

第3章

実験装置

本研究では第2章で述べたランダムパターン光投影を利用したステレオ法に基づく三次元計測装置を構成し、実験を行った。本章ではこの実験装置の構成、カメラに対して行ったキャリブレーション及び測定における処理の流れについて述べる。

3.1 装置の構成

図 3.1 に実験装置の概観を示す。実験装置は2つのカメラと1つのプロジェクタ、および制御用のコンピュータ1つで構成されている。また、図 3.2 に測定システムの構成を示す。

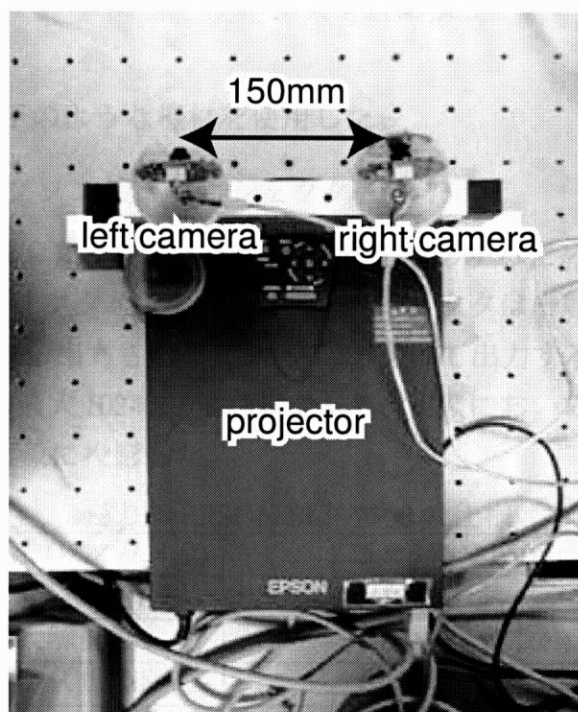


図 3.1 実験装置の概観

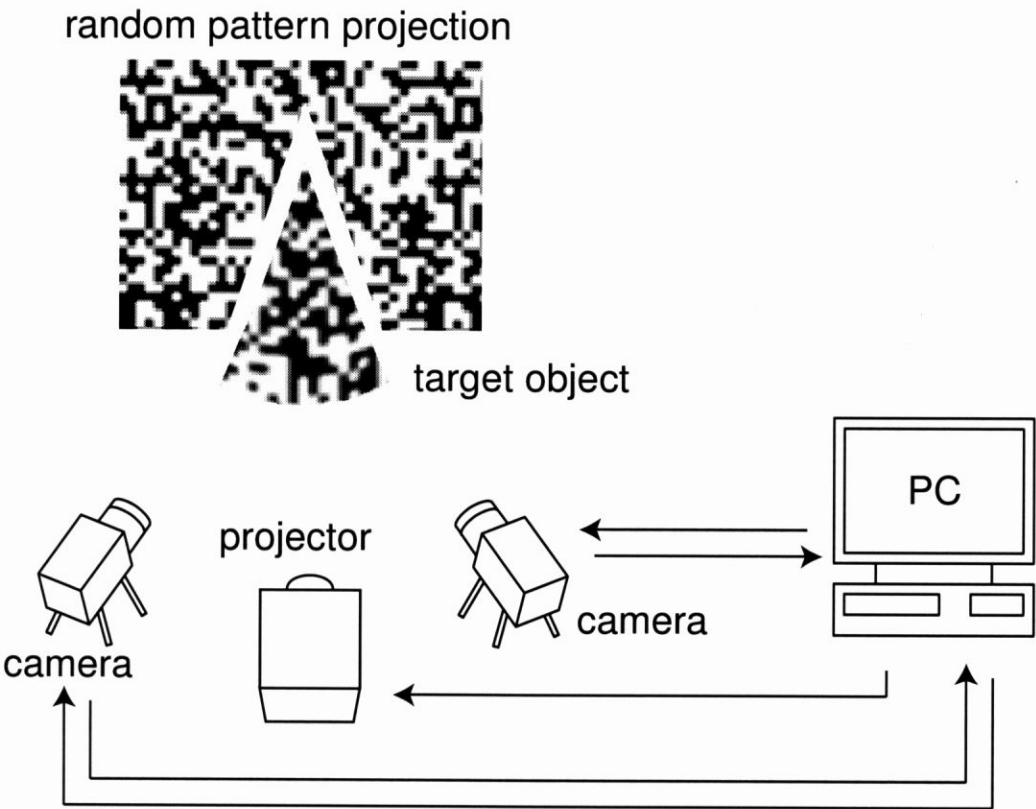


図 3.2 測定システムの構成

今回の実験では以下のような機材を使用した。

投影系 セイコーエプソン 液晶プロジェクタ ELP-7500

提案手法で作成したランダムパターン光を投影するために、表 3.1 の仕様を持つ液晶プロジェクタを用いた。このプロジェクタは一般に市販されているものであり、PCから出力されるRGB信号を受けて出力することができる。出力できる解像度は最大1024×768画素であり、実験においてもこの解像度の画像を入力として対象に投影した。

表 3.1 EPSON ELP-7500 の仕様

外形寸法 (W×H×D)	235 × 346 × 85(mm)
液晶パネルサイズ	0.9 インチ (×3) アスペクト比 4:3
最大解像度	1024 × 768(pixel)
投影レンズ焦点距離	f : 38 ~ 49(mm)
投射距離	1.0 ~ 16.3(m)
明るさ	800ANSI ルーメン

撮像系 Orange Micro iBOT2

ランダムパターン光を投影した対象物体を撮影するために、表 3.2 の仕様を持つカラー CMOS カメラを用いた。このカメラは出力として最高 640×480 画素、RGB24bit フォーマットの非圧縮デジタルビデオを出力することができる。撮影した画像は USB2.0 接続により、最大 30 フレーム/秒 (@ 640×480) の速度で制御用 PC に転送することができる。今回の実験では静止物体の測定のみしか行っておらず、 640×480 画素を 14 フレーム/秒で PC へと転送した。

表 3.2 Orange Micro iBOT2 の仕様

CMOS イメージセンササイズ	1/3 インチ アスペクト比 4:3
最大解像度	$640 \times 480(\text{pixel})$
最高撮影速度	$30(\text{fps})@640 \times 480$

制御系 PC (CPU Pentium4 1.5GHz, Memory 256MB)

市販の一般的な PC を制御に用いた。この PC1 つによりプロジェクタと 2 つのカメラの制御、および三次元座標演算している。プロジェクタへの入力のためにビデオカードを追加している。

実験スペースの観点から、今回の実験においては測定対象をカメラおよびプロジェクタから 900~1100mm のところに置いて測定を行った。ステレオ法では、カメラ間の距離を変えることによって測定可能な距離範囲を自由に調節することができる。1.2 節において紹介した平行ステレオモデルによると、今回使用したカメラの焦点距離 (6.0mm) に対して、カメラ間の距離を変えることによって測定可能な距離範囲は図 3.3 のように変化し、カメラ間の距離が大きくなるにつれて測定可能な距離範囲は遠いところへと移動する。今回の実験では、測定対象とする距離範囲内で距離分解能のある値として、カメラ間の距離を 150mm に設定した。

カメラおよびプロジェクタともに図 3.4 に示すような中心投影方式 (ピンホールモデル) で近似することができる。中心投影方式では、対象までの距離に応じて結像する像の大きさが変化する。これはプロジェクタからある単一周波数のストライプパターンを投影し、これをカメラで撮影したとき、カメラとプロジェクタの位置関係によってカメラで撮影したパターンの空間周波数が変化することを意味する。提案手法では撮像系の周波数特性をもとに、サンプリング後の信号から元の連続信号を復元できるような周波数帯域の投影パターンを作成したが、これが有効であるためにはカメラとプロジェクタの位置関係に制限が存在する。中心投影方式によれ

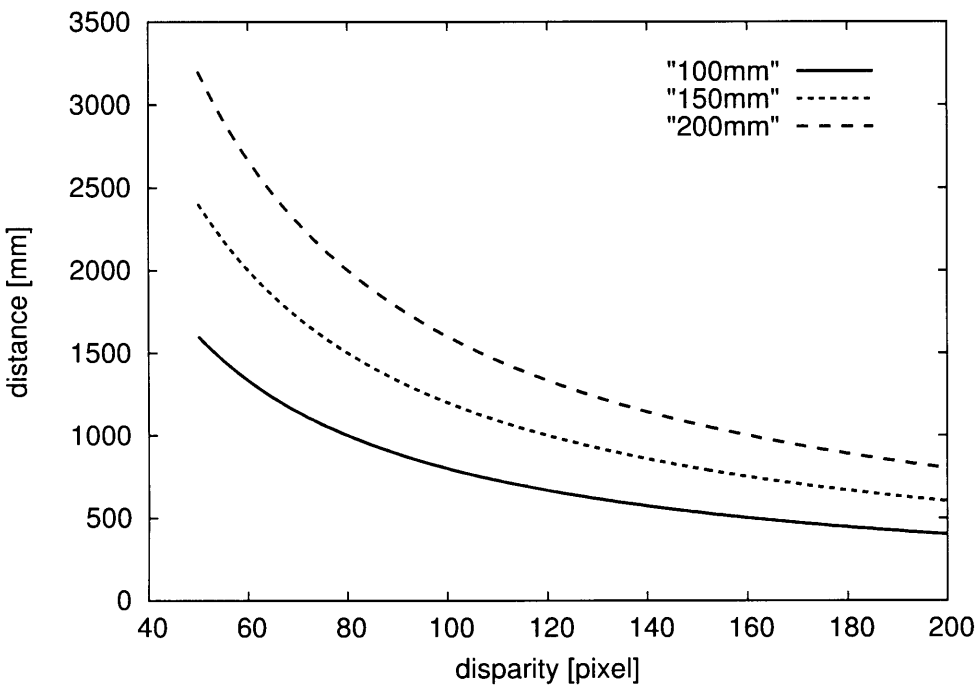


図 3.3 ベースライン長と距離計測可能範囲

ば、三次元座標上の点 $P(X, Y, Z)$ を焦点距離 f のカメラで撮影したとき、その画像座標 (x, y) は

$$x = f \frac{X}{Z}, y = f \frac{Y}{Z} \tag{3.1}$$

で与えられる。

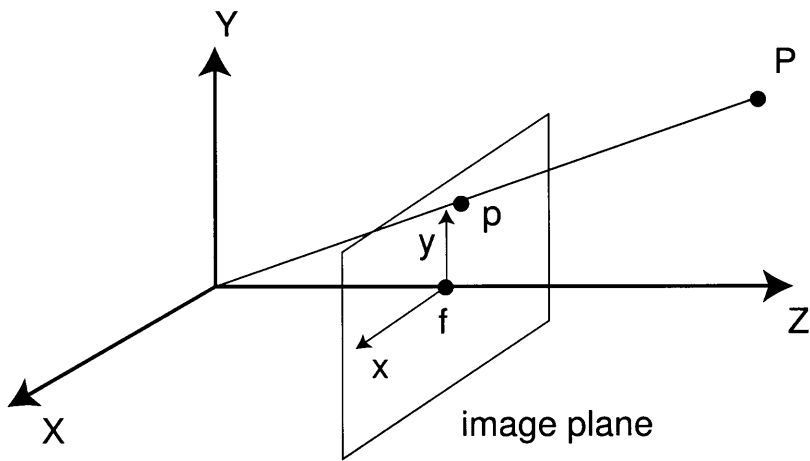


図 3.4 中心投影方式

カメラ1画素あたりに撮影されるプロジェクタの画素数について考えると、カメラの焦点距離を f_c 、画素ピッチを d_c 、対象物体までの距離を l_c とし、プロジェクタの焦点距離を f_p 、画素ピッチを d_p 、対象物体までの距離を l_p とすると、プロジェクタ1画素は対象物体上において

$$n_p = \frac{l_p d_p}{f_p} \quad (3.2)$$

の大きさで結像する。これをカメラで撮影すると、

$$n'_p = \frac{l_p \cdot f_c \cdot d_p}{l_c \cdot f_p} \quad (3.3)$$

の大きさに撮影される。これより、カメラ1画素あたりに撮影されるプロジェクタの画素数は、

$$\frac{d_p}{n'_p} = \frac{l_c \cdot f_p \cdot d_c}{l_p \cdot f_c \cdot d_p} \quad (3.4)$$

