

Tomo-e Gozenを利用した近地球天体及び 宇宙デブリ観測の可能性

JAXA：柳沢俊史、黒崎裕久、吉川真

JSGA：奥村真一郎、浦川聖太郎

東大：酒向重行、大澤亮

国立天文台：伊藤孝士、吉田二美

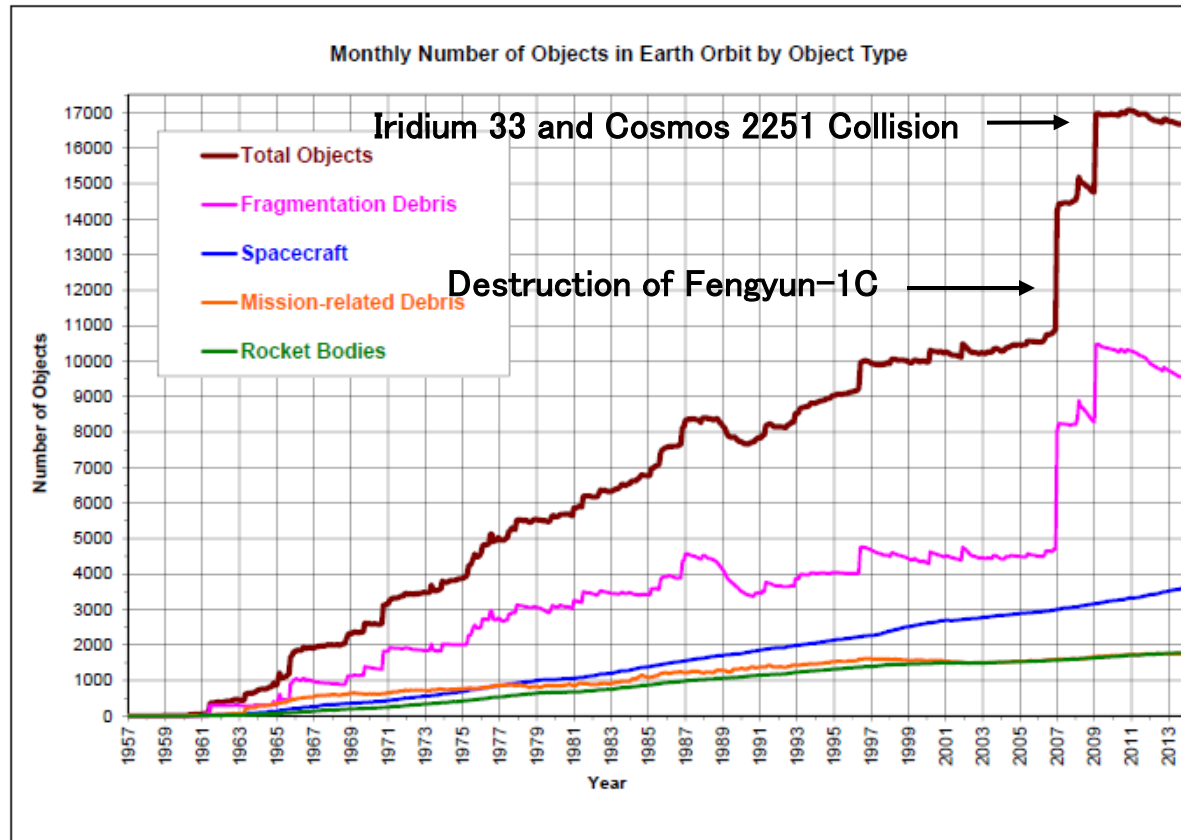
序論

宇宙航空研究開発機構 研究開発部門では、宇宙デブリ問題を解決するために観測、防御、発生防止の分野において研究開発を進めている。観測の分野ではスペースデブリの状況把握のために光学観測に関する技術の研究開発を進めている。

また、今年度より国立天文台、日本スペースガード協会と共同で関連技術を利用した近地球天体発見技術の研究開発に着手し成果を挙げつつある。

Tomo-e Gozenは広視野、大集光力、高時間分解能を有した世界唯一の検出器であり、宇宙デブリ及び地球近傍天体の発見に適用した場合非常に大きな成果をあげることが期待されている。これらの物体に対するTomo-e Gozenの有効性を紹介するとともに、Tomo-e PMの試験観測データ利用してこれら移動物体の検出を試みたのでその結果を紹介したい。

背景



現在カタログ化されている人工の宇宙物体(10cm以上)は16000個程度、1mm以上のものは1.5億個程度存在するといわれている。

中国の衛星破壊実験や衛星同士の衝突により低軌道(軌道高度800-1000km付近、日本の多くの観測衛星が滞在)の環境がデブリにより急速に悪化している。

公開されている軌道データ(TLE)は精度が悪く、接近衝突解析をするさいの誤差範囲がおおきくなる。低軌道上の日本の衛星への接近衝突警報は米国JSpOCに頼っているが、情報の精度がどの程度のものか全く不明。

背景



デブリの分布状況

静止軌道デブリの 光学観測技術



- 唯一の貴重な軌道
- 現在低軌道ほど混雑していない
- 大気抵抗による軌道低下はない
- 1m以下の状況は不明

JAXA入笠山光学観測施設

宇宙デブリ光学観測技術の研究開発を実施。



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 ε -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

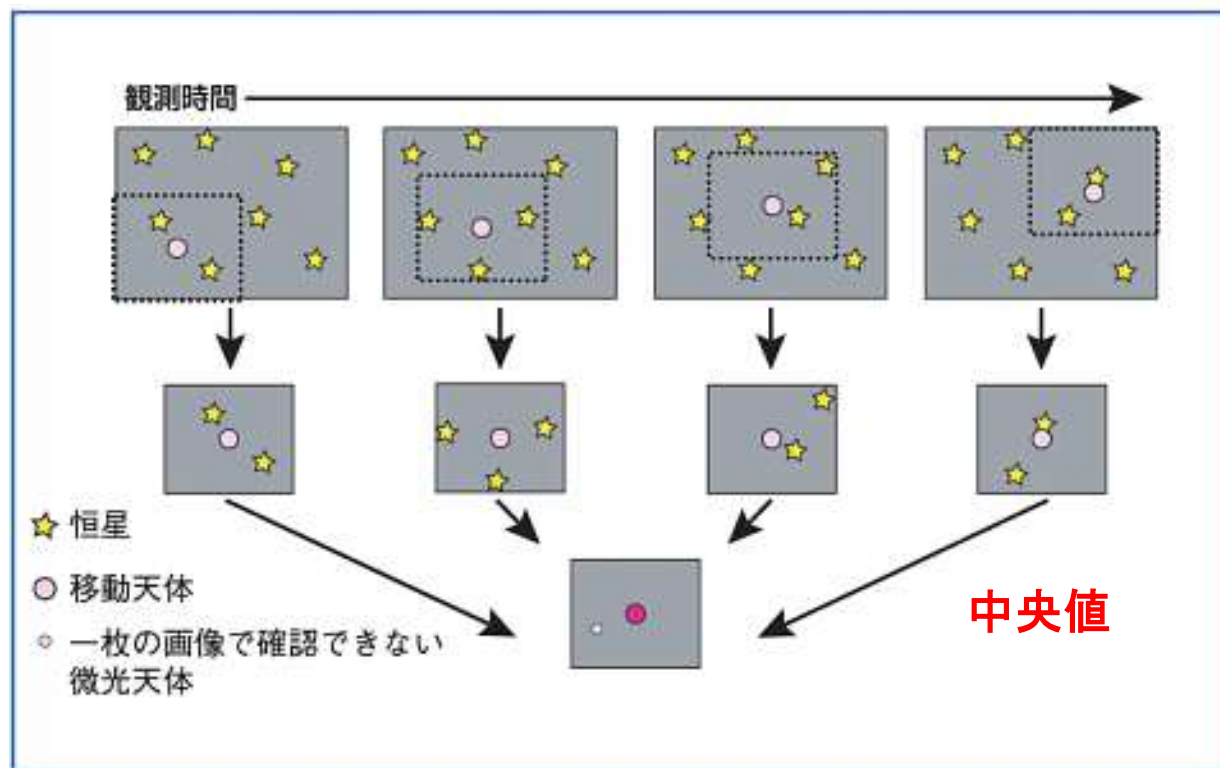


カメラ FLI製23042
2K2K裏面照射型(e2v)
視野角 $1.4 \times 1.4^\circ$

JAXAで開発中の移動物体検出手法(重ね合わせ法)

