

宇宙デブリ観測技術の研究

R&D on Space Debris Observation Technology

宇宙先進技術研究グループ スペースデブリセクション
Advanced Space Technology Research Group, Space Debris Section

中島厚、柳沢俊史、黒崎裕久
Atsushi Nakajima, Toshifumi Yanagisawa and Hirohisa Kurosaki

Abstract

For the development of the optical observation technologies for space debris, Institute of Aerospace Technology(IAT) of JAXA has preliminary constructed an optical observation facility at Nyukasayama mountain in Nagano Prefecture. 35cm Newtonian optical telescope with 2K2K CCD camera is a main equipment. The telescope is located at an altitude of 1,870 meters. The optical environment of this observation site provides good condition for faint objects detection; 21st magnitude asteroids can be detectable by this small aperture telescope. One of the most important study items in our R&D is to develop an automatic small size GEO debris detection software. In usual case, a long exposure time is necessary to detect faint object by accumulating weak light energy during the time. On the contrary, short exposure observation is necessary for GEO debris detection to avoid the influence of the fixed star streaks image. We have proposed a stacking method for detecting noise level faint GEO debris by accumulating the signals of a number of images, for example, a hundred frames. This paper describes the facility and the developing software.

1. はじめに

軌道上を周回する人工物体はその軌道が確定しているものだけでも 9,000 個以上に達し、1996 年以降高水準で推移している。大部分は運用を停止した衛星や打上げロケット及びこれらの爆発により発生した破片からなるデブリで、運用されている衛星は全体の 6%程度である。今後、観測能力を向上させ、より小さなデブリまで軌道決定を行ない、更により多くの微小破片の存在を明らかにし、正確な宇宙環境の把握を行なう必要がある。高高度デブリに対しては、世界中に光学観測施設が展開されており、最近では比重の小さなデブリ(high area-to-mass ratio)の検出・軌道決定が大きな課題となっている。口径 1 mクラスの望遠鏡では 10cm~20cm サイズのデブリまで検出可能といわれている。

総研本部では、研究開発用小型光学装置として、口径 35cm 望遠鏡を長野県入笠山付近の標高 1,870m に移設整備を行なっている。本望遠鏡により得られた画像から、より小さなデブリを検出するために、重ね合わせ法による画像解析手法を開発してきたが、平成 17 年度にはその試作モデルが完成した。本試作ソフトにより、静止軌道上の衛星を自動検出することが確認されたが、平成 18 年度以降は本ソフトを改良し、20cm サイズのデブリ検出を目指す。また、本技術の民間への波及として、小惑星自動検出ソフトの実用化に成功したが(平成 16 年度)、その後の改良により、平成 17 年度には 21 等級か 22 等級という、口径 1m クラスの望遠鏡でしか検出できないような暗い小惑星も、口径 35cm の小口径望遠鏡で検出可能であることを実証し、重ね合わせ法の能力と、併せて観測サイトの立地条件の良いことが証明された。

2. 研究の概要

平成 17 年度のデブリ観測技術研究として、(1)低軌道デブリに対しては、低軌道衛星追尾装置を用いたライトカーブ特性(光度変化)測定を平成 16 年度に引き続き行ない、また、高高度デブリに対しては、(2)小型光学観測装置の移設整備を行なって画像データ取得を可能にし、(3)重ね合わせ法によるデブリ自動検出ソフトを試作し、その評価を行なった。更に本技術の移転として実用化された、(4)小惑星自動検出ソフトの改良を行い、未知小惑星検出に成功した。

本文では、(2)、(3)及び(4)項についてその成果を報告する。

3. 成果の概要

3. 1 光学観測施設⁽¹⁾

研究開発用として仮設置して予備的な画像取得・解析を行ってきた 35cm 望遠鏡を、長野県高遠町(現、伊那市高遠町)と平成 18 年 3 月に土地貸借契約書を締結し、入笠山に隣接する高遠町平芝に約 300 平方メートルの土地を借用して移設整備を行なった。これらは富士見町のアマチュア観測所に仮設置してあった 35cm 望遠鏡、3m ドーム及び制御棟である。



Fig.1 Overview of the JAXA Nyukasayama optical observation facility(left) and 3m dome(right). 35cm telescope is located in the dome.