となる。 l_c と l_p が大きく違う場合、対象物体までの距離が変化することによってカメラとプロジェクタの画素数の比も変化するが、 $l_c = l_p$ の場合には対象物体までの距離が変化してもカメラとプロジェクタとの画素数の比は一定である。そこで、実験装置ではカメラとプロジェクタレンズ中心から対象物体までの距離が等しくなるように配置した。

3.2 キャリブレーション

今回の実験で使用したカメラは市販の非測定用のカメラであり、その位置や角度を正確に特定することが困難である。カメラの位置関係は距離計算において非常に大きな影響を持つため、これらを明示的に求めておくことは必要不可欠である。そこで本研究ではキャリブレーションにより、これらのパラメータを求めた。

前節でピンホールカメラモデルについて述べたが、これは全ての距離がカメラ座標系で表され、かつ画像座標がカメラ座標の z 軸と交わる点を原点とする場合のみ有効である。実際には、ワールド座標とカメラ座標、画像座標はレンズの焦点距離や画素の大きさ、カメラの位置や角度などのさまざまなパラメータによって関連付けられている。これらのパラメータを求めることをキャリブレーションという。キャリブレーションの手法としてはTsaiの手法[23]をはじめとして様々なものが提案されている。この手法ではレンズ歪みを扱うため非線形成分を含むが、近年のレンズの発達によりレンズ歪みによる非線形成分は微小であり、本研究ではパラメー

タを線形化した、既知パターンによるキャリブレーション[24]を行った。図 3.5 に既知パターンによるキャリブレーションの様子を示す。

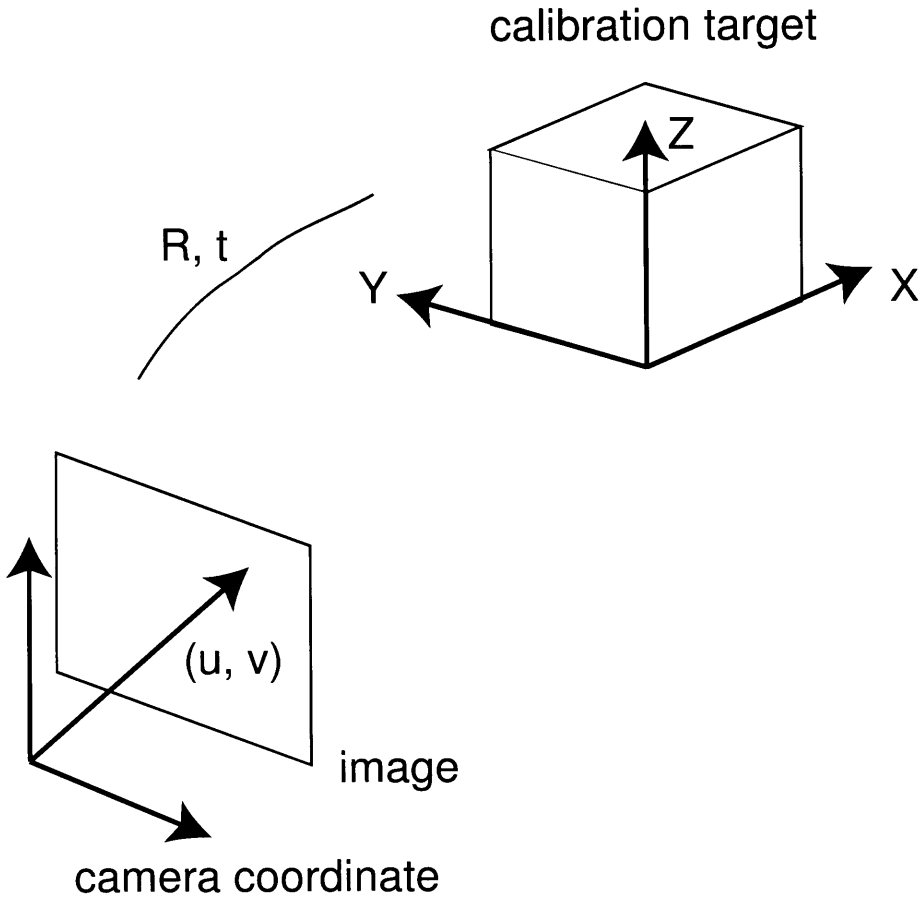


図 3.5 既知パターンによるキャリブレーション

ワールド座標系は空間上の任意の位置に設定することができる。画像座標系とカメラ座標系、およびワールド座標系の関係を図 3.6 に示す。

まずは画像平面の座標系とカメラ座標系との対応関係を調べる。カメラ座標 (x, y, z) に対応する画像平面上の点 (u, v) は次式のように表される。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{z} \begin{pmatrix} \alpha & -\alpha \cot \theta & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{\beta}{\sin \theta} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

ここで、 (u_0, v_0) は画像中心の座標、 α 、 β はカメラの焦点距離とセンサ開口の大きさを表すパラメータとの積であり、正方開口のセンサの場合 $\alpha = \beta$ となる。また、 θ

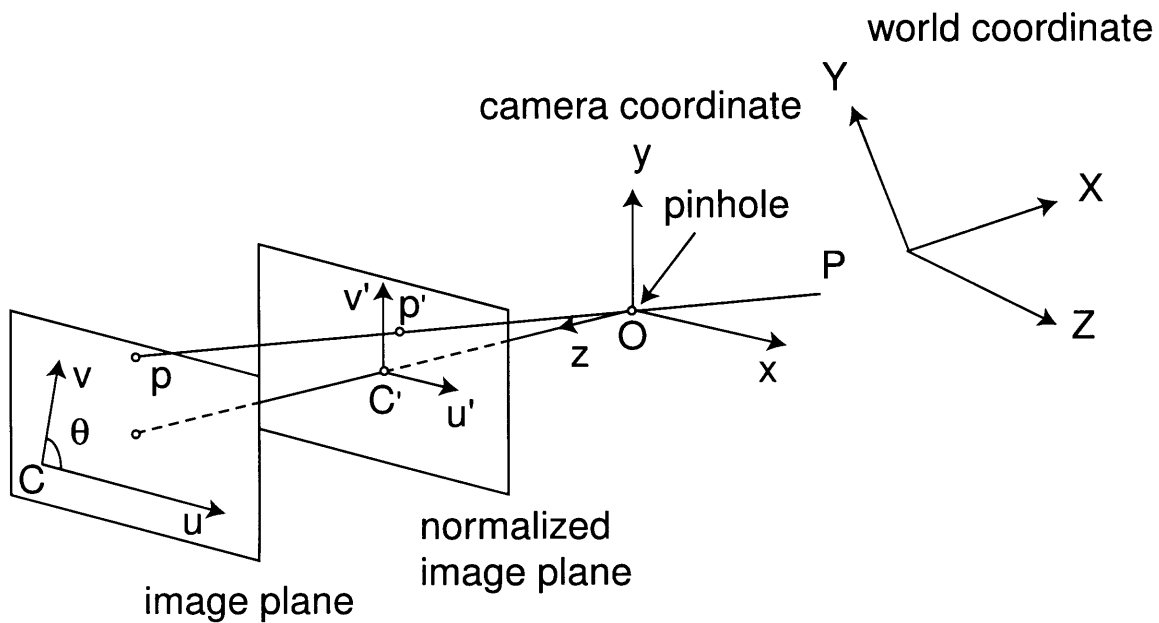


図 3.6 画像座標系とカメラ座標系、ワールド座標系の関係

は画像座標系における二つの軸がなす角度であり、製造時のプロセスの問題等で直角にならない場合がある。

次に、カメラ座標系とワールド座標系との対応関係を決定する。カメラ座標 (x, y, z) の点とそれに対応するワールド座標 (X, Y, Z) の点の間には次のような関係がある。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \mathbf{R} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \mathbf{t} \quad (3.6)$$

\mathbf{R} は座標間の回転行列、 \mathbf{t} は並進ベクトルである。

カメラパラメータを $(p_{11}, p_{12}, \dots, p_{34})$ とすると、式 (3.1) および式 (3.2 より) 画像平面上の点 (u, v) はワールド座標 (X, Y, Z) に関して次のように表される。

$$u = \frac{p_{11}X + p_{12}Y + p_{13}Z + p_{14}}{p_{31}X + p_{32}Y + p_{33}Z + p_{34}} \quad (3.7)$$

$$v = \frac{p_{21}X + p_{22}Y + p_{23}Z + p_{24}}{p_{31}X + p_{32}Y + p_{33}Z + p_{34}} \quad (3.8)$$

ここで、 n 点のキャリブレーション点が多得られた場合、 $p_{34} = 1$ とすることによって次のように展開することができる。

$$\begin{pmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1X_1 & -u_1Y_1 & -u_1Z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -v_1X_1 & -v_1Y_1 & -v_1Z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_nX_n & -u_nY_n & -u_nZ_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -v_nX_n & -v_nY_n & -v_nZ_n \end{pmatrix}$$
$$\begin{pmatrix} c_{11} \\ c_{12} \\ \vdots \\ c_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \vdots \\ u_n \\ v_n \end{pmatrix} \tag{3.9}$$

これを最小二乗法によって解くことによりカメラパラメータが求められる。カメラパラメータは11個のパラメータに依存する。キャリブレーション点1点あたり二つの式が得られることより、少なくとも同一平面上にない6点のキャリブレーション点によってカメラのキャリブレーションを行う必要がある。

表 3.3に左右カメラのキャリブレーション結果を示す。キャリブレーションによって得られるパラメータは式(3.1)の α 、 β 、 θ 、 u_0 、 v_0 および式(3.2)の回転行列、並進ベクトルである。

表 3.3 キャリブレーションパラメータ

	左カメラ	右カメラ
α	707.107629	793.350909
β	703.207989	792.826554
θ	1.576736	1.573320
u_0	324.336115	285.301398
v_0	289.348795	253.859833
\mathbf{R}	$\begin{pmatrix} 0.999827 & -0.013608 & 0.012714 \\ -0.013558 & -0.999900 & -0.004003 \\ -0.012767 & -0.003830 & 0.999911 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.998768 & 0.010820 & 0.048419 \\ 0.011679 & -0.999779 & -0.017477 \\ -0.048219 & -0.018021 & 0.998674 \end{pmatrix}$
\mathbf{t}	$(73.360091 \ 167.012764 \ 884.203952)^T$	$(-31.082896 \ 161.900838 \ 989.959164)^T$

実際のキャリブレーションにおいては、図 3.7に示すような金属性の箱の側面に印をつけ、これをキャリブレーション点として用いた。キャリブレーション点の座

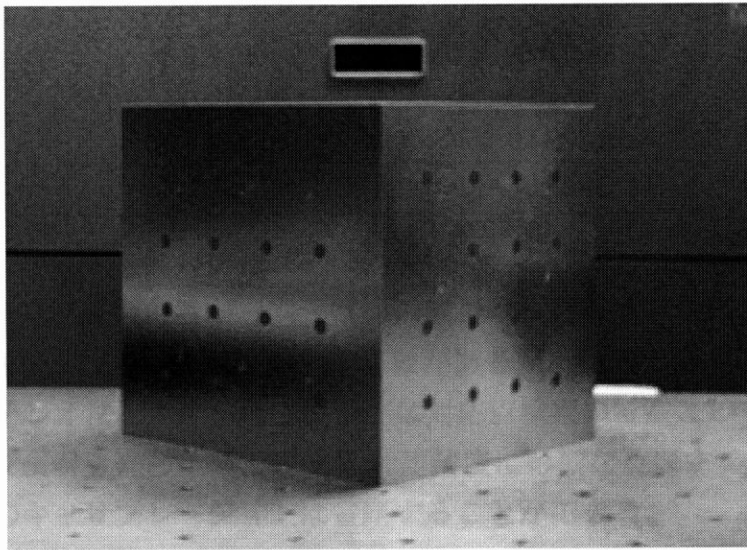


図 3.7 使用したキャリブレーションターゲット

標を決定する際に生じる誤差はそのまま三次元計測誤差に影響するため、キャリブレーション点はワールド座標系および画像座標系どちらにおいても精度良く検出される必要がある。今回行ったキャリブレーションではまずキャリブレーションターゲット上に印をつけていき、その座標を計測し直すことによってワールド座標を得た。しかしこれらの作業はすべて人手によって行ったため、キャリブレーション点のワールド座標には多少の誤差が含まれていると考えられる。また、画像座標系においては、ターゲット上の印の重心を求めることによりキャリブレーション点の座標を得た。この座標についても、イメージセンサの標本化誤差や量子化誤差により多少の誤差が含まれていると考えられる。

