OUKA
Osaka University Knowledge Archive

Title	全方位視覚センサの高解像度化に関する研究
Author(s)	長原, 一
Citation	大阪大学, 2001, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/1952
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

工学 8165

全方位視覚センサの高解像度化に関する研究

長原 一

大阪大学大学院基礎工学研究科

博士学位論文

平成13年4月

全方位視覚センサの高解像度化に関する研究

長原 一

大阪大学大学院基礎工学研究科

博士学位論文

平成13年4月

平成 13 年度博士学位論文

全方位視覚センサの高解像度化に関する研究

長原 一

内容梗概

全方位視覚センサ HyperOmniVision は周囲 360 度が一度に観測でき，容易に通常のカメラ画像やパノラマ画像に無歪みでシームレスに変換できるという利点をもつ．この特徴により，人への広視野角画像提示やユーザの任意視線方向に応じた画像提示に応用できることから，監視システムやテレプレゼンスシステムならびに人工現実感や複合現実感のためのレンダリングに盛んに用いられてきた．しかしその反面，その構造から一般のカメラに比べ同一画角で比較した場合，解像度が低いという問題をもつ．本論文では，画像列を用いることにより従来指摘されてきた HyperOmniVision の低解像度問題を改善する手法について述べる．

目 次

1 はじめに **1**

2 全方位視覚センサ HyperOmniVision **4**

2.1 全方位撮像と画像変換 4

2.2 低解像度と収差問題 7

3 全方位視覚センサの高解像度化 **10**

3.1 従来の高解像度手法 10

3.2 HyperOmniVision の高解像度化 11

3.3 センサ操作系 12

3.3.1 画素ずらし 12

3.3.2 焦点ずらし 13

3.4 光学系 14

3.4.1 固定焦点における最適化 18

3.4.2 多重焦点における最適化 20

3.5 アルゴリズム 22

3.5.1 画像列最近傍内挿 22

3.5.2 バックプロジェクション 22

3.5.3 多重焦点画像列最近傍内挿 24

3.6 実験 26

3.6.1 シミュレーション 26

3.6.2 実画像実験 33

3.7 本章のまとめ 37

4 モデリングにおける高解像度化 **39**
4.1 背景 39
4.2 前提条件 40
4.3 高解像度 3D モデリング 41
4.4 三次元幾何モデリング 42
4.4.1 垂直エッジ検出 42
4.4.2 対象平面位置推定 42
4.5 テクスチャの高解像度化 46
4.5.1 テクスチャ領域の分割 46
4.5.2 解像度重みテーブル 47
4.5.3 テクスチャ画像のマッチング 47
4.5.4 テクスチャ画像の高解像度化 49
4.6 実験 51
4.7 本章のまとめ 58

5 おわりに **60**

謝辞 **61**

参考文献 **62**

研究業績 **66**

付録 **68**
A. 固定焦点入力画像列 68
B. 多重焦点入力画像列 71
C. モデリングにおける入力画像と重みテーブル 74
D. テクスチャ画像列と解像度重みテーブル 76

Chapter 1

はじめに

人間の視野の大きさは垂直で約120度であるが，水平においては単眼視野で約240度と水平視野の大きさと重要性を表している．一方，コンピュータやロボットの視覚として用いられる通常のビデオカメラの視野角は，それに対して60度に満たない．そのため，主にロボットのナビゲーションを目的とした広視野角センサとして，周囲360度が撮像可能な全方位視覚センサが数多く試作，研究されてきた．全方位の視覚情報を獲得する研究には複数の画像を統合する方法と光学系を工夫する研究に大別される．前者には，回転カメラを用いる方法 [Sarachik 89, Zheng 90, Ishiguro 90] やマルチカメラによる方法 [辻 96, Tanahashi 00] がある．後者には，魚眼レンズを用いる方法 [Cao 86, Morita 89] や円錐面 [八木 91, Yagi 95] や球面 [Hong 91]，双曲面 [Yamazawa 95]，放物面 [Peri 96, Nayer 97] と言った凸面ミラーを用いた方法が挙げられる．また，両者を組み合わせたマルチカメラと角錐ミラーによる方法 [川西 97] も提案されている．

近年では，ロボットの目としての応用のみならずその超広画角を利用して，監視システムやテレプレゼンスシステムならびに人工現実感や複合現実感のためのレンダリングにと人に対する提示目的の応用にも盛んに用いられている．このような，人間への提示目的では全方位視覚センサに次のような特徴が要求される．

- 全方位実時間撮像

  全方位視覚センサには一度に周囲360度を撮像するタイプと，数回に分けて撮像するタイプがある．動的シーンを必要とする場合には，全方位撮像に時間のかからない一度に周囲360度を撮像するものが適している．

  例: 魚眼レンズ，マルチカメラ，凸面ミラー

- 単一視点による透視投影の光学特性

  全方位視覚センサでは周囲360度の情報を複数枚の平面投影画像に分けるか，画像を歪めて1枚の画像に収める必要がある．このとき，全方位視覚センサの種類によっては，ひとつの視点から周囲360度を撮像するという透視投影の光学特性をもたないものがある．単一視点による透視投影の光学特性は，撮影された全方位画像から任意形状のディスプレイ・スクリーン面への正確な投影画像の生成や画像から環境の幾何的構造の理解等を可能とする．

  例: 回転カメラ，凸面ミラー (双曲面，放物面，角錐面)

- シームレスな画像生成

  全方位視覚センサには，複数台のカメラにより周囲360度を撮像するものと，1台のカメラにより撮像するものがある．カメラキャリブレーションの難しさから，複数台カメラから得られた画像の繋ぎ合わせには問題が残る．

  例: 回転カメラ，凸面ミラー

- 高解像度

  全方位視覚センサには，複数台のカメラにより周囲360度を撮像するものと，1台のカメラにより撮像するものがある．当然ながら，複数台のカメラによる方法の方が，一台あたりの撮像画角の違いから解像度が高い．また，画像を歪めて画像に収めるタイプでは，画像中の部位毎に解像度が異なるという問題がある．

  例: 回転カメラ，マルチカメラ

数ある全方位視覚センサの中で双曲面鏡を用いたHyperOmniVision(Hyperboloidal Omnidirectional Vision Sensor: 双曲面反射型全方位視覚センサ)[Yamazawa 95]は，これらのうち高解像度以外の複数の特徴を持ち合わせ，人への提示目的への応用に適したセンサといえる．しかしながら，一枚のCCDで全方位を撮像するという構造上，解像度が低いという問題をもっている．そこで，本論文ではこの全方位視覚センサHyperOmniVisionの低解像度問題を改善するための高解像度化手法について論じる．

2章において全方位視覚センサHyperOmniVisionの基本原理，射影特性，光学特性について述べる．次に3章で全方位視覚センサHyperOmniVisionに適応した高解像度化として，処理手法のみならず撮像時のセンサ操作，センサ光学特性，センサ設計指針および最適化について述べる．さらに4章で，モデリングにおける高解像度化として，全方位視覚センサ

HyperOmniVision によるモデリング手法とテクスチャの高解像度化手法について述べる．この手法はモデリングという応用に特化することで，センサ移動を伴うビデオストリームから高解像度化を行うことができる．

Chapter 2

全方位視覚センサ HyperOmniVision

2.1 全方位撮像と画像変換

HyperOmniVision は図 2.1，2.2に示すように，鉛直下向きの双曲面鏡と上向きのカメラから構成される．双曲面鏡は式 (2.1)，(2.2) のように表され，二つの焦点 $(0,0,c)$，$(0,0,-c)$ をもち，カメラは双曲面の中心軸と同軸に主点が双曲面鏡のその一方の焦点 $(0,0,-c)$ にくるよう配置されている．このように配置することで，センサの周囲 360 度を一度に撮像することができる (図 2.4-(a))．また，図 2.2に示すように双曲面鏡のミラー焦点に向かって入ってくる光は，双曲面の特性によりミラーに反射後，もう一方の焦点に向かう．すなわち，画像上での任意の写像点 $p(x,y)$ と俯角 α，方位角 θ の関係は，式 (2.3)-(2.6) から一意に決まる．この式から，全方位入力画像 (図 2.4-(a)) を図 2.3に示す関係により，ミラー焦点を視点とした透視変換画像 (図 2.4-(b)) やパノラマ画像 (図 2.4-(c)) に容易に変換できるという特性をもつ．

$$\frac{X^2+Y^2}{a^2}-\frac{Z^2}{b^2}=-1(Z>0) \tag{2.1}$$

$$c=\sqrt{a^2+b^2} \tag{2.2}$$

$$\tan\theta=\frac{Y}{X}=\frac{y}{x} \tag{2.3}$$

$$Z=\sqrt{X^2+Y^2}\tan\alpha+c \tag{2.4}$$

$$\alpha=\tan^{-1}\frac{(b^2+c^2)\sin\gamma-2bc}{(b^2-c^2)\cos\gamma} \tag{2.5}$$

$$\gamma=\tan^{-1}\frac{f}{\sqrt{x^2+y^2}} \tag{2.6}$$

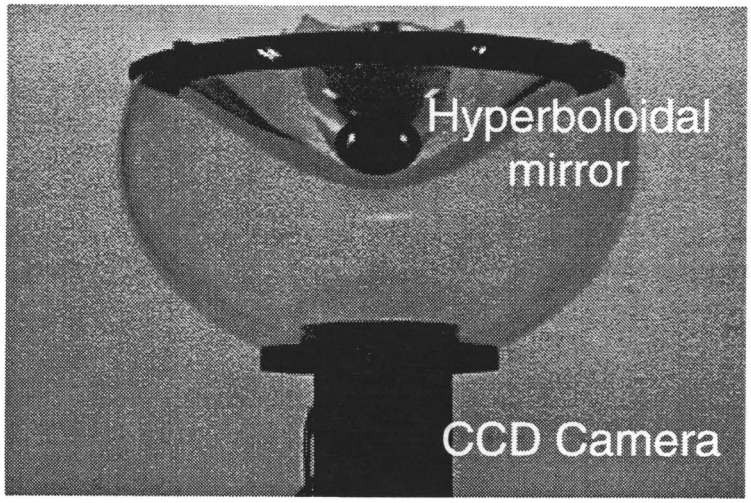


図 2.1: HyperOmniVision

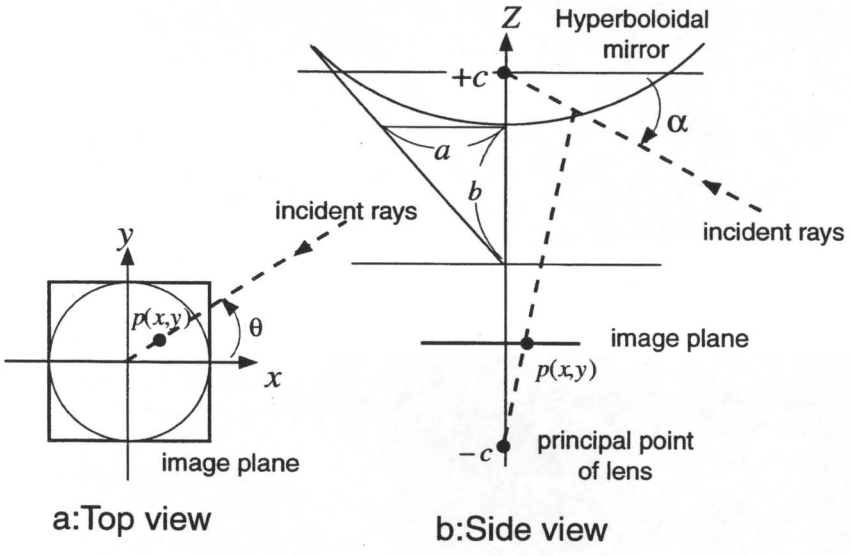


図 2.2: HyperOmniVision の光学系

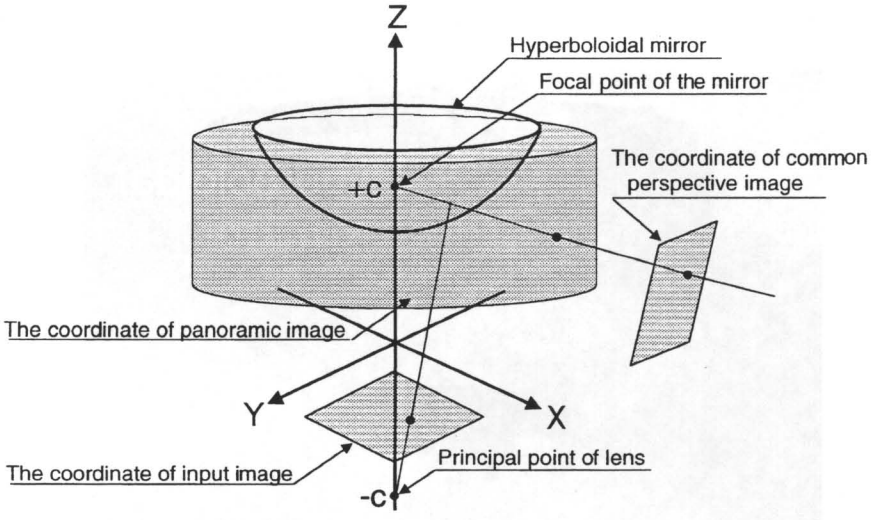
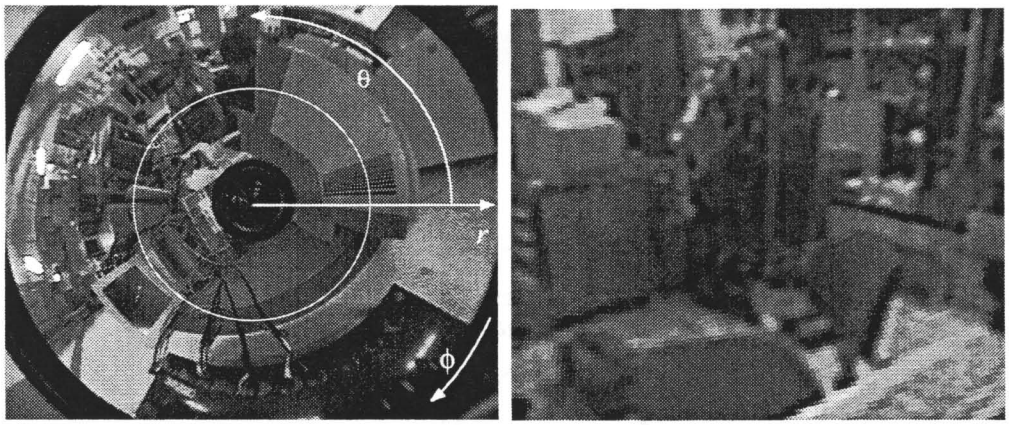
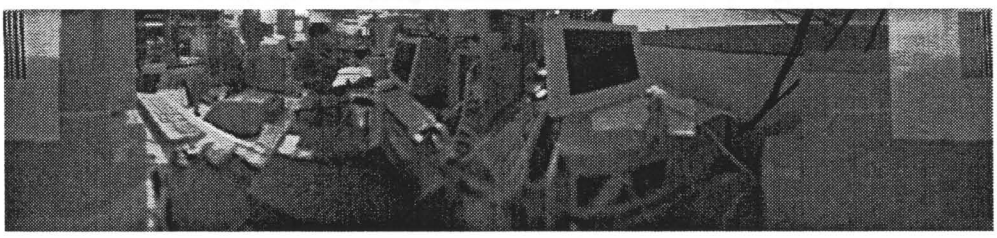


図 2.3: 入力画像と変換画像の射影の関係



(a) 入力画像　　(b) 透視変換画像



(c) パノラマ変換画像

図 2.4: 全方位入力画像と変換画像例

2.2 低解像度と収差問題

2.1節に示したように，全方位視覚センサ HyperOmniVision は入力全方位画像に無歪みでシームレスな透視変換やパノラマ画像に変換できるため，人への提示目的のための広視野角撮像センサとして適している．しかし，図2.3に示したように，たった一枚の CCD センサで全方位を撮像するため，画角分解能が全体的に劣るという欠点をもつ．さらに図2.4-(a)のように入力画像は撮像対象を放射状に撮像するため，図2.5に示すように俯角に伴って画角分解能が低くなる．図2.5は入力画像の周囲方向と放射方向において，俯角に対する画角解像度を実線により示したものである．すなわち，パノラマや透視変換により引き延ばされ，変換画像下部の解像度の低さは更に顕著になる．本研究では，全体の解像度を向上させることはもちろんのこと，この俯角に対する解像度の違いを緩和させることを目指した．

また，HyperOmniVision は全方位を一度に撮像すると同時に，大きな垂直視野角をとるために曲率の大きな双曲面鏡を用いている．この曲面ミラーを介して反射された光は平面ミラーとは異なり，一点に虚像を結ばずボケを生じる．その原因として，球面収差および非点収差がある．球面収差とは，図2.6 に示すように入射される光が光軸から離れれば離れるほど焦点が近くなり，結像点がずれるために生じる収差である．非点収差とは，ミラーの垂直と水平方向の曲率が異なるため生じる収差である．図2.7に示すように垂直と水平方向の結像点がずれるために，非対象なボケを生む．HyperOmniVision では，これら二つの収差の複合により，CCD 面上で位置に依存した非対象なボケをもつ．図2.5は焦点を俯角0度に合わせた際の入力画像の周囲方向と放射方向において俯角に対する PSF(Point Spread Function) の大きさをそれぞれ点線により示したものである．これらの収差による影響を軽減する方法としては，カメラの絞りを絞ること，ミラー曲率を小さくすることが考えられる，しかしながら，絞りを絞ることは入射光量を減らすことを意味し，画像のダイナミックレンジ確保からも限度がある．また，ミラー曲率を小さくすることは，垂直視野角の減少を意味し同様にトレードオフの関係であり，実際には完全な解決は不可能である．

これらのことから，全方位視覚センサ HyperOmniVision の高解像度化においては，センサの持つ射影および光学特性を考慮することが重要である．

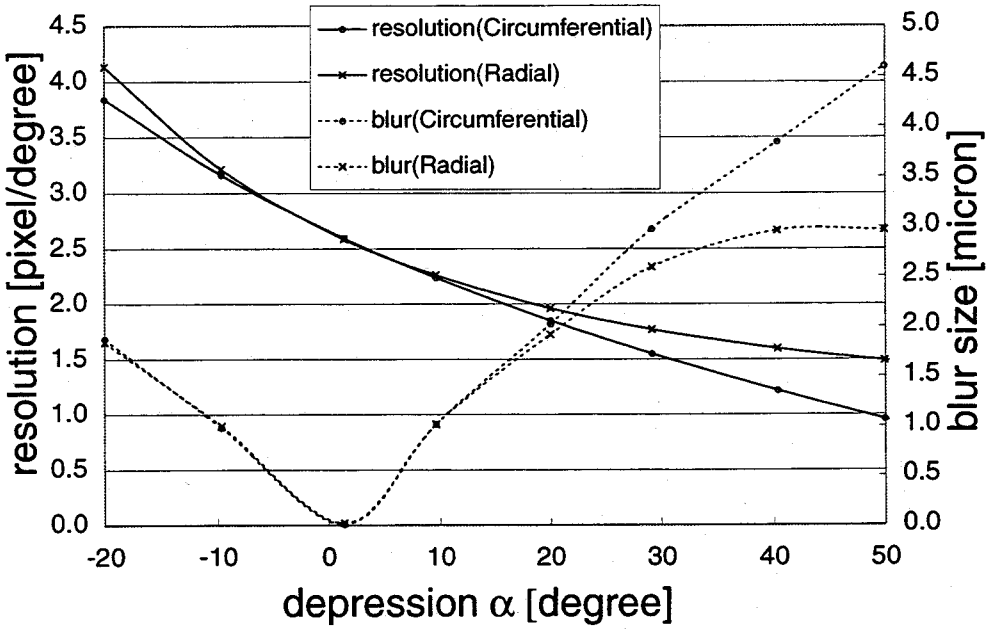
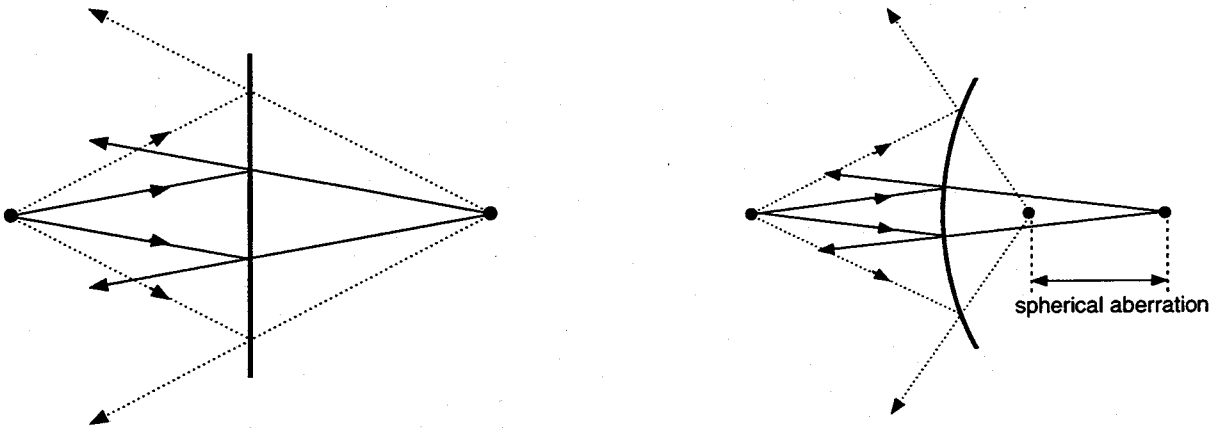


