

# ステレオカメラによる色ターゲットの3次元位置計測

飯塚 健男† 中村 恭之† 和田 俊和†

†和歌山大学 システム工学部 情報通信システム学科

Vision & Robotics Laboratory

〒640-8510 和歌山市栄谷 930 番地

E-mail: iizuka@vrl.sys.wakayama-u.ac.jp

**あらまし** ステレオカメラを用いた3次元距離計測の研究では、主に計測対象の3次元表面形状を復元する問題が取り扱われてきた。しかし、剛体や多関節物体の運動や姿勢の解析・制御などを目的とした場合には、対象表面上の数点の3次元位置を計測できれば十分である。本報告では、複数の色ターゲットの3次元位置を実時間で計測できるステレオカメラシステムを提案する。提案したステレオカメラシステムの3次元位置計測性能を評価する実験により、その有効性を確認した。

## 3-D Position Estimation of Color Targets Using Stereo Camera

Takeo IIZUKA† Takayuki NAKAMURA† and Toshikazu WADA†

Faculty of Systems Engineering,

Wakayama University,

930 Sakaedani, Wakayama City, 640-8510, Japan

E-mail: iizuka@vrl.sys.wakayama-u.ac.jp

**Abstract:** In the foregoing research of 3-dimensional depth measurement using stereo cameras, dense reconstruction of the object surface is mainly investigated. However, for the motion analysis and control of solid and/or articulated objects, it is sufficient to measure the 3-dimensional positions of several points on the object surfaces. In this paper, we propose a stereo camera system that estimates 3-dimensional position of multiple color targets in real time. We confirm the effectiveness of our system through the experiments that evaluate the performance of 3-dimensional position estimation.

### 1 はじめに

カメラを用いた物体の運動計測技術は、ゲーム、CG からロボット制御の分野まで多岐に渡っている。これらの分野をさらに広げ、より有益なアプリケーションを開発するには、簡便、かつ、高精度な3次元運動計測技術が必要不可欠である。このような目的のため、本研究では、簡便で高速な3次元運動計測が可能なステレオビジョンシステムの構築を行う。

画像を用いて3次元位置計測を行う場合、ステレオカメラを用いるのが一般的である。ステレオカメラを用いた研究の多くは、計測物体の表面形状を復元することを目的とし、視野全体に渡って面的に距離計測をするものである。しかし、剛体や多関節物体の運動解析や制御を目的とした場合、

1. 対象の面的な距離計測は計算コストが高い、

2. 運動解析のために、面的な3次元距離データに対するモデルフィッティングを行うなどの別の処理が必要になる、

などの理由から面的な距離計測法はなじまない。

剛体の3次元運動を解析する場合、剛体上の3点以上の運動軌跡が求められれば、3次元空間内での位置・姿勢が計算できる。従って、ステレオカメラにより3次元空間内の複数の点の位置が計測できれば、運動解析やロボットの制御に使用できる計測システムが構築できる。ステレオカメラによって点の3次元位置を推定する場合、ステレオ画像対内部での対応点探索が問題となり、これまでも対応点を安定に求める様々な手法が研究されてきた(例えば,[1,2]など)。

本研究では、この問題を簡単化するために計測対象

に色の付いたターゲットを複数取り付け、最近傍識別器による色ターゲット検出法[4]を用いて2枚の画像内から対応領域をロバストに求めて、複数のターゲットの3次元位置を推定するシステムを構築する。以下、第2節で、ステレオカメラを用いたターゲットの3次元位置計測の原理について述べ、第3節で提案するシステムについて述べ、第4節で、提案するシステムの性能を評価するために行った実験結果について述べる。

## 2 ステレオカメラによる3次元位置計測

図1に、ステレオカメラを構成する2台のカメラの一般的なカメラ配置を示す。計測点を $\mathbf{M}$ 、カメラA,Bの画像平面上対応点をそれぞれ $\mathbf{m}$ と $\mathbf{m}'$ とする。このとき、対応点 $\mathbf{m}$ と $\mathbf{m}'$ に対して次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{m}} &= \mathbf{P}\tilde{\mathbf{M}} \\ \tilde{\mathbf{m}}' &= \mathbf{P}'\tilde{\mathbf{M}} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで

