

軌道上センサと地上観測網の連携によるデブリ追跡

○田川真, 花田俊也 (九州大学), 柳沢俊史, 松本晴久, 黒崎裕久, 小田寛 (JAXA), 北澤幸人 (IHI)

要旨

地球周回軌道のデブリ環境は年々悪化を続けており, 継続的な宇宙開発利用に対する大きな脅威となっている. そうした脅威に対処するために, 宇宙機自身が取れる対策としては大きく防護と回避の二つが挙げられる. しかし, そうした対策が有効なデブリのサイズにはギャップがあるため, リスク低減は十分でない. 本研究では回避可能なデブリサイズの限界をより小さくするために, 軌道上センサと地上観測網の連携システムを用いた検出および追跡手法を提案する. 提案する手法の実現可能性について, 画像処理および観測感度向上の観点から評価を行った. 初期検討の結果, 軌道上センサによる検出結果を用いた初期軌道推定は, 地上観測網において追尾観測を行う際の画像処理に適用できる精度を持っていることがわかった. さらにそうした画像処理が行えるという前提のもとで地上観測網における観測可能な限界サイズを見積もったところ, 直径 5cm 以下という結果が得られた.

1. 導入

宇宙開発が始まって以来, 地球周回軌道はデブリによって汚染され続けており大きな脅威となっている. 現在運用されている宇宙機がデブリに対処する手段としては大きく防護と回避の二つが挙げられる. これら二つの手段が有効となるデブリのサイズには技術的限界からそれぞれ制限がある. 地球低軌道においては, 防護可能な物体の最大サイズはおよそ直径 1cm[1], また回避可能な物体サイズはおよそ 10cm 以上[2]に限られる.

本研究は特に地球低軌道のデブリに注目し, その追跡能力を向上させることで宇宙開発利用におけるリスクを低減することを最終的な目標とする. 近年活発化してきている宇宙状況認識の分野に対しても追跡能力の向上は大きく寄与する. 本研究では, 軌道上センサと地上観測網の連携によって小さな物体を追跡する手法を提案する. 本研究では手法の実現可能性を, 観測シミュレーション結果をもとに感度向上手法に着目し評価した.

2. 連携観測システム

本研究では, 追跡能力を向上させる手段として軌道上センサと地上観測網を組み合わせる運用する, 連携観測を提案する. 軌道上センサと地上観測網ともに, 光学観測によって物体の検出を行う. 光学的条件がほぼ一定に保たれることと, 低軌道における物体が集中していることから軌道上センサは太陽同期軌道周辺に配置することとした[3]. 軌道上センサが対象とする物体と同一のものを地上からも観測することを考える. 地上観測網が低緯度に配置された場合, 地上から観測可能な太陽同期軌道の物体はその昇交点地方時によって大きく制限さ

れる. これは観測地が日陰であることと, 軌道上物体が日照条件であることを同時に満たす必要があるためである. 観測地を高緯度に設定することで, 季節による制限はあるものの観測可能な昇交点地方時を広く取ることができ, 観測効率を向上させることができる. そうした連携の概念を図 1 に示す.

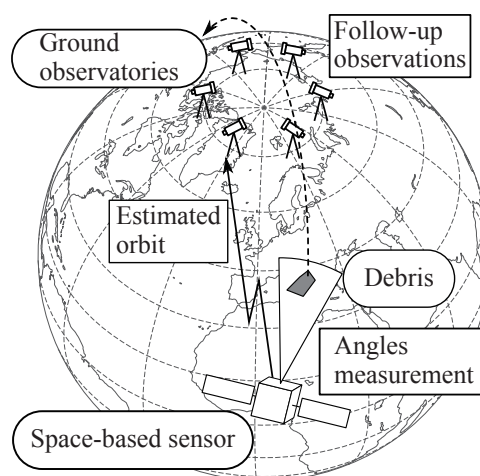


図 1. 連携観測システム概要.