図 2.5: 俯角に対する解像度と PSF (焦点位置 $\alpha = 0^\circ$)



(a) 平面ミラー　　(b) 曲面ミラー

図 2.6: 球面収差

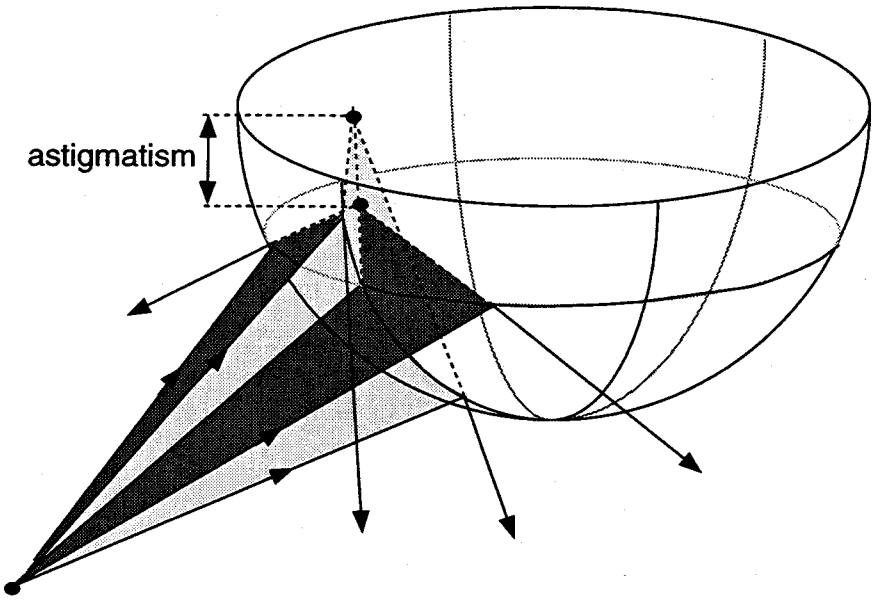


図 2.7: 非点収差

Chapter 3

全方位視覚センサの高解像度化

本章では，全方位視覚センサ HyperOmniVision 特有の低解像度および俯角に対する解像度の違いを高解像度化により改善する手法について述べる．提案する高解像度化手法は，HyperOmniVsion による全方位同時観測，ならびに透視画像やパノラマ画像への変換が可能であるという射影特性を維持しつつ，全方位特有の問題を考慮したシステム設計および処理手法である．また，実験結果から各手法の長所，短所について考察する．

3.1 従来の高解像度手法

一般に，撮像素子の分解能が一定の場合，解像度を向上させる方法としては，センサ自体の構造または機構を工夫する試みと画像処理手法による 試みが考えられる．たとえば，一つのアプローチとして，水平に設置されたカメラを鉛直軸周りに回転させる方法 [Zheng 90] が提案され，詳細なパノラマ画像を得ることのできる手法があるが，周囲 360 度パノラマ視野の映像を獲得するのに時間がかかるとともに，パノラマ視野を同時観測することはできないという欠点がある．また，Barth ら [Barth 96] はラインスキャンセンサを高速に回転させるシステムを構築した．このシステムは低解像度での全方位高速撮像が可能であるが，37500 × 256 画素の高解像度パノラマ画像を得るには同様に 3 分を要し，垂直解像度が低いという問題点を持つ．また，川西らの六角錐ミラーとカメラ 6 台からなるマルチカメラシステム [川西 97] は 3000 × 330 画素のパノラマ画像をビデオレートで得ることができるが，カメラ間のキャリブレーションの問題とシステム規模の点で課題が残る．Nayer ら [Nayer 00] は，凸面鏡反射光学系の全方位視覚センサを横に設置し，鉛直周りに回転さ

せることで，640 × 480 画素の CCD カメラから 4000 × 2000 画素のパノラマ画像を生成できるシステムを構築した．しかし，カメラ回転に 3 分を要し，パノラマ視野領域の同時観測を行うことができない．

一方，画像処理手法により解像度を向上する試みには，カメラの動きによる画素ずれを想定した画像列を用いて，撮像された画像信号の生成過程を含めて画像処理により復元することで，仮想的に CCD 分解能を越える超解像を実現する手法がある．Tsai と Huang[Tsai 84] は，並進ずれの画像列を用いた周波数領域における超解像方法を提案した．また，Keren と Pelg[Keren 88] は求める高解像度の初期画像から，それが撮像される光学過程をシミュレートして得られた推定撮像画像と実際撮像された画像列の誤差を最小にするように高解像度画像を反復推定する方法を提案した．Irani と Pelg[Irani 91] は，トモグラフィに似たバックプロジェクション手法により，また Cheeseman ら [Cheeseman 94] は，ベイズ推定を用いることで超解像を実現した．また，画像の光学過程の復元は考慮せず，直接的に複数の画素ずれ画像を内挿することによる高精細化手法 [遠藤 87, 小松 91] が提案されている．しかし，どの手法も通常のテレビカメラを対象としたもので，光学特性が特殊な HyperOmniVision などの全方位視覚センサを対象とした手法ではなく，そのままでは活用できない．

3.2 HyperOmniVision の高解像度化

全方位視覚センサ HyperOmniVision の高解像度化は，画素ずれ画像列を組み合わせることにより行う．全方位視覚センサ HyperOmniVision は通常のビデオカメラと異なり，2章で述べたように特殊な光学特性や射影特徴をもつ．高解像度化において，具体的には球面収差や非点収差による入力画像のボケが高解像度化を阻害するという問題をもつ．また，大きな利点である全方位の連続撮像や任意の射影変換を可能にする透視投影の光学特徴を損なわないセンサ操作が必要となる．さらに応用となる映像提示を考えた場合，一般にユーザに提示される画像は，人が直感的に理解しやすい通常のカメラ画像 (透視射影) やパノラマ画像 (円筒面射影) であり，入力画像をこれらの射影空間に変換した状態での画質を考慮する必要がある．

以上のことから，全方位視覚センサ HyperOmniVision に適応した高解像度化について 3.3節でセンサ操作，3.4節で光学特性と最適化，3.5節でアルゴリズムについて述べる．図 3.1に各アルゴリズムと関連項目と章の関係を示す．

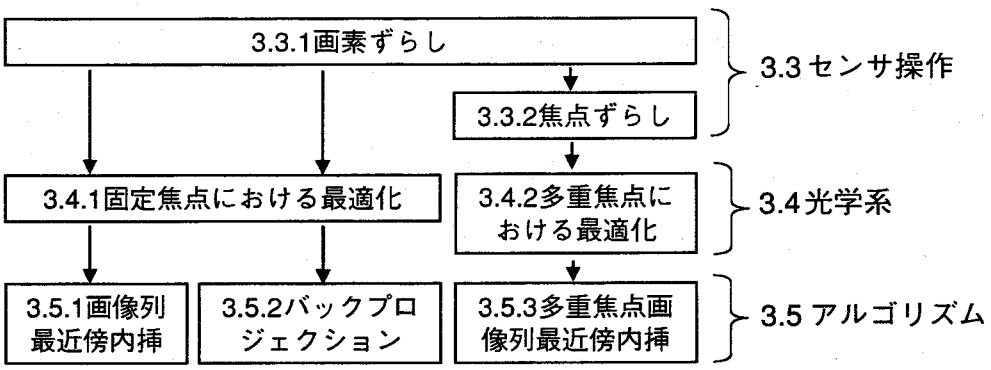


図 3.1: 各アルゴリズムと関連項目

3.3 センサ操作系

3.3.1 画素ずらし

図 2.2に示すように HyperOmniVision は回転対称の光学系である．そのため，センサの Z 軸回転運動においては，光学的な変化は CCD の回転のみであり仮想視点 $+c$ は変化しないため，HyperOmniVision の特徴のひとつである透視投影の光学特性を崩さない．また，カメラパラメータの変化は CCD の回転角 ϕ のみであり，画像列間の位置合わせが容易であるという利点を持つ．さらに，入力画像は矩形座標系のため，各画素は回転により回転中心からの距離が変化する．つまり，回転により画素のずれが出力画像の水平方向（入力座標系円周方向）だけでなく，垂直方向（入力座標系放射方向）においても起こることから，鉛直軸周りの動作により両方向の解像度の向上が行える．以上の HyperOmniVision のセンサ特徴から，高解像度化のための画素ずれを生むカメラの動きとしてこの Z 軸回転を採用した．図 3.2に Z 軸回転による画素ずれ画像列とその変換画像，出力画像の関係を示す．なお，入力画像の外周を基準とし，出力画像の横サイズを $2\pi r \times n$ と定義する．ここで n は拡大率を示し，変換画像サイズおよび入出力画素比は表 3.1 に示すようになる．以後，本章では特に断らない限り出力画像をパノラマ変換画像とし，出力画像サイズを変換画像拡大比 n によって示す．ここで，座標系の違いから $n = 1$ の場合であっても，図 2.5の関係より出力画像の下部にいくに従って情報量が大幅に不足していることに注意されたい．

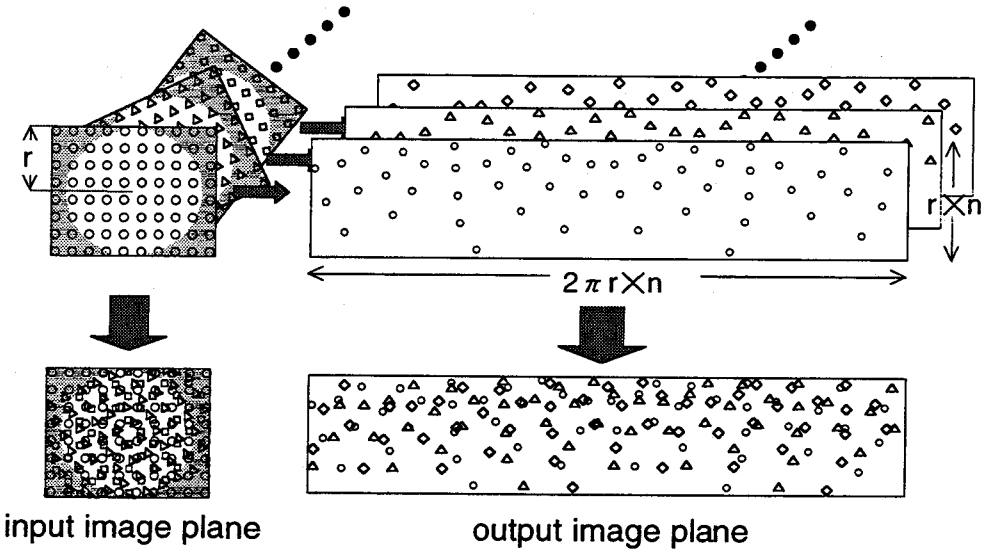


図 3.2: 入力画像列と出力画像におけるサンプリング点の関係

表 3.1: 出力画像サイズと入出力画素数比

n	panoramic image size [pixels]	input/panoramic pixel ratio
1	1282×165	0.674
2	2765×330	0.168
3	4146×495	0.0749
4	5529×660	0.0421

Transformed pixels on input 142518(/512×440)[pixels]

3.3.2 焦点ずらし

HyperOmniVision の CCD 上での集光を図3.3に模式で表す．このように，センサ特有の収差により俯角に対して合焦点距離が著しく異なる．2.2節において画素ずれによる高解像度化を阻害するこの収差の低減と広視野角撮像はトレードオフの関係にあり，光学設計による改善は困難であることを述べた．また，画像処理によるボケ復元の処理は，HyperOmniVision のようにボケが大きい場合には，計算コストの割にあまり効果的ではない．従来，焦点距離拡大の観点から多重焦点画像を用いる研究 [内藤 96, 児玉 97] が提案されている．これらの手法は，焦点距離の異なる部分合焦点画像から焦点が合った部分のみを組み合わせることにより，ボケの無い全焦点画像を得るものである．焦点距離の異なる部分焦点画像列を

得るためには，レンズを移動させ焦点距離を逐次変化させる必要があるが，高速の可変焦点レンズ [金子 97, Kaneko 97] の出現により実時間での多重焦点画像の撮像も可能となっている．

そこで，可変焦点レンズの使用や CCD 面を移動させることにより焦点距離を変化させて得られる多重焦点画像列を用いて HyperOmniVision 特有の収差問題を解決し高解像度化の向上をねらう．以後本章では，図 3.3中のように俯角-10 ° に焦点を合わせた場合の焦点距離を f_{-10} と表現する．

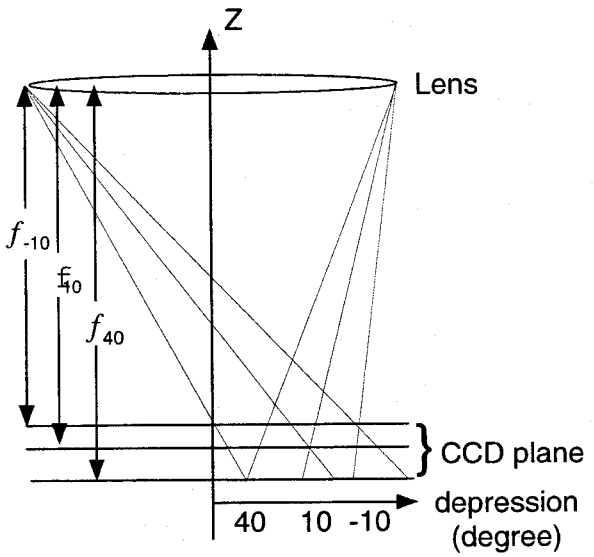


図 3.3: 焦点ずらし

3.4 光学系

一般に，画素ずれを細かくすればするほどサンプリング数が増え，解像度が向上するものと思われがちだが，現実には，集光限界などの影響によって解像度の向上が制限される．HyperOmniVision では図 2.5に示すように，収差により焦点位置から離れるに従い放射周

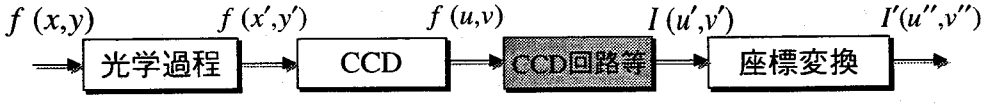


図 3.4: 撮像モデル

表 3.2: ミラーとレンズパラメータ

Hyperboloidal mirror	a	63.8mm
	b	88.4mm
CCD camera	Lens	paraxial
	F	1.4
	CCD cell pitch	15 micron
	CCD cell size	7.5 micron

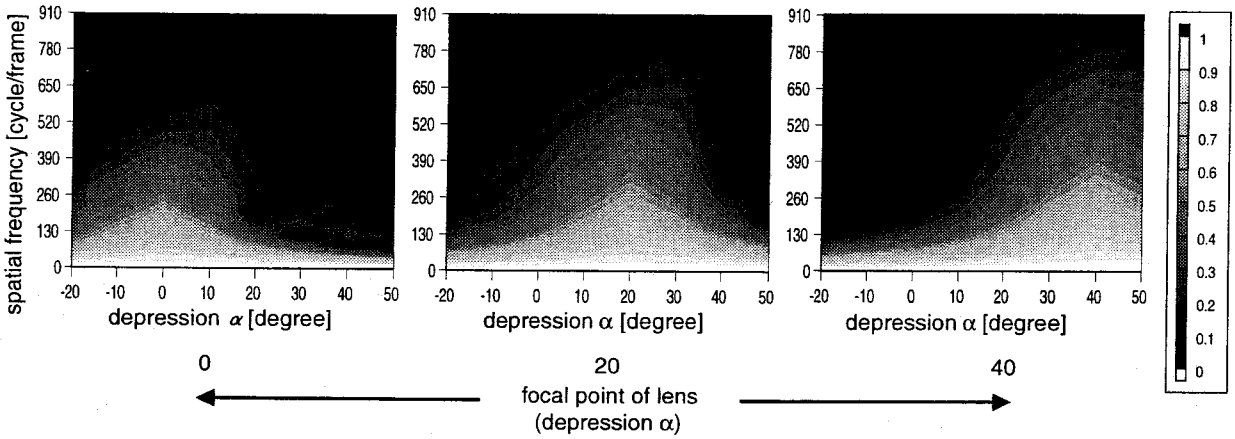


図 3.5: CCD 面での MTF 特性 (周囲方向)

囲方向において非対称なボケ特性を示す．このボケにより解像度の向上が制限されるため，HyperOmniVision の光学特性やレンズ焦点位置，変換対象画像上での分解能など，撮像過程全体での特性評価が重要となる．

そこで，本章では，図 3.4に示すように撮像過程を物理モデルにより定義し，各モデルの特性を求めることで光学系の最適化を図る．具体的には，HyperOmniVision およびレンズの光学系，CCD の受光特性，出力画像面上での周波数特性をモデル化し，今回の実験で用いたセンサを例にしてシミュレーションにより，解像度向上の限界の評価と最適化を行う．

ここで，特性が特定できない CCD 回路やビデオキャプチャボード等のアナログ過程を含む部分 (図 3.4中灰色部) は無視している．表 3.2に評価に用いたセンサ系のパラメータを示す．

まず，HyperOmniVision の双曲面鏡とカメラの集光レンズの特性をレイトレーシングによりシミュレートし，各焦点位置における MTF(Modulated Transfer Function) を求めた．

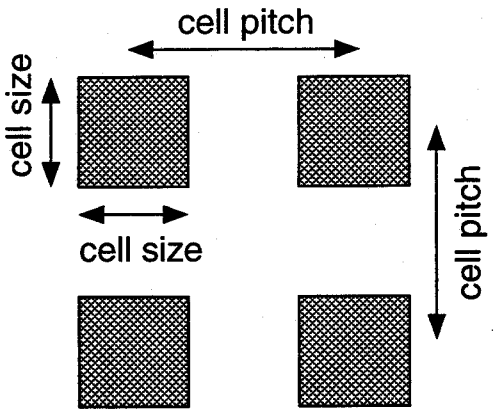


図 3.6: CCD の模式図

焦点位置が俯角 0 °, 20 °, 40 ° のところに合わせた場合の MTF の例を図 3.5に示す. 図中, 縦軸, 横軸は空間周波数ならびに俯角 α である. 図 3.5より, 合焦点俯角近傍で最も空間周波数が高く, レンズの焦点位置の変化に伴い MTF 特性も変化することが見てとれる.

実際の CCD の受光面は実際には点ではなく, 図 3.6のように一定の感度を保つため有限の大きさを持つ. そのため, 得られた値はこの窓内の平均輝度となるためローパスフィルタとして振る舞い, その帯域は制限される. 図 3.7に画素ずらしによる CCD の周波数通過特性を示す. 画素ずらしなしの時の通過限界はサンプリング定理に従って, ナイキスト限界である 33cyle/mm である. それに対して, 画素ずらしを用いることにより, 図 3.7の CCD のカットオフ周波数である 80cycle/mm となり, ナイキスト限界に対して約 2.5 倍の向上が行えることが分かる.

また, 図 3.8に CCD セル/ピッチ比が 1/4 及び 3/4 の CCD を用いた際の画素ずらしによる周波数特性を重ねて示す. これより, セルピッチに対してセルサイズが小さいほど周波数特性がよく, 画素ずれによる高解像度化に向くことが示された.

つぎに, 画像変換に伴う周波数の変化について考える. 図 3.9に出力における最大要求周波数の入力換算を例として周囲方向について示す. 図 2.4-(c) に示したようなパノラマ画像変換を行う場合, 図 3.9から出力画像で同じ空間周波数であったとしても, 俯角に伴い入力での要求周波数が高くなることが分かる. すなわち, 均一な解像度の出力画像を得るためには, 俯角-20 ° に対し 50 ° では入力画像上で 3 倍以上の解像度が必要なこととなる.