$\tilde{\mathbf{m}} = [u, v, 1]^T$ ,  $\tilde{\mathbf{m}}' = [u', v', 1]^T$ ,  
 $\tilde{\mathbf{M}} = [X, Y, Z, 1]^T$ である。また、 $\mathbf{P}$ と $\mathbf{P}'$ は、カメラA,Bの内部変数と外部変数を含む射影行列で、これらはカメラキャリブレーション(例えば、Tsaiの方法[1])により求めることができる。

式(1)を整理してまとめると

$$\mathbf{B}\mathbf{M} = \mathbf{b} \quad (2)$$

が導かれる。ここで

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} up_{31} - p_{11} & up_{32} - p_{12} & up_{33} - p_{13} \\ up_{31} - p_{21} & up_{32} - p_{22} & up_{33} - p_{23} \\ u'p'_{31} - p'_{11} & u'p'_{32} - p'_{12} & u'p'_{33} - p'_{13} \\ u'p'_{31} - p'_{21} & u'p'_{32} - p'_{22} & u'p'_{33} - p'_{23} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b} = [p_{14} - up_{34} \quad p_{24} - up_{34} \quad p'_{14} - u'p'_{34} \quad p'_{24} - u'p'_{34}]$$

$p_{ij}, p'_{ij}$ はそれぞれ $\mathbf{P}, \mathbf{P}'$ の*i*行列の要素である。従って、3次元位置 $\mathbf{M}$ は、射影行列と各画像平面上に投影される対応点座標を基に式(2)を変形して、

$$\mathbf{M} = \mathbf{B}^+\mathbf{b}$$

として求めることができる。 $\mathbf{B}^+$ は $\mathbf{B}$ の擬似逆行列のことで $\mathbf{B}^+ = (\mathbf{B}^T\mathbf{B})^{-1}\mathbf{B}^T$ である。

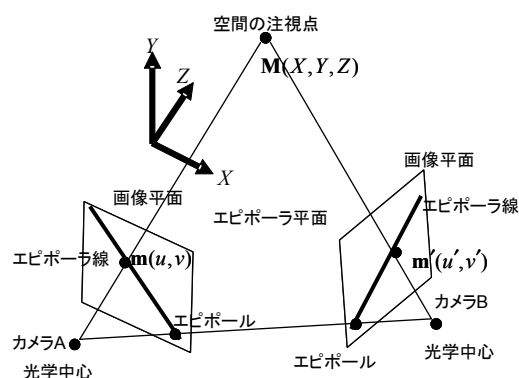


図1 一般的なカメラ配置

## 3 提案システム

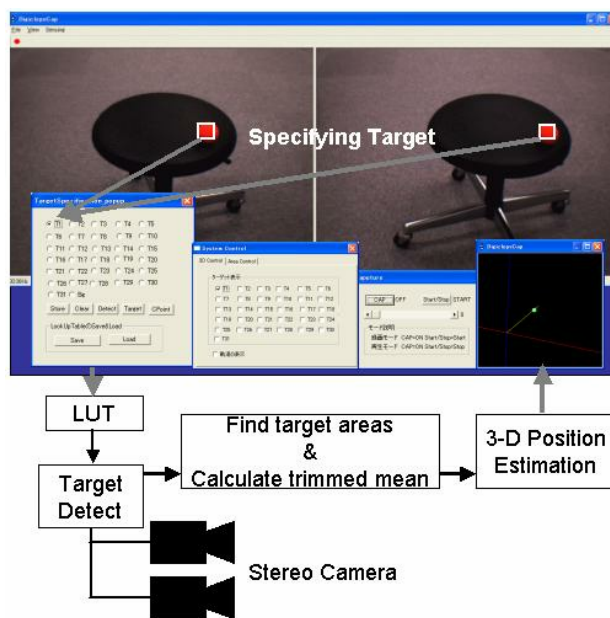


図2 システム概観

本研究では、PCベースのlow-costなステレオカメラを用いた3次元位置計測システムを構築する。

提案するシステムでは、計測対象に色の付いたターゲットを複数取り付け、それらをステレオカメラによって撮影し、ステレオ画像からターゲット領域を抽出することにより複数のターゲットの3次元位置を推定し、計測対象の運動を計測する。

