

静止軌道周辺スペースデブリ検出のための線分積分法の提案

稲葉 敬之^{†a)} 谷口 匠[†]

Trajectory Segment Integration Method for GEO Space Debris Detection

Takayuki INABA^{†a)} and Takumi TANIGUCHI[†]

あらまし スペースデブリは宇宙利用における深刻な問題とされている。本論文では静止軌道周辺におけるスペースデブリの光学的な搜索・監視法として線分積分法を提案する。提案法は、処理負荷低減と検知性能向上を図るために、位置推定処理系に先立ちシフト量推定処理系を備えることを特徴としている。シフト量推定処理系の総組み合わせによるシフト量マップ合成処理では高 S/N が得られデブリの有無判断と位置推定処理系のための初期値としてのシフト量の推定を可能としている。本手法が適用可能なデブリ離心率、軌道傾斜角について、また従来法との処理負荷比較について考察するとともに、計算機シミュレーションではシフト量推定処理系の S/N 改善能力について評価し、位置推定処理系の具体的な制御法を提言している。また静止軌道周辺の小デブリである Titan 3C Transtage デブリの実観測データ（小型望遠鏡（口径 130 mm）を使用）に対し提案法を適用した評価解析より、静止軌道周辺のデブリ搜索・監視のための手法として提案法が有効であることを示す。

キーワード スペースデブリ、光学望遠鏡、線分積分法、パルス圧縮、Titan 3C Transtage

1. ま え が き

地球周回軌道に存在する役目を終えた人工衛星、ロケットや粉碎衛星の残骸はスペースデブリ（以下デブリと呼ぶ）と呼ばれ近年その数は増加の一途をたどっており、今後の宇宙利用において深刻な問題であるとされている。静止軌道においては、衛星同士の衝突は確認されていないが、2 件の爆発粉碎が確認されている。一つは EKRA2 (International Designator 1977-092A9) で、バッテリーの爆発により 1978 年 6 月 25 日に粉碎した。二つ目は 1992 年 2 月 21 日に起こった Titan 3C Transtage (1968-081E) である。残留推進薬が原因とみられている。しかし NASA, ESA の観測によると、これら 2 件の爆発ではない粉碎によって生じたと思われる破片も観測されており、実際には静止軌道で 10 件ほどの粉碎現象があったと考えられている [1]。このような背景の元、気象・通信・放送等を担う多数の衛星群が投入されている静止軌道周辺のリアルタイムな

デブリ搜索・監視システムの開発・実用化が求められている。高度 200~1,000 km の低軌道帯のデブリに対する搜索・監視のためには主にレーダ装置が用いられているが、距離が遠く電波を送受信するレーダでは検知が困難となる静止軌道周辺のデブリに対しては、一般に光学望遠鏡によるパッシブ観測が適しているとされている。

以上の背景より本研究では、静止軌道周辺の衛星やデブリを小型光学望遠鏡で搜索・監視可能とする観測法及び信号処理法の研究開発に取り組む。

研究開発上の主たる課題は、微小なデブリを小型の望遠鏡でも観測可能とするため高い検知能力を備えること、またリアルタイム搜索を実現するために装置規模や計算処理負荷が小さいことが求められる。

静止軌道上のデブリ検知では、架台による追尾等が不要で簡易な計測法である固定撮影法が用いられてきた [2], [3]。しかし、厳密な静止軌道から離れたデブリを検出しようとした場合にもデブリが流れない露光時間で検出性能確保のために観測時間を長くすると膨大な撮影枚数となる。また、デブリが流れない時間内の画像間でのメディア処理では十分に恒星が抑圧できることも懸念される。また、デブリ線分検出において多数の画像を用いた全探索が必要であり処理負荷の低

[†]電気通信大学大学院情報理工学研究所, 調布市

Graduate School of Electro-Communications, The University of Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, 182-8585 Japan

a) E-mail: inaba@ee.ucc.ac.jp

DOI:10.14923/transcomj.2021JBP3038

減が課題とされている [4].

一方、デブリが流れることを許容し、恒星を有効かつ簡易に除去するために恒星追尾撮影法を採用し、少ない画像枚数からデブリ線分を有効かつ効率的に検出する手法の研究はまだなされていない。

以上の背景から本論文では、静止軌道周辺デブリ検出において、検知能力が高く処理負荷が小さい「線分積分法」[5]を提案する。提案法でのデブリ検出に用いる画像は、検出性能向上のため数十分ほどの長時間にわたる恒星追尾撮影での観測画像群を用いる。1枚の撮影露出時間は、30秒ほどの長さとするためデブリは点像でなく線分 (Trajectory Segment) として撮影される。一方、撮影枚数は30枚程度と少ない枚数となる。積分する画像枚数が少ないため処理負荷低減につながる。

提案法の信号処理構成は、恒星を除去しデブリ位置を探索する範囲 (探索エリア画像と呼ぶ) を切り出す「前処理系」、デブリの有無を判断し連続する探索エリア画像間でのデブリ線分の移動量 (シフト量と呼ぶ) を求める「シフト量推定処理 (Shift estimation method, SEM) 系」、求めたシフト量値 (今回は探索エリア画像内1目標と想定) を用い画像間で位置調整し画像積分と点像圧縮しデブリ位置座標を求める「位置推定処理 (Location estimation method, LEM) 系」から構成される。

提案法は SEM 系を備えることを特徴としており特に「シフト量マップ合成処理」を総組み合わせにて合成することで LEM 系を超える高出力 S/N が得られ LEM 系の処理を行う前にデブリ有無の判定を可能としている。また、シフト量が推定されるため LEM 系での重ね合わせのための既知情報として用いることで全探索が不要となる。すなわち出力 S/N に応じて LEM 系での処理法の選択を最適化することが期待される。例えば出力 S/N が良い場合から悪くなるに従い、①SEM 系で得たシフト量のみで LEM 系を1回だけ演算する。②SEM 系で得たシフト量を初期値として勾配法 (最急降下法など) [6]を用いて LEM 系を山登り求解する。③SEM 系で得たシフト量を初期値として確率的探索法 (例えば人工蜂コロニー法 [7], [8] など) で探索する。4., 5. にて詳述するが、おおむね②の勾配法による探索にてデブリ位置推定が可能でありその探索イテレーション数も数十回程度にて最適値に到達することが期待され、この点でも処理負荷軽減に大きく寄与すると考えられる。

本論文 2. では、観測方法と観測対象の目標条件について、目標デブリの離心率と軌道傾斜角とセンサ画角との関係について説明する。

3. は、提案する線分積分法信号処理を示す。4. では、実観測データを元にして生成した疑似データによる計算機シミュレーションにて、SEM 系及び LEM 系の出力 S/N 比較評価、及びシフト量の誤差評価を行い、提案法の理想条件での期待性能等の考察を行う。5. では、小型の観測機材を用いて撮影した静止軌道周辺人工衛星と微小デブリ画像を元に提案法の有効性について考察する。

2. デブリ軌道条件と具体的機器構成例

3. で提案する線分積分法信号処理においては、検出性能向上のため数十分ほどの長時間にわたる恒星追尾撮影での観測画像群を用いる。1枚の撮影露出時間 T は30秒ほどの長さとするためデブリは点像でなく線分 (200画素程度) として撮影される。一方、画像枚数 N は30枚程度 (観測画像群と呼ぶ) である。なお、当手法を用いた監視システムでは、恒星追尾にて連続撮影し「 N 枚の観測画像群」を逐次スライディングにて選択し、1回の線分積分法信号処理への入力画像とする。

以下、本章では、観測対象とするデブリの軌道傾斜角条件及び離心率条件について示す。また、システム構成の具体例を示し、静止軌道周辺全域を監視するためのシステム規模について言及する。