Table 1 Main Characteristics of the Facility

Coordinates
(1) Longitude : 138°10' 18"
(2) Latitude : 35°54' 05"
(3) Altitude : 1,870m.
Telescope
Takahashi ϵ -350, ϕ 355mm, $f=1,248$ mm, $F/3.6$, Image Circle ϕ 70mm
Mount type
Showa Kikai, Equatorial Folk-Mount
Dome
Nisshin dome, ϕ 3m
Cameras
(1) NIL 1Kx1K back illuminated CCD, 13μ mx 13μ m, Mechanical and Electric Shutters
(2) NIL 2Kx2K back illum.CCD, 13.5μ mx 13.5μ m, Mech.Shutter, FOV:1.3°x1.3° for ϵ -350

3. 2 デブリ自動検出ソフト(2),(3)

検出限界は主に光学系の口径に依存する。小口径望遠鏡で検出限界を向上させる方法として、多数の画像を重ね合わせ、S/Nを上げることが一般的に行なわれる。デブリ検出においては、デブリが時間と共に画像上を移動するため、その移動に併せて重ね合わせを行なう必要がある。総研本部で開発した手法は、移動量とその方向をパラメータにして、重ね合わせを繰り返し、合致したデブリを検出するものである。図2にその原理図を、図3に汎用ソフトとして試作したソフトのフローチャートを示す。