連携観測の狙いは, 高い感度での観測を多くの物体に対して定常的に行うことである. より高い感度で観測を行うには, 地上設備よりも軌道上センサの方が大気の影響を受けないため有利である. 加えて, より小さなデブリを観測するには, 軌道上センサと対象デブリの軌道面が近いことが望ましい. これは対象デブリの見かけ運動が小さくなるためである. こうした観測をより多くの物体に対して行うには軌道上センサの軌道面を徐々に移動させ, 観測できる軌道面を変更し続ける必要がある.

このようなスワイプ観測を行うと、一度(あるいは数度)の観測後に再び軌道面が接近するまで次の観測が行えないため、軌道上センサのみでは同一物体に対する定常的観測が困難である。そこで、軌道上での観測以後の観測を地上観測網で補完することを考える。地上からの観測を行う際に、軌道上で得られたデータを適用することで画像処理を行い通常地上観測よりも高感度で観測することを可能とすることを目指す。

また、連携観測システムを設計するにあたって観測対象は太陽同期軌道周辺の物体と仮定する。

2.1. 地上観測網

連携観測システムにおける地上観測は、複数の光学望遠鏡によって行われるとする。光学望遠鏡それぞれにおいて仮定した諸元を表 1 に示す。

表 1. 地上観測設備の諸元仮定.

| | |
|--------|-----------------|
| 口径 | 1m |
| F 値 | 1.5 |
| 視野角 | 7.7°×7.7° |
| センサ種別 | CMOS |
| センササイズ | 対角 287mm |
| 暗電流 | 0.007e-/pix/sec |
| 量子化効率 | 0.53 (500nm) |

設定した諸元を持つ光学望遠鏡を極域周辺に等間隔に配置する。図 2 に北極点を中心とした地上観測網の配置例を示す。本研究での観測シミュレーションにおける季節を北半球での冬と仮定するため、考慮する地上観測網は北極域のもののみである。



図 2. 地上観測網の配置例 (北極域).

この配置により太陽同期軌道周辺物体について、広い昇交点地方時範囲を対象とした観測が可能となる。こうした高い緯度に観測施設を配置する場合、夏季は日陰条件が得られず光学観測は行えないため、南北の極それぞれに配置し、年間を通して観測機会を補完する必要がある。また、連携観測システムにおいて地上観測網は画像処理による信号増幅を前提としているため、検出に必要な元画像での信号雑音比は 2 とする。また、地上観測網から軌道上物体への可視条件は、観測施設が日陰かつ物体が日照であること。加えて、天文薄明を避けるために太陽仰角が -18° 以下とする。

連携観測システムにおいて地上観測網の役割は軌道上センサで検出された物体に対する定常観測による追跡運用である。軌道上センサで検出され、初期軌道推定結果が提供されれば地上観測網において適切な画像処理を施すことで通常では観測できないサイズの物体について情報を得ることができる。一度地上観測網で検出した後には、地上観測網の間で情報を共有しその後の定常観測を行うと仮定する。

2.2. 軌道上センサ

連携観測システムにおける軌道上センサの役割は感度の良い検出である。観測装置を軌道上に配置することで、大気による減光や夜天光によるノイズを排除することができ、感度面で有利となる。加えて観測可能な時間帯も適切な投入軌道を設定すれば、ほとんど制限されない。また天候の影響も受けないため、観測効率の点からも有利である。ここで軌道上センサに搭載する光学系の諸元を表 2 に示す。

表 2. 軌道上センサに搭載する光学系単体の諸元仮定.

| | |
|-------|---------------|
| 焦点距離 | 135mm |
| F 値 | 2 |
| 視野角 | 11.7°×11.7° |
| センサ種別 | CCD |
| 暗電流 | 0.2e-/pix/sec |
| 量子化効率 | 0.9 (500nm) |

ここで示した光学系を面外方向に 5 つ並べることで、図 3 に示すように観測可能な軌道面範囲を広くする。また軌道上センサは特別な画像処理を用いずに物体を検出するため、検出に必要な信号雑音比を 5 とする。