2.1 検出対象とするデブリ軌道条件

本節では、 N 枚の観測画像群の画像全てにデブリ線分が撮影され提案法である線分積分法が適用可能となる、焦点距離とセンササイズから決まる縦横画角とデブリの離心率 e 、軌道傾斜角 I との関係について検討する。なお本節では提案法で観測可能となるデブリ軌道条件の目安を得ることを目的としており、簡単のため、センサの取り付け角度誤差等は無視するものとする。

1枚の画像撮影時の露出時間を $T[\text{sec}]$ とすると (総観測時間 $T_m \equiv N \cdot T$)、恒星追尾による静止軌道上デブリの移動角は $\theta_a[\text{deg}] (= 360 \cdot T / (24 \times 60 \times 60))$ である。このとき、1枚の画像内でのデブリ線分画素数 D は式 (1) で表される。

$$D = \theta_a \frac{P_x}{V_x} \quad (1)$$

ここで P_x はカメラセンサの横方向の画素数, V_x は横方向の画角 (deg) である. なお, デブリ線分が画角の端から端まで動く間の観測画像群 N 枚は下式で表される (図3 参照).

$$N \approx \frac{P_x}{D} \quad (2)$$

1) センサの横方向画角 V_x と離心率 e の関係

観測対象のデブリが円軌道でなくだ円軌道である場合, 近点での線分長と静止軌道上の円軌道デブリ線分長との画素数差を u ($u \ll D$) とすると, 式 (2) を以下に置き換える.

$$N < \frac{P_x}{D+u} \quad (3)$$

ここで遠点でのデブリ線分長は $D-u$ であり, 角速度と線分長の関係と面積速度一定の法則から, 遠点・近点距離と離心率の関係を整理すると離心率 e は, u を用いて式 (4) で表される.

$$e \equiv \sqrt{1 - \left(\frac{\text{近点距離}}{\text{遠点距離}} \right)^2} = \sqrt{1 - \left(\frac{D-u}{D+u} \right)^2} \quad (4)$$

以上式 (3)(4) より離心率 e の上限式 (5) が得られる.

$$e < \sqrt{1 - \left(2 \left(\frac{T}{240} \cdot \frac{N}{V_x} \right) - 1 \right)^2} \quad (5)$$

2) センサ縦方向画角 V_y と軌道傾斜角 I の関係

軌道傾斜角 I のデブリを地球中心からみた緯度は, I を振幅とした正弦波で表せる. 軌道の変化率が最大となる位置における 1 枚の画像の露出時間 T の間での移動角 V_{max} (deg) は次式で表される.

$$V_{max} = I \cdot 2\pi \cdot \frac{T}{24 \times 60 \times 60} \quad (6)$$

以上より, 移動角の正負を考慮して, N 枚の画像にデブリ線分が撮影されるには, V_{max} と縦方向画角 V_y が式 (7) の関係を満たす必要がある.

$$V_y > 2(N-1) \cdot V_{max} \quad (7)$$

式 (6)(7) より軌道傾斜角 I の範囲は T , V_y , N を用いて式 (8) で表される.

$$I < \frac{V_y}{4\pi(N-1) \cdot \frac{T}{24 \times 60 \times 60}} \quad (8)$$

2.2 具体的機器構成例

具体的構成例としてここでは表1に示す二つの例において光学機器諸元を検討する. 構成Aは4, 5.で示す性能評価シミュレーションと原理検証実験で用いた機材諸元に基づくものである. 一方, 構成Bは運用システム構築時を想定したものであるが, 低価格で明るい汎用鏡筒であるRASA11 (焦点距離620mm, イメージサークル70mm, f値2.0)の諸元を基にした例である.

撮影パラメータは表1に示すように露出時間 T を30秒とし, 式(3)から画像枚数 N はほぼ上限値である18, 30とする.

このとき2.1で得られた関係式より, 観測対象とするデブリの離心率 e と軌道傾斜角 I に対するセンサ縦横画角との関係は図1で示される. 具体的には構成A, Bの画角にて, それぞれ離心率 e は0.636, 0.767まで, 軌道傾斜角 I は23.3deg, 36.1degまでの静止軌道周辺デブリ観測へ対応可能であることが確認される.

なお, 構成Bにおいて横方向画角が4.57degであることから, 指向方向を変えた8台の鏡筒を用いることで静止軌道周辺の方位角 ± 18 degの全域をリアルタイムに搜索可能となる.

表1 システム構成例の機材諸元と撮影パラメータ

Table 1 Equipment specifications of system configuration example and shooting parameters.

Equipment specifications	A	B
Telescope Focal length [mm]	430	620
Sensor Pixel pitch [μ m]	4.63	19
Sensor size (vertical) [mm]	13	49.5
Sensor size (horizontal) [mm]	19.1	49.5
Angle of view (vertical) [deg] : V_y	1.73	4.57
Angle of view (horizontal) [deg] : V_x	2.54	4.57
Number of pixels (vertical) : P_y	2822	2605
Number of pixels (horizontal) : P_x	4144	2605
Total Exposure Time [sec] : T	30	30
Total Images : N	18	30

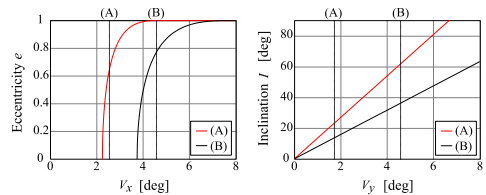


図1 センサ画角と目標条件の関係 (左: センサ横画角-離心率, 右: センサ縦画角-軌道傾斜角)

Fig. 1 Relationship between the number of image pixels and the target condition (left: Angle of view -Eccentricity, right: Angle of view -Inclination).

3. 提案する線分積分法の信号処理

提案する線分積分法の信号処理ブロック図, 処理画像フロー図をそれぞれ図 2, 3 に示す. 入力は 2. で説明した「 N 枚の観測画像群」である. 線分積分法の信号処理構成は, 「恒星減算処理 (Star subtraction)」と「探索エリア切り出し処理 (Search area cropping)」からなる「前処理系 (Pre-processing)」, 画像間のデブリ線分のシフト量推定のための「画像間相互相関処理 (Correlation between two images)」 「シフト量マップ合成処理 (Shift

map composition)」 「シフト量検出処理 (Shift pixels detection)」 からなる「シフト量推定処理 (Shift estimation method, SEM) 系」, 及び最終的なデブリ位置推定のための「線分積分処理 (Trajectory segment integration)」と「線分圧縮処理 (Trajectory segment compression)」からなる「位置推定処理 (Location estimation method, LEM) 系」で構成される.

SEM 系は, 総組み合わせにてシフト量マップ合成を行うことで, LEM 系を超える高出力 S/N が得られ LEM 系の処理を行う前に, デブリ有無の判定を可能とする. また, シフト量が得られるため LEM 系での重ね合わせのための初期値として用いることができ, 少ない処理負荷にて位置を推定することが期待される. 以下に各処理について説明する.

3.1 線分積分法の信号処理

3.1.1 前処理系 (Pre-Processing)

1) 恒星減算処理 (Star subtraction)

N 枚の観測画像群 $F(n)$ に対し, 画像 $n = 0, 1, \dots, N-1$ ごとに以下処理により恒星減算画像 $F_s(n)$ を得る.

$$F_s(n) = \text{Thres}(F(n), th) \quad (9)$$

Thres はしきい値 th 以上の要素を雑音の平均値に置き換える処理である. このしきい値処理でのしきい値

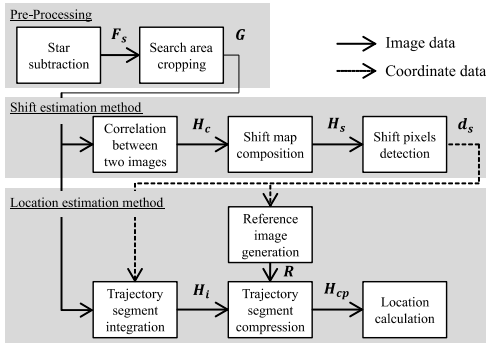


図 2 提案法の信号処理ブロック図

Fig. 2 Signal processing block diagram of the proposed method.

