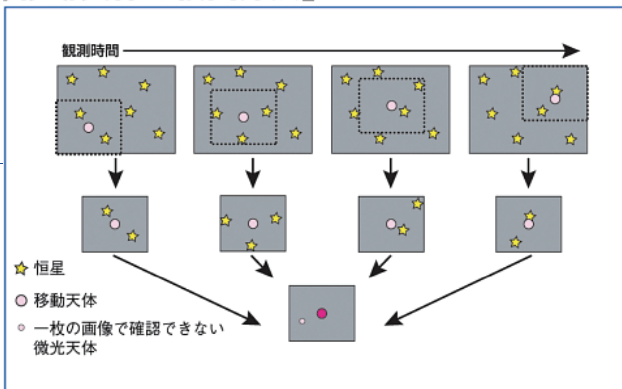
CCDカメラのシャッター開閉時刻を正確(1/1000)に計ることで、露光開始時刻と終了時刻が精度よく求まる。



## データ解析手法①:重ね合わせ法

重ね合わせ法は1枚の画像では検出できない非常に暗いデブリを検出する技術。2000年から研究開発を進めている。

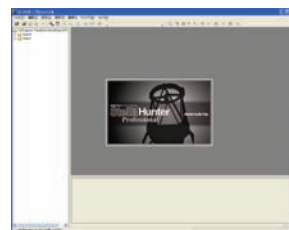
### 「移動天体の検出方法」



重ね合わせ法による検出例。  
処理前(左)、処理後(右)。

移動天体の動きを仮定して画像をずらして重ね合わせることで、1枚の画像では確認できない微光天体が浮かび上がる。

多数の小惑星の発見で実証されている。

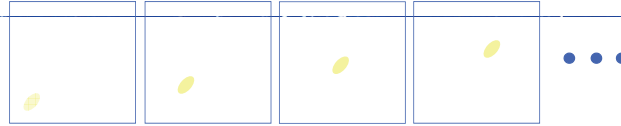


市販用の小惑星、彗星等の検出ソフト、ステラハンターを開発。



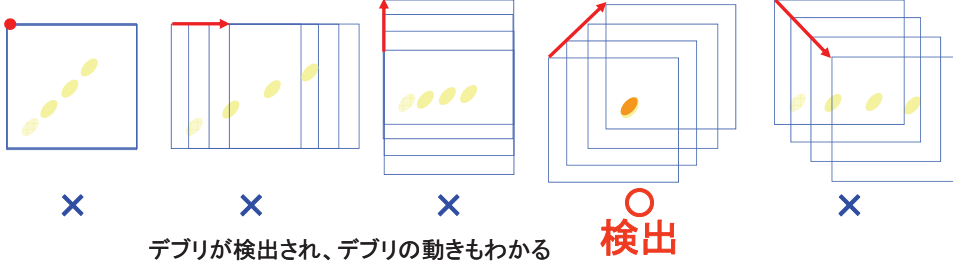
## データ解析手法①: 重ね合わせ法

移動方向が未知のデブリや地球接近小惑星の検出にはあらゆる方向で重ね合わせをしないといけないため解析に時間がかかる。



望遠鏡を固定して連続で撮影した画像

シフト量によって重ね合わせる



デブリが検出され、デブリの動きもわかる

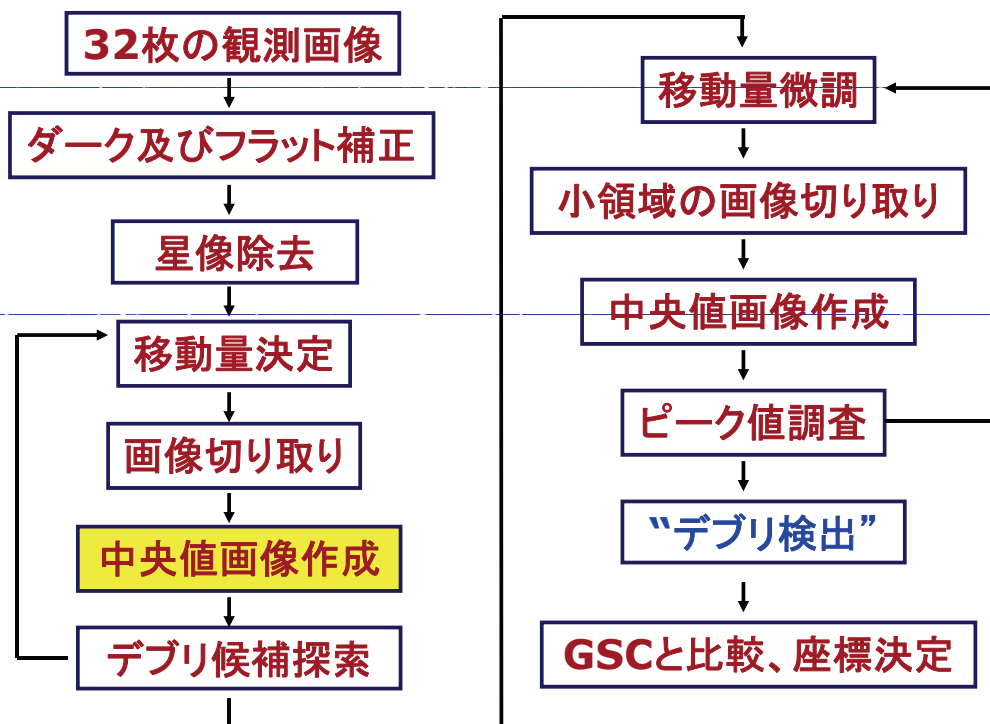
1024 × 1024画素のCCD画像32枚について画像内を256 × 256画素の範囲内で移動する物体を検出しようとした場合65536通りの解析をする必要がある。