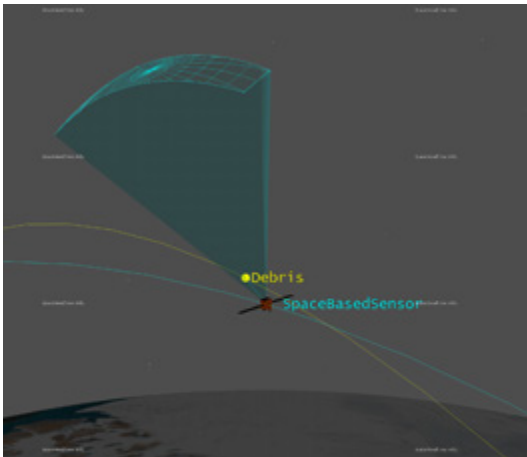


図 3. 軌道上センサの観測視野角。

観測感度、時間帯に利点を持った軌道上センサであるが、低軌道から低軌道物体を観測するシナリオを考えた時には同一物体に関する観測頻度の課題がある。こうした相対位置関係において、軌道上センサから見た対象物体の見かけの運動速度は両者の軌道面の差異に大きく影響される。より小さな物体を検出するには、見かけの運動速度は小さいほうが望ましい。従って、軌道上センサを投入すべき軌道は観測対象物体の軌道付近となる。

宇宙機がデブリを回避する運用に資するデータを作成する目的のためには、より数多くのデブリについて観測を行うべきである。軌道上センサが感度良く観測できるのは近い軌道面物体に限られることから、観測可能物体数を増やすためには軌道上センサの軌道面を変更し続ける必要があることがわかる。

軌道上センサに対する感度と観測対象数の要求を満たす軌道を設計すると、同一物体に対する観測の頻度は低くなる。それは一度観測した（軌道面が近づいた）後に再び観測可能な軌道面条件となるまでに長い時間を要するためである。そのため、連携観測システムにおける軌道上センサの役割は検出と初期軌道推定のみとしている。

2.3. 画像処理による連携

連携観測システムの実現可能性を評価する上で最も重要な課題の一つが、地上観測網が軌道上センサによって提供されるデブリ推定軌道にもとづき行う観測である。この地上における初回観測では、重ねあわせ法と呼ばれる画像処理を地上観測結果に適用することで感度向上を図る。この画像処理方法は JAXA によって開発され、静止軌道物体については適用実績がある[4]。

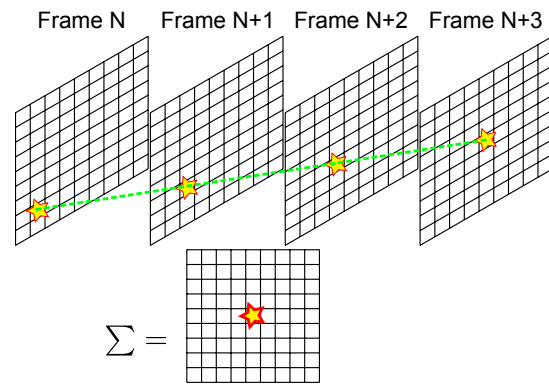


図 4. 重ねあわせ法概念。

この画像処理方法は、図 4 に示すように時系列に沿った複数の画像中において対象物体が見かけ上等速かつ直線状に運動していることを前提として信号を足しあわせていく。そのため、軌道種別が多岐に渡る低軌道物体について事前予測情報無しに適用することは計算時間あるいは観測計画の面から現実的でない。

本研究で提案する連携観測システムにおいては、軌道上センサから得られる初期軌道推定結果を低軌道物体に対する重ねあわせ法適用に必要な事前予測情報として用いる。地上観測網はこの事前予測情報を用いて、望遠鏡を予測位置に向ける追尾観測を行う。追尾観測中の画像内での実際の光点は観測誤差などの影響を受けて見かけ上運動するため、この運動に対して重ねあわせ法を適用し感度向上を図る。この手法の実現可能性は、予測した軌道と実際の軌道がどの程度のズレを生じるかという点によって評価できる。二つの軌道に大きなズレがあると、追尾観測中の光点が見かけ上大きく運動してしまうため、重ねあわせ法の適用が難しく感度の良い観測が行えない。仮定している軌道上センサを用いて得られる初期軌道推定結果により生じる見かけ運動が重ねあわせ法適用に問題ない程度かどうかを評価する。