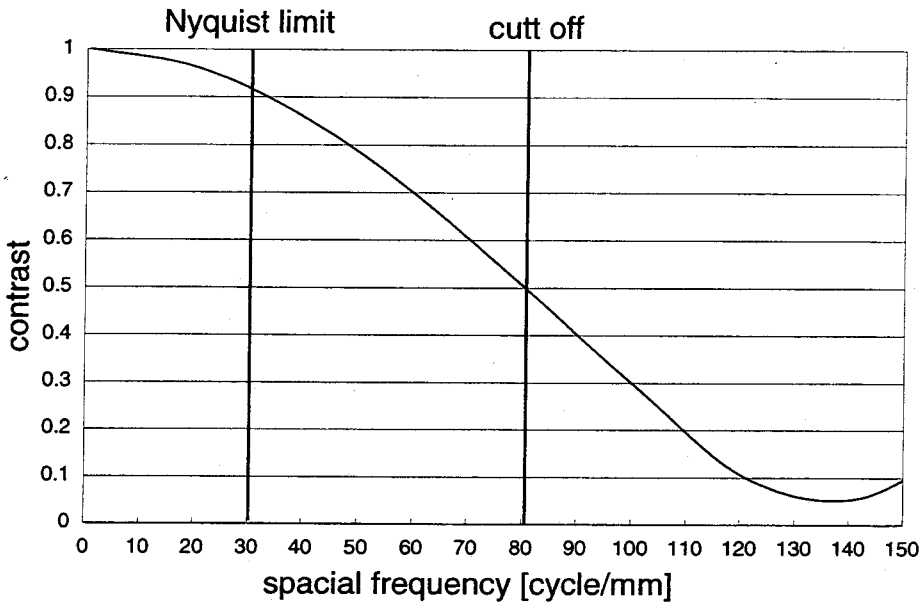


図 3.7: 画素ずらしによる CCD 周波数特性

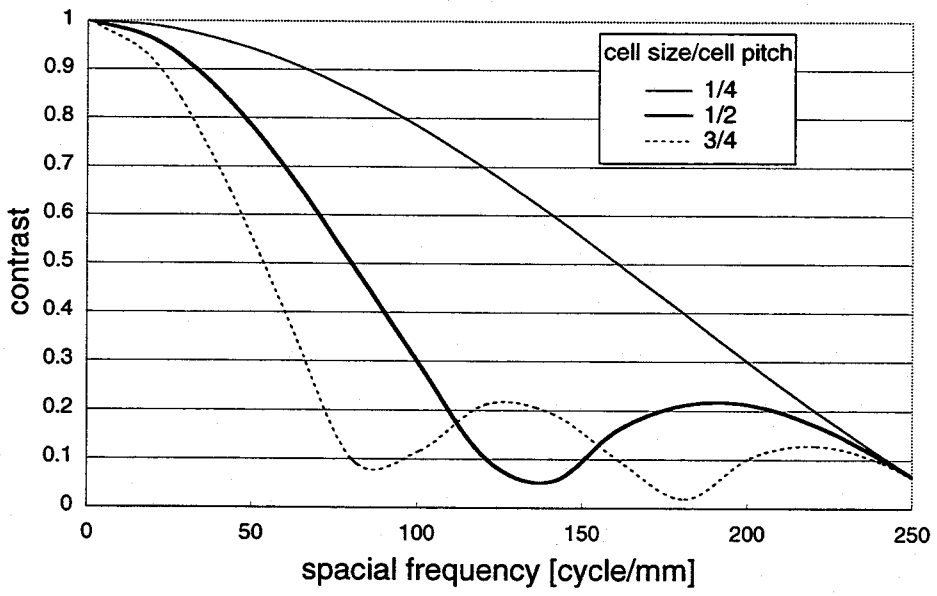


図 3.8: CCD セル/ピッチ比と周波数特性

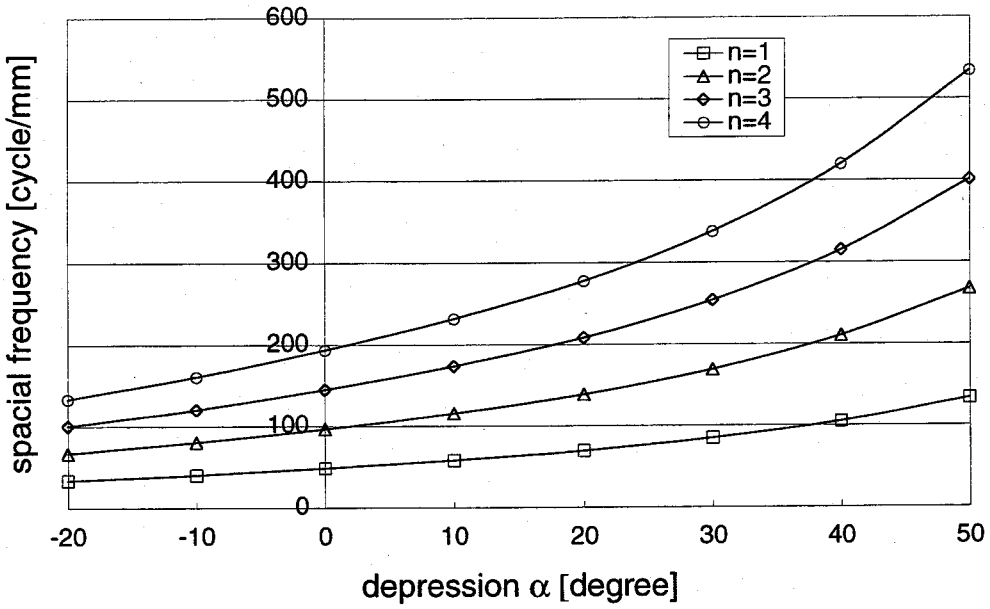


図 3.9: 出力画像サイズに対する入力要求周波数

3.4.1 固定焦点における最適化

上述の三つの特性 (MTF，CCD 周波数特性，画像変換の関係) を考慮し，固定焦点における撮像系の最適化を行う．図 3.10，3.11にレンズの焦点位置を俯角 0 °，20 °，40 ° に合わせた際の撮像系全体の空間周波数特性を出力画像の x 軸，y 軸方向について，シミュレーションして求めた結果をそれぞれ示す．図中縦線は，各画像拡大比 n における出力画像の最大周波数 (ナイキスト周波数) を表す．これから，出力画像サイズにより最適なレンズの焦点位置や全体の解像度の再現性に違いが見られることから，求める出力画像の解像度によって最適焦点が異なることが明らかとなった．これは，解像度が上がるにつれ俯角の大きい方から限界に近づくためである．直接的な情報量の向上は，変換画像拡大比 $n = 2$ あたりであることがわかる．以上，図 3.10，3.11から変換画像拡大比 $n = 2$ の時の表 3.2の撮像システムにおける最適レンズ焦点位置は俯角 20 ° の位置に焦点が合っている時とした．ところで，従来の HyperOmniVision の設計では，画素数の多い外側または俯角ゼロ度近傍で MTF 特性が最大となるように設計されてきた．しかし，画素ずれによる高解像度化を考慮した場合，光学特性 (MTF) だけでなく，CCD や画像変換というシステム全体の特性から俯角 20 ° が最適な場合として選ばれた．また，図 3.10，3.11で示す特性はあくまで画像全体の平均特性を表すものである．そのため，透視変換のように，画像の一部のみを最適化する場合には MTF ピークを目的視野に合わせるのがよいと言える．

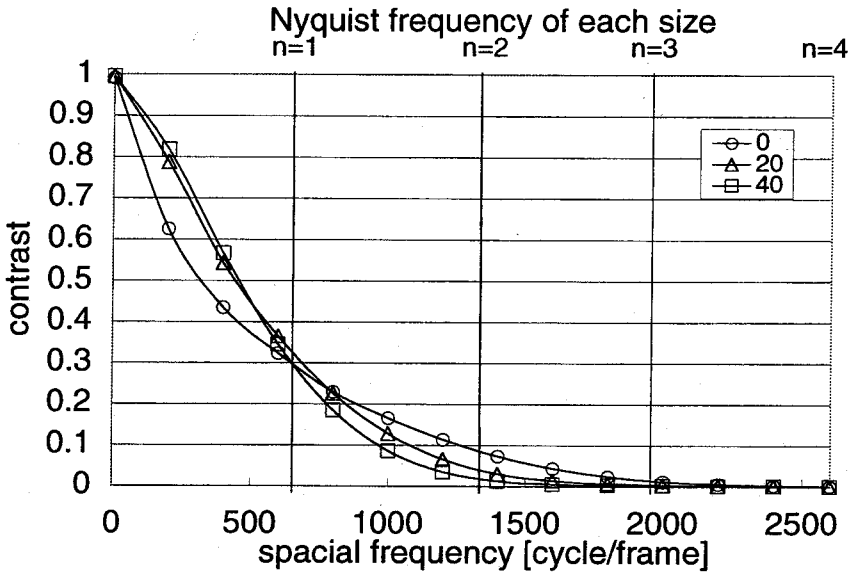


図 3.10: パノラマ出力画像における周波数特性 (x 方向)

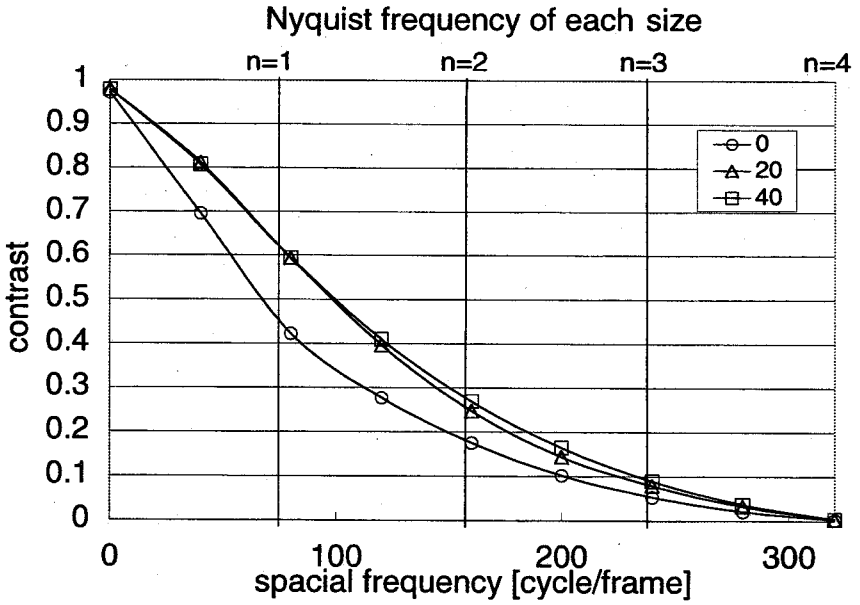


図 3.11: パノラマ出力画像における周波数特性 (y 方向)

3.4.2 多重焦点における最適化

図3.7のCCDの周波数特性から，CCDの遮断周波数はナイキスト限界に対して画素ずらしにより向上することを前で述べた．それに対してHyperOmniVisionの場合，図2.5に示したような俯角に依存した収差を持つため，図3.12に示すように，CCDの遮断周波数をMTF特性が俯角5°以下及び40°以上で下回っている．図3.12はf_{20}に焦点を合わせた時の俯角に対するMTF遮断周波数特性と画素ずらしによるCCDの遮断周波数特性の関係を周囲方向に対して例示したものである．また，同図に俯角全域においてボケが2倍になった場合をセンサ小型化や広視野角化による例として示した．すなわち，画素ずらしによりCCDの周波数限界が向上しているにもかかわらず，光学特性がこれを満たせていない．またこの傾向は，センサの小型化や広視野角化により光学ボケが大きくなり，MTF特性が悪化した際にはCCD要求を満たす領域はさらに狭まることを示している．この考察から，HyperOmniVision特有の俯角に対する光学ボケ特性が従来法の解像度向上を阻害することが分かる．

図3.13に示すように，合焦点位置をずらすとMTF特性も変化する．すなわち，焦点距離f_{-10}の場合には，およそ俯角-20°～3°の領域，f_{10}の時には-3°～28°と，焦点が合っている俯角の近傍領域ではCCDの遮断周波数特性を満たしていることがわかる．このように，CCDの周波数限界を満たす複数の焦点距離を選択して撮像した画素ずれ画像列を用いて，合焦点領域ごとに処理を行うことにより，HyperOmniVision特有のボケ問題を解決し解像度の向上を図る．

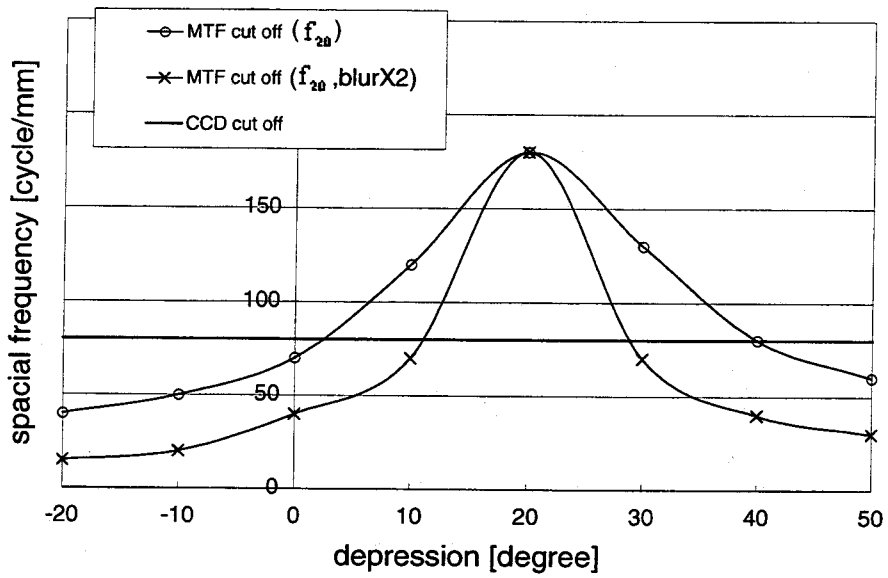


図 3.12: 俯角に対する MTF と CCD の遮断周波数特性 (入力画像周囲方向)

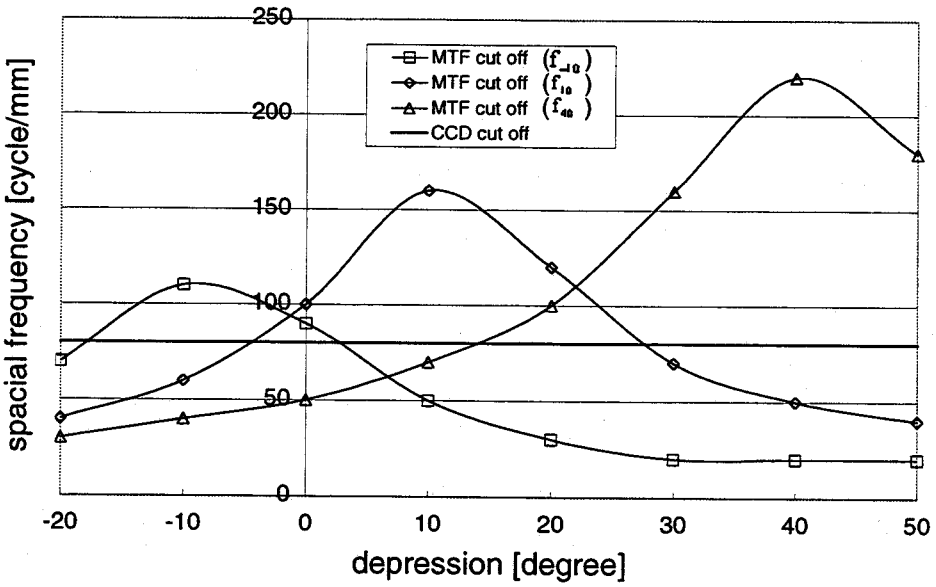


図 3.13: 複数の焦点位置における MTF と CCD の遮断周波数特性 (入力画像周囲方向)

3.5 アルゴリズム

画素ずれ画像列を用い，高解像度化を行うためのアルゴリズムについて述べる．従来，超解像を実現する手法として提案されている反復推定やバックプロジェクションによる間接的な方法 [Keren 88, Irani 91, Cheeseman 94] は，精度は高いものの計算コストが大きく動的提示を目的とする実時間応用には不向きと言える．そこで本章では，計算コストを重視した手法と精度を重視した手法として，画像列最近傍内挿とバックプロジェクションを各々用いて高解像度化を行った．また，多重焦点画像列を用いた方法として，バックプロジェクションのように，光学劣化復元過程を持たない最近傍内挿法に用いて高解像度化を行った．この手法を多重焦点画像列最近傍内挿として計算コストと高解像度化の両立を狙った．

3.5.1 画像列最近傍内挿

出力画像空間から入力を見た場合，図 3.2のように入力画素は回転による画素ずれにより相対位置が変化する．撮像対象が静止していると仮定した場合，出力画素に対して最近傍の入力画素の値がより正確な情報であると言える．そこで，画像列中において出力画素の最近傍の画素値を出力値として用いて高解像度化を行う．この方法はバックプロジェクションのように反復演算が必要なく，また逐次的に処理できることから計算コストが軽いため，実時間処理が可能であると考える．

3.5.2 バックプロジェクション

バックプロジェクションによる超解像 [Irani 91] は，最近傍内挿等によって作られた初期出力画像 $f^0(\boldsymbol{x})$ から，式 (3.1) より推定入力画像列 $g_k^0(\boldsymbol{y})$ を生成する．図 3.14に示すように，その推定入力画像列と実際に撮像された入力画像列との差をとり，その誤差を出力画像にバックプロジェクションし，更新を繰り返すことにより解像度の向上を行う．式 (3.1), (3.2) にこの過程を式で，求める高解像度出力画像の画素 $\boldsymbol{x}$ と入力画像の画素 $\boldsymbol{y}$ の空間的な関係を式 (3.3) に示す．この方法は，解像度の向上と同時にボケ復元を行えるという利点を持つ．

$$g_k^n(\boldsymbol{y}) = \sum_{\boldsymbol{x}} f^n(\boldsymbol{x}) h^{PSF}(\boldsymbol{x}) \tag{3.1}$$

$$f^{n+1}(\boldsymbol{x}) = f^n(\boldsymbol{x}) + \sum_{\boldsymbol{y}\in U_k \boldsymbol{Y}_{k,\boldsymbol{x}}} (g_k(\boldsymbol{y}) - g_k^n(\boldsymbol{y})) \frac{(h^{BP}_{\boldsymbol{xy}})^2}{c\sum_{\boldsymbol{y}'\in U_k \boldsymbol{Y}_{k,\boldsymbol{x}}} h^{BP}_{\boldsymbol{xy}'}} \tag{3.2}$$

$$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{TRy} \tag{3.3}$$

ここで,

$f^n(\boldsymbol{x})$: 高解像度推定画像

$g_k(\boldsymbol{y})$: 撮像入力画像列

$g_k^n(\boldsymbol{y})$: 推定入力画像列

$\boldsymbol{x}$: 高解像度画像の画素

$\boldsymbol{y}$: 入力画像の画素

$\boldsymbol{Y}_{k,\boldsymbol{x}}$: $\{\boldsymbol{y} \in g_k(\boldsymbol{y}) \mid \boldsymbol{y}$に影響を与える$\boldsymbol{x}\}$

h^{PSF} : ボケ関数

$h^{BP}_{\boldsymbol{xy}}$: バックプロジェクションカーネル

c : 正規化定数

$\boldsymbol{T}$: 変換行列 (パノラマ, 透視投影変換)

$\boldsymbol{R}$: 回転行列

なお，PSF は画像中での位置に依存した楕円分布となる．そこで本手法では，3.4節のレイトレーシング結果より PSF を二次元正規分布により近似して h^{PSF} を作成した．また，バックプロジェクションカーネル $h^{BP}_{\boldsymbol{xy}}$ は，$\boldsymbol{y}$ の $\boldsymbol{x}$ に対する寄与率の重み関数として，式 (3.1) の関係からボーティングにより求めた．

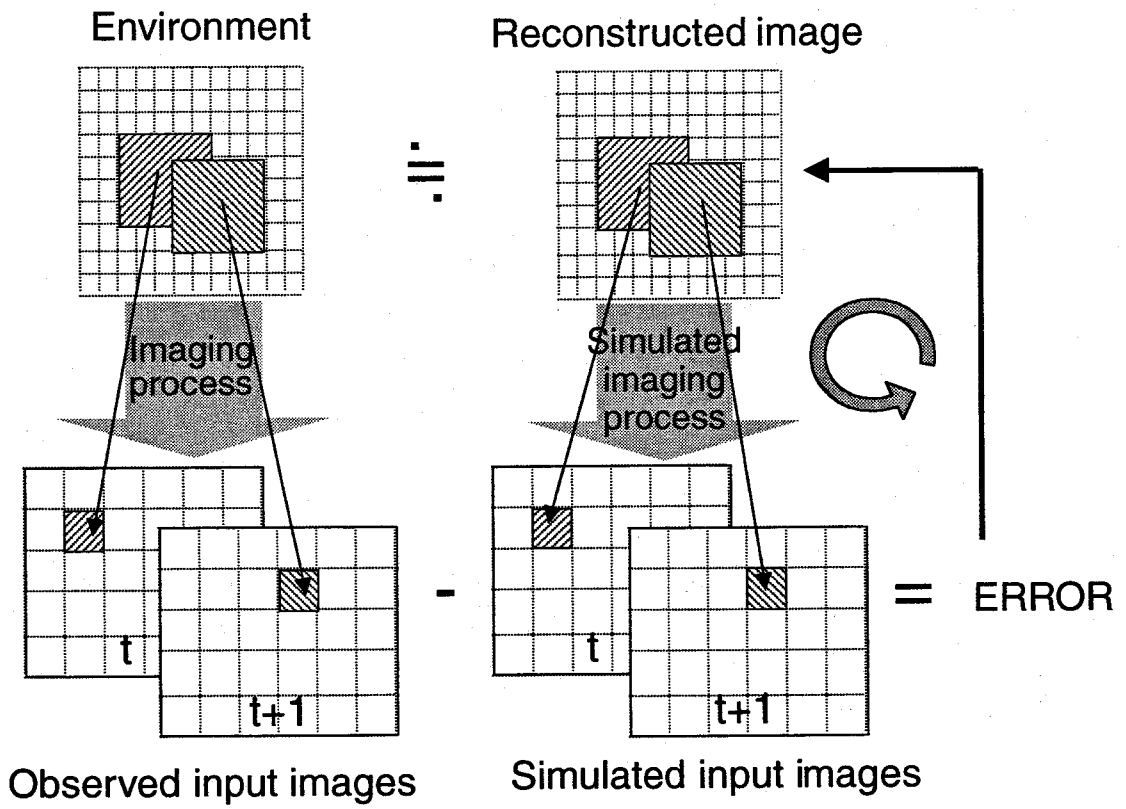


図 3.14: バックプロジェクション

3.5.3 多重焦点画像列最近傍内挿

光学劣化復元過程を持たない最近傍内挿において，ボケによる制限を多重焦点画像列を用いて解決し，計算コストと解像度の向上を両立する．3.4.2項の光学特性より選択された，CCD の周波数限界を満たす複数の焦点距離により撮像した画素ずれ画像列を用いて，合焦点領域ごとに画像列から最近傍内挿を行う．この過程を図 3.15に図示する．

