

## 6.3 距離検出ノイズの低減とモデリング応用

3次元オブジェクト生成では、被写体の形状計測データやテクスチャをもとに、モデリングやレンダリング、テクスチャマッピングなどが行われ、これらは一般的に時間のかかる作業であり、撮影対象も静止した被写体に限定される場合が多い。これに対し、Axi-Vision カメラでは、高速かつ多画素な距離検出が可能なため、形状計測時間の短縮や動く被写体のリアルタイムモデリングが期待できる。さらに、被写体映像と同じサイズの距離画像が得られ、画素単位でテクスチャと距離値が対応しているため、テクスチャマッピング作業の効率化にも大きなメリットがある。

しかし、現在 Axi-Vision カメラの距離検出分解能は 17 mm（カメラと被写体間の距離 2 m、光の強度変調周波数 45 MHz の場合）[6]であり、人物の顔などの細かい形状検出は困難である。また、カメラより出力される距離値は相対的な奥行き距離であるため、形状計測のためには絶対的な距離値への変換作業が必要となる。

そこで本節ではこれらの課題に対し、画像蓄積効果によるノイズ低減効果を検討し、本距離検出方式に適したフィルター方式を新たに提案し、距離検出分解能の向上を目指すとともに、距離検出特性の補正による絶対的な距離値の算出を行う。最後に、本カメラを用いたモデリング技術の CG 合成や特殊映像効果への応用の可能性を検証する。

### 6.3.1 画像蓄積による分解能向上

本カメラの距離検出ノイズの主な要因は、I.I.や CCD カメラのショットノイズである。これらのランダムノイズは、画像蓄積により低減され、距離検出分解能が向上できる。この距離検出分解能の向上効果を、10 mm の段差形状を持つ被写体で確かめた。図 6.13 のグラフは、横軸を画面水平方向、縦軸を出力距離値とし、図 6.13(a)は蓄積がない場合、図 6.13(b)と(c)はそれぞれ 10 フレーム蓄積、及び 100 フレーム蓄積の場合の距離検出結果である。蓄積が無い場合は被写体の 10 mm の段差形状は検出できないが、蓄積フレーム数が増加するとともに、形状が明瞭に検出できるようになる。測定値の標準偏差  $\delta$  を求め、 $3\delta$  に相当する値を距離検出分解能として測定した結果、蓄積が無い場合は距離検出分解能が 17 mm であるのに対し、10 フレーム蓄積(映像取得時間 0.3 s)で 4.7 mm、100 フレーム蓄積(映像取得時間 3.3 s)で 2.3 mm に向上した。

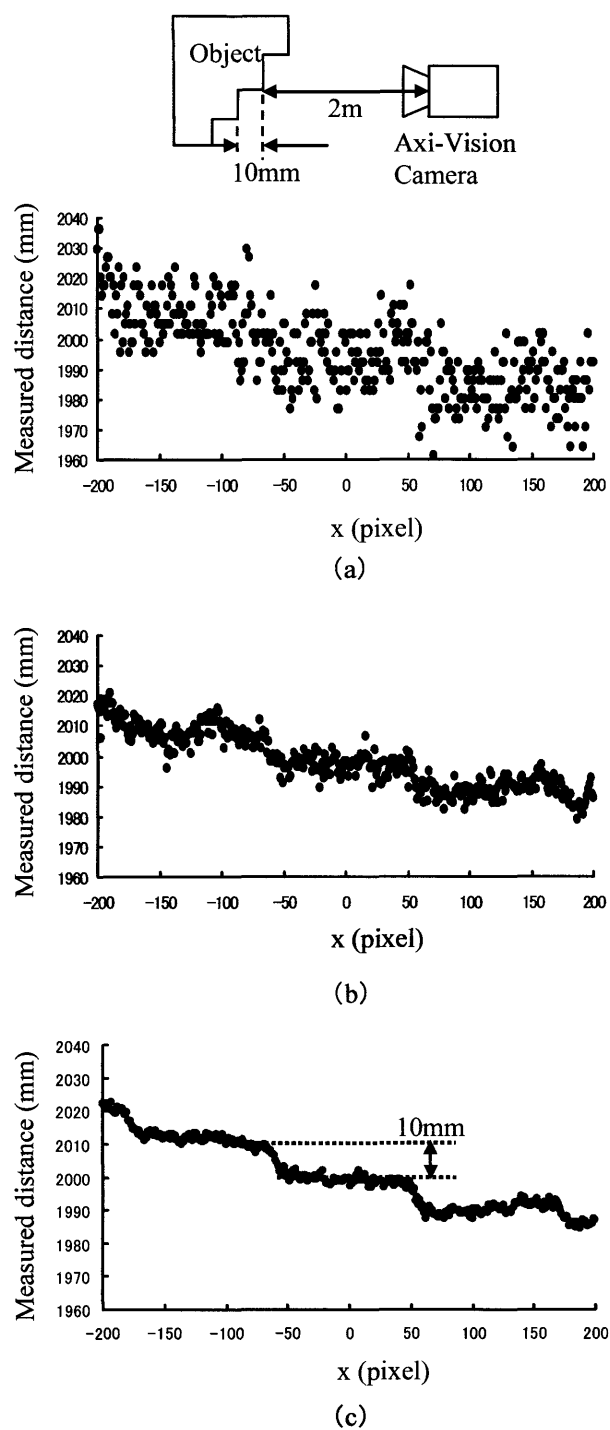


図 6.13 段差形状の被写体の画像蓄積による距離検出結果 (a) 蓄積が無い場合 (b) 10 フレーム蓄積の場合 (c) 100 フレーム蓄積の場合

図 6.14 に画像蓄積による人物のモデリング結果を示す。カメラより距離 1.3 m の人物を撮影し(図 6.14(a))、出力距離画像を VTR に収録後、パソコンに画像データを取り込み、16 ビットメモリに 300 フレーム加算平均した。得られた形状データ(図 6.14(b))

～(d))では、鼻や口、眼もとなどの凹凸が検出でき、画像蓄積効果により 3 次元モデリングに有効な距離検出分解能が得られることが示された。また図 6.14(e)は被写体のカラー映像をテクスチャとしてマッピングした結果である。カラー映像と距離画像が画素単位で対応しているためテクスチャマッピングが容易であるメリットがあった。

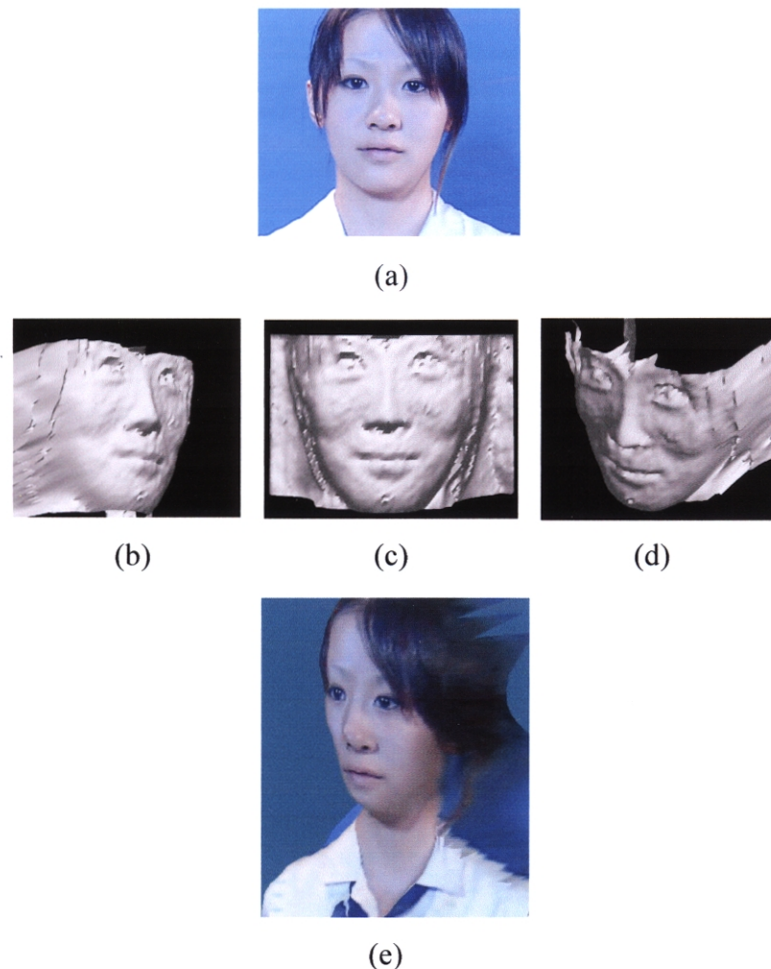


図 6.14 Axi-Vision カメラの画像蓄積による形状計測例 (a) 撮影被写体、距離画像を 300 フレーム蓄積し得られた形状データを (b) 左下、(c) 正面、(d) 右上方向より観察した 3 次元形状データ。(e) テクスチャマッピング画像

