

D6

デブリの運動推定技術研究

Visual-based Motion Estimation for Space Debris Removal

○片山保宏、林正人、河本聡美(JAXA)
○Yasuhiro Katayama, Masato Hayashi, Satomi Kawamoto

デブリ衛星の除去のためには、近い位置まで接近する必要があり、デブリ衛星の正確な位置姿勢計測と運動推定が求められる。我々は、除去衛星が取得した画像を分析するアプローチの検討を行っている。この方式は、計測精度や処理速度の向上が課題であるが、低リソース化や低コスト化が期待できる。

この研究のため、高性能な光学シミュレータ実験装置を整備している。回転運動(3自由度)が可能なデブリ衛星の縮小精密モデルを、直動運動ステージ(3自由度)上のカメラで撮影し、デブリ衛星の運動や接近が模擬できる。環境条件として、回転可能(2自由度)な照明装置や、各々の位置関係に応じ動的に変化する地球背景プロジェクションも可能である。また、複数台の高分解能カメラによる画像取得な実験装置も整備している。

本発表では、これらの実験装置を用いた画像に基づくデブリの運動推定技術研究の検討状況について報告する。

An accurate positions, attitude and motion estimations of the debris target satellite are required to approaching to the target for its removal. We employed the visual-based sensing approach, that analyzes the image and/or sequence obtained by the chaser satellite, and considered this approach has the advantages of low-resources and low-cost. The experimental equipment that simulated approaching to the debris target under the actual optical environment is built in our laboratory. This equipment can precisely simulate to the debris removal phases in the orbit. In this presentation, our recent activities are introduced with some experimental results.

第6回 スペースデブリワークショップ

2016年10月18～20日
JAXA 調布航空宇宙センター

デブリの運動推定技術研究

Visual-based Motion Estimation for Space Debris Removal

○片山保宏、林正人、河本聡美(JAXA)

○Yasuhiro Katayama, Masato Hayashi, Satomi Kawamoto (JAXA)

概要

デブリ衛星の除去のためには、近い位置まで接近する必要があり、デブリ衛星の正確な位置姿勢計測と運動推定が求められる。我々は、除去衛星が取得した画像を分析するアプローチの検討を行っている。この方式は、計測精度や処理速度の向上が課題であるが、低リソース化や低コスト化が期待できる。

この研究のため、高性能な光学シミュレータ実験装置を整備している。回転運動(3自由度)が可能なデブリ衛星の縮小精密模型を、直動運動ステージ(3自由度)上のカメラで撮影し、デブリ衛星の運動や接近が模擬できる。環境条件として、回転可能(2自由度)な照明装置や、各々の位置関係に応じ動的に変化する地球背景プロジェクションも可能である。また、複数台の高分解能カメラによる画像取得な実験装置も整備している。

本発表では、これらの実験装置を用いた画像に基づくデブリの運動推定技術研究の検討状況について報告する。

(英文概要) An accurate positions, attitude and motion estimations of the debris target satellite are required to approaching to the target for its removal. We employed the visual-based sensing approach, that analyzes the image and/or sequence obtained by the chaser satellite, and considered this approach has the advantages of low-resources and low-cost. The experimental equipment that simulated approaching to the debris target under the actual optical environment is built in our laboratory. This equipment can precisely simulate to the debris removal phases in the orbit. In this presentation, our recent activities are introduced with some experimental results.

デブリ除去の手段

- デブリ除去には、「除去のための装置」を取り付けることが必要。
 - 導電性テザーEDT(Electrodynamic Tether)を伸展し、テザーに電流を生じさせ、地磁場との干渉によるローレンツ力で、デブリ衛星の速度を変化させ、軌道離脱させる方法が提案。
 - 推進装置の取付なども検討。
- デブリ除去装置の取付には、
 - 非協力対象(=デブリ衛星)への接近
 - 装置取付作業

が、必要となり、その実現には、ロボティクスによる遠隔操作・自立作業が不可欠。

→ 画像を用いた位置姿勢計測・運動推定技術

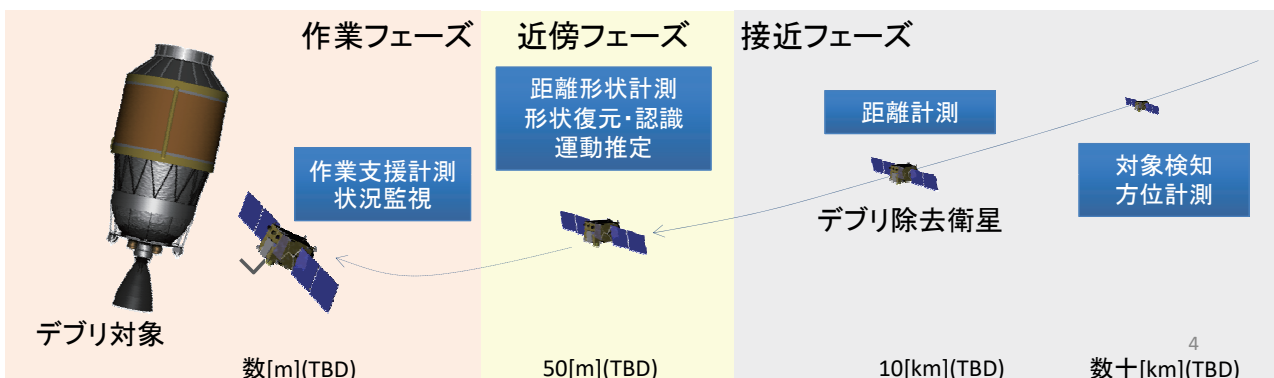


3

デブリ除去のフェーズ別け

デブリ対象との距離によるフェーズ別け(画像計測の種類)