次に高精細化に用いる多重焦点画像の枚数の組み合わせについて考える．図 3.16は各部分合焦点領域において，高解像度化に用いる画像枚数に対する占有画素比を示した図である．ここで出力変換画像はパノラマ画像としている．ここで言う占有画素比とは，出力に活かされる入力画素の割合のことで，出力画素総数に対する入力画素が出力画像において半画素以内に存在する出力画素数の割合のことである．すなわち，図 3.16は入力画像枚数に対して出力に反映される入力画素の数を各部分合焦点領域ごとに示している．図 3.15のように，入力と出力の画像空間は異なるため，入力の画素ずれが出力画像の 1 画素に単純に対応せず，一部重複を含み図 3.16のような非線形な増加となる．また，図 2.5に示すよ

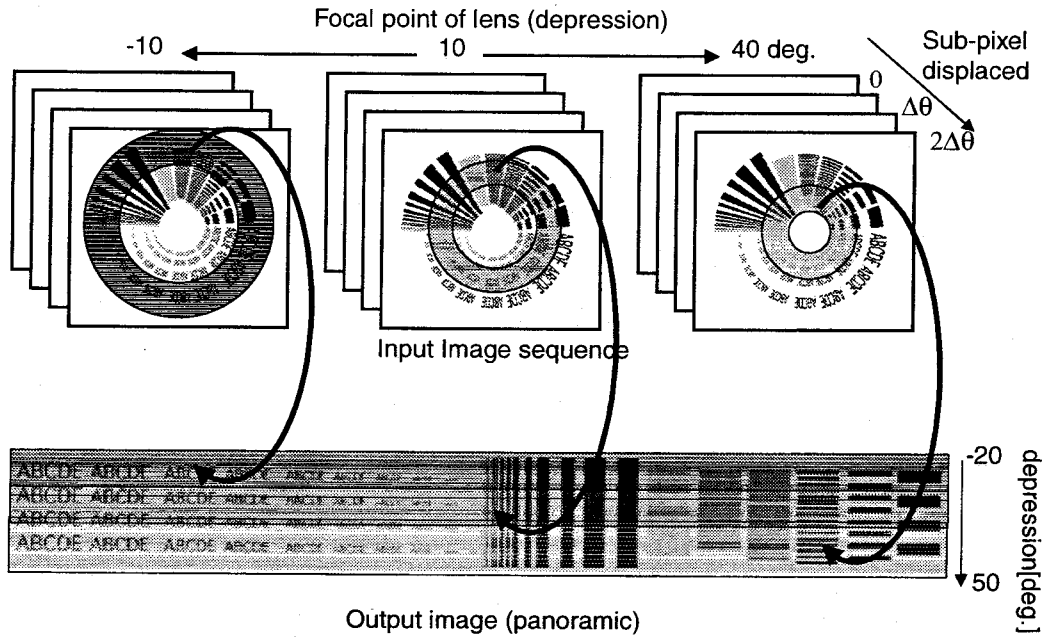


図 3.15: 焦点ずれ画素ずれ画像列を用いた高解像度化

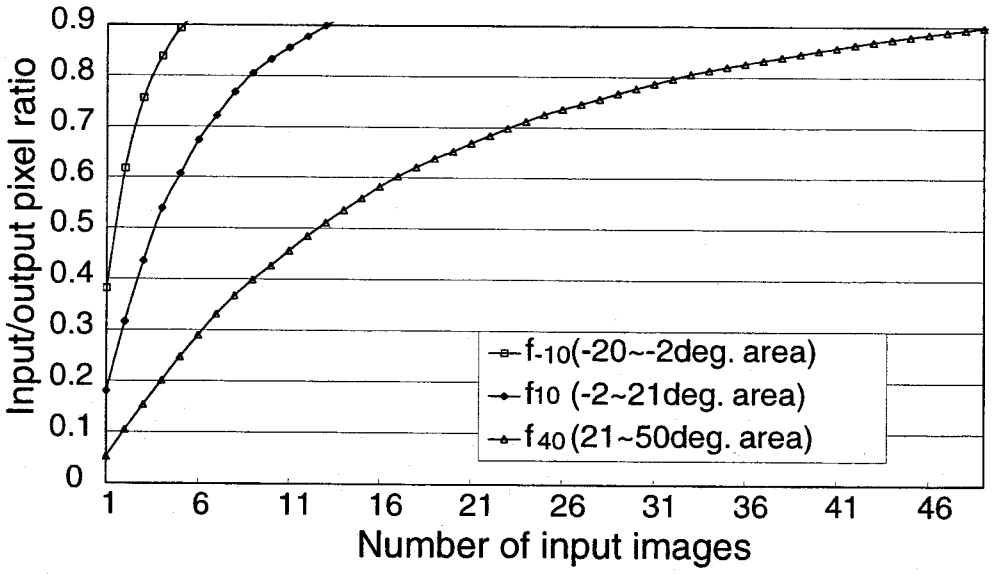


図 3.16: 占有画素比率

うに入力画像に含まれる画素数は俯角が大きくなるにつれ減少するため，出力画像に必要な撮像枚数は各部分合焦点領域ごとに異なる．具体的には図3.16において，俯角の小さいf_{-10}の合焦点領域(俯角-20 ～-2 °)はおよそ4枚の入力画像で出力の9割を満たすが，俯角の大きいf_{40}の合焦点領域(俯角21 ～ 50 °)においては50枚も必要となることが示されている．このことから，出力画像全体の解像度が均一となるように俯角の大きい領域は俯角の小さい領域に対して多くの画像を用いる必要がある．そこでは，この占有画素比を指標にして出力画像の解像度の均一化の観点より部分合焦点画像の組み合わせを決定した．

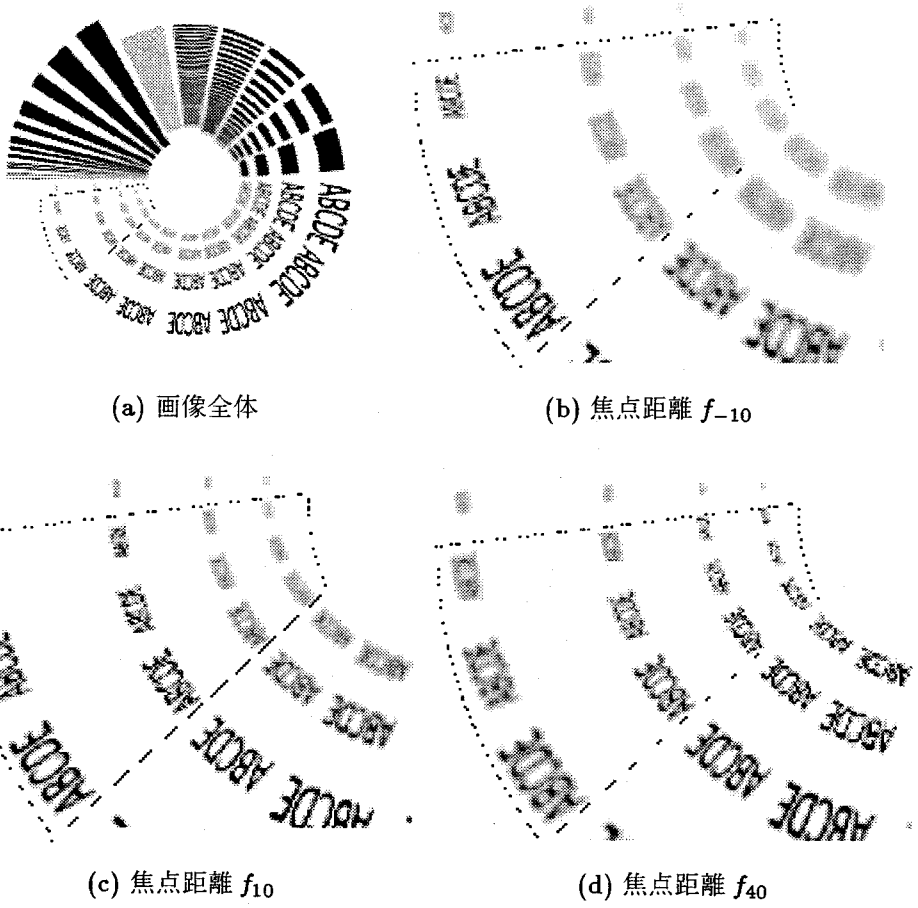
3.6 実験

3.6.1 シミュレーション

全方位視覚センサHyperOmniVisionをシミュレートして作成した入力画像を用いて，解像度向上および画像枚数や光学ボケによる影響を数値的，視覚的に評価を行った．センサモデルとして表3.2のミラーおよびカメラパラメータを用いた．出力画像はパノラマ画像とした．図3.17に，シミュレーション入力画像例をそれぞれ焦点距離f_{-10}，f_{10}，f_{40}の場合について示す．図3.17-(b),(c),(d)より合焦点位置から離れるに従い，画像がボケていることに注意されたい．

各手法による解像度の向上を数値的に検証するために，理想画像とのPSNR(Peak Signal to Noise Ratio)を指標として用いた．PSNRは大きいほど，理想画像との差が小さいことを示し，高解像度化能力が高いことを表す．入力画像列の焦点距離は固定焦点においては，3.4.1項において求められたf_{20}用いた．また，多重焦点の場合では3.4.2項において求められた複数の焦点距離の入力画像を用いた．図中の画像枚数は，占有画素比均一化の観点より組み合わされた部分合焦点画像の合計枚数を示している．図3.18に画像枚数に対する各手法のPSNRを示す．これより，単一画像から一般的に用いられている共一次内挿による結果(PSNR 21.2dB)に対して画像列最近傍内挿で約4dB，バックプロジェクションおよび多重焦点画像列最近傍内挿で5dB以上の解像度の向上が示された．また，画像列の枚数は，三手法とも25枚あたりで解像度の向上が収束していることが分かる．

光学ボケに対する解像度向上への影響を示すために図3.19にボケの大きさに対するPSNRを示す．ここで，横軸は表のモデルセンサのPSFを1としてセンサの設計変更によるMTF悪化の例として，それぞれ1.5倍，2.0倍した場合を示した．図3.19より，画像列最近傍内



(a) 画像全体　(b) 焦点距離 f_{-10}

(c) 焦点距離 f_{10}　(d) 焦点距離 f_{40}

図 3.17: シミュレーション画像例

挿はボケの大きさに比例して線形に PSNR が低下しており，ボケが 2 倍でおよそ-2.5dB もの劣化を招いている．これは，画像列最近傍内挿がボケ復元過程を持たないため，直接的に入力画像のボケによる影響を受けている結果である．それに対してバックプロジェクションでは，信号処理によるボケ復元の能力によりボケの大きさが 2 倍になっても，-0.5dB 程度の低下に抑えられている．同様に多重焦点画像列最近傍内挿においても，CCD 特性を満たすように f_{-10}，f_0，f_{10}，f_{20}，f_{30}，f_{40} と 6 つの部分合焦点画像を組み合わせることで，およそ-0.5dB の低下に抑えられた．このことから，画像列最近傍内挿の欠点を入力画像に多重画像列を用いることで補われていることが分かる．

図 3.20に入力画像枚数に対する各手法における計算コストをそれぞれ示す．バックプロジェクションに対しては，繰り返し計算回数を例として 5,15,25 回について示している．バックプロジェクションは，固定焦点画像を用いしかもボケの影響に対して強いという解像度

向上の観点からは良い結果となったが，計算コストの観点では画像列最近傍内挿に対して100倍以上大きく，実時間処理は不可能である．それに対して，画像列最近傍内挿は計算コストが軽い上に逐次的に処理することができる．ユーザの視線方位等に高解像度化を限定すれば，さらに処理時間は短縮できるため現状でも十分実時間処理が可能である．高解像度化能力に関しては，センサ操作は増えるが多重焦点画像列を用いることで解決できる．

図3.21にバックプロジェクションにおける繰り返し計算回数に対するPSNRを示す．この結果より，ボケの大きさが1倍の時は10回あたりで収束しているのに対して，2倍の場合には25回と，ボケの大きさに比例して，PSNRの収束が遅れていることが分かる．バックプロジェクションは図3.19より光学ボケに強いが，ボケの大きさに伴って計算コストがさらに増大することが現れている．

つぎに，解像度の向上および光学ボケによる影響を視覚的に評価するために，画像列最近傍内挿とバックプロジェクション，多重焦点画像列最近傍内挿による高解像度化を行った結果を画像で図3.22に示す．また，比較として単一画像を用いた共一次内挿による画像も同図に示した．これらは，入力画像(図3.17)の点線領域内について処理した結果である．画像列は25枚を用い，多重焦点画像列最近傍内挿では3.4.2項の最適化より各焦点距離画像の組合せをf_{-10}2枚，f_{10}5枚，f_{40}18枚の合計25枚を用いた．光学ボケサイズが2倍の場合においても同様に，図3.23に示す．この結果から，PSNRによる評価と同様に画素ずれ画像列による解像度の向上(図3.22-(b),(c),(d))が共一次内挿の結果(図3.22-(a))に対して視覚的にも明らかである．また，画像列最近傍内挿(図3.22-(b))の結果では，焦点の合っている俯角20°付近以外の領域においてはボケた感じとなっている．それに対して，バックプロジェクション(図3.22-(c))および多重焦点画像列最近傍内挿(図3.22-(d))では，俯角に対するボケの不均一さが抑えられ，全体的な解像度の向上が見られる．特にボケサイズを2倍にした図3.23の場合では，この傾向がさらに顕著に現れている．

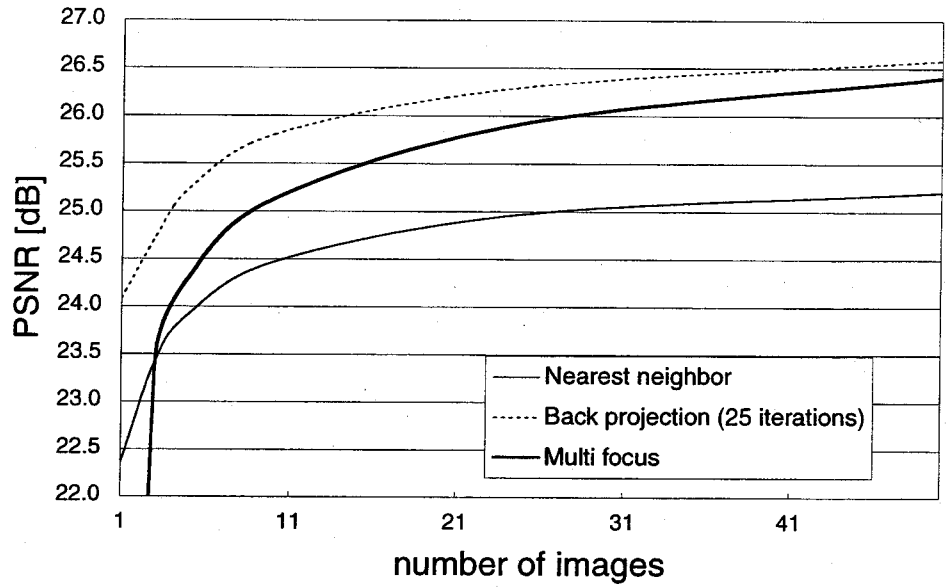


図 3.18: 入力画像枚数に対する PSNR

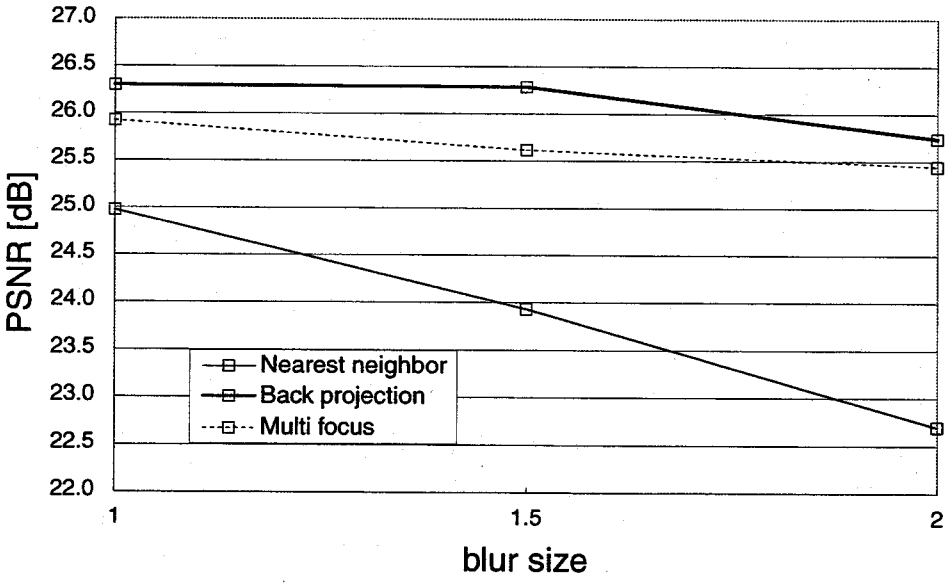


図 3.19: ボケに対する PSNR

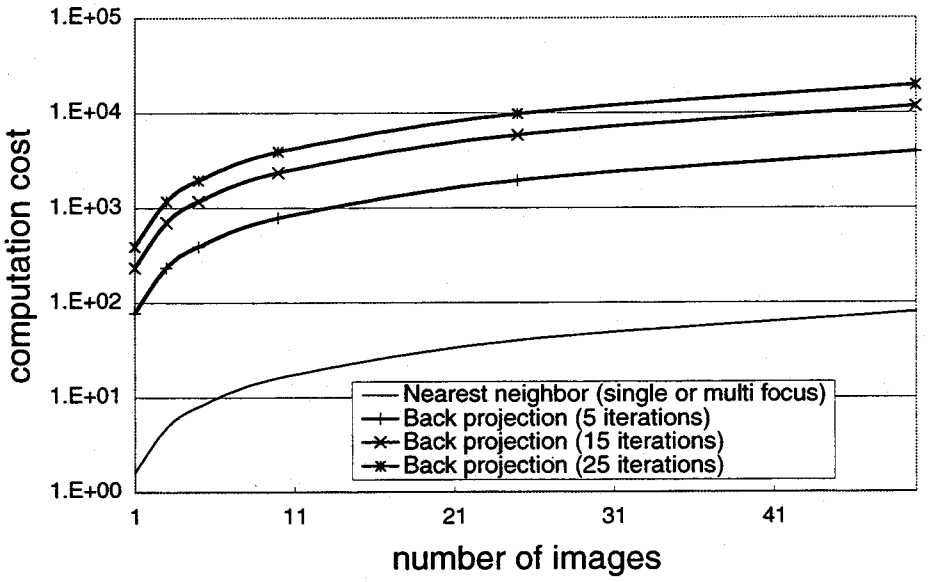


図 3.20: 各手法における計算コスト

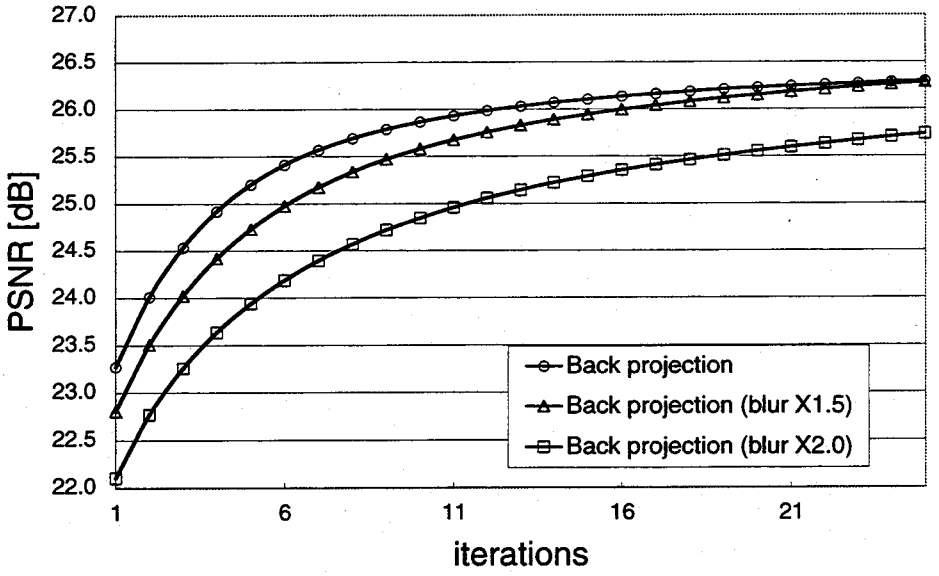
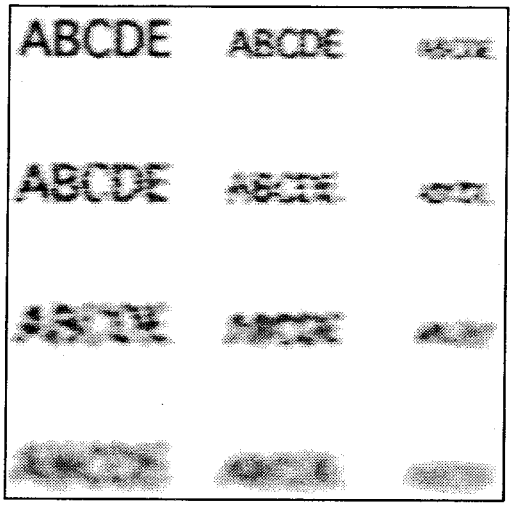
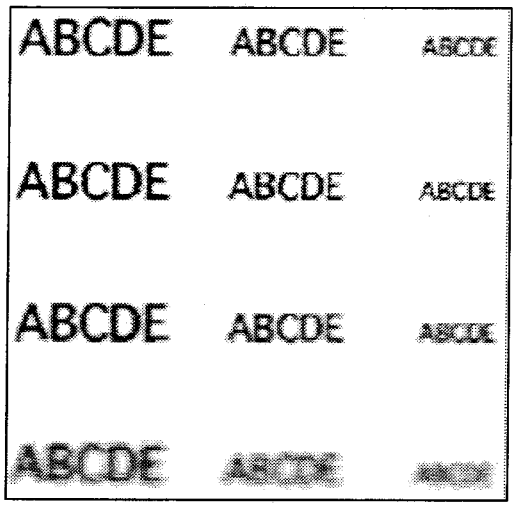