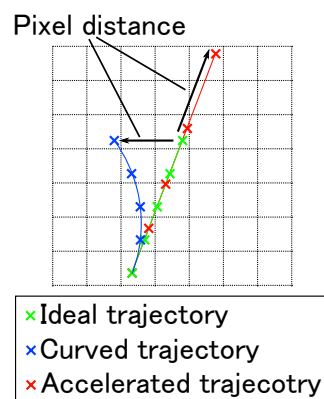


図 5. ピクセル距離概念。時系列で光点の素子上の運動を見た時に、緑線が示す理想的な等速直線運動からどの程度離れるかを示す。青線が曲線、赤線が加速した見かけ運動の例を表している。

重ねあわせ法の適用可否を評価するにあたり、図 5 に示すピクセル距離という量を導入する。この量は見かけ運動が理想的な直線等速運動からどの程度離れているかを表すものである。複数の画像を連続して撮影した場合に、累積ピクセル距離が 1 ピクセル以内に収まれば十分に重ねあわせ法が適用可能であると結論付けることができる。ここで累積ピクセル距離とは、ある時点から複数枚の連続撮影を行ったと想定した場合に、撮影終了時において実際の光点位置と理想条件下での光点位置のズレを表す。

軌道上センサによる観測をシミュレートし、その結果を元に地上観測網での追尾観測を模擬した。軌道上センサでの観測シミュレーションでは、CCD センサの分解能や GPS による位置決定精度を誤差要因として考慮した。地上観測網へ提供する初期軌道推定結果を求めるにあたり、軌道上センサでの観測が短時間で終わることを考慮し、単純化した円軌道仮定手法によって行った。

観測の自機は北半球での冬季と仮定し、地上観測網については北極域周辺分のみ考慮する。また軌道上センサでの観測は、赤道面上で起こったと想定する。従っておよそセンサ軌道の四半周期後に地上観測網での可視域に入ることになる。

北極域周辺に等間隔に配置した観測施設それぞれにおいて、ノイズおよび可視条件を考慮し模擬追尾観測中の検出しうる可視パスを抽出した。そのときに可視パス中の一秒ごとに算出した光点位置それぞれに対して、累積ピクセル距離を算出した。本シミュレーションおよび観測試験では、複数枚の連続撮影は 32 枚を CMOS センサによって行うと仮定する。

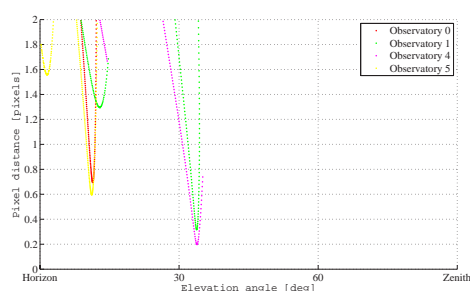


図 6. 連携観測におけるピクセル距離の傾向。連携観測シミュレーションにおいて、各地上観測施設から可視と判断されたパスについて、その時点から 32 枚の画像を連続撮影した時の累積ピクセル距離を示す。

図 6 に結果を示す。可視パス中の光点が持つ移動速度は仰角によって大きく異なるため、観測所別に仰角とピクセル距離の関係をまとめた。結果から、4 つの観測施設において等速直線運動とみなせる、すなわち累積ピクセル距離が 1 以下となる、見かけ運動を得ることが可能な

可視パス条件が実現できることがわかった。

2.4. 観測試験結果

シミュレーションによって得られたピクセル距離の傾向を確かめるために、観測試験を行った。試験に用いた光学系の主な諸元を表 3 に示す。

表 3. 観測試験における主要光学諸元

| | |
|------|-------------|
| 焦点距離 | 200mm |
| F 値 | 2 |
| 視野角 | 10.3°×10.3° |

この観測試験の目的は誤差を持った軌道情報に基づいた追尾観測において、実際の光点の見かけ運動が受ける影響を調べることであったので、対象物体はすでに追跡され軌道情報が公開されている明るい物体とした。そうした物体の軌道情報に対して、軌道上センサによる観測で予測される誤差を印加し、追尾観測の対象データとした。試験装置は図 7 の枠で囲まれた部分で、口径は 10cm 程度である。