市販のPC1台で要する解析時間は**280時間！！**

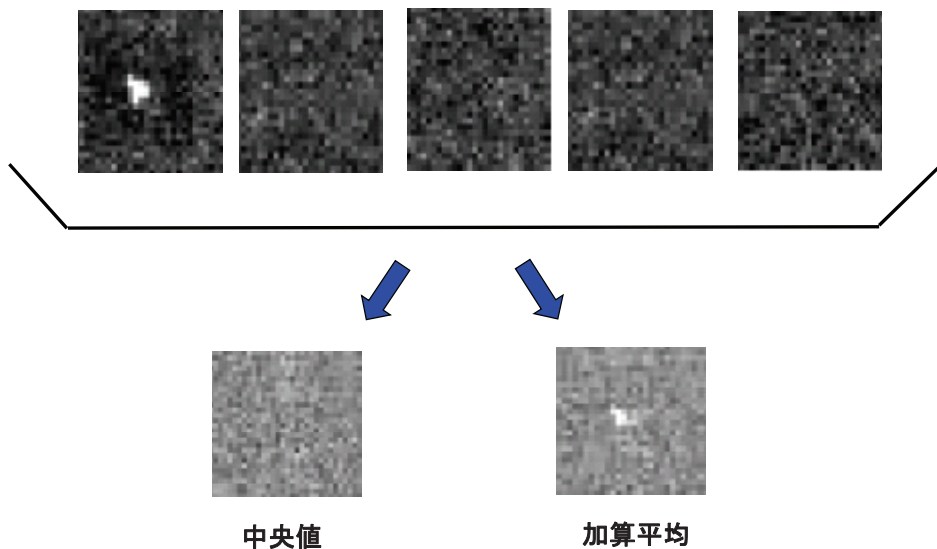


## データ解析手法①: 重ね合わせ法



# データ解析手法①:重ね合わせ法

## 中央値と加算平均の違い

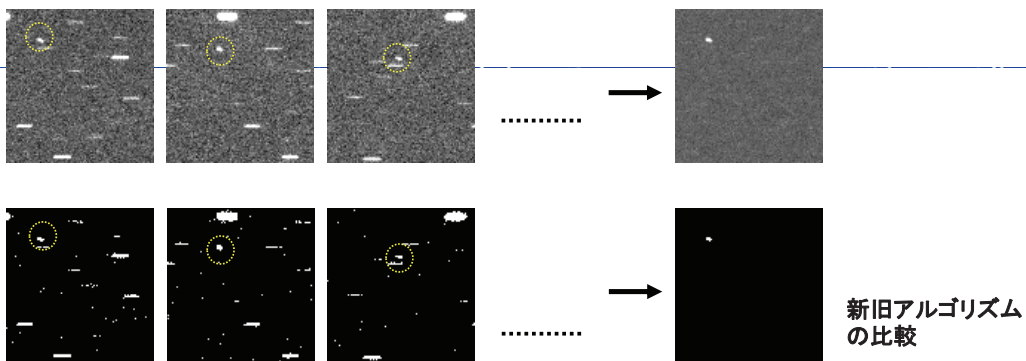


# 新アルゴリズムの開発

中央値の計算は加算や平均と比較すると計算が複雑で時間を要する。

中央値の利点(高いノイズの影響を除去できる)をいかしつつ加算などの単純な計算と代用できないか。

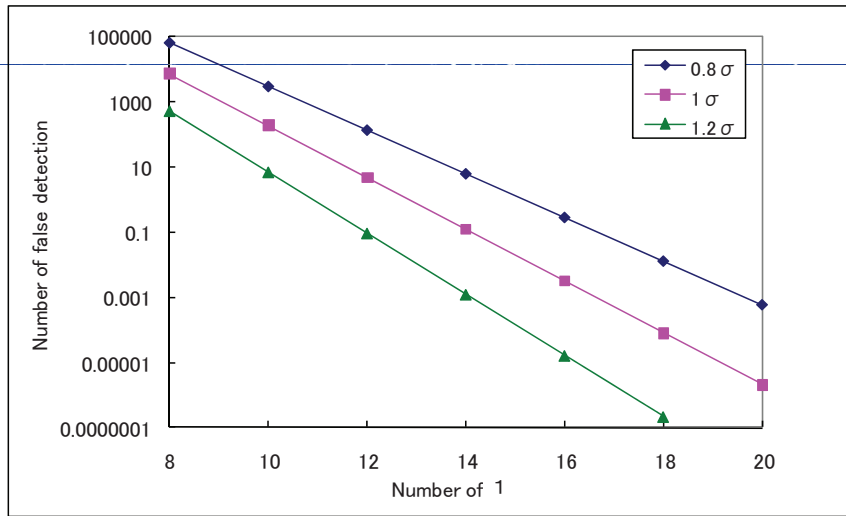
画像を2値化することにより2つの特徴を網羅できる。



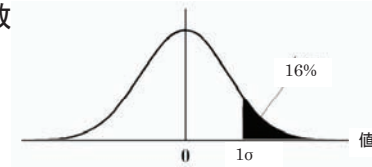
解析時間を**60分の1**に短縮できる。



## 新アルゴリズムの開発



各閾値、1の数に対する誤検出の数