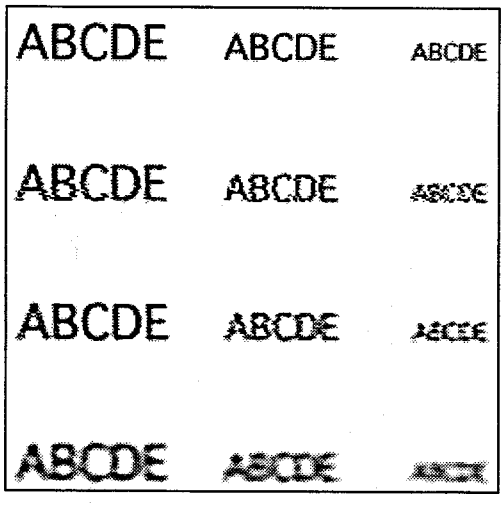
図 3.21: 繰り返し計算回数に対する PSNR



(a) 共一次内挿 (入力画像 1 枚，焦点距離 f_{20}, PSNR 21.2dB)

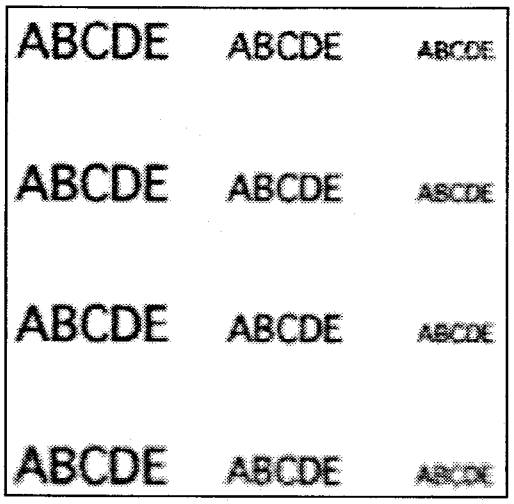


(b) 画像列最近傍内挿 (入力画像 25 枚，焦点距離 f_{20}, PSNR 25.0dB)



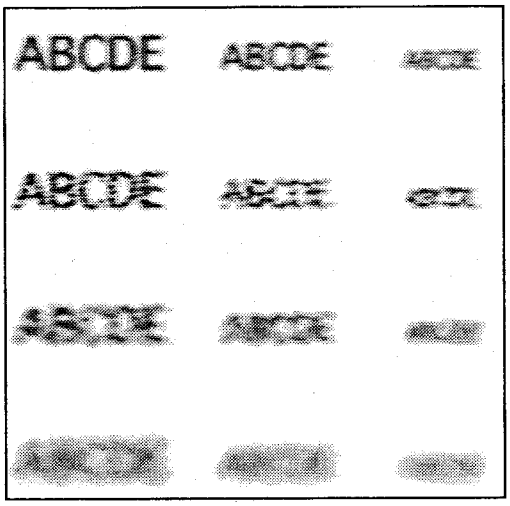
(c) バックプロジェクション (入力画像 25 枚，焦点距離 f_{20}，PSNR 26.3dB, 反復 15 回)

d

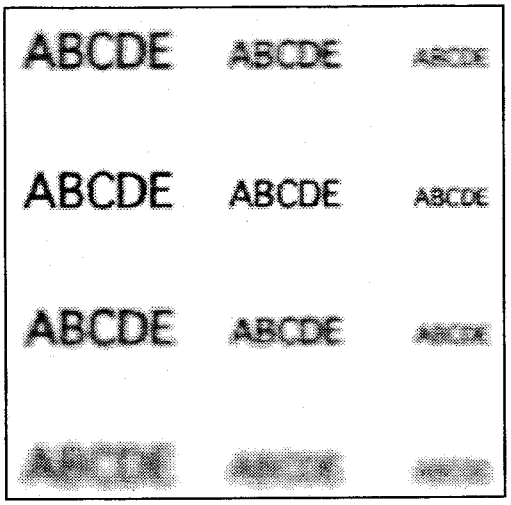


(d) 多重焦点画像列最近傍内挿 (入力画像 25 枚，焦点距離 f_{-10}, f_{10}, f_{40}, PSNR 25.9dB)

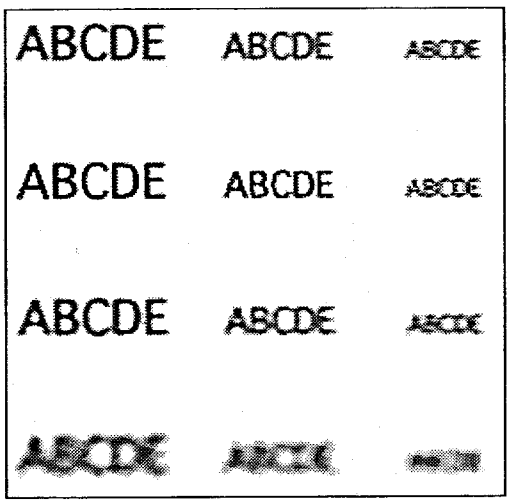
図 3.22: シミュレーション画像による結果 (パノラマ画像，256×256 pixels)



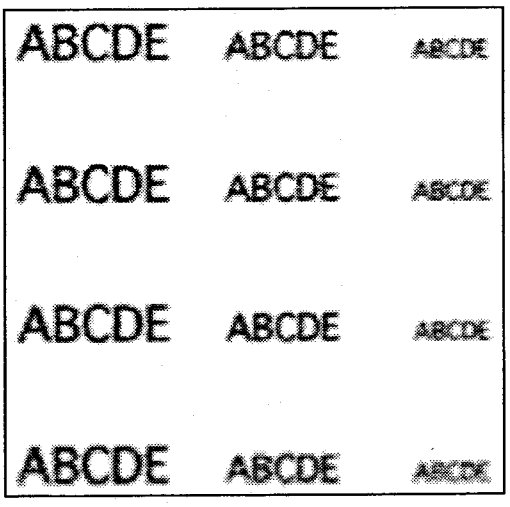
(a) 共一次内挿 (入力画像 1 枚，焦点距離 f_{20}, PSNR 20.6dB)



(b) 画像列最近傍内挿 (入力画像 25 枚，焦点距離 f_{20}, PSNR 22.7dB)



(c) バックプロジェクション (入力画像 25 枚，焦点距離 f_{20}，PSNR 25.7dB, 反復 15 回)



(d) 多重焦点画像列最近傍内挿 (入力画像 25 枚，焦点距離 f_{-10},f_0,f_{10},f_{20},f_{30},f_{40}, PSNR 25.4dB)

図 3.23: シミュレーション画像による結果 (パノラマ画像，blur×2，256×256 pixels)

図 3.24: 撮像システム

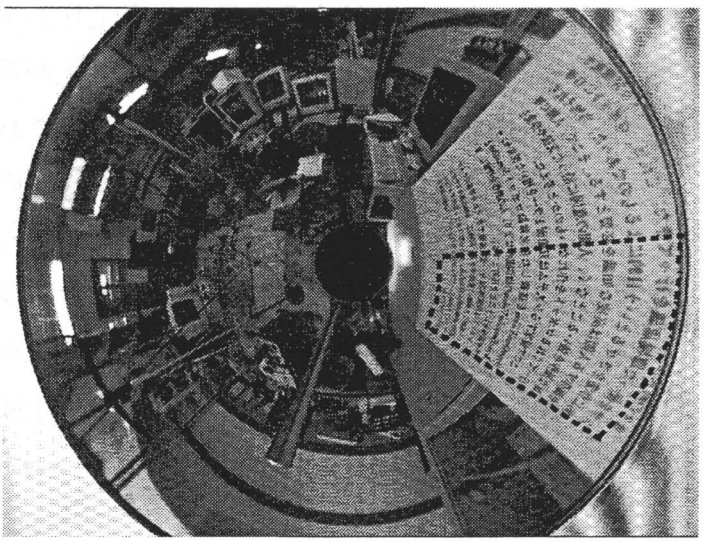


図 3.25: 入力実画像例 (20221 pixels(点線内))

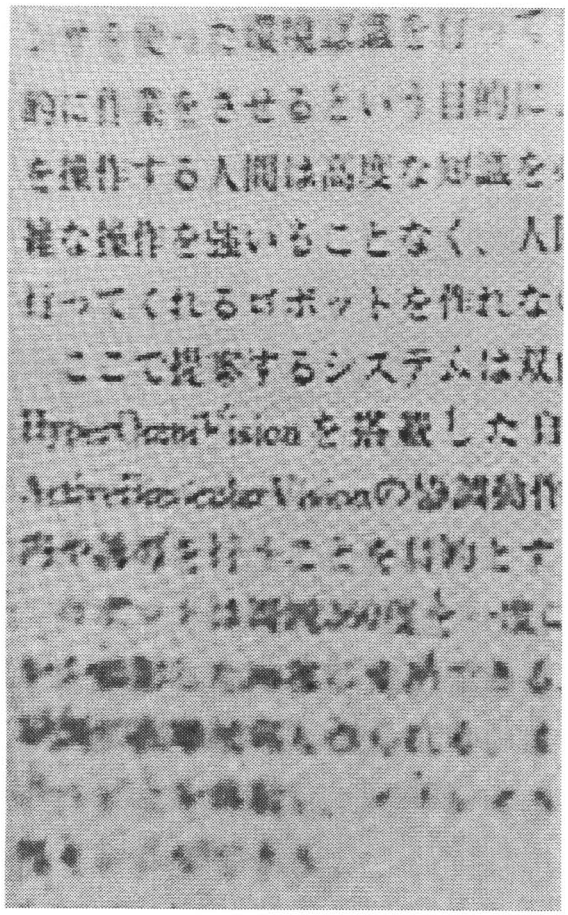
3.6.2 実画像実験

実際に高解像度撮像システムを作成し，実環境にて実験を行った．本システムは表 3.2に示したパラメータの双曲面鏡とカメラ (XC-009 Sony) が回転テーブル (DR-160 シグマ光機) の上に回転軸とカメラ光軸，HyperOmniVision 中心軸が同軸になるよう設置され，カメラごと回転する構成をとる (図 3.24)．このシステムを用いて撮像した図 3.25のような画像列を用いて実験を行った．変換画像は透視変換画像とした．回転角はシミュレーション実験において優位が見られた 0.13 ° とした. これは入力画像の外周で半画素ずれとなる．回転テーブルは最小 0.0025 ° までコントロールできるため，回転精度は問題無いと考える．

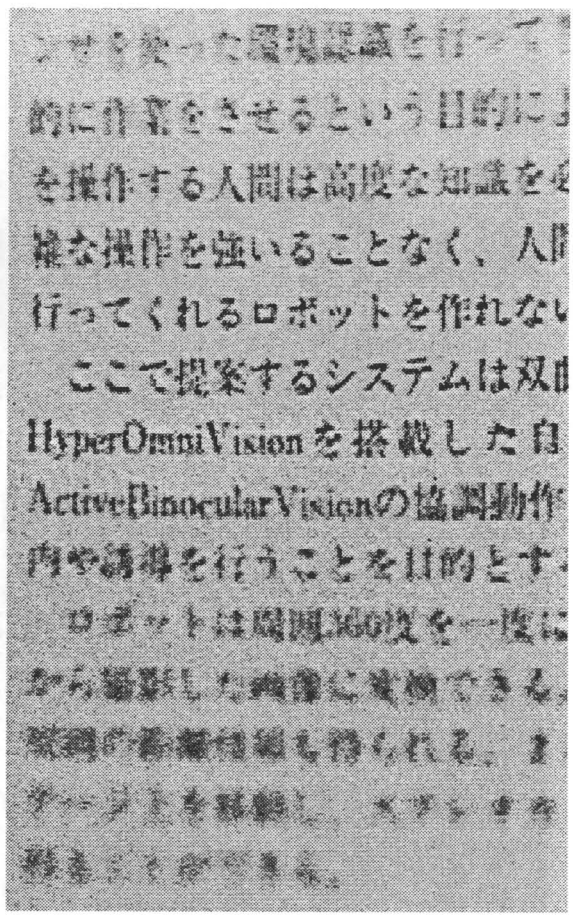
図 3.25の点線内を用いて，共一次内挿, 画像列最近傍内挿，バックプロジェクションおよび多重焦点画像列最近傍内挿の結果を図 3.26，図 3.27にそれぞれ示す．図 3.26-(a) の共一次内挿の結果は，補間により全体的にぼけている感じで，とくに画像下部の低解像度が目立ち HyperOmniVision の解像度差問題が顕著に現れている．それに対して，図 3.26-(b), 3.27-(a),(b) の画像列による高解像度化の結果はコントラストが高く，輪郭がはっきりとしている．このことから，シミュレーションと同様に実画像においても図 3.25の入力画像に対して解像度向上の効果が視覚的に確認できた．特に俯角の大きい情報量の少ない部位 (出力画像下部) について著しい違いが見られる．これらより，HyperOmniVision の従来の問題点である俯角に対する解像度差の問題も改善された．また，画像列最近傍内挿とバックプロジェクション，多重焦点画像列最近傍内挿の比較においては，シミュレーション同様,

バックプロジェクションによる光学劣化復元および多重焦点入力画像を用いたことにより，合焦点領域以外でよりシャープでコントラストが高く，より良い結果となった．なお，実験に用いた入力画像の詳細は付録A，Bを参照されたい．

これらの結果より，実画像においてもある程度の解像度の向上が示された．しかしながら，シミュレーションほどの成果は確認できなかった．これは，既成のカメラや画像伝送系を用いており，撮像過程において不明な部分が多かったからである．とくにバックプロジェクションでは，光学過程の正確な把握が推定結果に大きな影響を与える．さらなる向上のためには，集光レンズやCCDなどを高解像度化を考慮して選定しシステムを作成する必要がある．

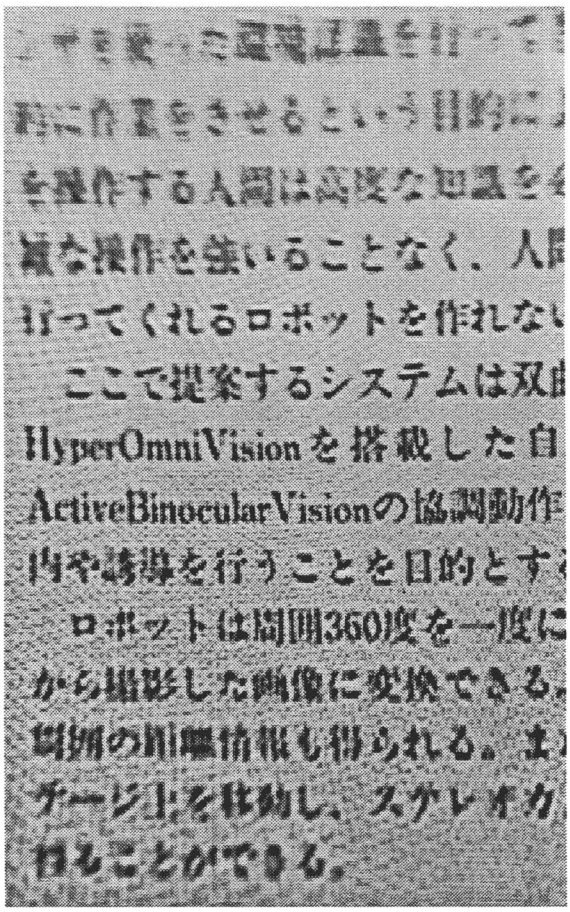


(a) 共一次内挿 (入力画像 1 枚，焦点距離 f_{20})

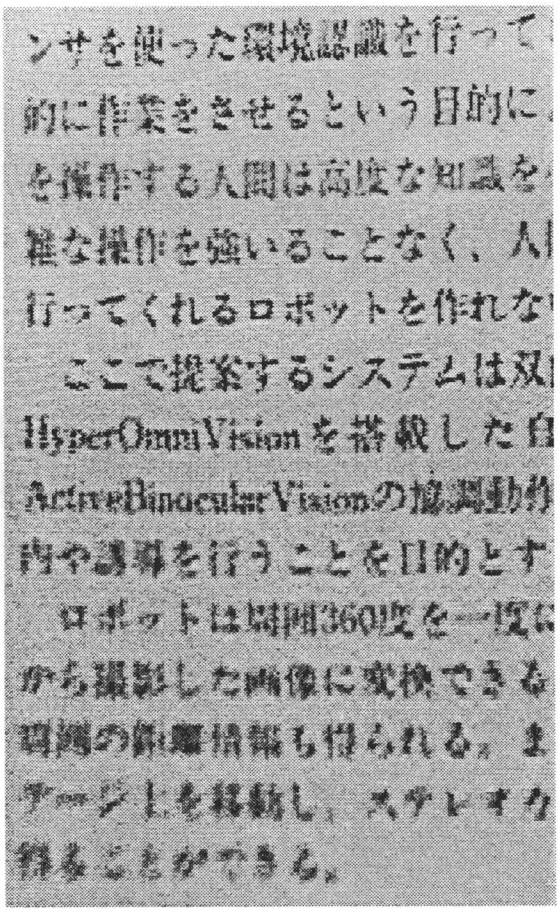


(b) 画像列最近傍内挿 (入力画像 25 枚，焦点距離 f_{20})

図 3.26: 実画像実験結果 (透視変換画像，205×335 pixels)



(a) バックプロジェクション (入力画像 25 枚，焦点距離 f_{20}，反復 15 回)



(b) 多重焦点画像列最近傍内挿 (入力画像 25 枚，焦点距離 f_{-10},f_{10},f_{40}))

図 3.27: 実画像実験結果 (透視変換画像，205×335 pixels)

3.7 本章のまとめ

本論文では，全方位視覚センサ HyperOmniVision の高解像度化手法を提案した．高解像度化は，カメラの回転運動による画素ずれ画像列の情報を統合することにより実現される．カメラの動きとして Z 軸同軸回転を用いることで HyperOmniVision の特徴のひとつである透視投影の光学特性を崩さないという意味で，HyperOmniVision の光学特性に適応しているといえる．また，撮像モデルを作成し，シミュレーションにより光学特性を解析することで，本センサシステム全体の最適化を行った．さらに，バックプロジェクションにおけるボケ回復および入力画像の多重焦点化により，HyperOmniVision 特有のボケの影響を緩和し，さらなる解像度の向上を目指した．その結果，シミュレーション画像と実画像の両方の結果により，高解像度化を確認し有効性を示した．表 3.3にシミュレーション実験において検証した各手法の特徴をまとめて示す．

表 3.3: 各高解像度手法の特徴

	センサ操作	ボケ耐性	計算コスト	高解像度化
画像列最近傍内挿	画素ずらし	低	小	低
バックプロジェクション	画素ずらし	高	大	高
多重焦点画像列最近傍内挿	画素，焦点ずらし	高	小	高

この結果より，高解像度化の主流とされたバックプロジェクションによる超解像は，本システムにおいても良い結果が得られたが，計算コストがかかりすぎるため，動的提示を要求する用途には不向きと言える．したがって，実時間提示が必要でない応用に対しては，バックプロジェクション，実時間提示が必要な応用に対しては画像列最近傍内挿による高解像度化手法と使い分けるのが妥当であると考える．また，高速の可変焦点レンズなどの使用により実時間での多重焦点撮像が可能であれば，解像度についてもバックプロジェクション同等またはそれ以上の向上が可能となる．

解像度を向上させる他の手段として，ハイビジョンカメラ等の高解像度カメラを用いることも考えられるが，出力画像の俯角に対する解像度差の問題は残る．また，高解像度カメラに対しても本手法は適応でき，さらなる解像度向上を行うことができる．

最後に，本手法による高解像度化は，静止環境を対象としているため，動的なシーンに対しては，そのまま適用できない．しかし一般に人がモニタで観察する場合，動領域部分

の解像度が低くても，見た目には違和感なく感じる．したがって，実際の撮像システムを構築する際には，動領域を背景差分等により検出し，その領域をマスキングして，静止領域の高解像度化と動領域の更新を同時に行えば，違和感のない全方位モニタリングができると考える．

Chapter 4

モデリングにおける高解像度化

4.1 背景

ロボットの遠隔操作の遅延補償やウォークスルーといったロボティクスやヴァーチャルリアリティの応用において，実シーンからのリアルな仮想空間の構築は重要な技術課題で，様々な手法が提案されてきた．従来提案された手法の多くは，イメージベーストレンダリング (IBR) に基づく手法と，三次元環境モデルを用いるモデルベーストレンダリング (MBR) 手法に大別される．

