

# 宇宙航空研究開発機構研究開発報告

## JAXA Research and Development Report

---

### 軌道上組立用画像計測システム

上村 平八郎, 西田 信一郎

2007年3月

**宇宙航空研究開発機構**

Japan Aerospace Exploration Agency



# 軌道上組立用画像計測システム\*

上村 平八郎<sup>\*1</sup>、西田 信一郎<sup>\*1</sup>

An image measurement system for on-orbit structure assembly by space robot\*

Heihachiro KAMIMURA<sup>\*1</sup>, Shinichiro NISHIDA<sup>\*1</sup>

## Abstract

A structure assembly is effective robot work, in order to build a large-sized structure on orbit and on moon/planet surface. The system which prepares a marker for image measurement in positioning of a structure assembly is simple and highly precise. JAXA is doing development of a 3-dimensional color marker for space robot positioning, and the image-processing technique. Under various kinds of lighting environment, positioning operation testing of the drive mechanism by measurement of the color marker was carried out. This paper describes this testing result and evaluation.

**Keywords:** *On-orbit assembly, Color image processing, Pattern recognition*

## 1. はじめに

軌道上組立は、大型反射鏡のようにロケットフェアリング直径からくる制約により既存の手段では輸送できない大型構造物を軌道上や月惑星面上に構築するために必須のロボット作業技術である。構造物組立は、予め手順や配置をコーディネートすることができるので、ロボットアームの自律制御で行うのが基本である。しかし、大型構造物やロボットアームには熱歪やガタ、部材形状誤差などに起因する位置/姿勢の誤差があり、組立作業の位置決めにおいては、画像センサによる位置/姿勢の計測に基づくフィードバックが必要である。そのためには、位置決め箇所に画像計測用のマーカを設けるのが簡便で、かつ高い精度が期待できることからこのような用途に適切な方法である。

宇宙ロボットの位置決め用マーカとしては、スペースシャトルのマニピュレータのTバーターゲットやETS-VII ロボット実験に使用された3点マーカの事例<sup>[6]</sup>がある。しかし、Tバーターゲットは自動画像処理を意識せずにマニュアル操作に構成されたものであり、必ずしも画像処理に適したものではない。また、ETS-VIIのマーカは、照明を持たないモノクロカメラに対応してモノクロであり、画像からの抽出が環境の明るさや周辺の明暗模様による疑似マークに左右されやすいという課題があった。一方、衛星の外観の色は断熱材などの黒、白、金、銀色が主である。このため、他の色でマーカを

構成して色抽出画像処理を行うことで高い抽出性が得られることがわかっている<sup>[13]</sup>。本論文では、宇宙ロボットの位置決め用の3次元カラーマーカを試作し、試験・評価を行った結果につき報告する。

## 2. カラーマーカの軌道上組立への適用

### 2.1 軌道上組立作業概念

宇宙ロボットによる大型構造物組立作業の概念図を図2.1に示す。ロボットアームは、構造要素を構造要素を順次結合することにより組立作業を行う。組立作業の進行に伴い作業場所の変更が必要になるが、ロボットアームは構造物上を尺取り虫のように移動する。なお、各反射鏡セグメントは、2重構造になっており、組立後に3つの内蔵アクチュエータにより鏡面のアライメント調整が行える方式であるため、鏡面精度は構造物や組立の精度に依存しない。

### 2.2 位置決め作業概念

軌道上組立作業を構成するいずれのタスクにおいても位置決め作業が必要である。各作業項目に必要なロボットアームの位置決め対象は、各タスクともにエンドエフェクタ<sup>[10]</sup>専用の取っ手や結合機構が対象となっている。従って、取っ手や結合機構の近傍にマーカを取り付けておけば、いずれのタスクにおいても同一の形態・手順での位置決め作業で対応することができる。

\* 2007年3月1日受付 (Received 1 March, 2007)

\*1 総合技術研究本部 宇宙先進技術研究グループ (Advanced Space Technology Research Group, Institute of Aerospace Technology)

軌道上組立作業は、何らかの異常時を除いて、予めコーディネートした対象・手順で作業を行うことができる。従って、ロボットの自動による位置決めにおいても、構造物やロボットアームの熱歪みやガタによる誤差を生じるだけで、大きな位置・姿勢誤差を生じることはない。そこで、位置決め作業は、図 2.2 に示すように、まず取っ手の上方へ自動位置決めし、次に画像計測で許容位置ずれ範囲に入っていることを自動確認した後に取っ手の直近上方にアプローチを行い、再度、画像計測で位置／姿勢ずれの確認・修正を行った後に取っ手への力制御での挿入動作を行うことを基本手順とする。

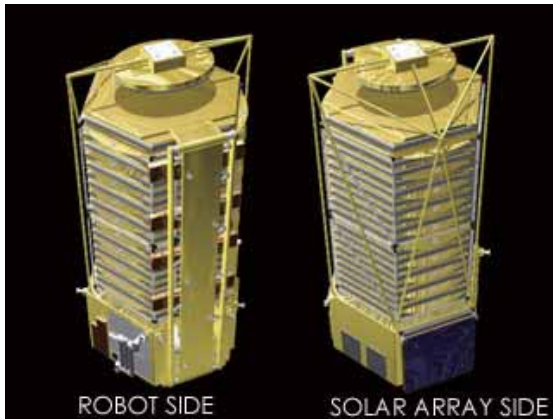
### 2.3 カラーマーカへの要求機能・性能

前述のように軌道上組立での位置決め作業では、主に対象の上方と、そこから許容されるコリドー範囲内を接

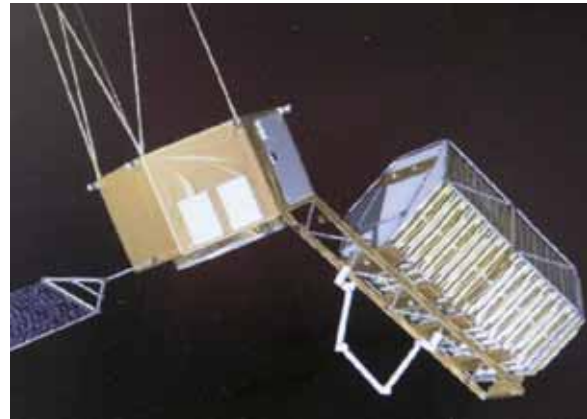
近した対象の直近上方の2箇所においてマーカの画像計測が必要となる。各々における対象からの距離とエンドエフェクタ上のカメラの配置を考慮し、マーカの計測レンジ等の要求性能を表 2.1 に示す値に設定した。

