

# 1 第9回:三次元映像解析

## 1.1 概要

今回は、映像解析から一步進んで、三次元映像解析について学ぶ。その前提知識として二次元映像解析についての復習と要点を押さえておく。

- 二次元映像解析
- 三次元映像解析
- DLT 法 (Direct Linear Transformation Method)

## 1.2 目的

今回の授業では、三次元映像解析の基本的な理論をその実際を学ぶ。三次元映像解析は二次元映像解析の応用であるが、撮影段階から気をつけなければならない点もあり、やや注意が必要である。

# 2 計測の手順

## 2.1 映像撮影

### 2.1.1 準備するもの

三次元映像解析法では、昨今ではビデオカメラや高速度カメラを用いることが多い。しかしながら実質は、複数のカメラのそれぞれについて一コマ一コマに写し込まれた被写体の位置を自動もしくは手でデジタイズ (digitize) する、作業を行ううえでは、カメラの種類は本質的ではない。すなわち、ビデオカメラである必要もないわけである。時間的に同期されたカメラ映像が複数必要であることが条件である。

今回は簡単なデジタイズ作業を行うことを想定して、デジタルビデオカメラを中心としたシステムで映像撮影を行うものとする。映像撮影に必要なハードウェアは以下のとおり。

1. デジタルビデオカメラ (今回の場合、NTSC 信号を出力すればよい)
2. タイムシンクロナイゼーション装置
3. 同期用発光装置
4. 録画用ビデオデッキ

## 2.2 撮影手順

ここで用いる三次元映像解析法は、Abdel-Aziz. と Karara[2] によって発表された写真測量方法の一手法である。2 台以上のカメラを用いることで簡便に三次元座標を復元できる。デジタルビデオカメラや高速度カメラを設置することがまず手始めとなる。

ここで、注意すべきは2台のカメラの光軸が向かい合うようにカメラを設置してはいけないということであろう。1台のカメラでは奥行き方向が感知できないが、別のカメラでこれを知ることから3次元の空間座標が復元できるため、カメラそれぞれの光軸を向いあわせにしては、奥行きを知ることが出来ない。

1. 2 台以上のカメラを被写体を同時に撮影できるように配置する．このとき光軸が平行にならないように注意する．
2. カメラの画角や露出を決定する．このとき複数台のカメラの露出のうち，出来るだけシャッタースピードは同じにしておく．フレームレートも勿論同じ速さにしておく．
3. 複数カメラが PC に接続されて，同時に撮影できるような場合を除けば，複数台のカメラの映像を時間的同期を行うために，同期装置を準備し，映像にタイムコードを上書きする．<sup>a</sup>
4. 記録開始時刻をいつにすればよいのか？を考える．これをトリガと呼ぶ．スタートトリガ，エンドトリガー，センタートリガーの 3 つが通常一般的である．
5. 直方体や立方体<sup>b</sup>を複数台のカメラで同時に撮影する．この格子状のキャリブレーションマーカーの絶対座標系における座標を計測あるいは決めておく．
6. 試技を撮影する．時間的に同期しておかないといけない場合には，カメラの画角内にストロボの光を映しこんだりしておく．
7. 被験者の身体にはあらかじめマーカーやテープを貼っておく．このマーキングに関する注意事項はモーションキャプチャの際と同じ．