IBR に基づく手法とは，実シーンをビデオストリームとして蓄積し，撮影時の視点位置での映像を再生する方法である．山口らや高橋らは，全方位視覚センサを入力手段とすることで，車などで走行しながら得た全方位ビデオストリームから任意視点での透視変換画像を表示することのできるシステムを構築している [山口 99, 高橋 99]．この方法は，実画像を直接用いているため環境モデルを必要とせず，光源反射などを再現できるため写実性が高いという利点がある．しかし，撮像視点から大きく離れた場合，IBR により多視点画像列から生成した画像には歪みが現れ，特に広視野画像の生成には問題が残る．さらに歪みを解消する方法として，空間に対しランダムな視点位置での映像を密に撮影する方法が考えられるが，膨大な画像を蓄積しなければならないため実装上困難である．

これに対し，MBR による手法では，実画像を用いて三次元環境を復元または近似的にモデリングし，仮想視点画像を提示しようというアプローチがとられてきた [Tomasi 96, 上原 00]．このアプローチでは，三次元モデルから仮想視点の画像を構築するため，任意の視点での広視野角映像が忠実に生成でき，少ないデータで広域の再現が可能となる．この方法において

も，全方位視覚センサはその視野の広さから盛んに利用されてきた [島村 00, 川崎 99]．我々も，全方位入力画像列から環境地図及びロボット自己位置姿勢を同時推定する手法 [浜田 00] を提案している．しかし，全方位視覚センサは周囲 360 度が一度に撮像できる特徴により容易に三次元モデリングが行えるという利点と同時に，一枚の CCD により全方位を撮像するため入力画像の角度分解能は低いという欠点を持つ．そのため，得られた三次元幾何モデルにテキスチャマッピングしたとしても解像度が低く，利用者への提示目的には不十分と言える．

本章では，全方位視覚センサ HyperOmniVision により移動しながら撮像された画像列から，環境の三次元幾何モデル及びテクスチャを抽出することで三次元環境をモデル化する手法を提案する．特に本手法では，モデリングに用いる画像列から観測点の関係を考慮することによるイメージモザイキング及び画素ずらしによる超解像の考え方により，三次元幾何モデルの各面に対応するテクスチャ情報の高解像度化を行なうことができる．本手法 [長原 01] と類似した手法は，川崎ら [川崎 01] によりほぼ同時に提案された．彼らの手法は，EPI 解析により三次元モデルを構築し，切り出されたテクスチャをバックプロジェクションにより高解像度化を行っている．しかしながら，アルゴリズムの制約によりセンサ運動を等速直線運動に限定している．それに対し、本モデリングアルゴリズムはセンサの動きに対する自由度が大きいため，大きな奥行き，視点変化を持つ画像列を用いることができる．そのため，様々な奥行きで撮像された部分解像度の異なる画像列から解像度の高い部位をモザイキングすることにより高解像度化を行える．さらに移動による画素ずれからバックプロジェクションによる超解像手法を同時に用いることで，さらなる高解像度化を実現できる．また，解像度重みテーブルを用いることで，テクスチャ部位毎に高解像度化に用いる画像とその枚数を最適化することができる．

3章で述べた固定視点による高解像度化とは異なり，本章での手法はモデリングという応用に限定することで，センサ移動を伴う画像列からの高解像度化を可能とする．

4.2 前提条件

本手法では，モデリングを行う環境を垂直平面に囲まれた屋内やビル等が立ち並ぶ屋外とした．以後本章では，モデリングの対象となる環境の個々の垂直平面を対象平面と呼ぶこととする．モデリングおよびテクスチャの分割のためのランドマークは，環境中の垂直エッジとする．また，センサの動きを平面上の動きに限定し，照明の変化は無いものと仮

定した.

4.3 高解像度 3D モデリング

本手法の処理フローを図 4.1に示す．個別の処理については 4.4節でそれぞれ述べる．環境中の任意の点 $P(X,Y,Z)$ は，図 2.2及び式 (2.3)-(2.6) の関係で入力画像に撮像され，入力画像上の点 $p(x,y)$ と一意に対応する．また式 (2.3) の関係より，対象平面の垂直エッジは高さに関わりなく同一方位を示し，入力画像中では画像中心から放射上の線分として現れる．すなわち，入力画像中の放射エッジからセンサ全周のすべての垂直エッジの方位が推定でき，センサ移動に伴う垂直エッジの方位変化をトラッキングすることで，垂直エッジ及び自己位置の変化を推定することができる．ここで，推定された垂直エッジ間を対象平面とする．

次に，各対象平面はカメラ移動により様々な距離で撮像したことになる．そこで，異なる奥行きで観測された各面のテクスチャ情報から最適な画素を選択し，選択されたテクスチャに対しバックプロジェクション [Irani 91] により個々のテクスチャを推定する．そして三次元幾何モデルと各面のテクスチャから高解像度 3D モデリングを行う.

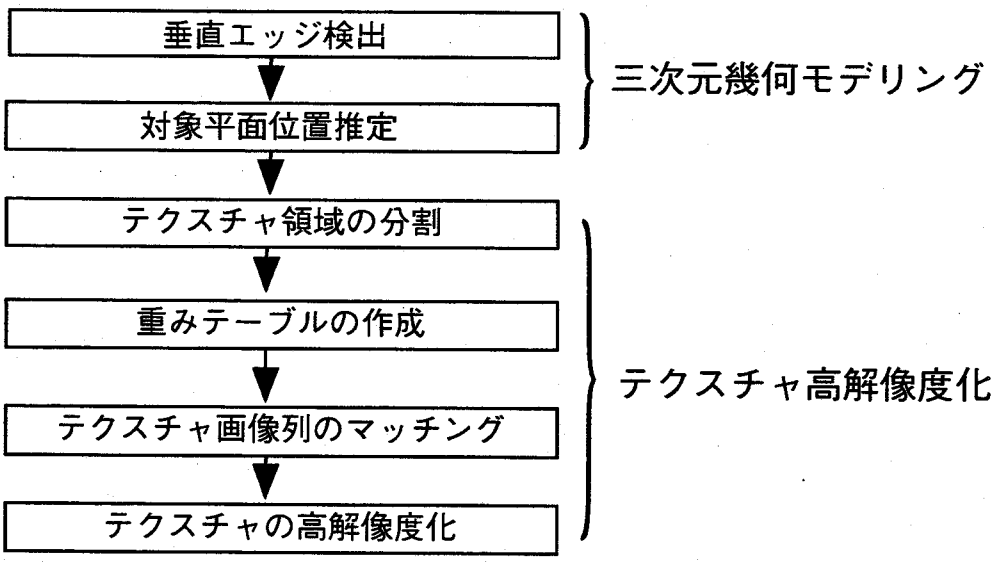


図 4.1: 処理フロー

4.4 三次元幾何モデリング

4.4.1 垂直エッジ検出

本手法において，モデリングのためのランドマークとする環境中の垂直エッジは高さや距離に関わらず入力画像中で放射上に現れる．図 4.2 に示すように，入力画像を極座標変換し，横方向微分を行うことにより，垂直エッジを抽出する．これを，図 4.2に示すように r 方向にプロジェクションし，閾値で切ることにより，容易に安定に垂直エッジ方位 $\theta_i(t)$ を得ることができる．この各エッジ方位の変化 $\theta_i(t)$ を用いて対象平面の三次元位置推定に用いる．

4.4.2 対象平面位置推定

図 4.3に示すフレーム t における基準座標系でのセンサ位置ならびに対象平面エッジ i の位置を $({}^0X_t, {}^0Y_t)$，$({}^0X_i, {}^0Y_i)$ とする．フレーム t におけるセンサ座標系の基準座標系に対する角度を $\phi(t)$ とする．このときセンサ座標系から見たフレーム t における対象平面エッジ i の観測方位角 $\theta_i(t)$ には，式 (4.1) の関係が成り立つ．そして，時系列間で対象平面エッジを観測することで，各時刻の観測位置 $({}^0X_t, {}^0Y_t)$，姿勢 $\phi(t)$ 並びに i 個の対象平面エッジ位置 $({}^0X_i, {}^0Y_i)$ は，式 (4.1) の観測方程式を解くことより得られる (詳しくは文献 [浜田 00] 参照)．

$$\begin{aligned} \tan(\theta_i(t) - \phi(t)) &= \frac{Y_i(t)}{X_i(t)} \\ X_i(t) &= {}^0X_i - {}^0X_t \\ Y_i(t) &= {}^0Y_i - {}^0Y_t \end{aligned} \tag{4.1}$$

式 (4.1) に示す対象平面の推定エッジ位置 $({}^0X_i, {}^0Y_i)$ と推定自己位置 $({}^0X_t, {}^0Y_t)$ から，フレーム t におけるセンサ座標系での対象エッジ相対位置 $({}^tX_i, {}^tY_i)$ は，式 (4.2),(4.3) で表現できる．2章で述べたように，全方位視覚センサ HyperOmniVision は透視投影の光学特徴を持つため，$({}^tX_i, {}^tY_i)$ と式 (2.4)-(2.6) より対象の高さを求めることができる．ところで，単独の入力画像から安定に垂直エッジの端点を求め，対象エッジの高さを得ることは難しい．図 4.4に示すように，対象エッジ情報は画像列中の複数フレームにわたり観測されている．そこで，図 4.5のように入力画像 t 上の対象エッジ i の輝度情報を $({}^tX_i, {}^tY_i)$ にそれぞれ射影する．そして，Z 軸方向に微分し，これを t 軸方向に投影しピークを検出すること

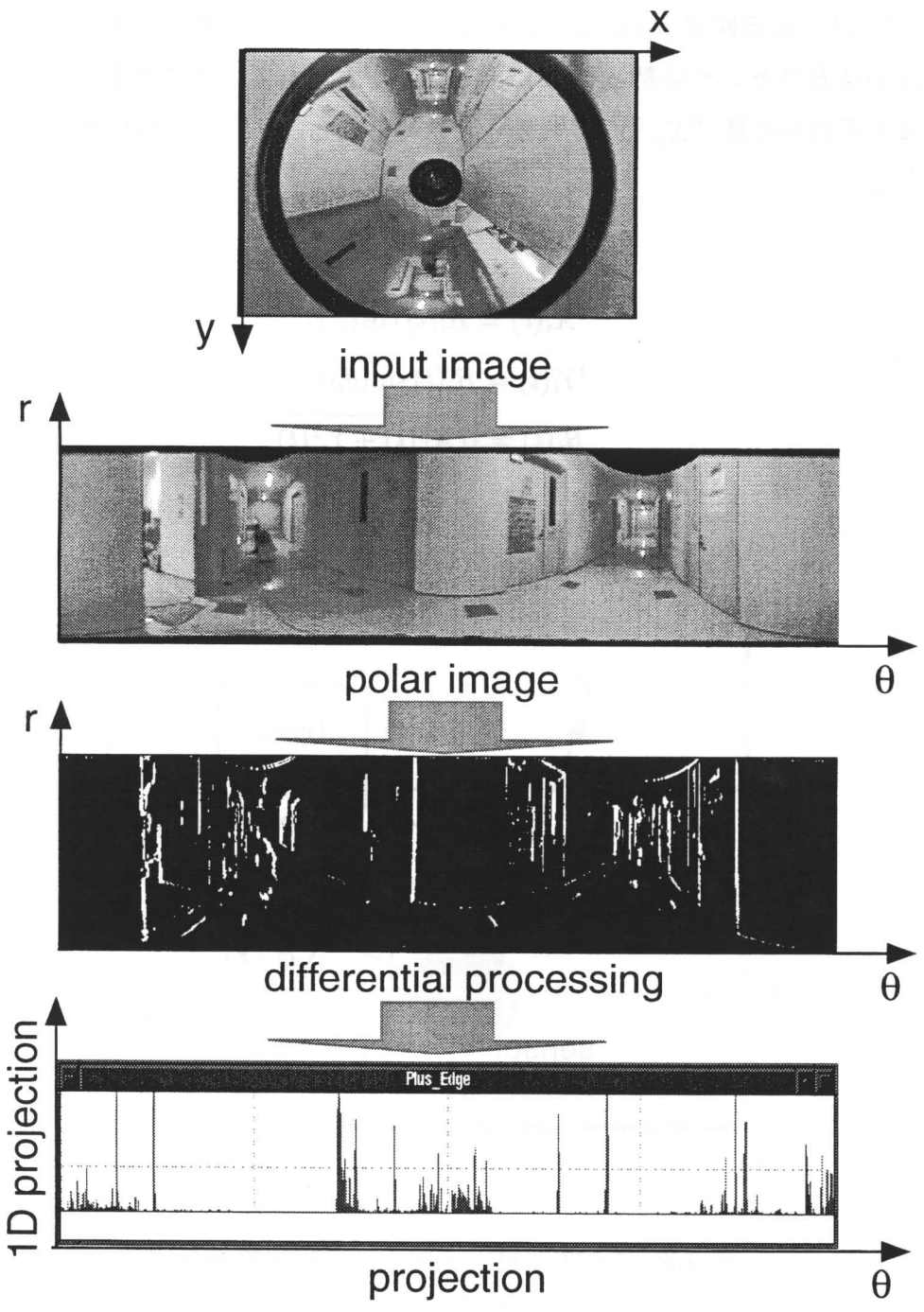

x
y
input image
r
polar image
θ
r
differential processing
θ
1D projection
Plus_Edge
projection
θ

図 4.2: 垂直エッジ検出

により，対象平面エッジの上下端点の高さ Z_i^H,Z_i^L を推定する．図 4.6 は，実際のプロジェクション結果の一例である．ここで，式 (4.2),(4.3) において，各センサ座標系でのエッジ位置 $({}^tX_i, {}^tY_i)$ は，推定距離 $R_i(t)$ 及び $\theta_i(t)$ より求めている．これは，エッジの相対推定位置 $(X_i(t), Y_i(t))$ 及びセンサ姿勢 $\phi(t)$ には推定誤差が含まれるためである．このように，すべての対象平面頂点座標 $({}^0X_i, {}^0Y_i, Z_i^H, Z_i^L)$ を求めることで，三次元幾何モデリングを行うことができる．

$$ {}^tX_i(t) = R_i(t)\cos(\theta_i(t)) \tag{4.2} $$

$$ {}^tY_i(t) = R_i(t)\sin(\theta_i(t)) \tag{4.3} $$

$$ R_i(t) = \sqrt{X_i^2(t) + Y_i^2(t)} $$

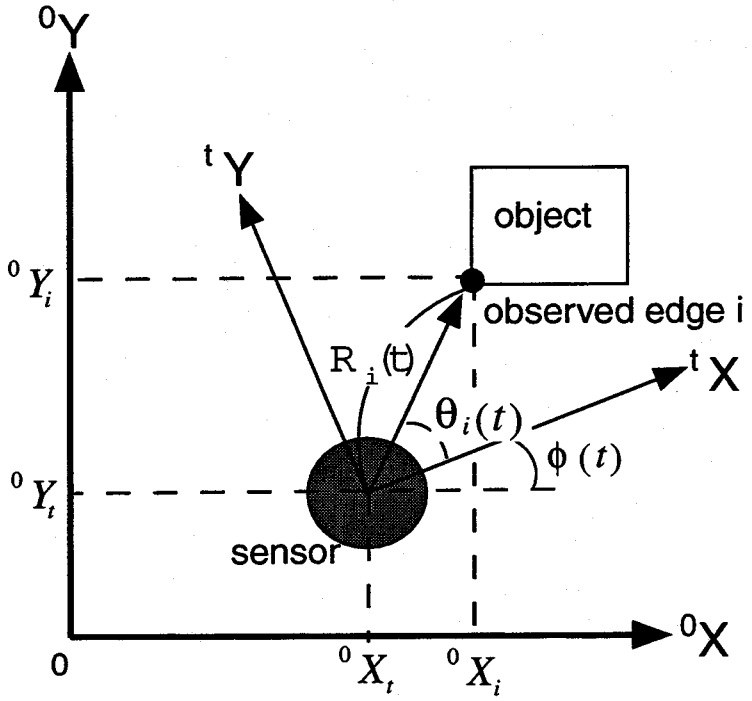


図 4.3: センサと対象平面エッジの位置関係

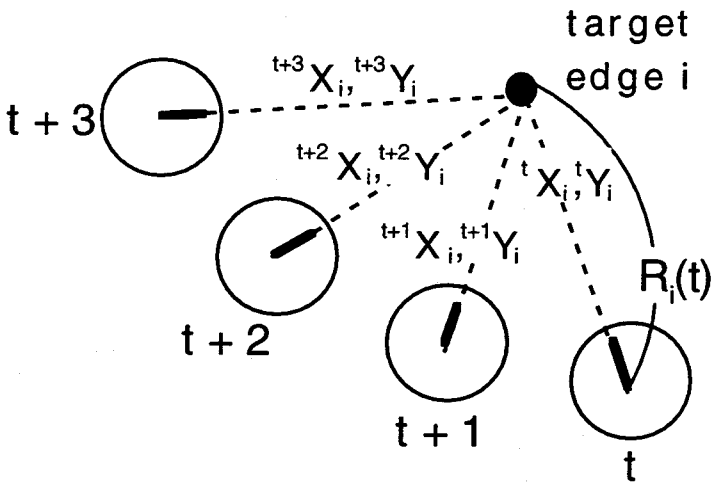


図 4.4: 入力画像列と対象平面エッジの関係

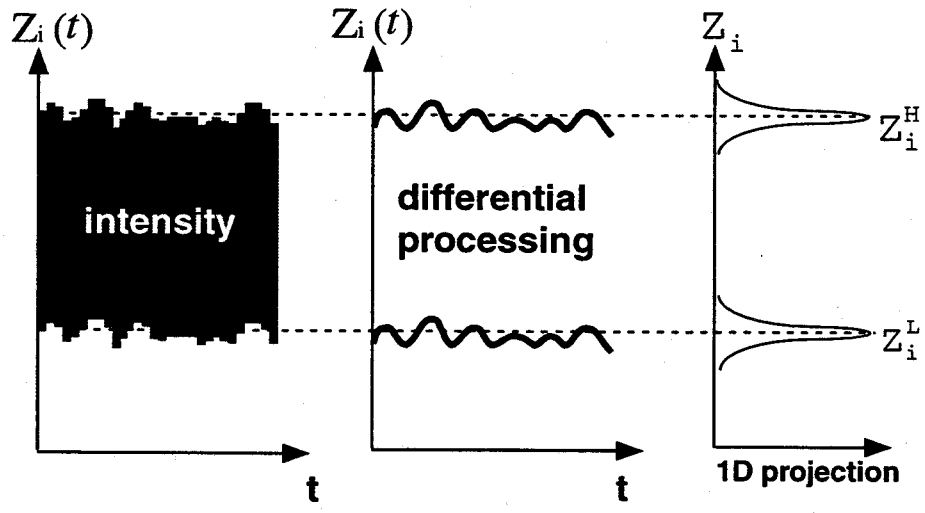


図 4.5: プロジェクションによる高さの決定

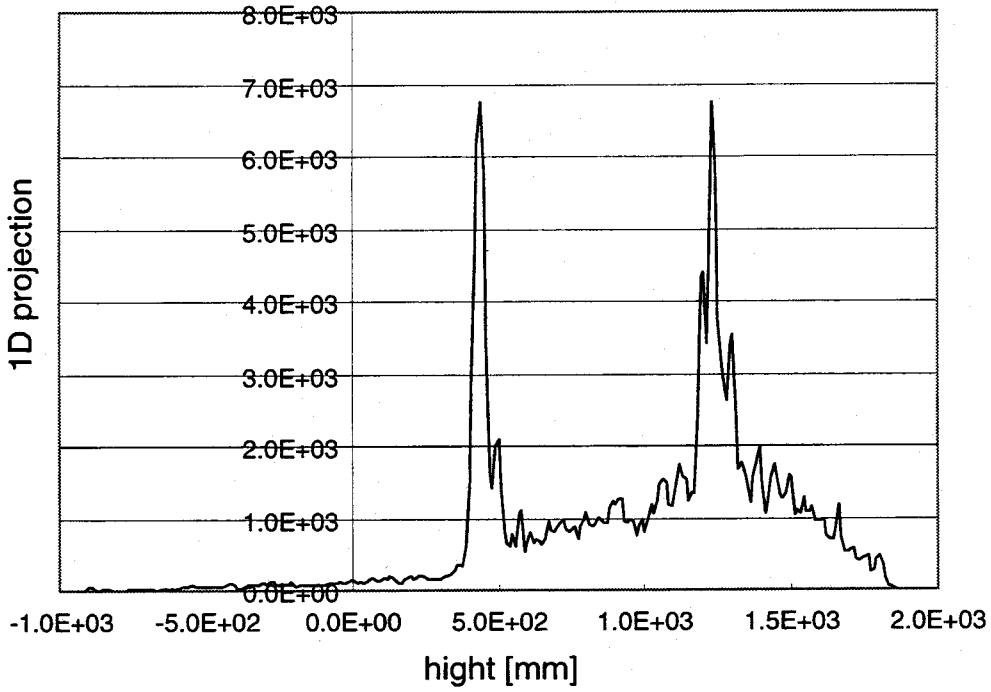


図 4.6: エッジのプロジェクションの例

4.5 テクスチャの高解像度化

入力画像中のテクスチャ情報は，画像の撮像位置によって異なる．また，HyperOmniVision は放射状に環境を撮像するため，俯角に対しても大きな解像度差をもつ．すなわち，入力画像中に含まれるテクスチャ情報はフレームごとに異なる．そこで，画像列間のマッチングや高解像度化に用いる画素の選択指標として解像度重みテーブルを作成し，画像列の位置合わせ及び高解像度化を行う．

