

C5

## デブリ除去における画像計測と運動推定についての 現状報告

### Current Progress in the Application of Visual-based Perception and Motion Estimation for Space Debris Removal

○片山 保宏, 渡邊 恵佑, 鈴木 悟史(JAXA),  
林 正人(有限会社ニック), 河本 聡美(JAXA)

○Yasuhiro Katayama, Keisuke Watanabe, Satoshi Suzuki(JAXA),  
Masato Hayashi (Ltd. Nick), Satomi Kawamoto (JAXA)

デブリ衛星の除去を実現するためには、デブリ衛星の計測と運動推定の技術が必要不可欠である。安全で確実にミッションを実施するためには、数十 m 程度の距離からデブリ衛星の外観観測とその運動推定の実施し、その後、デブリ衛星へ数 m 程度の近距離まで接近し、除去装置の取り付け作業が特に重要となる。我々は、システムを小規模で構築でき、遠方から近距離まで広範囲で利用可能な画像を用いた計測手法が有効と考え検討を進めている。ステレオ視による 3 次元形状復元や、モデルマッチングによる対象の位置・姿勢推定などのアルゴリズム検討、そして、計測精度評価や処理速度見積もりを実施している。また、画像を用いる際に問題となる太陽光の映り込みや夜間など多様な照明環境を評価するために、実験室内に光学シミュレータを整備し実験を行っている。本発表では、画像計測と運動推定についての状況についての報告を行う。

Perception and motion estimation of a target are extremely crucial for space debris removal. A safe and secure mission to achieve this involves the following steps: first, checking the appearance and estimating the motion of a target from a distance of few tens of meters; then, approaching it until the distance is reduced to a few meters; and finally, setting a removal equipment for it. A visual-based perception system is found to be useful for these tasks because it can be compactly structured and measure a wide and long range. We studied this system for practical applications such as stereo vision three-dimensional (3-D) reconstruction, model-based matching for pose-position estimation, and so on. We built an optical simulator that can be used for testing various optical situations in an orbit. This paper briefly describes the current progress of our activities.

the 6th Space Debris Workshop  
Dec 19, 2014

## Current Progress in the Application of Visual-based Perception and Motion Estimation for Space Debris Removal

○ Yasuhiro Katayama (JAXA), Keisuke Watanabe (JAXA), Satoshi Suzuki (JAXA),  
Masato Hayashi (Ltd. Nick), Satomi Kawamoto (JAXA)

### デブリ除去における画像計測と運動推定についての現状報告

○ 片山 保宏 (JAXA), 渡邊 恵佑 (JAXA), 鈴木 悟史 (JAXA),  
林 正人 (有限会社ニック), 河本 聡美 (JAXA)

## Abstract

Perception and motion estimation of a target are extremely crucial for space debris removal. A safe and secure mission to achieve this involves the following steps: first, checking the appearance and estimating the motion of a target from a distance of few tens of meters; then, approaching it until the distance is reduced to a few meters; and finally, setting a removal equipment for it. A visual-based perception system is found to be useful for these tasks because it can be compactly structured and measure a wide and long range.

We studied this system for practical applications such as stereo vision three-dimensional (3-D) reconstruction, model-based matching for pose-position / motion estimation, and so on. We built an optical simulator that can be used for testing various optical situations in an orbit. This paper briefly describes the current progress of our activities.

デブリ衛星の除去を実現するためには、デブリ衛星の計測と運動推定の技術が必要不可欠である。安全で確実にミッションを実施するためには、数十m程度の距離からデブリ衛星の外観観測とその運動推定の実施し、その後、デブリ衛星へ数m程度の近距離まで接近し、除去装置の取り付け作業が特に重要となる。

我々は、システムを小規模で構築でき、遠方から近距離まで広範囲で利用可能な画像を用いた計測手法が有効と考え検討を進めている。ステレオ視による3次元形状復元や、モデルマッチングによる対象の位置・姿勢、運動推定などのアルゴリズム検討、そして、計測精度評価などを実施している。また、画像を用いる際に問題となる太陽光の映り込みや夜間など多様な照明環境を評価するために、実験室内に光学シミュレータを整備し実験を行っている。本発表では、画像計測と運動推定についての状況についての報告を行う。

