

付録A 撮影系データ

表 A.1: SONY 3CCD Color Video Camera Module XC-003 (DONPISHA)

	3CCD カメラビデオモジュール XC-003
撮像素子	インターライン型 1/3 インチ CCD
有効画素	768(H) × 494(V)
チップサイズ	6.00(H) × 4.96(V) mm
有効受光面	4.876(H) × 3.655(V) mm
信号方式	NTSC 方式
走査線数	525 本
操作方式	2:1 インタレース
同期方式	外部同期: VS
水平解像度	570TV 本
垂直有効ライン数	485 本
最低被写体照度	311lx
感度	20001x (F5.6)
映像出力	$Y : 1V_{p-p}(75\Omega)$
映像 S/N 比	59 dB
利得	4 dB

表 A.2: Nikon Cine-Nikkor 7.5mm F1.4

	JF 7.5 1.4
焦点距離	7.5 mm
口径比	1.4
画角	$35.49^\circ \times 26.99^\circ$
法兰ジバック	17.526 mm
バックフォーカス	14.04

付 錄B 汎用画像処理装置を用いたステレオシステムの実験パラメータ

本システムで処理される映像サイズは 160×120 (NTSC方式で撮影後4分割ユニットで $1/2$ サイズに縮小され、さらにDSPボードで $1/2$ に縮小される)。ステレオ処理は、2章で説明したSEAのアルゴリズムに従い、4眼ステレオにより、視差1から12までの12段階の視差推定を行った。対応点探索は、ウィンドウサイズ 3×3 のウィンドウマッチングを行い、隠れ検出のために図3.9の4種類の隠れマスクを使用した。各パラメータを表B.1に示す。

表 B.1: 実験に使用した各パラメータ

画像サイズ(X × Y)	160 画素 \times 120 画素
カメラ台数 N	4 台
推定視差数 d	12
マッチングウィンドウサイズ W	3×3
隠れマスクの数 M	4

付録C カメラキャリブレーション

本研究で利用したカメラパラメータのキャリブレーション手法について説明する。

キャリブレーションは、図C.1に示すように、3次元空間中にワールド座標系での位置が既知なキャリブレーションパターン（またはマーカ）を用いて行う。キャリブレーションは二つのステップからなる。一つ目は、キャリブレーションパターンのワールド座標系での3次元座標から画像の2次元座標への射影を定める射影変換行列を求めるステップ。二つ目は、射影変換行列からカメラの内部パラメータおよび、外部パラメータを求めるステップである。

C.1 射影変換行列の算出

ワールド座標系での3次元座標から画像の2次元座標への射影は、次のように表現される。

$$w \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{C.1})$$

式(C.1)を展開すると、一つの3次元座標と2次元座標の対応から射影変換行列 P の要素に関する二つの線形方程式

$$\begin{cases} p_{11}X_i + p_{12}Y_i + p_{13}Z_i + p_{14} - p_{31}u_iX_i - p_{32}u_iY_i - p_{33}u_iZ_i - p_{34}u_i = 0 \\ p_{21}X_i + p_{22}Y_i + p_{23}Z_i + p_{24} - p_{31}v_iX_i - p_{32}v_iY_i - p_{33}v_iZ_i - p_{34}v_i = 0 \end{cases} \quad (\text{C.2})$$

を立てることができる。 n 個の対応点の組があれば、方程式

$$Bp = 0 \quad (\text{C.3})$$

を得る。ここで p および B は、

$$p = [p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{14}, p_{21}, p_{22}, p_{23}, p_{24}, p_{31}, p_{32}, p_{33}, p_{34}]^T \quad (\text{C.4})$$