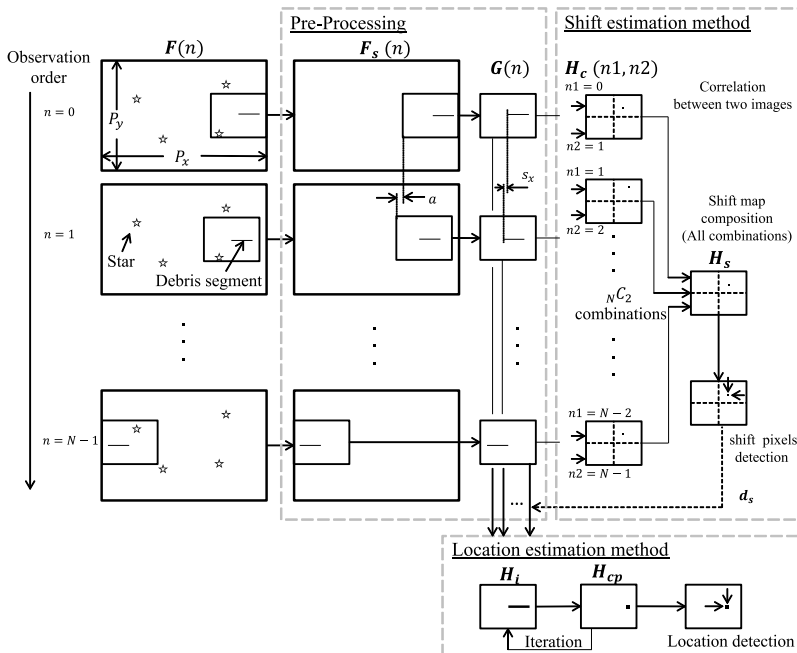


図 3 処理画像フロー図

Fig. 3 Schematic image flow.

はデブリ線分の想定輝度より大きくしておく。

この恒星減算を高精度化するには幾つかの方法が考えられるが、デブリへの悪影響が生じないようにするため、また後述するように提案法では恒星の消え残りの影響を回避可能であることから処理負荷が少ない上記方法を採用している。

2) 探索エリア切り出し処理 (Search area cropping)

計算負荷と恒星の影響を低減するために、探索エリア画像 $G(n)$ として画像サイズ $P_{tx} \times P_{ty}$ の範囲を切り出す。このとき、探索エリア画像 N 枚全てに検出対象とするデブリが収まっているように、想定するデブリ軌道に沿って切りだし位置を移動させながら切り出す。処理は次式で表される。

$$G(n) = \text{submatrix}(F_S(n), x1, x2, y1, y2) \quad (10)$$

submatrix は配列 $F_S(n)$ から $x1$ 行目から $x2$ 行目、 $y1$ 列目から $y2$ 列目の範囲の要素を取り出す処理であり $x1, x2, y1, y2$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} x1(n) &= x_0 + a \cdot n \\ x2(n) &= x_0 + a \cdot n + P_{tx} - 1 \\ y1(n) &= y_0 + b \cdot n \\ y2(n) &= y_0 + b \cdot n + P_{ty} - 1 \end{aligned} \quad (11)$$

ここで x_0, y_0 は切り出しの初期位置、 a と b は探索エリア画像間のデブリ線分移動量仮定値 (厳密な静止軌道上軌道目標の移動量) である。線分移動量仮定値を用いることで、静止軌道「周辺」デブリの探索エリアを小さくすることが可能となる。なお、横方向の画像サイズ P_{tx} はデブリ線分長 D の3倍程度を採用する。また縦方向の画像サイズ P_{ty} は、4.2で示すように小さい方が S/N 改善性能や計算負荷の点で有利になる。なお、縦方向を小さくした場合は、縦方向の切り出し開始位置を変えて、式 (12) 以降の処理を複数回行う。

3.1.2 シフト量推定処理系 (Shift estimation method, SEM)

デブリが静止軌道から離れている等の要因により探索エリア切り出し処理で与えた移動量仮定値には誤差がある。この連続する探索エリア画像 $G(n)$ 間での誤差をシフト量と呼び、SEM 系での推定対象である。観測画像内でデブリはほぼ等速直線運動であると仮定しておりシフト量は一定値となる。

1) 画像間相互相関処理 (Correlation between two images)

シフト量を推定するために、2枚の探索エリア画像の相関処理を周波数軸上の畳み込み積分 (convolution) により実施し「画像間相関マップ $H_C(n_1, n_2)$ 」を作成する。

$$H_C(n_1, n_2) = \text{convol}(G(n_1), G^*(n_2)) \quad (12)$$

convol は畳み込み積分を表し、 $0 \leq n_1 < n_2 \leq N-1$ であり、 $G^*(n)$ は要素反転 (Flip-Matrix) 画像である。この畳み込み積分は FFT を用いた周波数軸上の積で演算することにより計算量の軽減が可能である [9]。

2) シフト量マップ合成処理 (Shift map composition)

連続した画像間で作成した $(N-1)$ 個の画像間相関マップを合成することで CC シフト量マップ (CC (consecutive combination) shift map) が得られる [5]。しかしここでは SEM 系において LEM 系にも勝る S/N 改善を図りデブリの有無検出を行うことを目的として、 ${}_N C_2 = N_S (= N(N-1)/2)$ の組からなる総組み合わせ (AC (all combination)) による「画像間相関マップ $H_C(n_1, n_2)$ 」を合成し AC シフト量マップ (AC (all combination) shift map) H_S を作成する方法を提案する。

$$H_S = \sum_{n1=0}^{N-2} \sum_{n2=n1+1}^{N-1} \text{comp}(H_C(n1, n2)) \quad (13)$$

ここで、関数 comp は、デブリの移動は十分直線であると仮定できると仮定して、連続する画像間 ($n_2 - n_1 = 1$) での画像間相関マップ $H_C(n_1, n_2)$ 上の座標 (c_x, c_y) に含まれる目標は、例えば $n_2 - n_1 = K$ の画像間相関マップでは座標 $(K \times c_x, K \times c_y)$ に対応することを考慮して合成を行う。具体的処理の方法は各種考えられるが、ここでは $K = 1$ の画像間相関マップ上のシフト量分解能 (1 画素) を考慮して、 $K \neq 1$ の場合は上記座標を中心に「 $\pm K$ の範囲の画素の平均値」を採用した。

なお、探索エリア画像 $G(n)$ (画像サイズ $P_{tx} \times P_{ty}$) に対し、上記の comp により合成可能なシフト量の最大探索範囲 P_{sx}, P_{sy} との関係は下式で表される。

$$P_{sx} < \frac{P_{tx} - D}{(N-1)} \quad (14)$$

$$P_{sy} < \frac{P_{ty}}{(N-1)} \quad (15)$$

上記 (14)(15) を満足する範囲で P_{sx}, P_{sy} を大きくすることで、静止軌道上デブリ線分の移動量仮定値 (a, b) からの静止軌道「周辺」デブリのシフト量との差が大きくても、検出が可能となる。

3) シフト量検出処理 (Shift pixels detection)