また、左右カメラの座標系についてワールド座標との関係式(式(3.2))が求められたとき、左右カメラの回転行列、並進ベクトルをそれぞれ \mathbf{R}_1 、 \mathbf{R}_2 および \mathbf{t}_1 、 \mathbf{t}_2 とすると、左右カメラ間の回転行列と並進ベクトルは次のように計算することができる。

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_1 \mathbf{R}_2^T \quad (3.10)$$

$$\mathbf{t} = -\mathbf{R}_1 \mathbf{R}_2^T \mathbf{t}_2 + \mathbf{t}_1 \quad (3.11)$$

求められた左右カメラ座標系間の回転行列 \mathbf{R} および並進ベクトル \mathbf{t} を表 3.4 に示す。

表 3.4 左右カメラ座標間の回転行列および並進ベクトル

R	$\begin{pmatrix} 0.999064 & 0.025060 & -0.035268 \\ -0.024554 & 0.999591 & 0.014675 \\ 0.035622 & -0.013795 & 0.999270 \end{pmatrix}$
t	$(135.270846 \quad -10.112916 \quad -101.691574)^T$

光投影法では投影光の位置が三次元情報の取得に重要な意味を持っているためプロジェクトのキャリブレーションも行う必要があるが、提案手法では距離計測の方法としてはステレオ法を用いるので投影光は対応点検索の特徴として使われることになり、プロジェクト光の位置が三次元計測精度に影響を及ぼすことはないため、プロジェクトのキャリブレーションは省略することができる。

3.3 三次元座標計算

2つのカメラが平行に配置された場合、2.1節において述べたように三次元座標はカメラ間の距離、視差、カメラの焦点距離から簡単に計算することができるが、実際にはこのようにカメラを配置することは非常に困難である。

2つのカメラが平行でない場合、三次元座標は両カメラの射影行列から求めることができる。左右カメラ画像において対応点 (u, v) 、 (u', v') が既知であるとき、それぞれのカメラの射影行列

$$s \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}, \quad s' \begin{pmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p'_{11} & p'_{12} & p'_{13} & p'_{14} \\ p'_{21} & p'_{22} & p'_{23} & p'_{24} \\ p'_{31} & p'_{32} & p'_{33} & p'_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

が求められたとすると、

$$\begin{pmatrix} up_{31} - p_{11} & up_{32} - p_{12} & up_{33} - p_{13} \\ vp_{31} - p_{21} & vp_{32} - p_{22} & vp_{33} - p_{23} \\ u'p'_{31} - p'_{11} & u'p'_{32} - p'_{12} & u'p'_{33} - p'_{13} \\ v'p'_{31} - p'_{21} & v'p'_{32} - p'_{22} & v'p'_{33} - p'_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{14} - up_{34} \\ p_{24} - vp_{34} \\ p'_{14} - u'p'_{34} \\ p'_{24} - v'p'_{34} \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

を最小二乗法によって解くことにより計測点の三次元座標を求めることができる。表 3.5 にキャリブレーションに用いた 32 点に対して距離情報を求めた結果の最大・最小誤差および平均誤差を示す。また、図 3.8 はキャリブレーション点の位置と計

表 3.5 キャリブレーション点を用いた三次元計測結果

	x	y	z
最大誤差	1.11mm	1.81mm	6.79mm
最小誤差	0.00mm	0.03mm	0.18mm
平均誤差	0.45mm	0.55mm	2.41mm

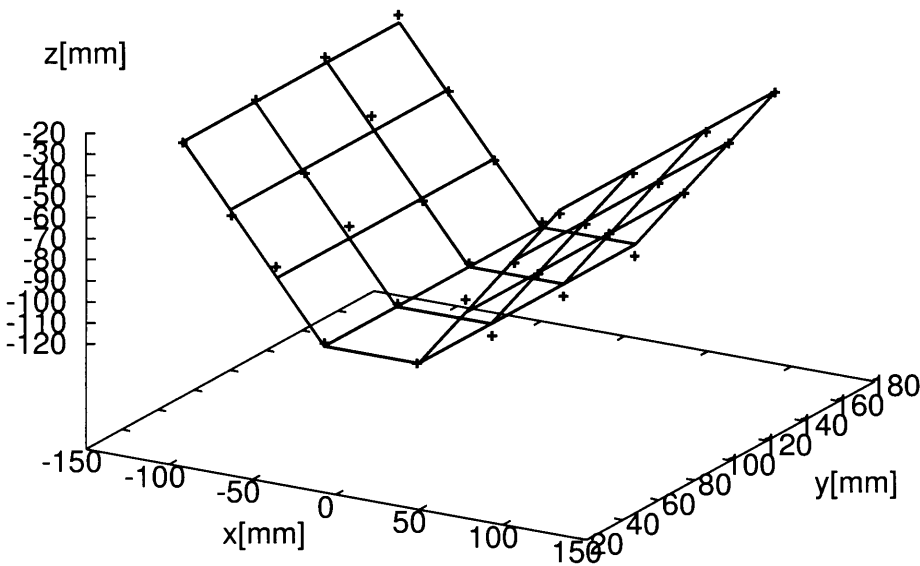


図 3.8 キャリブレーション点を用いた三次元計測結果

算によって得られた三次元座標とをプロットしたものである。実線がワールド座標におけるキャリブレーション点の位置、点が計算によって得られた位置を示す。

3.4 処理の流れ

ここでは提案手法によって実際に三次元計測を行うための処理の流れを示す。ここで、カメラのキャリブレーションは測定の前にあらかじめ行われているものとする。

1. 投影パターンの作成

測定の前にあらかじめ投影パターンを作成しておく。提案手法では一枚の投影パターンのみしか使用しないのと、パターンを作成する際に周波数フィルタをかけるため、リアルタイムでのパターン作成が困難だからである。作成した投影パターンをRGB信号でPCからプロジェクタへと出力し、対象物体に対して投影する。ここでは、測定の前に投影パターンの自己相関を調べ、ステレオマッチングにおいて使用するウィンドウの大きさを決定しておく必要がある。

2. シーンの撮影

二台のカメラで同時に対象物体を撮影する。

3. 対応点検索・三次元情報計算

得られた画像に対して対応点探索を行い、対象物体の三次元情報を計算する。カメラからの出力はRGB24bit フォーマットであるが、これをPCで取得した後256階調白黒画像へと変換し、これを用いて対応点の探索を行う。

4. レンジマップの出力

左カメラの各画素について距離情報を白黒256階調で表したレンジマップを出力する。

第二章で述べたように、提案手法では領域ベースのステレオマッチングによって対応点の探索を行う。領域ベースのステレオマッチングの評価関数としては正規化した相関係数やSSD(Sum of Squared Differences)などさまざまなものが利用されているが、本研究では計算の簡単なSAD(Sum of Absolute Differences)を使用した。SADは次式によって表される。

$$SAD = \sum_i^P \sum_j^Q |M_L(x_L, y_L) - M_R(x_R, y_R)| \quad (3.14)$$

ここで P 、 Q はそれぞれウィンドウの縦横の大きさ(pixel)、 $M_L(x, y)$ 、 $M_R(x, y)$ はそれぞれ左、右画像中の (x, y) 画素における輝度値を示す。また、画像間の明るさの違いに対応するために、次式によって正規化を行った。

$$M'(i, j) = HIGH \times \frac{M(i, j) - M_{min}}{M_{max} - M_{min}} \quad (3.15)$$

ここで、 $M(i, j)$ は (i, j) 画素の輝度値、 M_{max} 、 M_{min} はそれぞれウィンドウ内の輝度値の最大・最小値、 $HIGH$ は画像の最大階調値(255)を示す。この正規化処理は画像から新しくウィンドウを切り出すごとに行われる。

ステレオマッチングにおいてウィンドウ内の輝度値の変動が小さいものは特徴量を十分に含んでいないものであり、正確な対応点の検出を期待することはできないため、今回の実験におけるステレオマッチングではウィンドウ内の輝度値の変動がある閾値以上のものについてのみ対応点の探索を行った。これにより、実際には投影パターンが投影されている部分においてのみ対応点の探索が行われた。この処理

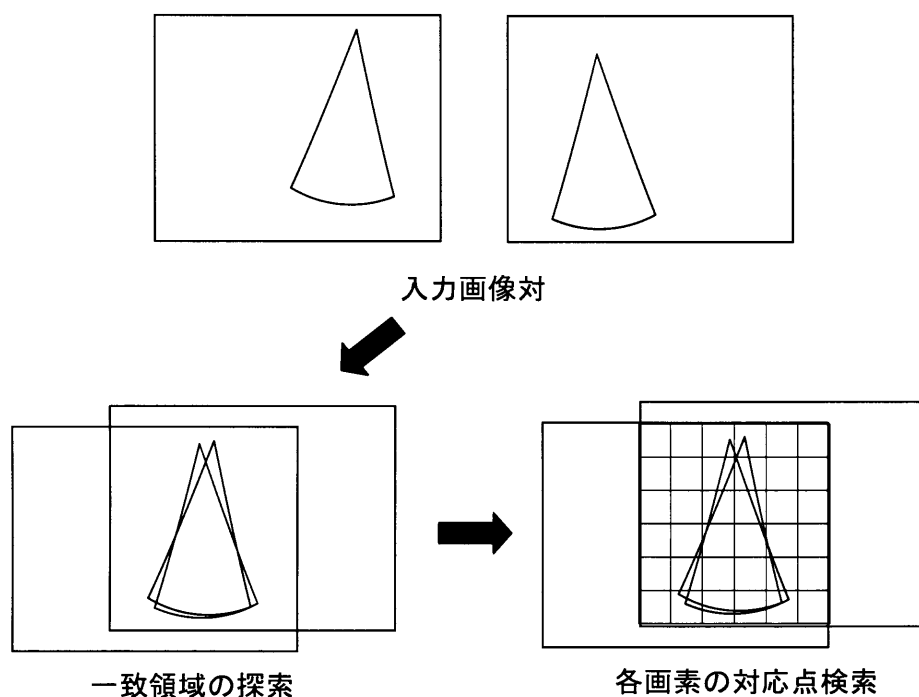


図 3.9 二段階のマッチング

によって信頼度のあるマッチングのみが行われるほか、計算時間を短縮することができる。

さらに、対応点の検出をより信頼度のあるものとするために二段階にわけてステレオマッチングを行った。この様子を図 3.9 に示す。まずは二つの画像全体でのずれを調べ、次にそのずれの位置の周囲において二次元方向に対して各画素の対応点の探索を行った。これによって対応点探索の範囲を狭めることができ、計算時間を短縮することが可能となる。

今回の実験では一台のPCのみによってカメラとプロジェクタの制御、および三次元情報の計算を行ったが、一組の画像を処理するために数十分の時間を要した。そのため、動画などを入力とした連続処理は行っていない。

第4章

測定結果

本章では前章で述べた実験装置を用いて行った三次元計測結果について述べる。まずはじめに撮像系の周波数特性を測定し、投影パターンの周波数成分が撮像系によって制限されていることを確認した。次に、撮像系の周波数特性に基づいて投影パターンを作成した。さらに、作成した投影パターンの自己相関を調べることによってステレオマッチングにおける最適ウィンドウサイズを決定した。また、平板の三次元計測を行い、ウィンドウサイズによる結果の変化および投影パターンの周波数成分の違いによる結果の変化について調べたほか、円錐や球といったオクルージョンの存在する物体の測定を行い、提案手法による三次元計測精度の評価を行った。

4.1 撮像系の周波数特性

第二章において投影パターンの周波数帯域は撮像系によって制限されると仮定したが、これを確認するために撮像系の周波数特性の測定を行った。測定はプロジェクタより平板に対して単一周波数のストライプパターンを投影し、これをカメラの画角いっぱいに撮影することによって行った。撮像系の周波数特性の測定結果を水平方向については図 4.1(a) に、垂直方向については (b) に示す。どちらの図も横軸はカメラのサンプリング周波数により正規化された周波数となっている。縦軸はMTF(Modulation Transfer Function)であり、入射信号 S の最大・最小値をそれぞれ S_{max} 、 S_{min} とすると、次式によって求められる [25]。

$$MTF = \frac{S_{max} - S_{min}}{S_{max} + S_{min}} \quad (4.1)$$

水平・垂直方向ともにカメラのナイキスト周波数においてMTFは極小値となっているが、これは折り返しによって周波数特性がナイキスト周波数を軸に対称になることによるものであると考えられる。また、プロジェクタの解像度とカメラの解像度が近い値であるため、完全に対称とはならず、プロジェクタのナイキスト周波数を軸としてMTFが対称となっている。これはプロジェクタからの出力は離散的な