- **接近フェーズ**: デブリ対象を発見し接近、デブリ対象の形状や運動を計測
 - デブリ対象の検出(発見)・方位計測 ~数十[km](TBD)
 - デブリ対象の距離計測/距離形状計測 ~10[km](TBD)
- **近傍フェーズ**: デブリ対象を詳細に計測・運動推定する。ターンアラウンドも含む。
 - デブリ対象の位置姿勢、形状復元認識・運動推定 ~50[m](TBD)
- **作業フェーズ**: 除去装置をデブリ対象に取付ける作業を行う。
 - 除去装置取付の作業支援計測 50[m](TBD)~数[m](TBD)
 - 除去装置の状況確認(動作確認) 30[m](TBD)



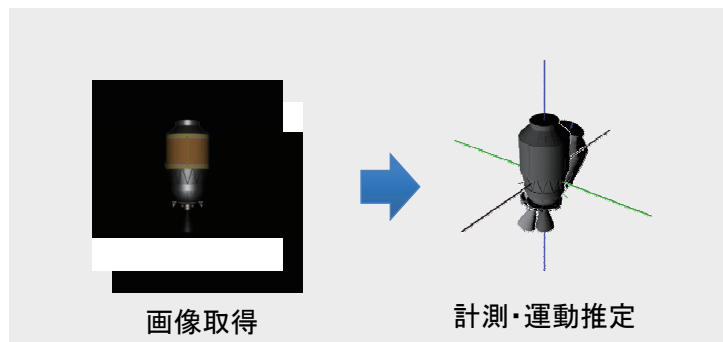
4

画像による位置姿勢計測・運動推定（近傍フェーズ）

デブリ除去衛星に搭載したカメラにより取得した画像を用い、画像計測・画像認識技術により、デブリ対象の計測・運動推定を行う。

2次元平面の画像に投影されたシーンを、3次元の空間情報に再構築する技術。

- 計測対象が、画像中に十分な大きさと投影されている必要がある。
- 姿勢(角度)に関する計測能力が高い。
- 計測レンジ、広範囲の計測が可能。
- 照明条件の影響を受けやすい。
- 単眼方式によっては、スケール任意性が残る。
(対象の大きさが既知の場合は、任意性を除くことが可能)



5

画像計測センサの研究開発の進め方

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、多様な事前実験によって、画像計測センサの研究開発を実施し、センサシステムを確立させる。

- コンピュータグラフィクス(CG)や数値解析
 - アルゴリズムの原理、性能評価。多くのケースの実験が可能
- 縮小模型・環境シミュレータを用いた実験
 - 実際のカメラ・レンズを用い、多くのケースの実験が可能
- 実際のH2A上段の撮影
 - デブリ衛星の表面や実スケールでの対象の状況、カメラのフォーカシングを検証
- 実際の画像(H2A、HTV、ISS)による画像
 - ケースは非常に少なく、対象も異なるが、撮影環境や画像特性がわかる。
- 実証実験による画像獲得
 - 実環境での計測システムの評価が可能

【本日は、現在の検討状況を紹介】

紹介① 光学シミュレータ(実験装置(改修))