多数の画像を利用することにより 1 枚の画像では検出できない暗い移動物体を検出する技術。

重ね合わせ法概念図

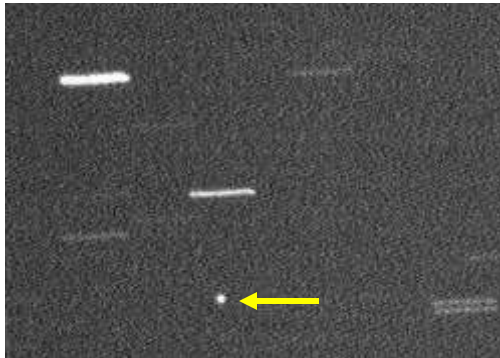


移動物体の動きを仮定し、複数の観測画像の切り取りを行う。切り取られた画像の中央値画像を作成することにより暗い移動物体の検出が可能になる。

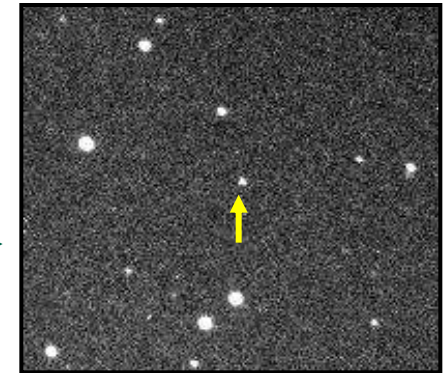
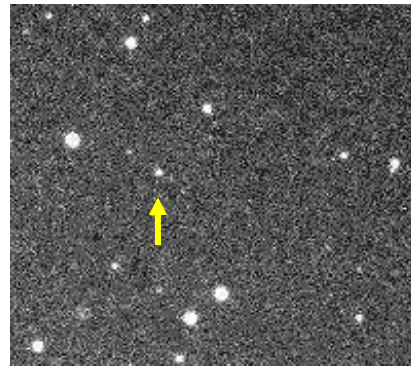
従来の検出方法との比較

従来の検出法

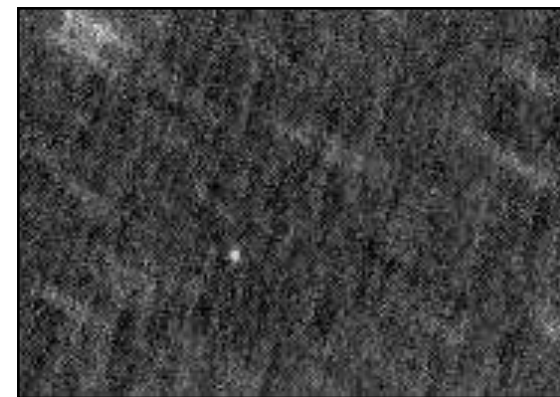
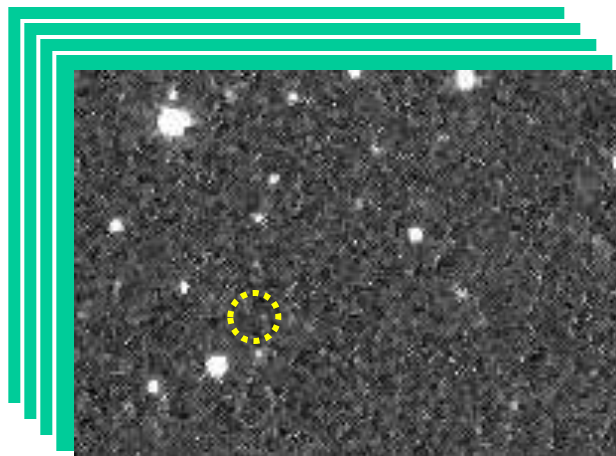
静止デブリ