<sup>a</sup>この役目は時間同期装置が行ってくれるが，四分割機などを用いて画面合成を行ったうえで記録をする．

<sup>b</sup>原理的には格子になっていなくてもよい

## 2.3 キャリブレーションフレームの撮影と座標確認

図 1, 図 2 は 2 台のカメラで撮影したキャリブレーション用の直方体である．この直方体の各点の絶対座標系における位置座標は次のとおりである．

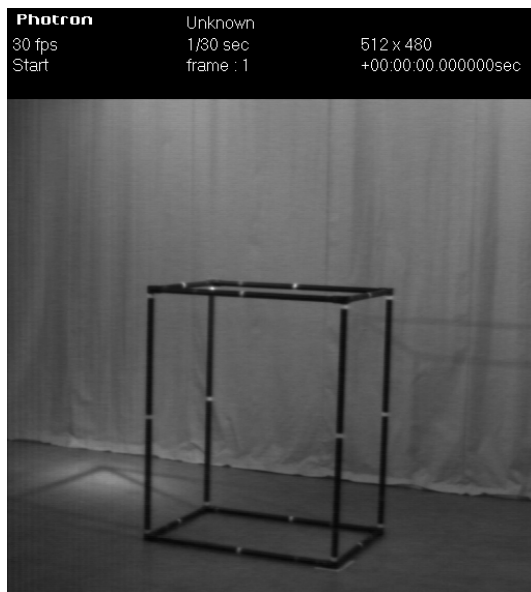


図 1: カメラ 1 のキャリブレーション映像

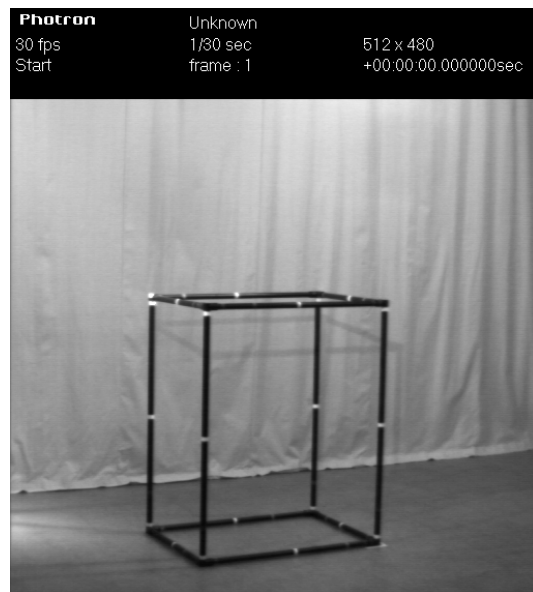


図 2: カメラ 2 のキャリブレーション映像

表 1: キャリブレーションフレームの三次元座標

| 単位 (m) | x     | y     | z     |
|--------|-------|-------|-------|
| O      | 0     | 0     | 0     |
| A      | 0     | 0     | 0.594 |
| B      | 0     | 0     | 1.208 |
| C      | 0.976 | 0     | 0     |
| D      | 0.974 | 0     | 0.588 |
| E      | 0.974 | 0     | 1.209 |
| F      | 0     | 0.675 | 0     |
| G      | 0     | 0.675 | 0.589 |
| H      | 0     | 0.676 | 1.208 |
| I      | 0.976 | 0.675 | 0     |
| J      | 0.976 | 0.675 | 0.589 |
| K      | 0.975 | 0.678 | 1.209 |
| L      | 0     | 0.319 | 1.208 |
| M      | 0.486 | 0.676 | 1.208 |
| N      | 0.974 | 0.337 | 1.209 |
| P      | 0.488 | 0     | 1.208 |

このキャリブレーションフレームの模式図は次のようにあらわされ、それぞれのキャリブレーション点の座標を確認してみたい。後の作業のため、表 1 の 1 行目と 1 列目の数字以外が入っている行列を削除し、タブ区切りテキストファイルを作成しておく。

## 2.4 試技の撮影

キャリブレーションフレームの撮影が終わったら、キャリブレーションフレームを置いた場所とほぼ同じ場所で試技を行い、これを撮影する。

## 2.5 デジタイジング

### 2.5.1 準備するもの

1. 撮影後の映像データファイル (AVI や MPEG などのムービーファイル)
2. デジタイズ用ソフトウェアのいずれか
  - (a) Frame Dias(DKH 社製：有料 180 万円程度, 仰木研究室にもあり)
  - (b) PS-デジタイザ (Physicalsoft 社製, フリーウェア, 申し込みが必要)
  - (c) MovieDigitizer(2006 年度政策・メディア研究科修了赤池輝幸作, フリーウェア)<sup>1</sup>
  - (d) DgeeMe(<http://www.geeware.com/>, フリーウェア)

<sup>1</sup><http://www.sfc.keio.ac.jp/~ohgi/Research/2007HMA/DirectX 9.0 以降および, Microsoft .NET のランタイムが必要>