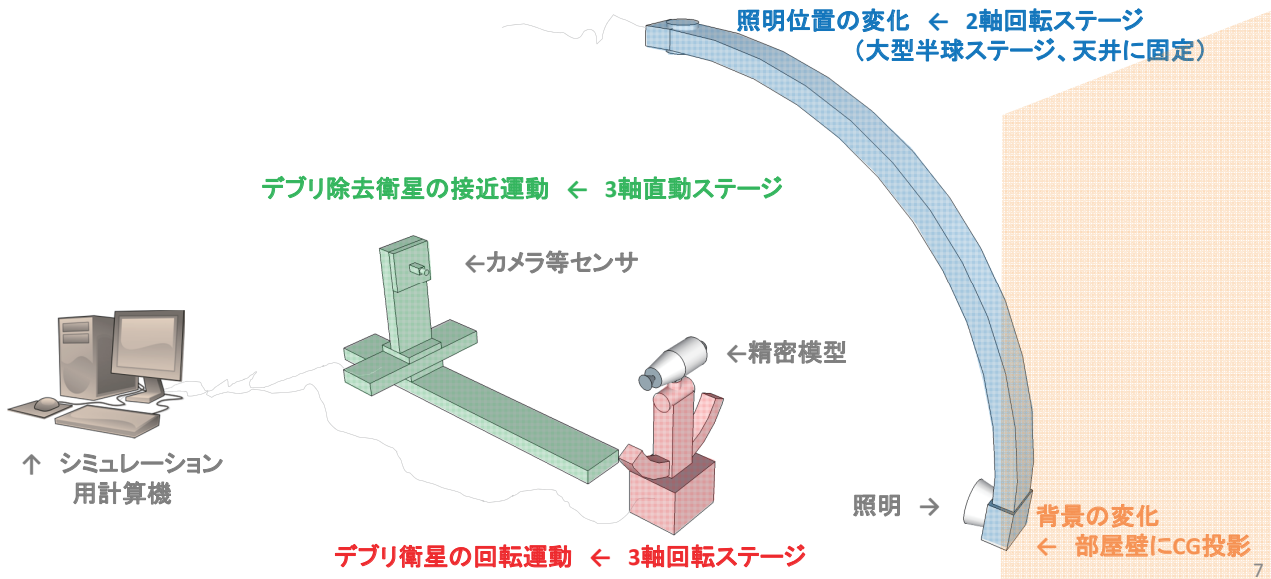
紹介② 画像による位置姿勢計測、運動推定アルゴリズム

6

紹介① 光学シミュレータの概要

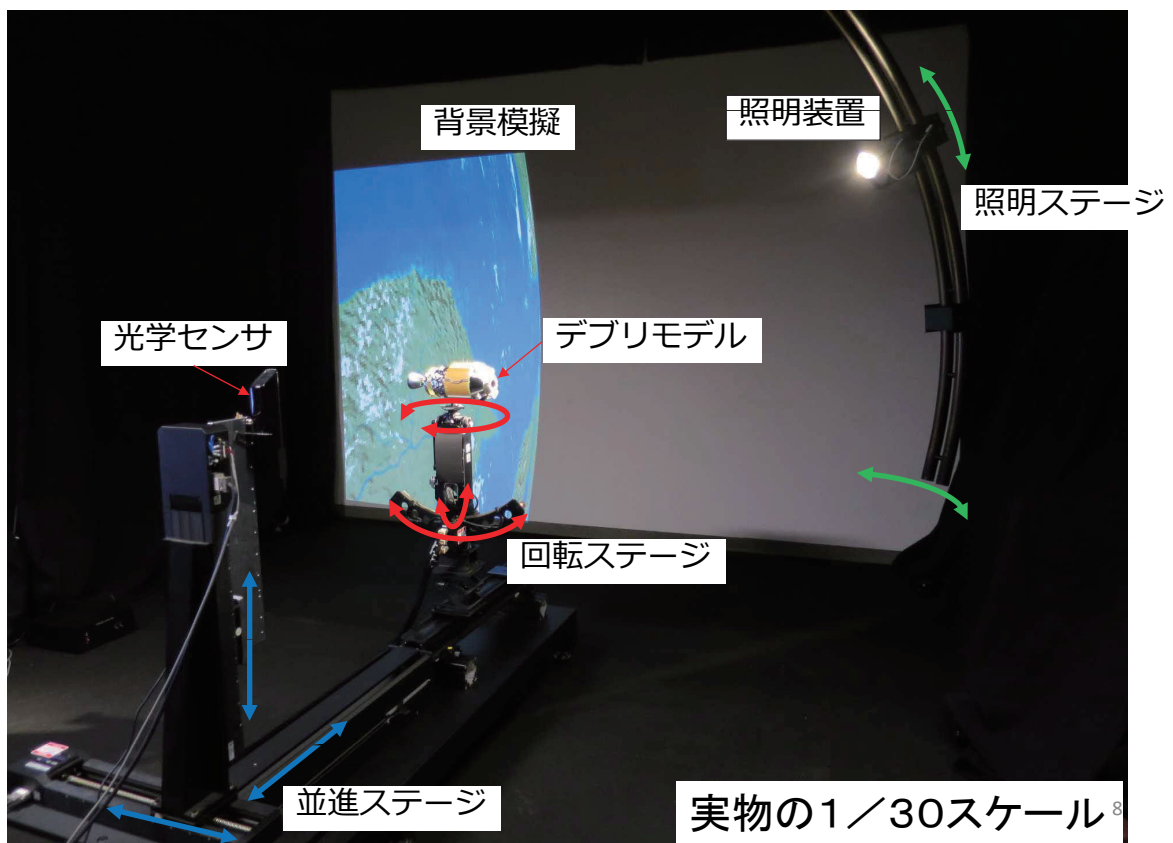
(JAXA 調布航空宇宙センター 宇宙3号館 1階)

- 軌道上のデブリ衛星の回転運動、
デブリ除去衛星の接近運動、
及び太陽照明環境を模擬する実験装置
- 運動モデル、軌道、太陽位置情報等を模擬するソフトウェアにより動作
- 動的に変化する地球背景(部屋壁にCG画像をプロジェクション)

