

E2

PAF を利用したデブリ捕獲システムの概念検討状況

Conceptual Study of Mechanical and Sensing System for Debris Capturing for PAF

○柴崎浩一, 大林 航(川崎重工業株式会社),
河本聡美, 青山順一(宇宙航空研究開発機構)

○Kouichi Shibasaki, , Wataru Oobayashi (KHI),
Satomi Kawamoto, Junichi Aoyama (JAXA)

近年急増しているスペースデブリは、人工衛星や宇宙ステーション等に対する脅威となりつつある。デブリの影響を低減するには、これから打ち上げる宇宙機のデブリ発生抑止対策だけでは不十分で、現存するデブリを能動的に軌道から除去する仕組みが必須である。

本稿では、デブリとして数が多いロケットの上段部をターゲットとして、デブリ除去衛星が接近するための画像センサ、及びデブリを捕獲するシステムについての検討状況を報告する。

The amount of space debris has been increasing, and that is becoming a threat to the currently operated satellites and ISS. The provision to prevent future spacecraft from being debris is not enough to decrease the risk of debris, an active debris removal(ADR) will be needed. The upper stages of expendable launch vehicle have been remaining in the orbit as space debris, and the number of it is so large. This paper reports the conceptual study status of mechanical and sensing system for capturing the upper stages of expendable launch vehicle.

The 7th Space Debris Workshop

PAFを利用したデブリ捕獲システムの概念検討状況 Conceptual Study of Mechanical and Sensing System for Debris Capturing for PAF

2016/10/19

○柴崎浩一，大林 航（川崎重工業株式会社），
河本聡美，青山順一（宇宙航空研究開発機構）
○Kouichi Shibasaki, Wataru Oobayashi(Kawasaki Heavy Industries, Ltd.),
Satomi Kawamoto, Junichi Aoyama(Japan Aerospace Exploration Agency)

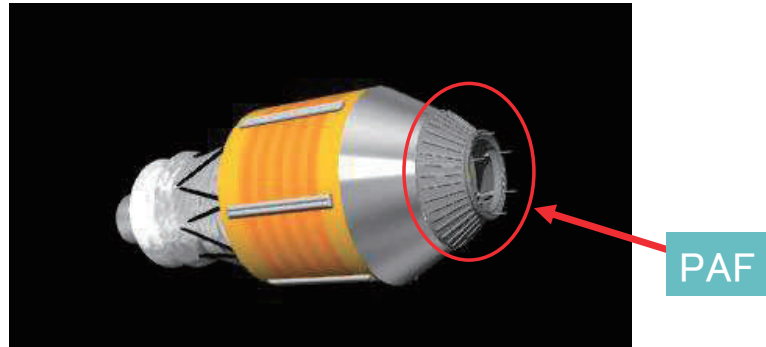
目次

1. コンセプトの説明
2. 把持装置の検討状況
3. 画像センサの検討状況

1-1 捕獲対象

ロケット2段部を除去対象とする

- ロケット2段部は、衛星搭載用にPAF (Payload Attach Fitting)を持つものが多い
- 衛星固定部の直径は、937、1194、1666等の同一サイズのものが多い



H-2A Rocket 2nd stage image

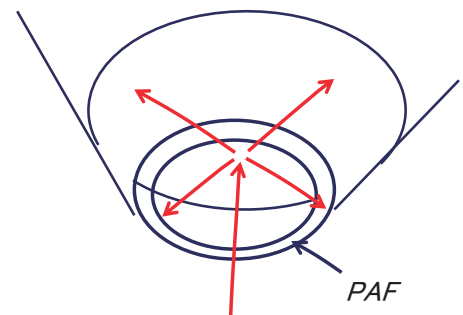
- 衛星を固定する箇所であり、強度・剛性が確保され、形状も明確
- 円形の構造であるため、接近時の画像処理にも好適

多くのロケット2段部に設けられているPAF(Payload Attach Fitting)を利用する。

3

1-2 把持の対象としてのPAF

接近方式に適合する把持方式として、PAF端面を把持することなく、PAF内部の空間に把持装置を差し込んで固定する方法が考えられる。



この方法のメリットとしては、以下が挙げられる。

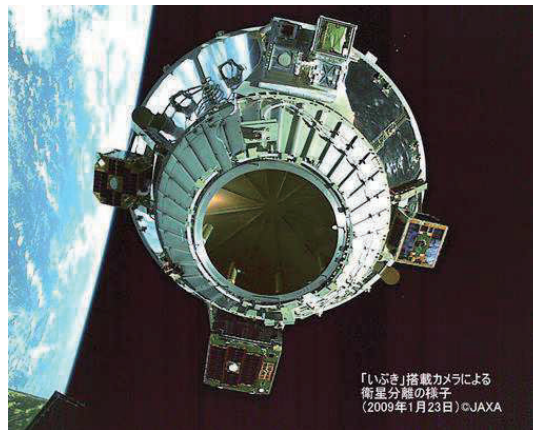
- PAFの開口部(例えばΦ1m程度)の中に把持装置を差し込むため、PAFの運動推定精度は、PAF端面を固定する場合に比較して緩いもので済む可能性が高い。
- 開口の内部には障害となるものが無いため、把持ポイントを抽出するためのパターンマッチング等は不要となる。また画像処理による推定精度が荒くてもよい。
- 開口中心を狙えばよいいため、プッシュロッド等の端面からの突出物が障害になりにくい。

4

1-3 画像センサの対象としてのPAF

PAFは画像認識のための対象部位としても以下の点で好適

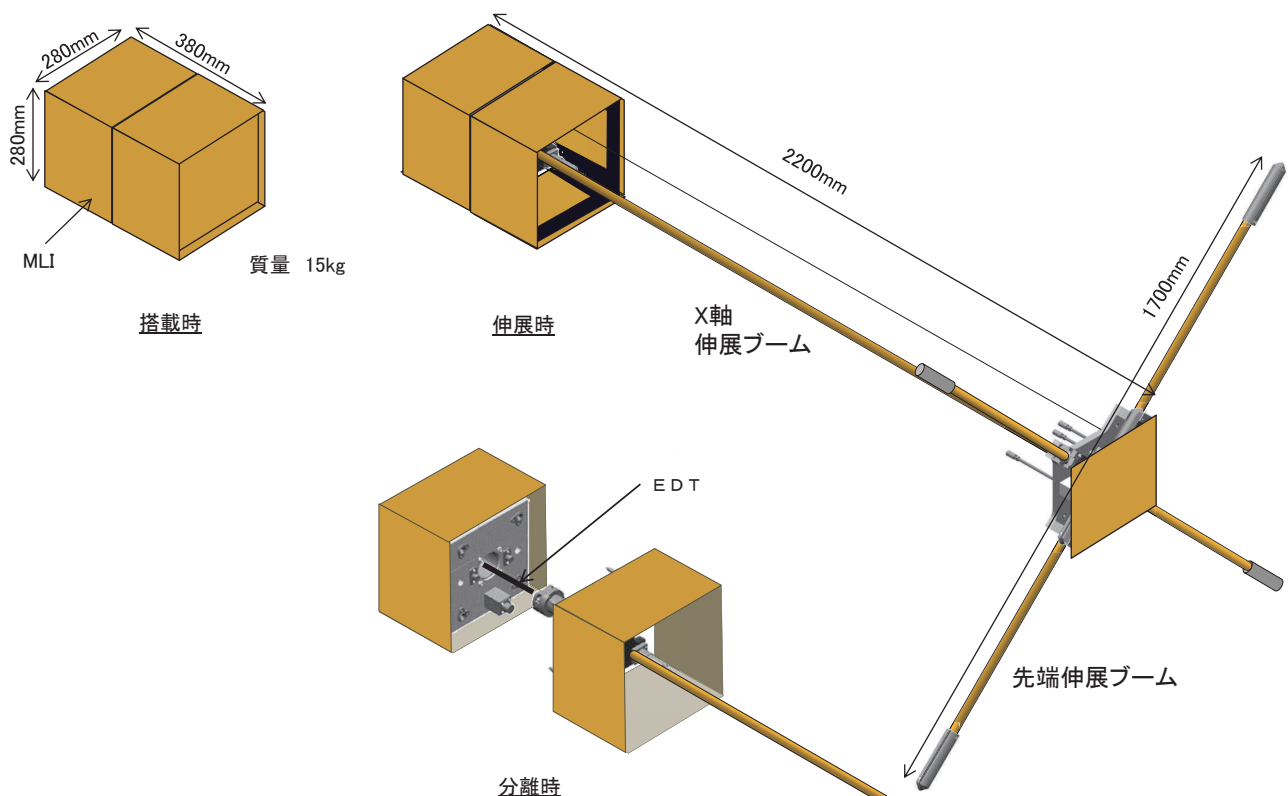
- ①形状が円形とシンプルであり、高精度でロバストな認識が可能
- ②直径が1m以上と大きく、一定の距離を隔てても安定した視認性が期待できる
- ③材質が安定しており、変形・変質の可能性が低く、反射特性も想定可能である