表 2.1 カラーマーカ計測の要求性能

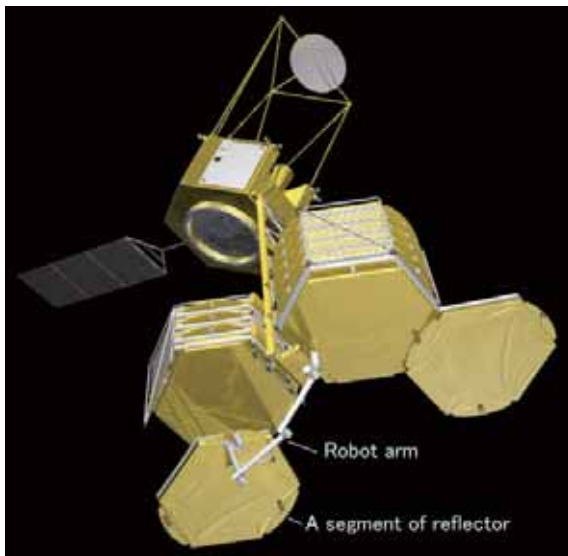
項目	性能	備考	
計測レンジ	距離	0.3~0.6m以上	
	横ずれ	0.05~0.1m以上	距離に依存
	姿勢	5 deg.以上	3軸合成
計測精度	距離	30 mm 以下	
	横ずれ	5 mm 以下	2軸合成
	姿勢	3 deg.以下	3軸合成



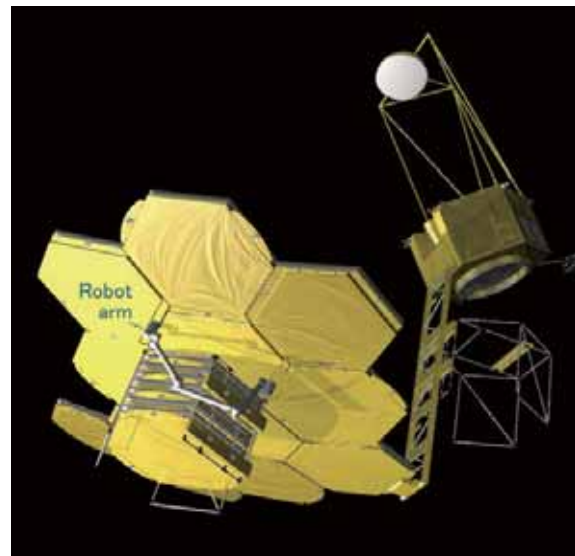
a. 打上げコンフィギュレーション



b. ロボットアームの起動



c. 反射鏡パネルのハンドリング



d. 構造物上の尺取り虫型移動

図 2.1 宇宙ロボットによる大型構造物（オフセットカセグレン反射鏡）組立作業の概念

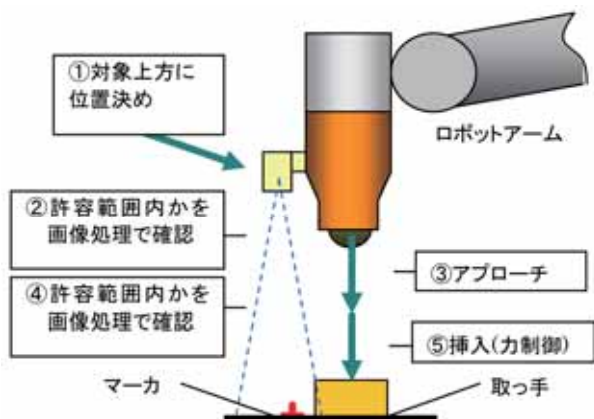


図 2.2 ロボットアームの位置決めの基本手順

### 3. 軌道上組立用画像計測システム

#### 3.1 位置決め用カメラ

CCD や CMOS の 2 次元イメージセンサは、衛星搭載用のカメラに数多く採用されており、製品の多様性、入手性および信頼性という観点から宇宙ロボット用のカメラにも適している。2 次元イメージセンサは、単板のイメージセンサ画像をデモザイック処理でカラー画像を生成する単板方式と、3 枚のイメージセンサを装着し、一度に R, G, B 画像を取得する三板方式とがある。色の再現性の点では三板式が優れているが、この方式のカメラは小型化、軽量化、および省エネ化という点で制約がある。一方、単板式カメラは構造が簡単なことから小型軽量という点で優れており、ロボットアームの手先部への取り付けに適している。カラーマーカのプロトタイプを用いて、デモザイック処理の計測精度への影響を評価したところ、影響が十分に小さいことが確認できたため、軌道上組立ロボットの手先カメラとして単板式カメラの使用を前提とした。

#### 3.2 照明

軌道上では自然光照明として太陽光と地球のアルベド光があるが、組立作業は軌道上を周回しながら行われるため照明環境は絶えず変化し、ときには位置決め用カメラの視野の一部または全部が陰になることも珍しくない。このような場合のためになんらかの人工照明が必要とされるが、本研究では光量、消費電力、寸法、そして重量を考慮して、リング型の LED 照明を人工照明として採用した。

#### 3.3 カラーマーカ

ロボットアームの位置決めの際の指標用としてカラーマーカを試作した。マーカは大きさが小さくても倒れ回転を精度良く計測するために 3 次元形状とし、図 3.1 に示すように 40mm x 40mm の矩形のベースプレート中



図 3.1 試作したカラーマーカ

心に支柱を立て、その上に円形マークのひとつを配置した。カラーマーカの寸法を決めるにあたり、ロボットアームの目視クリアランスおよび動作クリアランスを考慮して断面積がカメラと同等程度となるようにし、ベースプレート上には赤、橙色の円形マークを施し、支柱先端には緑の円形マーク（以後、カラーマーカを構成する 3 色の円盤をマーカそのものと区別するために「マーク」と呼ぶ）を配置した。マークの形状は円に限らず他の幾何学的形状がいく通りも考えられるが、後述するデモザイック処理の影響で画像の高周波成分が抽出されにくくなることを避けるために、望む方向に関係なく常におだやかな曲線で構成される円形を選択した。また、カラーマーカの材質は製作上の形状精度と耐久性からアルミ合金製とした。

カラーマーカを含む画像において、各円形マークの中心をセントロイド演算で求めれば、倒れ回転は赤い円と緑の円の相対位置関係から、中心軸まわりの回転は赤と橙の円との相対位置関係から得られる。ただし、マーカがカメラの近くにあつて、かつ正対位置関係にないときにはパースペクティブのためにマークの像面の形状（楕円）の中心は実際のマークの中心と一致しないが、位置決めの際の初回の接近動作で正対位置に移動させるので精度には殆ど影響はない。