このシステムは、以下に示す機能をもっている。

- ターゲット色の教示が瞬時に行え、未検出・誤検出部分を再教示できる
- 2枚のVGAサイズの画像に対してターゲット領

域の検出，重心計算をビデオレートで行う

- ターゲット色は31種類指定できる

### 3.1 インタラクティブな対応点決定

ステレオ画像内の対応点は，左右の画像上のターゲット領域の色情報を教示することで決定する．

教示された色情報に基づき画像内からターゲットの領域を検出する．この検出処理に最近傍識別器を用いた色ターゲット検出法[4]を用いている．この手法では，入力される全ての色を最近傍識別器で識別した結果を記録したLook Up Table (LUT)を学習時に生成し，このLUTを参照して識別を行うためきわめて高速なターゲット検出が行える．また，LUTの更新は，LUTの各要素に保存されている教示データからの距離(distance)と色の種類を表すラベル(tag)を修正することでなされる．このようなデータ構造により，色の追加や削除などを行う場合には，distanceの値を基に書き込み許可・禁止の判断を下し，書き込みが許可された場合にはtagの書き換えが局所的に実行できる．提案システムでは，この手法を利用することで，実環境中でロバストかつ高速(30fps)にターゲット検出・対応点の決定が行える．

### 3.2 Trimmed平均を用いた対応点座標値計算の安定化と3次元位置計算の高精度化

色ターゲット検出法で求められた左右画像内のターゲット領域の重心位置を対応点座標として用いて，ターゲットの3次元位置を推定する．このとき，映像信号のノイズや，照明条件の変化などの影響によりターゲット領域の検出が不安定になり，求められる対応点座標の値も不安定になる．そこで，本研究では，ターゲット領域の重心位置を求める際に，Trimmed平均[5]を計算することにより対応点座標の算出の安定化を図った．Trimmed平均の計算法では，観測値の極端に大きな，あるいは小さな値を破棄し，残りの観測値を用いて平均を計算する．図2に，Trimmed平均に基づくターゲット領域の重心位置の計算法を示す．

画像内のターゲット領域は，この領域を構成する画素  $\{p_i = (x_i, y_i) | i = 1 \dots N\}$  の集合として定義できる．このとき，ターゲット領域を構成する座標値の集合  $\{x_i | i = 1 \dots N\}$ ， $\{y_i | i = 1 \dots N\}$  の中の要素を小さい順に並べ替えた集合を，それぞれ

$\{x_{(i)} | i = 1 \dots N\}$ ， $\{y_{(i)} | i = 1 \dots N\}$  と表すとき，Trimmed 平均を用いてターゲット領域の重心位置  $\mathbf{m} = (u, v)$  は，

$$u = \frac{1}{N - 2\alpha} \sum_{i=\alpha+1}^{N-\alpha} x_{(i)} \quad , \quad v = \frac{1}{N - 2\alpha} \sum_{i=\alpha+1}^{N-\alpha} y_{(i)}$$