表 4.1 カメラおよびプロジェクタに関するパラメータ

	カメラ	プロジェクタ
焦点距離	6.0mm	36mm
対象までの距離	1000mm	1000mm
画素サイズ	0.0075mm	0.018mm

信号であり、プロジェクタのナイキスト周波数において対称となるからである。カメラのナイキスト周波数付近まではプロジェクタ側の折り返しは見られないことから、投影パターンの周波数成分は撮像系の周波数特性によって制限されることが確認できる。

4.2 投影パターン

第二章において述べた方法で投影パターンを作成した。カメラのナイキスト周波数は水平・垂直方向とも $66.7[1/mm]$ であり、これをピンホールカメラモデルを用いてプロジェクタでの周波数に変換すると $11.1[1/mm]$ となる。ここで、空間周波数の変換に用いたパラメータを表 4.1 に示す。

カメラのナイキスト周波数に相当する信号はプロジェクタの画素単位では5画素となるので、第二章で述べた投影パターンの作成法により、 $3 \times 3[pixel]$ の白黒のブロックをランダムに並べて二値のランダムパターンを作成した後、水平・垂直方向に対してそれぞれ別々にカットオフ周波数でローパスフィルタをかけた。カットオフ周波数はプロジェクタの正規化周波数で水平方向 $170/1024[1/pixel]$ 、垂直方向 $128/768[1/pixel]$ とした。

4.2.1 投影パターンの周波数成分

図 4.2 に投影パターンの周波数成分を示す。これはフーリエ係数の対数を256階調値で表したものであり、色が明るいほどフーリエ係数が大きいことを表しており、画像中心が直流成分、周辺部に行くにつれて高周波成分となっている。周波数成分は水平・垂直方向の軸に関して対称となっている。また、二値のランダムパターンと投影パターンの水平方向の周波数成分を図 4.3 に示す。横軸はプロジェクタ側のサンプリング周波数で正規化された空間周波数である。正の周波数のみをプロットしてあるが、実際には直流成分を軸として正負対称となる。これにより、投影パターンでは二値のランダムパターンに比べカットオフ周波数以上の周波数成分が小さくなっていることが確認できる。画像データは整数値しかとることができないため、量子化の影響により高周波数成分は完全には取り除くことができないが、投影パ

ターンではカットオフ周波数以上の周波数成分はカットオフ周波数以下のものと比べて非常に小さい値になっているのが確認できる。サンプリングされる信号はレンズおよび開口領域での積分特性によって低域通過特性が働いたあとのものとなるので、このカットオフ周波数以上の成分はさらに小さいものとなり、無視することができると思われる。

4.2.2 投影パターンの自己相関

最適なウィンドウサイズを決定するために、投影パターン上の任意の位置から切り出したテンプレートを走査することによって投影パターンの自己相関を求めた。図 4.4 にテンプレートサイズが 27×27 [pixel] の場合の自己相関、図 4.5 に 29×29 [pixel] の場合の自己相関について示す。この自己相関値は、任意の位置から切り出したテンプレートを二次元方向に探索したときの相関値の最大値を水平方向のずれに対してプロットしたものである。ここで、テンプレートの大きさはプロジェクタの画素数で表したものである。実際にステレオマッチングを行う際には、ピンホールカメラモデルによってこれをカメラ側での画素数に変換してウィンドウサイズを決定した。今回の場合、自己相関の S/N が 2 倍以上となるテンプレートサイズは 29×29 [pixel] であり、これをカメラの画素数に換算したものより大きい最小の奇数は 13 であることから、ステレオマッチングのウィンドウサイズは 13×13 [pixel] とした。ここで、テンプレートサイズおよびウィンドウサイズが奇数となっているのは、ある点を中心とする正方形をテンプレートおよびウィンドウとして使用したためである。

4.3 三次元計測結果

前章で述べた実験装置を用いて三次元計測を行った。三次元情報はすべてワールド座標で計算されている。ワールド座標の原点は前章で述べたキャリブレーションターゲットの下底中央に設定してある。今回の実験では平板、円錐および球の測定を行ったが、提案した投影パターンが三次元計測精度にどのような影響を持つのかを確認するために、模様のない真っ白な対象物体を用いて測定を行った。また、周囲の照明の影響を受けないよう、照明をすべて落とした状態において測定を行った。

4.3.1 平板の測定結果

提案した二次元的なランダムパターンを投影光として用いたステレオ法による三次元計測手法の精度を評価するために平板の測定を行った。平板はカメラおよびプロジェクタのレンズ中心から 1000mm の場所に設置されている。図 4.6(a) に測定し

た平板の左右カメラ画像を示す。これより、左右カメラ間で画像が大きく回転していることに加え、上下方向にも大きくずれていることがわかる。このため、二次元的な対応点探索が必要であり、二次元的な探索を正確に行うことを目的とした投影パターンの効果を評価することができる。図 4.6(b) に平板に提案手法で作成したパターンを投影したシーンを左右カメラで撮影した画像を示す。測定時には周囲の照明をすべて落としたほか、反射率の高い物体を測定対象としたため、撮影画像中で信号値が飽和してしまわないようカメラの露出を抑えた状態で測定を行ったので、投影パターンのみが撮影された状態となっている。図 4.6(c) に平板の三次元計測結果のレンジマップを示す。画像の明るい点ほど距離が近く、暗い点ほど距離が遠いことを表している。また、図 4.7(a) に測定結果の x - z 平面での断面図、(b) に y - z 平面での断面図を示す。さらに、図 4.8 に測定結果を三次元プロットしたものを示す。

三次元計測の精度については以下のように評価を行った。前章で述べたように、キャリブレーション点について距離計算をした場合でも最大で 6.79mm の誤差が生じている。ステレオマッチングにおける精度評価は対応点の検出がどれだけ正しいかということであり、距離計算の誤差はキャリブレーションや装置の構成によって生じた誤差であると考えられる。そこで精度評価のためにスポット光を投影して左右画像の画素の対応を調べ、この対応とステレオマッチングによる対応点検出の結果がどのくらい一致するのかを調べた。スポット光の画像座標は重心演算によって求めたが、ステレオマッチングでの対応点検出は画素単位であり、スポット光の重心の近傍 4pixel は正しい対応点であるとして精度評価を行った。正しい対応点検出が行われた点と判定された点に対して、実際に測定対象を置いた位置とステレオマッチングにより得られた距離情報との間の差について、最大誤差および平均誤差を求めた。その結果、マッチング精度は 98%、最大誤差は 18.9mm、平均誤差は 8.46mm であった。画像中の場所にもよるが、対応点が 1pixel ずれることによって距離情報は 8~9mm ずれる。

4.3.2 投影パターンの周波数による測定結果の変化

投影パターンの周波数によって三次元計測結果がどのように変化するのか確認するために、投影パターンを作成する過程において作成した二値のランダムパターンを投影パターンとして測定を行った。二値のランダムパターンを使用した場合、投影パターンがカメラのナイキスト周波数を越える高周波数成分を含むため、折り返し雑音が生じてしまい左右の画像で正しい対応点検出を行うことができないと考えられる。図 4.9 に測定結果のレンジマップを示す。ステレオマッチングにおけ

表 4.2 投影パターンの周波数による測定結果の変化

	マッチング精度
提案したランダムパターン	98%
二値のランダムパターン	89%

るウィンドウサイズなど、投影パターン以外は提案手法と同じ条件で測定を行ったが、マッチング精度は 89%となり、投影パターンの周波数を最適化することにより 9%のマッチング精度の改善が得られた。これは投影パターンの高周波数成分の影響を小さくしたことにより、ミスマッチングを引き起こすだけの折り返し雑音が生じなかったためであると考えられる。

4.3.3 ウィンドウサイズによる測定結果の変化

投影パターンは提案手法で作成したものをそのまま使用し、ウィンドウサイズを変化させることによって平板の三次元計測結果の変化を調べた。測定環境は平板の測定と同じ条件においておこなった。図 ??にウィンドウサイズを5×5から15×15[pixel]まで変化させたときの三次元計測結果のレンジマップを示す。5×5[pixel]のウィンドウを用いた場合は対応点の誤検出による距離情報のばらつきが数多く見られる他、ウィンドウ内の信号値のばらつきが小さいため対応点検出が行われなかった点が見られるのに対し、ウィンドウが大きくなるにつれ、測定した距離情報のばらつきが少なく、また対応点検出が行われない点が少なくなっているのが見てとれる。

ウィンドウサイズを変化させた場合のマッチング精度、およびそのウィンドウサイズに対する投影パターンの自己相関のS/Nについて表 4.3 に示す。ウィンドウサイズが大きくなるにつれてマッチング精度は上がるが、13×13[pixel]より大きいウィンドウに対してはマッチング精度に変化は見られなかった。また、投影パターンの自己相関のS/Nが2以上となるウィンドウサイズに対しては、98%のマッチング精度を得ることができた。

4.3.4 円錐の測定結果

平板の他に、オクルージョンの存在する物体として円錐の測定を行った。図 4.11(a)に円錐の左右カメラ画像、(b)にステレオマッチングに用いたパターンを投影したときの左右カメラ画像(c)に測定結果のレンジマップを示す。円錐の両側のエッジの部分は片方のカメラから見るのできないオクルージョンの部分であり、実際には対応点は存在しないため、対応点の誤検出の原因となる。コンピュータでステレオマッチングを行う際、対応点の存在は評価関数の最大・最小で判断されるため、

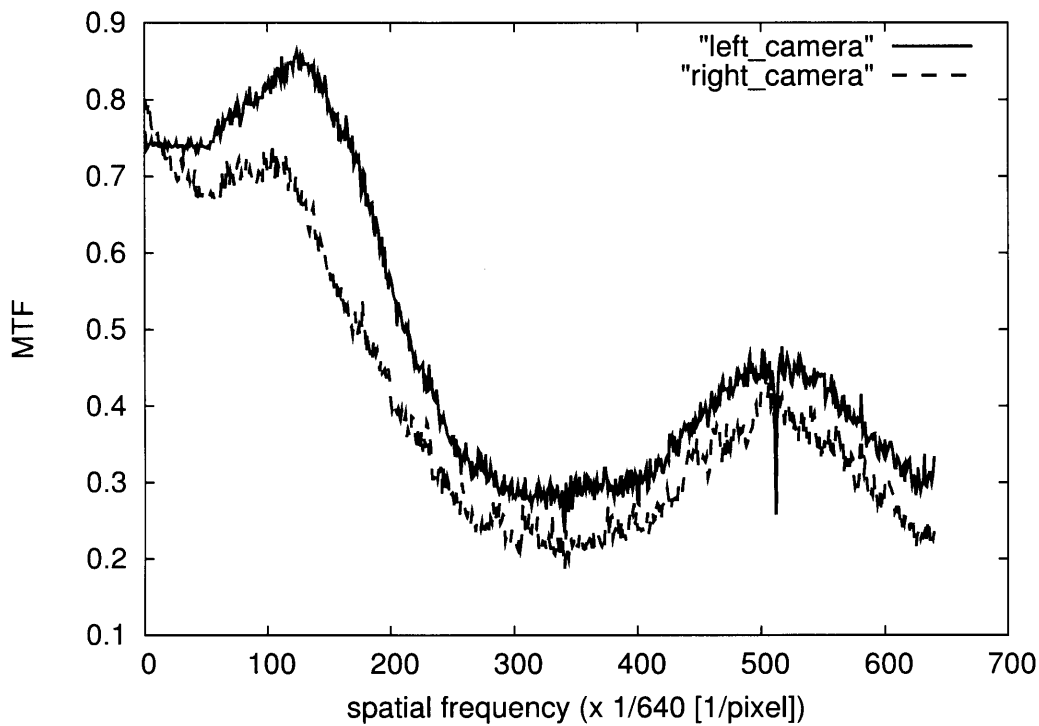
表 4.3 ウィンドウサイズを変化させた場合のマッチング精度

ウィンドウサイズ	マッチング精度	S/N
5 × 5[pixel]	56%	1.11
7 × 7[pixel]	78%	1.38
9 × 9[pixel]	91%	1.52
11 × 11[pixel]	96%	1.94
13 × 13[pixel]	98%	2.19
15 × 15[pixel]	99%	2.60