## デブリ除去とその手段について

- 軌道上のスペースデブリは年々増加しており、今後の宇宙開発において大きな問題になると懸念されている。デブリを増やさず減らすことが、継続的な宇宙開発のために必要である。
- このためには、デブリ衛星を軌道上から除くデブリ除去が有効である。上段ロケットなどの大規模の対象を除くことが、多数のより小さなデブリの発生防止に効果的で、また、技術的にも取り組みやすい。
- デブリ除去は、国際的にも重要であることが認識されており、継続的なデブリ除去活動としての産業化の可能性も高い。
- デブリ除去は、デブリ衛星に軌道離脱のための装置を取り付ける必要があり、導電性テザー(EDT: Electrodynamic Tether)や推進装置の取付などが考えられている。
- 何らかの除去装置を取り付けるためには、非協力対象であるデブリ衛星への接近と装置取付作業のための計測・認識技術が重要となる。



EDT装置によるデブリ除去イメージ図

## デブリ衛星への接近・作業のために必要な計測・運動推定

- デブリ衛星への接近・除去装置取付作業のためには、デブリ衛星の(現在の)外見形状と運動、デブリ除去衛星との位置姿勢関係を、計測・認識する必要がある。下記の様な計測や運動推定が考えられる。
  - 方位計測: デブリ衛星の方位を計測する
  - 距離計測: デブリ衛星までの距離を計測する
  - 相対位置姿勢推定: デブリ衛星とデブリ除去衛星との相対的な位置姿勢を推定する。
  - 形状復元: デブリ衛星の形状を復元する(対象が既知の場合は不要)
  - 運動推定: デブリ衛星の運動を推定する
  - 作業支援: 除去装置の取付作業を支援する
- 我々は、コスト面で有利で計測レンジの広い画像を用いた計測や運動推定による検討を行っている。本発表では、その現状について報告する。

## 画像計測・運動推定について

- ・ デブリ衛星の計測・運動推定を行うために、アクティブ方式であるレンジファインダ等や、パッシブ方式である画像計測等が考えられ、以下の様な特徴がある。

(レンジファインダ)LIDAR、LRF等

- － 正確な距離・形状が計測可能
- － 遠方(数100m以上)からの計測、広範囲の計測に不向き
- － リソース(電力、重量)が大きく、コストが大きい

(画像計測)ステレオ視、モデルマッチング等

- － 遠方からの計測、広範囲の計測に向いている
- － リソース(電力、重量、規模)が小さく、コスト面で優位
- － 計測アルゴリズムや計測精度向上が必要
- － 照明環境に制約を受ける

- ・ 画像計測は、研究開発要素が高い計測技術であるが、計測レンジが広く、搭載性やコスト面で優位性があり、戦略的に獲得すべき技術項目である。レンジファインダとの併用の可能性も考えられる。

## 画像計測・運動推定の課題と、研究開発の進め方

### 【画像計測・運動推定の課題】

- － 照明条件によるデブリ衛星の見え方の違い
- － 撮影位置・姿勢の違いによる見え方の違い(地球背景処理)
- － デブリ衛星の運動と、デブリ除去衛星の運動の区別
- － 形状モデルとの差異(詳細部分、経年変形、経年変色)
- － リソース(撮像系、計算処理系)の制限
- － 研究開発段階で、実際の画像を得ることができない。

### 【研究開発の進め方】

一般的な画像計測センサの研究開発では、実際の画像を用いることができるが、デブリ除去では、実際の画像を得ることが難しい。このため、下のように幅広い手段により研究開発を進める必要がある。

- － コンピュータグラフィクス(CG)や数値解析の利用
- － 縮小模型を用いた実験
- － 実際のデブリ対象(H2A上段ロケット等)の画像
- － 実際の撮影環境での画像の利用(ISS、HTV、HIIA等の取得画像)
- － 実証実験による画像取得