として求める．このような平均値の計算法を  $\frac{\alpha}{N} \times 100\%$  Trimmed 平均という．

このように，Trimmed 平均を用いることでノイズ部分が削られ，残りの領域の値を用いて重心を求めるので安定した座標値が算出できる．

また，このような重心位置計算により，サブピクセルの精度で対応点座標値を計算していることになる．その結果，ターゲットの3次元位置をサブピクセルの精度で推定できる．

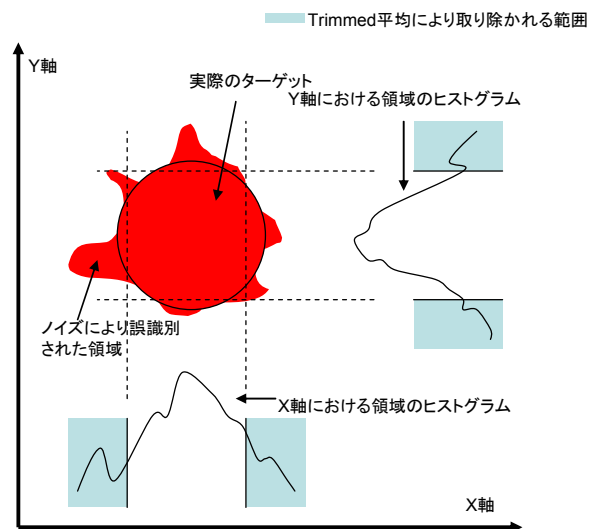


図2 Trimmed 平均に基づく座標値の計算

### 3.3 複数ターゲット検出のためのLUT作成

従来色ターゲット検出法[4]では，色空間を量子化したLUTを作成することにより背景色を含めて4種類の色ターゲットしか検出することができなかった．そこで，より多くの色ターゲットを検出できるように，その手法に改良を加えた．

色の識別は，LUTを参照し，各色に対応するLUT要素のタグbitを参照して行うことができる．そこで，色識別を行うために作成されているLUTの各要素の構造を修正した．図3に示すように，LUTの各要素は16-bit

で表し、上位10-bitを色のクラスを表すタグとして使い、下位6-bitをトレーニングパターンからの距離として使う。また、LUTのサイズも修正した。高速な検出を行うためにLUTがCPUのキャッシュメモリに収まるようにする必要があるため、64×64×64のサイズ(524K-byte)に量子化したLUTを作成した。

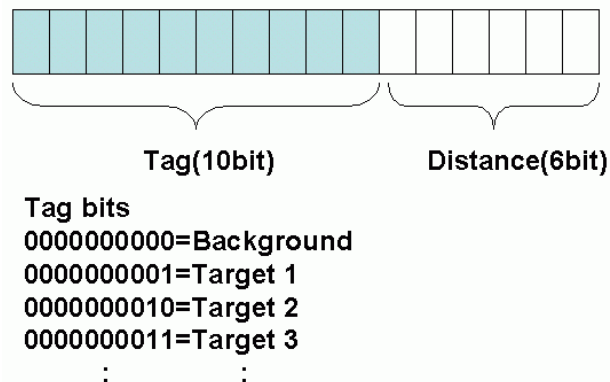


図3 LUT要素のデータ型

## 4 性能評価実験

### 4.1 システム構成

提案システムのステレオカメラとして、Point Gray Research社のBumblebeeを用いた。このカメラは、2眼式平行ステレオカメラで、カメラキャリブレーションは出荷時に行われており、IEEE1394インターフェースの搭載されているPCに接続するだけで、簡単に、しかも、高速(30fps)に、ステレオ視により3次元位置情報を得ることが可能である。左右のカメラからの入力画像のサイズは640×480である。実験で使用したPCは、以下のような仕様のものである。

|         |                     |
|---------|---------------------|
| CPU     | Pentium(R)4 3.00GHz |
| メモリ     | 1.00GB              |
| OS      | Windows XP          |
| プログラム言語 | Visual C++ 6.0      |

### 4.2 実測値と計測値の比較

色ターゲットをステレオカメラから0.1m~4.0mまで0.1m間隔で提示して、そのときのターゲットまでの距離を提案システムにより計測した。計測値はターゲットを100フレーム間計測しその平均値とした。また、そのときの標準偏差を計測値のばらつきとして求めた。このような計測を大きさの異なる

種類(直径33mm,57mm,190mm)の色ターゲットについて行った。図4,5に、実測値と推定値の比較結果、計測値のばらつきの結果を示す。図4内の折れ線に対して直線を最小2乗法により当てはめた結果は、

$$33mm \cdots y = 1.009x - 0.004$$

$$57mm \cdots y = 1.020x - 0.027$$

$$190mm \cdots y = 0.992x - 0.015$$

である。これから分かるように、提案システムは実測値に対して精度良く距離計測が行えていることがわかる。図5では計測値の標準偏差のデータを累乗の曲線で近似した結果も示した。この図から、画像内のターゲット領域の面積が大きいほど計測値のばらつきの大きさが小さいことがわかる。図6には、0%Trimmed平均と25%Trimmed平均を用いて重心位置を計算した場合の計測誤差の標準偏差の比較結果を示す。この図でも、標準偏差のデータに対して累乗の曲線で近似した結果も同時に示している。この図から、25%Trimmed平均を用いて重心位置を計算した方が計測値のばらつきが小さいことが分かる。このように、提案システムでは、Trimmed平均を用いて重心位置を計算することで、ノイズの影響を抑え、サブピクセルの精度で対応点の決定ができるため、3次元位置を正確に求めることができる。