小惑星

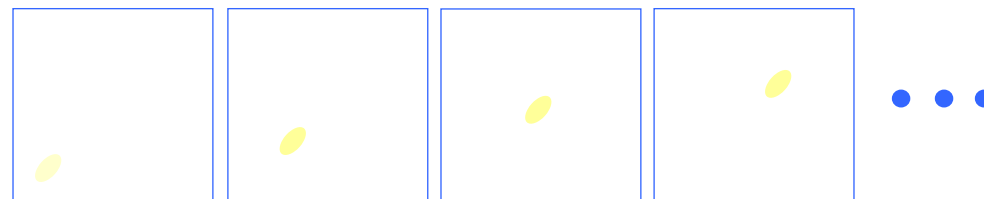


重ね合わせ法



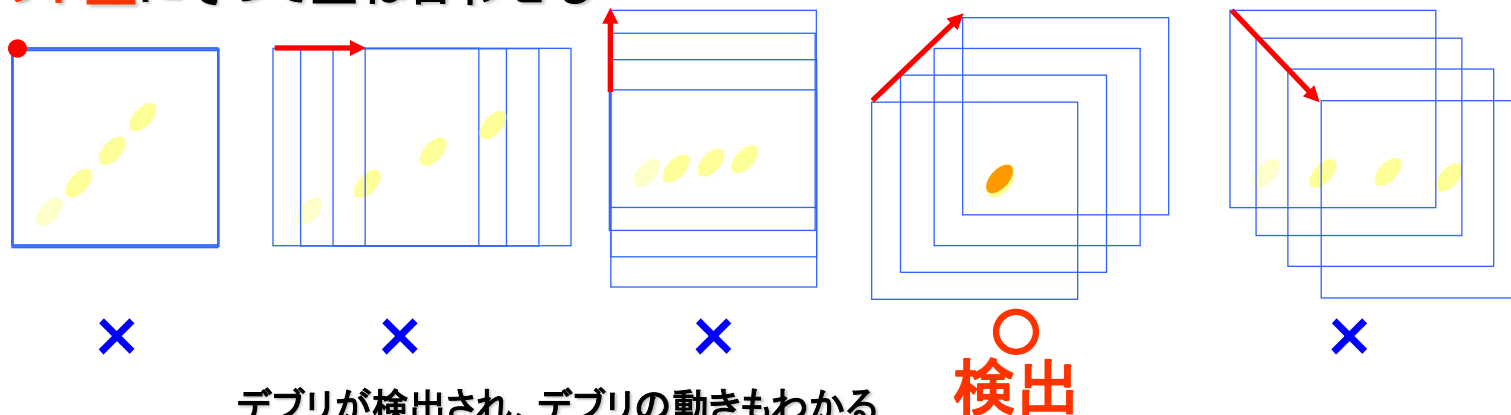
重ね合わせ法の弱点

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。



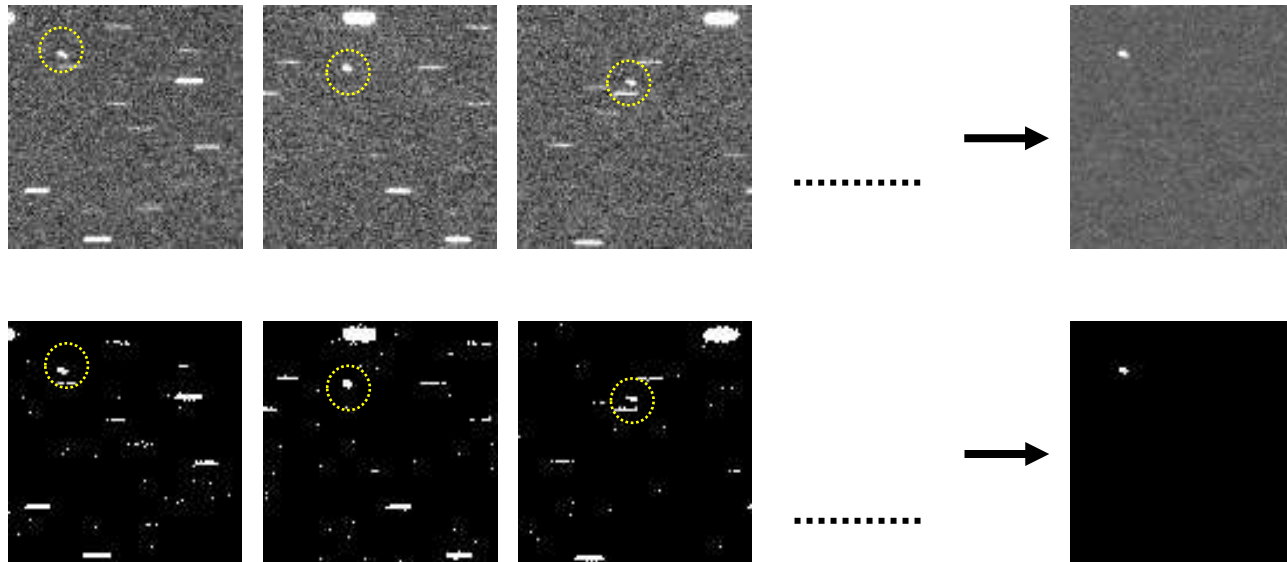
市販のPC1台で要する解析時間は280時間！！

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

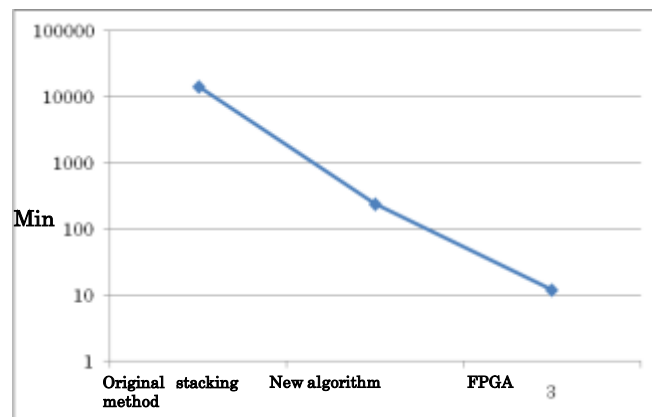
新アルゴリズムをFPGAに実装しさらなる高速化を図る。



Nallatech社製FPGAボード H101-PCIXM



iDAQs社製FPGAボードシステム



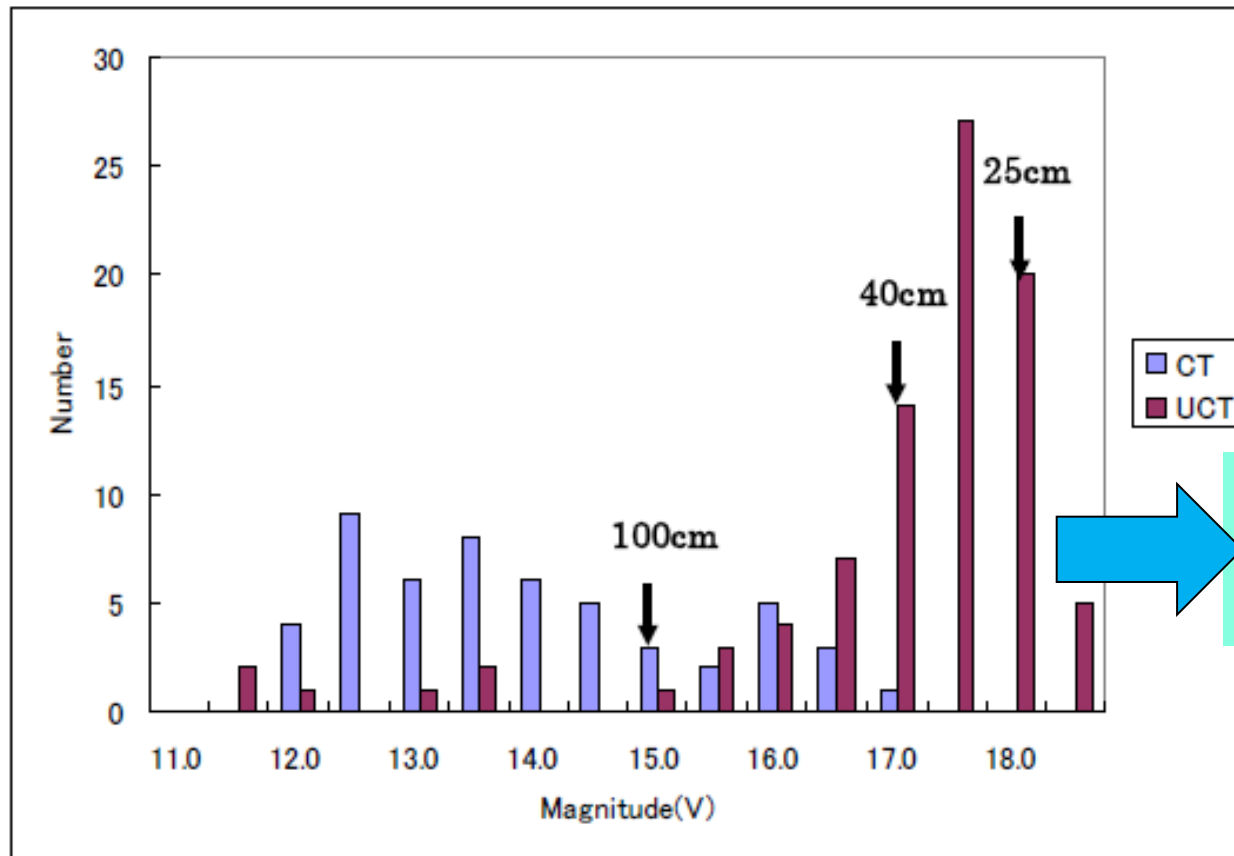
解析時間の変化

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

Titan3C破片の観測(九大との共同研究)

九大のデブリ伝播モデルを利用してTitan3Cの破片の分布を予測し観測を効率的に実施。FPGA版重ね合わせ法で解析を行い、多数のTitan3C破片と思われるデブリを検出した。



Tomo-e Gozenによる検出が期待される領域

検出した物体の明るさ分布

デブリ観測技術を利用した 近地球天体の観測



- デブリ観測技術が適用できる。
- 多数の近地球天体の存在が示唆されている。

デブリ観測技術を利用したNEOサーベイの提案

世界には多くのNEOサーベイプログラムが存在する。 CSS, Linear, Space Watch, Bisei, Pan-Starrsなど。

基本的な観測、解析手法は同じ。

1-2m級望遠鏡＋大面積CCDカメラ＋Blink。

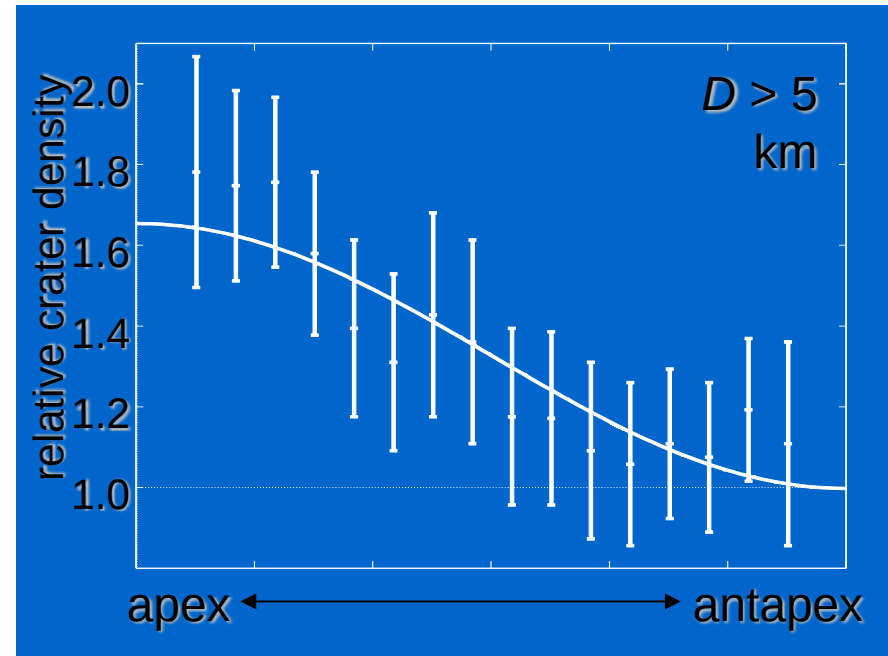
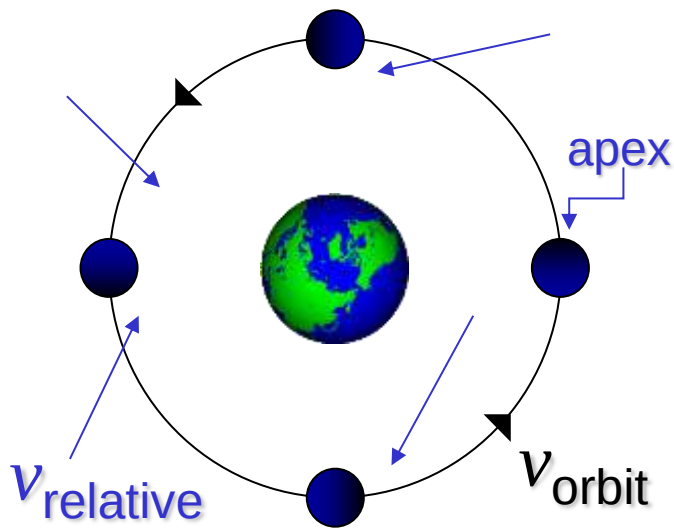
観測視野：数平方度