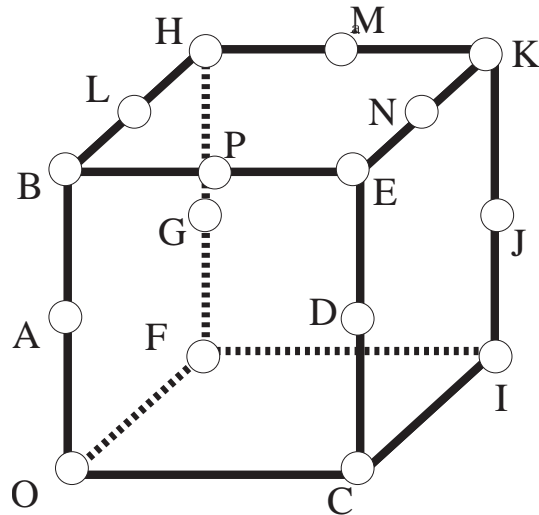


図 3: キャリブレーションフレームの模式図

—— 画像解析フリーウェア ——

(有) フィジカルソフトでは、いくつかのフリーウェアを出している。これらは以下の URL からダウンロードが可能である。

<http://www.vector.co.jp/vpack/browse/person/an038059.html>

フィジカルソフト - PS モーションキャプチャ DV カメラのキャプチャと 4 画面同時再生で動作改善

フィジカルソフト - モーションビューワ (フリー版) スポーツ動作を左右画面に表示し同時再生しながら比較検討する

## 2.6 キャリブレーション映像のデジタイズ

どのようなデジタイズソフトウェアを用いてもよいので、まずはキャリブレーション映像のデジタイズを行う。あらかじめ決めた順番どおりにデジタイズを行う。今回の実習では、政策・メディア研究科修士の赤池輝幸氏が開発した、MovieDigitizer を用いてデジタイズを行ってみることにする。

カメラ 1, カメラ 2 のそれぞれについて、キャリブレーションフレームのマーカーを全てデジタイズする。このファイルはテキストファイルとなって作成されるので、出来上がった後で  $u, v$  のように座標データだけからなるタブ区切りテキストとしてファイル (例えば, Cam1Cal.txt, Cam2Cal.txt といった名前) に保存しておく。

## 2.7 試技映像のデジタイズ

同様の作業によって試技ファイルを 2 台のカメラ分デジタイズを行う。DLT 法ではある瞬間に撮影された 2 つのカメラの映像に必ず同じマーカーが映りこんでなければそのマーカーの三次元座標を復元できない。そのため、腕の振りで腰のマーカーが見えない、といった場合にはそのフレームの腰関節座標は求められないこととなる。

