

重ね合わせ法による高速移動天体の発見観測

柳沢俊史、黒崎裕久、Manuel CegarraPolo、
吉川真、黒田信介、平子敬一（JAXA）、大澤亮、
酒向重行（東京大学）、吉田二美（産業医科大学）、
奥村真一郎（JSGA）

序論

JAXA研究開発部門では地球接近天体や宇宙デブリ等の観測技術開発を長年実施している。多数の画像を効率的かつ高速に処理することによりこれまで画像中に見逃してきた暗い天体の検出を可能とする技術を開発した。

この技術を利用して地球接近天体や多くの未カタログデブリの検出ができること判明している。

今後はこの技術を軌道上の宇宙機やすばる望遠鏡、Tomo-e Gozenカメラからのデータに適用して地球接近天体の早期発見や太陽系の起源の解明、宇宙デブリ問題の解決に役立っていきたい。

地球接近天体の脅威

地球接近天体(NEO: Near Earth Object)の問題は人類の安定的な繁栄のためには解決しなければいけない重要な課題の1つである。



ツングースカ

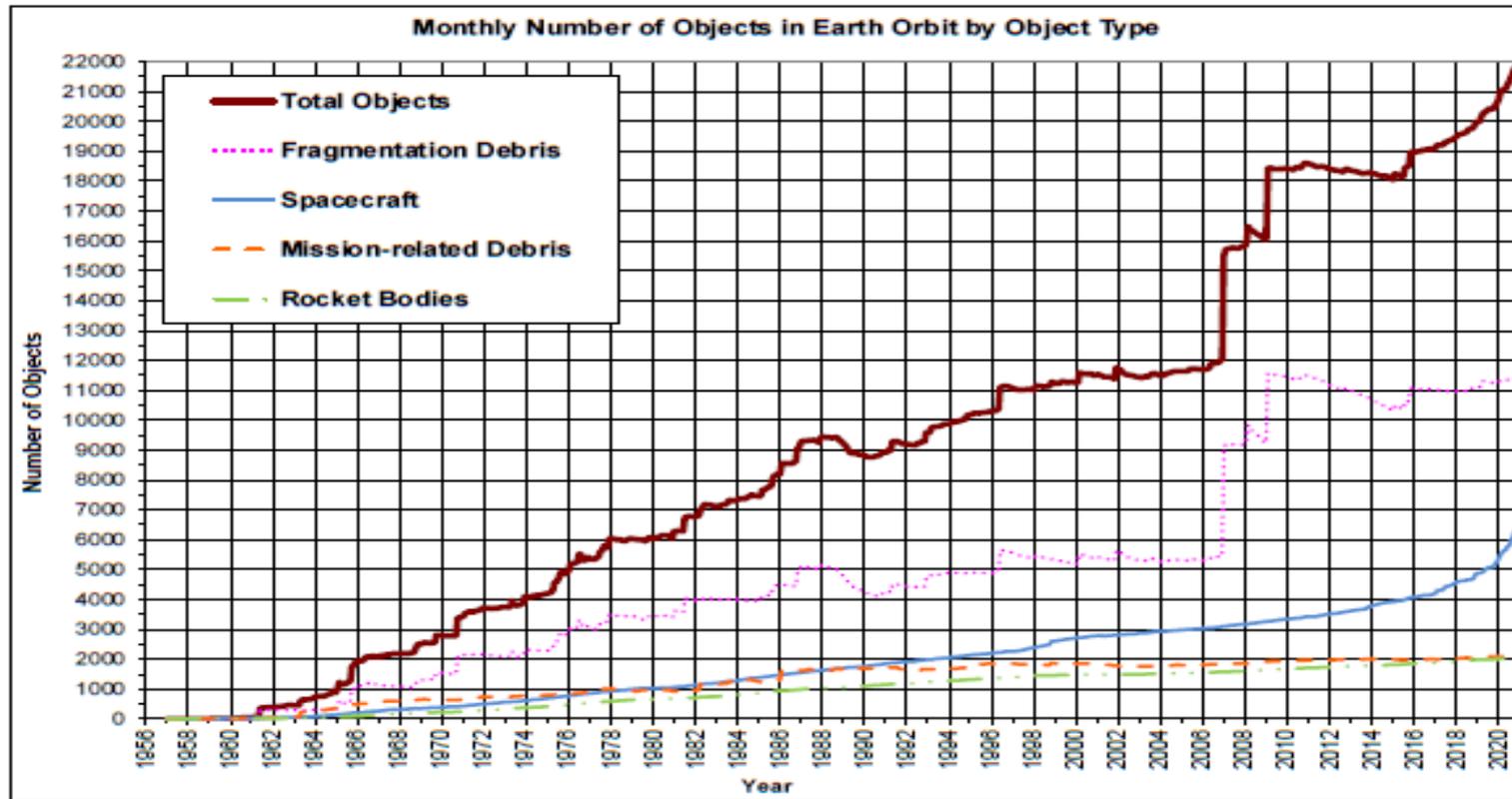


チェリャビンスク

過去に確認されている
NEOの地球衝突事例

- ・ユカタン半島に衝突し恐竜を絶滅させた。10km
- ・1908年、ロシア、シベリア上空で爆発し2000km²を焼き払った。数10m
- ・1972年、アメリカ、カナダ上空で目撃。数10m
- ・2007年、ペルー、カランカス村に衝突、住民に健康被害。サイズ不明
- ・2008年、スーダンに落下。数m
- ・2013年、ロシア、チェリャビンスク上空で爆発、1200名負傷。17m

スペースデブリ問題



- 低軌道の環境は年々悪化の一途をたどっている。(衛星破壊実験、衛星同士の衝突等)
- 観測限界が10cmであるにも関わらず、宇宙機が防御できるサイズは数mm
- 公開されている軌道要素(TLE)の精度が悪い。

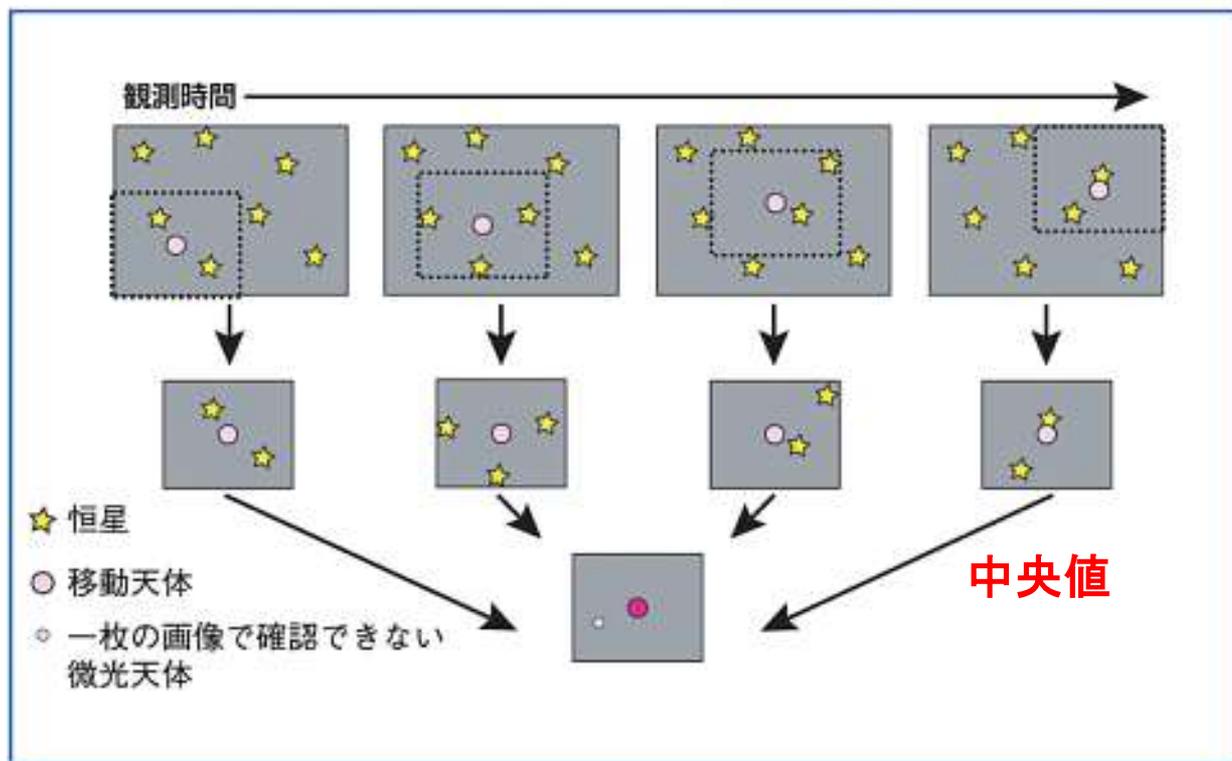


低軌道デブリの観測能力を強化する必要がある。

JAXAで開発した移動物体検出手法(重ね合わせ法)

比較的小規模な観測装置での観測効率を上げるため、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を開発。