4.5.1 テクスチャ領域の分割

対象平面は対象エッジ $i, i+1$ を両端とする平面であり，4.4節で求められたエッジ端点 $({}^tX_{i+1}(t), {}^tY_{i+1}(t), Z^H_{i+1}, Z^L_{i+1})$,$({}^tX_i(t), {}^tY_i(t), Z^H_i, Z^L_i)$ により囲まれた平面上の任意の点は，式 (4.4),(4.5) から入力画像と対応付けられる．これにより，入力画像に射影することでテクスチャ画像が得られる．各フレームでの平面頂点座標には推定誤差が含まれる．そこで，一定量拡大した領域を以後の処理では用いることにする．

$$x = Xf\frac{b^2 - c^2}{(b^2+c^2)Z - 2bc\sqrt{X^2+Y^2+Z^2}} \tag{4.4}$$

$$y = Yf\frac{b^2 - c^2}{(b^2+c^2)Z - 2bc\sqrt{X^2+Y^2+Z^2}} \tag{4.5}$$

4.5.2 解像度重みテーブル

対象平面上の任意の点 (u,v) は式 (4.4)-(4.8) の関係から入力座標系の対応点 (x,y) に射影される．この関係より，(u,v) における微小変動 $\Delta u, \Delta v$ に対する入力座標系における変動量 $\Delta x, \Delta y$ の比として解像度分布を求めることができる (式 (4.9))．本手法は，この解像度分布により様々な奥行きや視点から撮像された入力画像の対象平面における部分解像度差を定量的に評価した解像度重みテーブルとする．これは，射影の関係から直接求められるため，センサと対象平面の位置関係だけでなく全方位センサ視覚 HyperOmniVision 特有の俯角に対する解像度差の影響も同時に含まれている．図 4.7のように異なる視点 (P1,P2,P3) から撮像した場合の密度分布の例を示す．これをマッチング及びバックプロジェクションに用いる重みパラメータとする．

$$X = \frac{{}^tX_{i+1} - {}^tX_i}{w}u + {}^tX_i \tag{4.6}$$

$$Y = \frac{{}^tY_{i+1} - {}^tY_i}{w}v + {}^tY_i \tag{4.7}$$

$$w = \sqrt{({}^tX_{i+1} - {}^tX_i)^2 + ({}^tY_{i+1} - {}^tY_i)^2}$$

$$Z = -v + Z_i^H \tag{4.8}$$

$$W(u,v) = \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}{\sqrt{\Delta u^2 + \Delta v^2}} \tag{4.9}$$

4.5.3 テクスチャ画像のマッチング

4.5.1項の方法により切り出されたテクスチャ領域は，三次元モデル及びカメラの自己位置に推定誤差が含まれるため，テクスチャ画像列間に微小な位置姿勢ずれが生じる．そこで，テクスチャを射影する対象平面上で各テクスチャ画像列を微小変動してテンプレートマッチングを行うことで，対象平面とセンサの相対座標を補正する．ところで，様々な位置から撮像された画像列から得られるテクスチャ画像は，部位により解像度に違いをもつ．

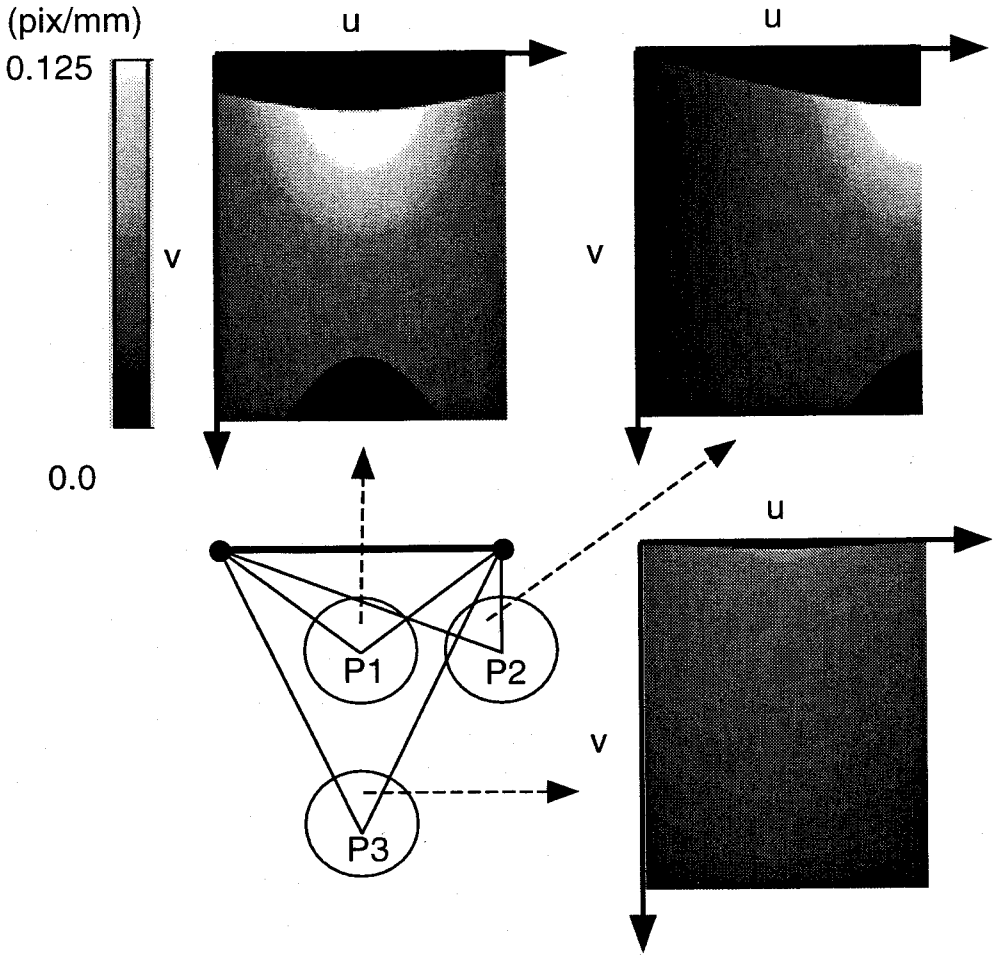


図 4.7: 撮像位置に対する解像度重みテーブルの例

そのため，解像度の違いを無視してマッチングを行うと，低解像度部分に引きずられ，高解像度部位のマッチング精度が悪くなる．また，4.5.4項の高解像度化において，高解像度部位が優先的に用いられるため，高解像度部位を重視してマッチングを行う必要がある．そこで前述の解像度重みテーブル $W(u,v)$ を用いて，式 (4.10) の重み付き相関により濃淡値でマッチングを行う．補正のための微小変動パラメータは，図4.8に示すテクスチャ横方向 du，縦方向 dv，センサからの距離 dr，幅 dw，Z 軸回転 $d\Phi$，法線軸回転 $d\rho$ とした．

$$C = \sum_{u,v}^{N} (W_{tr}(u,v) \ \frac{(f_t(u,v) - \bar{f}_t)(f_r(u,v) - \bar{f}_r)}{\sqrt{\sigma_t \sigma_r}}) \tag{4.10}$$

$$\sigma_t = \sum_{u,v}^{N} W_{tr}(f_t(u,v) - \bar{f}_t)$$

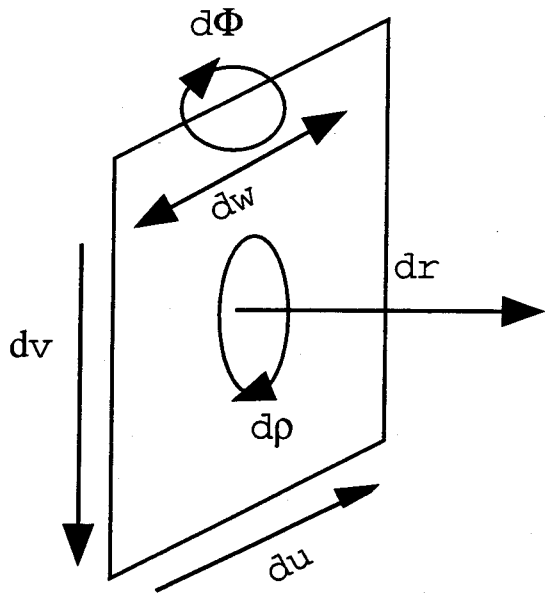


図 4.8: テンプレートマッチングの変動パラメータ

$$\sigma_r = \sum_{u,v}^{N} W_{tr}(f_r(u,v) - \bar{f}_r)$$

$$\bar{f}_t = \frac{1}{N}\sum_{u,v}^{N} f_t(u,v)$$

$$\bar{f}_r = \frac{1}{N}\sum_{u,v}^{N} f_r(u,v)$$

$$W_{tr}(u,v) = W_t(u,v) + W_r(u,v)$$

ここで，$f_t(u,v), f_r(u,v)$ はフレーム t 及びリファレンスのテクスチャ画像，$W_t(u,v), W_r(u,v)$ はフレーム t 及びリファレンスの解像度重みテーブル，N はテクスチャ画像の全画素数である．

4.5.4 テクスチャ画像の高解像度化

図 4.7に示されているように，対象平面からの距離により入力画像が持つテクスチャの情報量が異なる．画像列中で最大の解像度が得られるフレームは当然ながら図 4.7の P1 のように対象平面に近い視点から撮像されたフレームであるが，視野角が狭まるため上下が欠けてしまっている．そこで，モザイキングの考え方により，各フレームの解像度の高い

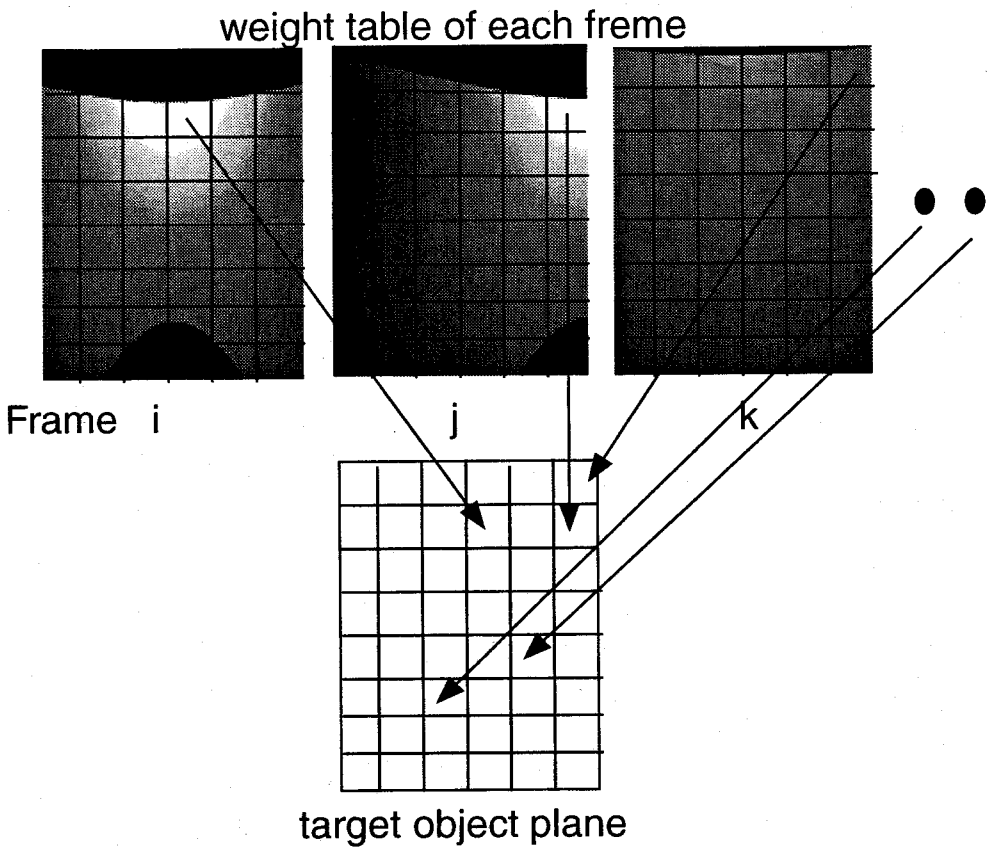


図 4.9: 重みテーブルよる入力フレームとフレーム数の選択

部位を組み合わせて対象平面のテクスチャを生成することより，視野角を保ちながら全体の解像度を向上させる．また，撮像された画像列は，センサ移動により近傍フレームにおいて画素ずれを生じる．この画素ずれから 3.4.2項で述べたバックプロジェクションによる超解像手法により更なる高解像度化を行う．図 4.9に示すように，各フレームの解像度重みテーブルを比較し，部位に応じて解像度の高い部位を優先的にテクスチャ生成に用いるフレームとして選択する．また，バックプロジェクションに使用するフレーム数は各部位ごとの重みの合計が目的解像度を満たすように選択する．これにより解像度の低い部位は多くのフレームを用い更新が行われる．このようにして，バックプロジェクションによる超解像手法に用いるフレームと部位を解像度重みテーブルにより選択することで，同時にイメージモザイクによる高解像度部位の繋ぎ合わせの効果を得る．

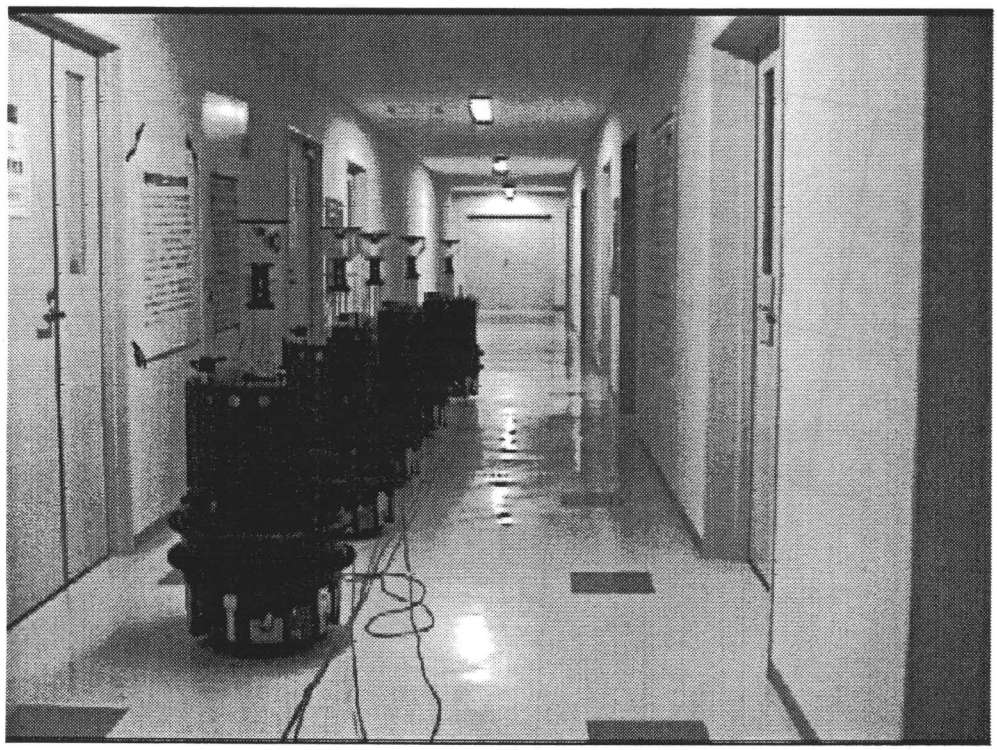


図 4.10: 実験モデリング環境

4.6 実験

移動ロボット (Nomad200/Nomadic Technologies Inc.) 上に表 3.2のパラメータの双曲面鏡とビデオカメラ (EVI-310/Sony) で構成される全方位画像センサ HyperOmniVision を搭載したシステムにより実験を行った．対象環境は図 4.10に示すような，建物内の垂直平面の壁に囲まれた廊下とした．図 4.10のようにロボットを手動で移動させて撮像した 350 枚 (720 × 486pixel) の多視点画像を入力画像列として用いた．モデリングにより検出された垂直エッジの三次元情報には，対象平面を構成する上で不必要なものも含まれる．そこで，不必要なエッジの除去と対象平面の両端となるエッジのペアを手動により決めて幾何モデルを作成した．図 4.11に幾何モデリングの結果をワイヤーフレームで示す．

モデリングに用いた画像列中から対象平面付近の 25 枚を用いて，1 枚の対象平面を例としてのテクスチャ高解像度化について考察する．図 4.12-(d) に撮像時の動きを，図 4.12-(a),(b),(c),(e) に 00,08,11,24 フレーム目での入力画像を示す．HyperOmniVision は反射光学系のため，図 4.12の入力画像は，実際の環境やセンサの動きに対して反転して撮像されることに注意されたい．図 4.13-4.16に図 4.12-(a),(b)(c),(e) それぞれから対象平面に投影

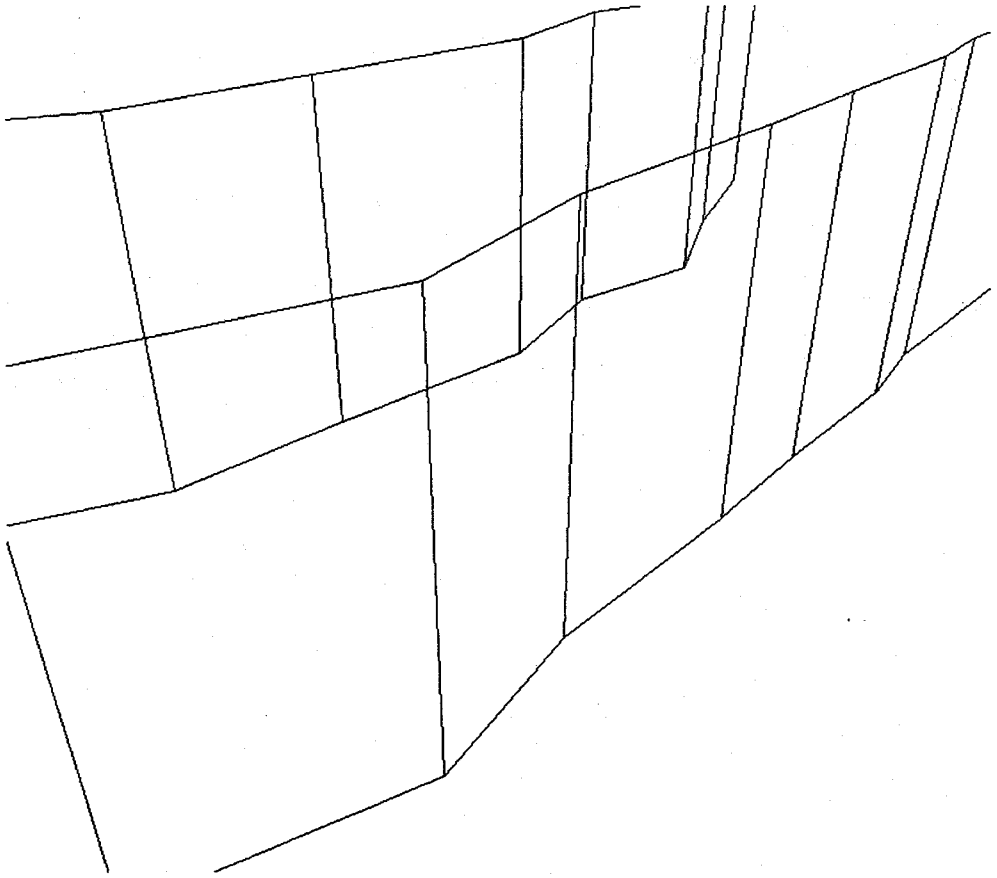


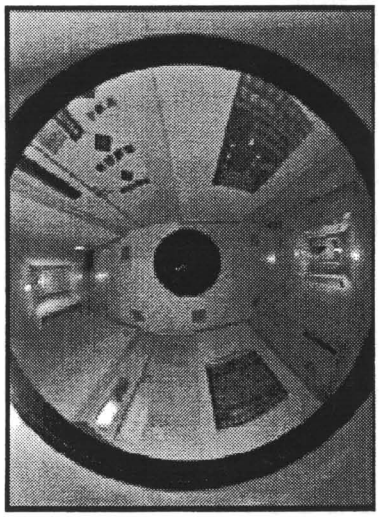
図 4.11: モデリング結果

したテクスチャ画像と解像度重みテーブルを示す．この結果から，対象平面に対して左側の位置から撮像したフレーム 00 ではテクスチャ画像の左上が解像度が高く，正面から撮像したフレーム 08 では真中上部が高いというように，撮像位置により解像度の違いが現れ，解像度重みテーブルが実際の入力画像においても対応していることが確認できる．また，全方位視覚センサ HyperOmniVision は垂直視野は制限されており，特に仰角が狭い．そのため，大きな視野をモデリングするためには，図 4.12-(e) のように離れた視点で撮像することとなる．しかし，図 4.16のように全体の解像度は当然ながら接近して撮像した図 4.13-4.15に対して低くなる．これら 4 枚のフレームを含む 25 フレームを用いて本手法の高解像度化を行った結果を図 4.17に示す．25 フレームの入力画像および対象平面への投影画像，解像度重みテーブルの詳細は，付録 C，D を参照されたい．同図右に高解像度化に選択されたフレーム数を同図左のテクスチャ変換画像の各画素に対応させて示した．図 4.17 のフレーム数から入力画像列において画像下部や対象平面から離れて撮像される画像上部