しかし、このような単なる画像蓄積では、大容量のメモリが必要であるとともに、画像数が多い場合にはメモリが飽和し実用的ではなく、被写体も数秒間静止する必要がある。Axi-Vision カメラの特徴であるリアルタイム性を活かすには、動画像にも対応できるフィルター処理が望ましい。そこで、次節では、本距離検出方式に適したノイズ低減法を提案し、その効果を調べるとともに、検出データから絶対的な距離値への変換を検討する。

### 6.3.2 ノイズ低減手法の提案

従来、映像のノイズ低減には、ノイズリデューサーが使用され[13,14]、その一例であるリカーシブフィルターは、入力画像とフレームメモリ内の画像間の差分を取り、ある係数を乗算後、フレームメモリの画像に加算していくものである。このフィルター処理は、無限回行ってもメモリは飽和せず、また、フィルター係数の制御により、各入力信号のノイズ低減率や低減速度を制御できる。このフィルターを Axi-Vision カメラの出力距離画像に加えることで、ノイズ低減効果は得られるが、本カメラの持つ高速な形状計測機能を最大限に活かすために、より効率的なノイズ低減法を考案する。

#### (1) ノイズ低減方法

本距離検出方式に適したノイズ低減方法として、増加変調光時の映像信号  $V_+$  と減少変調光時の映像信号  $V_-$  に、それぞれに最適なりカーシブフィルター処理を行い、所定の時間内で効率よく距離検出ノイズを低減する手法を提案する(図 6.15)[15,16]。これまで、 $V_+$  と  $V_-$  を交互に取得し距離を算出してきたが、距離検出分解能は各映像信号の SN 比により左右されるため、SN 比が低い方の映像信号を多く蓄積し、重点的にフィルター処理することで、距離画像のノイズを短時間に効率的に低減する。また  $V_+$  と  $V_-$  の各撮影ビデオフレーム数に応じて、最大のノイズ低減率が得られるように各フィルター係数  $n_+$ 、 $n_-$  を決定し、所定フレーム時間内で効率的なノイズ低減を図る。

Axi-Vision カメラの距離検出ノイズ  $\delta_D$  は、第 4 章(4.9)式より、

$$\delta_D \propto \sqrt{\left(\frac{\delta_+}{V_+}\right)^2 + \left(\frac{\delta_-}{V_-}\right)^2} \quad (6.1)$$

で表される。ただし、 $\delta_+$  は増加変調光照射時の映像信号のノイズ成分、 $\delta_-$  は減少変調光照射時の映像信号のノイズ成分である。(6.1)式より、距離検出ノイズ  $\delta_D$  は、増加および減少変調光照射時の映像のノイズ対信号比  $\delta_+/V_+$  と  $\delta_-/V_-$  に依存していることがわかる。



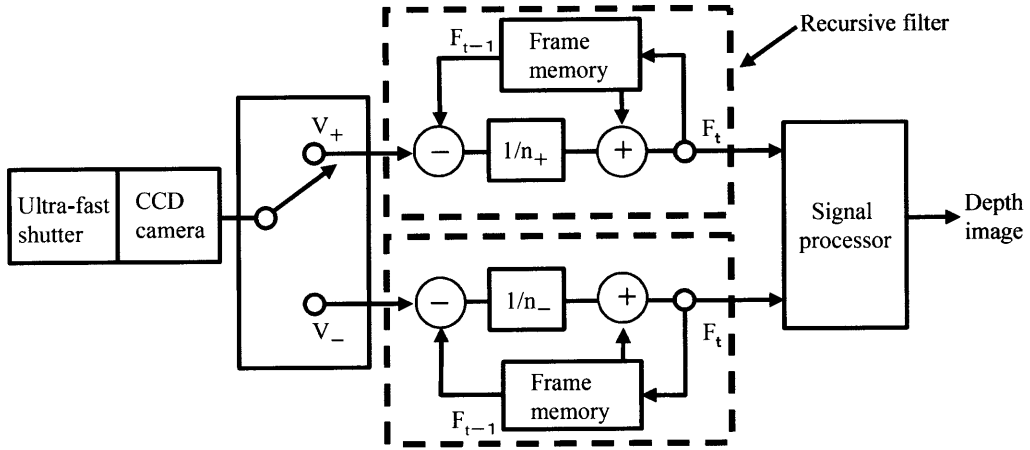


図 6.15 リカーシブフィルターによるノイズ低減法

次に提案方式のノイズ低減率を求める。図 6.15 に示すリカーシブフィルターの出力信号  $F_t$  は

$$F_t = F_{t-1} + \frac{V_{+,-} - F_{t-1}}{n_{+,-}} \quad (6.2)$$

となる。ここで、 $F_{t-1}$  はフレームメモリからの出力信号、 $n_{+,-}$  は乗算係数である。本提案方式のノイズ低減率  $r$  は次式で表される。

$$r = \frac{\delta_D'}{\delta_D} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\delta_+'}{V_+}\right)^2 + \left(\frac{\delta_-'}{V_-}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{\delta_+}{V_+}\right)^2 + \left(\frac{\delta_-}{V_-}\right)^2}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{a_+\delta_+}{V_+}\right)^2 + \left(\frac{a_-\delta_-}{V_-}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{\delta_+}{V_+}\right)^2 + \left(\frac{\delta_-}{V_-}\right)^2}} = \sqrt{\frac{k^2 a_+^2 + a_-^2}{k^2 + 1}} \quad (6.3)$$

$$k = \frac{\frac{\delta_+}{V_+}}{\frac{\delta_-}{V_-}} \quad (6.4)$$

$$a_+ = \sqrt{\frac{1}{2n_+ - 1} \left[ 1 - 2(1 - n_+) \left( 1 - \frac{1}{n_+} \right)^{2(t_+ - 1)} \right]} \quad (6.5)$$

$$a_- = \sqrt{\frac{1}{2n_- - 1} \left[ 1 - 2(1 - n_-) \left( 1 - \frac{1}{n_-} \right)^{2(t_- - 1)} \right]} \quad (6.6)$$

ただし、 $\delta_D'$ はフィルター後の距離信号ノイズ、 $a_+$ および $a_-$ はそれぞれ $V_+$ 、および $V_-$ のノイズ低減率、 $t_+$ および $t_-$ はそれぞれ画像 $V_+$ および $V_-$ の蓄積フレーム数である。

図 6.16 に、本ノイズ低減フィルター処理のフローチャートを示す。まず、初期画像 $V_+$ と $V_-$ を撮影し、画像の輝度より SN 比を推定し(6.4)式の $k$ を求める。

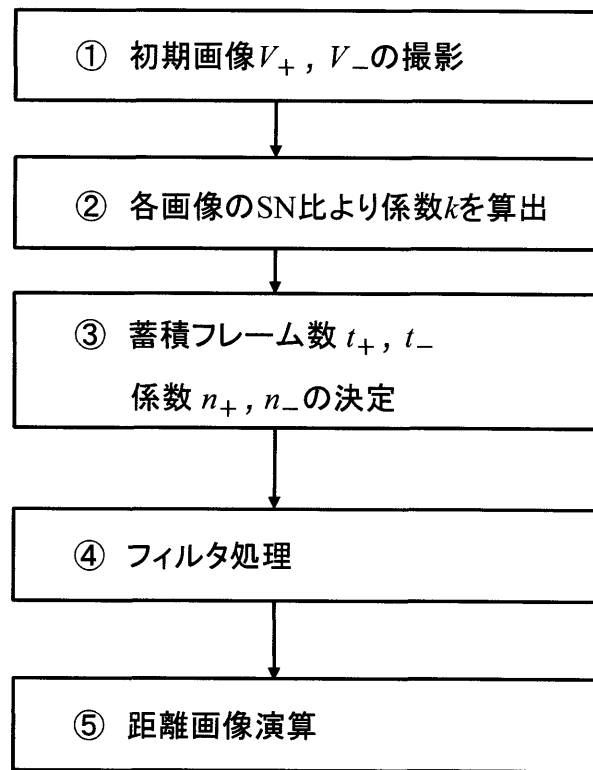


図 6.16 ノイズ低減フィルター処理のフローチャート

この SN 比の推定は、カメラの撮影条件が一定であれば、信号対ノイズの関係も 1 対 1 で定まるため $k$ を算出できる。

次に、 $k$ より $V_+$ 、 $V_-$ 画像の各蓄積フレーム数 $t_+$ 、 $t_-$ ( $t_+ + t_- = T$ 、 $T$ は所定の撮影回数)と乗算係数 $n_+$ 、 $n_-$ を(6.3)式のノイズ低減率 $r$ が最小とするように決定する。まず、係数 $n_+$ 、 $n_-$ は(6.5)式および(6.6)式を最小とする値が選ばれ、蓄積フレーム数 $t_+$ 、 $t_-$ が約 100 回以下の場合は、

$$n_{+,-} = 0.32 t_{+,-} + 2.8 \quad (6.7)$$

と近似できる。さらに、(6.3)式の $r$ を最小とする蓄積フレーム数 $t_+$ 、 $t_-$ は、以下の近似式より得られる。

$$\frac{t_+}{t_-} = 1.20 \ k - 0.23 \quad (6.8)$$

以上、(6.7)式と(6.8)式より、 $t_+$ 、 $t_-$ と $n_+$ 、 $n_-$ が求められる。なお、実際の画像  $V_+$ 、 $V_-$ の撮像回数の制御は、光源の強度変調信号の切替えタイミング制御と、第5章の図5.7に示した画像メモリ切替えスイッチ2の制御で可能と考えられる。