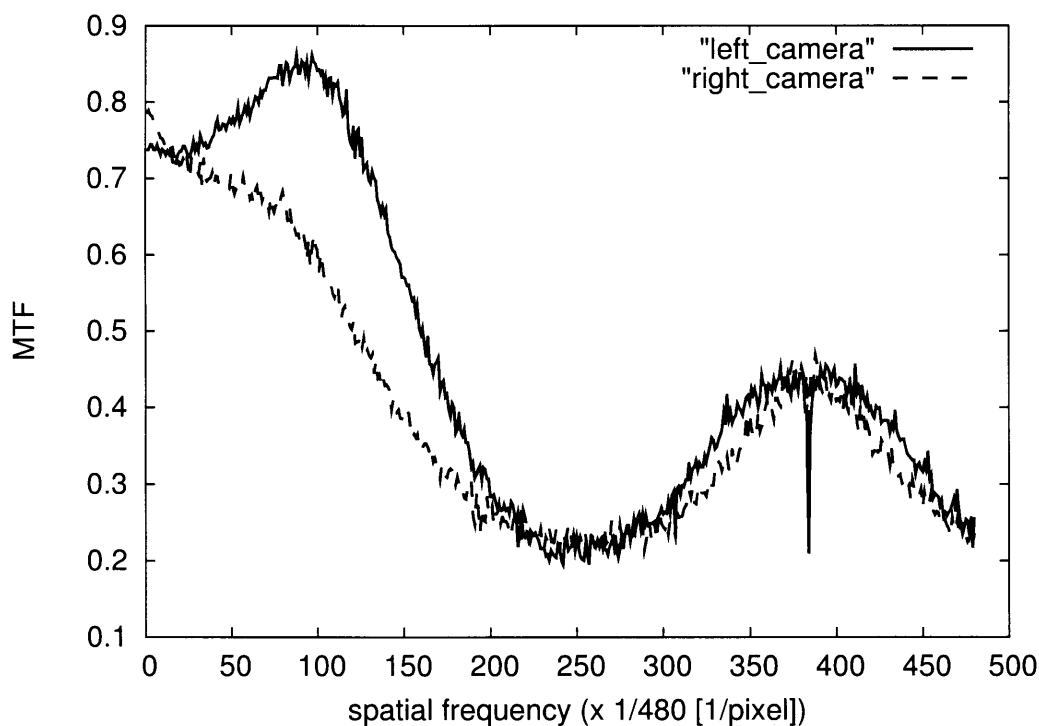
オクルージョン部分を自動的に判別することは非常に困難である。図 4.12(a) に円錐の測定結果の x-z 断面図、(b) に y-z 断面図を示す。これらの結果より、円錐の両側では対応点の誤検出により誤った距離情報が計算されてしまっているのがわかる。オクルージョン部分を自動的に検出するには、左画像から右画像への対応と右画像から左画像への対応を共に求め、これらが一致する部分のみ距離情報を求める dual-matching[26] や、カメラの数を二台以上に増やすマルチステレオ法 [6] などによって対応点検出を行う必要がある。

4.3.5 球の測定結果

図 4.13(a) に球の左右カメラ画像、(b) にパターンを投影したときの左右カメラ画像、(c) に測定結果のレンジマップを示す。さらに、図 4.14(a) に測定結果の x-z 断面図、(b) に y-z 断面図を示す。左右のエッジにおいて円錐の場合と同様にオクルージョンが存在するため、対応点を誤検出してしまっている。また、球の場合、今回の実験装置におけるプロジェクタとカメラの位置関係から投影光があたっていない場所がカメラで撮影されているが、この領域には特徴がないため、対応点を検出することができなくなっている。また、レンジマップ中程の球の表面で対応点検出が正しく行われていないが、これはプロジェクタから出力された光が球の表面で強く反射したためだと思われる。今回測定の対称物体としたのは真っ白な発泡スチロール製の球であり、光の表面反射率が比較的高いものだからである。光の反射によって画像中の信号値が飽和し、投影パターンをそのまま正確に撮影することができなかったためであると考えられる。



(a)



(b)

図 4.1 撮像系の周波数特性 (a) 水平方向 (b) 垂直方向

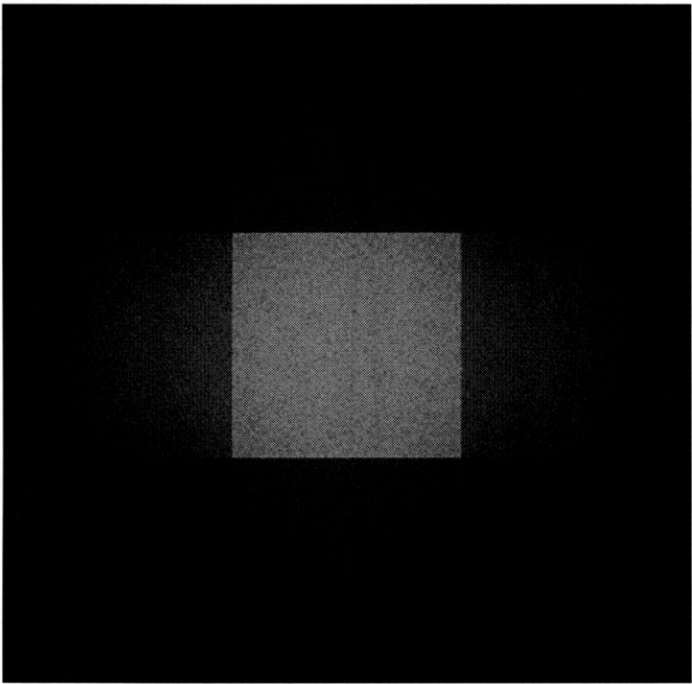


図 4.2 投影パターンの周波数成分

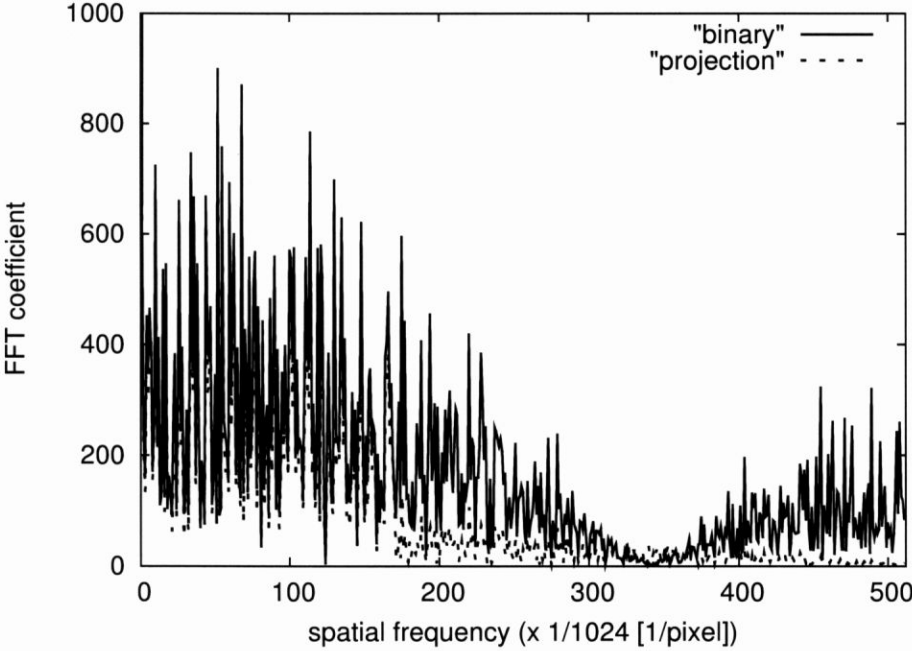


図 4.3 投影パターンと二値ランダムパターンの周波数成分

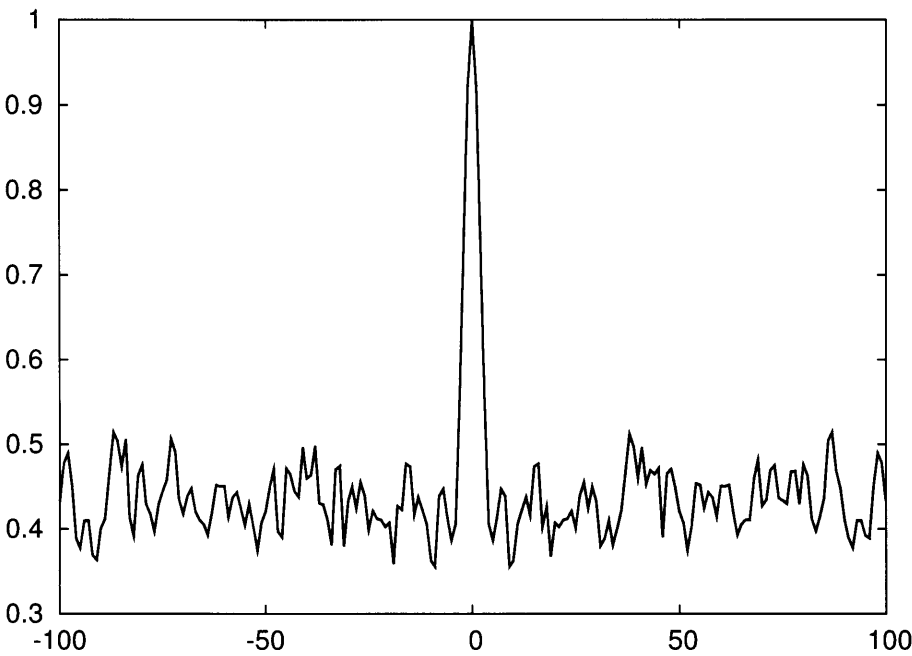


図 4.4 投影パターンの自己相関 (27×27 の場合)

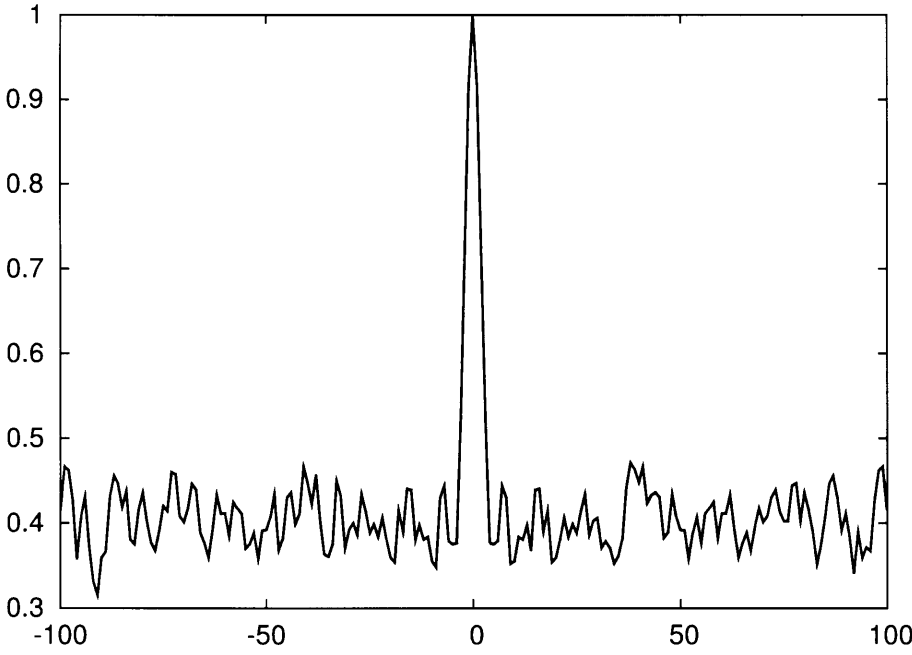


図 4.5 投影パターンの自己相関 (29×29 の場合)