## 新アルゴリズムの開発

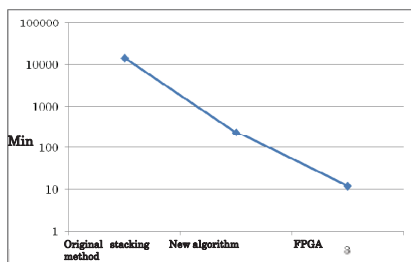
新アルゴリズムをFPGAに実装しさらなる高速化を図る。



Nallatech社製FPGAボード H101-PCIXM



iDAQs社製FPGAボードシステム



解析時間の変化

解析時間をさらに**20分の1**にできる。  
合計で**1200分の1**に短縮。

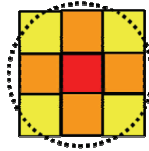
**280時間 → 14分**



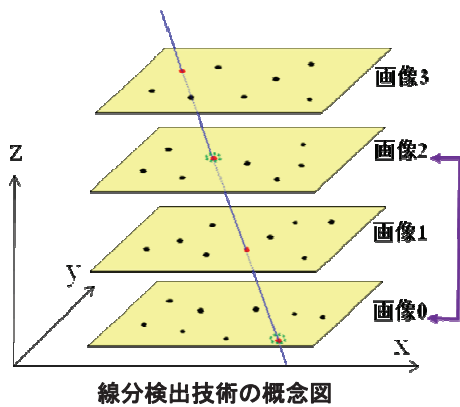


## データ解析手法②:線分検出技術

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。



形状パラメータ=  
9画素値合計/中央画素値



多数枚の画像を取得

画像中の星像候補閾値、形状パラメータを利用してを検出

移動量をもった直線上にのるものを検出

利点:

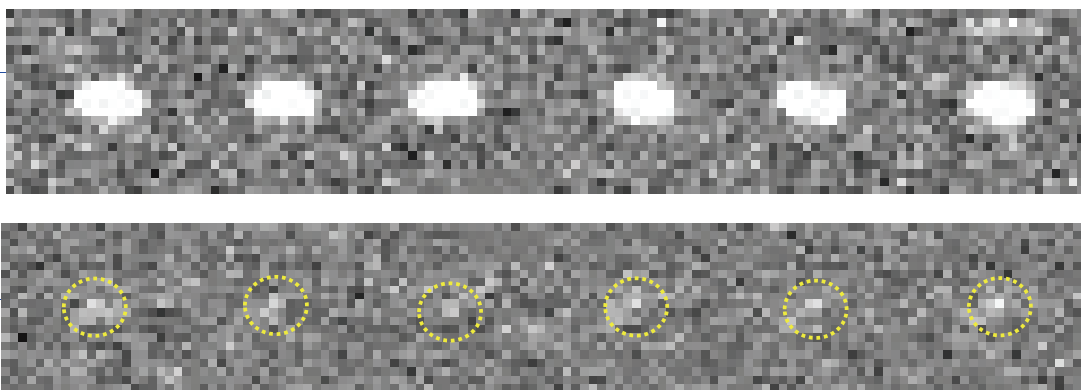
あらゆる移動方向を想定しなくてよい。

計算機の力に応じて星像候補数を調節できる。

実際の観測に即適用できる。



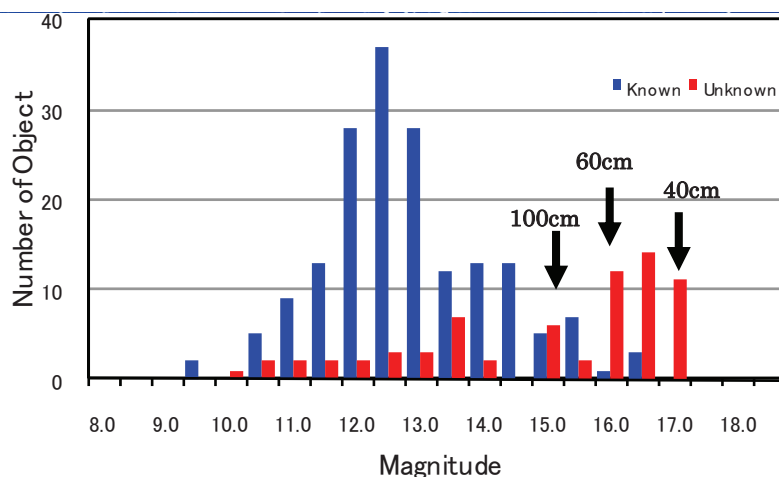
## データ解析手法②:線分検出技術



線分検出技術を利用した検出例。6枚の連続撮影画像において候補付近の画像を並べた様子。12等のカタログ物体(上)及び17等の未知デブリ。



## 線分検出法による観測結果



入笠山光学観測施設の35cm望遠鏡で取得された画像、15日分を線分検出法で解析した結果



## まとめ

JAXAが開発中の高速画像解析手法について紹介した。重ね合わせ法における新たなアルゴリズムの開発やそのアルゴリズムのFPGAボードへの実装によりこれまで重ね合わせ法の弱点とされてきた解析時間の問題を解決できるみとおしができてきた。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。今後は検出した未知デブリの軌道決定をするための研究開発をおこない日本独自の静止軌道物体のカタログの作成を行っていききたい。