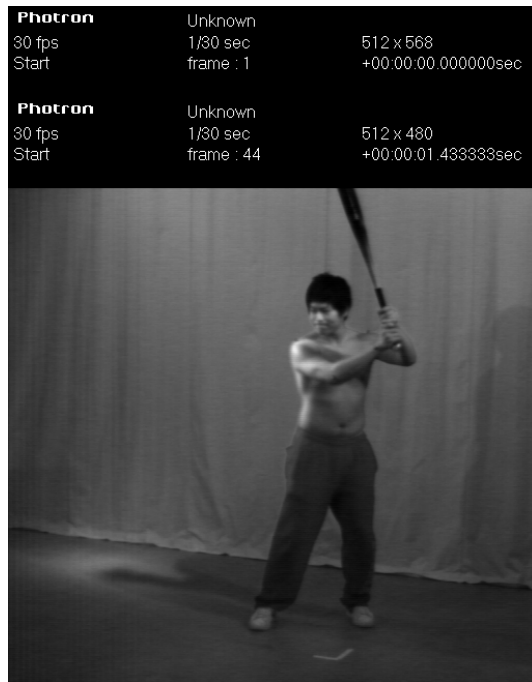


図 4: カメラ 1 の試技映像

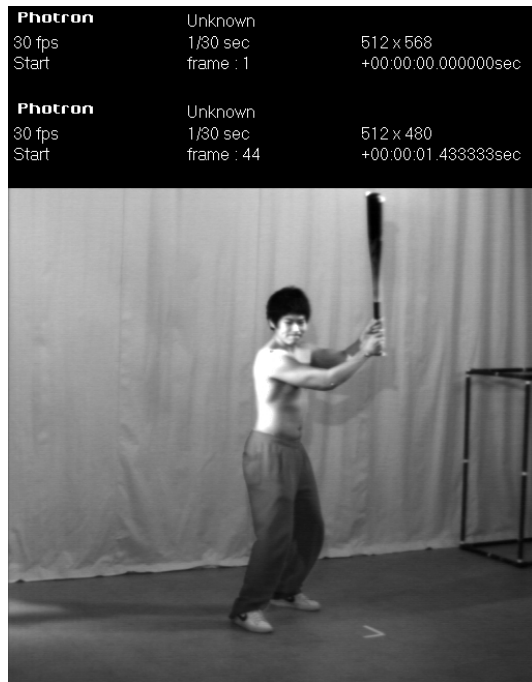


図 5: カメラ 2 の試技映像

このようなことは実はよく起こり，実際の研究現場ではどのようにしているのか？といえば，とりあえず目視（これを神の眼，などと呼んだりするが...）でデジタイズをして，三次元映像が復元できたときに，ばらつきを確認した後にフィルタリングなどの手法で整形する．さらにより多項式近似法などの高度な方法もある．

1つの試技について，2台分のデジタイズが終わったらそれらを，同じように保存し，タブ区切りテキストファイルとして保存しておく．例えば，Cam1Trial1.txt, Cam2Trial2.txt などの名前で保存しておく．

### 3 DLT の計算

#### 3.1 準備するもの

前節までの作業が終了すれば以下の5つのファイルが出来ているはずである．確認してみよう．

1. キャリブレーションフレームのマーカの三次元位置座標ファイル
2. カメラ 1 によるキャリブレーションフレームのデジタイズファイル (二次元)
3. カメラ 2 によるキャリブレーションフレームのデジタイズファイル (二次元)
4. カメラ 1 による試技のデジタイズファイル (二次元)
5. カメラ 2 による試技のデジタイズファイル (二次元)

カメラ 1 とカメラ 2 のキャリブレーションフレームマーカのデジタイズファイルと，キャリブレーションマーカの三次元位置座標ファイルから，それぞれのカメラのカメラパラメータが求められる．このカメラパラメータは，絶対座標系とカメラ座標系の座標変換に必要な情報だと思ってもらえばよい．

## 4 webMathematica による DLT

DLT 法を計算してくれるソフトウェアは、フリーウェアでは見当たらないようである。そこで、Web 上でこの計算を行うページを webMathematica<sup>2</sup>を用いて作成した。以下のページにアクセスし、前節で確認した5つのファイルを指定して実行ボタンを押してもらいたい。試技において求めたかった関節位置座標が三次元空間の座標、すなわち絶対座標系における座標として返されることがわかるだろう。

DLT 法を実行する Web サイト

<http://mathematica.sfc.keio.ac.jp/~ohgi/webMathematica/DLT.msp>

簡単ではあるが、求めた軌道を三次元の図としても表示できるようになっている。求められた三次元座標はブラウザ上に表示されるのでこれをコピーしてエクセルやテキストエディタに持ち込むことで操作が可能となる。

## 5 三次元映像解析法の理論

### 5.1 DLT 法

DLT 法 (Direct Linear Transformation method) は、複数のカメラを用いて3次元位置座標を推定する計測方法である [5]。カメラから得られる情報は2次元情報であり、1台のカメラから直接3次元座標を推定できないので、一般には複数のカメラが必要となる<sup>3</sup>。

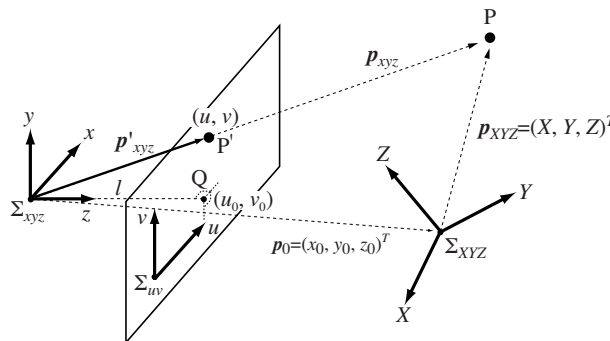


図 6: DLT 法における各座標系

まずはじめに基本原理を述べる。図??に示すように、実空間座標系  $\Sigma_{XYZ}$  と、カメラのレンズ中心に原点を持つカメラ座標系  $\Sigma_{xyz}$  がある。またフィルム面に固定された座標系  $\Sigma_{uv}$  はカメラ座標系  $\Sigma_{xyz}$  を平行移動した座標系で、 $xy$  座標軸と  $uv$  座標軸は平行である。計測点の座標はこの実空間座標系  $\Sigma_{XYZ}$  で表される。また点  $P$  がカメラのフィルム面の点  $P'$  に投影されている。

