

小型望遠鏡による NEO 探索システム —近地球天体 2017 BK, 2017 BN92 の発見！—

柳沢俊史¹⁾・黒崎裕久¹⁾・小田寛¹⁾・池永敏憲¹⁾・吉川真¹⁾
伊藤孝士²⁾・吉田二美²⁾・奥村真一郎³⁾・樋口有理可⁴⁾

¹⁾JAXA ²⁾国立天文台 ³⁾日本スペースガード協会 ⁴⁾東京工業大学

NEO observation system using small telescopes — Discovery of NEOs, 2017BK and 2017BN92 —

Toshifumi YANAGISAWA¹⁾, Hirohisa KUROSAKI¹⁾, Hiroshi ODA¹⁾, Toshinori IKENAGA¹⁾,
Makoto YOSHIKAWA¹⁾, Takashi ITO²⁾, Fumi YOSHIDA²⁾, Shin-ichiro OKUMURA³⁾,
and Arika HIGUCHI²⁾

Abstract

The research and development division of JAXA is developing observation technology for faint moving objects such as asteroid and space debris. JAXA has started the collaboration with National Astronomical Observatory of Japan and Japan Spaceguard Agency on the R&D for the new NEO search system since last April. The system has very different strategy for NEO observation from the existing NEO search programs like Pan-Starrs, CSS and so on. The system may innovate on the present NEO survey concept. We discovered two NEOs using the 18cm telescopes this January. The discovery of NEOs in Japan was after a lapse of about 9 years. In this paper, the detail of the new system, the comparison with the existing NEO survey and the test observation in which two NEOs were discovered, will be explained.

Key Words: NEO, Data analysis, FPGA

1 序論

地球接近天体の早期発見、軌道決定は人類が未来永劫存続するためにも積極的に取り組むべき課題の一つである。世界には多くの地球接近天体（NEO）サーベイプログラムが存在するが、多くが同様の観測手法、データ解析手法をもちいている。そのため特定の動きをもつNEOが世界のサーベイ観測で検出できていない可能性がある。本論文ではこのようなNEOを有効にかつ安価に観測する新しい観測システムを提案する。新しい観測システムはこれまでのNEO観測概念を一新する可能性を秘めている。2017年1月に提案する観測システムの基礎をなす観測装置をもちいて試験観測を実施した結果、2つの近地球天体をたてつづけに発見した。本試験観測の詳細についても説明したい。

2 未発見NEO群の可能性

世界ではCSS、Pan-STARRS、Linear、Biseiなど多くの観測グループがNEO探索を每晚実施している。しかし、これらの観測グループは基本的には1–2mの望

遠鏡に大型のCCDカメラを設置して数平方度の観測視野を確保して1つの視野に数10秒—数分の露出時間をかけ数回同一視野を観測するという手法を用いている。NEOの検出手法は数枚の同一視野の画像から恒星間を移動していくNEOを検出するというものでこれもほぼ全ての観測グループが同じ手法を用いている。全ての観測グループが同一の観測手法を用いた場合は、その観測手法が検出を不得意とする特定のNEO群の多くを見逃す可能性がある。