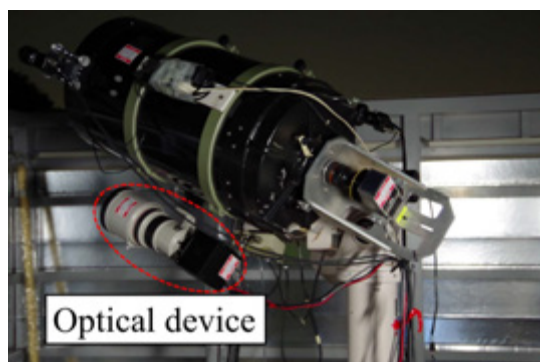


図 7. 観測試験に用いた光学系。一般のデジタルカメラ向けレンズと冷却 CCD カメラから構成される。

ここで示した試験装置を用い、誤差を印加した軌道要素に対して追尾観測を行った。追尾観測中に連続して画像を取得し、見かけ運動の特徴から観測対象と思われる光点を抽出した。得られた画像の中で対象が視野内に収まっている画像について明合成し二値化した結果を図 8 に示す。

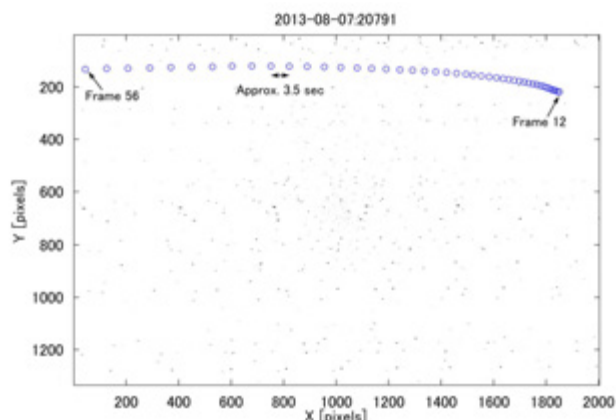


図 8. 観測試験で得られた画像の二値化明合成結果. 運動の傾向から小さな円で囲まれた点群が対象とした物体の軌跡と考えられる.

結果から背景の恒星とは異なり, デブリと見られる物体の運動が曲線状かつ加速していることが見て取れる. 得られた曲線に対してシミュレーション時と同様に累積ピクセル距離の傾向を仰角との関係として検証した. 結果を図 9 に示す.

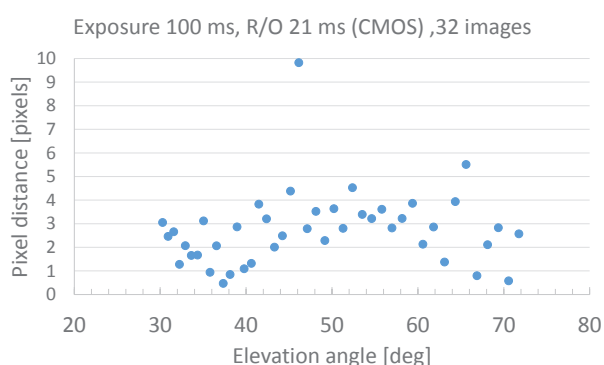


図 9. 光点それぞれの時点から連続撮影した際の累積ピクセル距離. 32 枚の連続撮影を想定する際の読み出し時間は CMOS センサの値を用いた. またそれぞれにおける露光時間は 100msec で一定として累積ピクセル距離の算出に用いた.

結果から仰角 70° 付近において, 重ねあわせ法を適用するに足るピクセル距離を得ることが可能であることがわかる. 観測予報におけるピーク仰角がおよそ 80° であったことから, ピーク仰角付近で見かけの運動速度の変化率が小さくなったためと考えられる. 地平付近においてもその見かけ速度が小さいために, ピクセル距離条件は満たしているが, 後述する感度解析結果から低い仰角は感度面で不利であることがわかっており観測には適さないと言える. これら領域の間では, 光点はピーク仰角に向かって昇るように見え, このときの見

かけ速度は加速を続けている. そのため, これら仰角範囲内での観測は, 等速性の面から重ねあわせ法には適さない.