H2A第2段対象部位

5

2-1 把持装置の形状

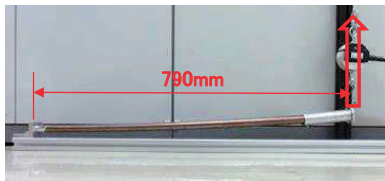


6

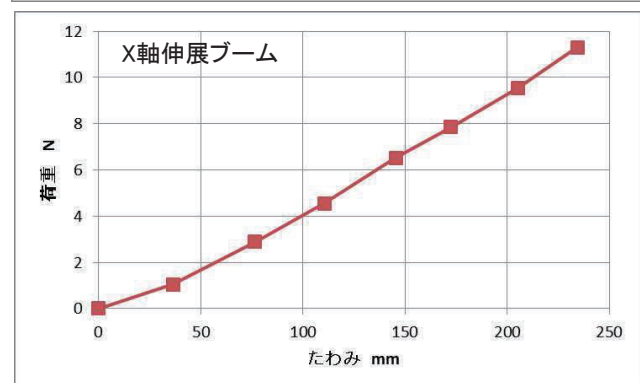
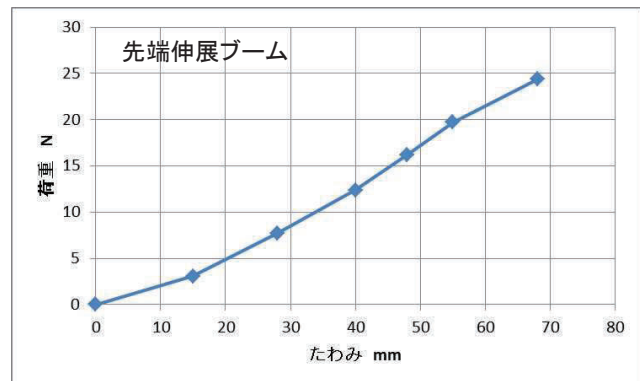
2-2 把持装置の性能検討(伸展ブームの特性取得)

把持装置の特性を評価するために
伸展ブームの機械的得を取得。
例として、ブームの曲げ剛性を示す。

先端伸展ブーム



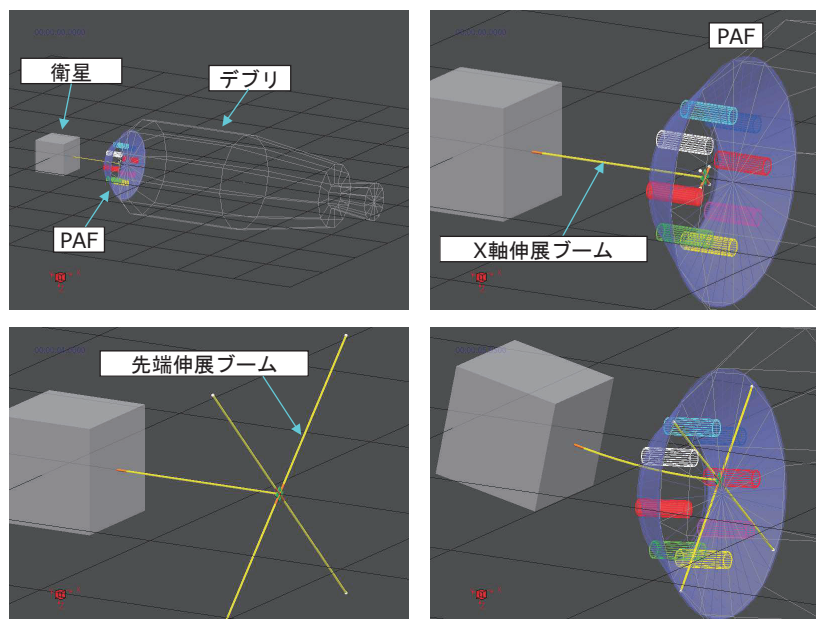
X軸伸展ブーム



7

2-3 把持装置の性能評価(捕獲シュミレーション)