## (2) ノイズ低減効果

ノイズ低減率を画像  $V_+$ 、 $V_-$ の SN 比の比率  $k$  が 1、3、5 の場合について、蓄積フレーム数 16 とし、以下の 3 つの条件について計算した。

条件① 蓄積フレーム数も乗算係数も最適化しない場合。

(蓄積フレーム数  $t_+$ 、 $t_-$ は各 8 フレーム、係数  $n_+ = n_- = 16$ )

条件② 蓄積フレーム数を最適化した場合。

(蓄積フレーム数  $T = t_+ + t_- = 16$  フレーム、係数  $n_+ = n_- = 16$ )

条件③ 蓄積フレーム数と乗算係数を最適化した場合。

計算結果を表 6.1 に示す。画像  $V_+$ 、 $V_-$ の SN 比に差がある場合、つまり  $k$  の値が大きい場合、蓄積フレーム数の最適化がノイズ低減に効果的であり、さらに(6.7)式で与えられる係数の最適化により、通常のリカーシブフィルターを用いた場合より、所望の蓄積フレーム数内で大幅な低減効果が得られる。

表 6.1 蓄積フレーム数と係数の最適化によるノイズ低減率の計算結果

	$k=1$	$k=3$	$k=5$
条件① 最適化なし	0.65	0.65	0.65
条件② 蓄積フレーム数のみを最適化	0.65	0.52	0.47
条件③ 蓄積フレーム数と係数を最適化	0.39	0.35	0.33

次に、ノイズ低減効果を実験で確かめた。被写体はカメラより 2 m 先の紙製プレートを使用し、表面の反射率は BaSO<sub>4</sub> 標準白色板を 1 に規格化したとき 0.85 のものを使用した。光の変調周波数は 43 MHz、撮影のシャッター時間は 2 ns に設定した。

増加変調光時の撮影画像  $V_+$ の映像信号レベルは 392 mV、ノイズ信号成分は 6.3 mVrms、また、減少変調光時の撮影画像  $V_+$ の映像信号レベルは 205 mV、ノイズ信号成分は 9.5 mVrms であり、 $k=3$  の条件下で測定した。測定は 10 ビット分解能で、画像

$V_+$ 、 $V_-$ をパソコンに入力しフィルター処理を行った。

前述の条件①～③におけるノイズ低減率 $r$ を測定した。

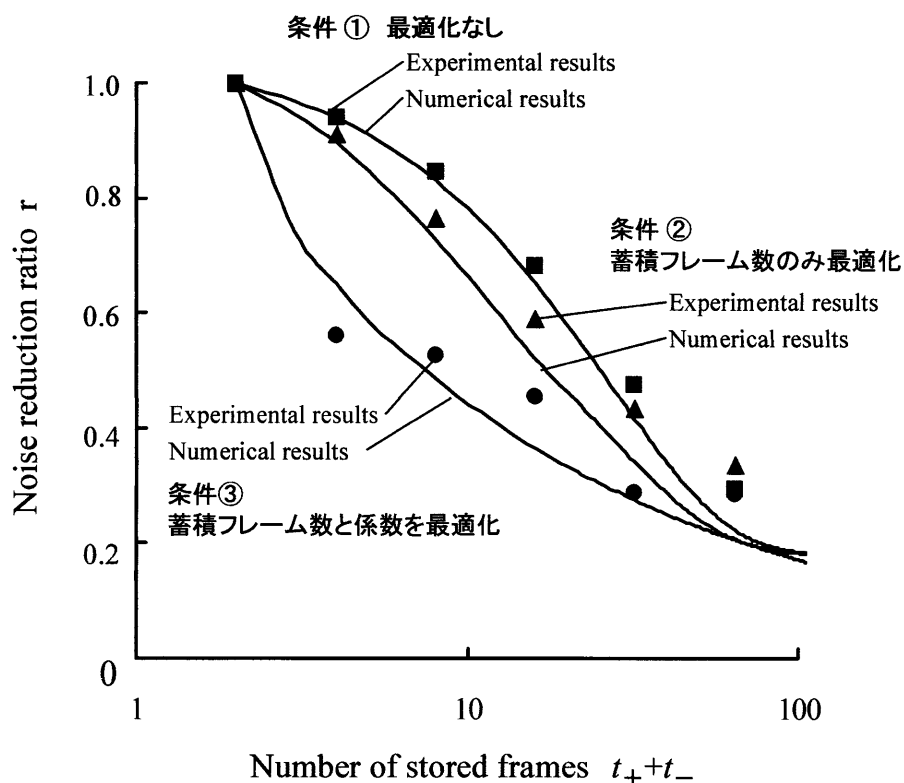


図 6.17 蓄積フレーム数とノイズ低減率の関係

蓄積フレーム数と距離画像のノイズ低減率 $r$ の関係を図 6.17 に示す。実線は計算結果、点は実験結果を示している。通常のリカーシブフィルター(条件①)の場合、蓄積フレーム数 8 枚でノイズ低減率は 0.84、16 枚で 0.68、32 枚で 0.47 である。これに対し、画像  $V_+$  と  $V_-$  の蓄積フレーム数を最適化した場合(条件②)では、ノイズはさらに 0.5～1 割減少している。また、蓄積フレーム数とフィルター係数を最適化した場合(条件③)では、蓄積フレーム数が 8 枚で 0.52 と大きな低減効果があり、64 枚で 0.31 まで低減した。この結果より、蓄積フレーム数とフィルター係数の最適化により、少ないフレーム数で効率よくノイズを低減できることが示された。本測定では蓄積フレーム数が 64 枚と多くなると、実験値では低減率 0.28～0.34、計算値では 0.2 となった。この計算値に比較し、実験のノイズ低減量が少ない理由は、I.I.や CCD カメラによる固定パターンノイズの影響と考えられる。

### (3) 検出データの校正

本カメラでは、カメラから被写体までの奥行き距離が検出されるため、カメラからの絶対的な距離値を得るには検出値の補正変換が必要である。

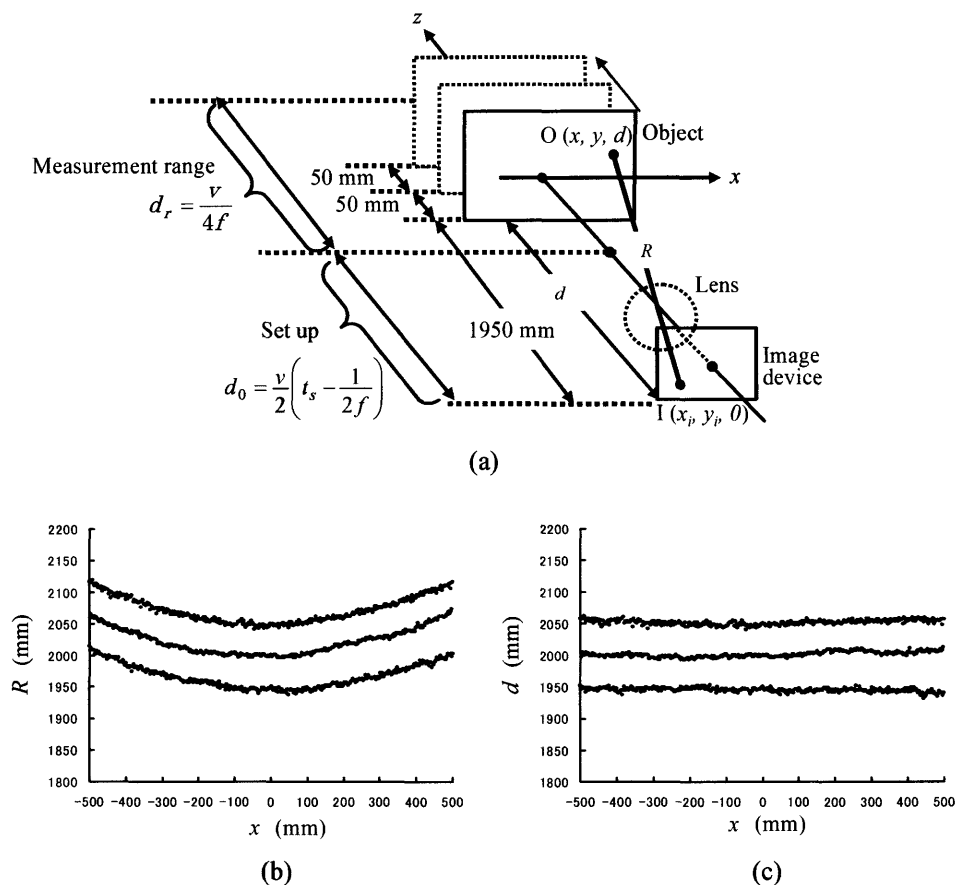


図 6.18 出力距離値の校正 (a) 被写体とカメラの位置関係 (b) 補正前の距離値 (c) 補正後の距離値

本カメラからの距離画像の出力映像レベル  $D$  ( $0 \leq D \leq 1$ )は、図 6.18(a)に示す被写体上の点  $O(x, y, d)$ と撮像面上の像点  $I(x_b, y_b, 0)$ 間の距離  $R$ であり、以下の式で表わされる。