## 画像計測・運動推定の検討状況について

我々の実施している画像計測・運動推定の現状として、下記の内容を紹介する。

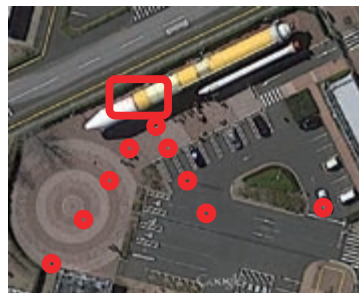
- ① HII展示機による実スケール画像計測実験
- ② 数値解析によるステレオ視の精度見積
- ③ デブリ除去軌道上光学環境模擬実験設備(光学シミュレータ)
- ④ 光学シミュレータを用いたモデルマッチングによる運動推定
- ⑤ KITE (HTV搭載導電性テザー実証実験)での画像取得

### ① HII展示機による実スケール画像計測実験

- ・ JAXA筑波宇宙センターのHII展示機を撮影対象とし、ステレオ視による画像計測実験を実施。(この実験は、IHI社殿の支援を頂き、本発表ではJAXAの結果のみを紹介)
- ・ HIIA上段ロケットを実スケールのデブリ衛星として、HII展示機に対し、実スケールのステレオカメラシステムにより、距離計測精度や夜間照明の効果を知らするために実験を実施。トータルステーションを用い、対象に対する撮影位置を正確に取得



JAXA筑波宇宙センター HII展示機  
(赤枠内の上段ロケット部がデブリ対象)



正面、斜め前・後などの各位置から撮影  
(赤点は、およその撮影位置)



JAXA 4眼ステレオ  
カメラ(80×80cm)



## HII展示機の画像計測結果について

- ステレオ視による3次元計測で計測精度の評価を実施した。30m～約2m の位置からの計測が行えることが確認できた。
- 今後、疎な計測点群からのモデル化、性能を向上させるため、再キャリブレーションや多眼(4眼)ステレオへの拡張を行う予定である。
- 夜間に照明によるステレオ画像撮影を行い、計測可能であることが確認できた。照明を用いれば夜間の計測・運動推定の実現が期待できる。

### 【処理結果例】



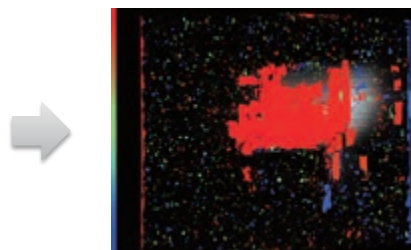
日中のステレオ画像(平行化済)



対応点探索結果 (カラー部分が計測できた点)



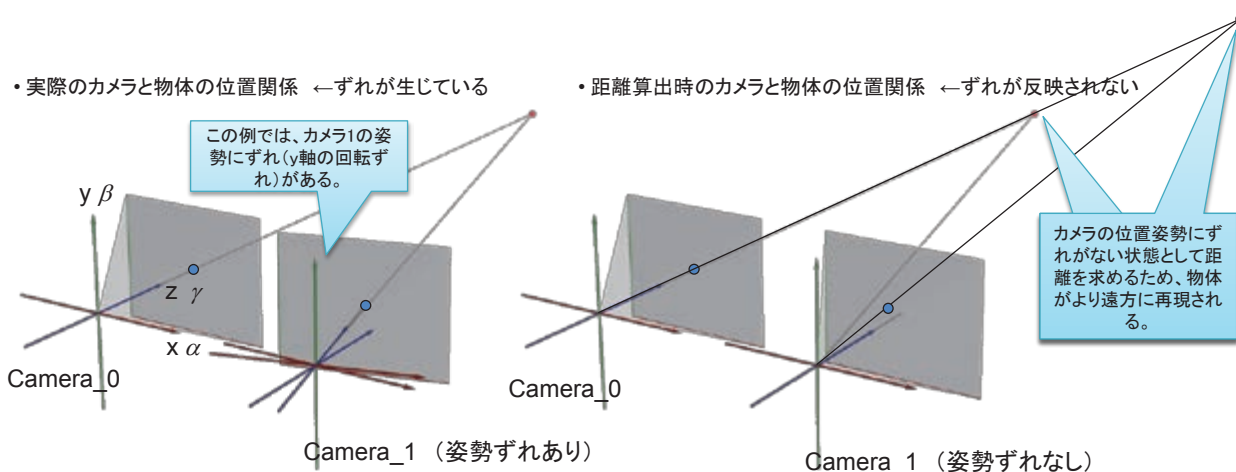
夜間の照明撮影によるステレオ画像(平行化済)