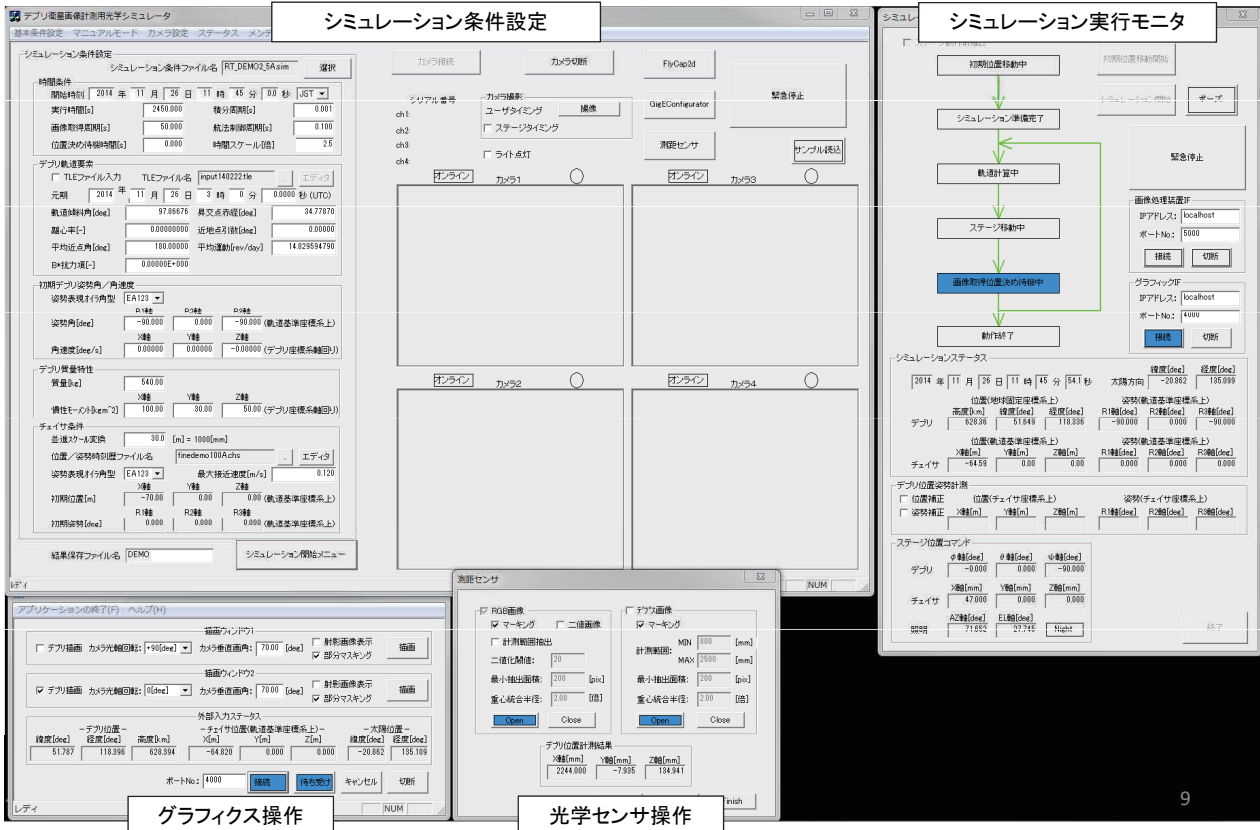


7

光学シミュレータ(実験装置)の外観

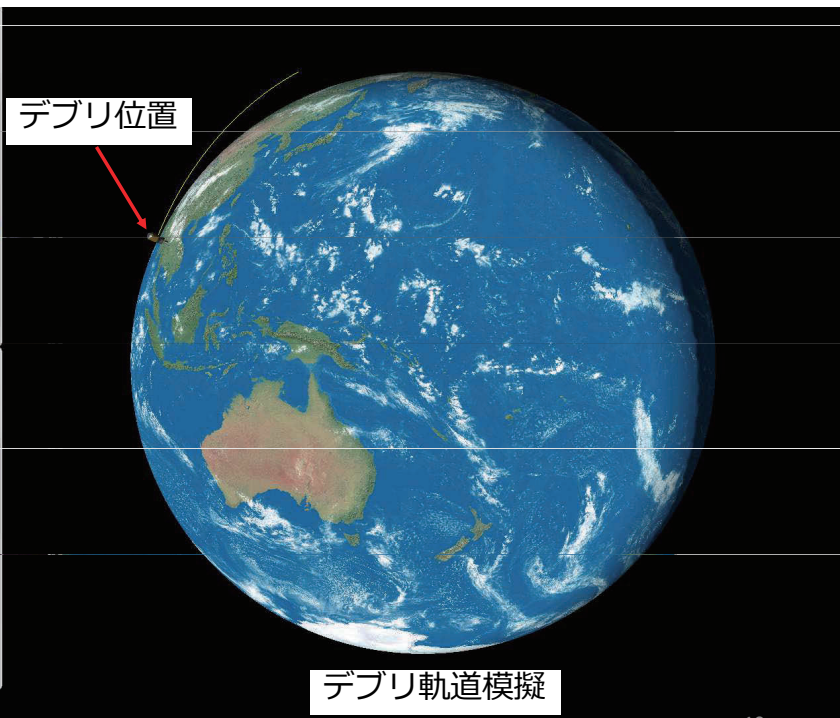
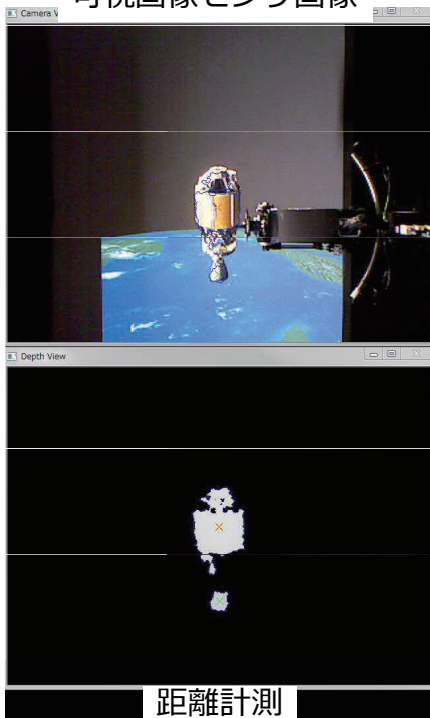