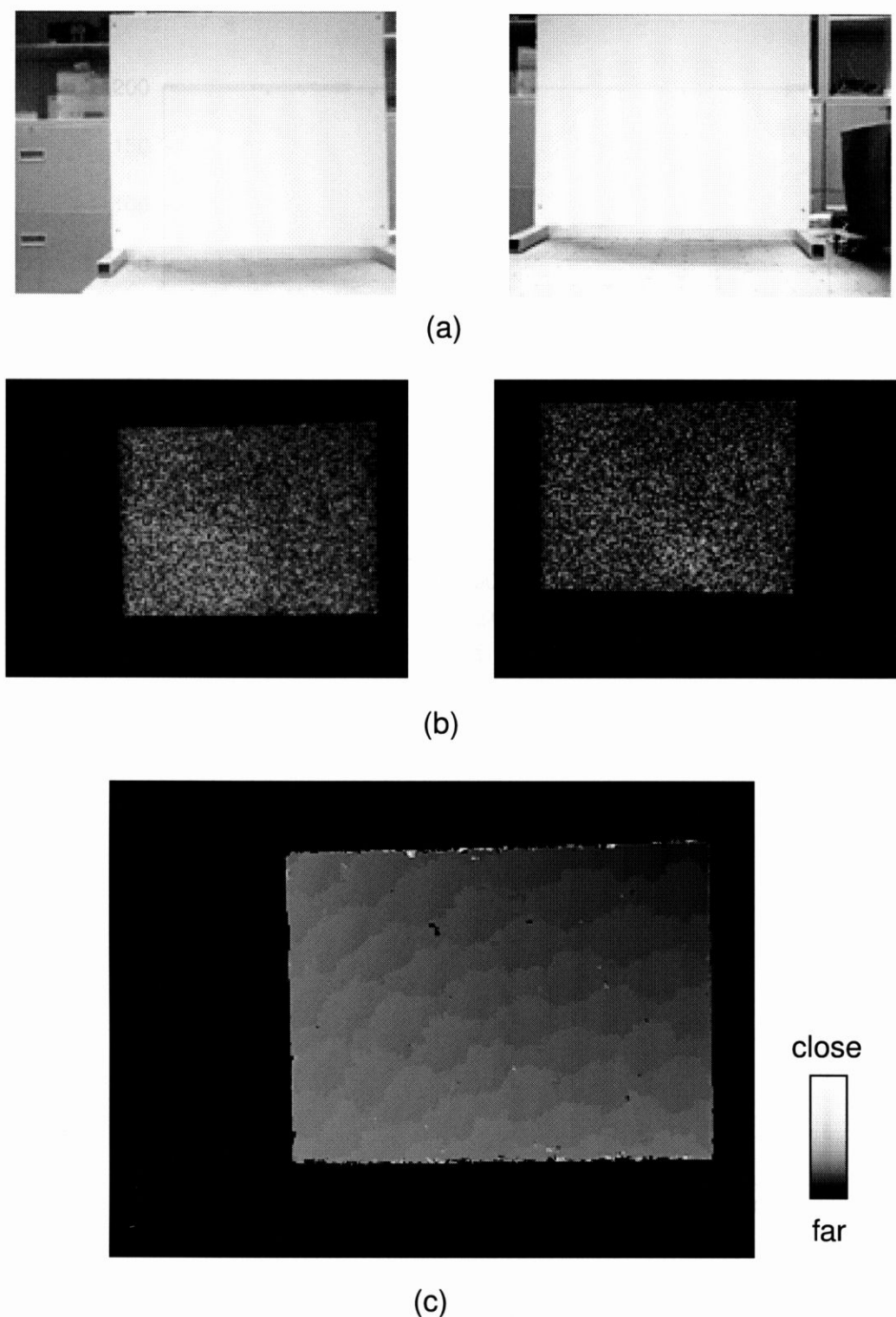


図 4.6 平板の (a) 左右カメラ画像 (b) 投影光を当てたときの左右カメラ画像 (c) レンジマップ

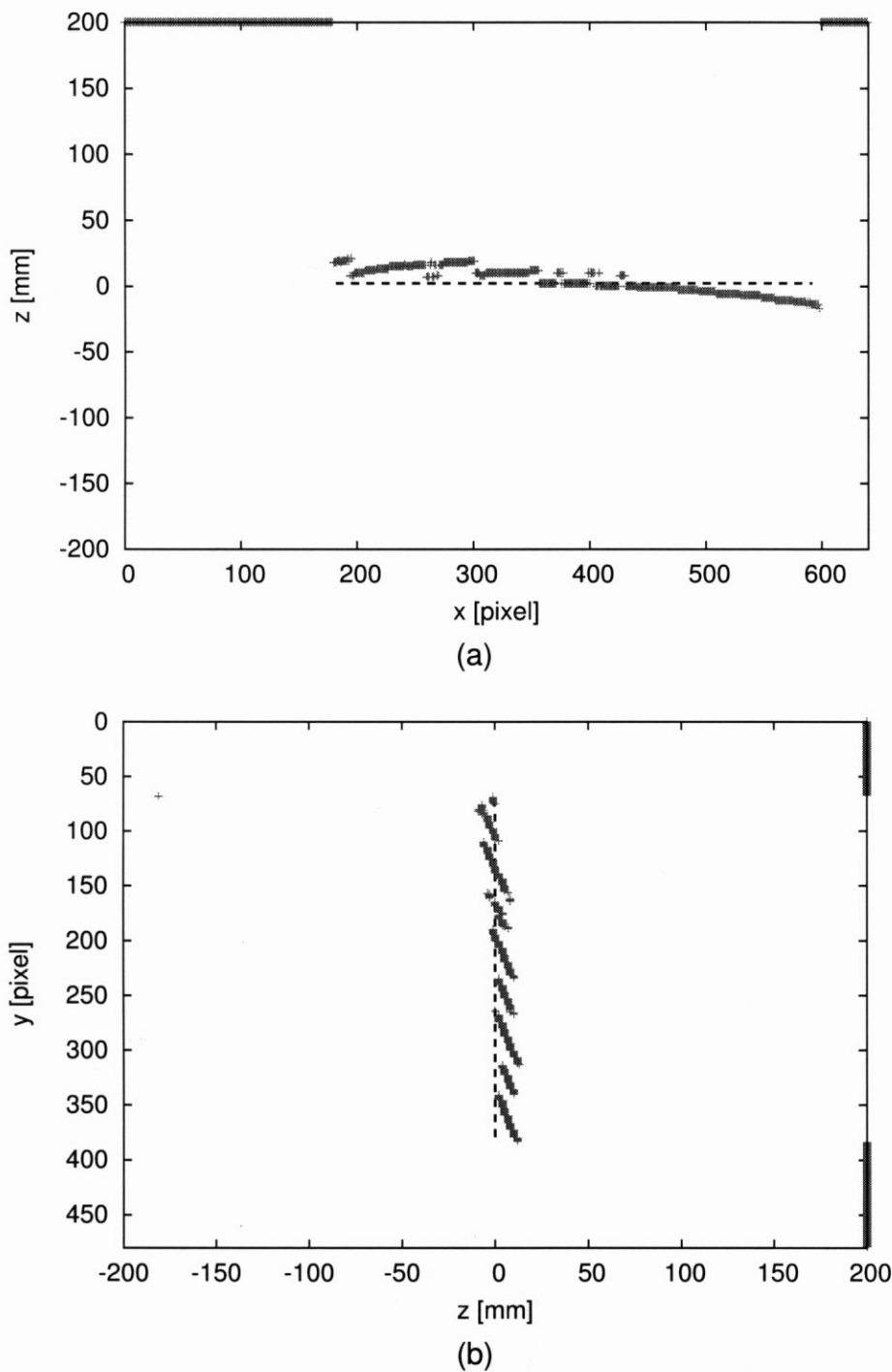


図 4.7 平板の測定結果の断面図 (a)x-z 平面 (b)y-z 平面

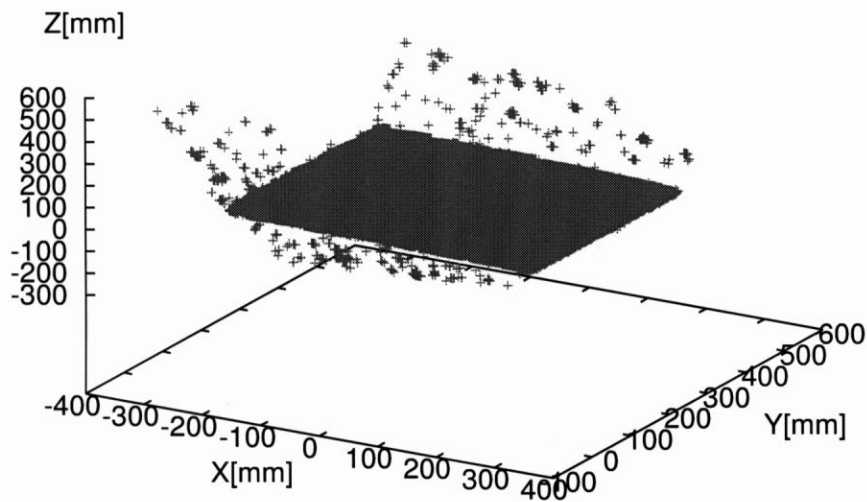


図 4.8 平面の測定結果の三次元プロット

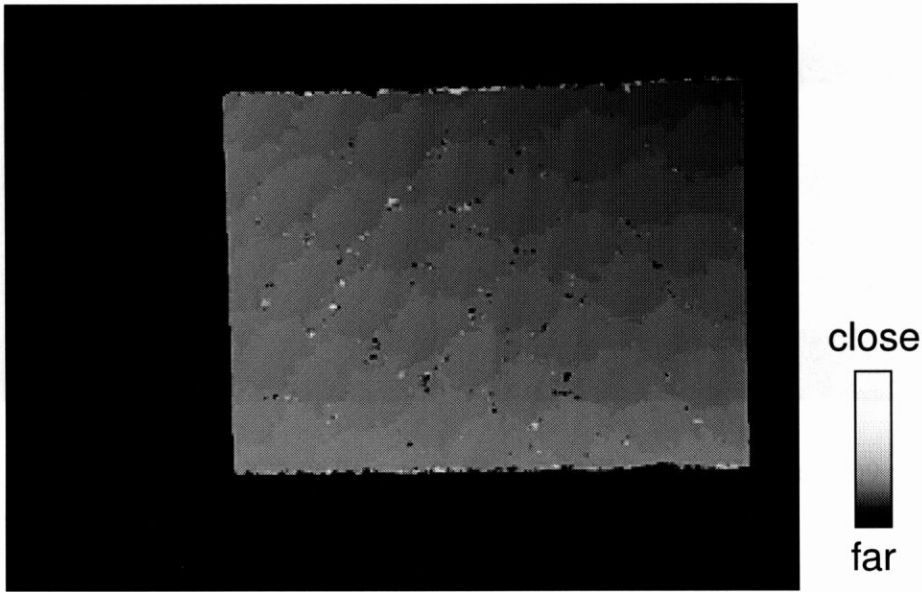


図 4.9 二値のランダムパターンを投影光として使用した場合

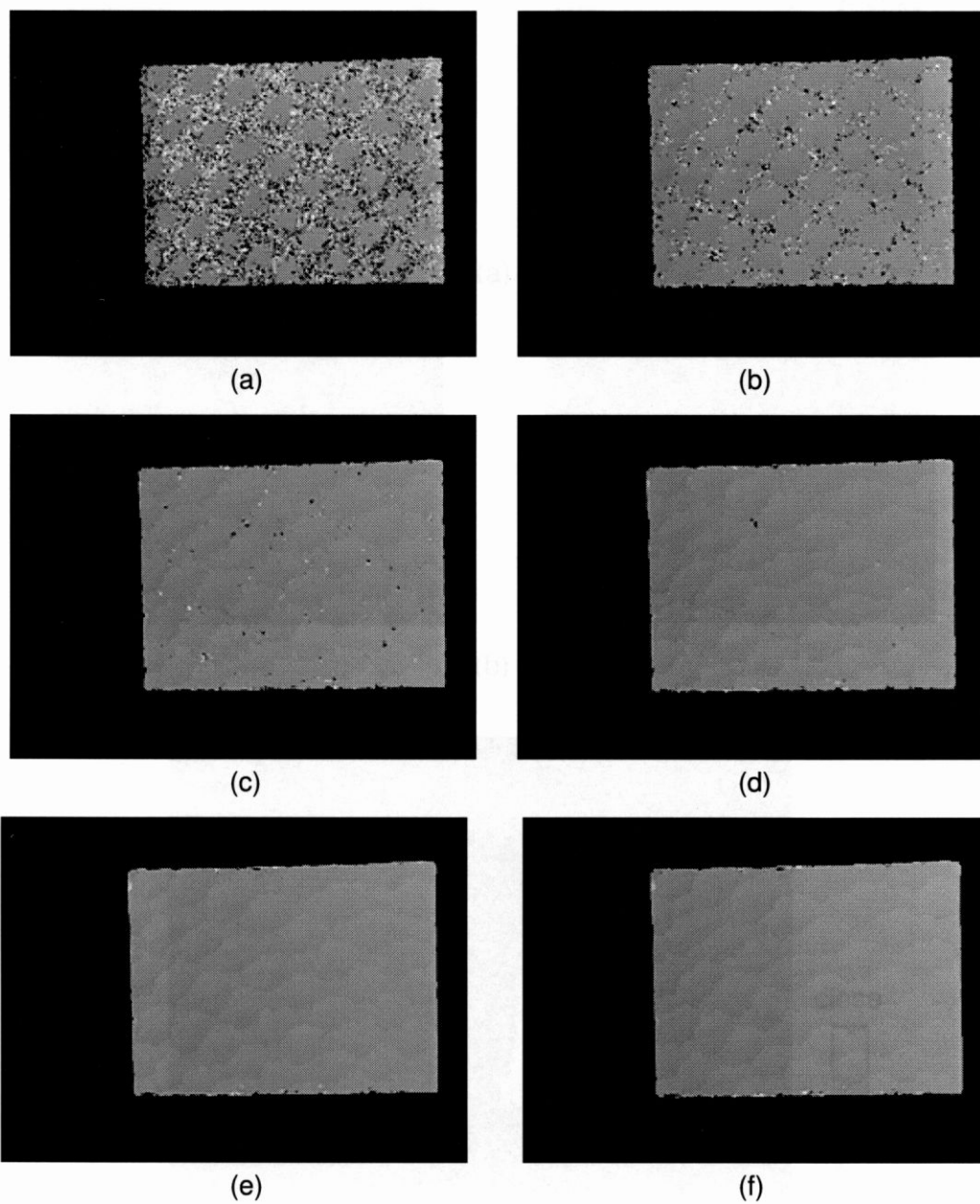
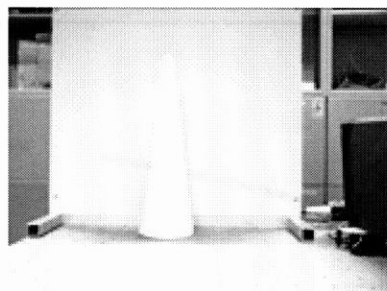
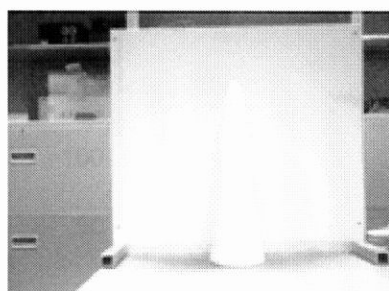
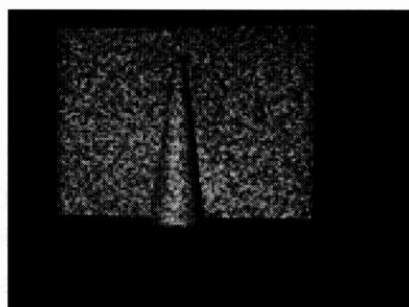
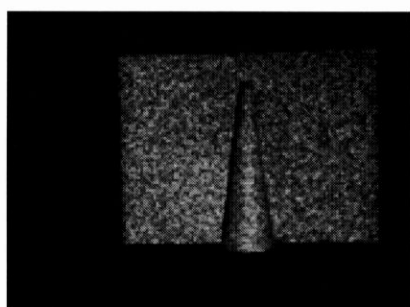