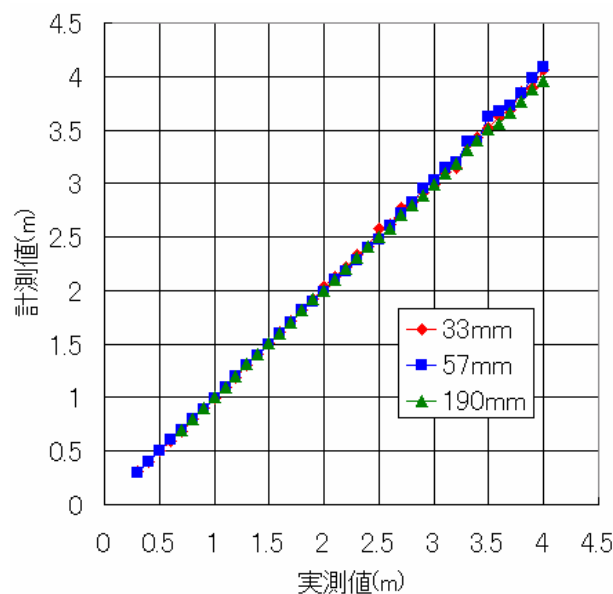


図4 実測値と計測値

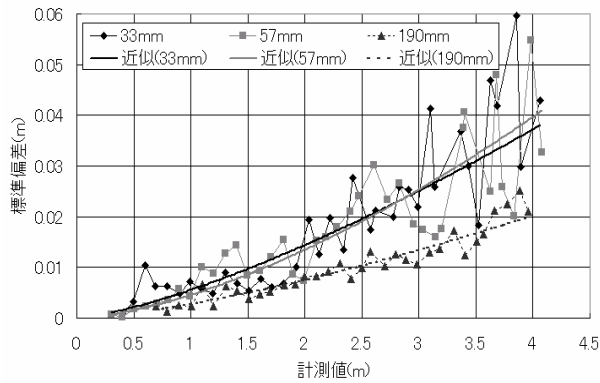


図5 計測値のばらつき

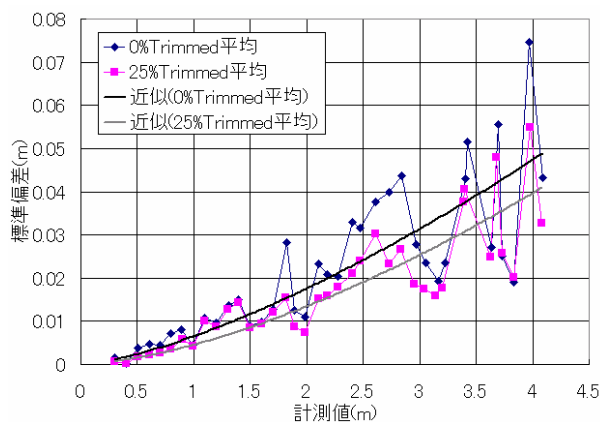


図6 Trimmed 平均計算の効果

#### 4.3 運動軌跡の計測

まず、直径 57mm の色ターゲットを半径が既知の円軌道上で動かし、その運動の様子を計測する実験を行った。図 7(a)~(d)に、この実験の結果を示す。図 7(a)に示すように、この実験では、色ターゲットを椅子の座面に固定し、椅子を回転させることで、色ターゲットを円軌道上で動かした。図 7(b)に、ターゲットの 3 次元位置の推定結果を示す。提案システムでは、同一平面上に乗る 3 点のターゲットの 3 次元位置を復元して、それを基に世界座標系を設定できる機能を持つ。この図では、椅子の座面上に 3 点ターゲットを設定し、これを世界座標系としたときの、この世界座標系における 3 次元位置を推定した結果を示している。図 7(c)(d)に、図 7(b)の 3 次元位置推定結果を、世界座標系の XY 平面上へ投影した結果、XZ 平面へ投影した結果を示す。図 7(c)より、ターゲットが円運動している様子が、図 7(d)より、ターゲットがある平面上を運動している様子が分か