$$D = \frac{R - d_0}{d_r} \quad (6.9)$$

$$R = Dd_r + d_0 \quad (6.10)$$

ここで、 $d_r$ は第3章の(3.8)式で表される距離検出測定レンジであり光の変調周波数に依存し、 $d_0$ は測定レンジ設定時のセットアップ距離である。

また、本距離検出では、第 4.4 節の図 4.10 に示したように、被写体の距離に対し曲線の映像信号出力特性を持つ。これは、照射光の強度変調波形が理想的な三角波でないことが要因であり、第 4 章図 4.9 で示したように、出力信号特性を逆関数で補正することで、被写体距離と出力信号レベルとの関係を直線に変換できる。距離画像の出力特性を直線に補正後、 $R$  値は、

$$R = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + d^2} \quad (6.11)$$

であるため、(6.10)式および(6.11)式より、被写体の距離値  $d$  は、

$$d = \sqrt{(Dd_r + d_0)^2 - (x - x_i)^2 - (y - y_i)^2} \quad (6.12)$$

で得られる。

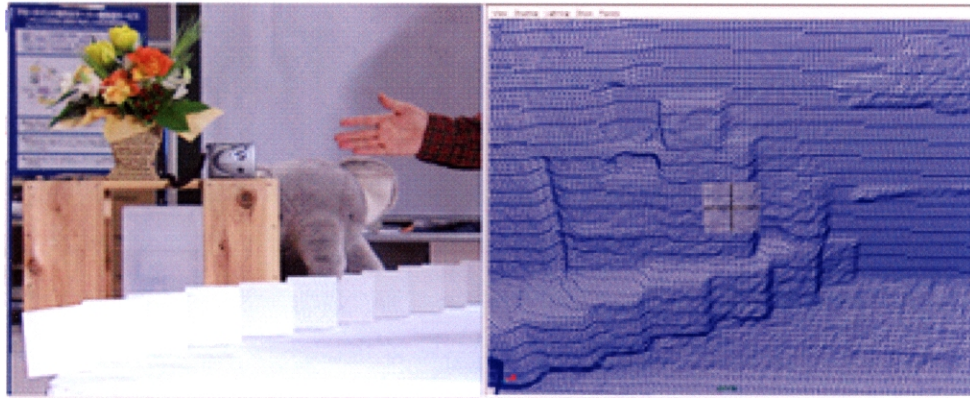
実験では、カメラに正対した平板パネルを被写体とし、カメラからの距離を 1950 mm、2000 mm、2050 mm と移動させ、50 フレーム蓄積で距離画像を撮影した。距離画像より(6.11)式で得られた  $R$  値を図 6.18 (b)に示す。さらに(6.12)式で得られた距離値  $d$  を図 6.18(c)に示す。カメラから被写体までの距離が 2000 mm の場合、 $R$  値は中心と周辺の距離差は 60 mm 以上であるが、絶対距離に変換後は被写体の平坦な形状が再現され、横幅 1000 mm の被写体において、距離検出精度を標準偏差で求めたところ 4.2 mm であった。

### 6.3.3 新規映像表現への応用の可能性

#### (モデリングとシャドウイング)

テレビ番組における CG 物体と実セットの映像合成技術では、実セットと CG のインタラクションや見え隠れ、仮想照明による CG の影の生成(シャドウイング)など、実セットの 3 次元形状情報が必要となる映像表現は困難であった。これに対し、Axi-Vision カメラによる人物やスタジオセットの 3 次元形状取得により、CG 物体の簡易で自然な配置や被写体形状に合わせた違和感の無い CG のシャドウイングなどが実現できる。

実験では、実写シーンのモデリングとテクスチャマッピングを行い、被写体の形状に応じた CG 物体の配置と仮想照明によるシャドウイングを行った[17]。カメラより 2 ～ 3 m の距離範囲に 10 cm 間隔で配置した紙製チャート板(図 6.19(a))を撮影し、ハイビジョンカラー映像と距離映像信号を D5 規格のビデオテープに同期収録した。



(a)

(b)



Charts

Shadow of CG

CG

(c)

図 6.19 Axi-Vision カメラによる撮影シーンのモデリングと 3 次元 CG 合成  
(a) 撮影シーン (b) メッシュデータ (c) CG 合成映像。手前右上に仮想光源を設定し、CG 背後のチャートの形状に合わせた CG の影を生成し合成している。

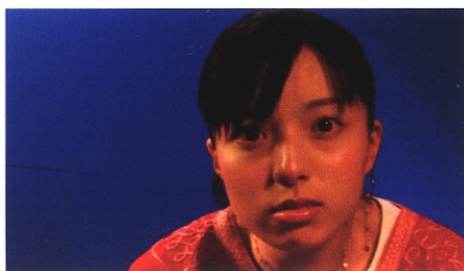
オフライン処理により、テープを再生し HD-SDI 出力信号(10bit, 29.97Hz)を 16 bit TIFF ファイルもしくは Cineon ファイルに変換し、撮影シーンをメッシュ化した。メッシュ化では全画素を処理するにはデータ量が多いため、1920 (H) × 1080 (V)画素を 240 (H) × 135 (V)画素に縮小した。このときの処理時間は 1.2GHz Pentium III で約 10 秒程度であった。

図 6.19(a)は撮影シーン、図 6.19(b)はそのメッシュデータを示している。メッシュデータへ撮影シーンをテクスチャマッピングし、CG モデルを実写形状に合わせて配



置した(図 6.19(c))。また、仮想光源を画面手前右上に設定しており、CG モデルから伸びる影が背後の階段状チャートの凹凸に合わせて生成されている。従来このような合成手法には、ダミーの机やチャートのモデリングデータを人工的に生成し、それを実セットのサイズに合せ込む手法があるが、本方式ではその整合作業がほとんど必要なく、簡易に自然なライティングとシャドウイングが実現できた。ここでの作業はオフライン処理で行ったが、アルゴリズムの開発によりリアルタイム処理の可能性もある。

Axi-Vision カメラにより、被写体の 3 次元形状が取得できれば、CG 合成以外に撮影映像の新しいデジタル効果にも応用できる。例えば、図 6.20 に示すように、被写体(図 6.20(a))の遠近感をより強調した映像加工(図 6.20(b))や、動画シーンの映像(図 6.20(c))の遠近感を逆に歪ませたり(図 6.20(d))[18]、または焦点深度を変化させたりなど、3 次元空間を考慮した映像の加工・処理による多彩な演出効果を実現することが可能である。



(a)



(b)



(c)



(d)

図 6.20 Axi-Vision カメラで得られた被写体の 3 次元形状を利用した映像効果 (a) 被写体の映像 (b) 遠近感を強調した映像 (c) 動画シーンの撮影映像 (d) 遠近感に歪を与えた映像



## 6.4 立体表示への応用技術

本節では、Axi-Vision カメラの立体映像システムへの応用の可能性を検討する。立体テレビは将来の夢の技術として長年にわたり研究開発されているが[19]、いまなお実用的なシステムの開発は実現されていない。その要因として、視覚疲労の問題や理想的な立体像再生に必要な情報量の多さなどがあげられる。立体情報の撮影や伝送、処理、表示といった一連の映像システムを構築するには、いかに必要かつ最小限な情報量で立体像を表現するが重要な鍵を握っていると考えられる。

Axi-Vision カメラで撮影される被写体のカラー画像と距離画像は、被写体の完全な 3 次元情報ではないものの、距離情報は立体像再構成に重要かつ必要な最小限の情報といえる。また、カメラで得られるカラー画像と距離画像の情報量は、RGB 画像情報に距離情報が加わるのみであるため、従来の 4/3 倍の情報量でありシステム構築に有利である。この距離情報をもとにした立体映像システムの提案は、今後の立体映像メディアの開拓に貢献できるものと考えられる。

本節では、Axi-Vision カメラで得られた距離情報をもとに、奥行きごとに被写体映像をサンプリングし、空間再生する奥行き標本化立体ディスプレイに基づいたシステムを提案する[4, 20]。撮影映像より奥行き標本化画像を実時間で生成するとともに、ハーフミラー合成による立体ディスプレイを試作し、実験により奥行き標本化数の増加による立体表示効果や実時間の撮影・表示を行い、Axi-Vision カメラの立体映像システムへの応用の可能性を検証する。

### 6.4.1 奥行き標本化立体ディスプレイ

立体表示方式には、偏光メガネ方式[21, 22]やレンチキュラスクリーン方式[23]、ホログラム[24]、インテグラルホログラフィ[25]などとともに、奥行き標本化方式がある。この方式は、各奥行き位置の画像を空間中に体積表示する方式であり、空間像を観察するため自然な立体感が得られる特長を持っている。本方式には、バリフォーカルミラー[26-29]や高速に移動するスクリーンやディスプレイを用いる方式[30, 31]、空間走査が不要なハーフミラー合成方式[32, 33]などがある。