ここで、カメラ座標系  $\Sigma_{xyz}$  からみた実空間座標系  $\Sigma_{XYZ}$  の原点の位置ベクトルを  $p_0 = [x_0, y_0, z_0]^T$ 、同じく  $\Sigma_{xyz}$  からみた点  $P$  の位置ベクトルを  $p_{xyz}$ 、実空間座標系  $\Sigma_{XYZ}$  からみた点  $P$  の位置ベクトルを  $p_{XYZ} = [X, Y, Z]^T$  とする。また  $z$  軸上の直線がフィルム面を貫く点  $Q$  の  $\Sigma_{uv}$  から見た座標を  $(u_0, v_0)$  とし、同じく点  $P'$  の座標を  $(u, v)$  とし、 $\Sigma_{xyz}$  の原点から点  $Q$  までの距離を  $l$  とすると、 $\Sigma_{xyz}$  からみた点  $P'$  の位置ベクトル  $p'_{xyz}$  は、

$$p'_{xyz} = [u - u_0, v - v_0, l]^T \quad (1)$$

<sup>2</sup>webMathematica とは数式処理ソフトウェア、Mathematica を Web サーバー上で実行できるようにしたものである

<sup>3</sup>単眼視による計測方法もある。様々な方法があるが、計測対象の構造などの情報を利用することによって単眼視が可能となる。しかし奥行き方向の計測精度は低い

ので,

$$\begin{aligned} k\mathbf{p}'_{xyz} &= \mathbf{p}_{xyz} \\ &= \mathbf{R} \mathbf{p}_{XYZ} + \mathbf{p}_0 \end{aligned} \quad (2)$$

が成り立ち,これを成分表示し,

$$k \begin{bmatrix} u - u_0 \\ v - v_0 \\ l \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

を得る.ここで, $k$ は比例定数であり,座標変換行列 $\mathbf{R}$ を

$$\mathbf{R} \equiv \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}$$

とすると,式(3)の各成分は,

$$k(u - u_0) = R_{11}X + R_{12}Y + R_{13}Z + x_0 \quad (4)$$

$$k(v - v_0) = R_{21}X + R_{22}Y + R_{23}Z + y_0 \quad (5)$$

$$kl = R_{31}X + R_{32}Y + R_{33}Z + z_0 \quad (6)$$

となり,さらに式(4)~(6)を整理すると,線形化されたDLT法の基本式

$$u = \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \quad (7)$$

$$v = \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \quad (8)$$

を得る.ここで, $L_1$ から $L_{11}$ は式の整理の際,新たに生じたパラメータでカメラパラメータ(camera parameter)と呼ばれる.

DLT法では,計測作業を行う前にカメラパラメータ推定作業であるキャリブレーション(calibration)を行う必要がある.このとき,コントロールポイント(control point)と呼ばれるキャリブレーション用の $\Sigma_{XYZ}$ で表される既知の実空間座標と,計測されたコントロールポイントの $\Sigma_{uv}$ で表されるカメラ座標との対応から,基本式(7),(8)のカメラパラメータ( $L_1 \sim L_{11}$ )を推定する.カメラパラメータ推定後は,カメラ座標から実空間座標への座標変換が可能になり,3次元計測の準備が整ったことを意味する.ただし,1台のカメラでは3次元座標を計測することができないので,複数台の各カメラから3次元座標を推定する必要がある.これらのパラメータ推定には一般に最小二乗法(least squares method)を用いる.