露出時間：数10秒－数分

特定の非常に近傍に存在するNEO群を見落としている可能性がある。

状況証拠 1 : 月の若いクレータの非対称分布

国立天文台、伊藤孝士氏の仕事 (Ito 2009)



Morota and Furumoto (2003)

相対速度が小さい



強い非対称性

状況証拠 2 : Mini moonの発見

Granvik et al. (2012)が、直径10cmサイズのTCO(mini-moon)が常に存在することを数値的に証明。

1.0m ; 2個
0.5m ; 1ダース
0.1m ; 1000個
常に存在する!

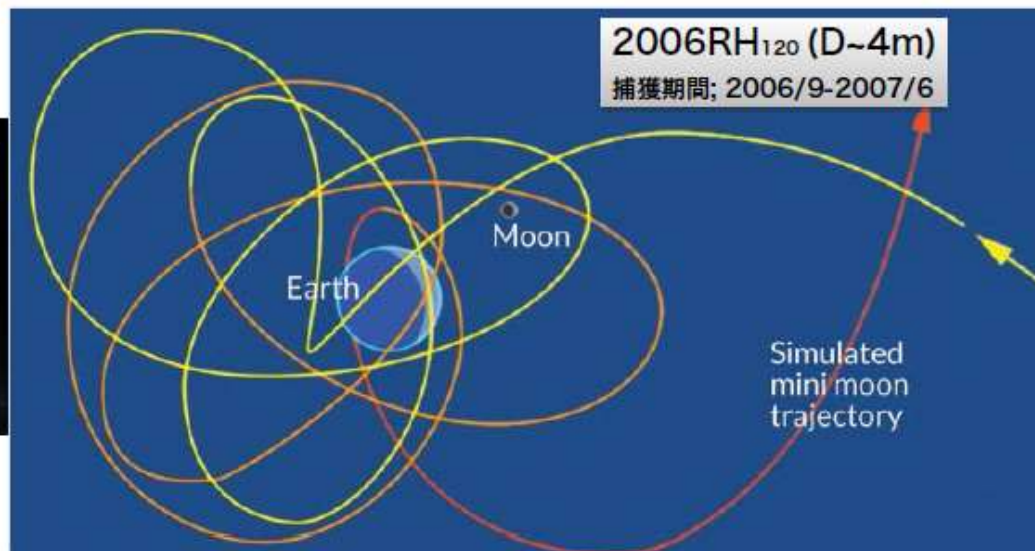


Asteroid 2016 HO3: Earth's Constant Companion



D~40-100m
100年前に捕獲
今後数100年間存在

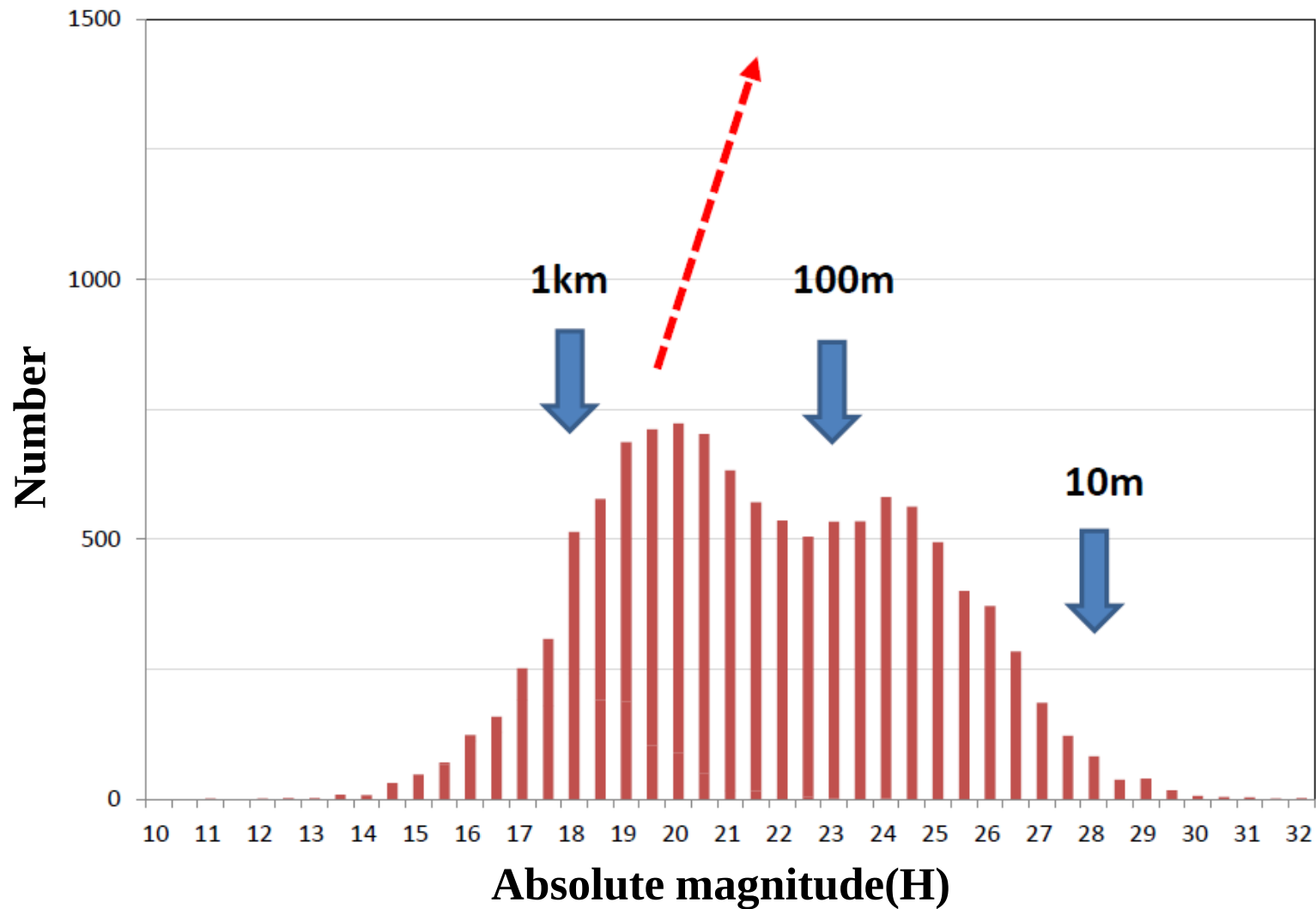
$a=1.0012$, $e=0.1041$, $i=7.7714$
 $P=1.0018$ yr