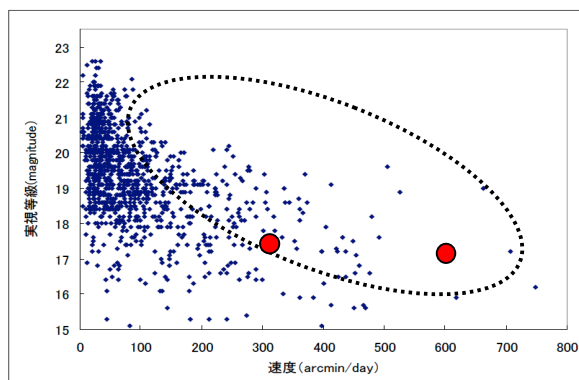


図1: NEO 発見時の明るさと速度

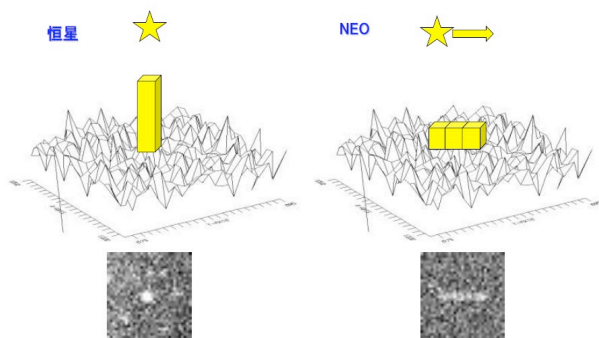


図 2 : トレイルロス効果

2. 1 速度—実視等級分布

図 1 にこれまでに発見されていた NEO の発見時の速度と実視等級分布を示す。横軸が速度で分角を単位とした日々運動量である。縦軸が実視 V 等級で値が高いほど暗いことを意味する。図 1 から暗い NEO は遅い時にのみ検出されていることがわかる。

2. 2 トレイルロス効果

2. 1 のような状況になる原因はトレイルロス効果によると考えられる。トレイルロス効果とは小惑星、彗星、宇宙デブリ等の移動物体を観測する際に起きる効果で移動する物体からの光子が検出センサ (CCD や CMOS など) の複数の画素に線状に分散されるため信号雑音比が低下する現象である。図 2 にトレイルロス効果の例を示す。左は恒星を観測したもので、恒星からの光子は中央付近の数画素に集中しているため信号雑音比が高くなっている。一方、同程度の明るさの移動物体を検出したものが右で移動方向にそって複数の画素に物体からの光子が分散され、信号雑音比がおおきく低下し画像上で認識しづらくなっていることがわかる。未発見の NEO はその動きを把握することは不可能であるため、望遠鏡は恒星追尾で待ち受けるしかなく、高速の NEO の場合はトレイルロスの効果がより顕著にあらわれる。NEO のサイズが小さければなおさらである。以上のような議論から既存の観測手法では地球



図 3 : NEO 観測網

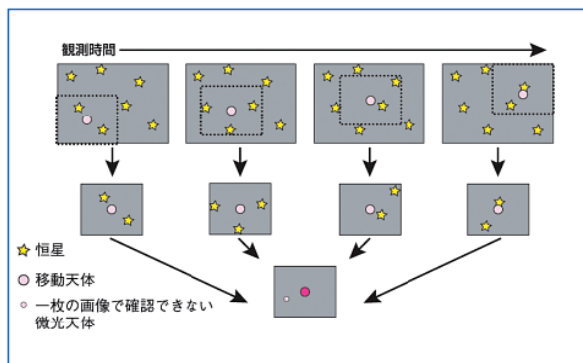
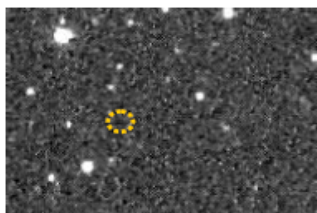