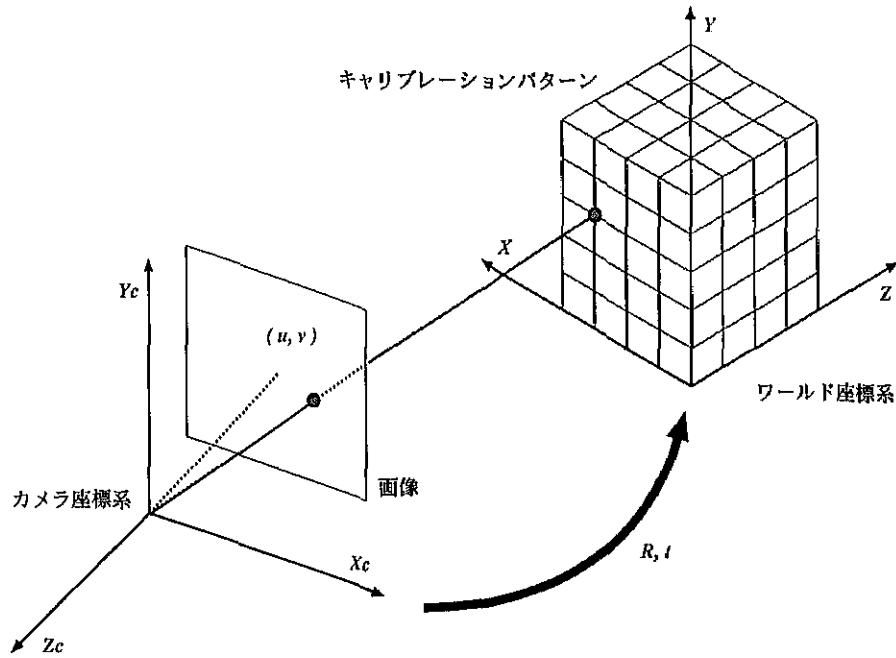


図 C.1: 3次元座標が既知であるマーカを利用したカメラのキャリブレーション

$$B = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1 X_1 & -u_1 Y_1 & -u_1 Z_1 & -u_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -v_1 X_1 & -v_1 Y_1 & -v_1 Z_1 & -v_1 \\ \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_n X_n & -u_n Y_n & -u_n Z_n & -u_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -v_n X_n & -v_n Y_n & -v_n Z_n & -v_n \end{bmatrix} \quad (C.5)$$

である。

射影変換行列 P は 11 個のカメラパラメータに依存する。この時、 n 個の 3 次元座標が同一平面上になければ、一般的に B のランクは 11 である。従って、 p は $B^T B$ の最小の固有値に対応する固有ベクトルとして求めることができる。

C.2 カメラパラメータの算出

前節で求めた射影変換行列をもとにカメラパラメータを算出する。ここで取り扱うカメラパラメータは、カメラの位置と姿勢を表す外部パラメータ ($T_x, T_y, T_z, R_x, R_y, R_z$) とカメラ固有の特徴を表す内部パラメータ (f, u_0, v_0, as) である。ここで、 f は焦点距離、 u_0, v_0 はレンズ中心の画像上での値、 as はアスペクト比を表す。

まず、

$$\begin{aligned} p_{34} &= 1 \\ p_1 &= [p_{11}, p_{12}, p_{13}]^T \\ p_2 &= [p_{21}, p_{22}, p_{23}]^T \\ p_3 &= [p_{31}, p_{32}, p_{33}]^T \end{aligned} \tag{C.6}$$

と定義する。

このとき、以下の拘束条件が成立する。

$$p_1 \cdot p_1 = \left(1 + \frac{u_0^2}{f^2}\right) \cdot cr^2 \tag{C.7}$$

$$p_2 \cdot p_2 = (as^2 + \frac{v_0^2}{f^2}) \cdot cr^2 \tag{C.8}$$

$$p_3 \cdot p_3 = \frac{cr^2}{f^2} \tag{C.9}$$

$$p_1 \cdot p_2 = \frac{u_0 \cdot v_0 \cdot cr^2}{f^2} \tag{C.10}$$

$$p_1 \cdot p_3 = \frac{u_0 \cdot cr^2}{f^2} \tag{C.11}$$

$$p_2 \cdot p_3 = \frac{v_0 \cdot cr^2}{f^2} \tag{C.12}$$

式(C.10)-(C.12)より $u_0, v_0, cr^2/f^2$ が得られる。式(C.7)より cr, f が、式(C.8)より as が決定できる。これらより、ゆがみのない理想的な射影変換行列が得られ、更に外部パラメータであるカメラの3次元位置および、姿勢を得ることができる。ここで、 cr は $p_{34} = 1$ とした時の実際の p_{34} との比を表す。