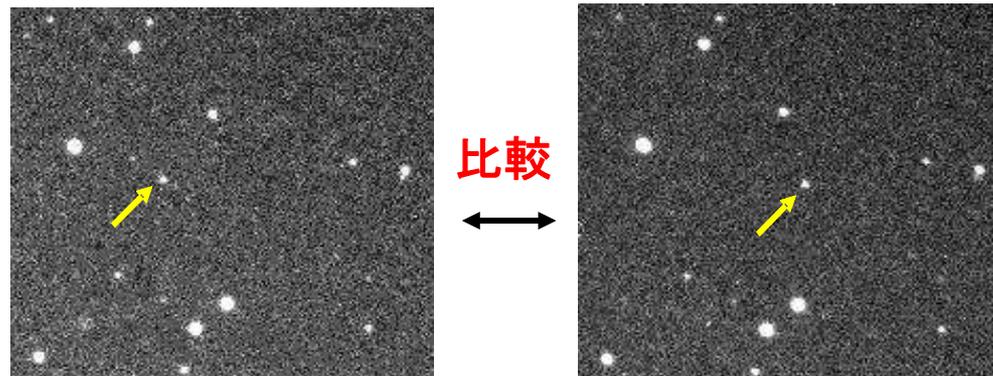
重ね合わせ法概念図



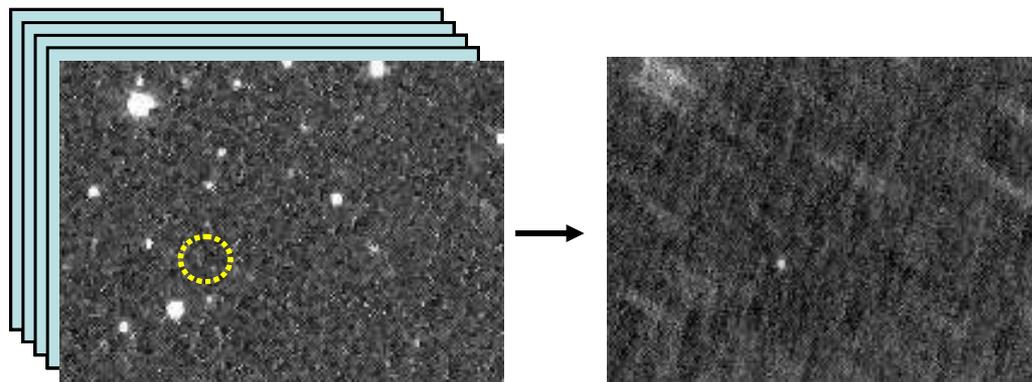
移動物体の動きを仮定し、複数の観測画像の切り取りを行う。切り取られた画像の中央値画像を作成することにより暗い移動物体の検出が可能になる。

既存の検出法との違い

ブリンク法



重ね合わせ法

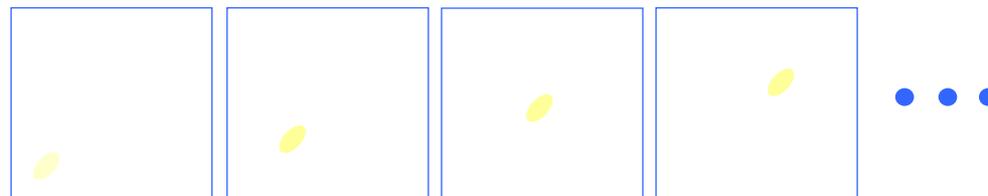


重ね合わせ法で検出された小惑星の例。撮影画像(左)、検出画像(右)

本手法により350個以上の小惑星を発見している。

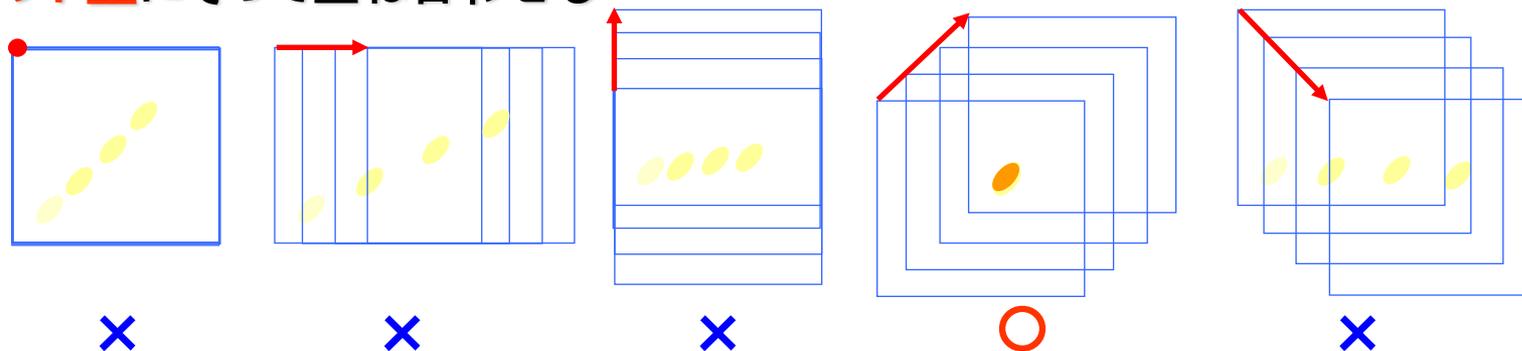
重ね合わせ法の弱点

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。(Blind stacking)



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

○
検出

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。



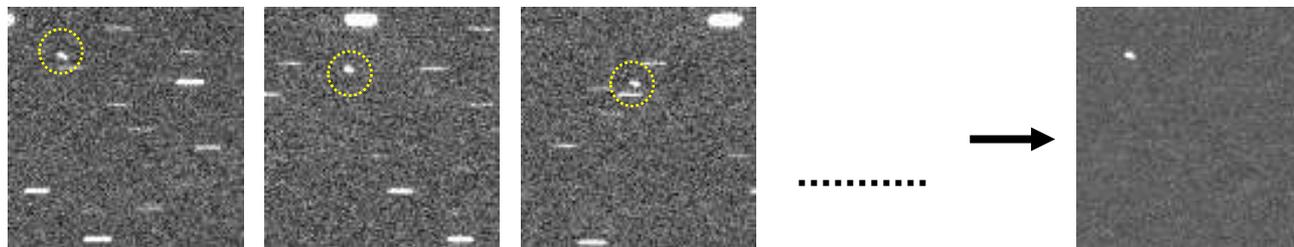
市販のPC1台で要する解析時間は280時間！！

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。



新旧アルゴリズム
の比較

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

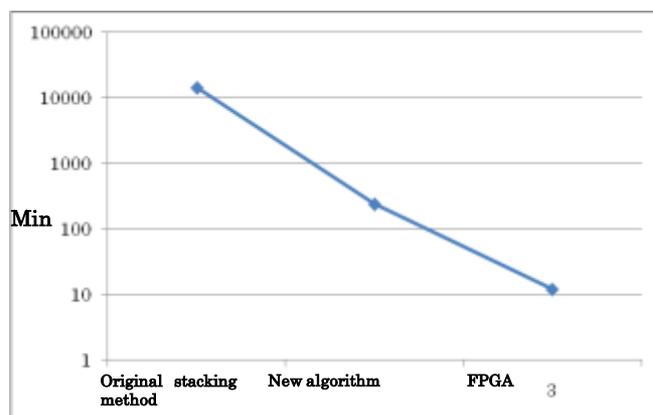
新アルゴリズムをFPGAに実装しさらなる高速化を図る。



Nallatech社製FPGAボード H101-PCIXM



iDAQs社製FPGAボードシステム



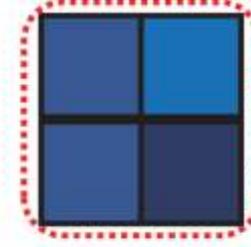
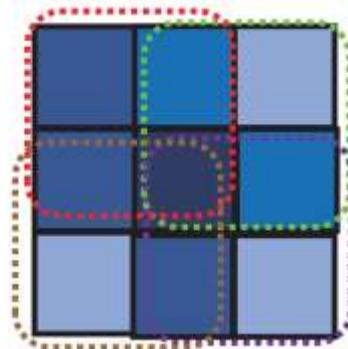
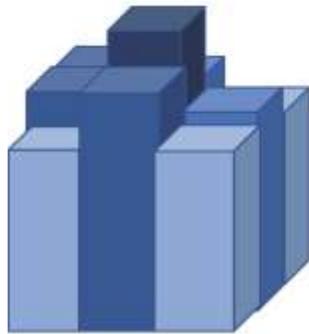
解析時間の変化