る。

このように提案システムにより、ターゲットの運動の様子が正確に推定できることが確認できた。

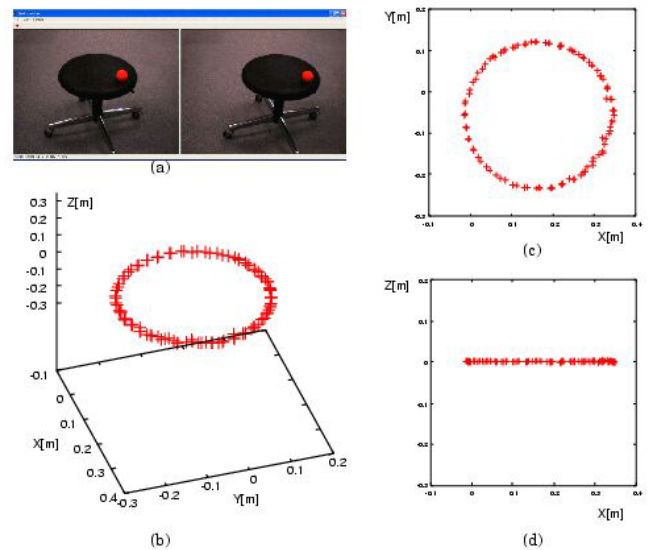


図7 円運動の計測結果

次に、飛行体（キーエンス社製、エンゲイジャー GSIII）が運動する時の様子を計測する実験を行った。飛行体の前後左右に 4 つの色ターゲット(直径 57mm)を取り付け、人間が飛行体を遠隔操作した。図 8(a)~(j)は、飛行体の運動の様子を示している。図 8(k)は、飛行体に取り付けられた 4 つの色ターゲットの 3 次元位置の推定結果の変化の様子を示している。図 8(l)は、4 つのターゲットの位置から計算されるこの飛行体の姿勢の変化の様子を示している。図中で黒丸の方向が飛行体の正面方向を表している。これらの図から、飛行中も複数の色ターゲットが安定して追跡されており、3 次元位置の推定も正しく行われていることがわかる。

#### 5 まとめ

本稿では、PCベースのlow-costなステレオカメラを用いた3次元位置計測システムを提案した。

このシステムでは、計測対象の運動を計測するために、対象に色の付いたターゲットを複数取り付け、それらをステレオカメラによって撮影し、ステレオ画像からターゲット領域を抽出することにより複数のターゲットの3次元位置を推定する。

実験より、計測対象に取り付けられた複数の色ターゲットをロボットの追跡でき、それらの3次元位置が推定できることが確認できた。さらに、色ターゲット領域の重心位置を計算する際に、Trimmed平均を計算することで、推定された3次元位置の誤差を軽減できることも明らかにした。

一台のステレオカメラで計測できる範囲は限られているため、計測範囲を広げるためには、ステレオカメラを複数台使用することが必要になる。その場合には以下のような問題を解決しなければならない。

- ステレオカメラ間の相対的配置の推定
- データ取得の同期

これらの問題を解決する手法については、別の機会に報告する。

### 謝辞

本研究で用いた Bumblebee をご提供頂いた株式会社ビュープラス桑島茂純氏に感謝いたします。

### 参考文献

- [1] D.Brockelbank and Y.Yang, "An Experimental investigation in the use of color in computational stereopsis," IEEE Trans. On SMC, Vol.9, No.6, pp.1365-1383, 1989.
- [2] A.Koschan, V.Rodehorst, and K.Spiller, "Color Stereo Vision Using Hierarchical Block Matching and Active Color Illumination," in Proc. of ICPR'96, pp.835-839, 1996.
- [3] R.Y.Tsai, "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses", J-RA, Vol.1.3 pp.323-344, 1987.
- [4] 和田俊和：最近傍識別器を用いた色ターゲット検出、情報処理学会トランザクション「コンピュータビジョンとイメージメディア」Vol.44, No.SIG17-014, 2002.
- [5] Rand R, Wilcox, "Introduction to Robust Estimation and Hypothesis Testing", Academic Press, 1997.