付録D カメラ間の輝度補正

ステレオ法による対応点探索において、精度良い対応点探索を実現するためには、異なるカメラで撮影された同一点の輝度値が一致することが重要である。しかし、カメラ特性の違いにより、同一点の輝度値を一致させることは困難である。

カメラの輝度レベルを合わせるために以下に示す方法により、周辺カメラの輝度値を多項式に当てはめて修正する。

一方のカメラから得られる点の輝度値 x からもう一方のカメラで得られる対応点の輝度値 x' への変換を n 次の多項式を用いて

$$x' = p_1 x^n + p_2 x^{n-1} + \cdots + p_n x + p_{n+1} \quad (\text{D.1})$$

と表現する。

この式は、 N 個のサンプル点を用いて、

$$\begin{bmatrix} x_1^n & x_1^{n-1} & \cdots & x_1 & 1 & -x'_1 \\ x_2^n & x_2^{n-1} & \cdots & x_2 & 1 & -x'_2 \\ \vdots & & & & & \\ x_N^n & x_N^{n-1} & \cdots & x_N & 1 & -x'_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_{n+1} \\ p_{n+2} \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{D.2})$$

と表すことができる。

このとき、

$$B = \begin{bmatrix} x_1^n & x_1^{n-1} & \cdots & x_1 & 1 & -x'_1 \\ x_2^n & x_2^{n-1} & \cdots & x_2 & 1 & -x'_2 \\ \vdots & & & & & \\ x_N^n & x_N^{n-1} & \cdots & x_N & 1 & -x'_N \end{bmatrix} \quad (\text{D.3})$$

とすると、多項式の係数は $B^T B$ の最小の固有値に対応する固有ベクトルとして求めることができる。

付録E カメラに輻輳がある場合の対応点と視差の決定法

2.3.3節では、全てのカメラの光軸が平行な場合の視差の定義、および対応点探索手法について説明した。しかし、実際に使用するカメラヘッドの光軸を全て平行にすることは非常に困難である。また、カメラを意図的に輻輳させ、カメラの基線長を長くとり対象物体を撮影したい場合、2.3.3節で説明した方法をそのまま適用することはできない。そこで、本研究では以下に示す方法により対応点探索を行った。

E.1 2次元射影変換行列を用いた対応点の決定

図E.1において、カメラ1から Z_{max} の距離に設置した平面上の点がカメラ1では点 p で、カメラ2では点 p_{max} で観測されるとき、点 p から点 p_{max} への変換を 3×3 の2次元射影変換行列 M_{max} を用いて、

$$p_{max} = M_{max} \cdot p \quad (\text{E.1})$$

と表現できる。同様に、カメラ1から Z_{min} の距離に設置した平面上の点がカメラ1では点 p で、カメラ2では点 p_{min} で観測されるとき、点 p から点 p_{min} への変換を、

$$p_{min} = M_{min} \cdot p \quad (\text{E.2})$$

と表現できる。従って、点 p_{min} と点 p_{max} を結んだ直線がエピポーラ線となる。

2次元射影変換行列は、ステレオ画像対で4点以上の対応点が得られれば求めることができる。本研究では、ステレオ画像対から多数の対応点を獲得し、最小2乗法を用いて算出した。このように算出した射影変換行列には、スケール因子に自由度が残る。そこで、得られた射影変換行列 M_{min} , M_{max} のどちらか一方を定数倍することにより、差行列の階数を1にする。ノイズやレンズひずみの影響により、差行列の階数を完全に1にすることは困難であるため、差行列を特異値分解した時の、第1特異値と第2特異値の比が最大になるように繰り返し法により非線形最小2乗法を利用して定数を決定する。