マーカの姿勢はマーカの 3 色円形マークの面積中心の位置関係から求めることができる。図 3.2 に示すように、レンズの第 2 主点から焦点距離  $f$  だけ離れたイメージセンサ上に画像フレーム座標を考えると、画像フレーム上では通常円形マークは楕円形として捉えられる。この楕円の長軸の長さ  $\delta$  はレンズとマーカが十分離れて位置するか、またはレンズの光軸に対してマーカ支柱のなす角度が小さいときには赤マークの直径とみなすことができるので、赤マークの実際の直径を  $d$ 、レンズの主点から画像フレーム上の楕円形の中心  $p_r(x_r, y_r, f)$  までの距離を  $l_r$  とすると、主点から赤色マークの中心までの距離  $L_r$  は次の式で表される。

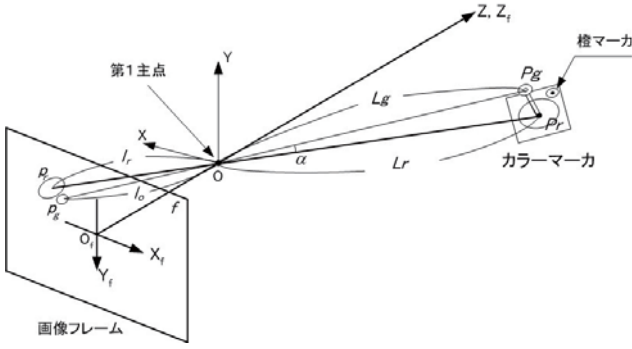


図 3.2 カラーマーカと画像フレーム上の画像との間の位置関係

$$L_r \frac{dl_r}{\delta} \quad (3.1)$$

ただし、 $l_r$ はフレーム座標系( $X_f, Y_f, Z_f$ )において

$$l_r = \sqrt{x_r^2 + y_r^2 + f^2} \quad (3.2)$$

である。

主点から緑マークまでの距離も赤マークと同様の方法で求められなくはないが、緑マークは赤マークに比してサイズが小さいため、大きさをたよりにして距離を求めるとは精度の劣化が避けられない。そこで、赤マークまでの距離と赤および緑の2つのマークの面積中心の張る角度を用いて緑マークまでの距離を求めた。余弦定理により赤色マークの中心  $P_r$  と緑色マークの中心  $P_g$  に対する見込み角  $\alpha$  は以下のように表すことができる。

$$\cos \alpha = \frac{(x_r^2 + y_r^2 + f^2) + (x_g^2 + y_g^2 + f^2) - \{(x_r - x_g)^2 + (y_r - y_g)^2\}}{2\sqrt{(x_r^2 + y_r^2 + f^2)(x_g^2 + y_g^2 + f^2)}} \quad (3.3)$$

同様に、主点から緑色マークまでの距離を  $L_g$  とすると、

$$L_g^2 - 2L_g L_r \cos \alpha + L_r^2 - h^2 = 0 \quad (3.4)$$

これより、

$$L_g = L_r \cos \alpha - \sqrt{(L_r \cos \alpha)^2 - (L_r^2 - h^2)} \quad (3.5)$$

ただし、 $h$ はマーカの支柱の高さである。

これより、レンズの第1主点を原点とする座標系  $X-Y-Z$  における赤色マーク、緑色マークの中心の座標値はそれぞれは以下のように表される。

$$P_r = \left( \frac{L_r}{l_r} x_r, \frac{L_r}{l_r} y_r, \frac{L_r}{l_r} f \right) \quad (3.6)$$

$$P_g = \left( \frac{L_g}{l_g} x_g, \frac{L_g}{l_g} y_g, \frac{L_g}{l_g} f \right) \quad (3.7)$$

これは赤色マークおよび緑色マークの位置ベクトルを表している。また、同様にして橙色マークの位置ベクトルも求めることができるので、これらをもとに3軸まわりの姿勢角が得られる。

カラーマーカを用いて姿勢を計測するには、取得した画像中からマーカの円形マークの全体を精度良く抽出することが必要である。円形マークの抽出はあらかじめ作成しておいた3次元カラーテーブルとピクセル毎にマッチングをとることによって行われるが、マーカの色は精度の良い抽出を可能とするために以下の4条件をもとに決定した。

- 色度
- 反射率
- 均一性
- 入手可能性

これらの条件をマーカ色の決定に適用するために具体化する以下のようなになる。

#### (1) 色度

色を定量的に表現する方法の1つとして  $L^*a^*b^*$  表色系がある。 $L^*a^*b^*$  表色系では  $(L_i, a_i, b_i)$  および  $(L_2, a_2, b_2)$  間の色の差、つまり色差  $\Delta E^*$  は次の式で表される<sup>[5]</sup>。

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (3.8)$$

ただし、

$$\Delta L^* = L_2^* - L_1^* \quad (3.9)$$

$$\Delta a^* = a_2^* - a_1^* \quad (3.10)$$

$$\Delta b^* = b_2^* - b_1^* \quad (3.11)$$

ここで、 $\Delta L^*$  は2つの色の明度差を、 $((\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2)^{1/2}$  は色度差を表す。つまり、色差とは明度差と色度差の両者に関連する量であるが、明度差は物体の反射率に依存

する値であり、後述するような理由から3色の円形マークの反射率の差が大きいと色情報をもとにした抽出に有害なため、この場合色差としては色度差だけを考えなくてはならない。

一般的に CCD カメラを通して得られるカラーマーカの画像では、元の色と比べて彩度が低くなる傾向がある。さらに、マーカに当たる照明が暗ければ暗いほど、どの色もグレーに近づく性質があるので、マーカに求められる色に関する条件は3つの色間の色度差ができるだけ大きいということである。すなわち、マーカの3つの円形マークの色を  $a^*b^*$  座標上で見たときに互いにできるだけ遠く離れて存在することが必要である。CCD カメラで取得したカラーマーカ画像の3色マークの色分布を  $a^*b^*$  座標上に表したものを図 3.3 に示す。

#### (2) 反射率

単板色カラー CCD カメラはフォトセンサ上にマイクロカラーフィルターを配して、1つのフォトセンサで RGB のうちの1つの色情報を得ているが、これを画像上で解釈すると1ピクセルにつき1種類の色情報しかないことになる(モザイク画像)。残りの2色はデモザイクと呼ばれる補間処理により再現することで自然なカラー画像を得ている。そのため、3色のうちのどの色が飽和しても、正しい色を再現することはできなくなり、カラーテーブルとのマッチング処理をしてもそのようなピクセルは抽出されないことになる。また、3色の円形マークのうち最も反射率の低い、すなわち最も暗い色のマークは照明が充分でない環境では容易にノイズに埋没してしまい、他の2色のマークが抽出されるにもかかわらず、1色だけマークの位置情報が得られない結果をまねく。

このような理由から、CCD カメラの限られたダイナミックレンジの中で最大限の抽出能力を実現するためにはできるだけ3色の円形マークの反射率が似通っていることが重要である。