本節では Axi-Vision カメラで得られた 3 次元情報をリアルタイムで処理し、奥行き標本化立体ディスプレイで実時間再生する方式を提案する(図 6.21)。被写体のカラー画像と距離画像を撮像し、信号処理装置により被写体の各奥行き位置の標本化画像を生成する。これらの画像は、複数台の CRT モニターとハーフミラーで構成された立体

ディスプレイ装置に表示され、奥行きを持った立体像として表示される。以下に本システムの各構成要素について詳細を述べる。

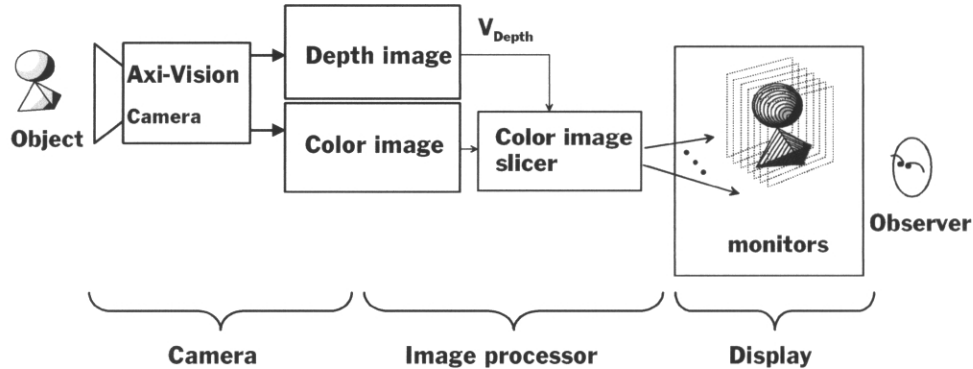


図 6.21 Axi-Vision カメラによる立体映像システム

### (1) 奥行き標準化映像の生成

Axi-Vision カメラの出力距離信号より、特定距離範囲の被写体映像を抽出する奥行き標本化映像の生成装置を試作した(図 6.22)。距離画像の信号レベルの上限閾値  $V_{\max}$  と下限閾値  $V_{\min}$  を設定し、比較器により特定の距離範囲の映像キー信号を生成し、映像抽出するものである。装置は 16 チャンネルの信号出力を設け、個々に抽出距離範囲を独立に設定できる構成とした。

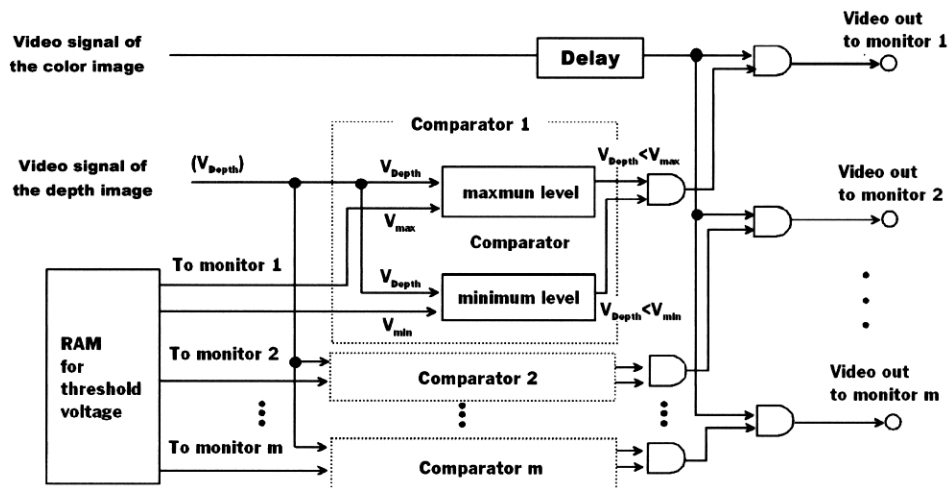
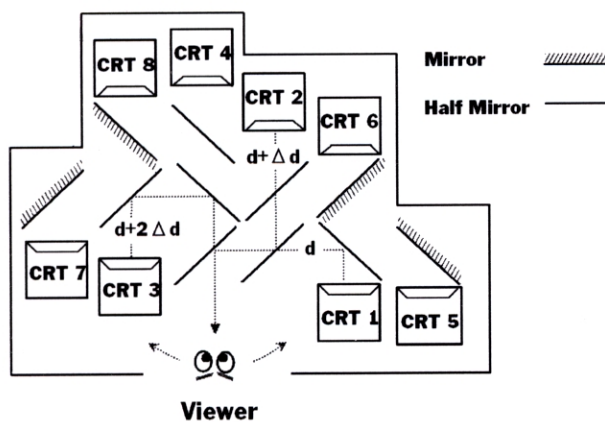


図 6.22 奥行き標本化映像の生成装置

なお、本映像信号処理装置および後述するディスプレイシステムは試作費用を抑えるために標準テレビ信号ベースで開発を行い、Axi-Vision カメラも第 4 章で試作した標準テレビ用カメラ[4]を使用し実験を行った。

## (2) 奥行き標本化立体ディスプレイの試作

立体ディスプレイの構成図と外観写真をそれぞれ図 6.23(a)および(b)に示す。ディスプレイは 8 台の 14 インチ CRT とハーフミラーおよびミラーより構成されている。観察者から CRT 1 までの距離は  $d$ 、CRT 2 までの距離は  $d + \Delta d$  とし、各 CRT を  $\Delta d$  の光路差をつけて配置した。CRT 1 には、カメラに近い被写体の映像を表示し、順次、遠くの奥行き標本化画像を各 CRT に表示する。これらの CRT の画面は 7 枚のハーフミラーと 4 枚のミラーで光学的に合成され、奥行き方向へ  $\Delta d$  間隔で体積的に表示される。すべての表示画面が 3 回ハーフミラーを透過もしくは反射し観察される配置とし、各画像の輝度低下の割合をそろえた構成とした。各 CRT や各ミラー、ハーフミラーの回転やあおり角度、光軸合わせは、観察側よりレーザー光を垂直入射し、その反射を観察しながら調整した。



(a)



(b)

図 6.23 奥行き標本化立体ディスプレイ (a) 構成図 (b) 外観写真

## 6.4.2 実時間立体撮像・表示実験

### (1) 奥行き標本化数と立体表示効果

奥行き方向に連続な被写体について、奥行き標本化数を 2、4、8 段と変化させた場合の立体表示効果を調べた。被写体として色が異なる平面パネル 2 枚をウェッジ状に合わせたパネルを用いた(図 6.24(a))。パネルの高さは 36 cm、奥行きは 90 cm、ウェッジ先端の角度 20 度である。また、像の奥行き方向への連続性を観察するために、ウェッジ先端上部より斜め下後方へ白い紐を取り付けた。

奥行き標本化数が 2 段階の場合、標本化画像間の距離は 24 cm とし、4 段階時は 12 cm、8 段階時は 6 cm とした。また、距離画像信号のノイズにより奥行き標本化画像の切出しエッジ部分に揺らぎが生じるため、それに相当する幅をクロスオーバーさせて映像抽出した。

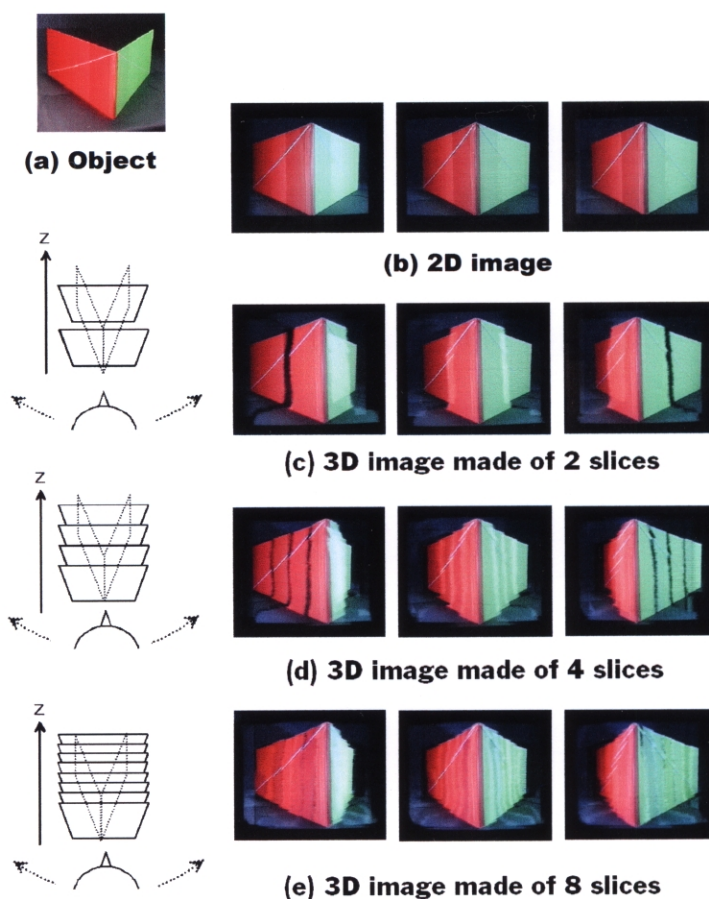


図 6.24 奥行き標本化による表示立体像の観察 (a) 被写体 (b) 2 次元画像 (c) 奥行き標本化数が 2 段階の場合 (d) 4 段階の場合 (e) 8 段階の場合