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。

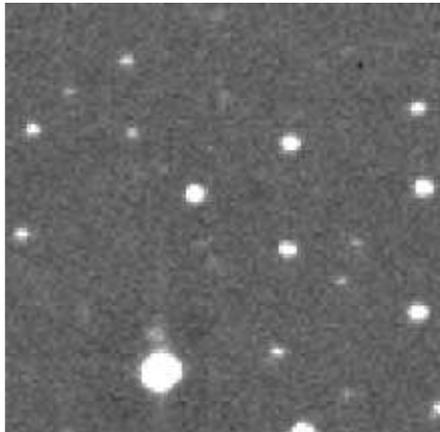
280時間 → 14分

新アルゴリズムの開発

2値化を閾値から候補物体に変更することにより検出限界を約0.5等向上させることに成功。



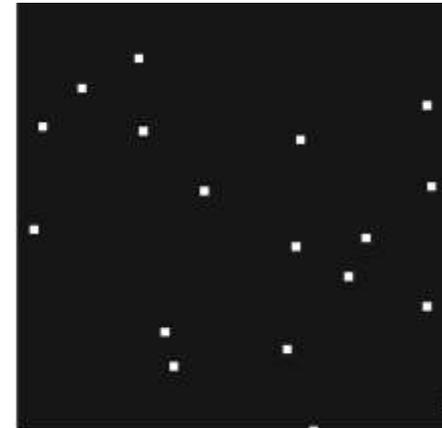
候補天体の検出



オリジナル画像



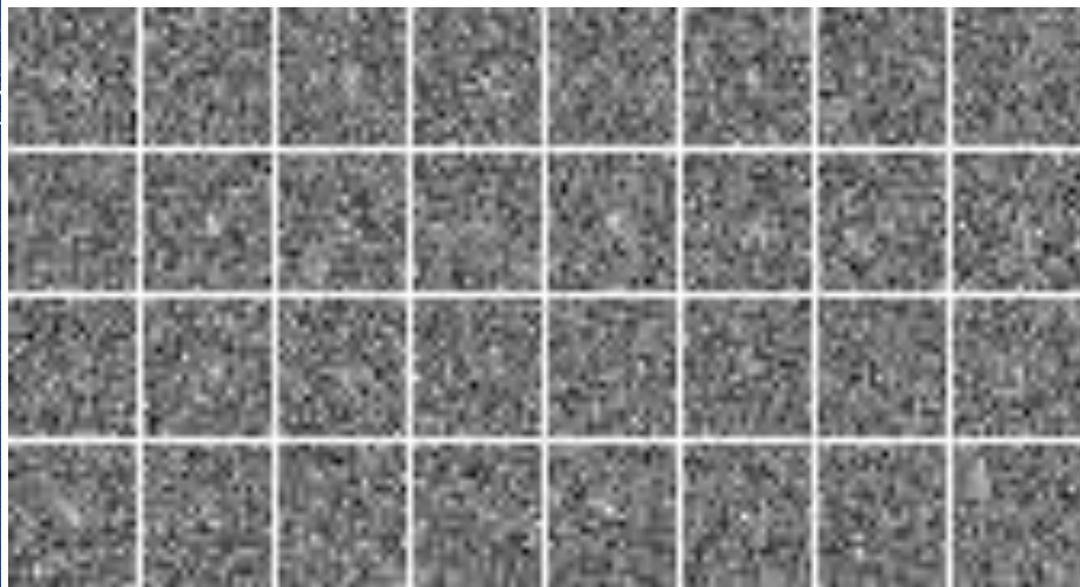
2値化画像



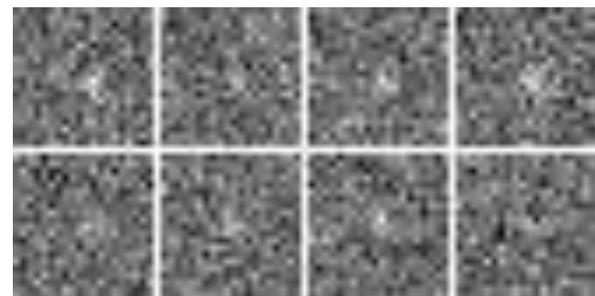
候補天体画像

新アルゴリズムの開発

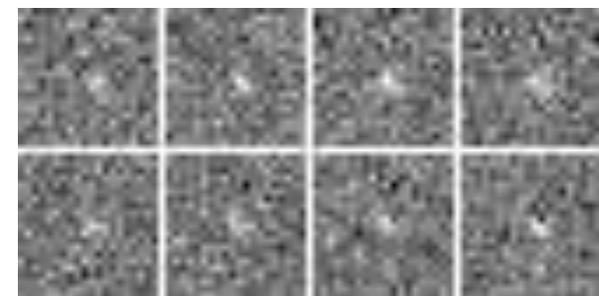
検出物体の画像



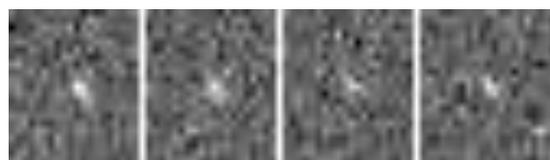
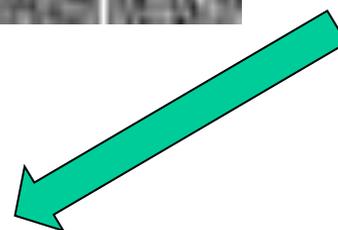
オリジナル画像



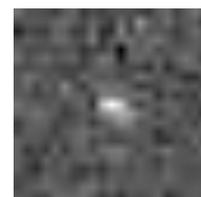
画像4枚重ね合わせ



画像8枚重ね合わせ



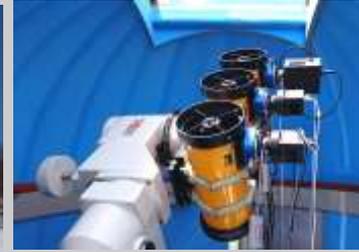
画像16枚重ね合わせ



画像32枚重ね合わせ

JAXA 研開部門の観測施設

入笠山光学観測施設



調布低軌道物体観測装置



豪州遠隔観測施設(Siding Spring天文台内)



新規観測サイト候補
Zadko observatory



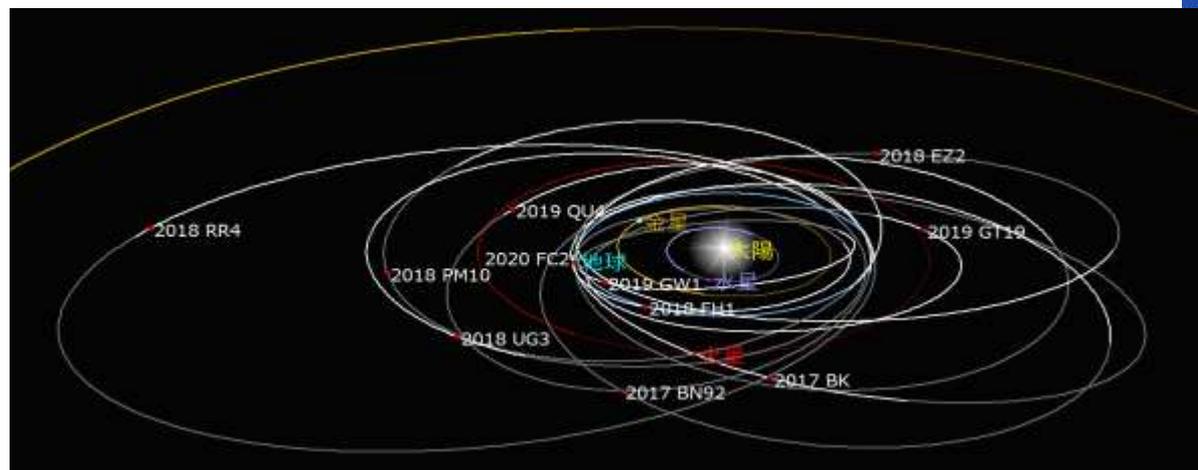
これまでの成果

入笠及び豪州遠隔観測施設においてNEOを11個発見(現在、予算の都合上観測を停止中)

仮符号	発見日	発見等級	分類群	離心率	軌道長半径 (AU)	軌道傾斜角	昇交点経度	絶対等級	サイズ (m)
2017 BK	2017.1.17	17.5	Apollo	0.489	1.909	6.6359	110.89	24.0	67
2017 BN92	2017.1.31	17.1	Apollo	0.483	1.921	1.0734	324.06	25.6	32
2018 EZ2	2018.3.12	18.2	Apollo	0.510	1.951	4.9718	173.92	26.6	20
2018 FH1	2018.3.18	18.7	Aten	0.177	0.938	3.5468	181.41	26.6	20
2018 PM10	2018.8.9	18.3	Amor	0.427	1.780	9.2065	317.51	27.0	17
2018 RR4	2018.9.11	18.0	Apollo	0.621	2.637	3.1793	351.37	27.1	16
2018 UG3	2018.10.31	19.4	Apollo	0.423	1.662	6.1673	47.27	24.5	53
2019 GW1	2019.4.4	17.5	Aten	0.114	0.934	13.2945	194.67	26.1	25
2019 GT19	2019.4.12	18.2	Apollo	0.370	1.273	7.7488	202.69	27.5	13
2019 QU4	2019.8.28	18.1	Apollo	0.332	1.426	10.1313	333.97	24.8	46
2020 FC2	2020.3.17	18.5	Apollo	0.398	1.644	6.8153	357.15	28.0	11