取得したブームの特性等を反映した捕獲シュミレーションの解析モデルを作成し、
シュミレーションによる把持性能の評価を実施

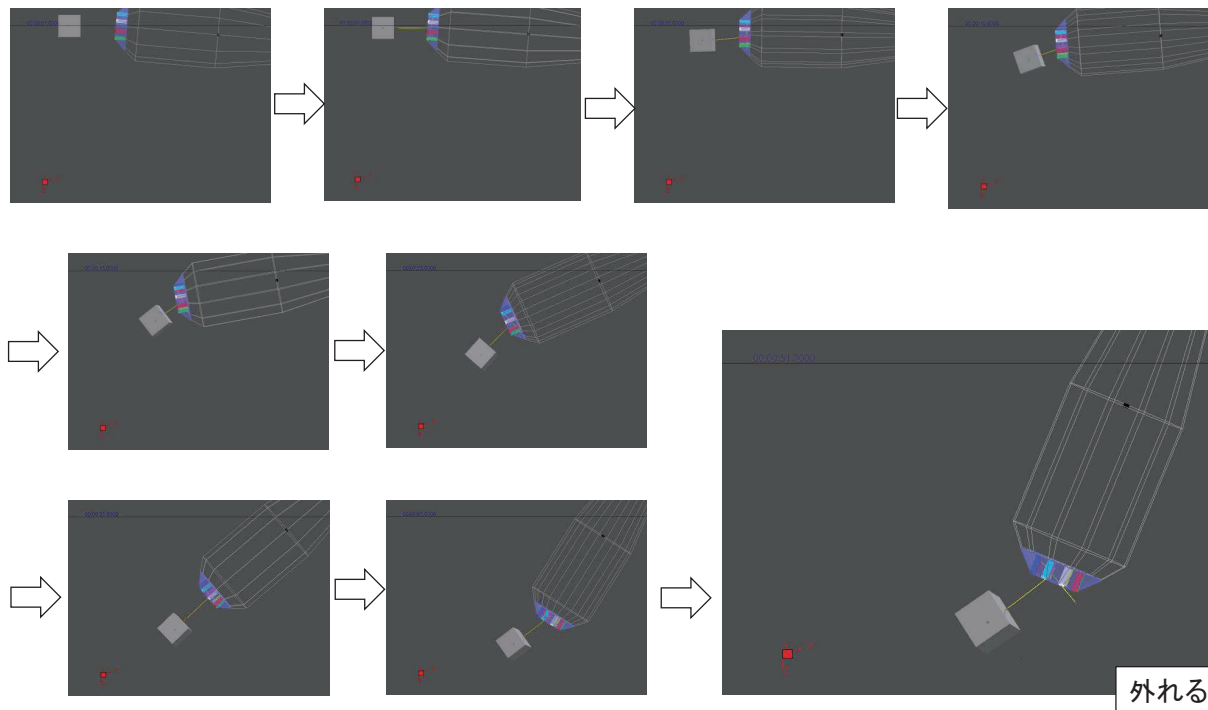


解析モデル

8

2-4 シミュレーション結果例

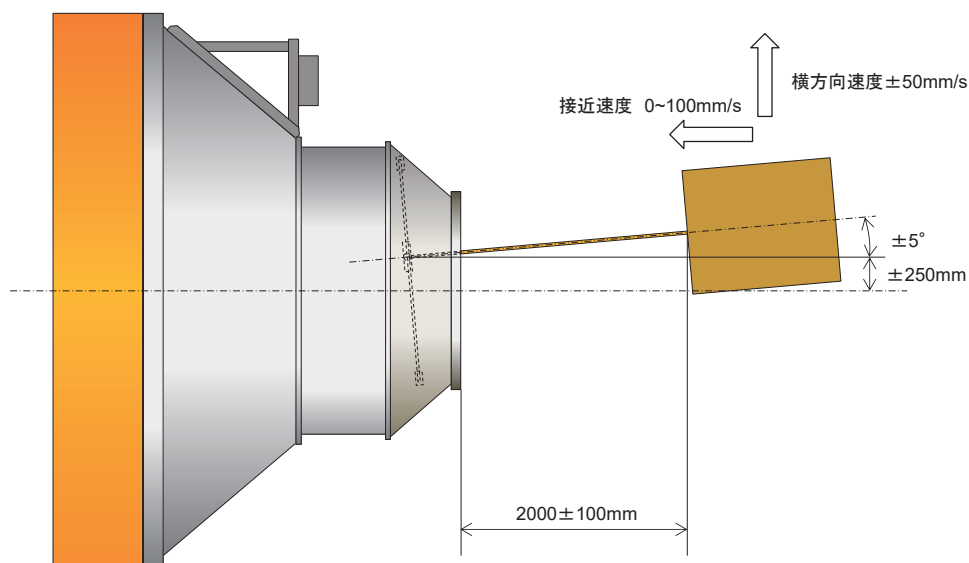
シュミレーション結果として、把持後の運動状態においてブームの1本が外れたケースを示す。このような現象の発生しない初期の相対位置や相対運動の条件を抽出。