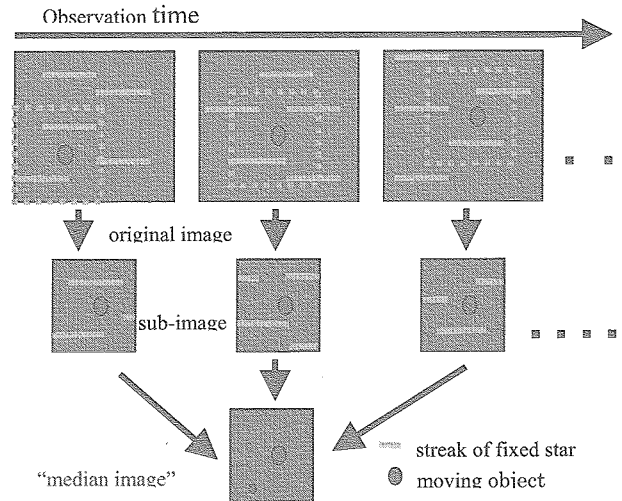


Fig.2 The Principle of the Stacking

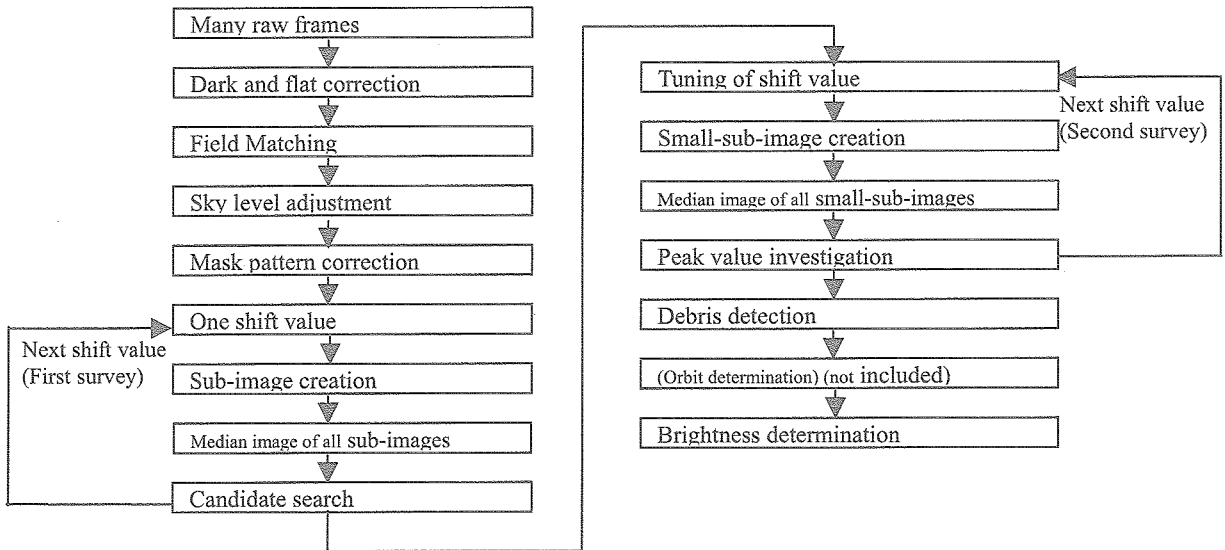


Fig.3 Automatic Debris Detection Software Flow Chart

以下、図4以降のスクリーン画面に沿ってソフトの流れを説明する。使用するデータは、2005年11月3日17時08分30秒(UT)から17時26分20秒(UT)の間に露出10秒で取得した48枚の画像を用いた。

一般に画像処理する場合、CCDピクセルや周辺減光等を補正するためにダーク・フラット補正を行うが、本ソフトにおいても本補正を行なった後の画像を用いて処理する。

図4は取得した画像の中心座標を決定するための画像マッチングで、スターカタログ(GSC)と比較を行なう。本プロセスにより正確な中心座標、ピクセル分解能が決定される。

図5はマスクパターン処理で恒星像を除去

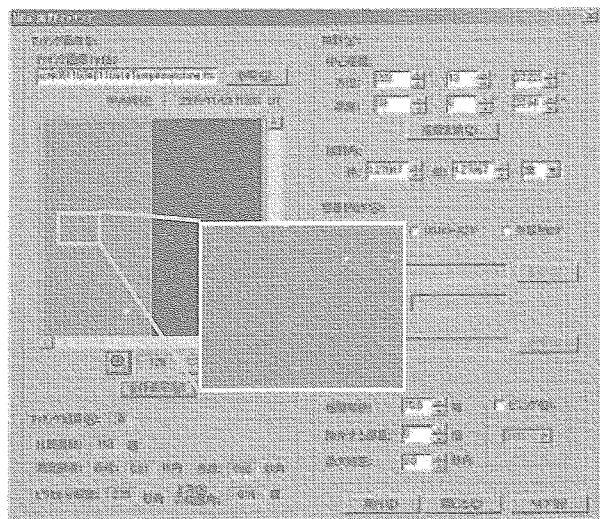
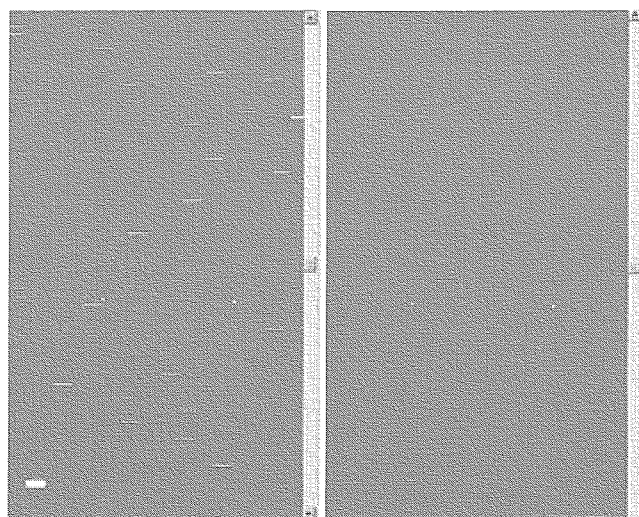