光学シミュレータ(ソフトウェア)の操作画面



光学シミュレータ(ソフトウェア)の処理例

可視画像センサ画像

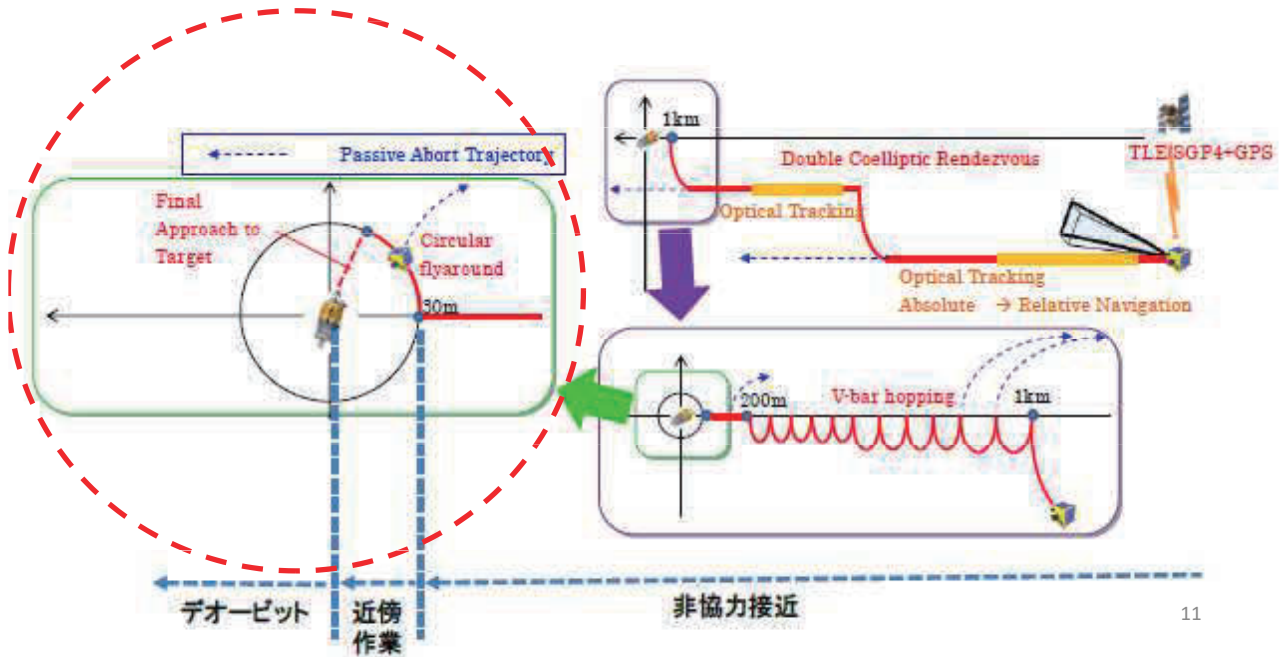


距離計測

デブリ軌道模擬

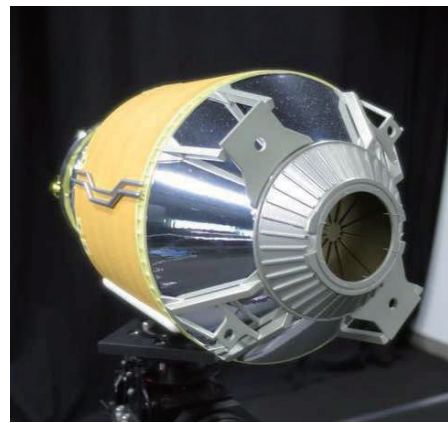
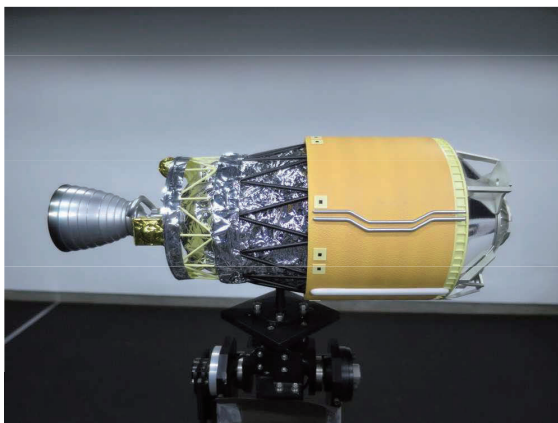
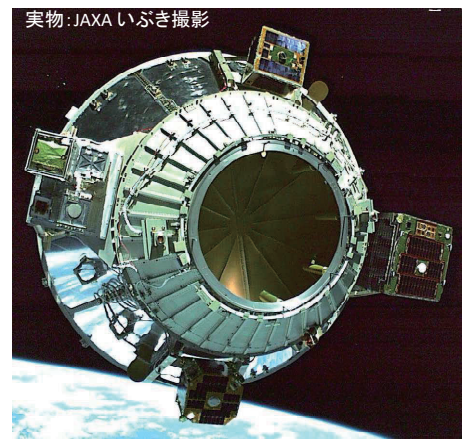
光学シミュレータの模擬範囲

- 近傍フェーズ(30m～)の接近中の挙動、照明環境を模擬。
- 精密模型のスケールを変えることで、非協力接近(1km近辺)に拡張(検討中)。



精密なデブリ衛星模型

- デブリ衛星が既知である条件のもと、最適なアルゴリズムを検討する。
このために、精密なデブリ衛星模型が研究開発に欠かせない。
- HII-A 上段ロケット(1/30スケール)を光学シミュレータに組み込む。(長さ約30cm)



HII-A 上段ロケット(デブリ衛星)精密模型(1/30スケール)

紹介② 画像を用いた位置・姿勢推定、及び運動推定アルゴリズム

(目的)

デブリ除去衛星に接近し、デブリ除去用の装置取り付けの必要がある。
正確で高速に、位置・姿勢推定、及び運動推定を行うことが求められる。

条件① リソース削減・低コスト化の観点から、低重量・低電力・省スペースが望まれる。

→ 画像を用いた計測方式が望まれる。

条件② デブリ除去の前提として、デブリ衛星の情報(サイズ、形状)が利用できる。

→ 先見情報(形状モデル)を用いた方式が有効。

条件③ 軌道上を周回しており、日照条件の変化が早い(1.5時間程度)。

→ 画像計測は日照変化に弱い。

⇒ 光学シミュレータを用いた研究開発が必要。

13

位置姿勢推定・運動推定の2つの方式を検討中

方式① ステレオ視+モデルフィッティング(位置・姿勢推定)

- ステレオ視による位置計測(第1段階)
 - 特徴ベース・ステレオにより、3次元点群の空間位置情報を得る。
- モデルフィッティング(第2段階) ←本年度実施中
 - 3次元点群情報に対して、デブリ衛星の3次元モデルをフィッティングする。