9

2-5 捕獲可能条件の整理

複数の初期条件でのシュミレーションを実施し、ブームの外れの発生しない捕獲可能な初期条件の範囲を次のとおり整理



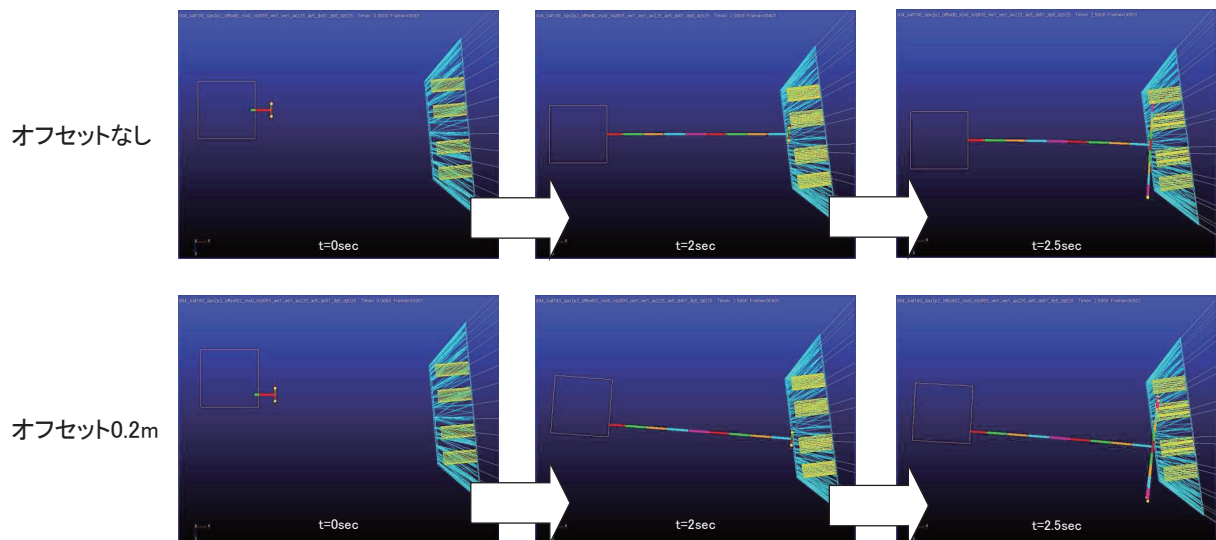
10

2-6 把持性能への衛星規模の影響評価

衛星の質量を100kgに設定し、シミュレーションを実施

結果： X軸伸展ブームの伸展時の本体の位置変化が増大、把持装置の搭載位置を衛星の機軸よりオフセットした条件では姿勢変化も発生し、把持不良となる条件を確認

対策： 変化量を見越した初期位置の補正をすることで把持可能であり、規模により要調整



11

2-7 捕獲装置に関する今後の計画

把持装置の把持性能について、シミュレーションにより推定している性能を実験により実証すること計画

把持後の相対運動中にブームが外れる現象について実験により確認する。

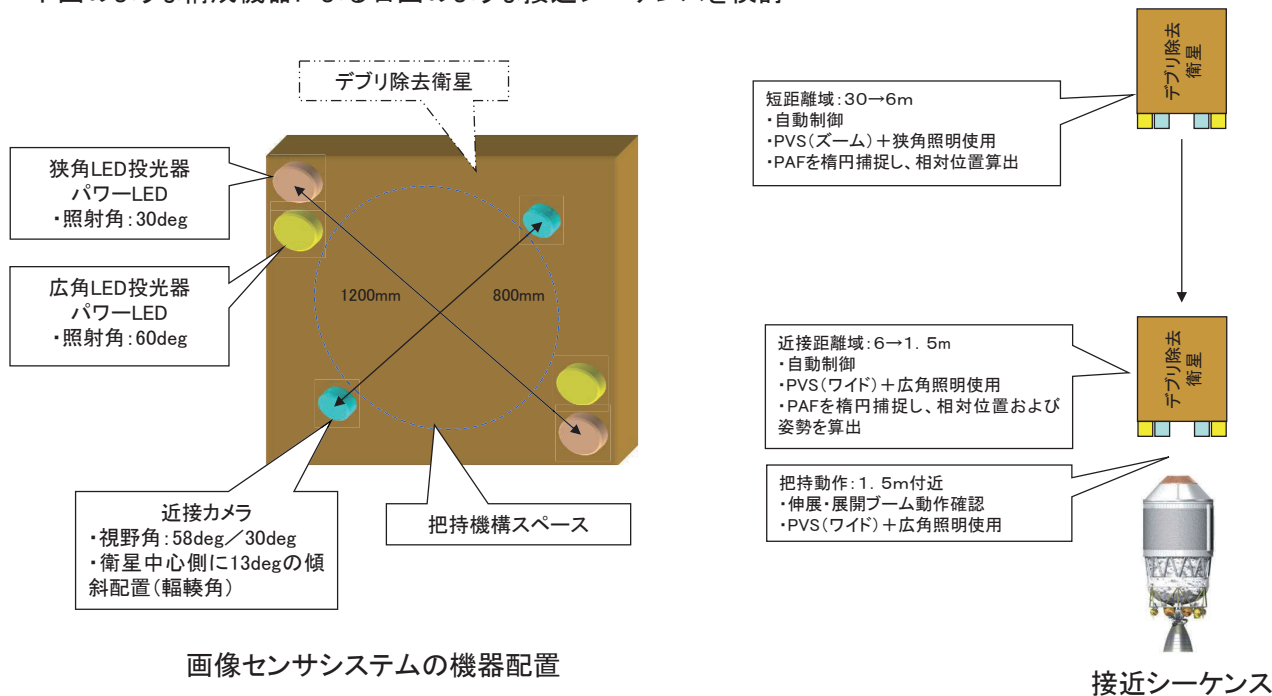
ブームが伸展した状態の把持装置の模擬品を供試体として、内部形状を模擬したPAFの内部に差し込み、ブームが外れる直前の位置関係と荷重条件を再現して準静的な荷重条件のもとに負荷し、ブームの外れの有無とそこに至る挙動を観察し、シミュレーションとの比較、評価を計画

また、把持装置への荷重条件として評定とされているEDT伸展後のブレーキ荷重に対する把持装置の性能について、同様の実験装置を用いて荷重試験を実施し、性能評価を予定

12

3-1 画像センサの概要(構成と接近シーケンス)

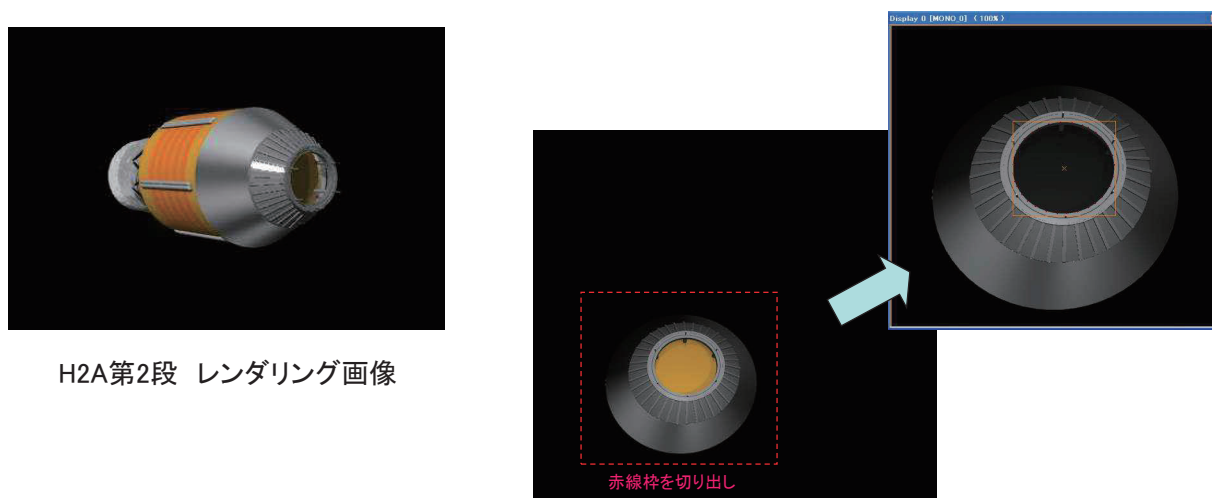
画像センサによる光学観測から、位置や姿勢データを抽出するためのシステムとして、
下図のような構成機器による右図のような接近シーケンスを検討



13

3-2 CGによる画像センサの検討

CGを用いた解析により、PAF開口部を認識し、相対位置を算出できることを確認

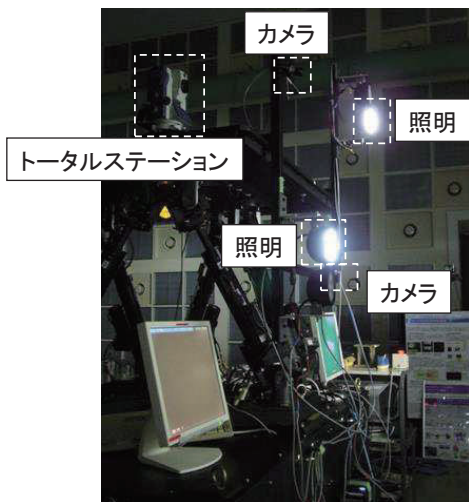


14

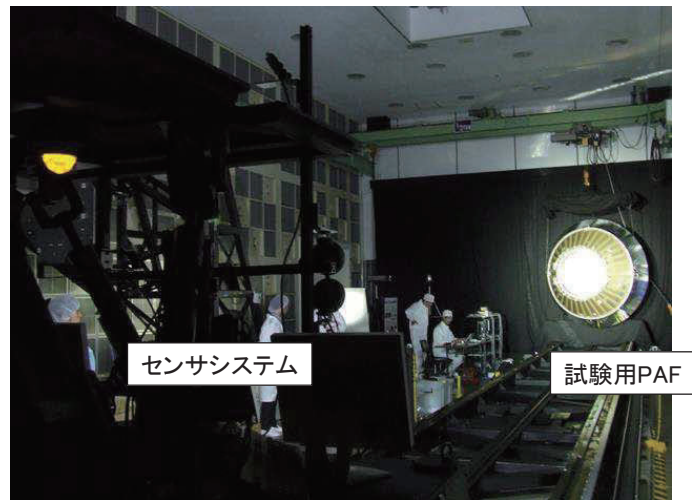
3-3 PAFの実画像取得(1/2)

軌道上環境模擬のために暗室化した屋内において、試験用PAFを対象として、LED投光器で照らし、2個のカメラで画像を取得

トータルステーションにより、基準となる位置と姿勢の情報も取得



センサシステム模擬品

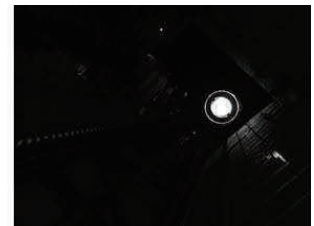
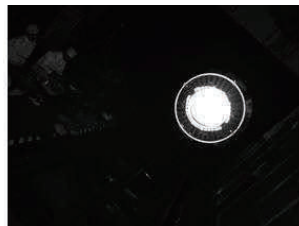
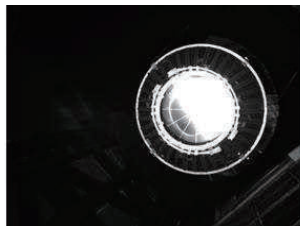
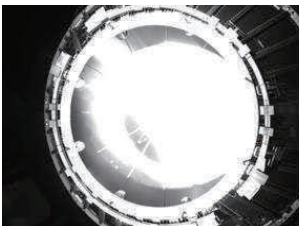