Fig.4 Field Matching

する。デブリ観測においては望遠鏡は固定されているため、デブリはほぼ点像で、恒星は線像となる。この線像をあらかじめ除去することにより後の処理において、明るい恒星像の影響等を除去することが出来る。図 5(b)がマスクパターン処理された後の画像で、恒星像はほぼ消され、静止衛星やデブリが残される。この画像は、図 6 の一次探索処理される。パラメータとして、X 軸、Y 軸方向の移動量、ステップ数及び閾値を任意に与え、この条件を満たすピクセルを全てピックアップする。図 7 の二次探索においては、一次探索で検出されたピクセルのグルーピングと詳細な移動量の決定を行なう。スクリーン上には検出された候補の位置、ピーク値及び広がりが表示さ



(a) Image Data (b) After Star Masking

Fig.5 Mask Pattern Correction

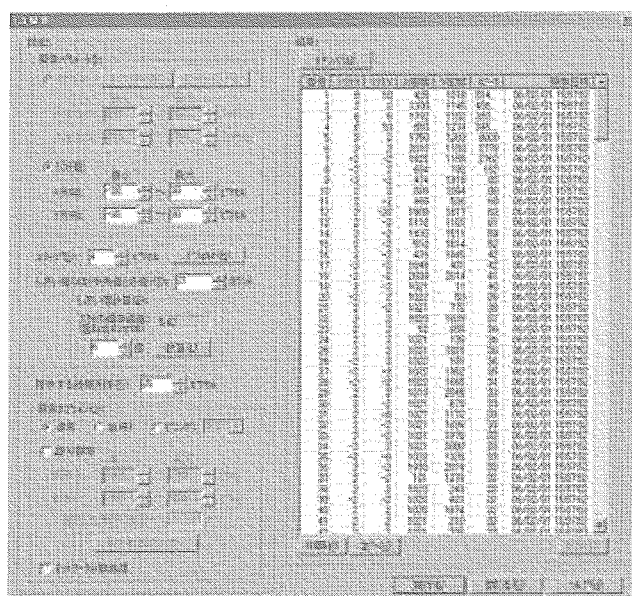


Fig.6 First Survey Results

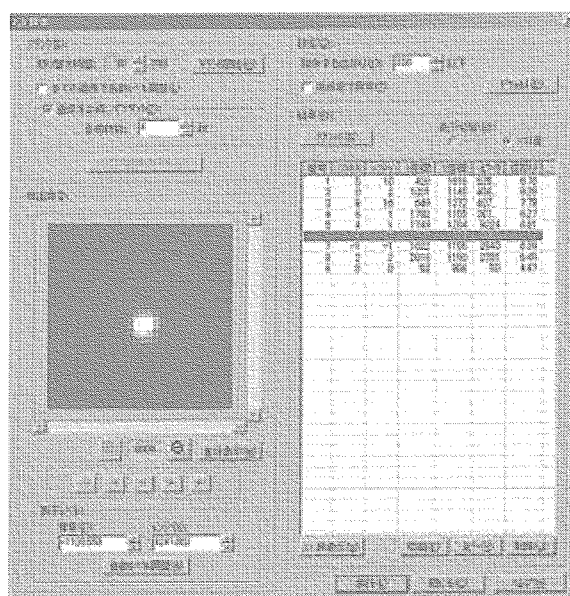


Fig.7 Second Survey Results

れ、その重ね合わせ像が表示される。デブリかノイズかの識別は、この重ね合わせ像の形状とブリンクによる動きから判断される。

二次探索の結果、一つの視野から 9 個の物体が検出され、TLE との比較から、8 個は静止衛星と識別された。図 8 は候補 6 番目のブリンク画像で、BSAT-1B と同定された。図

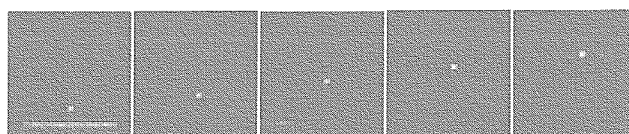


Fig.8 BSAT-1B(Candidate 6) Movement shown in the sub-screen in Fig.7.