シフト量マップ H_s のピーク値に対して次式に示す S/N (Signal to Noise standard deviation ratio) を検出評価パラメータとして定義する。

$$S/N = 10 \log \left(\frac{A - \mu}{\sigma} \right) \quad (16)$$

ここで、 A はシフト量マップのピーク値であり、 μ , σ はそれぞれ雑音平均、標準偏差を表す。

検出目標振幅や背景雑音からあらかじめ設定した検出判定のしきい値より S/N が大きい場合にはデブリありと判断する。デブリなしの場合は、以降の処理は実施しない。デブリありと判定されたときにはシフト量マップ H_s の検出座標値をシフト量 $d_s = (s_x, s_y)$ として出力する。ここで s_x, s_y はそれぞれ x 方向、 y 方向のシフト量を表す。

3.1.3 位置推定処理系 (Location estimation method, LEM)

LEM 系では、SEM 系で検出されたシフト量を既知情報として 1) 線分積分処理、2) 線分圧縮処理を実施しデブリ位置を算出する。この二つの具体的な処理制御法として、S/N の高い場合から順に、方法①SEM 系で検出されたシフト量のみに対して位置算出する、方法②SEM 系で検出されたシフト量を初期値として勾配法等で探索する、方法③SEM 系で検出されたシフト量を初期値として群知能アルゴリズム等の確率的探索 [5] を行う (探索評価関数が多峰性となる場合) 等の方法を用い分けることが計算負荷軽減のために有効である。

また、まえがきで述べたように、提案法はデブリを点像でなく線分として撮影した画像を用いていることに起因して、探索評価関数の最適値が鋭いピークとなるのではなく周囲に勾配をもつ単峰性形状となることが期待される。このため、実用的な範囲において、③でなく②で対処可能であり計算負荷軽減が期待される。更に明るい対象の場合には①を選択し LEM 系での探索は一切不要となる。

1) 線分積分処理 (Trajectory segment integration)

シフト量 d_s を元に、それぞれ N 枚の探索エリア画像 $G(n)$ の位置調整 (shift) と加算を行い、「線分積分画像 H_i 」を得る。

$$H_i(d_s) = \sum_{n=0}^{N-1} \text{shift}(G(n), d_s) \quad (17)$$

2) 線分圧縮処理 (Trajectory segment compression)

シフト量 d_s とデブリ線分移動量仮定値 (a, b) からデブリ線分の傾きを近似的に定め要素反転して参照関数 $R(d_s)$ を作成する。ここでは、デブリ線分長は対象が静止軌道周辺デブリであることから近似値を用いることとする。線分圧縮処理は、画像 $H_c(n1, n2)$ の作成時に用いた周波数軸上での畳み込み積分と同様の処理であり「線分圧縮画像 $H_{cp}(d_s)$ 」を得る。

$$H_{cp}(d_s) = \text{convol}(H_i(d_s), R(d_s)) \quad (18)$$

3) 位置計算 (Location calculation)

画像 $H_{cp}(d_s)$ 上のピーク位置と移動量仮定値 (a, b) を用い入力画像 $F(0)$ (1 枚目画像) 上の位置に変換し、検出したデブリの位置を定める。

3.2 処理負荷に関する考察

本節までに示した提案法と重ね合わせ法の主たる積和演算回数の概算比較を行う。

1) 提案する線分積分法

SEM (AC) 系、LEM 系の各処理での処理負荷概算を以下に示す。

① 恒星除去

しきい値処理の回数

$$N \cdot P_x \cdot P_y$$

② SEM 系の積和演算回数

・画像間相互相関処理 (2 次元 FFT, 総組み合わせ加算, 2 次元 IFFT) :

$$N \cdot FFT(P_{tx}, P_{ty}) + N_s \cdot P_{tx} \cdot P_{ty} + N_s \cdot FFT(P_{tx}, P_{ty})$$

・シフト量マップ合成 (AC) : $N_s \cdot P_{tx} \cdot P_{ty}$

③ LEM 系の積和演算回数

・線分積分処理 : $N_i (P_{tx} \cdot P_{ty})$

・線分圧縮処理 : $N_i (2 \cdot FFT(P_{tx}, P_{ty}) + P_{tx} \cdot P_{ty})$

ここで、 N_i は LEM 系のイテレーション数である。なお、画像間相互相関処理と線分圧縮処理で用いる 2 次元 FFT 及び 2 次元逆 FFT の積和演算回数は Radix4 を用いた場合以下で示される。

$$\begin{aligned} FFT(x, y) &= y \cdot \left\{ \left(4x + \frac{3}{2}x \right) \cdot \log_4(x) + 3x \cdot \log_4(x) \right\} \\ &\quad + x \cdot \left\{ \left(4y + \frac{3}{2}y \right) \cdot \log_4(y) + 3y \cdot \log_4(y) \right\} \\ &= y \cdot \left\{ \frac{17}{2}x \cdot \log_4(x) \right\} + x \cdot \left\{ \frac{17}{2}y \cdot \log_4(y) \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

以上より、例えば、撮影画像サイズが 4144×2822 ,

総観測時間 T_m が 450 秒、 $N = 15$ (線分撮影露出時間 T が 30 秒) のとき、提案法①のしきい値処理の回数は 1.8×10^8 回、②と③での積和演算回数の概算数は探索エリアが 601×151 、 601×1201 のときそれぞれ 9.1×10^8 回、 1.1×10^{10} 回となる。ここで、探索エリアが 601×151 のとき図 8、9 の解析結果から N_i を 10 とした。一方シフト量の誤差は主に x 軸であることから 601×1201 (x 軸は同じ) のときは約 3 倍の 30 と仮定した。

2) 重ね合わせ法 (シフトモード)

文献 [3] に示されている固定撮影画像を用いる「重ね合わせ法 (シフトモード)」は、全 N 枚の画像を連続する $M1$ 枚画像の $M2$ 組にわけ、 $M1$ 枚画像間でメディアンにより恒星除去を行い、その出力である $M2$ 枚の画像でデブリの移動 (シフト量) の全探索を行う。全探索を行うシフト量範囲を $P_{sx} \times P_{sy}$ とすると処理回数は、

① 恒星除去処理

メディアン処理の回数

$$M2 \cdot P_x \cdot P_y$$

② 線分検出処理の積和演算回数

$$P_{sx} \cdot P_{sy} \cdot (M2 - 1) \cdot P_{tx} \cdot P_{ty}$$

となる。

以下、観測時間とシフト量の探索範囲を提案法と揃えて処理負荷について考察する (観測時間を同じとすることで背景雑音下での検知性能はおおむね同等であると考えられる)。固定撮影による重ね合わせ法 (シフトモード) でのメディアンにより、恒星を抑圧しデブリに影響を与えないためには連続する $M1$ 枚画像間でデブリ画素が移動しない (1 画素以下) であることが必要である。

探索対象とする厳密な静止軌道からのずれすなわちシフト量範囲 $P_{sx} \cdot P_{sy}$ は、提案法で探索エリアが 601×151 、 601×1201 のときそれぞれ 29×9 、 29×81 である。すなわち、固定撮影の場合のシフト量範囲が $\pm 29/2$ (30 秒間) であることに相当する。

次に、画像 1 枚の露出時間について考える。本論文で想定する機材条件では、恒星追尾での厳密な静止軌道デブリの線分長は約 200 画素 (30 秒露出時) となる (± 0.24 画素/秒の移動速度)。また、固定撮影重ね合わせ法 (シフトモード) のメディアンで恒星を除去するために最低限 $M1 = 10$ 以上が必要であるとする。 $M1$ 枚の画像間でデブリが移動しないためには、1 枚画像の露出時間 T は約 0.2 秒以下が必要となる。450

秒間の総観測時間 T_m に全 $N = 2250$ の画像が得られ、シフト量の全探索を行う画像数は $M2 = 225$ (デブリを線分で撮影する提案法のデブリ線分長と同等数) となる。