#### (3) 均一性

精度の良い抽出には実際の製作上の問題も考慮する必要がある。そこで、色の均一性と形状精度を考慮した結果、アルミ合金製のカラーマーカ本体に3色の円形マークを印刷する方法を採用した。

#### (4) 入手可能性

条件 a および条件 b を満たす色とは彩度が高く、色度差が大きく、かつ似かよった明度を持つ色ということになるが、実際には印刷用のインクの色域には制限があり、これらの条件を完全に満たすようなインクは存在しない。そこで、入手可能な印刷用インクの中から可能な限り上の条件を満足する色を選択した。

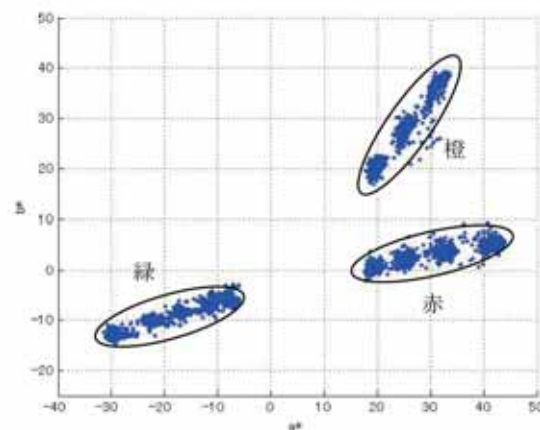


図 3.3  $a^*b^*$  座標上におけるカラーマーカの色分布

### 4. マーカ抽出のための画像処理方法

#### 4.1 カラーテーブルの作成

画像計測のためにはカラーマーカを含むカラー画像の中からマーカの3色の円形マークを抽出する必要がある。これは、カラー画像と予め用意しておいたカラーテーブルとの間でピクセル毎にマッチングをとることで行われる。カラーテーブルの作成にあたっては、図 4.1 に示す作成手順にあるようにマーカの各色部分をマニュアルでサンプリングし、これをカラーテーブル作成の元画像とする。サンプル画像は RGB 表色系から  $L^*a^*b^*$  表色系に変換した後、画像ごとに  $L^*$  座標 8 段階、 $a^*$  座標 75 段階、 $b^*$  座標 45 段階からなる 3 次元ヒストグラムを作成し、これをマーカの色ごとにヒストグラムを加算することで統合して1つにまとめる。

限られた色サンプルから作成されたヒストグラムは、この段階では含むべき色域が欠損していたり、逆にマーカの汚れやカメラの色ノイズのために含むべきでない色域を包含している。これらの問題を解決するために、ヒストグラムを適当な出現頻度を閾値として2値化し、これをあたかも2値画像とみなすこととする。この2値画像内ではマーカの各色は異なる場所に分布するクラスタとして観察される。これらのクラスタには欠損があるだけでなく、その周辺にはさらに小さなノイズが分布している。これに膨張・収縮処理を施すことでクラスタ内の欠損部分を満たし、最後にもう一度膨張処理を行うことにより、ノイズがなくダイナミックレンジの広い領域に適応できるカラーテーブルが生成される。これら一連の処理のうちで人手の介入を必要とするのはカラーマーカのサンプリング領域を指定するところだけで、残りの処理はすべて自動化されるため、軌道上では、初めに地上でサンプリングする場所を指定すれば後はオフラインでカラーテーブルを作成、または任意に変更する

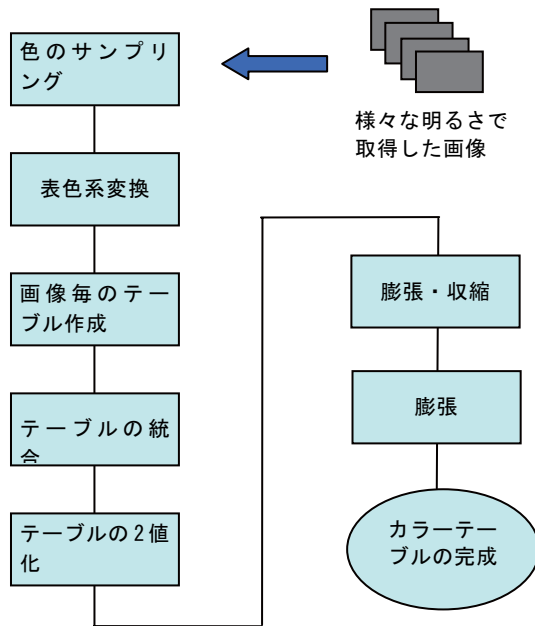


図 4.1 カラーテーブル作成手順

ことが可能である。また、照明環境の厳しい場合には最後に行う膨張処理の回数を多くし、テーブルの色域を拡張することで対応することも可能である。

## 4.2 デモザイク

現在入手可能な市販のデジタルカメラのほとんどは画像センサーの直前に R, G, B のマイクロカラーフィルターを配置することでピクセルごとに R, G, または B の色情報を得ている。したがって、画像センサーから直接得られる画像データでは R, G, B が規則的に並んだモザイク状を呈しており、どのピクセルも R, G, または B のうちのいずれかひとつの値を有するだけである。これから通常の RGB 画像を生成するには、欠落している 2 色を近傍のピクセルの色情報を使って内挿しなくてはならない。

この処理はモザイク状の画像からモザイクをなくするという意味でデモザイク (demosaic) 処理と呼ばれる。多くのデジタルカメラで用いられているカラーフィルター配列は Bayer 配列<sup>[1]</sup>と呼ばれているもので、その配列パターンを図 4.2 に示す。

これまでにデモザイクについてはいくつかの方法が提案されている。最も単純な方法は、近傍のピクセルの平均値から目的の色を再現するもので、これは線形内挿法 (以下、線形法と称す) と呼ばれる。本研究では線形法の他に Laroche と Prescott の方法<sup>[2]</sup> (以下、Laroche 法と称す) および Kimmel の方法<sup>[3]</sup>を簡略化した手法 (以下、簡略 Kimmel 法と称す) を比較・検討した。

線形法では R および B の情報を持つピクセルについ

て近傍の G の値を使って G の情報を内挿した後、初めから G の情報を持っているピクセルについて同様に近傍のピクセルの情報を使って R および B の値を決めるものである。この方法では先鋭なエッジをまたいだ内挿において偽色の発生を避けられない欠点がある一方、アルゴリズムが単純であるだけに計算負荷は 3 種類の方法のうちで最も小さいのが特徴である。

Laroche 法では G を内挿する際に縦および横方向のエッジをまたぐことを避けるとともに、R および B の決定にピクセル数の最も多い G と R および B の差を用いることで精度を上げる工夫がなされている。

簡略 Kimmel 法では縦横のみならず斜めのエッジも検出し、エッジの強さに逆比例したウエイトをかけて G を内挿した後、おなじ色の領域では G 対 R、または G 対 B の比が一定であるという仮定のもとに R および B を内挿する方法である。