このようにして求められた射影変換行列を用いて、二つの平面の間にある平面に対する射影変換行列を二つの射影変換行列の比によって獲得することができる[26]。

$$M = a \cdot M_{min} + (1 - a) \cdot M'_{max} \quad (\text{E.3})$$

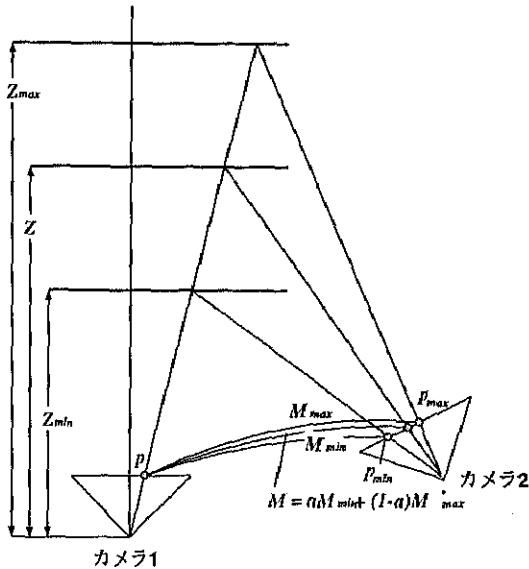


図 E.1: 2次元射影変換行列を用いた対応点の決定

ここで、 M'_{max} は差行列の階数を1にするために定数倍された射影変換行列である。このとき、二つの平面が平行であれば、式(E.3)で得られる射影変換行列は二つの平面を距離の逆数で $a : 1 - a$ の比に内挿した平面に関する射影変換行列を表す。

これを用いて探索範囲分射影変換行列を算出し、対応点探索を行う。

E.2 カメラパラメータを用いた対応点の決定

対応点探索範囲を中心カメラのカメラ座標系での奥行きで Z_{min} から Z_{max} と定義する。このとき、カメラパラメータが既知であれば、注目点 p の奥行きが Z_{min} , Z_{max} の時の周辺カメラで撮影された画像上での対応点 p_{min} , p_{max} は一意に決定する。従って、点 p_{min} と点 p_{max} を結んだ直線がエピポーラ線となる。

このとき、注目点の奥行きが Z_{max} の時の視差を 0, Z_{min} の時の視差を d_{max} と定義すると、注目点の奥行きが Z の時の視差 d は以下の式で与えられる。

$$d = \frac{(Z_{max} - Z) \cdot Z_{min} \cdot d_{max}}{(Z_{max} - Z_{min}) \cdot Z} \quad (\text{E.4})$$

逆に注目点の視差が d であるときの奥行き Z は

$$Z = \frac{Z_{min} \cdot Z_{max} \cdot d_{max}}{(Z_{max} - Z_{min}) \cdot d + Z_{min} d_{max}} \quad (\text{E.5})$$

となる。

従って、注目点の画像座標と視差 d を仮定した時の奥行き Z からカメラパラメータとともに周辺画像での対応点座標を決定し、対応点探索を行うことができる。

付録F Sony 3D Camera System

表 F.1: カメラ仕様

カメラ 1~5	DXC-950 (2/3インチ 3-CCD)
カメラ 1~5 レンズ	VCL-714BXEA
カメラ間同期	カメラ1にカメラ2~5が同期

表 F.2: 距離計測仕様

距離画像分解能	360 画素 × 240 画素 (実画像はこれより数画素小さい)
距離分解能	8 ピット
距離精度	対象物体に依存
距離計測範囲	3m ~ 5m
距離計測時間	1/60 秒
距離計測遅延時間	3/60 秒
距離画像信号仕様	SDI(720 画素 × 240 画素 / フィールド) 出力距離画像の水平方向解像度は 360 画素
距離計測画像	濃淡画像を用いて距離計測

表 F.3: 機能仕様

入力カメラ台数	最大5台 (カメラ2~5の任意のカメラを使用禁止にできる)
ステレオ演算ユニット数	4
距離探索数	最大32
距離値補完	パラボラフィッティングにより3ビット補完
マッチングウィンドウサイズ	3×3, 5×5, 7×7, 9×9から選択
距離値最適値計算	4つのステレオ演算結果から最適値を選択
距離値修正処理	3(H)×n(V)の範囲で最も確からしい距離値を選択 $n = 3, 5, 7, 9$ から選択



図 F.1: Sony 3D Camera System カメラヘッド