試験状況

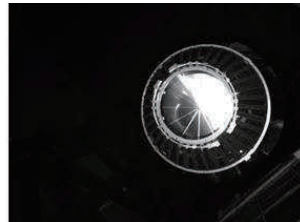
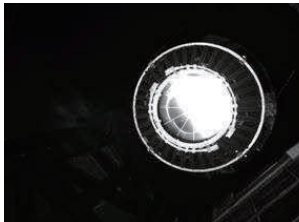
15

3-3 PAFの実画像取得(2/2)

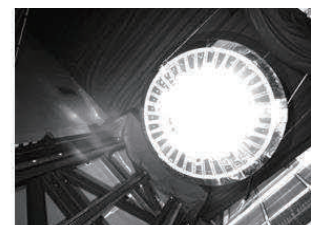
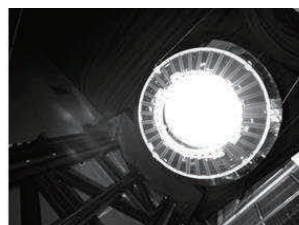
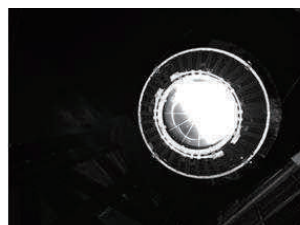
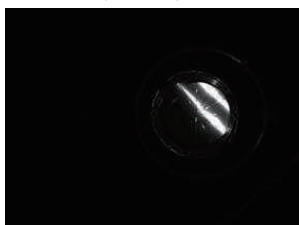
相対距離(m) 1.5, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 17.5



相対姿勢(deg) 0, 7.6, 10.6, 16.6, 20.6, 23.5, 26



露光量(msec) 2, 4, 8, 12, 16, 24, 32, 48, 64, 96, 112, 128, 160, 192, 224, 256, 288, 320, 352, 384

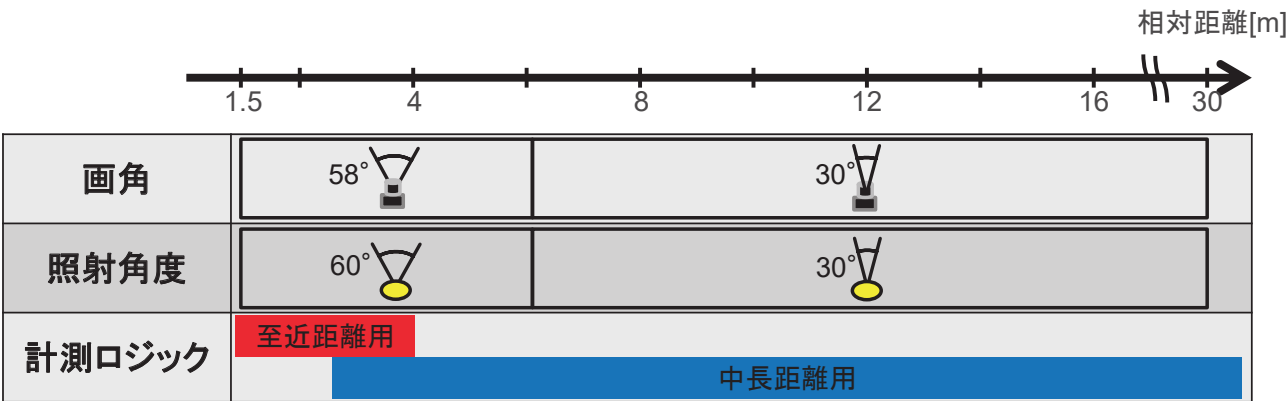


16

3-4 画像センサシステム運用イメージ(1/2)

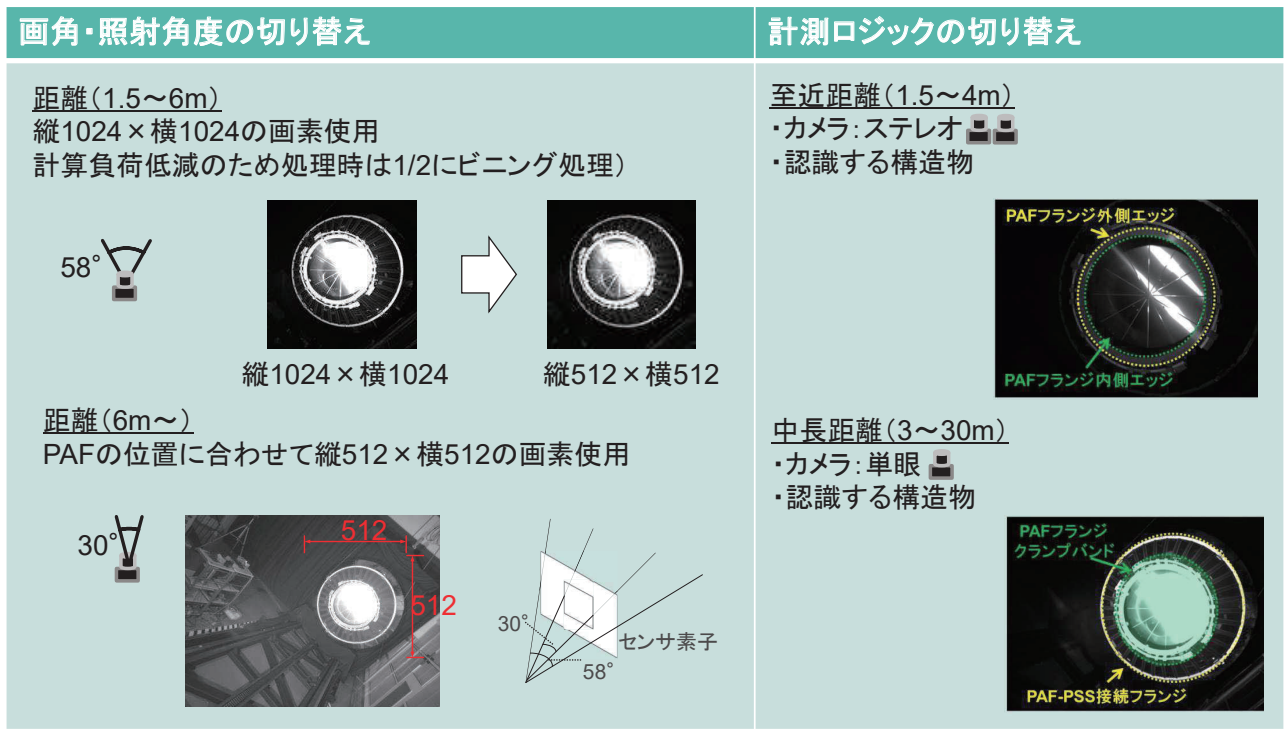
PAFの映り方が変化するため、相対距離によってセンサの設定を切り替え

- 画角、照射角度は、6mを境に切り替え
- 計測ロジックは、3.5m前後で切り替え



17

3-4 画像センサシステム運用イメージ(2/2)