これまで発見したNEOの詳細。発見が困難な10m級のNEOがよく検出できている。

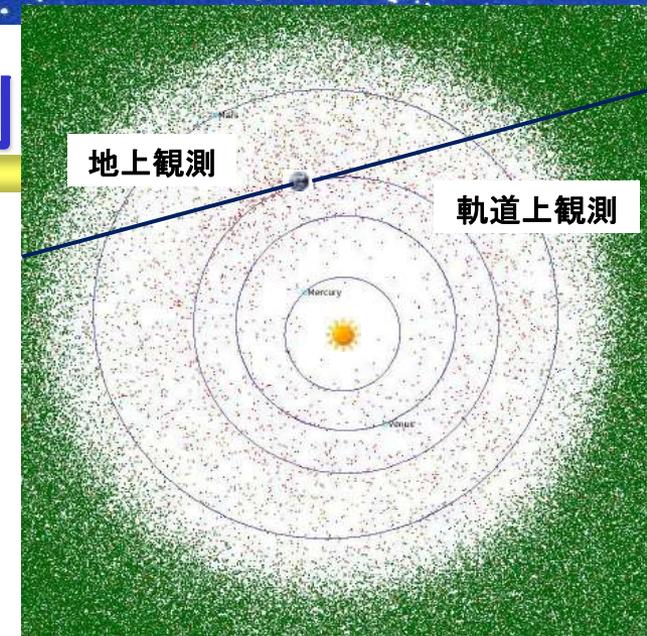


これまで発見したNEOの現在の位置

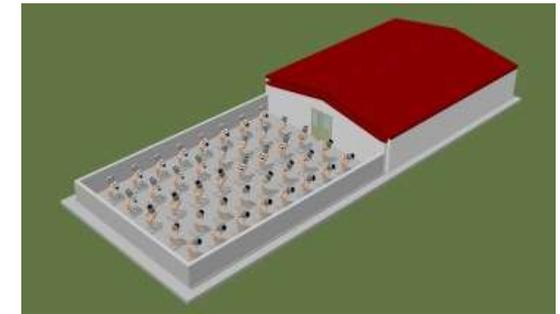
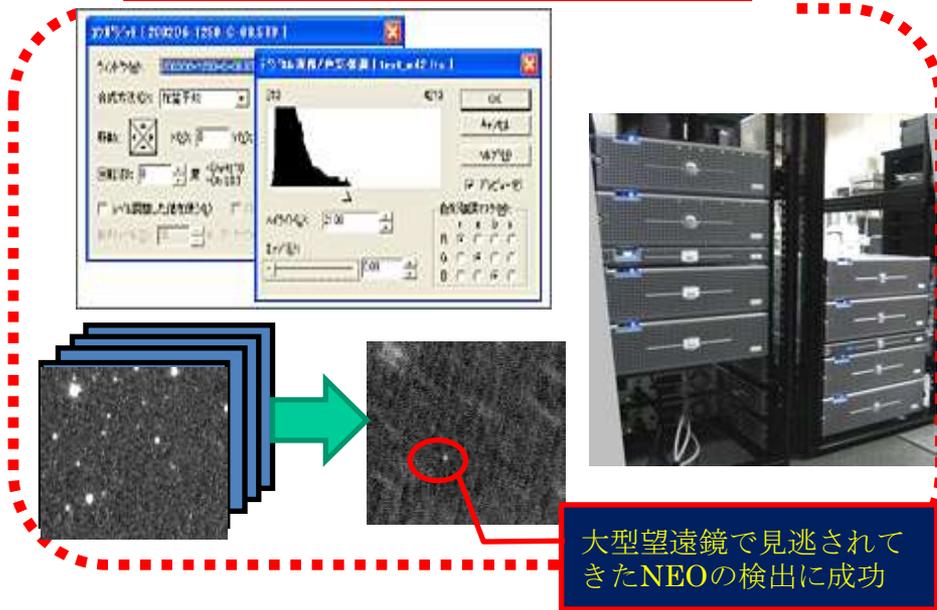
軌道上からのNEO観測

ミッション探求フェーズとしてJAXA内で研究を実施

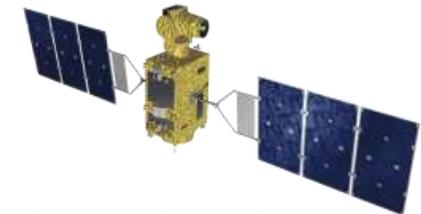
JAXA独自の技術を地上、軌道上に適用しこれまでほとんど発見されていない数10—数100m級のNEOを大量に見つけ出すシステムを構築するための検討を行った。



JAXA独自技術:新規高速解析手法



地上小型望遠鏡観測網



軌道上観測衛星群

軌道上からのNEO観測

衛星検討: 太陽同期軌道に10cm望遠鏡を投入

LST=12:00 のSSO軌道においてSEL直交方向を360degスキャンする方法。

太陽電池セル面を太陽指向して飛翔。

太陽方向軸周りに姿勢をステップ状に回転させる。

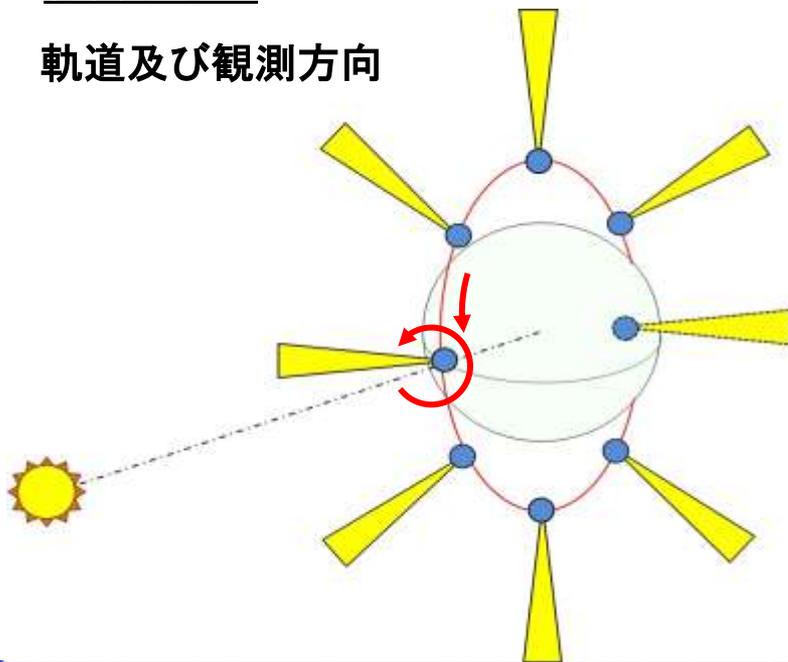
カメラが地球方向を指向しないように、カメラ視野方向と衛星軌道位置とを同期させる。

データ転送量を減らすため短時間露光の画像を位置補正してマッチングするオンボード処理及び画像圧縮を実施する。

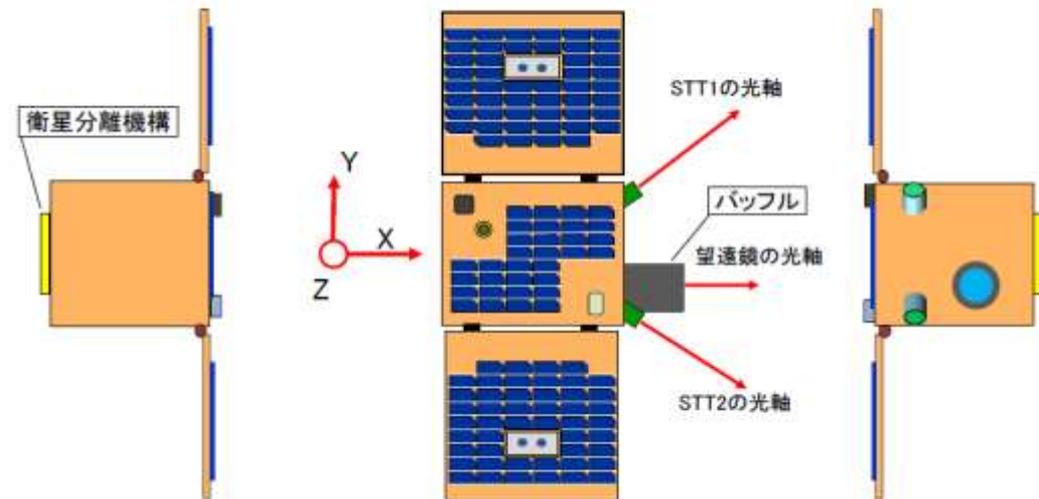
衛星1機のミッションからの開発費 約11~16億

ただし、データレコーダとデータダウンリンク用通信機の調達が課題であり、上記コストに影響する。

軌道及び観測方向



衛星コンフィギュレーション



衛星概観(両翼に展開パネル1枚)

軌道上からのNEO観測

光学系及びセンサの検討

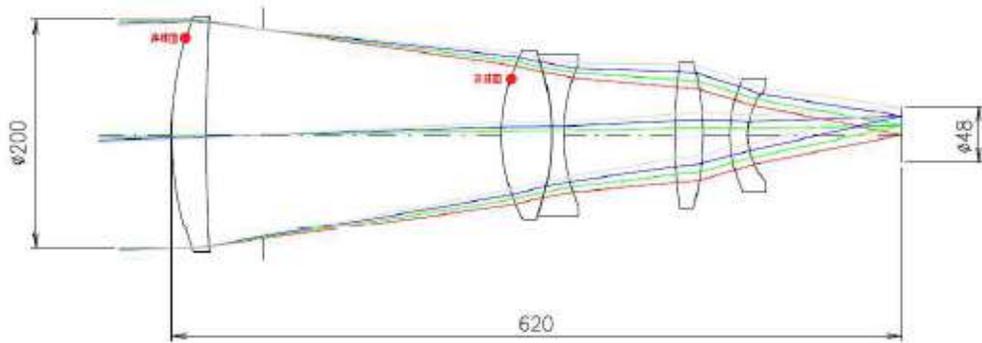


図1. 光学系のレイトレイス（上）及び焦点ずれにおけるスポットダイアグラム（右）。下端が焦点からずれを左端が視野中心からのずれを示している。

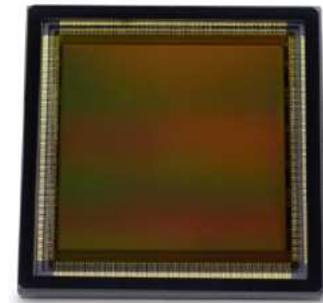
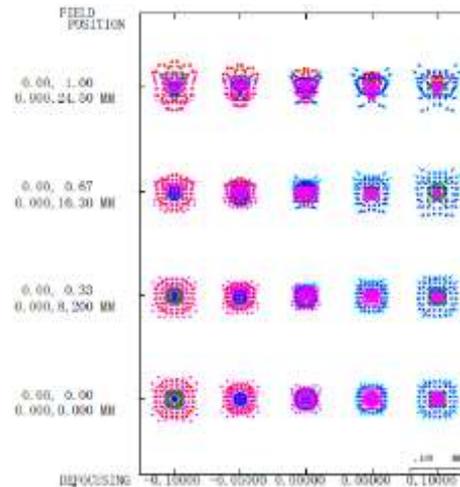