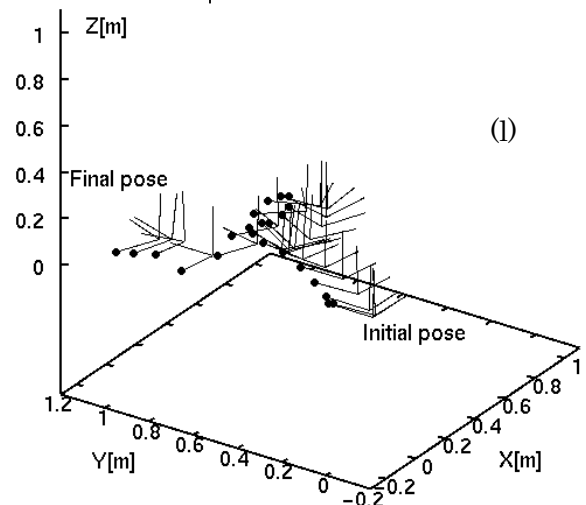
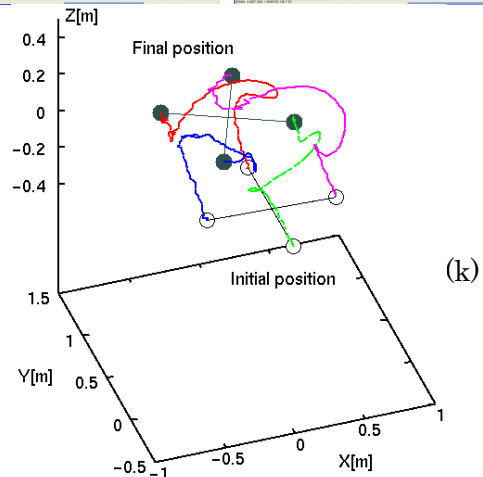
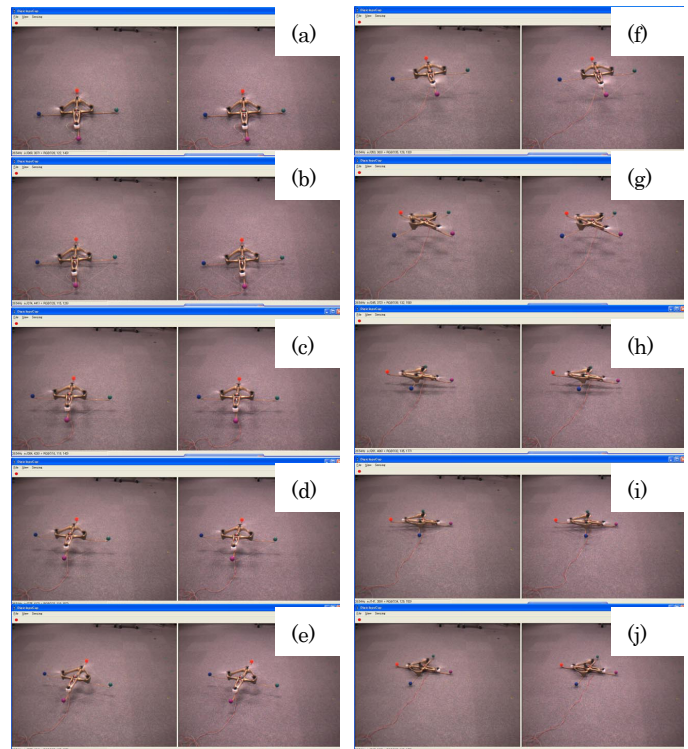


図8 飛行体の運動計測結果