18

3-5 中長距離域(3m～) の計測ロジック概要【構造物認識、位置推定】

①PAF構造物認識処理

PAF-PSS接続フランジ(外側リング)

二値化 ⇒ 外側リングエッジ抽出 ⇒ 楕円ロバスト推定

PAFフランジ領域重心(内側リング中心)

二値化・プロブ抽出 ⇒ 重心算出

PAF-PSS接続フランジ(外側リング)・その中心



PAFフランジ領域重心(内側リング中心)

②位置推定処理

(i)カメラとの対物距離を推定

・画像上のPAFの大きさから推定

⇒ 外側リングの楕円長軸長を算出、それを基にカメラパラメータから対物距離を推定する

(ii)視線ベクトル算出

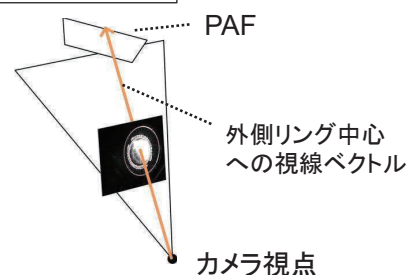
・カメラから見てどの方向にPAFがあるかを推定

⇒ 外側リング中心への視線ベクトルをカメラパラメータから求める

(iii)位置推定(外側リング中心)

・カメラ視点位置から、視線ベクトル方向に対物距離分をオフセットした位置を求める

透視投影模式図



$$(\text{外側リング中心}) = (\text{カメラ視点位置}) + (\text{視線ベクトル}) \times (\text{対物距離})$$

19

3-5 中長距離域(3m～) の計測ロジック概要【姿勢推定】

③姿勢推定処理

(i)内側リング中心 への視線ベクトル算出

・カメラパラメータから算出

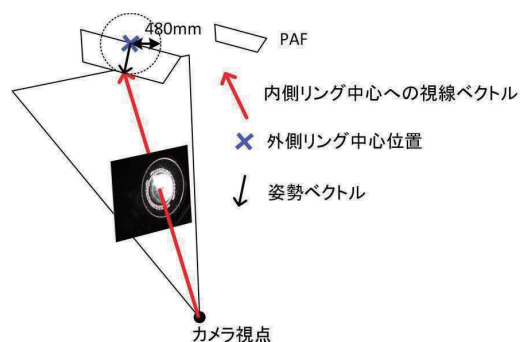
(ii)内側リング中心の位置推定

・内側リング中心は、外側リング中心から一定距離に存在
⇒ 外側リング中心を中心とした球と、内側リング中心への視線ベクトルとの交点を求める

(iii)姿勢ベクトルを求め、姿勢角を算出

・外側リング中心から内側リング中心へのベクトル

透視投影模式図



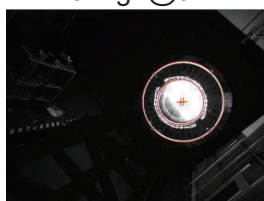
画像処理例

○ PAF-PSS接続フランジ(外側リング)の楕円近似結果

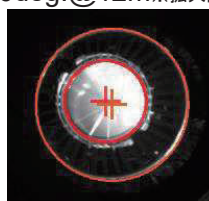
+ PAF-PSS接続フランジ中心(外側リング中心)

+ PAFフランジ領域重心(内側リング中心)

0deg. @6m



10.6deg. @12m ※拡大図



20.6deg. @17.5m ※拡大図



20

3-6 中長距離域(3m～)の計測精度評価結果1

計測精度評価を実施

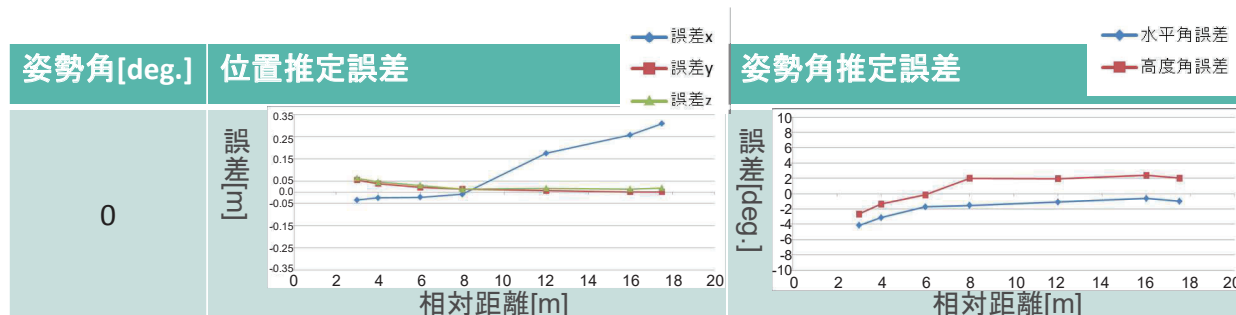
- 位置推定「外側リング中心」
- 姿勢推定「PAFフランジの法線方向」
- 3次元測量器の計測値と比較

精度評価条件

項目	パターン
相対距離[m]	3, 4, 6, 8, 12, 16, 17.5
相対姿勢角[deg.]	0, 7.6, 10.6, 16.6, 20.6, 23.5, 26
露光量[msec]	2, 4, 8, 12, 16, 24, 32, 48, 64, 96, 112, 128, 160, 192, 224, 256, 288, 320, 352, 384

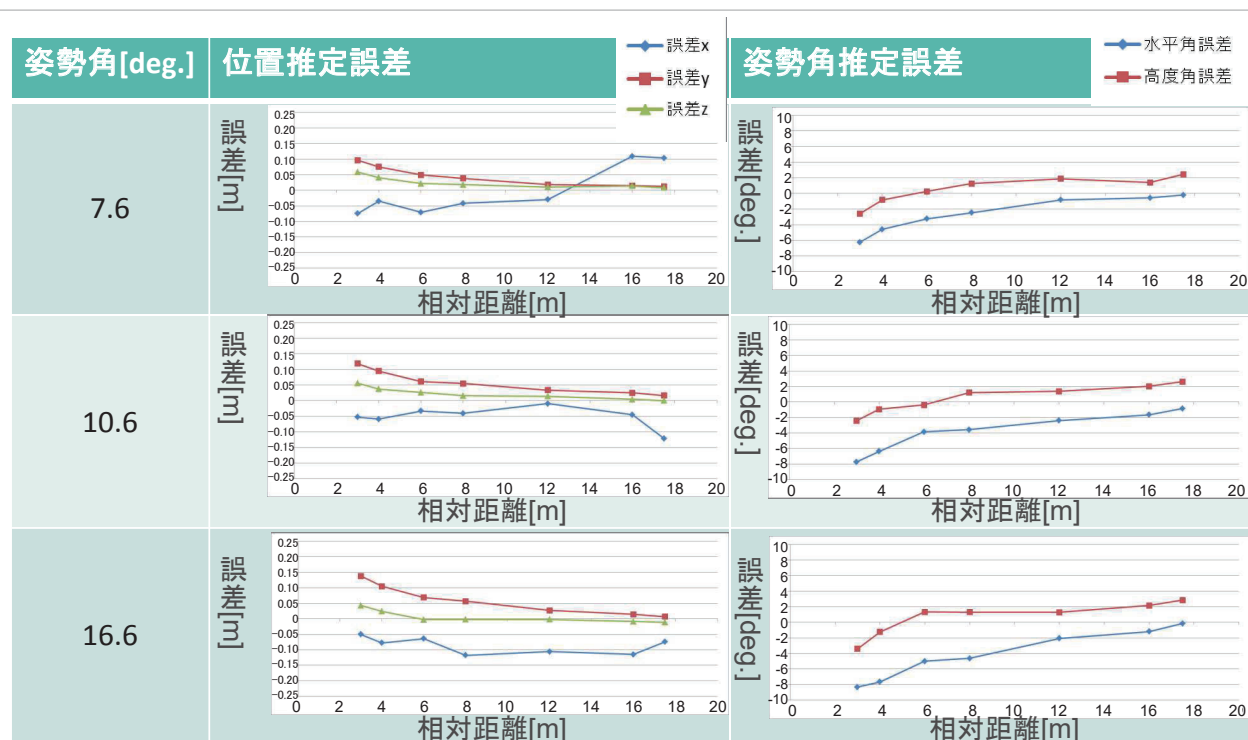
計測誤差算出結果(右カメラ)