図 4 : 移動物体検出手法

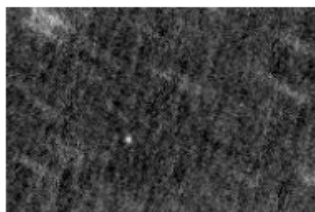
のごく近傍を高速で移動する NEO を取り逃している可能性が高い。

3 新規 NEO 発見手法の提案

2章において、従来の観測手法では地球近傍を高速で移動する NEO の検出が不十分であることが示された。これらの NEO、具体的には図 1 中の円で囲まれた領域に存在するであろう NEO を効率よく検出するため、図 3 に示すような多数の小口径望遠鏡を利用し天球の広範な領域を一度に監視する観測システムを提案している。我々はこれまで 1 枚の画像では確認できない非常に暗い宇宙デブリ等の移動物体を検出する技術を開発してきた¹⁻³⁾。短い露出時間で撮影された数 10 枚の CCD 画像について図 4 に示すように宇宙デブリの移動方向を仮定して画像の切り取りを行い、切り取られた画像について画像の重ね合わせを行う等の雑音軽減のための画像処理を施す。このような作業をあらゆる移動方向を仮定して実施する。これにより仮定した移動方向の 1 つと偶然同じ動きを示す非常に暗い宇宙デブリの検出が可能になる。図 5 にこの手法による移動物体の検出例を示す。(a) は 1 枚の CCD 画像であり、(b) は 40 枚の画像を本手法で処理した最終画像である。1 つの移動物体が検出されていることがわかる。この移動物体は (a) の円内に存在するはずであるが雑音に埋もれて確認することはできない。また、一枚の画像では確認できないほど暗い NEO を検出するためには図 4 のような操作をあらゆる移動方向を仮定して実施しなくてはならず、膨大な解析時間を要する。これを克服するために図 4 のアルゴリズムを専用で実施する FPGA ボードも開発した (図 6)。このような技術を利用して新たな NEO 検出手法を開発している。この手法が有効に機能すれば 25cm 程度の小口径の望遠鏡でも数 m の大口径望遠鏡並みの検出能力を発揮することができる。また、本手法の最大の利点は画像を移動方向に重ね合わせるため、これまでの観測グループがトレイルロスによって検出を逃していた地球近傍で高速



(a)



(b)

図 5 : 検出例



図 6 : 専用 FPGA ボード

移動するNEOの検出が可能になることである。

4 試験観測

3章の新規NEO発見手法の有効性を確かめるために試験観測をJAXA入笠山光学観測施設で2017年1月17, 25, 26, 31日の4日間実施した。タカハシ製望遠鏡ε 180ED (口径180mm、焦点距離500mm) 2台に対し、1台にFLI製CCDカメラML23042を、もう1台にCanon製CMOSを装着して異なる視野を指向するよう望遠鏡を赤道儀に設置した。CCDカメラは約3.5×3.5°の視野をカバーしCMOSは4.4×2.5°の視野をカバーする。1回の露光時間をCCDは24秒、CMOSは26秒 (CCDの読み出し時間2秒程度に対しCMOSは読み出し時間を無視できるためそれだけ長い露出時間をとることができる。)として各視野で32枚の画像を取得する。1視野の観測時間を15分とし一晩40領域のサーベイ観測を行った。一晩で観測できる視野は約930平方度である。

CCD、CMOSの各センサーは専用のWindowsマシンで制御され、データはNASシステムに蓄えられる。解析はFPGAを内蔵したPC2台をそれぞれのセンサーの主要部分の解析にあて、そのほか9台のリナックスマシンを1次解析に、1台のWindowsマシンを検出物体の

確認、位置推定用を利用した。リナックスマシンは2core搭載であるため2つのプロセスを同時に並列で処理することが可能である。15分おきに吐き出される32枚の画像データのすべての解析には2時間を要するが、9台のリナックスマシンを同時駆動させているため解析時間が観測時間を超えることはなく準リアルタイムで解析結果を得ることができる。検出物体の確認、位置推定用のWindowsマシンにはアストローツ製のステラハンタープロフェッショナルがインストールされている。

1月17日及び31日のサーベイ観測中に高速で移動するNEOを1個ずつ発見した(2017 BK及び2017 BN92)。両天体ともステラハンターで位置確認後、数時間後に追跡観測を行い、4点の観測位置を薄明前までにMinor Planet Centerへ報告した。それぞれのNEOの情報を表1、2に示す。1月17日に発見した2017 BKについて、観測画像中に該当天体がいるとされる部分を切り出したもの、8枚の画像を重ね合わせたもの、32枚の画像を重ね合わせたものを図7に示す。1枚の観測画像ではほとんど確認ができないほど暗いということがよくわかる。また、図8に2017 BKの発見時の軌道を示す。水色の軌道が地球、赤が火星、桃色が2017 BKである。我々の狙いどおり、地球近傍を高速でかすめている時期に捉えていることがわかる。2017 BKの日々運動量は5°であった。検出時の実視等級は17.5等で絶対等級は24等、およそ50mサイズで発見から5日後の2017年1月22日に地球からおよそ600万km (月軌道の約16倍)