# FPGA化による高速解析手法

柳沢俊史<sup>1)</sup>・黒崎裕久<sup>1)</sup>・藤田直行<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>JAXA

## Fast Analysis Methods for CCD Images of GEO Debris Observation

Toshifumi YANAGISAWA, Hirohisa KUROSAKI and Naoyuki FUJITA

### Abstract

JAXA is developing analysis technologies which is able to detect faint GEO objects that are not on the catalog provided by U.S. The stacking method is developed and shown to be useful for detection of faint objects, so far. The method has the disadvantage that is time-consuming to detect objects whose movements are unpredictable. In order to overcome this, a FPGA board system and some new algorithms are developed. In this paper, these are described.

Key Words: Space Debris, FPGA

### 1. 序論

宇宙航空研究開発機構(JAXA)ではデブリ問題解決のためにデブリの観測技術を研究開発している。その一環として、未踏技術研究センターではカタログにない暗い静止デブリを検出する技術、重ね合わせ法の開発を行っている。これまで実際にソフトウェアの開発を実施し小惑星や静止デブリの観測を通してその有効性が証明されたが、移動量が大きくその動きが予測不可能である物体にたいしては解析時間が膨大にかかるという弱点があった。今回、解析時間を大幅に短縮し、さらに重ね合わせ法とほぼ同様の効果をもたらすアルゴリズムを開発した。また、そのアルゴリズムをFPGAボードに実装しさらなる解析時間の短縮が可能になることを示した。重ね合わせ法とは別の微小物体検出アルゴリズム、線分検出技術の開発も進んでいる。

2章では重ね合わせ法の概略に触れその弱点、それを克服するためのアルゴリズムやそのアルゴリズムを実装したFPGAについて述べる。3章では線分検出技術について紹介したい。

#### 2. 1 重ね合わせ法

重ね合わせ法は1枚の画像では検出できない非常に暗いデブリを検出する技術で2000年から研究開発をすすめている[1-3]。JAXA 所有の入笠山光学観測施設[4]で取得された画像を利用して本手法の有効性の検証や実用化を行っている。詳しくは参考文献を参

照していただくとしてここでは概略を述べる。

図1に示すように、多数のCCD画像からデブリ等の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、全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全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)中の黄色い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。本手法の有効性は多数の小惑星を新発見したことで証明されている。35cmの望遠鏡で1mに匹敵する検出能力を示すことができた。

本手法の最大の弱点として画像の切り取りをあらゆる移動方向を仮定しておこなわなくてはならないという点がある。メインベルト小惑星のようにある程度の動きが予想されるもの、また予め軌道要素のわかっている暗いデブリの追跡観測には有効であるが、動きの予想のつかない未知デブリや地球接近小惑星の検出には膨大な解析時間を要し、現実的ではないことがわかった。例えば1024×1024画素のCCD画像32枚について画像内を256×256画素の範囲内で移動する物体を全て検出しようと