以上から、①のメディアン処理の回数は 2.6×10^9 回、②の積和演算の回数は探索エリアが 601×151 、 601×1201 のときそれぞれ 5.3×10^9 回、 3.8×10^{11} 回である。

提案法の処理負荷低減に関する考察を以下にまとめる。提案法のしきい値処理回数は、重ね合わせ法 (シフトモード) のメディアン回数の「1/15」であり、提案法の積和演算回数は、重ね合わせ法 (シフトモード) の「1/5.8」、「1/34.7」(それぞれ探索エリアが 601×151 、 601×1201) という処理負荷であると概算される。更に、重ね合わせ法 (シフトモード) は画像枚数が多いことから、配列データの読み込みや移動処理など処理時間が増大する要因であると考えられる。ただし、処理負荷はハードウェア構成に依存するので慎重でより具体的な評価が必要である。

4. 計算機シミュレーションによる考察

本章では、計算機シミュレーションにより、SEM 系及び LEM 系の出力 S/N 比較評価、及びシフト量の誤差評価を行い、提案法の理想条件での期待性能等の考察を行う。

4.1 背景雑音の解析

計算機シミュレーションにおける疑似背景雑音生成のために、実観測データを用いて背景雑音の特性について調査する。調査画像は、5. 表 4、5 に示す機材条件で撮影した実観測画像を元にその画像から恒星を除去した恒星減算画像 $F_s(n)$ とする。恒星減算画像 $F_s(0)$ 、及び画像 $F_s(0)$ と $F_s(1)$ の 2 画像を加算した画像のヒストグラム (灰色) をそれぞれ図 4 (a)(b) に示す。図中の赤線は、ガウス分布の理論値である。(a) より恒星減算画像 $F_s(0)$ (すなわち背景雑音) がガウス分布に従っていることが確認される。更に (b) より、加算したときのデータヒストグラムが、白色を仮定したガウス分布の加算理論値分布 (赤線) と良く一致している。以上から、本章でのシミュレーションによる考察において背景雑音は、ガウス分布かつ画像間で白色な雑音であると仮定する。

なお、以下の理由で恒星減算処理での消え残りは、S/N 改善評価に影響しないと思われるため本章でのシミュレーションによる考察において無視することとし

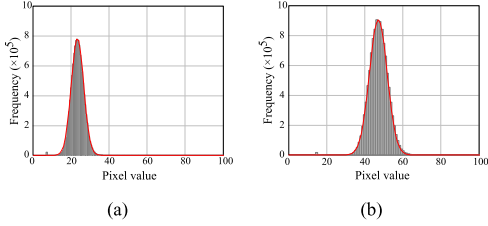


図4 背景雑音のヒストグラム (a): 恒星減算画像, (b): 恒星減算画像2枚の加算)

Fig. 4 Histogram of background noise (a): Star subtracted image, (b): Composition of 2 Star subtracted images).

た. SEM系においては, 恒星の画像間シフト量マップ(加算後)の画像 H_s 上の恒星の消え残りは座標 (a, b) に現れるが, それは式 (14)(15) で示される探索範囲 (P_{sx}, P_{sy}) の外となるため影響を無視することが可能である. 一方, LEM系においては, 探索シフト量に応じて N 枚の探索エリア画像 $G(n)$ が切り出され加算を行うため, 線分積分画像 H_i 上では恒星の消え残りは拡散されてしまう. またそもそも, 提案法においては, SEM系で既に検出が完了しているため LEM系での評価事項は出力 S/N でなく推定位置の誤差となる.

4.2 「シフト量推定処理 (SEM) 系」及び「位置推定処理 (LEM) 系」の出力 S/N 比較評価

本節では, SEM系及び LEM系の入出力 S/N に関する定量的な性能評価とするため式 (16) を用いた評価を行う. 評価に用いた擬似画像生成パラメータ, 処理パラメータを表 2, 3 に示す. なお, 目標パラメータは簡単のため軌道傾斜角, 離心率はともに 0 とする. 観測画像群の枚数 N は 15 とした.

図 5 では, 背景雑音の標準偏差, 平均をそれぞれ 4 と 20 (輝度を 0~255 規格化時) としたとき, 入力デブリ振幅 (対数値) を横軸とし, 各種出力 S/N (式 16) (真のシフト量での S/N 値) を縦軸に示している. これにより以下が確認される.

1) 「SEM系」の探索エリア依存性

図 5 中の赤○は探索エリアを (601,151) としたときの SEM系での総組み合わせ「シフト量マップ」(ACシフト量マップ) の出力 S/N, 青○は探索エリアを (610,1201) での同様の出力 S/N である. この結果より, 探索エリアを狭くすることで, 入力デブリ振幅に関係せず出力 S/N が 5 dB 程向上することが確認される.

なお, 2. で述べた離心率, 軌道傾斜角の全範囲に対応させる場合, 探索エリア面積を広くするのではなく, 狭い探索エリアに対し複数の線分移動量仮定値 a, b

表2 擬似画像生成パラメータ
Table 2 Image parameters.

Number of search area image pixels (vertical) : P_{Ly}	151	1201
Number of search area image pixels (horizontal) : P_{Lx}	601	
Debris amplitude	2,4,8,16,32	
Average noise level	20	
Noise standard deviation	1,2,4,8,16	
Number of images: N	15	
Trajectory segment length	201	
Trajectory segment width	3	
True shift pixels	(0,0)	

表3 処理パラメータ
Table 3 Processing parameters.

Number of shift map pixels (vertical) : P_{sy}	9	81
Number of shift map pixels (horizontal) : P_{sx}	29	
Trajectory segment length of segment compression reference	201	
Trajectory segment width of segment compression reference	3	

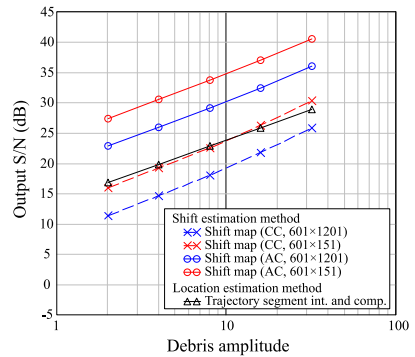


図5 観測画像でのデブリ振幅と SEM系出力 S/N の関係
Fig. 5 Relationship between debris amplitude and output S/N of SEM.

による処理, 更に探索エリアの初期上下位置 y_0 も変えて複数回繰り返す方が処理負荷・S/N 改善性能の双方の視点から優位であると思われる.

2) 検知判定方法の考察

SEM系と LEM系の出力 S/N 比較を行うことで検知判断方法について考察する.

図 5 で SEM系の連続する画像間「シフト量マップ」(CCシフト量マップ) での結果が赤×, 青×であり, 「LEM系」の出力 S/N が黒△である.

赤×は LEM系黒△と同程度の出力 S/N が得られる. 更に, 提案する赤○, 青○ (ACシフト量マップ) では LEM系黒△よりそれぞれ 10 dB, 5 dB の高出力 S/N が得られることが確認される. この結果より, SEM系で, 検出判断を完結することができると考えられる.

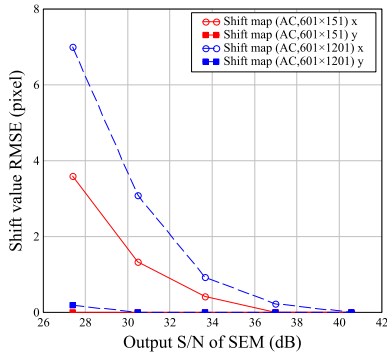


図6 SEM系出力 S/N とシフト量誤差の関係
Fig. 6 Relationship between output S/N of SEM and Shift value RMSE.