※露光量は、画像処理が正常に動作したものを選択



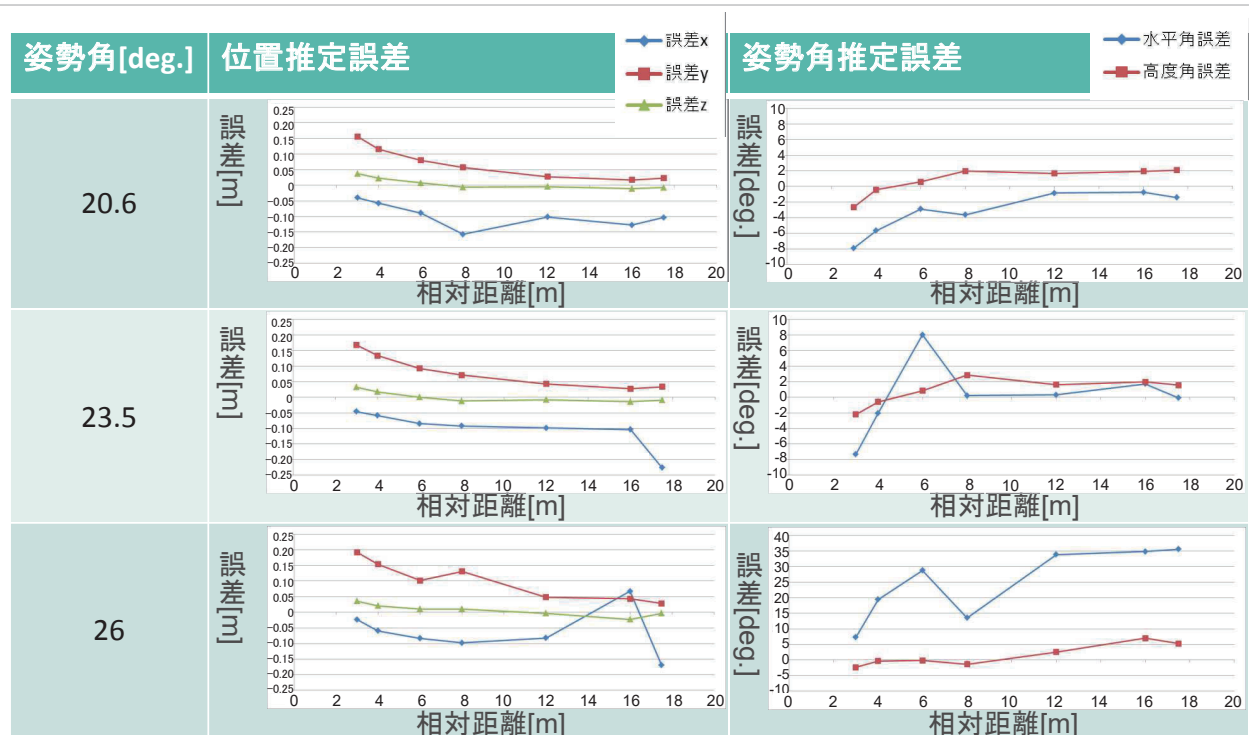
21

3-6 中長距離域(3m～)の計測精度評価結果2



22

3-6 中長距離域(3m～)の計測精度評価結果3



23

3-7 計測精度評価 結果概要

- 位置推定
 - ・ 6m～は位置誤差率3%以下で計測可能
 - ・ 一方で、～4mは位置誤差率が3～9%程度存在
- 姿勢推定
 - ・ 12m～は誤差3度以下で推定可能
 - ・ 一方で、～8mは相対距離が小さくなるにつれて、誤差が大きくなる
 - ・ 姿勢角26deg.は、どの相対距離でも計測不能

		相對距離[m]													
		3		4		6		8		12		16		17.5	
		位置	姿勢	位置	姿勢	位置	姿勢	位置	姿勢	位置	姿勢	位置	姿勢	位置	姿勢
相對角 [deg.]	0	△	△	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	7.6	△	△	○	△	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○
	10.6	△	×	○	△	○	△	○	△	○	○	○	○	○	○
	16.6	△	×	△	×	○	△	○	△	○	○	○	○	○	○
	20.6	△	×	△	△	○	○	○	△	○	○	○	○	○	○
	23.5	△	×	△	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	26	△	×	△	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×

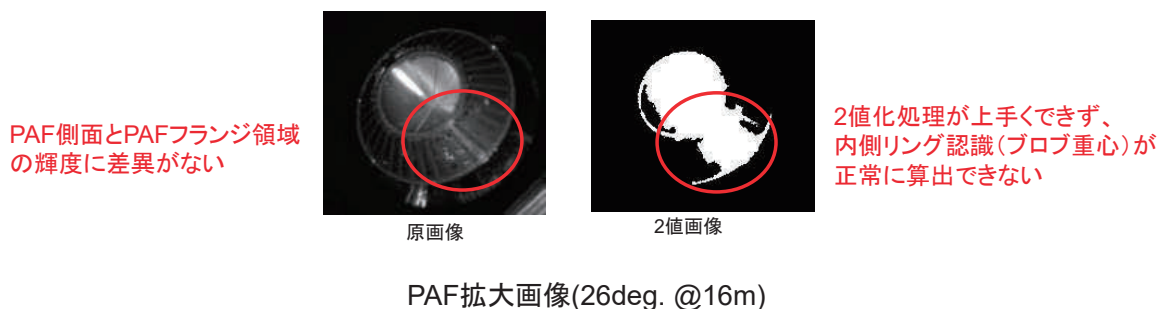
位置凡例	○	誤差率3%以下	△	誤差率9%以下	×	誤差率9%以上
姿勢凡例	○	誤差3度以下	△	誤差7度以下	×	誤差7度以上

位置誤差率[%] = (誤差[m]/相対距離[m]) × 100

24

3-8 計測精度評価 考察

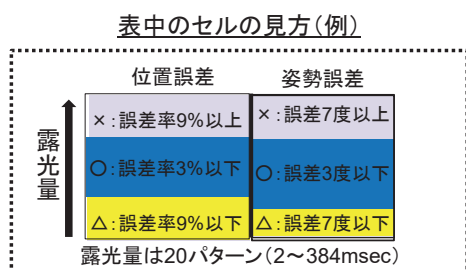
- a. 相対距離が小さくなるにつれて、誤差は位置・姿勢ともに増加する
 - ・ 画像処理により認識した楕円の中心は、実際のリング中心位置とは異なる
 - 相対距離が大きい場合は、カメラとPAFの画角が小さくなるためこれをほぼ無視することができるが、相対距離が小さい場合は影響を受けるため
- b. 姿勢角26deg.では姿勢推定に失敗
 - ・ PAF側面の輝度が大きくなり、内側リングの認識(プロブ重心算出)に失敗するため