観測試験結果から, 誤差を含んだ軌道情報を用いた追尾観測における累積ピクセル距離の傾向が確かめられた. 従ってシミュレーションによって得られた, 軌道上センサによって得られる初期軌道推定結果を用いることで, 地上観測網での初回観測に対して重ねあわせ法を適用し, 感度を向上させることが可能であるという結論は妥当であると言える.

3. 感度解析

連携観測システムの目的は, 地球低軌道において現状追跡できていないサイズのデブリを観測および追跡することである. 重ねあわせ法が適用可能であることを前提とし, 仮定した地上観測網によって観測できるサイズを求めた. 観測限界サイズを観測仰角と見かけ運動速度の関係として表現する. 観測仰角の高低は大気厚さに, 見かけ運動速度はピクセルあたりに得られる信号強度に影響し, 観測限界サイズを左右するためである.

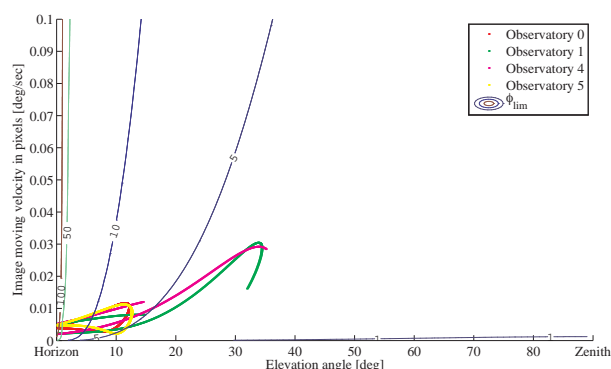


図 10. 地上観測網での可視パスと観測限界サイズの傾向.

結果は, 観測仰角と見かけ運動速度平面に観測限界サイズを等高線として表現したものである. 仰角が低い場合は, 見かけ速度が小さい場合でも厚い大気の影響を受けて観測限界サイズが大きくなることが見て取れる. また等高線と同時に, ピクセル距離算出のシミュレーションで用いた地上観測網での可視パスにおける仰角と移動速度の関係を示している. それぞれの地上局で得られた可視パスと観測限界サイズを合わせて見ると, 二つの観測施設では 5cm 以下の物体について潜在的に観測可能であることがわかる. ここでさらに, ピクセル距離と観測仰角の関係の結果を合わせて考えることで, 潜在的に観測可能な可視パスのうち重ねあわせ法の適用が可能であり, 5cm 以下の物体が観測できる領域が明らかに

なる．今回仮定した条件では，観測時の仰角がおよそ 30° を超えた可視パスにおいて重ねあわせ法が適用可能であった．

4. 結論

地球低軌道に配置した軌道上センサと極域に配置した地上観測網を連携させることで小さな物体を追跡するシステムを提案した．シミュレーションおよび簡易的な試験結果から，本研究で提案した連携観測システムにおいて，地上観測網での軌道上センサからのデータを用いた信号増幅は可能であると言える．こうした信号増幅を行った場合に，地上観測網では 5cm 以下の物体の追跡が可能となる．

観测试験は CCD センサによる簡易的なものだったため，より現実的な重ねあわせ法適用可能範囲を確かめるには更なる検討を行う必要がある．また，地上観測網の恒星や配置についてもコストと追跡運用の両面から検討を進める必要がある．

- [1] E. Christiansen and J. Kerr, “Ballistic limit equations for spacecraft shielding,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 26, pp. 93–104, 2001.
- [2] U. Nations, “Technical Report on Space Debris,” *New York*, p. 15, 1999.
- [3] 田川真, 花田俊也, 柳沢俊史, 松本晴久, and 北澤幸人, “軌道上光学システムを用いた地球低軌道小径デブリ追跡,” in *第 57 回宇宙科学技術連合講演会*, 2013.
- [4] T. Yanagisawa, H. Kurosaki, and A. Nakajima, “The Stacking Method: The Technique to Detect Small Size of GEO Debris and Asteroids,” JAXA-RR-07-032E, 2008.