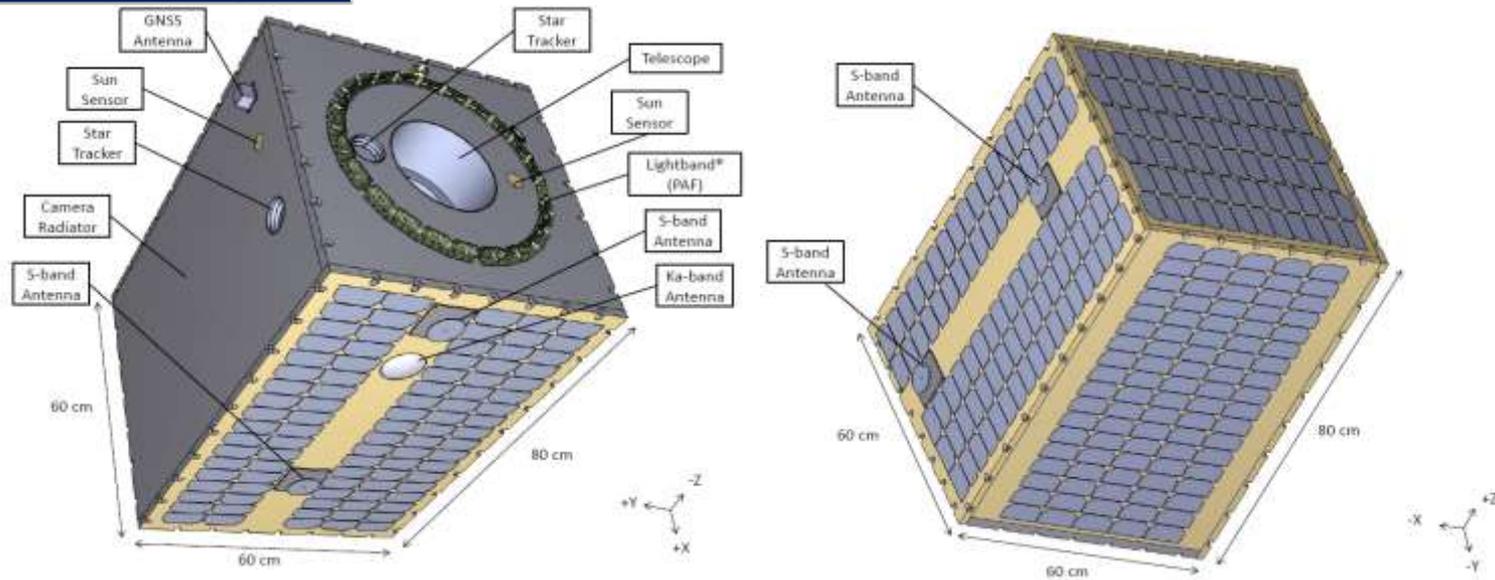
図2. Gpixel社製CMOSセンサ GSENSE4040

光学系については軌道上の温度変化から発生する焦点距離の変化（ピンボケ）を光学系の温度制御なしに抑制する**20cm光学系の設計**に成功（図1）。光学センサで広い視野を確保することから1画素のサイズが比較的広くなることを利用して全体に結像性能をおとすがどこでもピントがある程度ずれても結像性能が変化しないという熱歪にロバストな光学系である。

センサとしては**民生品であるGpixel社のGSENSE4040**（図2）が画素サイズ、視野角等から我々のミッションに相当と判断、同等のセンサを利用した地上観測画像の検出限界等級から軌道上で同センサの検出能力を検討した結果、**地上より2等（6.3倍）暗い物体を検出**できることが判明した。

軌道上からのNEO観測

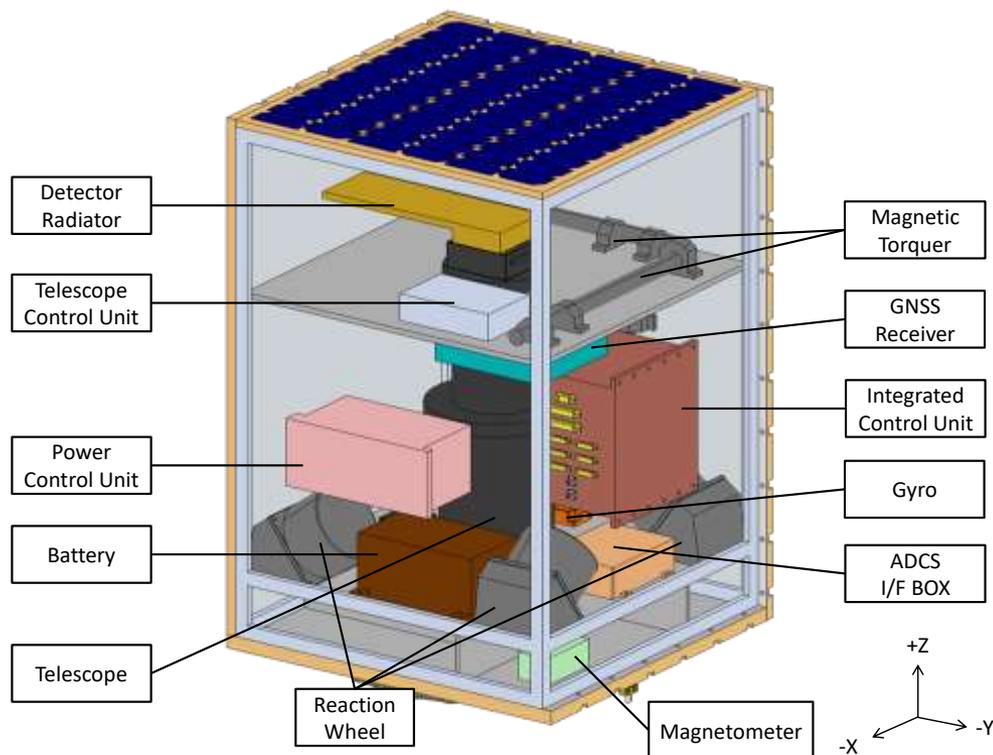
衛星の概念検討



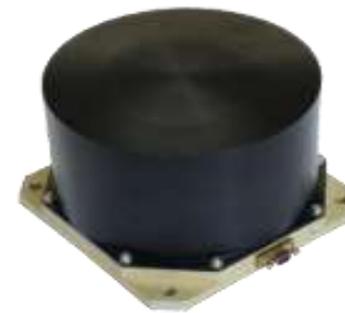
暗いNEOを検出するために以下の課題をクリアする必要がある。①センサを -80° まで冷却する。②観測時の相対姿勢安定度を $0.002\text{deg}/24\text{sec}$ とする。③1日30Gbyteの画像を全て地上局にダウンリンクする。検討の結果、**サイズ $60 \times 60 \times 80\text{cm}$ 、重力 65kg の衛星**において筐体1面をラジエータとすることで大部分の期間センサを -80° に冷却でき、センサから出力される恒星の位置誤差を利用して要求する姿勢安定度を達成、Kaバンド送信機を利用することにより30Gbyteのデータをダウンリンクできることが判明した。電力についても十分ミッション遂行が可能であることを確認した。本衛星を利用して**検出されるNEOは年間1400個程度**である。また、本衛星は静止デブリ観測も可能である。**静止軌道上にある40cm以上の全ての物体の状況を把握**することが可能である。衛星開発にかかるコストはミッション機器も含めて**13億円程度**である。

軌道上からのNEO観測

● NEO観測衛星概念検討 (つづき)