図 4.3 は CCD カメラから直接取得した画像、つまり Bayer 配列のモザイク画像である。図 4.3 のマーカの中心部を拡大した画像を図 4.4 に示す。

図 4.5、図 4.6、および図 4.7 は図 4.4 に示したマーカの中心部をそれぞれ、線形法、Laroche 法、および簡略 Kimmel 法でデモザイク処理したものである。線形法と Laroche 法にはエッジの部分に偽色が広く分布しているのが見られる一方で、簡略 Kimmel 法では激しく明度に変化する部分でも偽色の発生はほとんど見られない。

このようなカラー画像の再現方法が、実際の画像計測精度に対してどのような影響があるかを見るために試作したカラーマーカを用いて、デモザイク法ごとに姿勢角の測定精度を調べた。表 4.1 はデモザイク法ごとの測定値の最大誤差と処理時間を表す。処理時間は線形法に要した時間で正規化してある。表からわかるとおり、マーカの姿勢測定精度においては 3 つのデモザイク法の間には有意な差は認められない。この結果は処理後の画像を見る限りでは意外とも言えるものであるが、姿勢計測では 3 つの色マークの面積中心を使うため、色マークの縁に一樣に発生する偽色の影響が回避されるものと思われる。本研究では後述するカラーマーカによる姿勢測定、および自動ステージ上での位置決め実験のすべてで簡略 Kimmel 法を用いた。





図 4.2 Bayer 配列



図 4.3 RAW 画像の一部

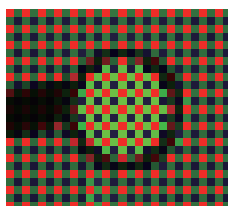


図 4.4 図 4.3 におけるマーカ中心部の拡大画像



図 4.5 線形法によるデモザイック処理結果



図 4.6 Laroche 法によるデモザイック処理結果

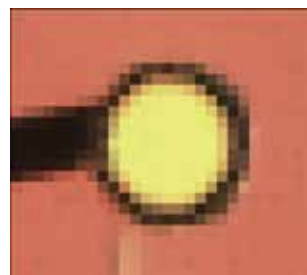


図 4.7 簡略 Kimmel 法によるデモザイック処理結果

表 4.1 デモザイック法による誤差と処理時間

	簡略 Kimmel 法	Laroche 法	線形法
X 軸 まわり (deg.)	1.24	0.52	1.25
Y 軸 まわり (deg.)	1.15	1.02	1.05
Z 軸 まわり (deg.)	0.2	0.1	0.1
処理時間	12.5	1.07	1

### 4.3 マーカの抽出

実験における元画像の取得から3色円形マークの抽出までの処理の流れを図 4.8 に、また、実際の画像処理のステップ毎の結果の一例を図 4.9～図 4.14 に示す。CCD カメラで取得した元画像をデモザイック処理でRGB画像に再現した後、画像をピクセル毎に表色系変換を行い、これを抽出対象の色情報をもつカラーテーブルと照合する。ここで、もしカラーテーブルの当該ピクセルの色を含む領域に1が立っている場合にはそのピクセルは残し、0が立っている場合には当該ピクセルのRGB値をすべて0にすることで円形マークの抽出を行う。

この段階における抽出画像には色ノイズと円形マーク内に欠損が存在しているので、これを2値画像に変換した後、クラスタリング処理を行い、最大クラスタだけを残すことで孤立ノイズを除去し、さらに膨張・収縮処理を施すことにより円形マーク内部の欠損を充填して抽出処理は完了する。

図 4.10～図 4.12 はそれぞれ赤色円形マーク、緑色円形マーク、そして橙色円形マークのマッチング処理の結果である。図 4.10 で抽出後の赤色円形マークの内部に大きな欠損があるのは、元画像(図 4.9)から容易に推測されるように赤色円形マーク中央に位置する緑色円形マークとその陰によるものである。これを 2 値化した画像(図 4.13)からわかるように、赤色円形マーク内部の欠損の他にも画像内にはノイズが存在しているが、クラスタリング処理および膨張・収縮処理後の画像(図 4.14)ではこのような欠損やノイズは除去されている。

元画像において支柱先端に位置する緑マークが赤マークの縁より外に出るような大きな角度がマーカに付いている場合には、膨張収縮処理では赤マークの縁の欠損を修復できないが、本カラーマーカの用途はロボットアームによる自動組立作業の結合時における位置決め用であり、ロボットアームの自動組立では組立部品の取付位置を図 2.2 に示すように、取っ手の上方に自動位置決めした後の結合操作の段階でマーカによる位置・姿勢計測が使われる。表 2.1 のロボットアームのカラーマーカに対する要求仕様に示すように、実際には 600mm 離れたところからマーカによる位置決めをすることが想定されており、そのときのマーカの最大倒れ角は 3 軸合成で 5°となっている。つまり、この程度の荒い位置決めはロボットアームにより自動でできるということであり、ロボットアームが 600mm 離れた地点で 100mm だけレンズの光軸と直交する軸方向に横ずれしていて、かつそれとは反対側に 5°マーカが傾いていた場合でさえ、取得された画像内で緑マークの縁は半径 14mm の赤マークの中心から 12mm の位置まで到達する程度なので、実際の組立に用いられたときに緑マークが赤マークの縁を隠して赤マークに欠損が生ずるといった事態は発生しない。