表 1 : 2017 BK の詳細

元期	2017-02-16.0
離心率	0.4902647
軌道長半径 (AU)	1.9107853
軌道傾斜角 (°)	6.64014
昇交点経度 (°)	110.9219
近日点引数 (°)	39.62114
平均近点角 (°)	0.82779
絶対等級	24
スロープパラメータ	0.15

表 2 : 2017 BN92 の詳細

元期	2017-02-16.0
離心率	0.4833413
軌道長半径 (AU)	1.922712
軌道傾斜角 (°)	1.0737
昇交点経度 (°)	324.10877
近日点引数 (°)	159.83225
平均近点角 (°)	7.94639
絶対等級	25.6
スロープパラメータ	0.15

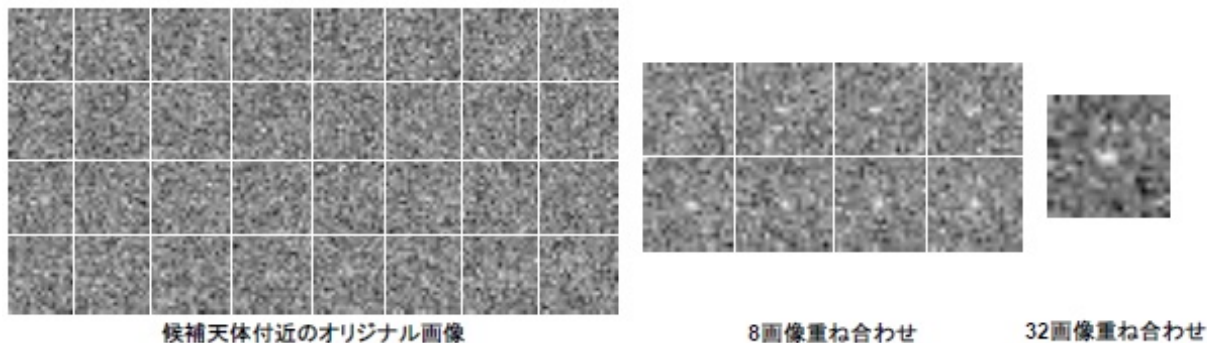


図7：2017 BKの観測画像

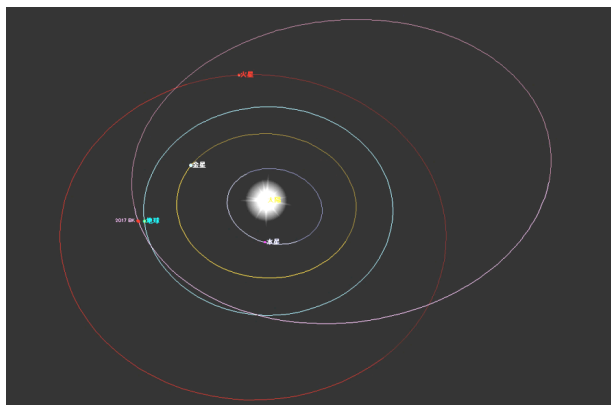


図8：2017 BKの発見時の暫定軌道

まで接近した。図1に今回発見した2つのNEOの位置を赤丸で示した。提案されている観測手法が既存の観測手法ではとらえられない高速のNEOの領域に対する検出能力があることがわかる。

5 議論

本試験観測では2台の望遠鏡を利用して4日間のサーベイ観測を実施し、2個のNEOを立て続けに発見した。日本でのNEO発見はおよそ9年ぶりであるが、試験観測での発見頻度をみると我々が推測しているとおり、高速で地球近傍をかすめているNEOの相当数が未発見である可能性が高い。図3に示すような多数の小型望遠鏡を利用した観測網を構築することによりさらに多数のNEO、しかも地球に接近する危険なものを選択的かつ効率的に発見できるはずである。表1に既存