図 6.24(c)～(e)にそれぞれ奥行き標本化数 2、4、8 段の場合の表示画像を示す。視距離 1.6 m で、水平視域角 $\pm 7.5$  度の範囲で左側、正面、右側と異なる観察位置より CCD カメラで撮影した画像を示している。2 段階表示では、前後の映像が明確に分離し、側面からの観察画像に大きな間隙が生じている。4 段階、8 段階と奥行き標本化数が増加し、画像間隔が密になるに従い、側面の白い紐が次第に連続的になり、奥行き方向への連続性が向上しているのがわかる。また、図 6.24(e)の 8 段階表示において、左側からの観察では、被写体左側面パネルの面積が大きく、逆に右側からの映像では、右側面パネルの面積が大きい画像が観察され、立体的に表示されていることがわかる。奥行き標本化数が増加し、各画像間隔が狭くなるほど、間隙の影響が少なくなっている。しかし、各表示において、各標本化画像間の間隙や前後の画像の重なりが、画質低下の要因となっている。

## (2) 間隙の改善検討

図 6.24(c)や(d)の表示画像で顕著にわかるように、複数の 2 次元画像から再構成された立体像では、観察位置が水平方向に大きく移動すると、各画像間の間隙があらわれる。次に、この間隙による画質低下の改善策を検討する。

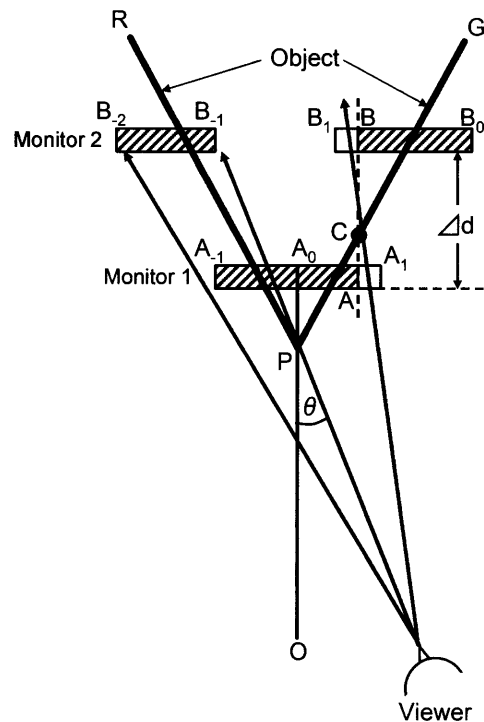


図 6.25 2 段階の奥行き標本化表示

図 6.25 に、奥行き方向へ連続な面 PG を、2 段階の奥行きに配置したモニター1,2 で表示する場合を示す。被写体の  $\overline{PC}$  部分は、手前の平面画像  $\overline{A_0A}$  に表示され、また、 $\overline{CG}$  部分は  $\overline{BB_0}$  に表示される。観察者の視点が正面の  $\overline{PO}$  線上の場合、3 点  $ACB$  はほぼ直線上にあるため間隙は目立たないが、観察者が図 6.25 に示すように右側に移動した場合、3 点  $ACB$  は分離し、黒い間隙が画像のエッジ部分の  $AB$  間に生じる。この間隙の影響は、各画像の端を  $A$  から  $A_1$  へ、 $B$  から  $B_1$  へと延長することで低減できる。必要となる延長部分  $\overline{AA_1}$  と  $\overline{BB_1}$  の長さはほぼ  $(Ad \sin \theta)/2$  となる。ここで  $Ad$  は奥行き標本化画像間距離、 $\theta$  は視域角である。また、視域角が  $\theta$  より小さい位置から観察した場合、この延長した  $\overline{AA_1}$  と  $\overline{BB_1}$  の部分が重複して見えることになり、輝度が加算される。そのため、延長部分に輝度勾配を持たせることで輝度の加算を抑えることができる。

このエッジ処理の効果を実験で確かめるために、勾配を持たせた抽出エッジを可能とする回路を試作した。図 6.22 に示した奥行き標本化生成装置の各キー信号に積分回路を挿入し、その時定数を調整することで切出しのエッジ部分の輝度を調整した。

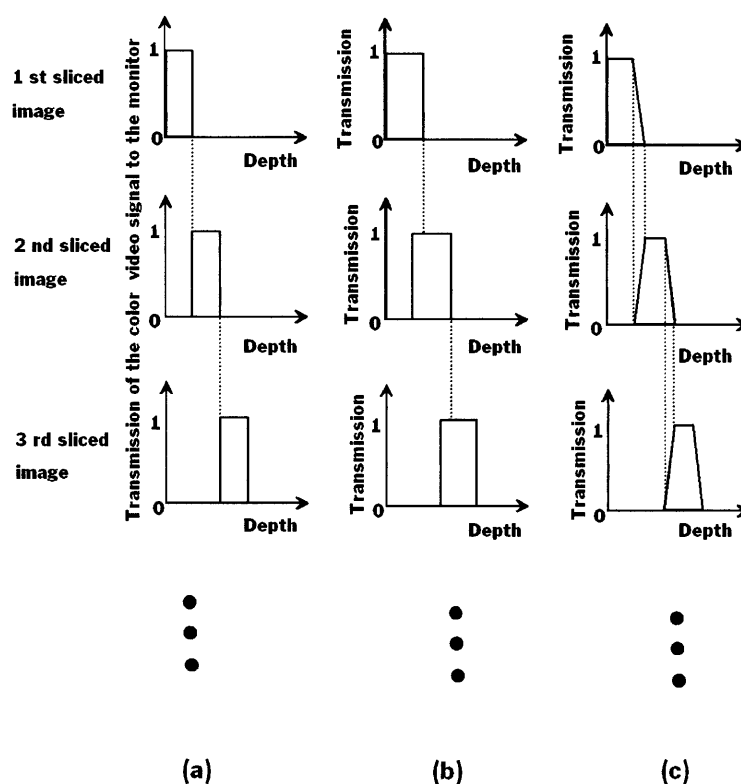


図 6.26 奥行き標本化映像の生成方法 (a) 距離の閾値で 2 値的に映像を抽出する方法 (b) 閾値部分を前後にクロスオーバーさせて抽出する方法 (c) 閾値部分に輝度勾配を与え抽出する方法

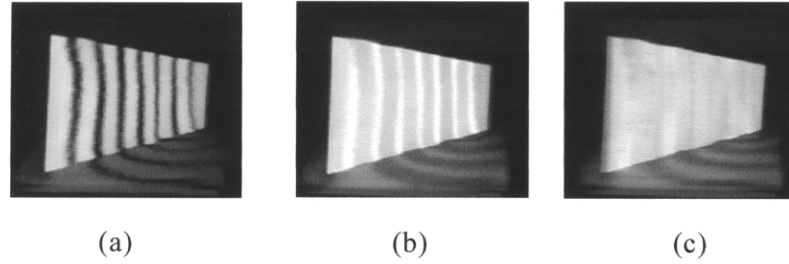


図 6.27 各奥行き標本化映像の生成時の表示画像

図 6.26 に 3 種類の奥行き標本化画像切出し方法を示す。図 6.26(a)は閾値で 2 値的に前後の奥行き標本化画像を抽出する方法、図 6.26(b)はエッジ部分をそれぞれクロスオーバーし抽出する方法、図 6.26(c)はそのクロスオーバー部に輝度勾配を与え抽出する方法である。

実験は、35 cm × 90 cm のパネルをカメラに対し 60 度傾斜して撮影し、表示画像を視域角 +10 度の位置より観察した。図 6.27(a)~(c)は図 6.26 に示した各奥行き標本化画像抽出法を使用した場合の表示像を CCD カメラで撮影したものである。

閾値で 2 値的に切出す方法では、図 6.27(a)に示すように間隙による黒いラインが目立ち、また、図 6.27(b)では、延長抽出した部分の画像が重なり、高い輝度部分が目立つ。一方、図 6.27(c)では黒いラインや、延長された画像による輝度の重なりが少なく平坦な輝度分布となり、間隙の影響が低減されていることがわかる。

### (3) 奥行き標本化数の増加

次に、両眼視差による奥行き距離の知覚を目安として、必要となる奥行き標本化数とその間隔を見積もる。

図 6.28 において、奥行き標本化画像 1 を観察時の輻輳角  $\theta_1$  と、奥行き標本化画像 2 を観察時の輻輳角  $\theta_2$ 、および両眼の間隔を  $a$  とすると、輻輳角の差  $\Delta\theta$  は、

$$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2 \approx a \frac{\Delta d}{d^2} \quad (6.13)$$