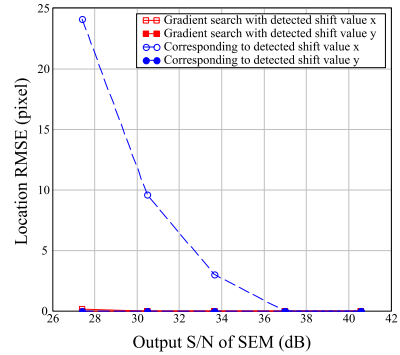


図7 LEM系の出力シフト値での目標位置誤差、及び勾配探索による目標位置誤差の関係
Fig. 7 Location RMSE between corresponding to detected shift value and using gradient search.

すなわち、デブリなしの場合は LEM 系の処理を行う必要がない。

また、提案法である赤○、青○では、シミュレーション条件である背景雑音標準偏差 4、平均 20 に対し、入力デブリ振幅が 2 (観測値は雑音と加算され 22 となる) という微小なデブリに対しても出力 S/N = 23、27.5 dB が得られており、シフト量マップ出力での検出可否判断のしきい値を例えば S/N = 20 dB とした場合、上記微小デブリを検出することが期待される。

4.3 「シフト量推定処理 (SEM) 系」の誤差評価と位置推定処理 (LEM) 系の制御方法の考察

本節では SEM 系におけるシフト量誤差、及び LEM 系の制御法選択に関する考察を行う。

1) 「SEM 系」のシフト量誤差

図 6 は、AC シフト量マップの出力 S/N を横軸として、そのとき検出されたシフト量値の誤差要素数 (RMSE (Root Mean Square Error)) を縦軸に示したものである。赤、青の違いは探索エリア面積でありそれぞれ画素サイズ (601,151)、(601,1201) に対応し、■が y (vertical) 軸、○は x (horizontal) 軸を示す。図 6 横軸左端 S/N=27.5 dB (デブリ振幅 2 に対応) の青○ (601,1201) (x 軸) で、最大 7 画素の RMSE 誤差となることがわかる。赤○では約 4 画素であることが確認される。

2) 「LEM 系」の制御法に関する考察

SEM 系で得られたシフト量値を初期値に用いて LEM 系を探索して得られるシフト量 RMSE (すなわちデブリ位置座標の RMSE でもある) の関係の評価した。

図 7 の横軸は図 6 と同じく SEM 系出力 S/N、縦軸は LEM 系の RMSE である。図において青○●は、SEM

系で検出された一つのシフト量値を用いて LEM 系を探索することなく 1 回計算し得られたデブリ位置座標の RMSE である。次に、赤□■は、SEM 系で検出された一つのシフト量値を初期値として勾配法で探索して得られたデブリ位置座標の RMSE である。

この結果から SEM 系出力 S/N が 37 dB 以上では、方法①SEM 系で推定されたシフト量のみに対して「LEM 系」にて位置算出することで真の位置座標を推定可能であることがわかる。

方法②SEM 系で検出された一つのシフト量値を初期値に用いて勾配法で LEM を用いた場合は、誤差要素数 (RMSE) ≒ 0 であり、ほぼ真のデブリ位置を得ることが可能であることがわかる。

この評価結果は大変興味深いものである。第一に、理想的シミュレーション条件下ではあるが、検出のための S/N 改善は比較的計算が少ないにもかかわらず SEM 系が優れており、一方シフト量の値 (すなわち目標位置) の推定誤差は LEM 系が優れていることを示している。次に SEM 系で得られるシフト値を初期値とした周囲は探索評価関数がほぼ単峰性であり LEM 系の探索において計算負荷の小さい「勾配法」に属する求解法の適用が可能であることを示している。以上から「位置推定処理 (LEM) 系」に先立ち「シフト量推定処理 (SEM) 系」を備える提案法処理構成は、検知判断のみならず最終的にデブリ位置座標を求めるまでの処理全体における負荷低減が期待される。

5. 実観測データへの提案法の適用・評価

本章では実観測データを用いて、提案法の有効性に

ついて検証する。特に、理想的な条件（恒星の消え残り、恒星追尾誤差、観測時間間隔誤差、大気ゆらぎ等がない）による計算機シミュレーションである 4. の結果と比較し、SEM 系の S/N 改善能力、及び LEM 系の制御法選択に関する考察を行う。

5.1 観測条件

観測に用いた機材とその性能諸元をそれぞれ表 4, 5 に、観測目標と撮影条件を表 6 に示す。本観測は、望遠鏡口径が 130 mm（焦点距離 430 mm）の小型鏡筒、汎用デジタルカメラ ZWO ASI294MM（マイクロフォーサーズサイズ）、小型の赤道儀を用いた簡易的な観測であり、提案法の原理検証を目的としている。

観測地は、Bortle = class4 の千葉県大多喜町（SQM = 21.39 mag/arc sec²）と群馬県甘楽郡（SQM = 21.48）である。観測対象は比較的輝度の高い人工衛星（データ 1）と暗いデブリ（データ 2）とした。具体的には、デ

表 4 観測機材

Table 4 Telescope and Camera used for observation.

Telescope	Takahashi ϵ 130D
Camera	ZWO ASI294MM

表 5 機材性能諸元

Table 5 Equipment specifications.

Telescope Aperture [mm]	130
Telescope Focal length [mm]	430
Telescope Aperture ratio	3.3
Aperture resolution [arcsecond]	0.89
Camera Sensor Pixel pitch [μ m]	4.63
Camera Sensor size (vertical) [mm]	13
Camera Sensor size (horizontal) [mm]	19.1
Pixel FOV [arcsecond]	2.22
Angle of view (vertical) [deg] : V_y	1.73
Angle of view (horizontal) [deg] : V_x	2.54
Number of pixels (vertical) : P_y	2822
Number of pixels (horizontal) : P_x	4144

表 6 目標条件と撮影条件

Table 6 Target parameters and Shooting conditions.

	Data1	Data2
Name	QZS-3 (michibiki3)	Titan 3C Transtage DEB
Satellite Catalog Number	42917	25000
Scale[m]	6.5×2.8 without Panels	Estimated diameter. =2.2 [10]
Perigee[km]	35783.6	35075.6
Apogee[km]	35806	36086.3
Eccentricity	0.0001604	0.0122497
Inclination[deg]	0.0572	3.3898
Observation Place	Chiba Pref. Japan	Gunma Pref. Japan
SQM value (Light pollution map 2015)	21.39	21.48
Date	18 th , November, 2020	11 th , March, 2021
Exposure time [sec]: T	30	25
Gain(ASI294MM)	390	390
Number of images: N	15	15

タ 1 = QZS-3 (MICHIBIKI-3, Satellite Catalog Number = 42917), データ 2 = Titan 3C Transtage DEB (Satellite Catalog Number = 25000) (以下 Titan3C25000 と呼ぶ) である。今回の観測は原理検証用途であるため、それぞれの既知 TLE データを元に軌道計算を行い撮影画像の右端に目標を導入し、恒星追尾により 15 枚の連続する観測画像群の取得を行った。

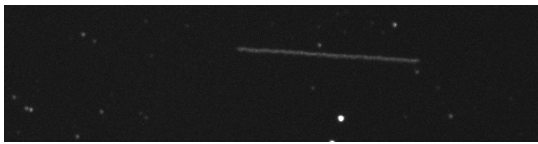
5.2 実観測データの解析評価

データ 1, 2 の各観測画像群に対する線分積分法の各部処理結果を図 8, 図 9 に示す。探索エリア面積は 601×151 とし、処理パラメータは表 3 に示すシミュレーションと同じものを用いている。これら図において、(a) 観測画像（探索エリア画像のサイズの範囲のみ）、(b) 同鳥観図、(c) 恒星減算画像、(d) SEM 系のシフト量マップ (AC)、(e)(d) のピーク検出によるシフト量を用いた LEM 系での線分積分画像、(f) 同様に線分圧縮画像である。また、(g) は提案法の中で必要とする処理ではないが解析評価のために作図 ((d) の 3 倍の分解能で作図) したものであり LEM 系の全探索による探索評価関数画像である。