日本大学 阿部新助氏提供

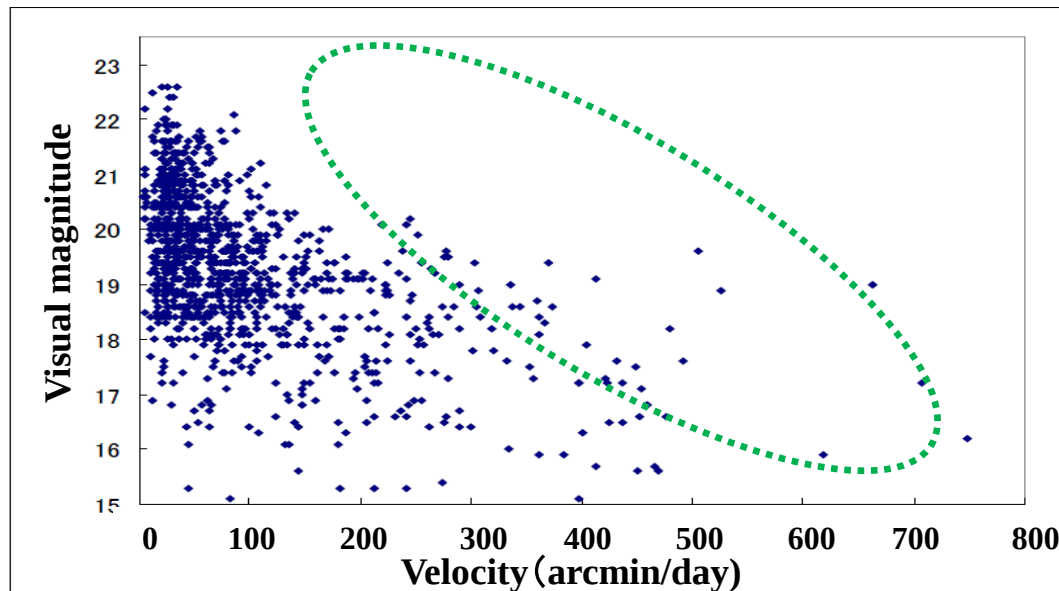
状況証拠 3 : 観測データ 1

— Size distribution of NEO —

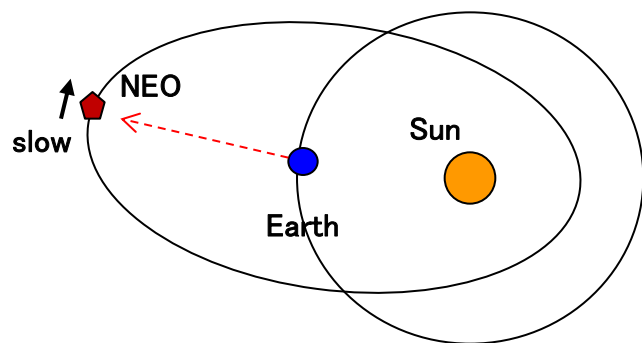


状況証拠 3 : 観測データ 2

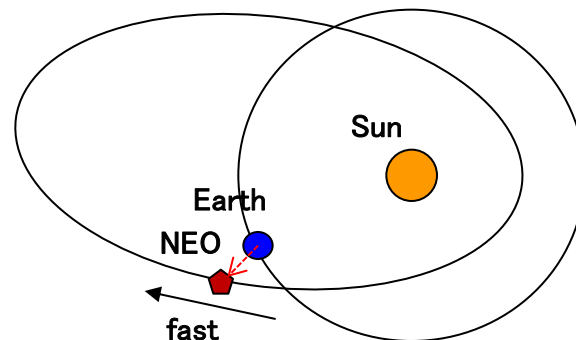
Velocity vs brightness of the first detection of NEOs



Dark NEOs were detected only at low velocities which means those NEOs are dark not because of the sizes but the distances. Fast moving NEOs which come very close to the Earth will be detected using small telescopes and our technologies



Conventional method: Detect slow NEOs with large telescope



New one: Detect fast NEOs with small telescopes

状況証拠4：トレイルロス

Relative light
collection power

3.5

3

2.5

2

1.5

1

0.5

0

The effect of the trail loss

Field star observation
with a large telescope

Moving object (MBA) observation
with a large telescope

Moving object ($2 \times$ MBA) observation
with a large telescope

Moving object ($4 \times$ MBA) observation
with a large telescope

Moving object ($8 \times$ MBA) observation
with a large telescope

← Our proposal

0

2

4

6

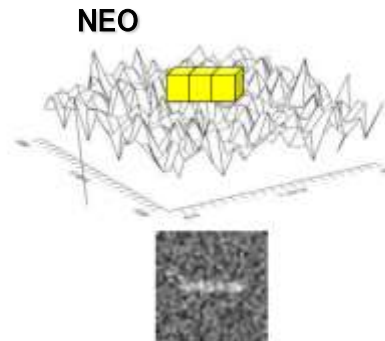
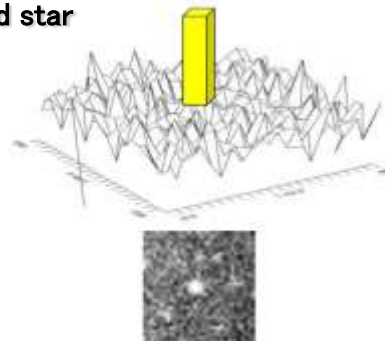
8

10

Exposure time(min)

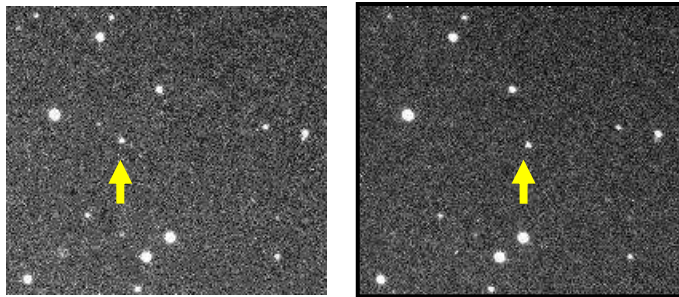
Field star

NEO

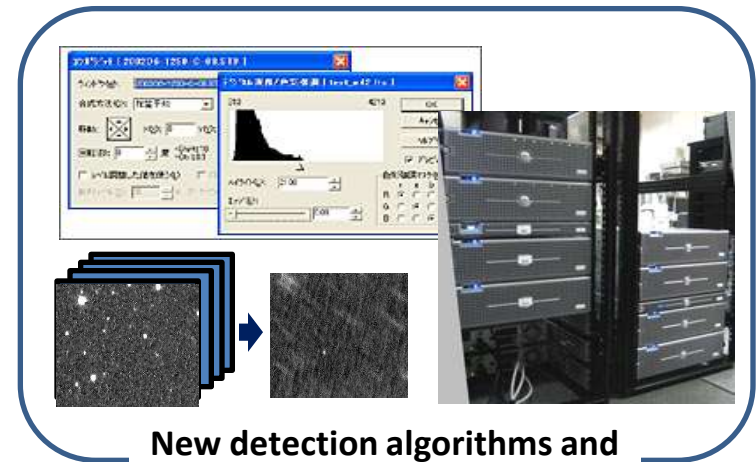


NEO search using our technologies

Conventional detection method for NEOs are taking several frames with some interval, comparing those frames and finding out moving objects among field stars. However, the method has been shown that it can't detect fast moving NEOs. We are developing the image processing techniques which can detect those NEOs. Fast moving NEOs is very close to the Earth which means small telescopes are enough for small NEOs using the image processing technologies.



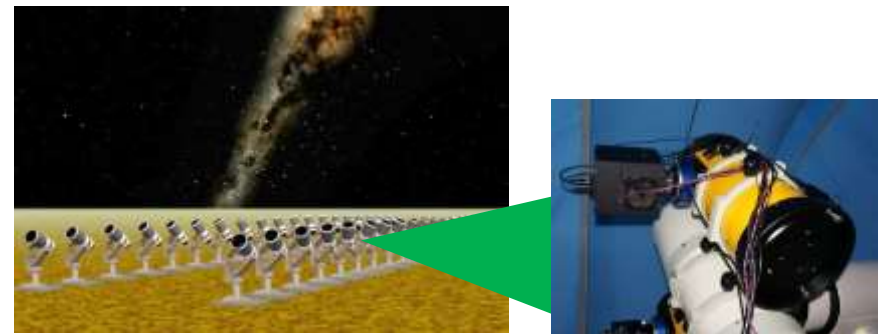
Conventional detection method for NEOs



New detection algorithms and fast data analysis with FPGAs



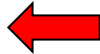
One large telescope



Numerous small telescopes

NEO search using our technologies

Comparison between conventional method and the new method

	Conventional method	New method
Photon collection	○	×
FOV	×	○
Slow NEOs	○	×
Fast NEOs	×	◎ 
Cost	×	○
Investment risk	×	○
Operational convenience	×	○

Test Observation

Test observations were carried out using the 18cm-telescopes at Mt. Nyukasa optical facility in Jan 17, 25, 26, 31 of 2016.