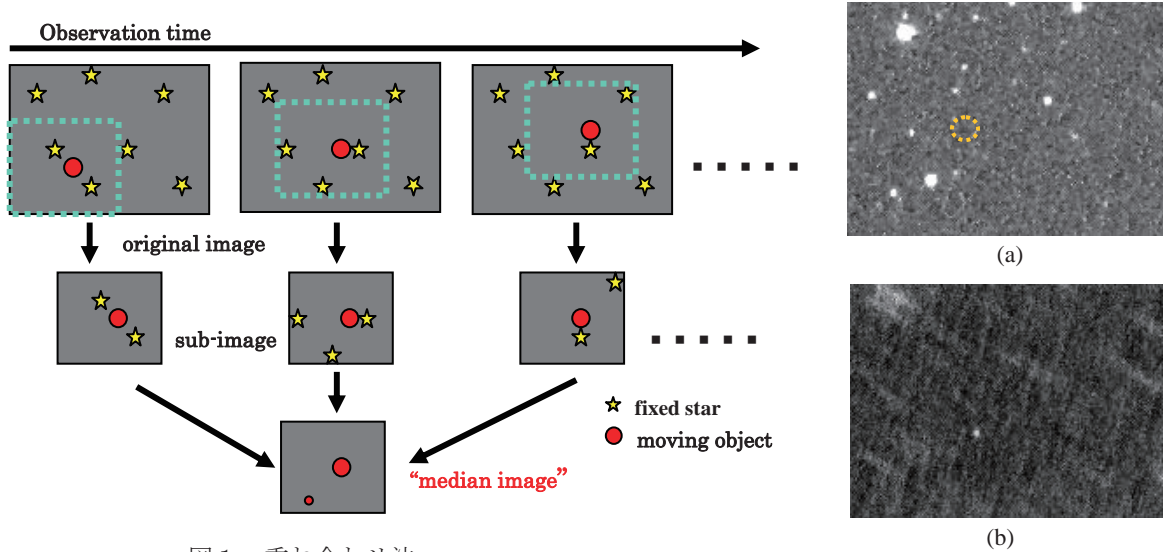


図1：重ね合わせ法

図2：重ね合わせ法で検出された小惑星

した場合65536通り(256×256)の探索回数が必要であるが、重ね合わせ法がこれだけの回数の計算に要する時間は通常のPCで約280時間である。計算機を複数台ならべて並列で解析する手法も考えられるが、今後のCCDの大型化を考えると新たなアルゴリズムの開発や斬新な技術改革の必要があるとおもわれる。

2.2 新アルゴリズムの開発

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受けなくてすむので、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。我々は、画像をある閾値(閾値A)で2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の重ね合わせ法とは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は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全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2値データに変換する(図3参照)。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。出来上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。

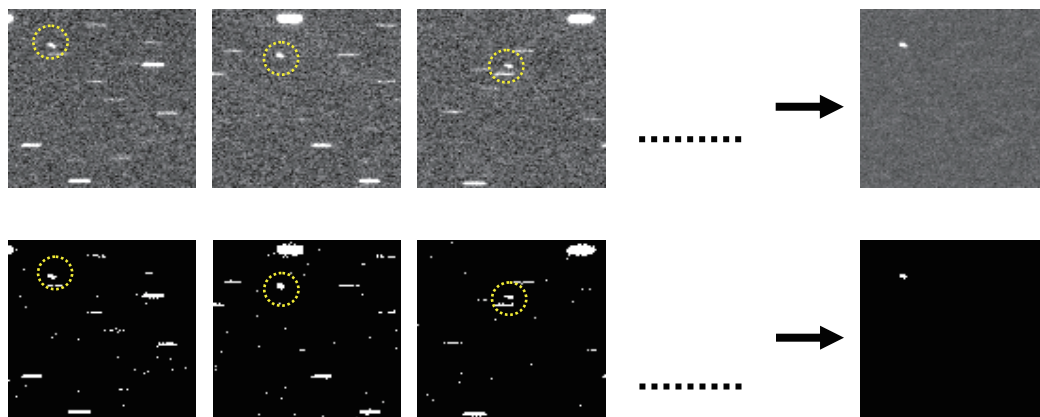


図3：(上) 16ビットの画像、複数枚を利用して中央値画像を作成している様子。(下) 16ビットのデータを2値化しその加算データのうちある閾値(閾値B)以上を示す画素を表示したもの。

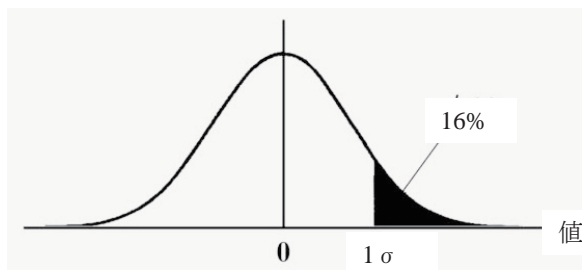


図4：画像中の値の頻度分布

この手法の利点を以下に述べる。まず、16ビットデータを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2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2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、2値化画像の切り取り画像を加算した結果は、その移動量を持つ物体もしくは雑音は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及びBの選定について述べる。閾値Aにより画像中の何%が2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 $1\sigma$ 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。図4に画像中の値の頻度分布を示す。図4中で黒く塗られた部分が1を示す画素でありそのほとんどが雑音であるが、なかには背景雑音レベル $1\sigma$ 以上の値を示す移動物体の信号も含まれている可能性がある。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 $1\sigma$ 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5に用いるCCDの画素数を $1024 \times 1024$ 、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（ $0.8\sigma$ 、 $1\sigma$ 、 $1.2\sigma$ ）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5