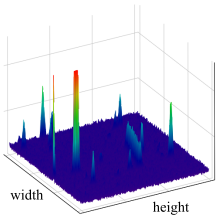
1) 「SEM 系」の S/N 改善評価

図 8（データ 1）において、各処理の定性的効果を確認する。図において観測対象が人工衛星であり輝度が高く 1 枚の観測画像 (a) の段階で線分が視認可能である。次に (b)(c) の比較より、恒星減算処理により恒星の振幅がデブリ線分振幅程度にまで抑圧されていることが確認される。更に (d) シフト量マップでは座標 (-1, -1) にピークが得られ、その座標が推定されたシフト量として出力されることとなる。(e) 線分積分画像ではそのシフト量を用いた加算により、恒星の消え残りが拡散され、背景雑音の標準偏差も小さくなる。最後の (f) 線分圧縮画像では更に雑音標準偏差は小さくなり、デブリ線分は三角状に圧縮されていることが確認される。このピークが探索エリア画像におけるデブリのシフト量値として得られ最終的に位置座標が求められる。

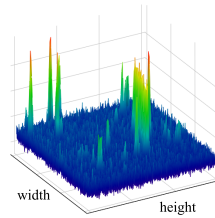
次に、表 7 に実観測データ解析結果と、実観測データの入力条件を模擬したシミュレーション結果を示す。データ 1 では 1 枚の観測画像での入力 S/N が 11.64 dB であり、画像間シフト量マップ合成における「連続する画像間」、及び提案する「総組み合わせ画像間」の各方法による出力 S/N はそれぞれ 38.60 dB, 47.24 dB であった。実観測データにおいても、総組み合わせを行うことでより S/N が向上することが確認された。シ



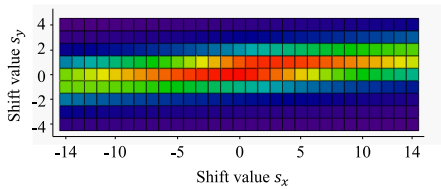
(a)



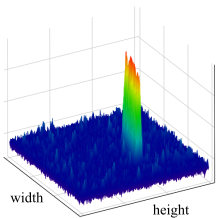
(b)



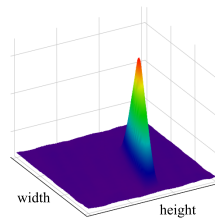
(c)



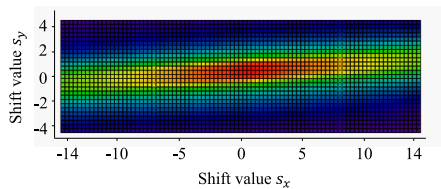
(d)



(e)



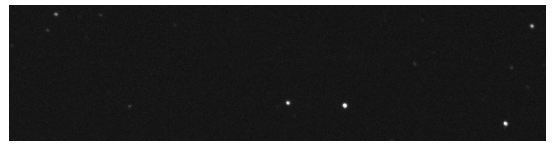
(f)



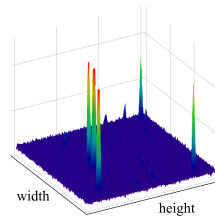
(g)

図8 実観測データへの提案法の適用結果 ((a): 観測画像 (2-D), (b): 観測画像, (c): 恒星減算画像, (d): シフト量マップ (AC), (e): 線分積分画像, (f): 線分圧縮画像, (g): 評価関数)

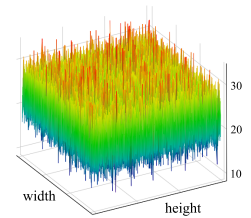
Fig. 8 Results of the proposed method for experimental data1 (QZS-3), ((a): Observed image (2-D), (b): Observed image, (c): Star subtracted image, (d): Shift map (AC), (e): Trajectory segment integrated image, (f): Trajectory segment compressed image, (g): Evaluation function).



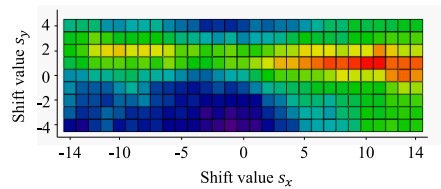
(a)



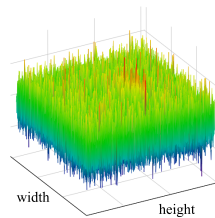
(b)



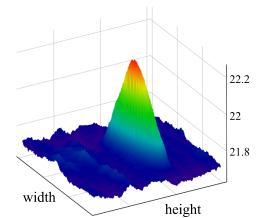
(c)



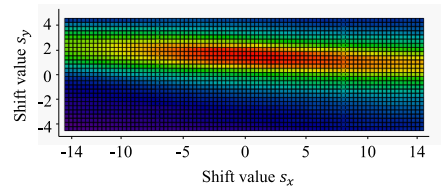
(d)



(e)



(f)



(g)

図9 実観測データへの提案法の適用結果 ((a): 観測画像 (2-D), (b): 観測画像, (c): 恒星減算画像, (d): シフト量マップ (AC), (e): 線分積分画像, (f): 線分圧縮画像, (g): 評価関数)

Fig. 9 Results of the proposed method for experimental data2 (Titan3c25000), ((a): Observed image (2-D), (b): Observed image, (c): Star subtracted image, (d): Shift map (AC), (e): Trajectory segment integrated image, (f): Trajectory segment compressed image, (g): Evaluation function).

表7 実観測データ解析と数値結果
Table 7 Data Analysis and Numerical Result.

	Observation (Data1)	Simulation (Data1)	Observation (Data2)	Simulation (Data2)
Input Debris amplitude	44	44	—	(11)
Input Debris width	7	7	—	(15)
Input Average noise level	26.6	26.6	21.1	21.1
Input Noise standard deviation	3.2	3.2	3.0	3.0
Input S/N(dB)	11.64	11.38	—	5.50
Shift map composition output S/N (CC)	38.60	38.67	35.73	34.60
Same as above (AC)	47.24	49.34	43.67	45.61

ミュレーションでのS/N改善能力がそれぞれ38.67 dB, 49.34 dB ほどもある中で、実観測データにおける処理損失は約0.07 dB, 2.10 dB にとどまっていることから、実観測データに対してもおおむね所望とするS/N改善性能が得られたと考えられる。すなわち、後者の処理損失が大きいのは、恒星追尾誤差によるデブリ線分移動の等速直線からのずれ、Windows PCのイーサネット経由制御による撮影時間間隔の不一定という誤差等の影響がより顕著に現れたものと考えられる。しかし「連続する画像間」による方法より7~8 dBも優れていることから、比較的誤差の大きい観測であっても「総組み合わせ」によるシフト量マップの生成は有効であると言える。

次に、図9(データ2)は、微小デブリであるTitan3C25000に対する処理結果である。文献[10]によるとこのデブリを球体と近似したとき直径は約2.2 mであると推定されている。このデータに対する撮影画像を見ると、1枚の観測画像(a)(b)はもとより、(c)恒星減算画像でもデブリ線分は視認できず、その入力振幅値やS/Nを読み取ることができないが、「総組み合わせ」でのシフト量マップの出力S/Nは43.67 dBが得られこの微小デブリに対しても十分に検出可能であると判断される。