8 のブリンク画像は、約 4 分おきの画像を表示したものであり、約 $0.1''/\text{sec}$ と高速で移動していることがわかる。各候補についてはこのようなブリンクにより、優位な信号であることを確認し、次のステップとして、位置の精測、TLE との比較を行い、図 9 に示すような星図の中に表示する。位置情報として、時刻と座標(赤経/赤緯、AZ/EL、直下点経度/緯度等)を得ている。時刻に関しては、10 ミリ秒の精度が必要なため、CCD カメラのシャッター開閉時刻を GPS から入手している。位置精度に関しては、望遠鏡の焦点距離や CCD カメラのピクセルサイズ等に依存するが、本システムでは約 0.5 秒角である。

図 9 は検出された衛星を、直下点経度 110E を中心とした星図に表示させたものである。静止高度で運用されている衛星でも若干の軌道傾斜角を持っているため南北への移動が確認される。

候補 9 番目は、重ね合わせ像が、広がりはある程度のピーク値を持っているため、微小物体と思われたが、ブリンクで確認したところ、移動量が全く無く、特定のピクセルに限定されているためノイズであると判断された。

本画像からは、微小デブリの存在が確認できなかったが、デブリ検出ソフトの基本的な機能の確認が出来たので、今後は観測領域を多くし、20cm サイズのデブリ検出を目指す。

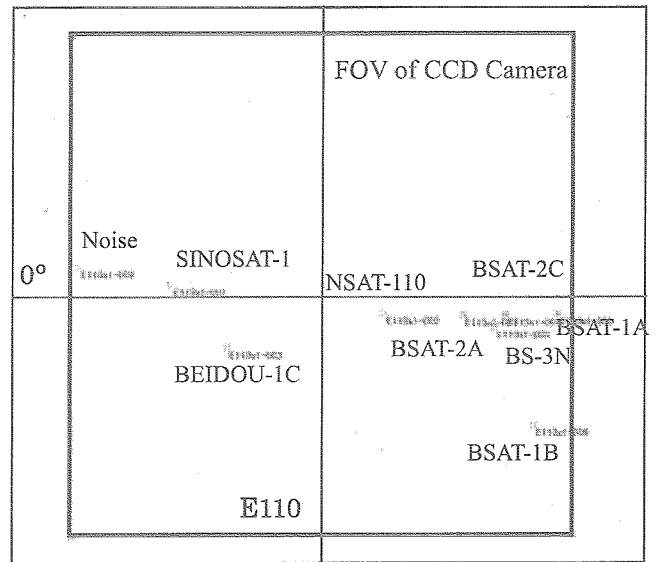


Fig.12 Space Objects Mapping on the Star Chart at Longitude 110 East Area

3. 3 小惑星検出例

総研本部で開発した重ね合わせ法は、小惑星検出ソフトとして既に商品化されているが、重ね合わせ手法の能力を検証する事例として本節でその成果を述べる。

我が国は過去において多くのアマチュア天文家が、小口径の望遠鏡を用いて小惑星発見に寄与しており、その発見数は最近まで全世界の 20% 近くを占めていた。1998 年頃から米国リンカーンラボのリニア望遠鏡(口径 1m の大型望遠鏡)稼働により、約 20 等級の小惑星までの大部分が発見されるようになった。これは我が国のアマチュア天文家の検出能力(約 19 等級)を大きく上回っており、もはや新規発見が不可能な状態となり、2003 年以降は年間一桁台に落ち込んでいる。

本重ね合わせ法は、如何に暗い移動物体を検出するかの技術手法であり、JAXA の成果活用促進制度により実用化された

小惑星検出ソフトは、このような状況を打開するための手法として注目を浴びている。平成 18 年 1 月から 3 月までの JAXA 入笠山光学観測所による観測結果から、22 等級を含む約 60 個の小惑星を発見(仮符号取得)しており、口径 35cm という小口径でも、口径 1m クラスの大型望遠鏡に匹敵する能力のあることが証明された。図 12 は検出の例で、3 分露出、50 枚の画像を重ね合わせた結果、一つの視野の中に 54 個の小惑