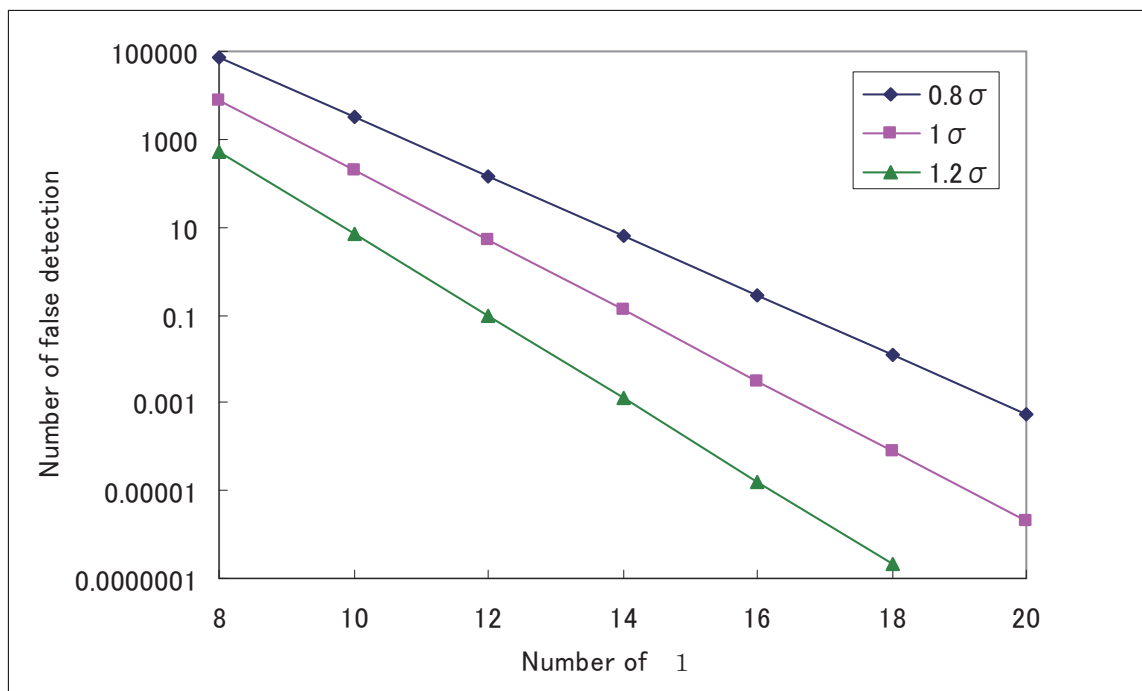


図5：仮定した移動量に沿って1を示す画素数と誤検出の関係



図6：Nallatech社製FPGAボード H101-PCIXM

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  $0.8\sigma$  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しなくてはならない。一方閾値が  $1.2\sigma$  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  $0.8\sigma$  では  $1.2\sigma$  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 を高くしておけば閾値 B は少なくすむ。図5から閾値 A が  $0.8$ 、 $1.0$ 、 $1.2\sigma$  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。

### 2.3 専用FPGAボードの製作

2.2章で示したアルゴリズムは複数の2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行う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