となる。ここで  $a=6.25$  cm、両眼視差による輻輳角の分解能を  $10''$  とし[33]、奥行き 42 cm の像を視距離 2 m から観察する条件下では、 $\Delta d$  は 3 mm、奥行き標本化数は約 140 段必要となり、ハーフミラー合成法で、この値まで表示画像数を増やすのは現実的でない。

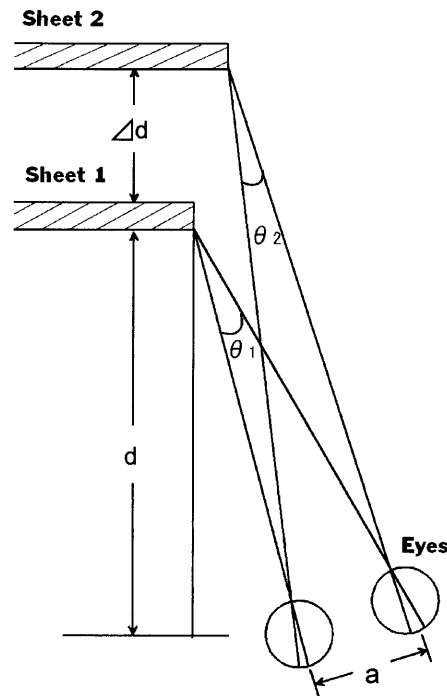


図 6.28 幅輻角

標準テレビ信号 Axi-Vision カメラの距離検出分解能が 18 mm [34]であることから、良好な画像切出しが有効な奥行き距離は 3～6 cm 程度以上である。これをディスプレイで 1/2 倍に縮小表示すると、奥行き標本化画像間隔は 1.5～3 cm 程度で、奥行き標本化数は 14～28 段となる。

この値を目安とし、奥行き標本化数をさらに増加するために、図 6.23 で説明した 8 段表示系の後に新たに光学系を加え、16 段表示系を構成した(図 6.29)。8 段表示系の光路を 2 分岐し、3 cm の光路差をつけ、液晶シャッターで時分割表示機構を加える。16 段階の奥行き標本化画像を 8 枚ごとに、フィールド単位で切替えて各 CRT に表示し、それに同期して各光路 1、2 の液晶シャッター  $S_1$  と  $S_2$  を交互に周波数 60 Hz で ON/OFF 駆動した。

実験には奥行き 1.5 m、幅 1 m の被写体を用いた(図 6.30(a))。図 6.30(b)に距離画像を示し、表示画像を左側と右側より観察した像をそれぞれ図 6.30(c)、(d)に示す。この再生像のサイズは、高さ 20 cm、幅 26 cm、奥行き 42 cm で、観察者から像中心までの距離は 2 m、水平方向の視域角は $\pm 9^\circ$ である。図 6.30(c)と図 6.30(d)より、観察位置の違いにより、異なる画像が得られ立体的に表示されていることがわかる。連続的な被写体に関しては、8 段表示時より奥行き方向への連続性が向上している。



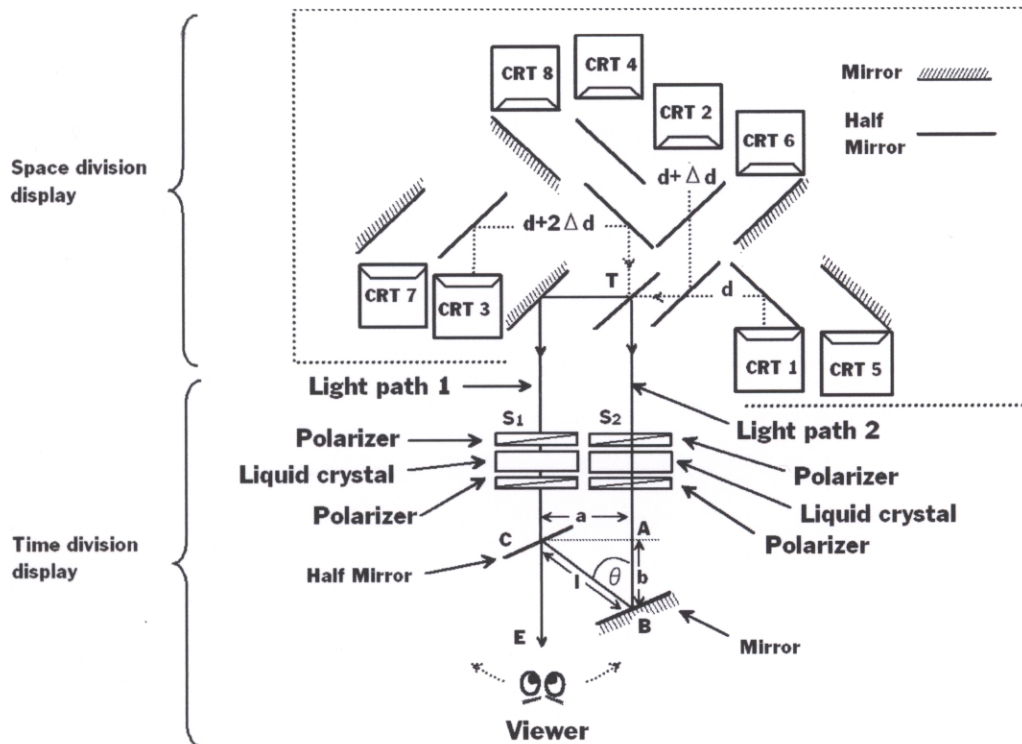


図 6.29 16 段階の奥行き標本化画像の表示システム

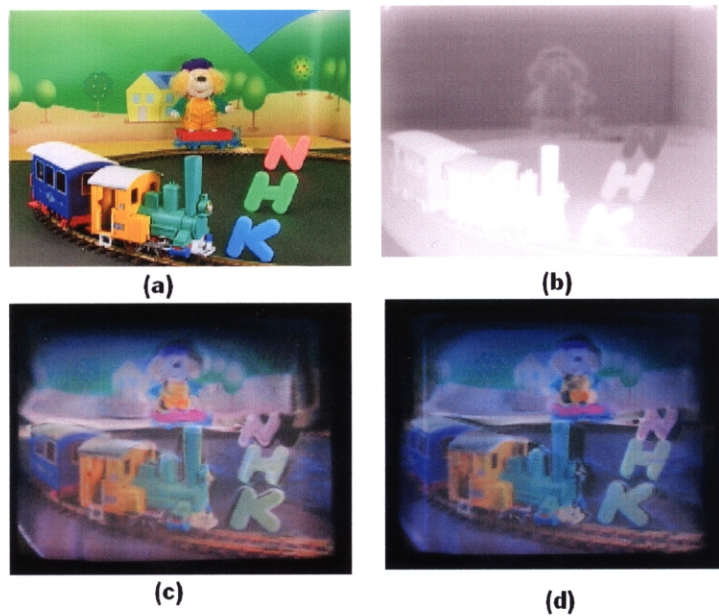


図 6.30 16 段階の奥行き標本化表示 (a) 被写体映像 (b) 距離画像  
(c) 左側から再生像を観察した場合 (d) 右側から再生像を観察した場合

この実験システムでは、ハーフミラーや偏光板、液晶セル、フィールド切替表示などの影響により、輝度とコントラストが大きく低下した表示映像となったものの、動く被写体でも実時間で撮影し、立体表示することが可能であった。

本システムのように、被写体のカラー画像と距離画像からなる比較的少ない情報量で、立体像を表示できることは、将来の立体映像システムを構築していく上で大きなメリットと考えられる。今後、この特長を生かした Axi-Vision カメラによる立体映像表示技術を進展させるには、よりコンパクトで高品質なディスプレイシステムを実現する必要があり、表示方法やデバイス開発などの更なる改善が課題である。具体的な改善策として、ホログラム表示機能を有する空間光変調素子の開発とそれを用いた奥行き方向への多重立体表示方法の開発[35]や、高速に結像面を移動させる立体表示方式の開発[36]があげられ、これらによりシステムの小型化や表示画像の画質向上が推進されることで、本カメラの立体映像システムへの応用の可能性が増加するものと期待できる。

## 6.5 まとめ

本章では、Axi-Vision カメラにより得られた距離情報を用いた映像合成技術を確立し、番組制作へ実用化した。また、画像蓄積効果により距離検出ノイズを低減し、距離検出分解能を向上させ、カメラによる3次元モデリング応用の可能性を示した。さらに、距離画像を用いた立体撮像・表示実験装置を試作し、立体映像システムへの応用の可能性も検証した。

本章では以下の結論が得られた。

- (1) 距離情報を用いた映像合成の基本性能を調べ、距離画像をキー信号とした映像抽出実験を行った。画像抽出時のエッジ部分の画質は距離検出ノイズに依存し、測定レンジ中心でノイズが最も少なかった。距離情報を使うことで、クロマキー法のブルーバックを必要としない映像抽出・合成技術が可能であることを実証した。
- (2) CG と実写映像間でお互いの距離情報を比較演算して合成することで、前後関係を考慮した3次元的な映像合成がリアルタイムで実現できた。
- (3) 距離合成技術を実際の番組制作に応用し、ブルーバックなしの実空間ベースバーチャルスタジオを構築した。距離情報をもとにした映像合成手法は、番組制