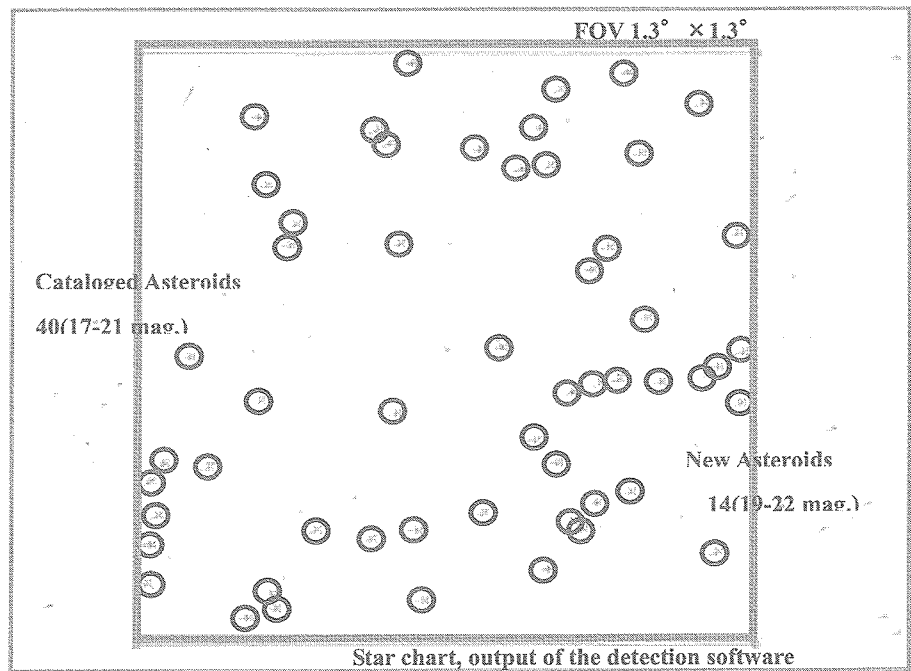


Fig.12 Asteroid Detection Example by the Stacking Method (red circle: catalogued asteroids, blue circle: new asteroids)

星が検出された。その内 40 個は既にカタログ化されている既知小惑星であり、その等級は 17 等級～21 等級である。この視野の中では、更に 14 個の未知小惑星が検出された。これらの等級は 19 等級～22 等級といった非常に暗いものであり、従来を検出能力を大きく上回るものである。

上記の例から、重ね合わせ法により、従来手法に比較して約 2 等級暗い小惑星まで検出できることが判明した。通常ではノイズに埋もれて確認できない信号を、重ね合わせにより優位な信号として検出可能となった。

4. まとめ

平成 17 年度における宇宙デブリの光学観測技術研究は、JAXA 入笠山光学観測所の整備を進めると共に、35cm 望遠鏡で取得した画像を、汎用性を高めたデブリ自動検出ソフトで解析し、静止衛星の検出及び同定が出来ることが確認された。他方、総研本部で開発した重ね合わせ法は、小惑星検出ソフトとして商品化されており、重ね合わせ法の能力並びに移設整備している観測サイトの光学観測環境を評価するために、小惑星検出を試みた。その結果、口径 35cm の小口径望遠鏡でも、本画像処理技術により、口径 1m クラスの望遠鏡に匹敵する検出能力があることが判明した。今後は、同様の手法で試作したデブリ検出ソフトの改良を行ないつつ、20cm サイズの静止デブリ検出を目指した開発を進める予定である。

[参考文献]

- [1] A.Nakajima et.al.:Optical Observation Facilities for Space Debris and Moving Objects, IAC-05-B6.3.07, IAC 2005, Fukuoka, Oct.17-21, 2005
- [2] A.Nakajima et.al.:R&D on Space Debris Optical Observation Technologies, 24th ISTS, Miyazaki, June2004
- [3] T.Yanagisawa et.al.:The Stacking Method:The Technique to Detect Small Size of GEO Debris, American Astronautical Society, vol.109, Oct. 2004