25

3-9 露光量へのロバスト性評価

- 各姿勢角、各対物距離で計測可能な露光量がオーバーラップしていることを確認(姿勢角26deg.の姿勢角推定除く)
- 撮影環境の差異変化へのロバスト性を有する



姿勢角 [deg.]		相対距離[m]						
		3	4	6	8	12	16	17.5
0	露光量							
7.6	露光量							
10.6	露光量							
16.6	露光量							
20.6	露光量							
23.5	露光量							
26	露光量							

26

3-10 露光量制御(1.方法)

PAF接近に伴う、刻々の照明条件変化に対して、安定な露光条件を維持するため、PAFフランジ部分の輝度値が適切になるように露光量を制御する方法を検討

フランジ部の輝度値が、
画像処理に適切な値よりも

- 大きければ 露光量減
- 小さければ 露光量増

※適切な輝度値は、事前の実験により決定

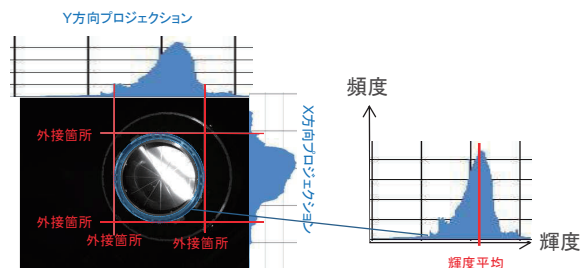


PAFフランジ部分の輝度値の算出方法

※反射特性の不透明なバルクヘッド部分は対象領域に含めない

手順

- (1) プロジェクション処理
- (2) クランプバンドを含む領域の外接箇所を探索
⇒各プロジェクション値列の立ち上がり
- (3) フランジ領域の設定
⇒長方形の内接円(ドーナツ状)
- (4) 領域内の輝度平均算出



フランジ領域の輝度ヒストグラムイメージ

画像処理に適した輝度値(事前決定)と現時刻の輝度値の差 Δp 、及び露光量カーブモデルから、次時刻での露光量増減量を算出する

27

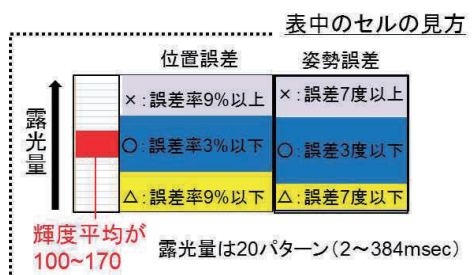
3-10 露光量制御(2.妥当性評価)

本制御方法を運用するには、画像処理に適切な輝度平均値が、全相対距離、姿勢角において一意の範囲である必要がある。

そこで、RDOTS試験画像を用いた実験によりこれを検証。

全相対距離、姿勢角において、輝度平均が100~170の一意の範囲のときに精度良く計測可能であることを確認。

中長距離計測ロジックの輝度平均が100~170のときの露光量レンジ



姿勢角 [deg.]	相対距離[m]						
	3	4	6	8	12	16	17.5
0	露光量						
7.6	露光量						
10.6	露光量						
16.6	露光量						
20.6	露光量						
23.5	露光量						
26	露光量						

28

3-11 実装性検討(1.計測条件)

計測アルゴリズムの主要な計算処理を、右表のような計算機に移植し、処理時間を計測

主要な計算処理一覧

ロジック種別	処理大分類	処理小分類
至近距離	フランジ外側エッジ認識	①2値化・プロブ抽出
		②外側エッジ探索
		③楕円推定
	フランジ内側エッジ認識	④内側エッジ探索
		③楕円推定
中距離	外側リング認識	①2値化
		②エッジ探索
		③楕円推定
	内側リング認識	①2値化・プロブ抽出

画像センサ計算機試作品スペック

項目	性能
CPU	PowerPC 405 400MHz
メインメモリ	64MB SDRAM
フラッシュメモリ	8MB NOR Flash
FPGA	Virtex2 Pro ・プロジェクション処理実装

29

3-11 実装性検討(2.処理時間計測)

■計測条件

処理時間計測条件

項目	パラメータ
画像	2m @0deg. 2000msec 512×512画素
楕円ロバスト推定 繰り返し回数	60回
処理領域(ROI)	下図参照 ※FPGAによるプロジェクション処理でROIを決定することを想定
処理時間計測方法	C標準関数timeGetTimeによる10回の計測の平均

ROI



原画像



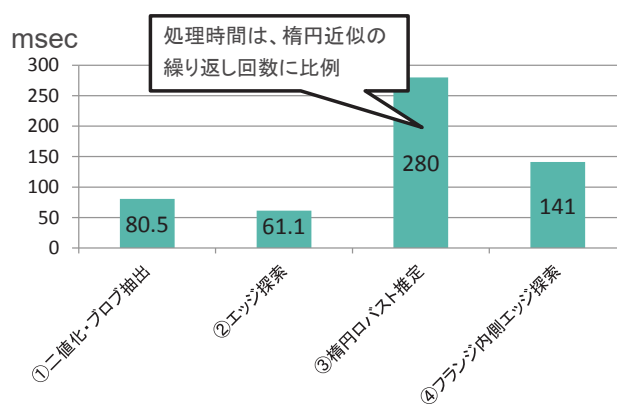
2値化・プロブ抽出



フランジ内側エッジ抽出

処理画像例

■計測結果



処理時間概算

至近距離ロジック

$$①+②+③+④+③ = 842.6\text{msec}$$

中長距離ロジック

$$①+②+③ = 421.6\text{msec}$$

30

3-11 実装性検討(3.処理時間評価)

今回の試験により、処理周期1Hzは達成できる見込みを得た。

以下要素の改良により更なる向上が期待できる。

(1)浮動小数点演算

- PowerPC 405は浮動小数点演算ユニットを有しないCPU
- 実装時、一部演算は整数演算化したが、全ての演算の整数演算化はできてない。
- したがって、全ての演算を整数演算化すれば、更なる高速化が期待できる

(2)楕円ロバスト推定繰り返し回数

- 楕円ロバスト推定の処理時間と比例するため、できる限り少ないことが望ましい
- 前時刻の処理結果を利用すれば、繰り返し回数を削減可能と考える

31

3-12 画像センサシステムに関する今後の計画

(1)PAF位置・姿勢計測ロジックの計測精度の評価

PAF画像取得と同様の環境にて、露光制御等のロジックを組み込んだ計測システムとしての機能確認と十分な試行回数により信頼性の高い精度評価を行う。

(2)デブリとの相対運動の影響評価

デブリとの間に相対運動がある条件における、画像センサの計測性能への影響の評価

(3)運用との機能・性能のすり合わせ

航法センサとして明確になってきた性能について、運用側からの要求をより具体的に取り込み、実現性を高める。

(4)実装置としての成立性検討

撮像周期2Hzの達成のため、検討で整理した改良点の反映を検討する。

32