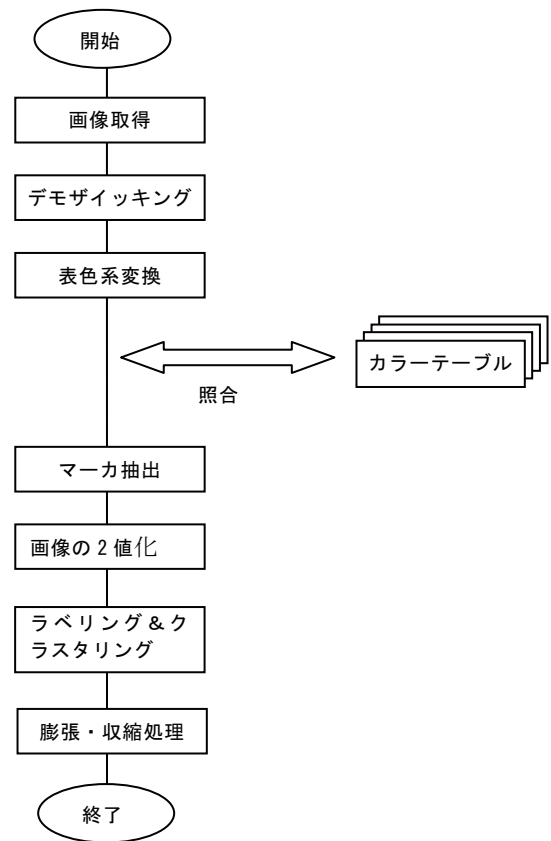


図 4.8 マーカ抽出処理のフローチャート



図 4.9 デモザイック処理後の元画像



図 4.10 赤色円形マーク抽出結果

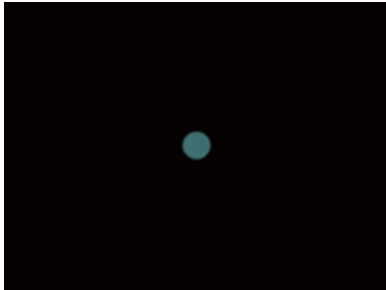


図 4.11 緑色円形マーク抽出結果



図 4.12 橙色円形マーク抽出結果

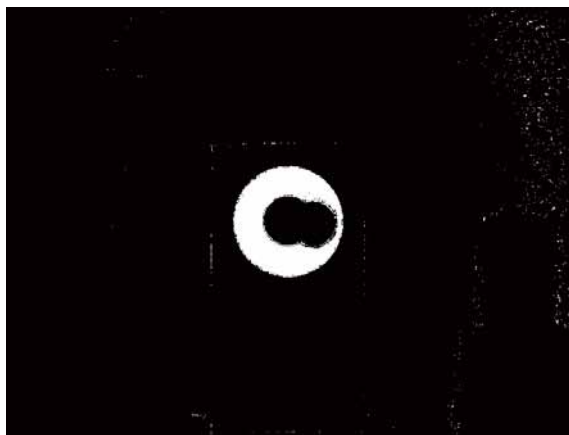


図 4.13 赤色円形マーク 2 値化処理

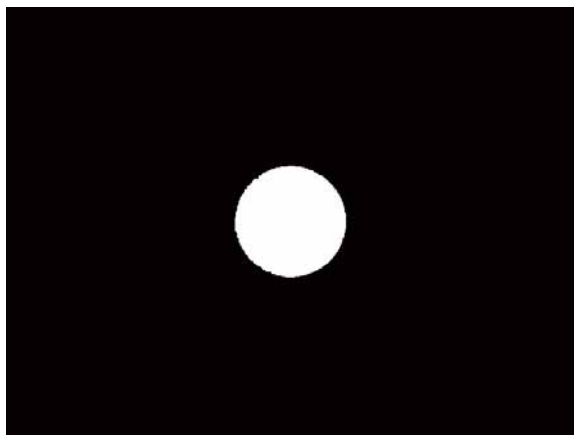


図 4.14 膨張・収縮処理後

## 5. 性能評価試験

### 5.1 目的

試作したカラーマーカ、CCD カメラ、自動ステージ、および LED 照明を用いて、実際に画像計測の性能を評価する目的で実験室において計測試験を実施した。

### 5.2 実験方法

試験では図 3.1 に示すカラーマーカを 3 軸回転ステージ上に搭載し、ロボットアーム手先カメラを模した CCD カメラを 3 軸直動ステージに取り付けた。マーカの搭載にあたってはベースプレートの中心を回転ステージの回転中心と一致させた。

使用した CCD カメラの画像センサーはダイナミックレンジが 12 ビット、画素数は 772(W)X580(H)、およびマイクロカラーフィルターは Bayer 配列である。これに後

述するマーカ計測評価試験では画角 14.6°(W)x11.0°(H)、位置決め実験では画角 22.6°(W)x17.0°(H)のレンズを装着し、焦点位置および絞り値を固定して使用した。

また、通常の CCD カメラではカラーフィルターの前にデモザイック処理で発生する偽色を抑える目的で光学ローパスフィルター兼赤外カットフィルターが設けられているのが普通であるが、本実験では光学ローパスフィルターの無い CCD カメラを用いた。ただし、CCD イメージセンサーが赤外域に高い感度を有していることを考慮して赤外カットフィルターについてはレンズ先端に熱吸収フィルターを用いることで代用した。

### 5.3 測定結果

マーカ画像計測により 3 軸回りの姿勢角度を測定した。ロボットアームの姿勢計測レンジに対する要求仕様は

±5°であるが、画像計測システムの性能を十分な余裕を持たせたレンジで試験をする目的から、±15°の範囲を測定レンジとして試験を実施した。

図 5.1、図 5.2、および図 5.3 はそれぞれ距離 300mm、400mm、および 500mm において取得した画像のカラーマーカの姿勢から測定された3軸まわりの測定誤差（設定角度と測定値の差）を示すものである。座標系はマーカの中心から支柱先端に向かう方向を-Z軸に、マーカのベースプレート中心で直交する軸をX軸およびY軸にとっている。

図からわかるように、いずれの距離においてもZ軸まわりの精度が最も良好であるが、これはカラーマーカがカメラに対して正対したままで回転するため常にマーカ全面が等しい焦点深度内にあるためであると推測される。また、前述したように、どのケースも焦点位置をカメラから400mmに固定して撮像しているが、デフォーカスによって生ずる画像のボケが測定精度に及ぼす影響は3つの図を比較してわかるとおり極めて小さく、フォーカス、デフォーカスを問わず設定角度に対する計測誤差は±0.7deg以内に収まっている。本試験で得られた測定値の中から、各距離における回転軸ごとの最大誤差の絶対値を表5.1に示す。

横ずれの測定精度はカラーマーカとカメラを位置決め操作の初期位置である600mm離し、かつ両者が正対する位置を中心として、水平方向(X軸方向)に-50mm～+50mmの範囲でカメラを移動させて測定した。その結果を図5.4に示す。図からわかるように、横ずれの最大値は2軸合成で約1.3mmとなっており、表2.1のロボットアームの要求精度である誤差5mm以内という仕様を充分満たす値であることが確かめられた。

表 5.1 3軸まわりの姿勢計測精度（単位：deg.）

距離 (mm)	X軸まわり	Y軸まわり	Z軸まわり	3軸合成	要求仕様(3軸合成)
300	0.48	0.54	0.10	1.12	3.0
400	0.40	0.51	0.00	0.91	3.0
500	0.40	0.24	0.10	0.74	3.0
600	0.68	0.59	0.10	1.37	3.0

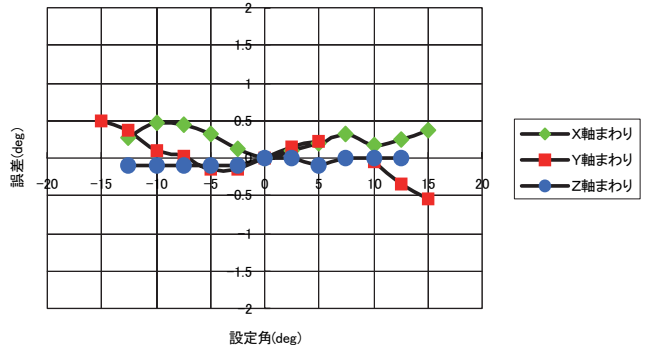


図 5.1 3軸まわりの姿勢測定誤差 (d=300mm)