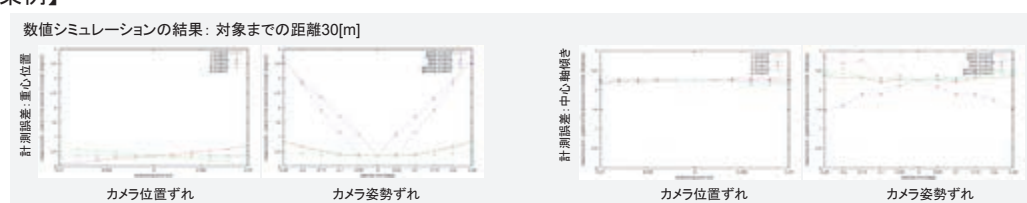
対応点探索結果

## ② 数値解析によるステレオ視の精度見積

- ステレオ視による3次元計測について、数値解析により計測精度を見積もっている。
- 下記のように、カメラの姿勢にずれがある場合などの影響を評価している。



### 【処理結果例】

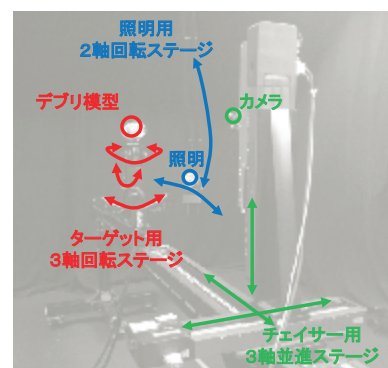
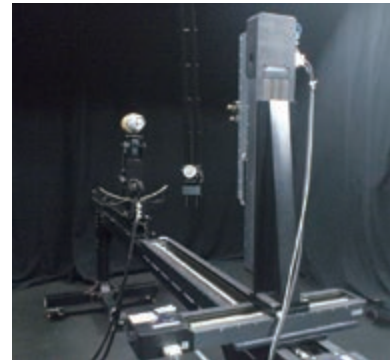


### ③ デブリ除去軌道上光学環境模擬実験設備(光学シミュレータ)

- JAXA調布航空宇宙センター実験室内に、光学シミュレータを設置し、様々な実験を行っている。
- 軌道上のデブリ除去中の光学条件を再現し、カメラを用いて画像計測・運動推定を行う。
- デブリ衛星軌道、太陽位置、デブリ除去衛星のダイナミクス等を模擬することが可能。

- 光学シミュレータの構成：
  - デブリ用3軸回転ステージ
  - チェイサー用3軸並進ステージ
  - 照明用2軸回転ステージ
  - 動的地球背景投影装置(今年度製作中)
  - 統合シミュレータ(上記のソフトウェア)
  - 平行模擬太陽光源(固定式)
  - HIIA上段ロケット模型(1/30)
  - 多眼ステレオカメラや汎用計測装置の搭載