次に具体的にキャリブレーションの方法について述べる.もともと未知パラメータは, $\mathbf{R}$ の各要素と $x_0, y_0, z_0, u_0, v_0, k, l$ の計16個であるが,基本式の線形化により,カメラ1台につき $L_1 \sim L_{11}$ の11個となる.基本式は未知パラメータに関して

$$\mathbf{y} = \mathbf{W} \mathbf{x} \quad (9)$$

のように整理することができる.ここで, $\mathbf{y}, \mathbf{W}, \mathbf{x}$ は

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= [u, v]^T \\ \mathbf{W} &= \begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & uX & uY & uZ \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & Y & Z & 1 & vX & vY & vZ \end{bmatrix} \\ \mathbf{x} &= [L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, L_7, L_8, L_9, L_{10}, L_{11}]^T \end{aligned}$$

であり，カメラパラメータ  $x$  の推定に最小二乗法を適用する．カメラパラメータを推定するためには，観測値ベクトル  $y$  とコントロールポイントの既知座標と観測値から定まる行列  $W$  が必要となる．すなわち，3次元座標  $(X, Y, Z)$  が既知であるキャリブレーション用コントロールポイントを用意し，画像計測によって対応する各点のカメラ座標  $(u, v)$  を計測する．なお，方程式 (9) の未知パラメータは 11 個であるので，キャリブレーションに最低 6 個のコントロールポイントが必要である．ただし通常は精度向上のため，十分に多くのコントロールポイントを計測空間に偏ることなく配置する．これらの作業が計測前のキャリブレーション（カメラパラメータ推定）作業である．

各カメラについてキャリブレーションが終了すれば，基本式が定まったことを意味する．次の 3次元座標計測の段階では，このカメラパラメータを利用してカメラ座標  $(u, v)$  から計測点の実空間座標  $(X, Y, Z)$  を復元する．基本式から，1 台のカメラあたり，3 つの未知パラメータ  $(X, Y, Z)$  に対して方程式が 2 つなので，複数のカメラを用いて実空間座標を推定する必要がある．ただし，カメラ  $n (\geq 2)$  台のときは方程式は  $2n (> 3)$  個となり，一意に  $(X, Y, Z)$  を決定できない．例えばカメラ 2 台の場合は，以下の式を最小二乗法に適用して，実空間座標  $(X, Y, Z)$  を推定する．

$$y' = W' x' \quad (10)$$

ここで，観測値ベクトル  $y'$ ，行列  $W'$ ，推定パラメータ  $x'$  は

$$y' = [u^a - L_4^a, v^a - L_8^a, u^b - L_4^b, v^b - L_8^b]^T$$

$$W' = \begin{bmatrix} L_1^a - L_9^a u^a & L_2^a - L_{10}^a u^a & L_3^a - L_{11}^a u^a \\ L_5^a - L_9^a v^a & L_6^a - L_{10}^a v^a & L_7^a - L_{11}^a v^a \\ L_1^b - L_9^b u^b & L_2^b - L_{10}^b u^b & L_3^b - L_{11}^b u^b \\ L_5^b - L_9^b v^b & L_6^b - L_{10}^b v^b & L_7^b - L_{11}^b v^b \end{bmatrix}$$

$$x' = [X, Y, Z]^T$$

である．ただし，右上の添え字  $a, b$  は 2 台のカメラを区別するための記号である．

なお，DLT 法では推定に線形化式 (7), (8) を用いたが，式 (3) を用いて，未知パラメータ  $k, l, u_0, v_0, x_0, y_0, z_0$  と回転行列の角度パラメータ 3 個を非線形最小二乗法によって算出する方法 [4, 3] もある．より詳細な 3 次元の画像解析を学びたい人は，金谷の著書 [1] を参照されるとよい．

以上が DLT 法の原理的な説明である．実際に DLT 法を適用する場合は，いくつか技術的なことにも注意が必要であり，まずカメラの配置に配慮をする必要がある．つまり奥行き方向に対して誤差が大きいため，2 台のカメラを使用する場合は，カメラがおおよそ直交する方向に設置するのが望ましい．

## 参考文献

- [1] 画像理解 - 3次元認識の数理 - . 森北出版, 1990.
- [2] Y.I. Abdel-Aziz and H.M. Karara. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. In *Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry*, pp. 1-18. American Society of Photogrammetry, Falls Church, 1971.
- [3] F. Gazzani. A new algorithm for calibrating stereophotogrammetric systems devoted to motion analysis. *Human Movement Science*, 1993.
- [4] H. Hatze. High-precision three-dimensional photogrammetric calibration and object space reconstruction using a modified dlt-approach. *J. Biomechanics*, 1988.



- [5] G.T. Marzan and H.M. Karara. A computer program for direct linear transformation solution of the colinearity, and some application of it. *Proceedings of the Symposium in Close-Range Photogrammetric Systems*, pp. 420–476, 1975.

## 6 メモ欄