Telescope: Takahashi ε180ED (D:180mm F: 500mm)

Sensor: FLI ML23042, Canon CMOS

Observation mode: 24-sec exposure × 32 frames × 40sets / day

Total sky coverage: 986 square degrees /day

Limiting magnitude: 18.4-magnitude up to 5.3-degree/day

We've discovered two NEOs (2017 BK, 2017 BN92)!!

2017 BK

Test Observation



Candidates in the 32 original frames.

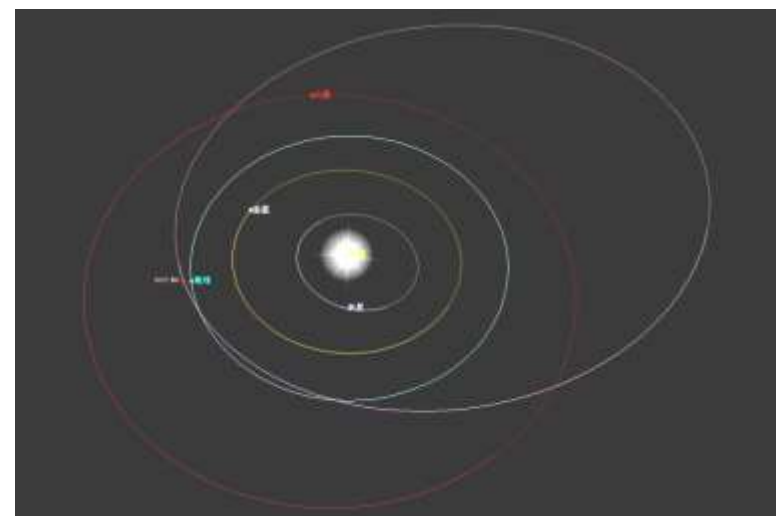


8-frames-stacked images



32-frames-stacked image

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 (°)	110.92190
近日点引数 (°)	39.62114
平均近点角 (°)	0.82779
絶対等級	24.0
スロープパラメータ	0.15

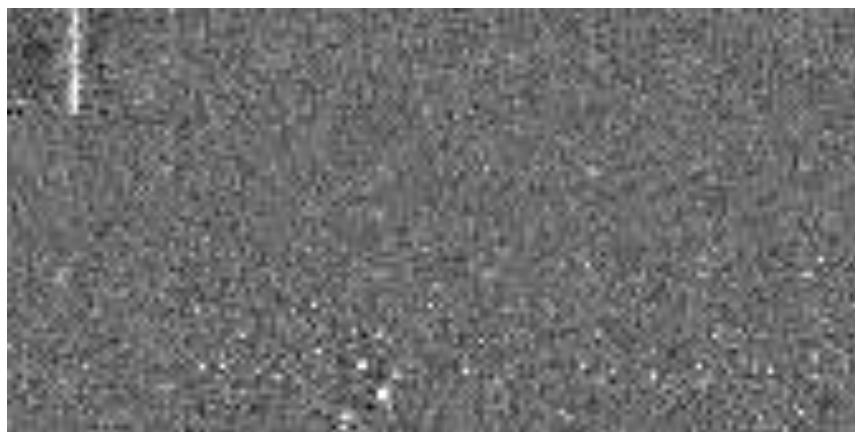


Temporal orbit of the candidate

サイズ50m程度。2017年1月22日に地球からおおよそ600万km(月軌道の約16倍)まで接近。

2017 BN92

Test Observation



Candidates in the 32 original frames.

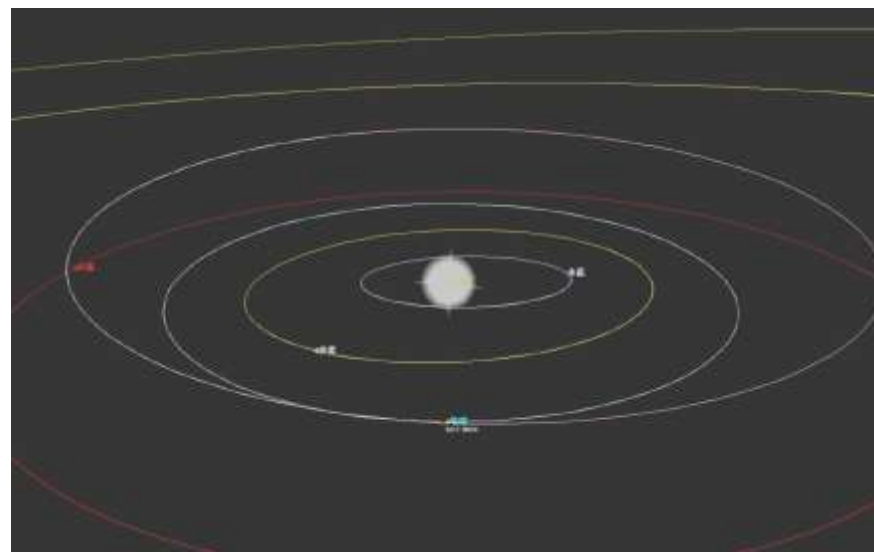


8-frames-stacked images



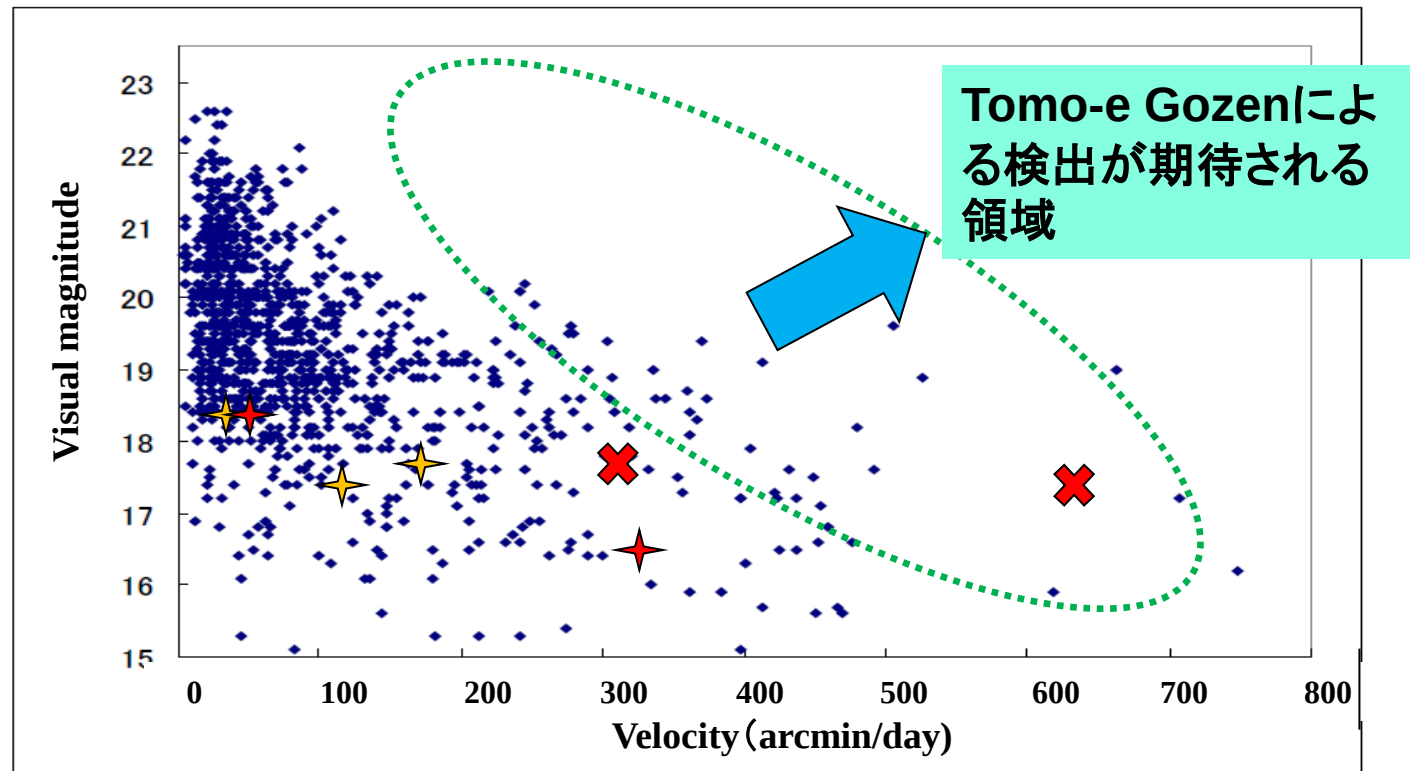
32-frames-stacked image

元期	2017-02-16.0
離心率	0.4833413
軌道長半径 (AU)	1.9227120
軌道傾斜角 (°)	1.07370
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