- 今後の検討課題
  - 画像計測結果による自動接近機能(今年度製作中)
  - 照明やステージの影、背景面への照明の映り込みの解消



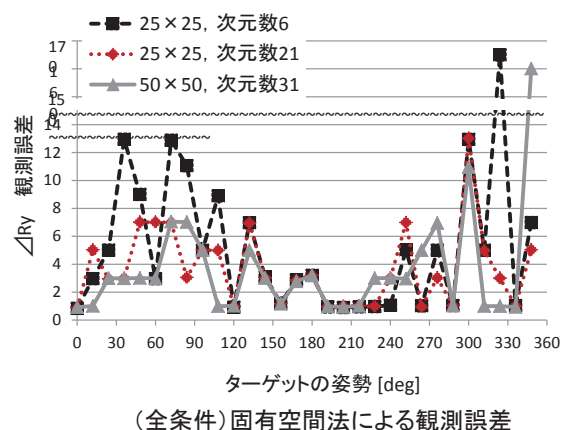
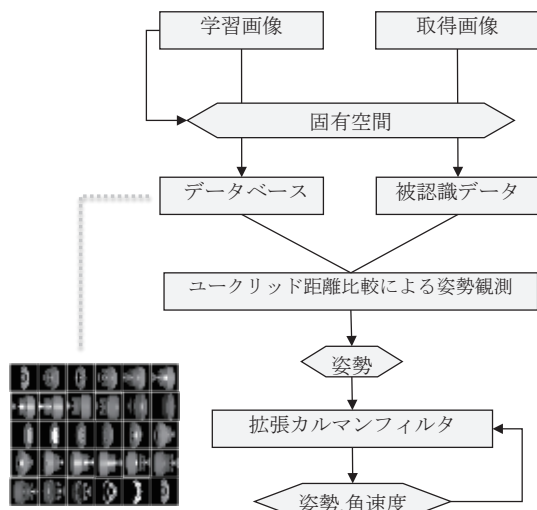
光学シミュレータの外観

#### 光学シミュレータのコントロール画面例



#### ④ モデルマッチング(固有空間法)による位置姿勢推定

- ・ 連携大学院 電気通信大学、菊池直彦 H25年度修士論文:固有空間法によるスペースデブリの単眼視運動推定 より
  - ・ 単眼視によるモデルマッチングによる姿勢推定、及び運動推定の研究を実施している。
  - ・ 固有空間の比較により得られた姿勢情報(時系列情報)に対して、拡張カルマンフィルタを用いた運動推定(回転運動)を実施する。
- 固有空間法で大まかに運動を観測すれば、その連続時間計測と拡張カルマンフィルタで良好に運動計測が可能であることを運動計測実験で確認できた。

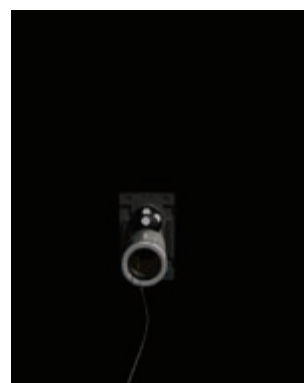


#### ⑤ KITE (HTV搭載導電性テザー実証実験)での画像取得

- ・ KITE (HTV搭載導電性テザー実証実験)に搭載されたカメラにより画像を取得する。
- ・ 実際の軌道上での画像を取得することができ、光学条件などのデータ収集を目指す。
- ・ 画像による計測システムの実運用に関わる技術・ノウハウを修練する。



JAXA プレスリリース資料より



KITE エンドマス外観と、エンドマス放出予想図  
※検討値等から推定したCGモデルなので、実際とは異なる。



## おわりに

- デブリ除去では除去装置の取付が有効であり、その計測システムとして、画像による計測・運動推定の検討を実施している。
- 画像計測・運動推定の研究開発の進め方を示し、現在の検討状況を紹介した。
  - HII展示機による実スケール画像計測実験
  - 数値解析によるステレオ視の精度見積
  - デブリ除去軌道上光学環境模擬実験設備(光学シミュレータ)
  - 光学シミュレータを用いたモデルマッチングによる運動推定
  - KITE (HTV搭載導電性テザー実証実験)での画像取得
- 引き続き上記の検討を進めるとともに、処理時間や専用処理装置、他のセンサとの融合についての検討を進める。