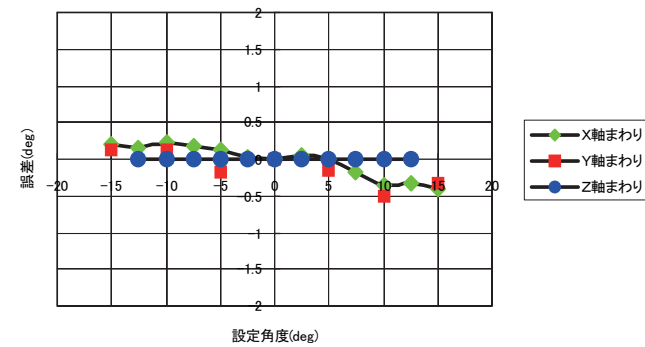


図 5.2 3軸回りの姿勢測定誤差 (d=400mm)

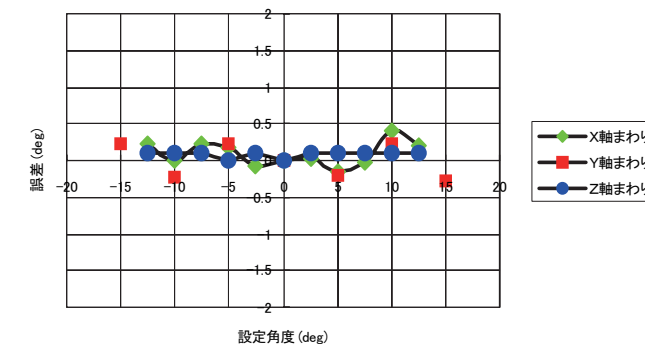


図 5.3 3軸まわりの姿勢測定誤差 (d=500 mm)

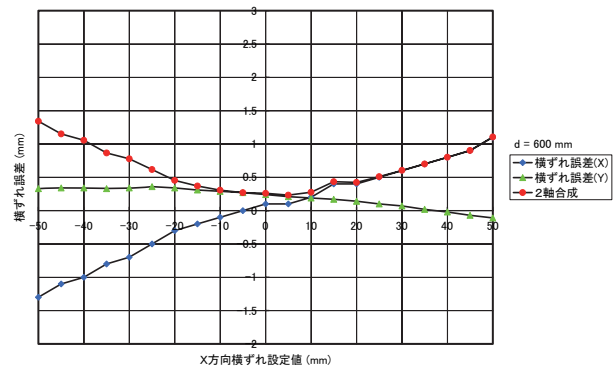


図 5.4 横ずれ誤差

## 5.4 位置決め実験

### 5.4.1 目的

静的な計測性能評価試験からマーカを用いた画像計測システムが高い計測精度を発揮することが検証されたが、実際の利用ではロボットアームの動きに沿って各点で計測システムが機能することが求められる。ロボットアームとともに手先カメラも移動するので、ロボットアームが動くとカラーマーカからの反射光が変化する。このような動的な光学条件のもとで画像計測システムが機能することを確認するのが本実験の目的である。

そのために、地上においてロボットアームの代わりに自動ステージを用い、画像取得から画像計測、および計測結果を基にしたロボットアームの駆動までを模擬する位置決め実験を実施した。

### 5.4.2 実験方法

本実験ではロボットアームの手先カメラを想定した CCD カメラを並進 3 自由度、回転 1 自由度を有する自動ステージ上に搭載し、画像計測の結果から得られた相対位置姿勢情報をもとにステージを駆動してマーカに対して位置決めを行った。マーカは画像計測の性能評価試験の際と同様に 3 軸回転ステージ上に搭載し、手動で姿勢角を設定した。実験に用いた装置の全体図を図 5.5 に装置の概念図を図 5.6 示す。

また、照明としてフラットな分光輝度特性をもつ人工太陽灯の他に LED を用いた。軌道上組立作業においては、カラーマーカは太陽からの直射光に曝されたり、一部または全体が陰に入ったりと変化するが、照明状態を予測することはできないので組立作業中は常時なんらかの人工照明が必要とされる。本実験ではそのような人工照明として LED を用いることを前提とした。人工太陽灯は図 5.6 に示すようにマーカとカメラを正対させたときのカメラの光軸に対して 13°の角度でマーカを照射した。

画像処理および自動ステージ駆動用として用いた PC(HP Vectra 800)の仕様は、OS が Windows 2000 SP4、CPU が Pentium 4、クロック周波数 2GHz、搭載メモリ 512MB である。

### 5.4.3 実験結果

実験はまず手動でカラーマーカの姿勢を設定し、カメラを初期位置に設定した後、位置決め用のプログラムを起動することで開始される。実験では照明として LED および人工太陽灯のそれぞれについて初期位置、姿勢に横ずれと回転ずれがある場合の実験を行った。実験では、回転方向のずれについては、カメラではなくマーカを回転させた。表 2.1 のマーカ計測の要求仕様に従い、初期位置(S)はマーカから 600mm 離れたところとし、合計 3

回の操作で最終的な位置決めを達成する。1 回目の位置決めではマーカから 400 mm 離れてマーカに正対する中継点(S1)を目標位置とし、前記の要求仕様を満たすために 2 回目および 3 回目はマーカから 300 mm 離れた地点を最終目標(P2)とする。

一例として、図 5.7 に LED 照明下でカメラの初期位置が中心から 100mm だけ横方向にずれている場合の位置決め経路を示す。図の凡例に第 1 回～第 4 回とあるのは、同一条件で 4 回の試行を行ったことを意味する。この図からわかるように、中継点 P1 に対するアクセスでは若干近めに寄る傾向が見られるものの 4 回の試行の再現性は高い。次の目標位置 P2 に対する位置決め精度は高く、最後の位置決め操作では極くわずかなズレを修正するだけとなっている。

前述したように位置決め実験は LED だけでなく人工太陽灯のもとでも行ったが、それらの実験に於ける位置決め操作完了時の目標位置に対する誤差の最大値を表 5.2 に示す。表からわかるとおり照明による位置決め精度に有意な差は認められない。これは、今回の実験で用いたカラーマーカを使った画像計測システムが照明およびカメラとマーカの相対位置に関係なくマーカの忠実な抽出を可能としていることを示すものである。