方式② 特徴点追跡による運動推定 ←本年度実施中

- 連続画像(2枚)で、特徴点群の変化を追跡し、モデルフィッティングを行うことで、運動(位置・姿勢変化)を推定する。

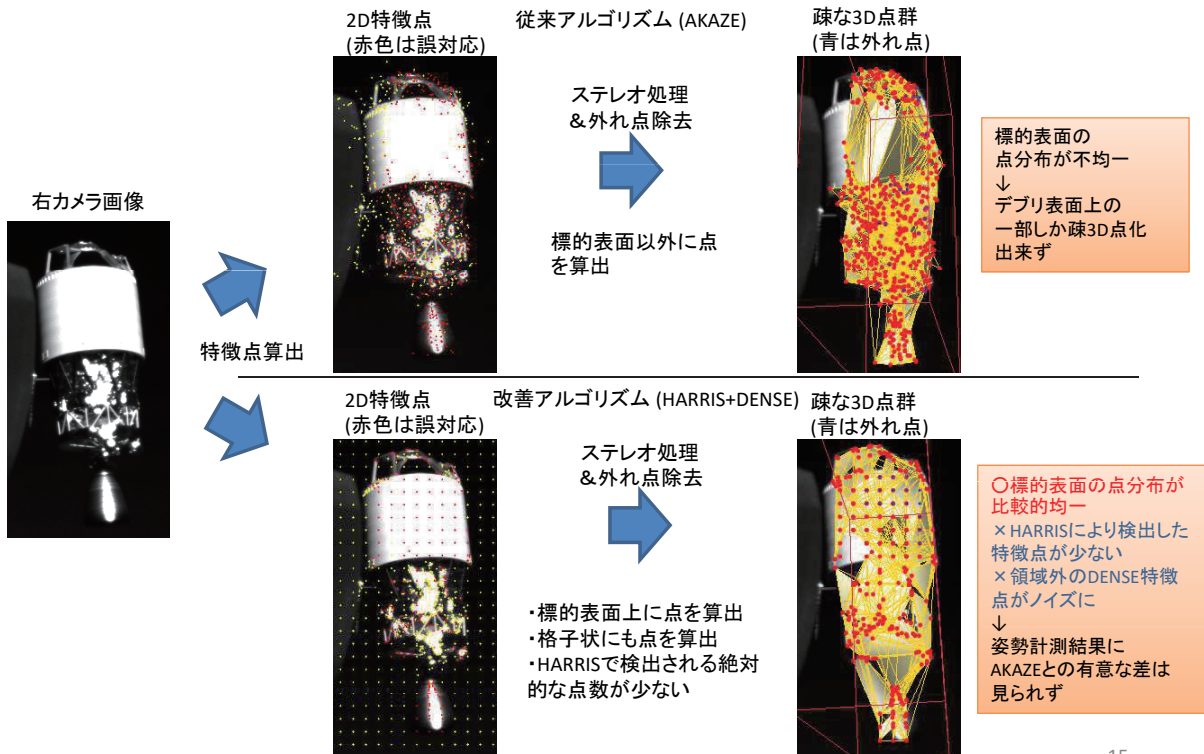
→ 2D点群レジストレーション(位置合わせ)+幾何推定

- 円筒フィッティング方式
- ICP(Iterative Closest Point)方式
- SVD推定方式

14

方式① ステレオ視+モデルフィッティング(位置・姿勢推定)

HARRIS+DENSEによる特徴表面の点分布均一化による改善