衛星内部機器配置



VECTRONIC Aerospace社製アクションホイール
VRW-05



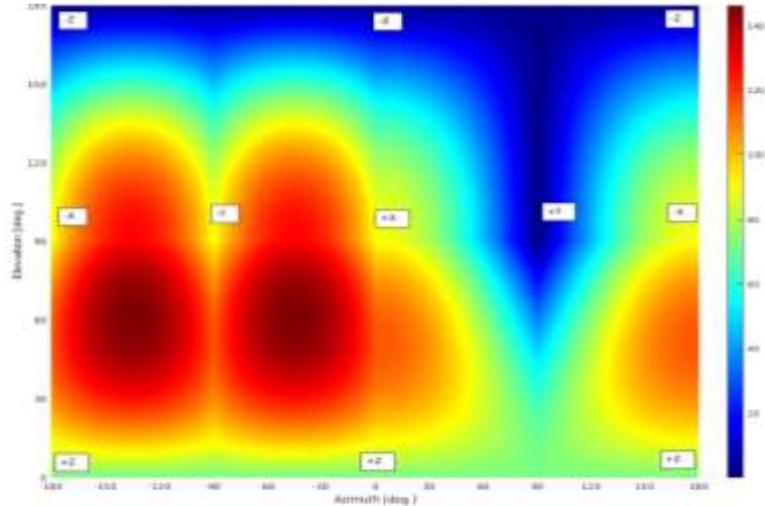
VECTRONIC Aerospace社製スタートラッカ
VST-60M



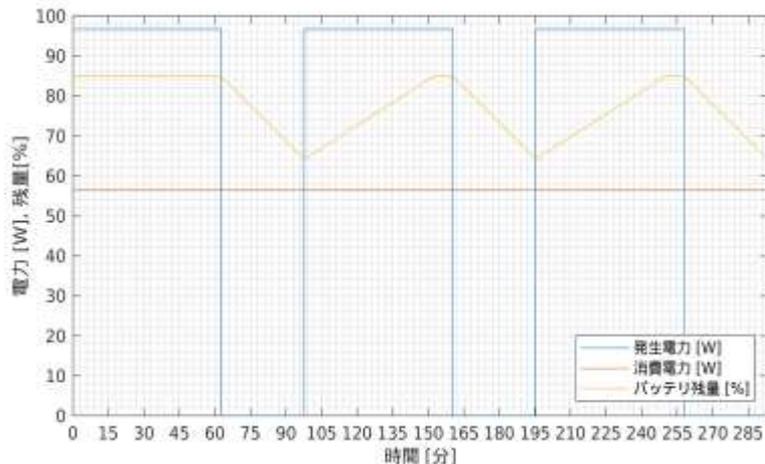
Astro Digital社Kaバンド送信機・アンテナ AKAT-418

軌道上からのNEO観測

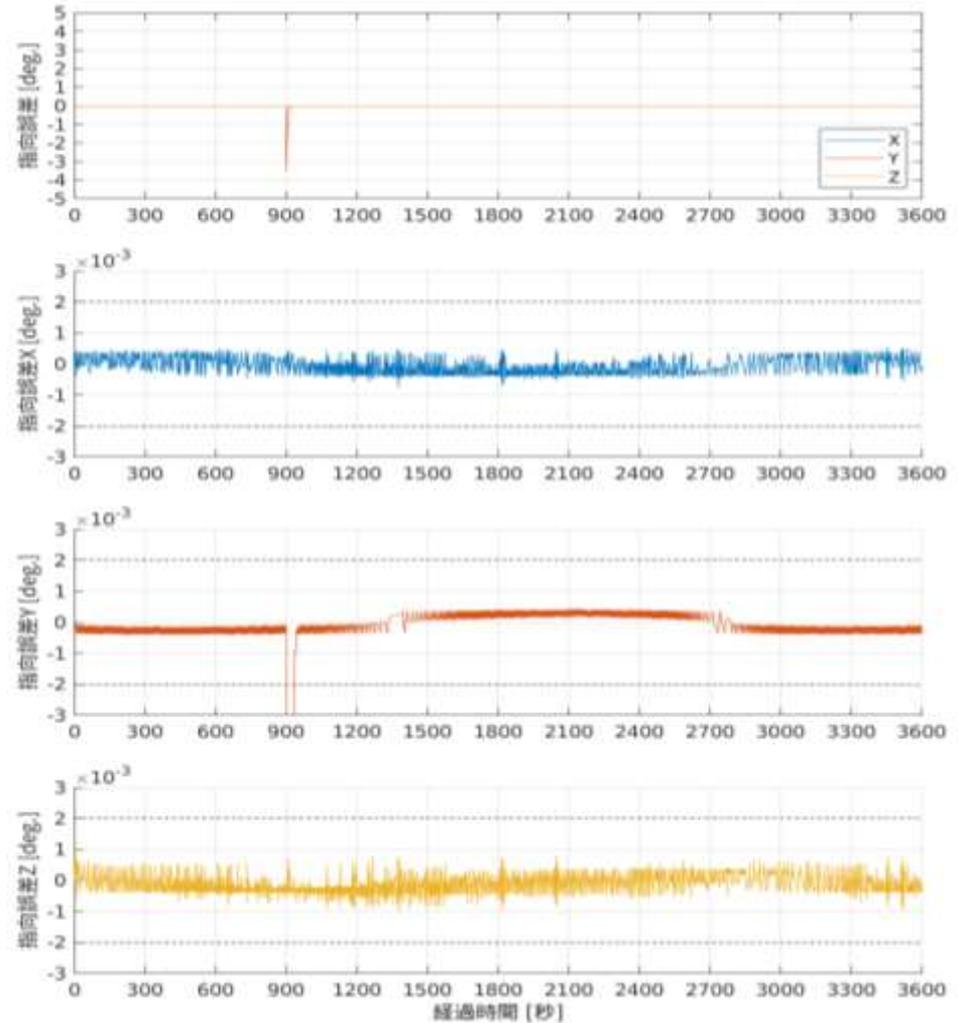
● NEO観測衛星概念検討 (つづき)



太陽入射方向と発電量の関係



発生電力が平均的な値となる方向を観測し続ける場合の電力収支

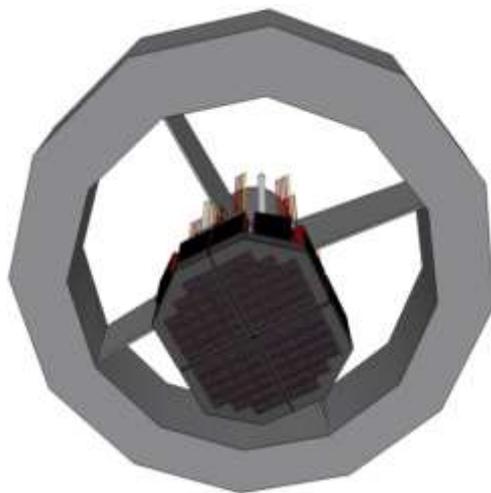


姿勢制御シミュレーションにより姿勢安定性の評価
開始900秒後にY軸周りに衛星を3.5°(センサ1視野分)
回転させた。

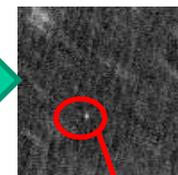
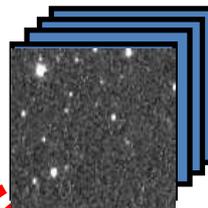
科研費の研究 (Tomoeデータを利用したNEOの検出)

科研費基盤(B)高速移動天体の検出による微小天体サイズ分布の解明
(研究代表者: 奥村真一郎)

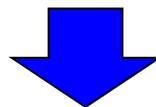
Tomoe Gozen



JAXA独自技術: 新規高速解析手法

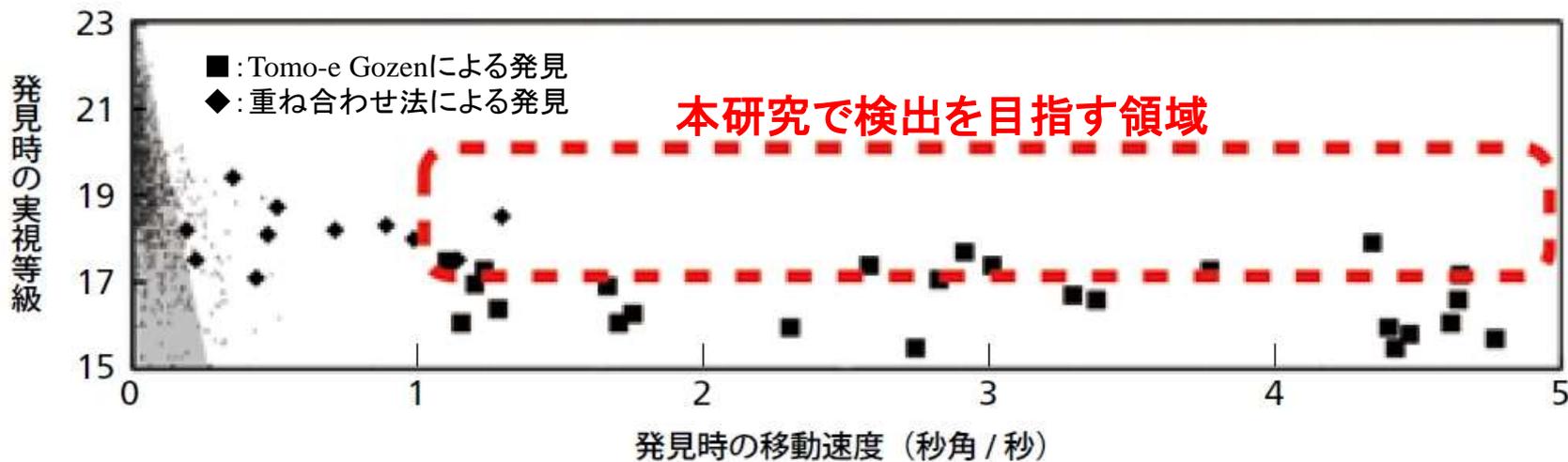
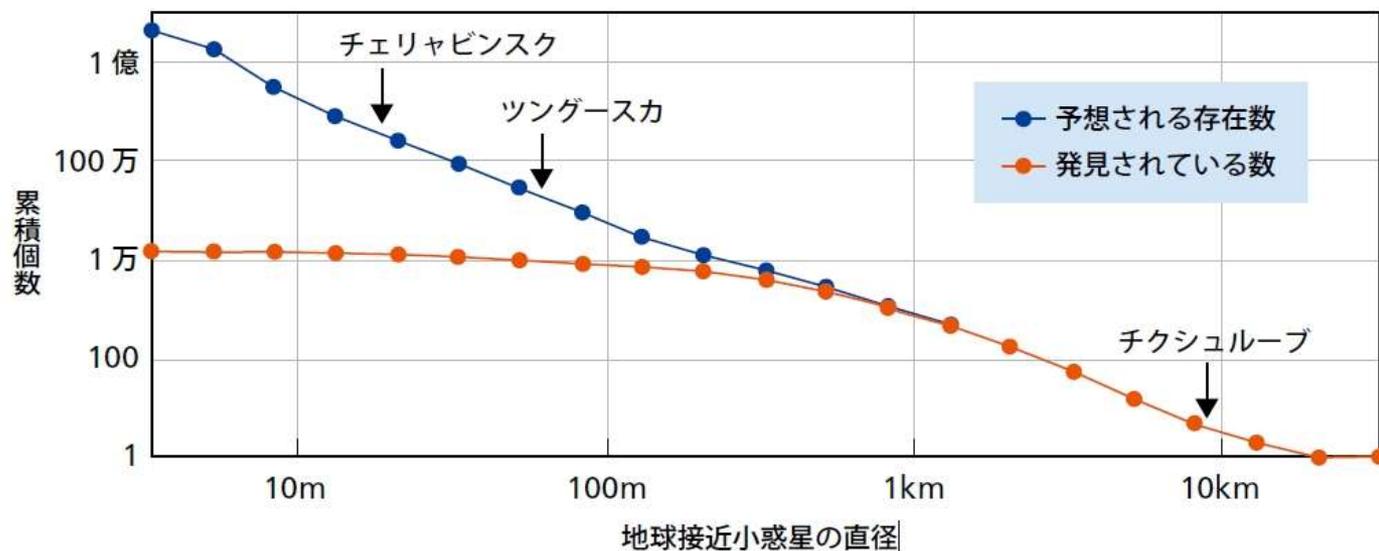