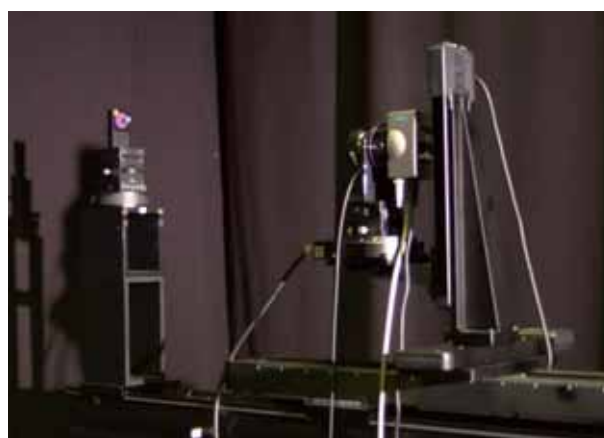


図 5.5 位置決め実験装置

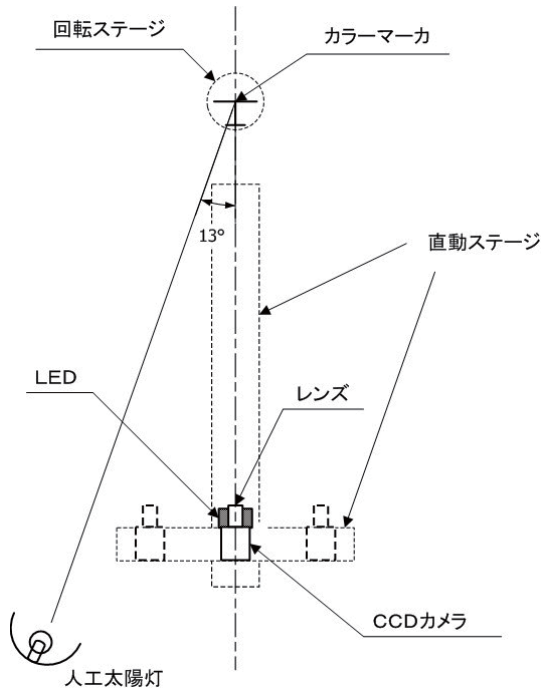


図 5.6 位置決め実験装置概念図

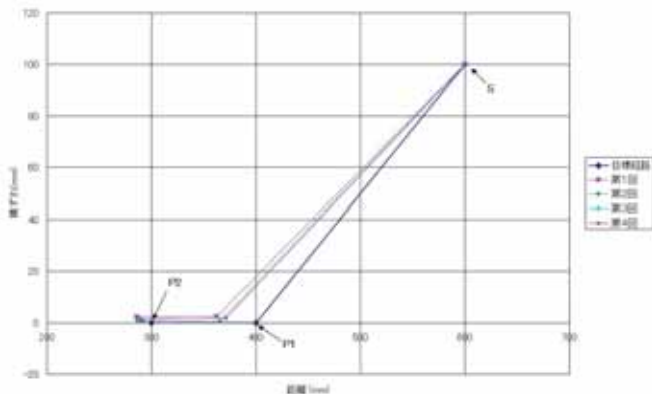


図 5.7 横ずれがある場合の位置決め経路(LED)

表 5.2 位置決め操作完了後の誤差

	LED	太陽灯
横ずれ (mm)	1.44	1.01
距離 (mm)	14.1	14.3
姿勢 (deg.)	0.09	0.34

## 6. おわりに

軌道上組立の位置決め用指標としてカラーマーカを試作するとともに、マーカの色部分を精度良く抽出するための画像処理手法を考案した。また、実験室においてカラーマーカ画像計測システムによる静的な計測評価試験を行い、ロボットアームの要求仕様を満たす精度を持つ

ことを確認するとともに、自動ステージにカメラを搭載して実際のロボットアームによる位置決め操作を模擬する実験を行い、位置決め操作の安定性と高い精度を確認した。

実際の軌道上組立作業では太陽と組立作業中の構造物の相対位置関係は刻々と変化するので、多様な照明環境に対応した画像計測技術が必要とされる。例えば、カラーマーカに当たっている太陽光がロボットアームまたは組立てセグメントに局部的に遮られて陰ができた場合には、カラーマーカに強い明暗差が生じる。最近、このような状況化においても機能するロバストな画像計測技術を開発したので、これについては別報にて報告する予定である。

## 7. 参考文献

- [1] B.E. Bayer, "Color imaging array," U.S. Patent No.3,971,065.
- [2] C. A. Laroche and M. A. Prescott, "Apparatus and method for adaptively interpolating a full color image utilizing chrominance gradients," U.S. Patent No. 5,373,322.
- [3] Ron Kimmel, "Demosaicing: Image Reconstruction from Color CCD Samples," IEEE Trans. Image Processing. vol. 9, pp.1221-1228.
- [4] Rajeev Ramanath, et al., "Demosaicing methods for Bayer color arrays," J. of Electronic Imaging 11(3) pp.306-315.
- [5] 日本色彩学会編「新編色彩科学ハンドブック第2版」、東京大学出版会
- [6] S.Nishida, M.Oda et.al: "Components and Control System of ETS-VII Robot Experiment Subsystem", ICAR99, Tokyo(1999)
- [7] H.Kamimura, S.Kawamoto, S.Nishida et.al: "Detection and Motion Estimation of Small Target Using Color Image Processing", ISTS2004, Miyazaki (2004)
- [8] Nishida, T. Yoshikawa: "Onboard Assembling of Large Space Structure by Torque Controlled Space Robot", SPIE-SS 2003, Sandiego (2003)
- [9] 西田、吉川: "Large Reflector Assembly in Orbit by a Mobile Space Robot", International Symposium on Robotics 2004 (2004)
- [10] 西田、吉川:「軌道上組立作業ロボット用エンドエフェクタの開発」、日本航空宇宙学会論文誌 Vol.53No.614pp.130-138(2005)
- [11] Kamimura, S. Nishida: "Three Dimensional Color Marker for On-orbit Assembling Using Space Robot", IAC2004, Vancouver (2004)
- [12] 上村、西田:「軌道上組立のためのカラーマーカ」、第48回宇宙科学技術連合講演会講演集
- [13] 上村、西田:「実用カラーマーカの製作と模擬軌道上環境での性能評価」、第49回宇宙科学技術連合講演会講演集
- [14] 上村、西田:「構造物組立用画像計測システム」第50回宇宙科学技術連合講演会講演集
- [15] H. Kamimura, S. Nishida: "Evaluation of Attitude Measurement Using a Color Marker", SPIE Smart Structures and Materials 2006, San Diego(2006)

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-06-047

---

発行 平成 19 年 3 月 30 日  
編集・発行 宇宙航空研究開発機構  
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1  
URL : <http://www.jaxa.jp/>  
印刷・製本 (有) ノースアイランド

---

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記をお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター  
〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1  
TEL : 029-868-2079 FAX : 029-868-2956

---

© 2007 宇宙航空研究開発機構

※ 本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。