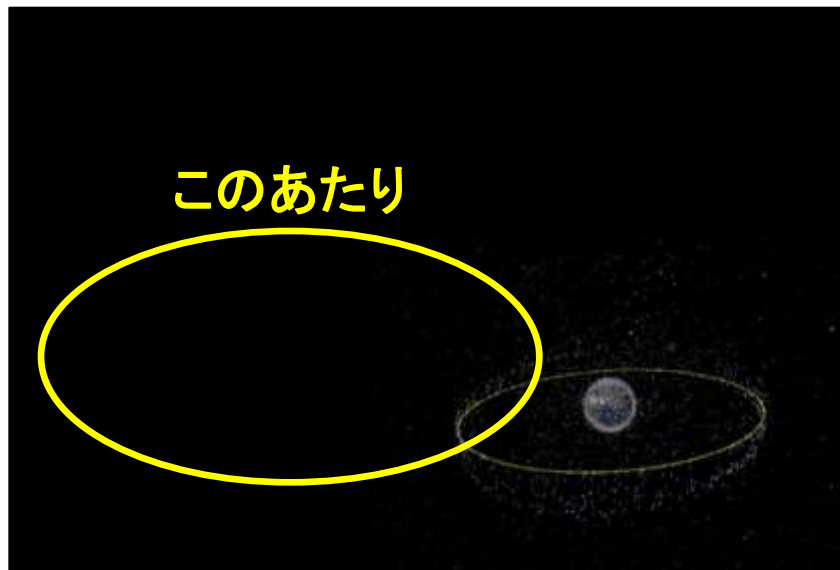
サイズ30m程度。2017年2月1日に地球からおよそ186万km(月軌道の約5倍)まで接近。

Test Observation



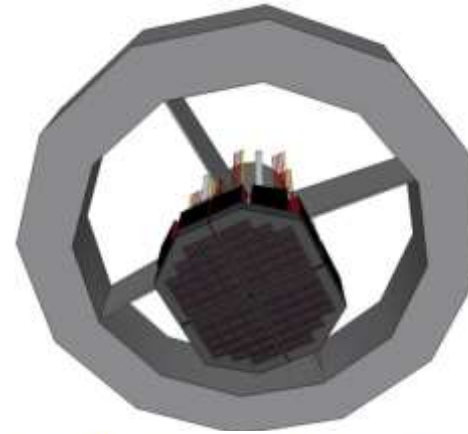
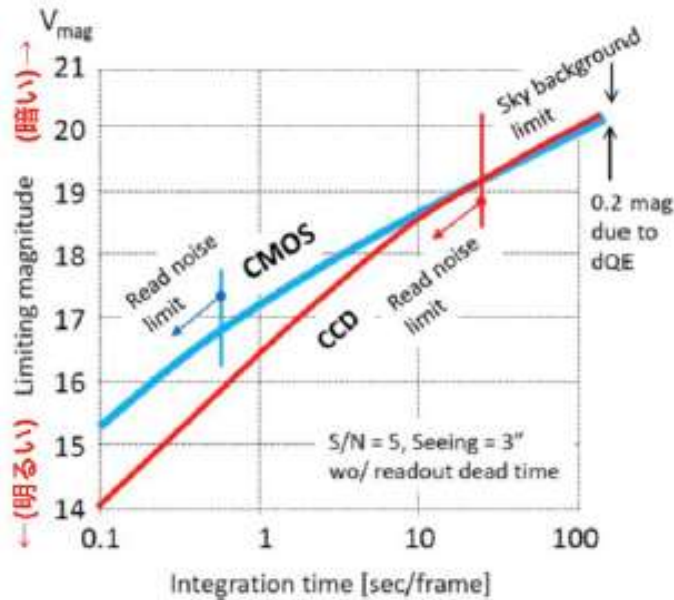
Distribution of NEO at the first detection in the velocity vs magnitude space

Tomo-e Gozenカメラを利用した NEO・デブリ観測の可能性



- 1mの望遠鏡で広視野をカバー
- 2Hzのサンプリングレート

背景



- Field of view : 20 deg² in ϕ 9 deg
- Sensor: 84 CMOS chips
- Frame rate : 2 frames/sec (max)
- Commissioning : 2017