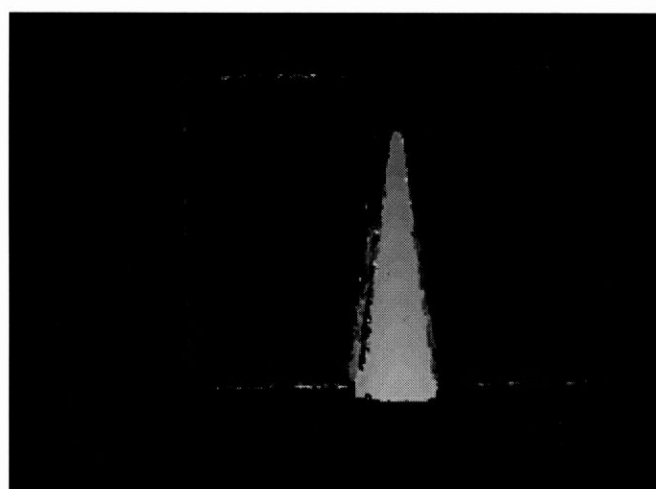
図 4.10 ウィンドウサイズを変化させた場合の結果 (a) 5×5 (b) 7×7 (c) 9×9 (d) 11×11 (e) 13×13 (f) 15×15



(a)



(b)



(c)

図 4.11 円錐の (a) 左右カメラ画像 (b) 投影光を当てたときの左右カメラ画像 (c) レンジマップ

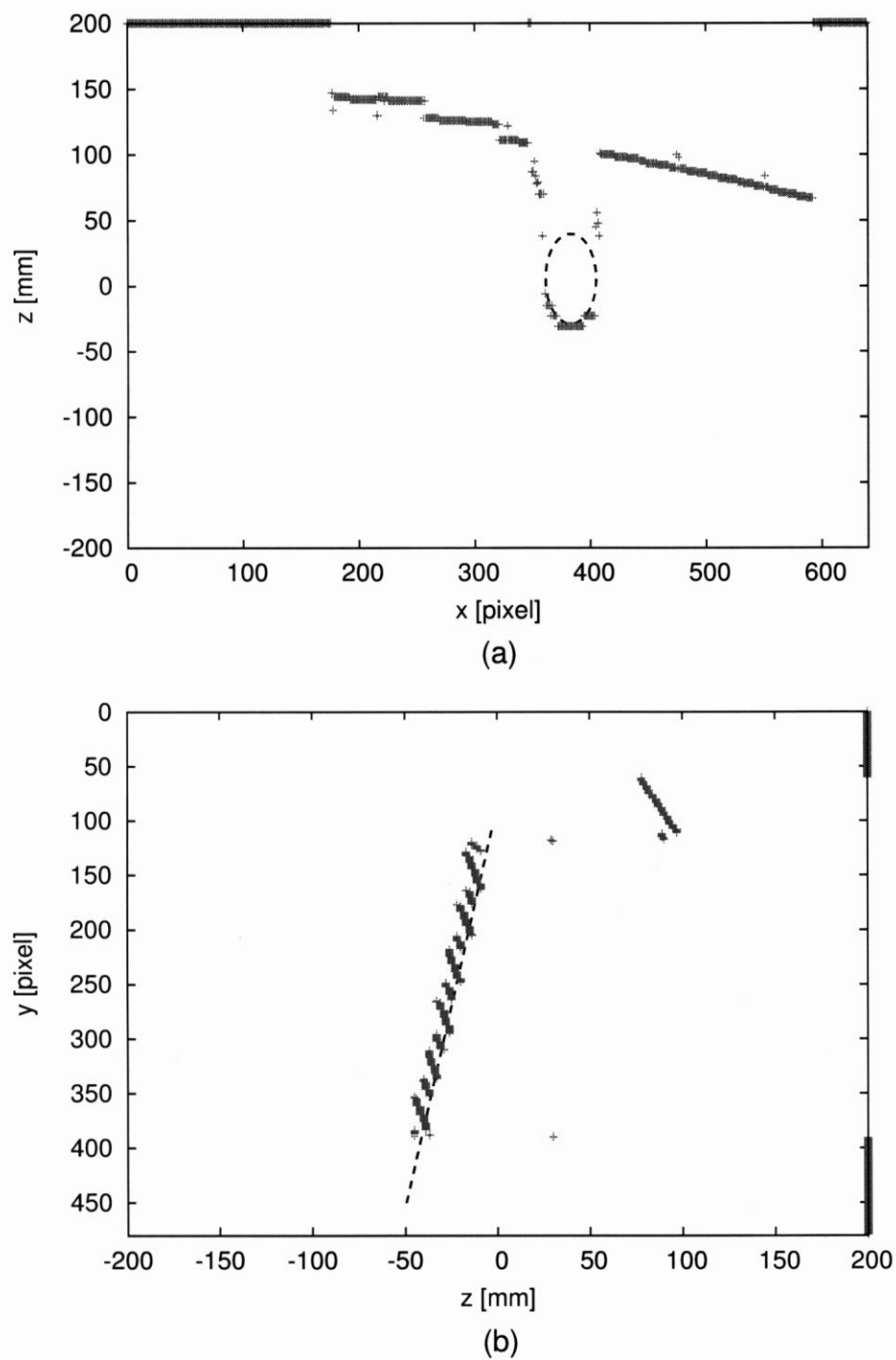
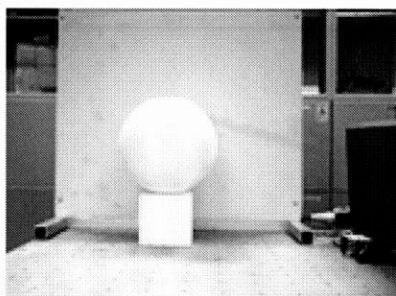
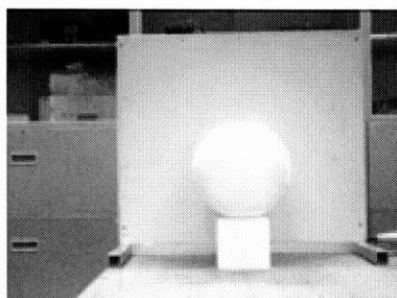
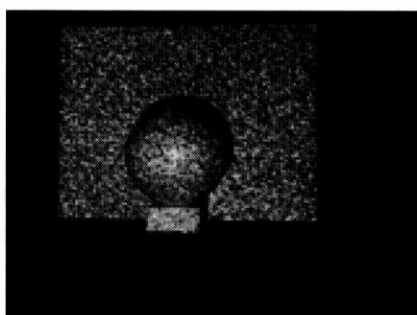
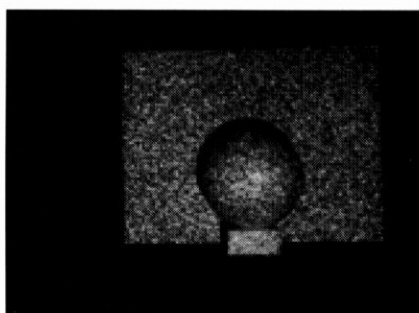


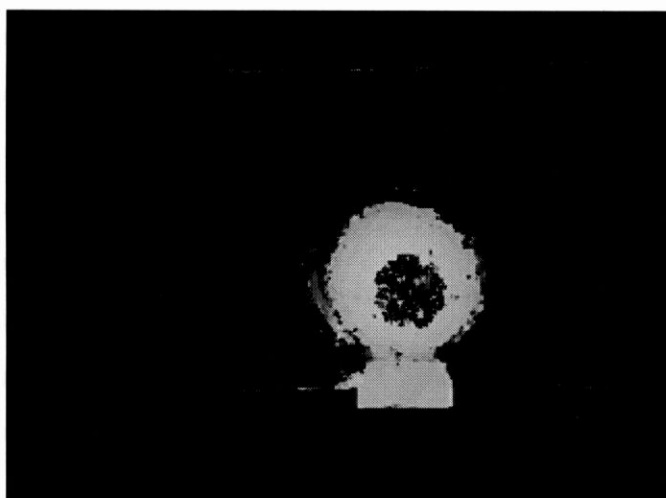
図 4.12 円錐の測定結果の断面図 (a)x-z 平面 (b)y-z 平面



(a)



(b)



close



far

(c)