作の時間やコスト削減に効果的で、生放送番組制作においてもリアルタイムで効果的な演出が可能となり、カメラの実用化に成功した。

- (4) 本距離検出手法に適した画像蓄積効果によるノイズ低減手法を提案し、効率的なノイズ低減による距離検出分解能の向上を実現し、高速かつ高精細な3次元モデリングの可能性と、CG合成や映像の加工や特殊効果に有効であることを実証した。
- (5) Axi-Visionカメラにより得られたカラー映像および距離情報より、奥行き標準化立体映像の生成を可能とし、奥行き標準化立体表示装置を試作することで、実時間の立体撮像・表示実験を行い、立体表示システムとしての可能性を示した。

## 参考文献

- [1] S. Shimoda, M. Hayashi, and Y. Kanatsugu, "New chroma-key imaging technique with Hi-vision background," *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 35, no. 4, pp. 357-361, 1989.
- [2] T. Kanade, A. Yoshida, K. Oda, H. Kano, and M. Tanaka, "A stereo machine for video-rate dense depth mapping and its new applications," in *Proceedings of 15th Computer Vision and Pattern Recognition Conference*, pp. 196-202, San Francisco, California, 1996.
- [3] W. Woo, N. Kim, and Y. Iwadate, "Object segmentation for Z-keying using stereo images," *Proc. of World Computer Congress - International Conference on Signal Processing (WCC-ICSP) 2000*, Beijing, pp. 1249-1254, 2000.
- [4] M. Kawakita, K. Iizuka, T. Aida, H. Kikuchi, H. Fujikake, J. Yonai, and K. Takizawa "Axi-vision camera: a three-dimension camera", in *Three-Dimensional Image Capture and Applications III*, B. D. Corner and J. H. Nurre, eds., *Proc. SPIE 3958*, pp. 61-70, 2000.
- [5] G. J. Iddan and G. Yahav, "3D imaging in the studio (and elsewhere...)," in *Three-Dimensional Image Capture and Applications IV*, B. D. Corner and J. H. Nurre, eds., *Proc. SPIE 4298*, pp. 48-55, 2001.
- [6] M. Kawakita, K. Iizuka, H. Nakamura, I. Mizuno, T. Kurita, T. Aida, Y. Yamanouchi, H. Mitsumine, T. Fukaya, H. Kikuchi, and F. Sato, "High-definition real-time depth-mapping TV camera: HDTV Axi-Vision Camera," *Optics Express*, vol. 12, no. 12, pp. 2781-2794, 2004.
- [7] M. Kawakita, K. Iizuka, T. Aida, T. Kurita, and H. Kikuchi, "Real-time three-dimensional video image composition by depth information," *IEICE Electronics Express*, vol. 1, no. 9, pp. 237-242, 2004.
- [8] 井上誠喜, "最近の放送番組制作技術 バーチャルスタジオ," *映像情報メディア学会*, vol. 56, no. 10, pp. 1538-1541, 2002.
- [9] 山内結子, 三ッ峰秀樹, 井上誠喜, "超高精細全天周画像を用いた実写ベース仮想スタジオ," *映像情報メディア学会*, vol. 55, no. 1, pp. 159-166, 2001.
- [10] 山内結子, 三ッ峰秀樹, 深谷崇史, 河北真宏, 井上誠喜, 林正樹, "実空間ベース仮想スタジオ ～実セットと仮想セットのシームレスな合成," *映像情報メディア学会*, vol. 57, no. 6, pp. 739-744, 2003.

- [11] 菊地秀之, 山内結子, “BS ハイビジョン「美しき日本 百の風景」スペシャル 制作報告 ～新世代バーチャルスタジオによる新しい演出方法～,” 放送技術, vol. 4, pp. 167-174, 2003.
- [12] 安藤孝, 鳥居宏行, 青山智一, 宮崎太郎, 堀口弘幸, 金澤勝, 濱浜公男, 津田貴生, 河北真宏, “愛・地球博(愛知万博)における NHK 関係施設の概要,” 放送技術, vol. 58, no. 4, pp. 123-130, 2005.
- [13] R. H. Mcmann, S. Kreinik, J. K. Moore, A. Kaiser, and J. Rossi, “A digital noise reducer for encoded NTSC signal,” J. SMPTE, vol. 87, pp. 129-133, 1978.
- [14] 二宮祐一, 大塚吉道, “動き補正型ノイズリデューサー,” テレビ誌, vol. 39, no. 10, pp. 956-962, 1985.
- [15] 浅見典充, 河北真宏, 白井暁彦, 小林希一, 滝沢國治, “3 次元カメラの画像蓄積による距離検出分解能の向上と形状計測,” 2004 画像電子学会, 第 32 回年次大会 学生セッション 18, pp. 71-72, 2004.
- [16] 山田英樹, 白井暁彦, 河北真宏, 三ッ峰秀樹, 中島正之, “Axi-Vision を用いた三次元モデリング,” 第 67 回 (平成 17 年) 情報処理学会全国大会, no. 4, 3Y-3, pp. 195-196, 2005.
- [17] 白井暁彦, 小林希一, 河北真宏, 斉藤豪, 中島正之, “Axi-Vision カメラによるモデリングとシャドウイング,” 映像情報メディア学会, メディア工学研究会 技術報告会, vol. 28, no. 32, pp. 9-12, 2004.
- [18] G. Fujimoto, M. Kawakita, and M. Inakage, ““ZECTO” Cinematograph for depth-based live-action imaging,” ACM SIGGRAPH 2005, Technical Sketches, Los Angels, Aug. 2005. (accepted)
- [19] NHK 技術研究所編, 3 次元映像の基礎, オーム社, 1995.
- [20] 河北真宏, 飯塚啓吾, 土屋譲, 飯野芳己, 菊池宏, 藤掛英夫, 佐藤弘人, “距離検出カメラと奥行き標本化ディスプレイによる 3 次元撮像・表示実験,” 3 次元画像コンファレンス 2001, P-7, pp. 141-144, 2001.
- [21] T. Motoki, I. Yuyama, H. Isono and S. Komiyama, “Research on 3-D Television System at NHK,” ABU Tech Rev., 150, pp. 3-10, 1994.
- [22] S. Yano, I. Yuyama, “Stereoscopic HDTV: Experimental system and psychological effects,” SMPTE J., 108, pp. 14-18, 1991.
- [23] H. Isono, M. Yasuda, and H. Sasazawa, “Autostereoscopic 3 D LCD Display using LCD-generated Parallax Barrier,” 12th Int. Display Research conf., Japan Display '92, pp. 303-306. 1992.

- [24] S. A. Benton, et al “Electronic display system for computational holography,” Practical holography IV, Proc. SPIE 1212, pp. 1212-1220, 1990.
- [25] J. Aria, F. Okano, H. Hoshino, and I. Yuyama, “Gradient-index lens-array method based of real-time integral photography for three-dimensional images,” Appl. Opt., vol. 37, pp. 2034-2045, 1998.
- [26] A. C. Traub, “Stereoscopic display using rapid varifocal mirror oscillations,” Appl. Opt., vol. 6, pp. 1085-1087, 1967.
- [27] E. G. Rawson, “3-D computer-generated movies using a varifocal mirror,” Appl. Opt., vol. 7, pp. 1505-1511, 1968.
- [28] M. C. King and D. H. Berry, “Varifocal mirror technique for video transmission of three-dimensional images,” Appl. Opt., vol. 9, pp. 2035-2039, 1970.
- [29] J. Hamasaki, Y. Nagata, H. Higuchi, and M. Okada, “Real-time transmission of a 3-D image using volume scanning and spatial modulation,” Appl. Opt., vol. 16, pp. 1675-1685, 1977.
- [30] H. Yamada, H. Sumita, K. Muraoka and K. Miyaji, “Linear moving screen type 3D display,” Japan display '92, pp. 307-310, 1992.
- [31] R. D. Williams and F. Garcia. Jr., “A real-time autostereoscopic multiplanar 3D display system,” SID 88 digest, pp. 91-94, 1988.
- [32] S. Tamura and K. Tanaka, “Multilayer 3-D display by multidirectional beam splitter,” Appl. Opt., vol. 21, pp. 3659-3663, 1982.
- [33] 大越孝敬, 三次元画像工学, 朝倉書店, 1991.
- [34] 河北真宏, 飯塚啓吾, 飯野芳己, 菊池宏, 藤掛英夫, 會田田人, “実時間距離検出3次元テレビカメラ(Axi-Vision カメラ),” 電子情報通信学会論文誌, D-II, vol. J87-D-II, no. 6, pp. 1267-1278, 2004.
- [35] 河北真宏, 中村博重, 飯塚啓吾, 土屋譲, 菊池宏, 飯野芳己, 藤掛英夫, 佐藤弘人, “光書込み型空間光変調素子による奥行き多重ホログラム表示,” 第26回光学シンポジウム, 13, 2001.
- [36] 米田昭, 羽生洋, 牧田匡史, 會田田人, 河北真宏, “奥行き標本化方式によるAxi-Vision 画像データの三次元表示,” 電子情報通信学会, 2005 年 総合大会, D-11-82, p. 82, 2005.