20平方度を2Hzでサンプリングする。

2Hzで得られた画像の加算枚数を調整することによりあらゆる露出時間を設定することが可能。

我々の技術を適用することによりこれまで検出できなかった明るさや速度のNEOや宇宙デブリを効率的に検出が可能になる。

Tomoe-PMの試験観測データを利用したNEO用の解析アルゴリズムを開発中。

来年度科研費(基盤B)に応募

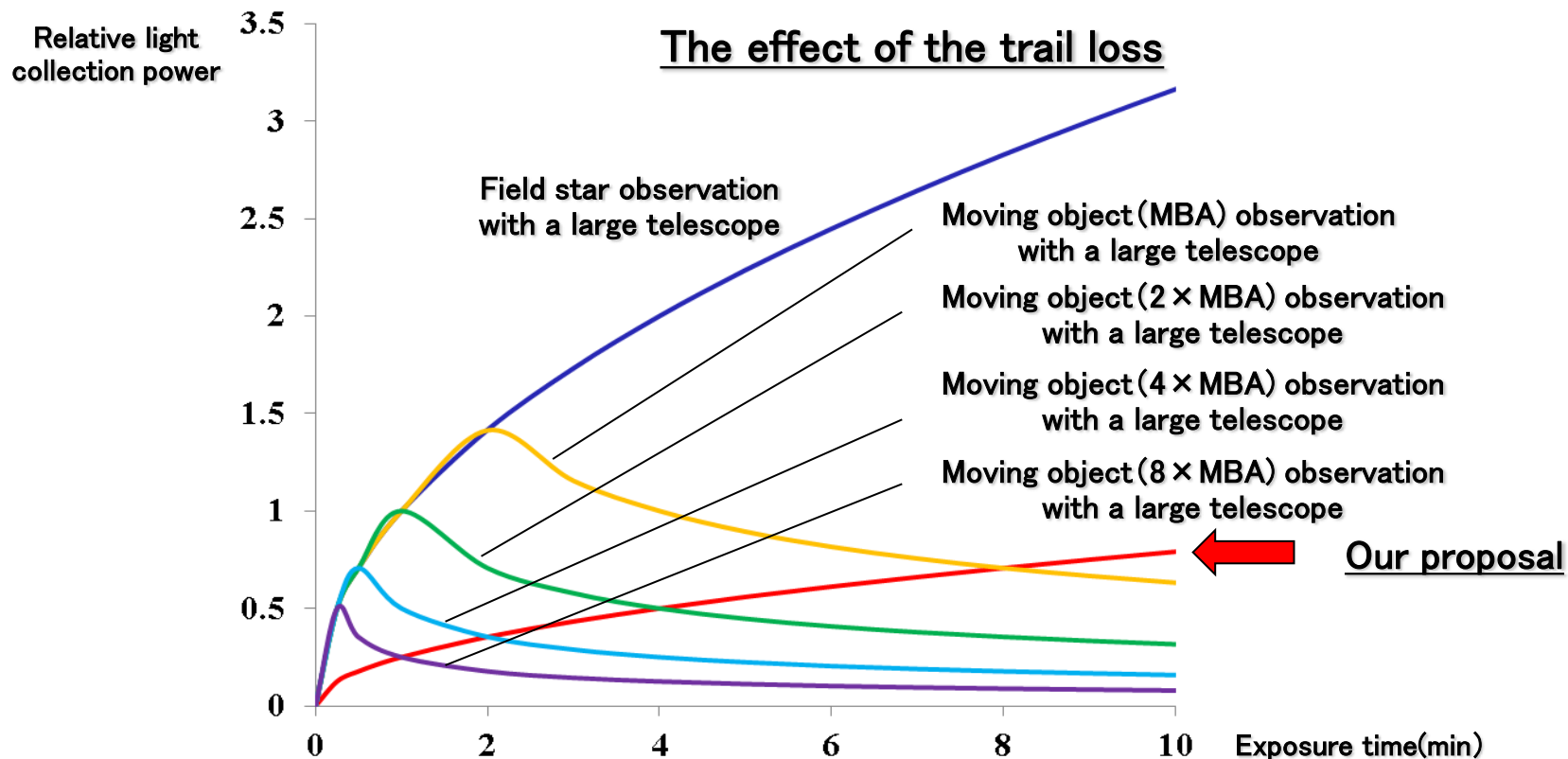
NEO search using our technologies

Comparison between conventional method and the new method

	Conventional method	New method	Tomo-e
Photon collection	○	×	○
FOV	×	○	○
Slow NEOs	○	×	○
Fast NEOs	×	◎	◎
Cost	×	○	△
Investment risk	×	○	○
Operational convenience	×	○	×

Tomo-e Gozenの最大の特徴

あらゆる速度領域の物体に対してトレイルロスの影響を完全になくすることができる。



Tomo-e Gozenの2Hzという読み出し速度は従来のCCDの性能をはるかに超えている。前出のトレイルロスの議論を持ち出すと、重ね合わせに利用する露出時間を1つ設定した場合、重ね合わせ法がもっとも有効に働く移動物体は厳密にはその露出時間内に1画素移動する物体のみである。Tomoe-e Gozenの2Hz(露出時間0.5秒)という超短時間の露出時間は、それを2枚加算すれば1秒露出、10枚加算すれば5秒露出と0.5秒以上の任意の露出時間に相当する画像群を構築できる。そのうえで各露出時間について重ね合わせ法を適用することにより効率的にCCDではとられなかった暗くてさらに低速から高速に移動するあらゆるデブリ、NEOの検出が可能となる。

Tomo-e PM画像を利用した試験解析

DATA: 41 regions at gemini and pisces on 2015/12/9

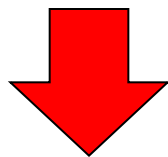
Sensor: Tomo-e PM (8 CMOS sensors)

Observation mode: 0.5-sec exposure × 400 frames

Analysis method: FPGA-based stacking method stacking 32 frames.

Analysis mode: 2, 4, 8-frame stack

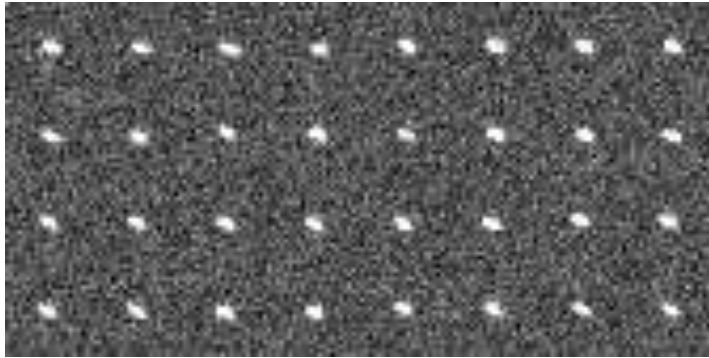
Analysis time: 45 min for 1 sensor



One bright object and a few faint objects are detected

Result of Test Analysis

Bright object



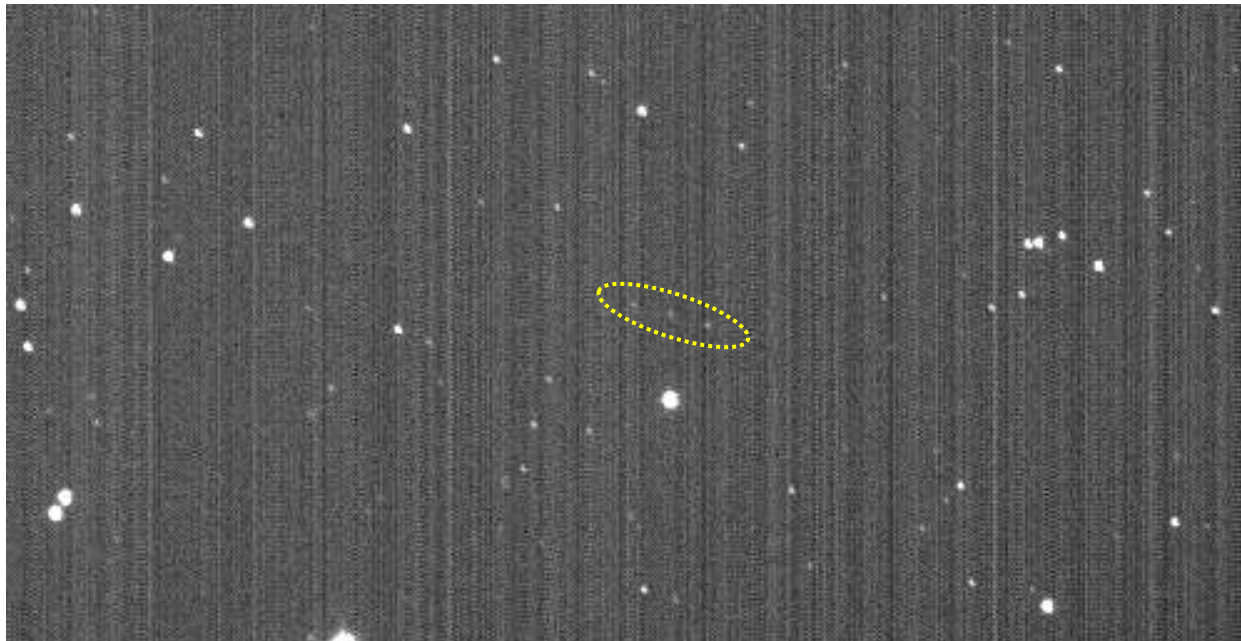
Candidates in the 32 original frames.



8-frames-stacked images



32-frames-stacked image



Motion of the object in the $\frac{1}{4}$ FOV.

RA: 1:10:21.7

Dec: +22:44:54

daily motion: 43.0-degree

Faint objects

Result of Test Analysis



Candidates in the 32 original frames.



Candidates in the 32 original frames.

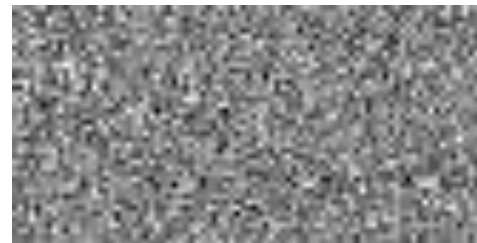


8-frames-stacked images



32-frames-stacked image

daily motion: 19.7-degree



8-frames-stacked images



32-frames-stacked image

daily motion: 12.2-degree

まとめ

Tomo-e Gozenは広視野、大集光力、高時間分解能を有した世界唯一の検出器であり、宇宙デブリ及び地球近傍天体の発見に適用した場合非常に大きな成果をあげることが期待されている。これらの物体に対するTomo-e Gozenの有効性を紹介するとともに、Tomo-e PMの試験観測データ利用してこれら移動物体の検出を試みたのでその結果を紹介した。

Tomo-e PM用に解析アルゴリズムを開発し、いくつかの移動天体候補の検出に成功した。

これまで開発してきた宇宙デブリ、近地球天体解析用の解析環境をTomo-e Gozenに適用することによりTomo-e Gozenの大口径、広視野、高速読み出しを有効に利用した宇宙デブリ、近地球天体検出システムを構築することが可能である。