一方、データ2の模擬において、デブリ振幅や幅を計測できないが、小型赤道儀の恒星追尾誤差・大気ゆらぎ誤差を勘案し、デブリ振幅11画素、幅15画素程度と仮定したシミュレーションではそれぞれ出力S/Nとして34.44 dB, 45.74 dBが得られ、観測とほぼ一致させることができた。提案法のSEM系では、線分が幅方向に広がる誤差要因があっても、それらも含め一つのシフト値に合焦するという機能が働くためであると思われる。理想的シミュレーション結果の図5において、出力S/Nが43.67 dBと検出しきい値の一例と

した20 dBとの差をデブリ振幅に換算すると約137倍であり、Titan3C25000の推定直径2.2 mからしきい値での検出可能なデブリ直径は約0.33 m (0.028 m²)と換算される(輝度は面積に比例と仮定)。

2) 恒星の消え残りの影響に関する考察

検出後のLEM系出力の(f)では、デブリピークの周囲にも小さなうねり状のものが見られる。図8(f)ではあまり見られないが、デブリ振幅が小さい図9(データ2)では、恒星の周囲が消え残りの影響が残存したものであると考えられる。この恒星の消え残りの影響は、4.で述べたように、SEM系では探索範囲外となるためほとんどその影響を受けないが、重ね合わせ原理に基づくLEM系は拡散されるだけであるためデブリ振幅が小さいと相対的に影響する。

このため、今回アルゴリズム開発の主題にはしていないが恒星減算処理において、恒星減算のしきい値(このしきい値はデブリを消去しない値)より低いレベルまで恒星の周囲も背景雑音レベルに減算する(置き換える)等の改変が望まれる。ただし、そもそも存在する機材の誤差と処理負荷とのトレードオフでもある。

3) 「位置推定処理系」の制御法に関する考察

図8(データ1)、図9(データ2)に対し、前記したように総組み合わせシフト量マップ出力S/Nは、それぞれ47.24 dB, 43.67 dBである。

また、それぞれの図において(d)SEM系出力のシフト量マップと、(g)LEM系を3倍の分解能で全探索したシフト量マップ(探索評価関数)、の二つの比較よりシフト量のピーク位置が数画素ほど異なるようである。なお画素ピッチは1画素約2.2秒と十分に小さい。

4.の理想的条件でのシミュレーションによる図8の結果では、総組み合わせでのシフト量マップ出力S/N=37 dB程以上では、シフト量の推定値がほぼ真値(RMSE=0)となることが期待されている。

一方、今回の観測は、汎用の低価格機材を用いて観測したデータであり、恒星追尾誤差、撮影画像間の時間間隔の誤差、更には大気ゆらぎ誤差等が大きく含まれており、方法①SEM系で推定されたシフト量のみに対してLEM系にて位置算出を選択可能となる出力S/Nは10 dB程マージンを見込んで47 dB以上を目安とすべきであると考えられる。

しかし、微小デブリに対する処理結果(出力S/N=43.67 dB)である図9(データ2)の(g)(探索評価関数)に見られるようにピーク周辺で単峰性であり、方法②SEM系で検出された一つのシフト量値を初期値

に用いて勾配法で LEM を用いて求解する方法を採用することが可能であることが分かる。また (d) との比較から 10 回程度のイテレーションで最適値に到達することが期待される。

以上から限られた実観測データでの結果ではあるものの、探索評価関数が単峰性であり、LEM 系での全探索が不要でありデブリ搜索の処理負荷軽減に貢献するものと思われる。今後、機材誤差や恒星消え残り誤差等を勘案し、実観測に即した制御方法の確立が望まれる。

6. むすび

本論文では静止軌道周辺におけるスペースデブリの光学的な搜索・監視法として線分積分法を提案した。提案法は、処理負荷低減、検知性能向上を図るために、位置推定処理 (LEM) 系に先立ちシフト量推定処理 (SEM) 系を備える処理構成であることを特徴としている。計算機シミュレーションでは S/N 改善性能や位置推定処理 (LEM) 系の制御方法の選択など処理法構築上の指針に言及した。また小型望遠鏡 (口径 130 mm) を用いて観測した静止軌道周辺の小デブリである Titan 3C Transtage DEB (25000) データに対する提案法各部の性能等について評価確認し、提案法は静止軌道周辺のデブリ搜索・監視のための手法として有効であることを示した。

提案法の信号処理アルゴリズムの機能性能改善における今後の課題として以下のような研究開発に取り組む予定である。

- 総組み合わせシフト量マップ合成法の改善
- 画像内・画像間で直線線分からの誤差が問題となるようなデブリ軌道に対応可能とする拡張
- 超近接する多目標対処への拡張
- 露光中の輝度変化の大きいデブリへの対応、逆にその変化情報抽出
- LEO デブリや小惑星探知を目的として静止軌道周辺以外の搜索法に向けての拡張
- 恒星減算処理の改善
- 追尾誤差や大気ゆらぎの信号処理による補正法開発

文 献

- [1] 有吉雄哉, 花田俊也, “静止軌道のスペースデブリの現状と将来予測,” 第 6 回「宇宙環境シンポジウム」, pp.279–282, 2010.
- [2] 鷲尾智幸, 梅原広明, 木村和宏, “静止衛星・静止デブリの

光学観測,” 通信総合研究所季報, vol.45, nos.3/4, pp.175–180, 1999.

- [3] 柳沢俊史, 中島 厚, 木村武雄, 磯辺俊夫, 二見広志, 鈴木雅晴, “重ね合わせ法による微小静止スペースデブリの検出,” 日本航空宇宙学会論文集, vol.51, no.589, pp.61–70, 2003.
- [4] 上津原正彦, 藤田浩輝, M.A. Shoemaker, 花田俊也, “静止軌道デブリ観測の高効率化の検討,” Spaceguard Research, vol.2, pp.19–22, 2010.
- [5] 稲葉敬之, 谷口 匠, “静止軌道周辺スペースデブリ検出のための線分積分法の提案,” 信学技報, SANE2021-13, 2021.
- [6] B.T. Polyak, “Introduction to Optimization,” Optimization Software, 1987.
- [7] D. Karaboga and B. Basturk, “Artificial Bee Colony (ABC) Optimization Algorithm for Solving Constrained Optimization Problems,” International Fuzzy Systems Association World Congress, Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [8] 谷口 匠, 稲葉敬之, “多周波ステップレータ MIMO ドップライメージングにおける人工蜂コロニー法を用いたスパース素子配列最適化,” 信学技報, A-P2019-12, 2019.
- [9] N. Levanon and E. Mozeson, RADAR SIGNALS, John Wiley & Sons, New Jersey, 2004.
- [10] H. Cowardin, et al., “Observations of titan IIIC transtage fragmentation debris,” Proc. 2013 AMOS Tech, 4112612, 2013.

(2021 年 10 月 26 日受付, 2022 年 2 月 10 日再受付,
4 月 1 日早期公開)



稲葉 敬之 (正員)

昭 56 東工大・理・物理卒, 昭 58 同大学院理工学研究科物理学専攻修士課程了。同年, 三菱電機 (株) 鎌倉製作所入社。同社情報技術総合研究所主席技師長を経て, 平 20 電通大教授。工博。レーダ信号処理, 超電導磁気センサ信号処理, アダプティブアレー信号処理, 多周波レーダの研究開発等に従事。本会通信ソサエティ論文賞 (平 18), IEEE AES Japan-chapter best paper award (平 19, 平 28), 電気学会電気学術振興賞 (論文賞) (平 28), テレコムシステム技術賞 (平 29) 受賞。



谷口 匠 (学生員)

平 31 電通大・情報理工・知能機械工卒。令 3 同大学院情報理工学研究科機械知能システム学専攻博士前期課程了。現在, 同大学院博士後期課程に在学中。