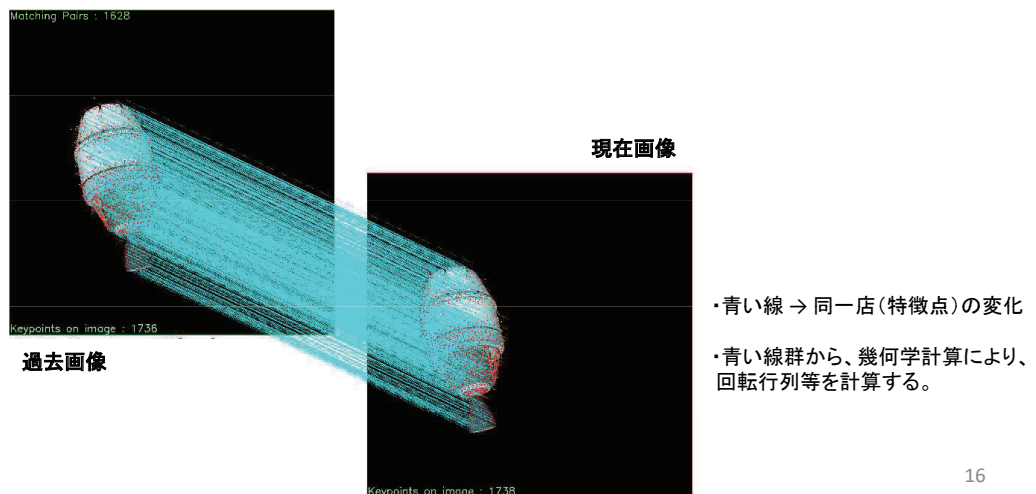
15

方式② 特徴点追跡による運動推定

ー 連続画像(2枚)で、特徴点群の変化を追跡し、モデルフィッティングを行うことで、運動(位置・姿勢変化)を推定する。

→ 2D点群レジストレーション(位置合わせ)+幾何推定

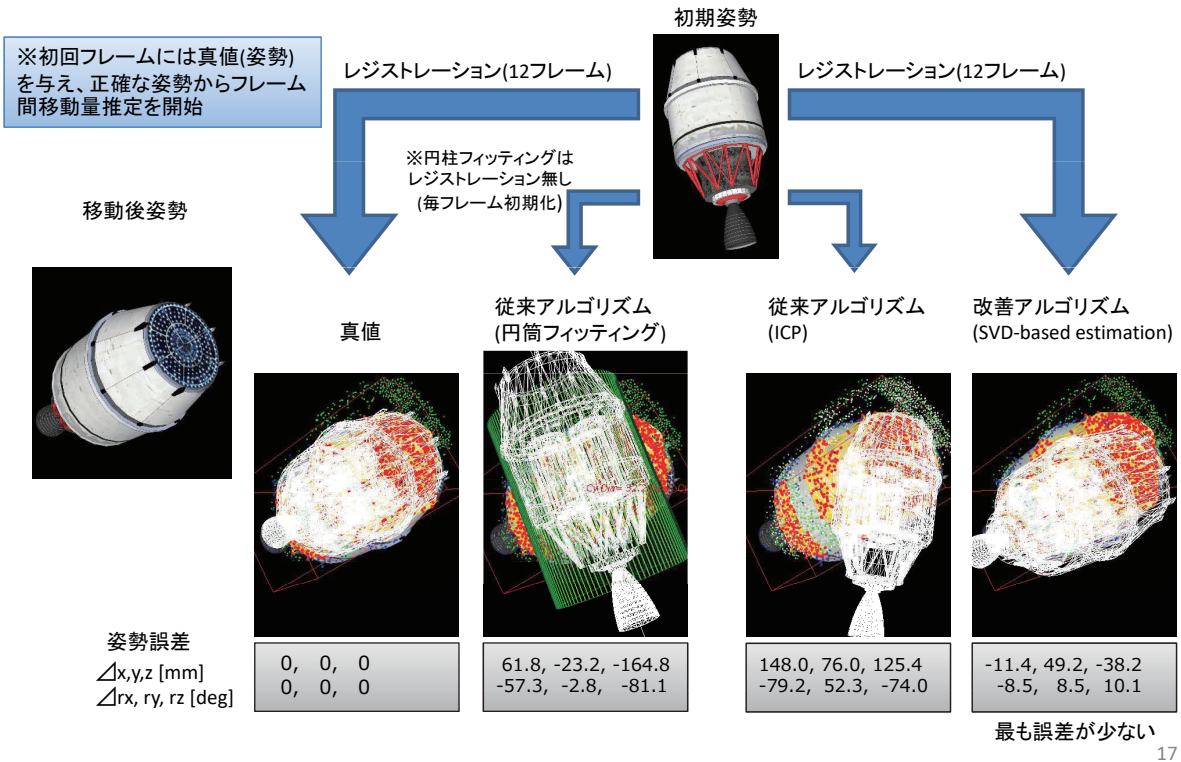
- ・ 円筒フィッティング方式
- ・ ICP (Iterative Closest Point) 方式
- ・ **SVD推定方式**