大型望遠鏡で見逃されてきたNEOの検出に成功



地球近傍を高速で移動するNEOを大量に発見

科研費の研究 (Tomoeデータを利用したNEOの検出)



(JSGA 奥村真一郎氏提供)

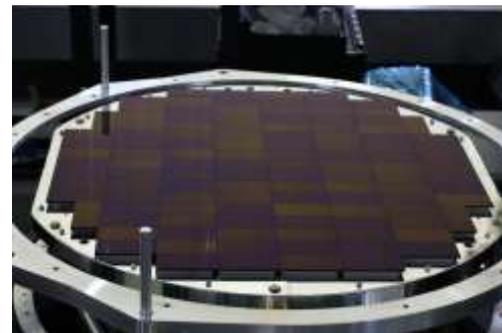
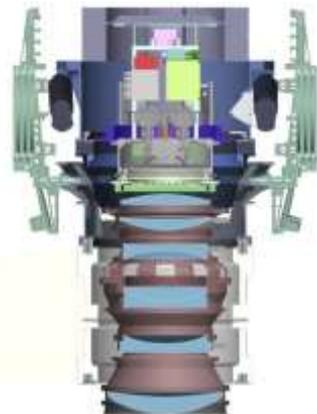
科研費の研究(すばるデータを利用した太陽系天体の検出)

新学術研究領域(研究領域提案型)

太陽系考古学、氷天体サーベイ観測から太陽系の歴史を探る

(研究代表者: 吉田二美):

大量のすばる画像からこれまで発見されてこなかった太陽系天体を多数検出、太陽系起源のなぞに迫る。



すばる超広視野主焦点カメラ (Hyper Suprime-Cam)



HSC1素子の画像(800万画素)

重ね合わせで解析

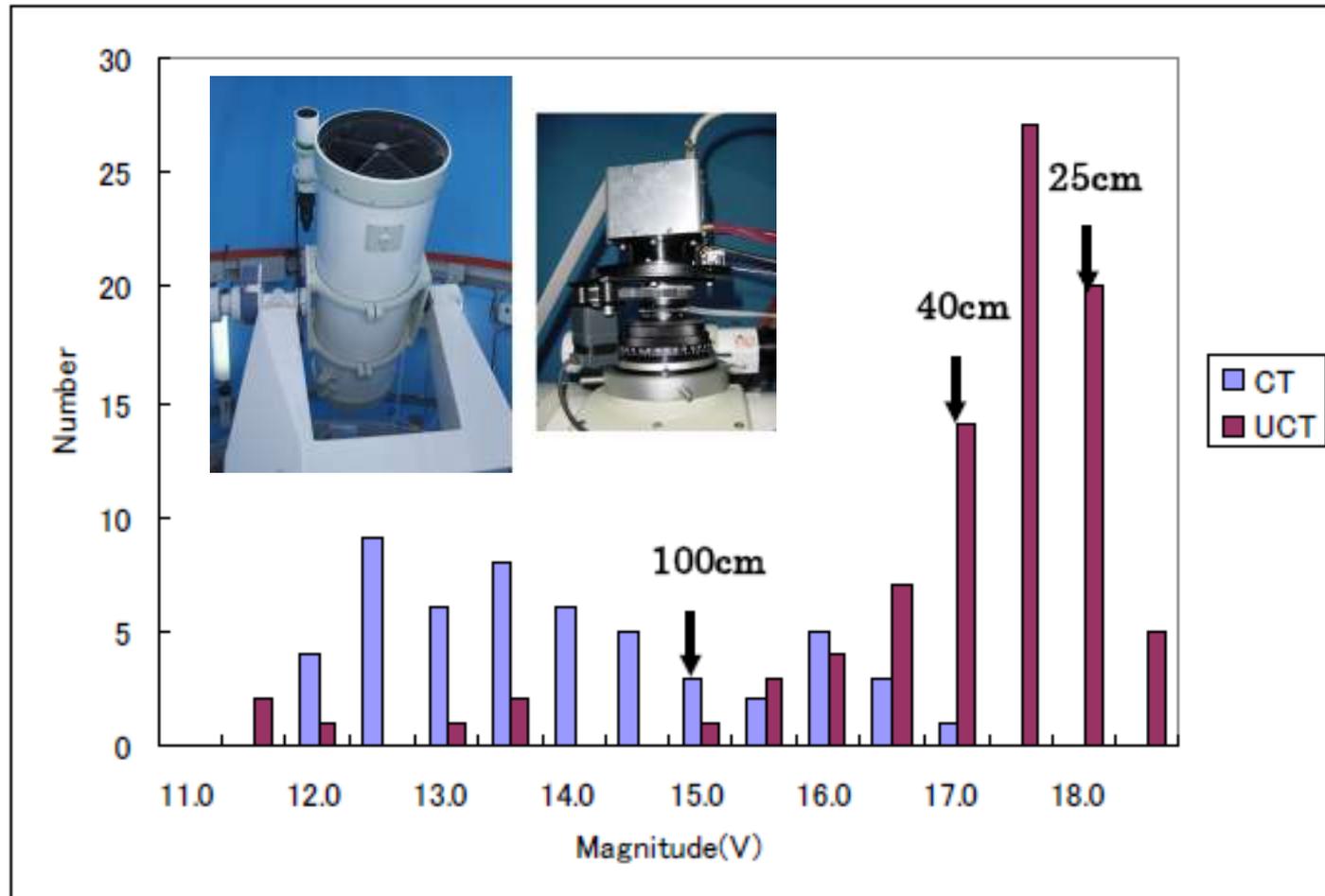


×104(素子) × 100(ショット)