図 4.13 球の (a) 左右カメラ画像 (b) 投影光を当てたときの左右カメラ画像 (c) レンジマップ

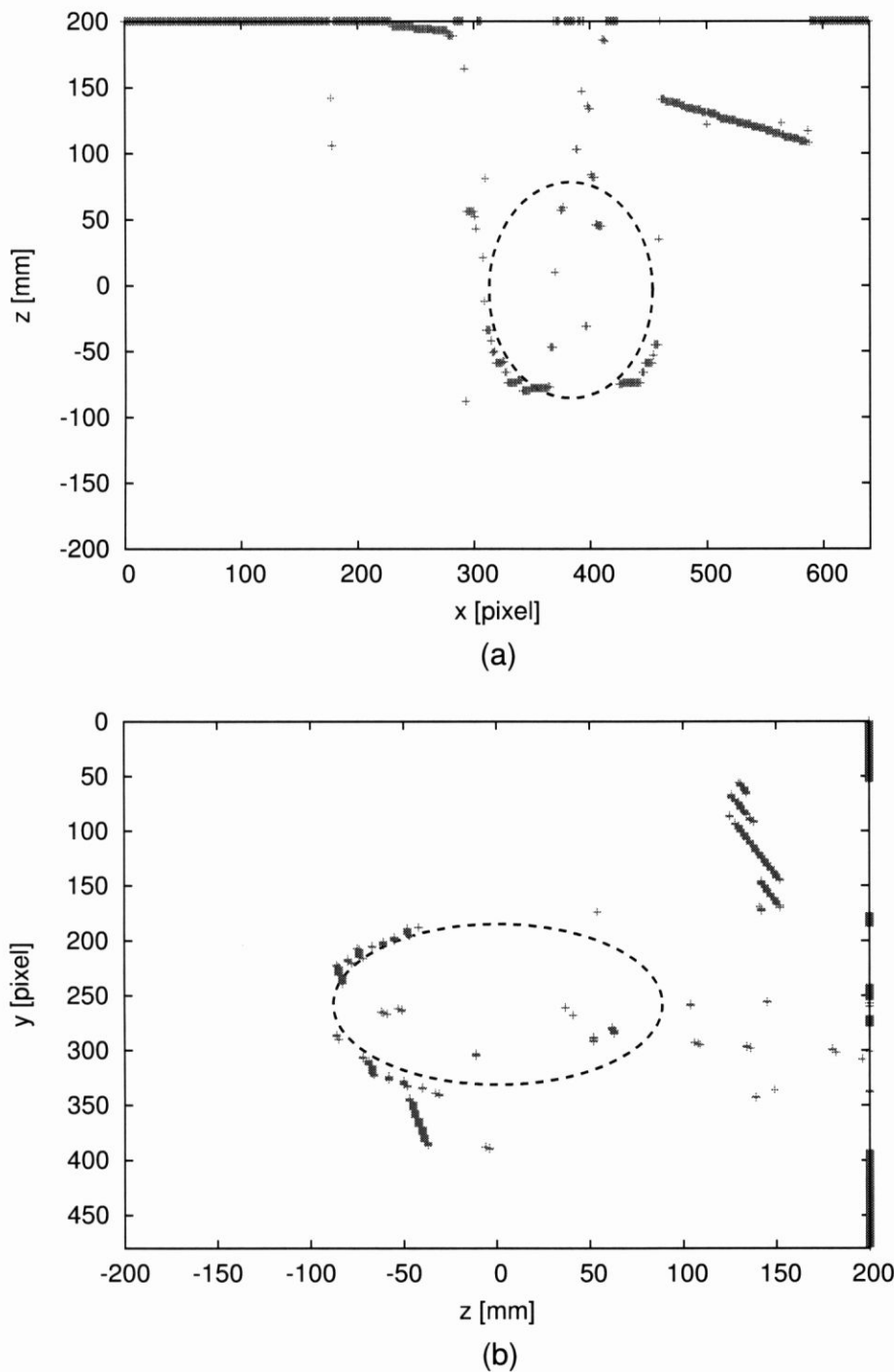


図 4.14 球の測定結果の断面図 (a)x-z 平面 (b)y-z 平面

第5章

結論

本研究では投影光として二次元的なランダムパターンを用いる光投影法とステレオ法とを合わせた三次元計測手法を提案した。ステレオ法による三次元計測には従来、次のような問題点があった。

- ステレオ法では画像中の対応点を検出することによって距離計測を行うが、対象物体表面に特徴量が少ない場合、対応点を検出することは非常に困難であり、高精度な三次元計測が不可能である。
- 領域ベースのステレオ法ではステレオマッチングにおけるウィンドウの大きさが三次元計測の精度を左右する重要なパラメータであるが、これを適切な大きさに設定するための有効な方法がない。精度を上げるためには反復処理を必要とするため、ハードウェアを使用したリアルタイムでの処理に不向きである。

前者に対しては光投影法とステレオ法とを合わせて用いることによって高精度な三次元計測を可能とする手法が提案されてきた。しかし、1シーンの三次元情報を得るために複数フレームの画像を必要としたり、対応点の探索のために複雑な計算を必要としたため、高解像度の三次元情報を高速に得ることが困難であった。本研究では、これらの問題点に対して次のような解決法を提案した。

- 1フレームのステレオ画像対のみから正確な対応点の検出を行うために撮像系の周波数特性に基づいてできる限り細かく、かつ復元可能な投影パターンを作成した。
- 二次元的なパターンを作成し、複雑な計算を行うことなく二次元方向に対する対応点探索を正確に行うことを可能とした。
- 投影パターンの性質を利用し、自己相関を調べることによってステレオマッチングにおけるウィンドウサイズを最適化した。

以上によって 1000mm 先の平板に対してマッチング精度 98%での対応点の検出を実現した。投影パターンの周波数を最適化する前のマッチング精度は 89%であり、周波数の最適化により 9%のマッチング精度の向上が得られた。また、提案手法では簡単な計算のみを用い、かつ 1 フレームの画像から 1 シーンの三次元情報を取得することが可能であり、ハードウェアを用いた高速処理を容易に導入することができる。

今後の課題としては、今回投影パターンの周波数およびウィンドウサイズによりマッチング精度が変化することの確認を行ったが、他にもウィンドウサイズが距離分解能に及ぼす影響について検討する必要がある。さらに、オクルージョンの検出が可能なステレオ画像処理の手法の開発があげられる。また、提案手法では簡単な計算のみで高精度な対応点の検出を可能としたが、これを用いてリアルタイムでの三次元情報の取得を可能とするハードウェアの開発があげられる。また、パターン投影をオン・オフしながら測定を行うことによって測定シーンの情報を取得し、テクスチャマッピングによってリアリティのある画像を生成することなどもあげられる。

参考文献

- [1] Takeo Kanade, Atsushi Yoshida, Kazuo Oda, Hiroshi Kano and Masaya Tanaka, “A Stereo Machine for Video-rate Dense Depth Mapping and Its New Applications,” in *Proc. of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 196 - 202, Jun. 1996.
- [2] Ahmad Darabiha, Jonathan Rose, W. James MacLean, “Video-Rate Depth Measurement on Programmable Hardware,” in *Proc. of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 1, pp. I-203 - I-210, Jun. 2003.
- [3] Robert Sablatnig, Srdan Tosovic and Martin Kampel, “Next View Planning for a Combination of Passive and Active Acquisition Techniques,” in *Proc. of the Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp. 62 - 69, Oct. 2003.
- [4] Sing Bing Kang, Jon. A. Webb, C. Lawrence Zitnick, Takeo Kanade, “A Multibaseline Stereo System with Active Illumination and Real-time Image Acquisition,” in *Proc. of the Fifth International Conference on Computer Vision*, pp. 1071 - 1076, Jun. 1995.
- [5] Daniel Scharstein, Richard Szeliski, “High-Accuracy Stereo Depth Maps Using Structured Light,” in *Proc. of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 1, pp. I-195 - I-202, Jun. 2003.
- [6] Masatoshi Okutomi and Takeo Kanade, “A multiple-baseline stereo,” *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 15, No. 4, pp. 353 - 363, April 1993.
- [7] Toshinobu Sugiyama, Shinichi Yoshimura, Ryoji Suzuki, Hirofumi Sumi, “A 1/4-inch QVGA Color Imaging and 3-D sensing CMOS Sensor with Analog Frame Memory,” *ISSCC Dig. of Tech. Papers*, pp. 434-435, Feb. 2002.
- [8] Yusuke Oike, Makoto Ikeda, Kunihiro Asada, “Design and Implementation of Real-Time 3-D Image Sensor with 640×480 Pixel Resolution,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 39, No. 4, pp. 622 - 628, Apr. 2004.
- [9] 井口 征士, 佐藤 宏介, “三次元画像計測,” 昭晃堂, 1980.

- [10] 岩川正人, 田島譲二, 本山純四郎, “Rainbow Range Finder による距離計測実験,” 映像情報メディア学会技術研究報告, Vol. 26, No. 41, pp. 37 - 40.
- [11] Takeo Miyasaka, Kazuhiro Kuroda, Makoto Hirose and Kazuo Araki, “High Speed 3-D Measurement System Using Incoherent Light Source for Human Performance Analysis,” *XIXth Congress of the international society for photogrammetry and remote sensing (ISPRS)*, Amsterdam, The Netherlands, 16-23, July 2000.
- [12] 丸山 稔, 阿部 茂, “ランダムな切断を持つスリットパターン投影による形状計測,” 電子情報通信学会論文誌, Vol. J71 - D, No. 21, pp. 2569 - 2603, 1998 年 12 月
- [13] Yusuke Yachide, Yusuke Oike, Makoto Ikeda, Kunihiro Asada, “Real-Time 3-D Measurement System Based on Light-Section Method Using Smart Image Sensor,” in *Proc of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pp. 1008 - 1011, Sep. 2005.
- [14] Takeo Kanade, Peter Rander, P.J. Narayanan, “Virtualized Reality : Constructing Virtual Worlds from Real Scenes,” *IEEE Multimedia*, pp. 34 - 47, 1997.
- [15] Ryohei Miyagawa and Takeo Kanade, “CCD-Based Range-Finding Sensor,” *IEEE Trans. on Electron Devices*, Vol. 44, No. 10, pp. 1648 - 1652, Oct. 1997.
- [16] Masahiro Kawakita, Keigo Iizuka, Haruhito Nakamura, Itaru Mizuno, “High-definition real-time depth-mapping TV camera: HDTV Axi-Vision Camera,” *Optics Express*, Vol. 12, No. 12, pp. 2781 - 2794, 2004.
- [17] Masao Shimizu and Masatoshi Okutomi, “Precise Sub-Pixel Estimation on Area-Based Matching,” in *Proc. of IEEE International Conference on Computer Vision*, Vol. 1, pp. 90 - 97, July 2001.
- [18] 米本 和也, “CCD/CMOS イメージ・センサの基礎と応用,” CQ 出版, 2004.
- [19] 辻 三朗, 徐 剛, “三次元ビジョン,” 共立出版, 1998.
- [20] Nicholas Ayache and Charles Hansen, “Rectification of Images for Binocular and Trinocular Stereovision,” in *Proc. of International Conference on Pattern Recognition*, Vol. 1, pp. 11 - 16, Nov. 1998.

-
- [21] Takeo Kanade and Masatoshi Okutomi, "A Stereo Matching Algorithm with an Adaptive Window: Theory and Experiment," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 16, No. 9, pp. 920 - 932, Sep. 1994.
- [22] Masatoshi Okutomi and Takeo Kanade, "A Locally Adaptive Window for Signal Matching," *International Journal of Computer Vision*, Vol. 7, No. 2, pp. 143 - 162, 1992.
- [23] Rober Y. Tsai, "A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-shelf TV Cameras and Lenses," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No.4, pp.323 - 344, Aug. 1987.
- [24] O. D. Faugeras, "Three-Dimensional Computer Vision : A Geometric Viewpoint," MIT Press, Cambridge, MA, 1993.
- [25] Eric G. Stevens and James P. Lavine, "An Analytical, Aperture and Two-Layer Carrier Diffusion MTF and Quantum Efficiency Model for Solid-State Image Sensors," *IEEE Trans. Electron Device*, Vol.41, No. 10, pp. 1753 - 1760, Oct. 1994.
- [26] Chienchung Chang, Shankar Chatterjee, Paul R. Kube, "On an analysis of static occlusion in stereo vision," in *Proc. of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 722 - 723, Jun. 1991.

本研究に関する発表

[1] 山本 一統、池田 誠、浅田 邦博、“ランダムパターン光投影によるステレオ視三次元計測手法,” 映像情報メディア学会 技術研究報告, vol.29, no.67, pp.13-16, 2005 年 11 月.

謝辞

本研究を進めるにあたり、日頃から暖かい御指導を頂き、また良好な研究環境を与えて下さいました浅田邦博教授に深く感謝致します。また、本研究を進めるにあたり、適切な御助言をして頂きました池田誠助教授に心から感謝致します。

本研究を進めるにあたり、数多くの御助言、御支援を下さいました助手の佐々木昌浩氏、鄭若丹彡氏に深く感謝致します。

本研究を進めるにあたり、研究内容に対して数多くの貴重な御意見を下さいました浅田研究室OBの大池祐輔氏(ソニー(株))に深く感謝致します。

日頃の研究活動においてさまざまな相談を聞いて頂き、数多くの貴重な御意見を頂いた吉田浩章氏、飯塚哲也氏、谷内出悠介氏、新宅宏彰氏に深く感謝致します。

日頃から研究活動を共にし、多くの助言を頂いた田島貴明氏、Dia Kin Hooi氏、山内裕史氏、村田泰亮氏、他研究室の皆様に深く感謝致します。