16

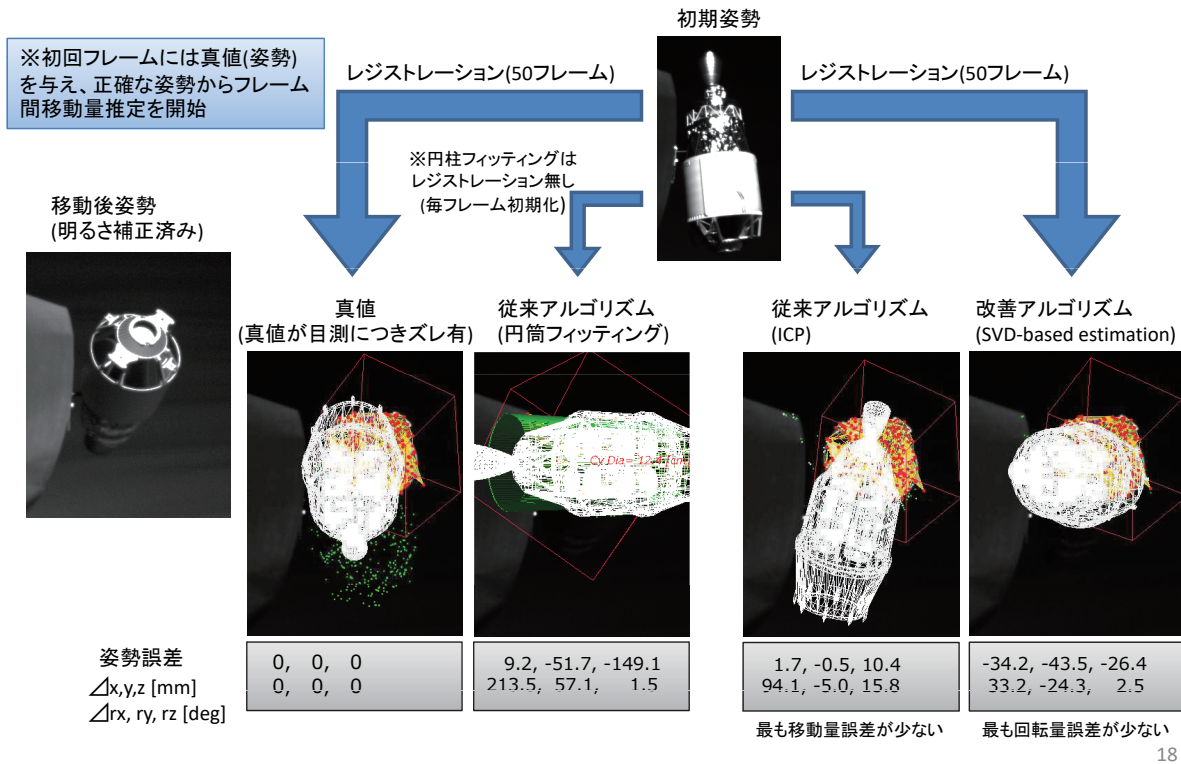
特徴点追跡による運動推定 (CG画像による検証)

SVD-based estimationによる剛体変換推定を用いたフレーム間の移動量推定による改善



特徴点追跡による運動推定 (精密模型画像による検証)

SVD-based estimationによる剛体変換推定を用いたフレーム間の移動量推定による改善



おわりに

- デブリ除去での接近フェーズにおける 画像計測システムとして、位置姿勢推定・運動推定の検討を実施中。
- 画像計測センサの研究開発の進め方を説明し、現在の検討状況を紹介した。
- 光学シミュレータの概要と、画像による位置姿勢推定・運動推定アルゴリズムの検討結果を紹介した。
- 引き続き、上記の検討を進める。
また、地上からの遠隔操作の検討や、専用処理装置についても検討中。