KBO等の太陽系天体を多数検出

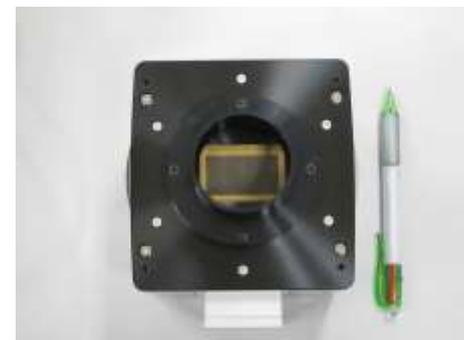
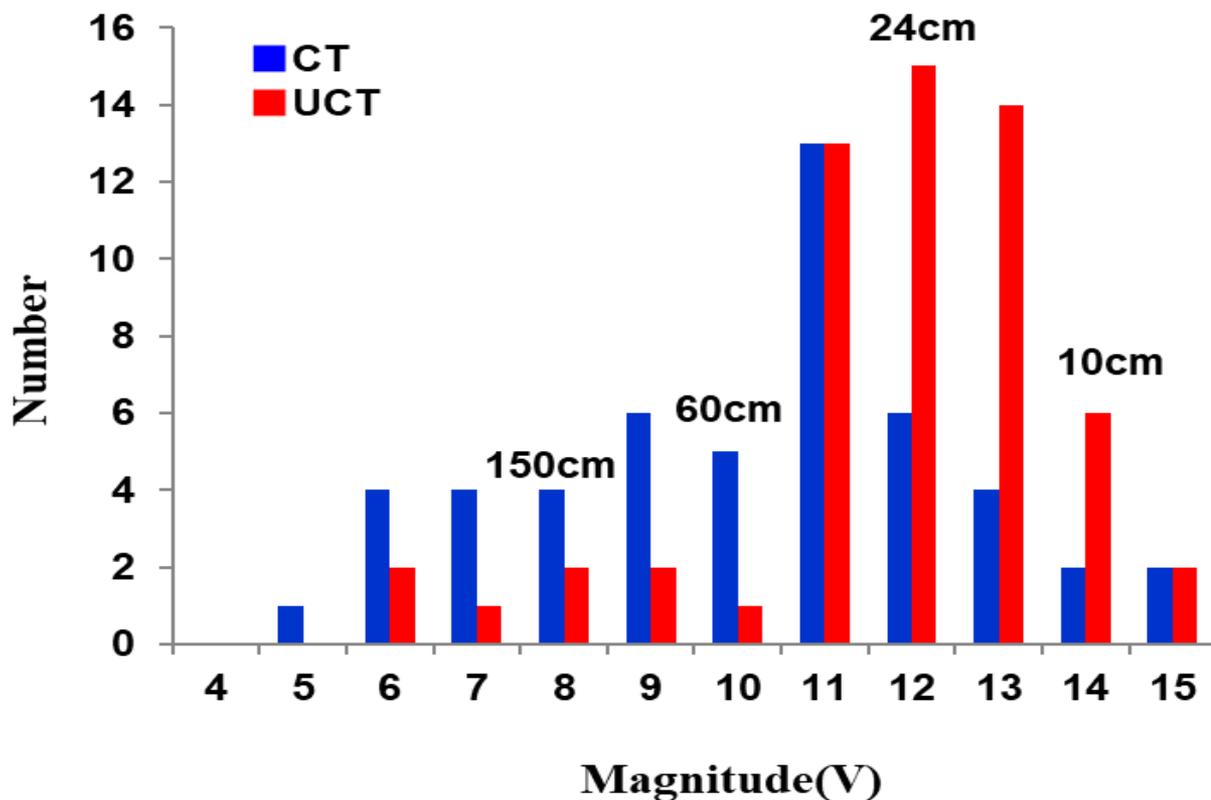
静止軌道デブリサーベイ観測

入笠山光学観測施設の35cm望遠鏡及びCCDカメラを利用した静止軌道のサーベイ観測



低軌道デブリサーベイ観測

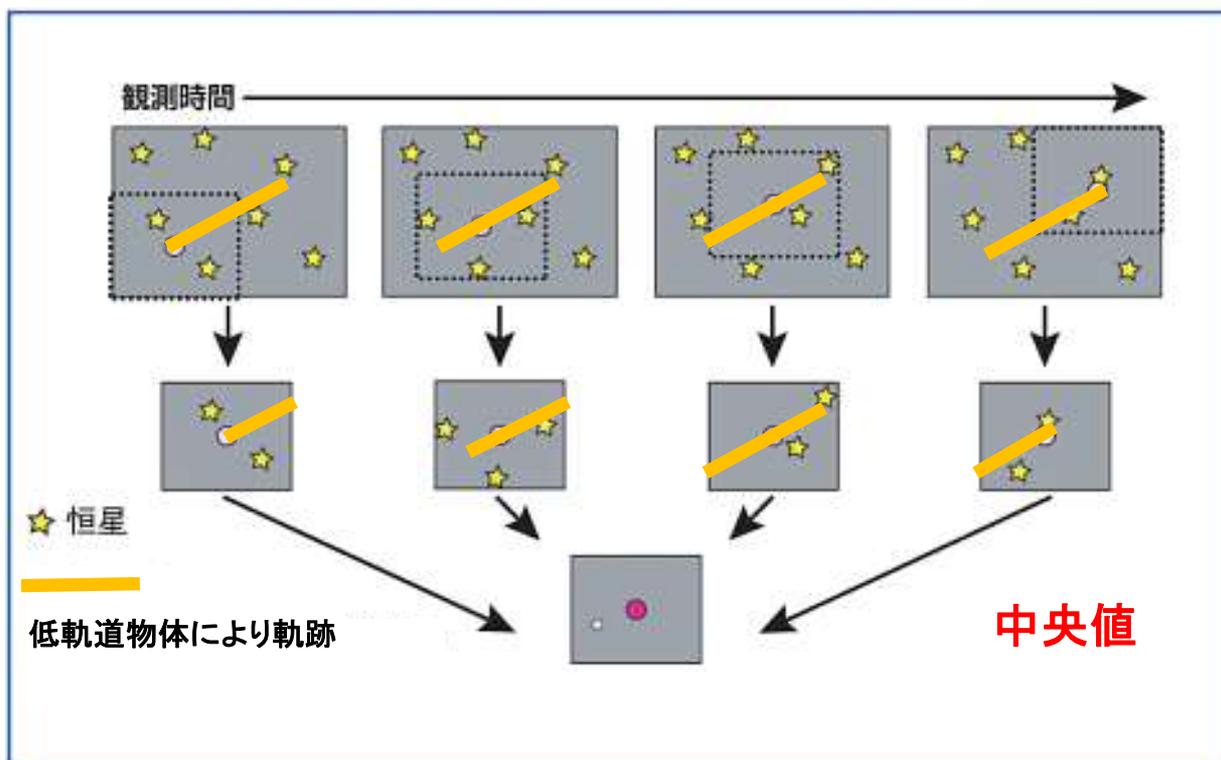
豪州遠隔観測施設の18cm望遠鏡及びCMOSカメラを利用した低軌道軌道のサーベイ観測



Tomoeデータを利用した低軌道物体の検出

Tomoe画像に写りこむ低軌道デブリによる軌跡を重ね合わせ法を適用して検出する。
1枚の画像に対して複数枚の画像を準備して重ね合わせ法を適用する。

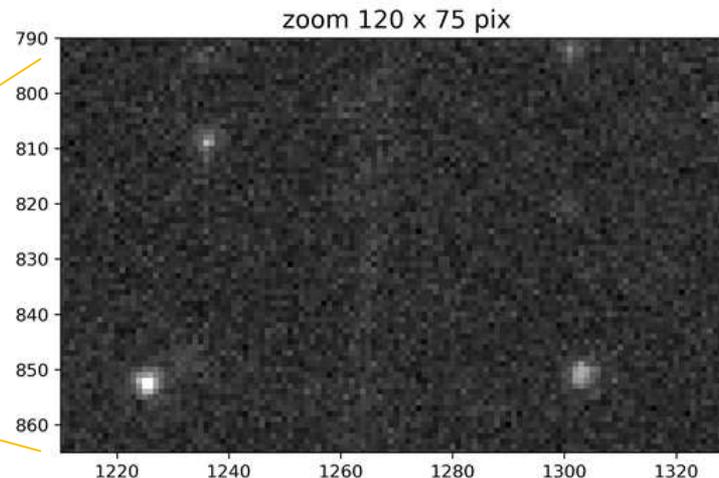
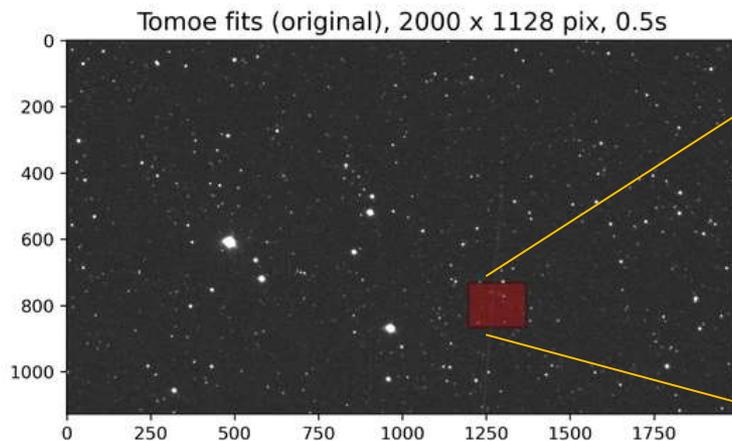
重ね合わせ法線分検出の概念図



Tomoeデータを利用した低軌道物体の検出



Tomoe画像に写りこんだ低軌道物体によるものと思われる軌跡



大量のCMOS画像データから重ね合わせ法を適用して線分を検出する技術を開発中。混雑化がすすむ低軌道のデブリ環境の把握を目指す。詳細はこの後のDr Manuel CegarraPolo氏の講演を参照。

まとめ

JAXA研究開発部門では地球接近天体や宇宙デブリ等の観測技術開発を長年実施している。多数の画像を効率的かつ高速に処理することによりこれまで画像中で見逃してきた暗い天体の検出を可能とする技術を開発した。

この技術を利用して地球接近天体や多くの未カタログデブリの検出ができること判明している。

今後はこの技術を軌道上の宇宙機やすばる望遠鏡、Tomo-e Gozenカメラからのデータに適用して地球接近天体の早期発見や太陽系の起源の解明、宇宙デブリ問題の解決に役立っていきたい。

謝辞

本研究の一部は、科研費(16K05546)及び防衛
装備庁の安全保障技術研究推進制度
(JPJ004596)の支援を受けて実施されました。