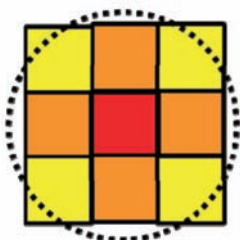


図7：星像候補の輝度分布

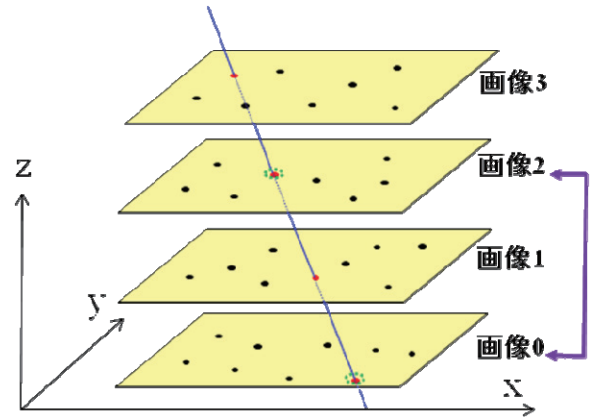


図8：線分検出技術の概念図

に高速でやるのに適している。図6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。2.2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。2.2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。

### 3 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。CCD画像上の天体は雑音とはことなり図7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7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7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、閾値を下げたり形状パラメータを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8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  $z$

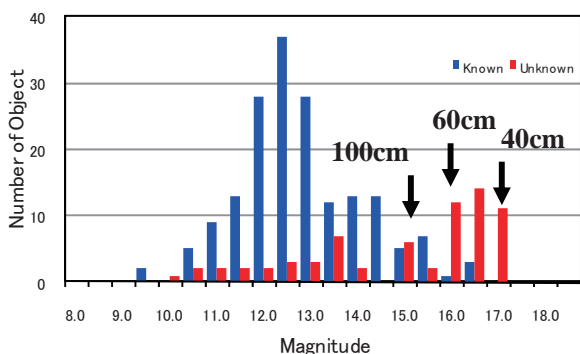


図9：線分検出技術で検出された静止軌道物体の明るさ分布。JAXA 入笠山光学観測施設 35cm 望遠鏡を利用。

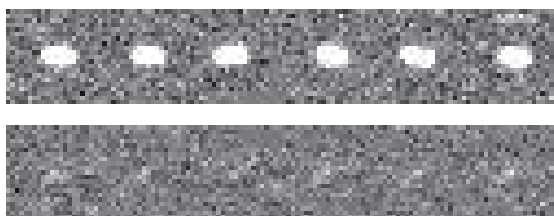


図10：線分検出技術で検出されたカタログ物体（上）と未知物体。カタログ物体の明るさは12等級、未知物体の明るさは17等級であった。

とするような3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が含まれるようであればそれは画像中を等速で移動している物体を捉えたことになるであろう。

この手法をもちいることにより、画像中で様々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(DELTA Precision 450)で1枚の画像の星像候補数を400(図8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よそ7分であり、きわめて現実的である。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9に JAXA 所有の入笠山光学観測施設の口径 35cm 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。青い棒グラフはカタログに載っている物体を示し、赤い棒グラフは未知物体を示す。静止軌道上では 16.5 等及び 17.5 等の物体のサイズはおおよそ 60cm 及び 40cm である。図10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等であった。下は未知物体で明るさは17等であった。図10からもわかるように、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。

#### 4. まとめ

JAXA が開発中の高速画像解析手法について紹介した。重ね合わせ法における新たなアルゴリズムの開発やそのアルゴリズムの FPGA ボードへの実装によりこれまで重ね合わせ法の弱点とされてきた解析時間の問題を解決できるみとおしができるようになった。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。今後は検出した未知デブリの軌道決定をするための研究開発をおこない日本独自の静止軌道物体のカタログの作成を行ってきたい。

#### 参考文献

- [1]柳沢俊史他：重ね合わせ法による微小静止デブリの検出，日本航空宇宙学会論文集，Vol51, No.589, pp.61-70, 2003
- [2]T.Yanagisawa et al: Automatic Detection Algorithm for Small Moving Objects, Publ. Astron. Soc. Japan, Vol57, pp. 399-408, 2005
- [3]黒崎裕久，中島厚：入笠山光学観測所におけるスペースデブリ検出技術の開発，第51回宇宙科学技術連合講演会 2F16, 札幌，2007
- [4]柳沢俊史，黒崎裕久，中島厚：JAXA 光学観測施設のデブリ観測の現状，第52回宇宙科学技術連合講演会 2H15, 淡路島，2008