表3：既存手法と提案手法の比較

	既存手法	提案手法
集光力	○	×
視野	×	○
低速NEO	○	×
高速NEO	×	◎
コスト	×	○
投資リスク	×	○
観測の利便性	×	○

の観測手法と提案手法の比較を示す。望遠鏡の集光力に注目した場合、既存手法は1-2m級の望遠鏡を利用しているため我々が利用している18cmの小型望遠鏡と比較して圧倒的に勝るものがある。しかしこの集光力は高速で移動する物体に対しては2章で述べたようにトレイルロスの効果であまり有効に働かない。特に大口径になればなるほど相対的に視野は狭くなり同じ速度のNEOがつくるトレイルもセンサー上では長くなってしまい余計不利になる。NEOサーベイのようにどこにいるかわからない対象を探索する場合は視野が広いほうが断然有利であるためそういう意味でも小口径の望遠鏡のほうが有利である。低速のNEOについてはトレイルロスの影響が少ないため既存手法が有利であるが高速NEOの検出に関してはトレイルロスの影響が少ない短時間露出の画像を多数利用する提案手法の方が圧倒的に有利であり、試験観測結果もそれを証明している。コストに関しても提案手法が有利である。一般に望遠鏡の建設費用は口径の3乗に比例するといわれている。1m望遠鏡の建設には数億円程度かかるが18cm望遠鏡については数10万で購入できる。これは大変重要な要素で、より迅速に研究開発することができる。投資のリスクという面でも提案手法は有利である。1-2mクラスのNEOサーベイ望遠鏡を購入しようとした場合、多くが新規設計の望遠鏡となり光学設計、鏡面精度や機械精度、など多くの厳しい要求仕様をクリアーする必要がある。とくにNEOサーベイには広視野が要求されるため必然的に無理な光学設計となり、巨額の資金投入にもかかわらず、要求仕様を満たさない可能性がある。市販の小型望遠鏡の方は、多くのアマチュア天文家に評価されたものを安価に購入できるため投資リスクは極めて低い。観測の利便性についても提案手法が有利である。提案手法は基本、豪州等、観測条件の良い場所における遠隔観測を想定している。簡易なスライディングルーフに複数台の望遠鏡を設置し日本から遠隔で観測、解析を実施する。専用の建築物や観測要員を調達する必要がない。また、故障時について、既存手法の場合、大型の観測装置1

台を運用しているため、些細な不具合でも全体の観測が長期間中断される可能性がある。提案手法は複数の望遠鏡を独立に制御できるため、1つの望遠鏡が不具合により稼働しなくても全体へのインパクトは少ない。また、市販品であるため不具合部分を修理せずに即時交換することが可能であり、復旧に要する時間を極力短縮できる。

6 結論

我々は、Pas-StarrsやCSS等既存のNEOサーベイチームとは全く異なる戦略に基づく観測法を提案しており、これまでのNEOサーベイの概念を一新する可能性を秘めている。本手法は小型の望遠鏡で得られる多数の画像をFPGAシステムを利用して解析することにより、既存のサーベイチームでは発見できなかった地球近傍を高速に移動するNEOを検出できる。

今年1月に18cm望遠鏡及び専用解析FPGAボードを利用した試験観測により2個のNEOを連続発見し、本手法の有効性を示すことができた。

今後は本システムでさらに検出数を増やすと同時に大規模化をめざして新規予算の獲得を試みたい。

謝辞

本研究は科研費（16K05546）の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) Yanagisawa, T., & Kurosaki, H. 2012, Trans.JSASS Aero Tech. Japan, 10, Pr_29
- 2) Yanagisawa, T., et al. 2005, PASJ, 57, 399
- 3) Yanagisawa, T., et al, 2002, Trans.JSASS, 44, 190

(2017年5月29日受付, 2017年6月1日受理)