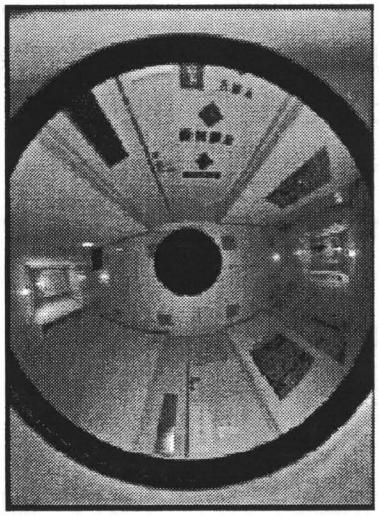
の解像度が低い部位において多くのフレームが選択され高解像度化に用いられていることが示されている．同一視野範囲である図4.16と比較すると，解像度の高い部位が入力画像列中から選択され，モザイキングの効果により全体的に解像度が向上していることがわかる．これにより，垂直方向の視野範囲の確保しながら解像度の向上させることができた．図4.18，4.19にテクスチャ画像の一部を拡大して示す．図4.19については，この部位を一番接近して撮像したフレーム05からの画像である．これらを比較すると，本手法による高解像度化画像の方が，滑らかな画像となっており入力画像列中で解像度が最大となる対象平面に対して最接近での撮像フレームによる画像と比較しても向上が確認できた．このことから，バックプロジェクションによる超解像の効果が確認できた．しかしながら，図4.17において輝度変化の不連続な部分が存在する．これは，本手法が照明の変化に対応していないことの影響である．これは今後の課題とする．

このようにして作成した高解像度テクスチャと同一視野角となる1フレームから作成したテクスチャ画像を用いて，仮想視点映像を生成した例を図4.21に示す．図4.21-(a),(b)は，それぞれモデル空間中の図4.20に示す視点A,Bから矢印方向を見た時の仮想視点映像となっている．図中点線は視野範囲を示している．同様に左図が本手法によりテクスチャを貼り付けたもの，右図がそれぞれ1枚の画像より生成したテクスチャを貼り付けたものである．

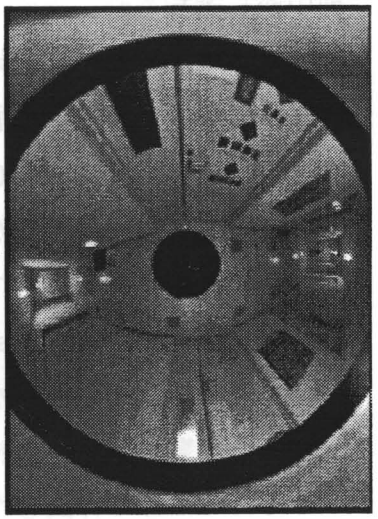
この結果からも本手法による結果は，解像度が向上し臨場感のある映像となり，本手法の有効性を確認した．



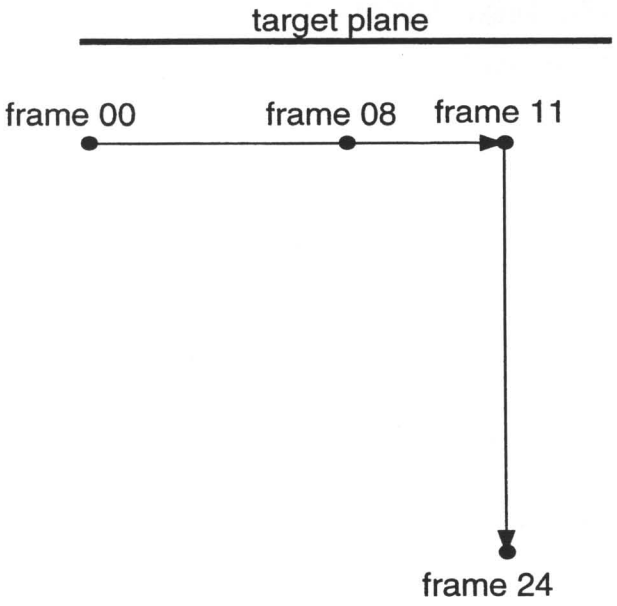
(a) フレーム 00



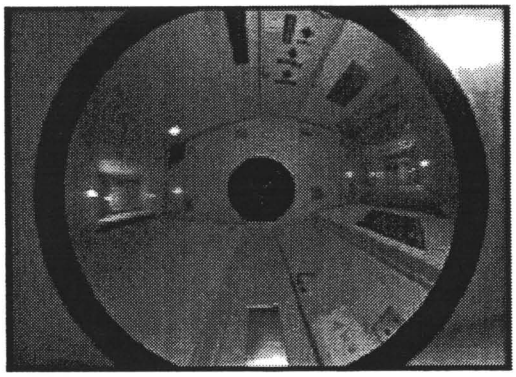
(b) フレーム 08



(c) フレーム 11



(d) 撮像時の動き



(e) 24 フレーム

図 4.12: 高解像度化に用いた入力画像例と撮像時の動き

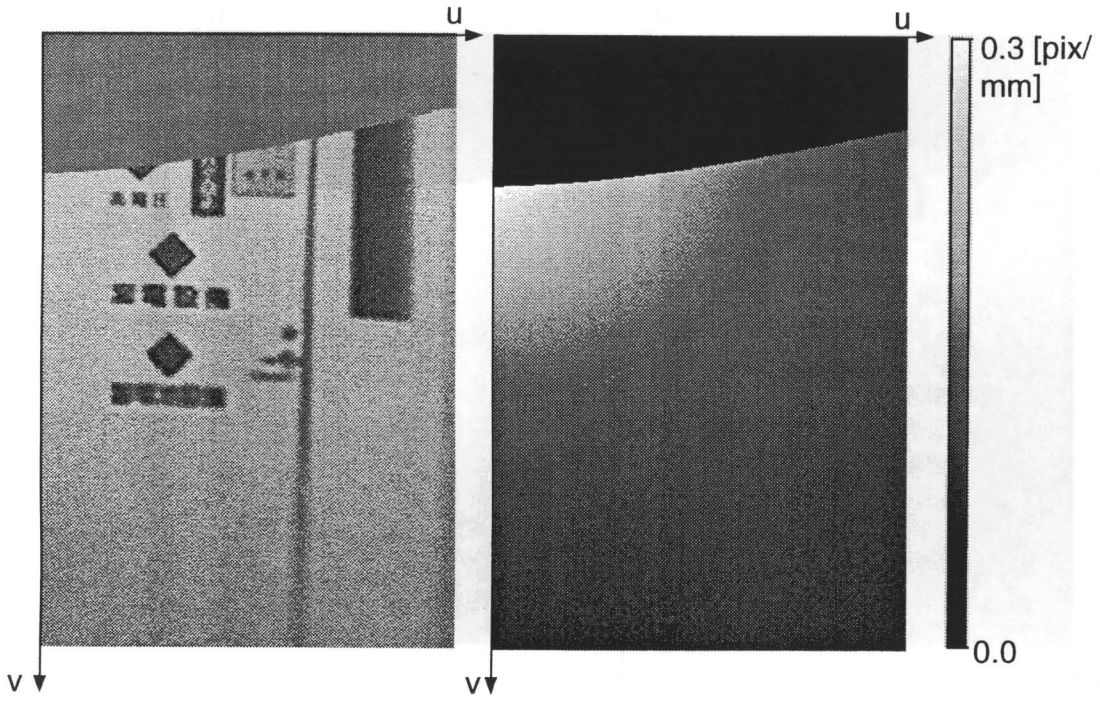


図 4.13: テクスチャ変換画像と解像度重みテーブル (フレーム 00)

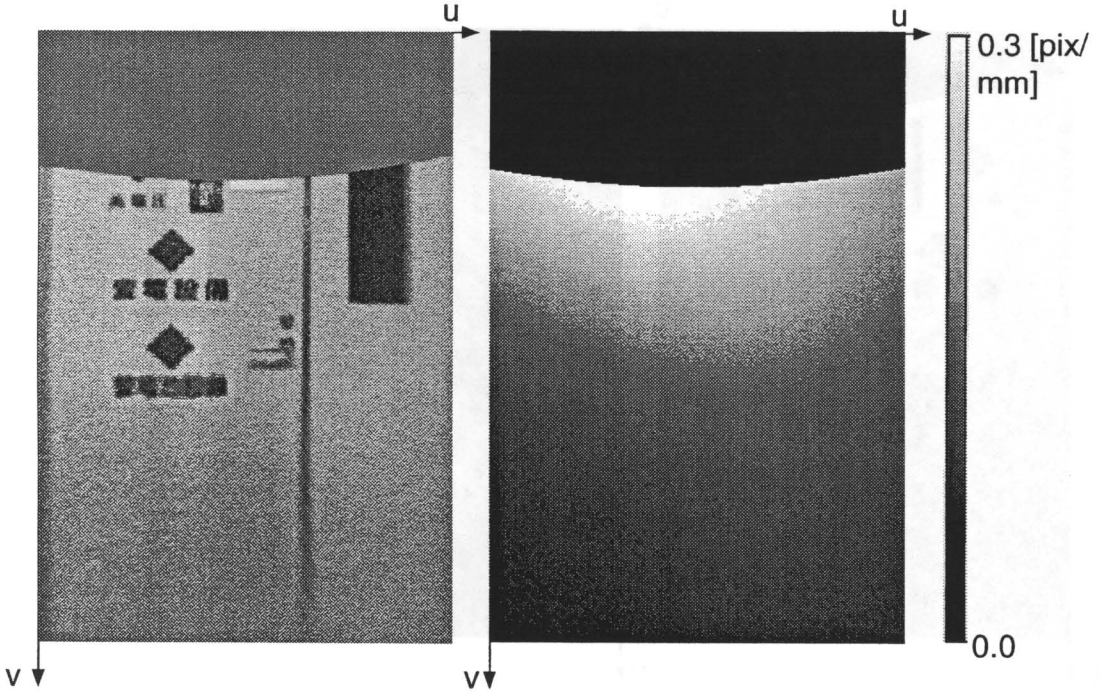


図 4.14: テクスチャ変換画像と解像度重みテーブル (フレーム 08)

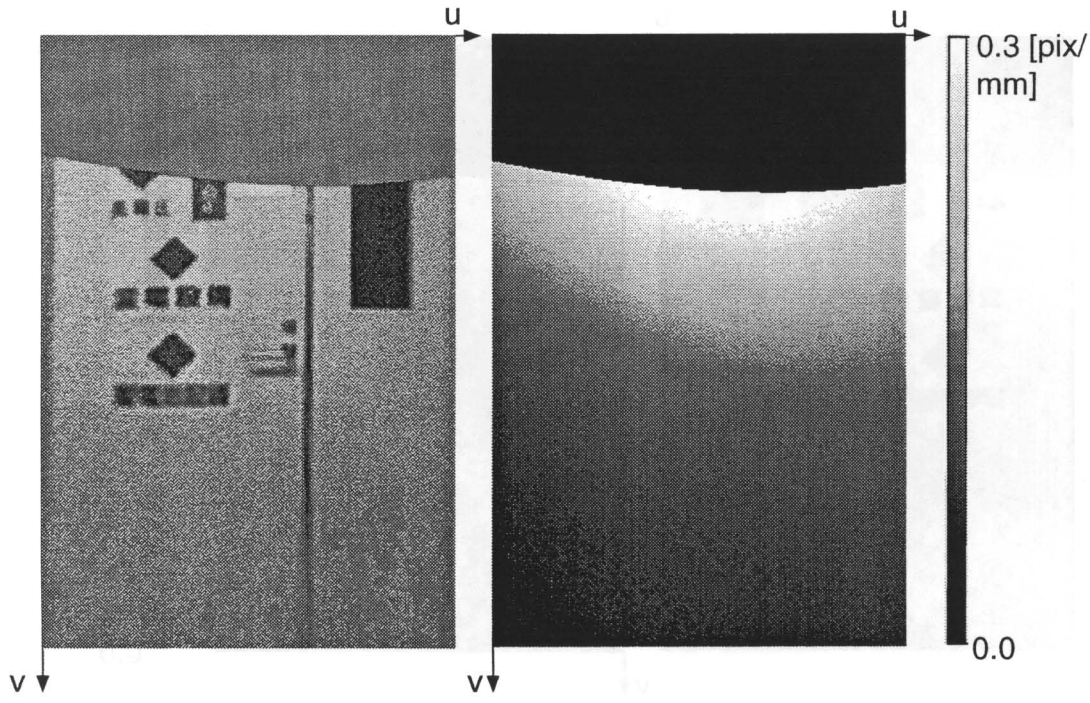


図 4.15: テクスチャ変換画像と解像度重みテーブル (フレーム 11)

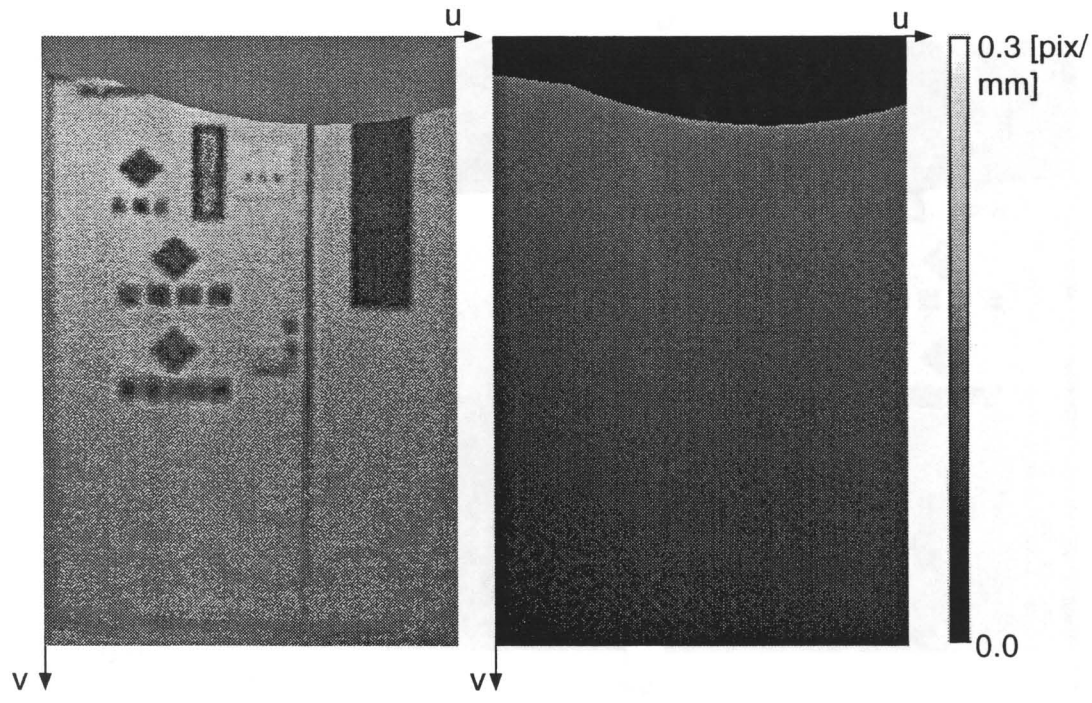


図 4.16: テクスチャ変換画像と解像度重みテーブル (フレーム 24)

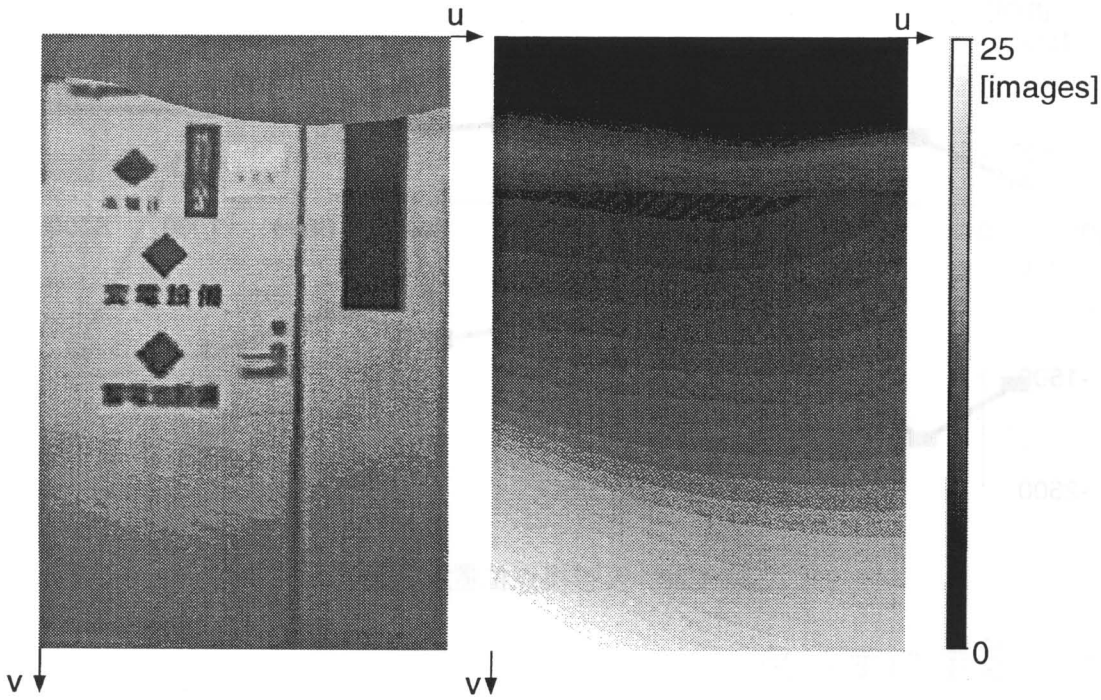


図 4.17: 高解像度化画像と部位ごとの使用フレーム数

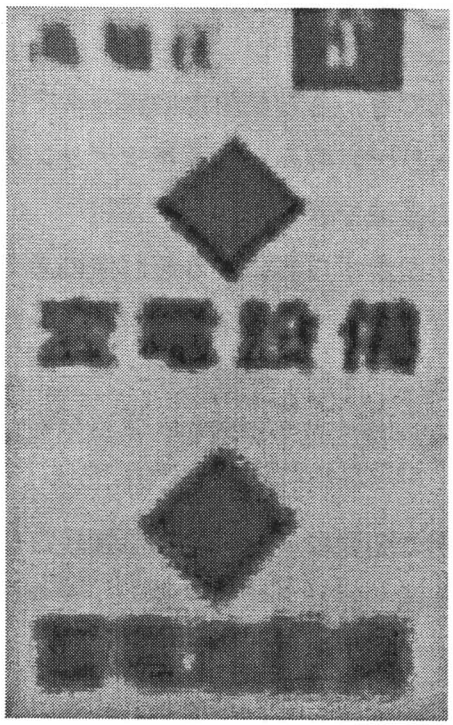


図 4.18: 高解像度テクスチャ (部位拡大画像)

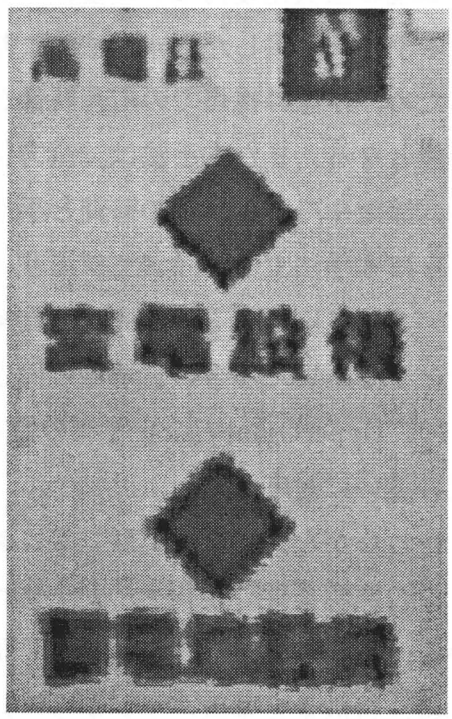


図 4.19: 1 枚からのテクスチャ画像 (部位拡大画像，フレーム 05)

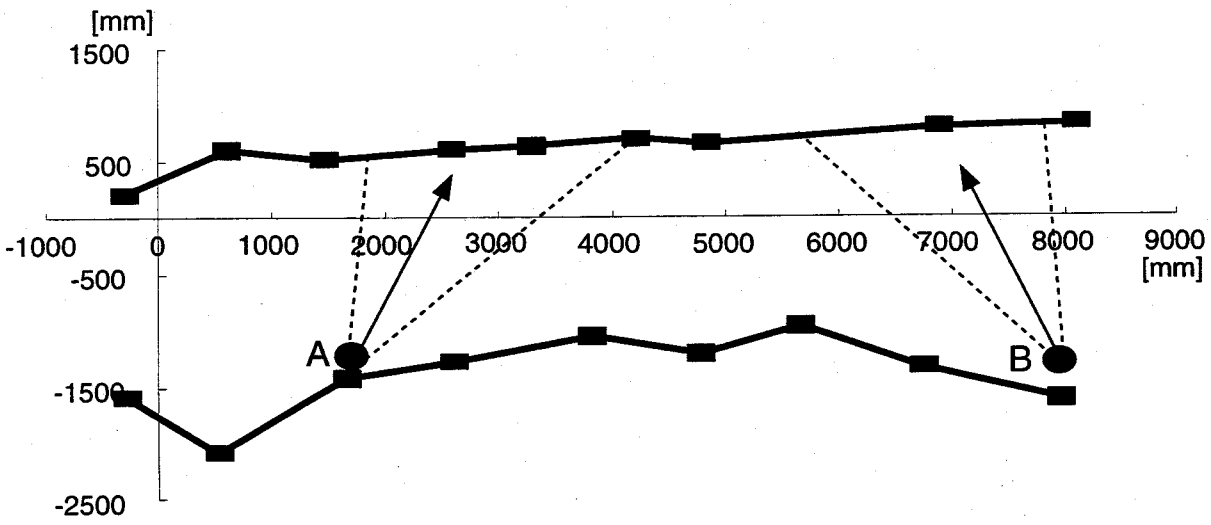


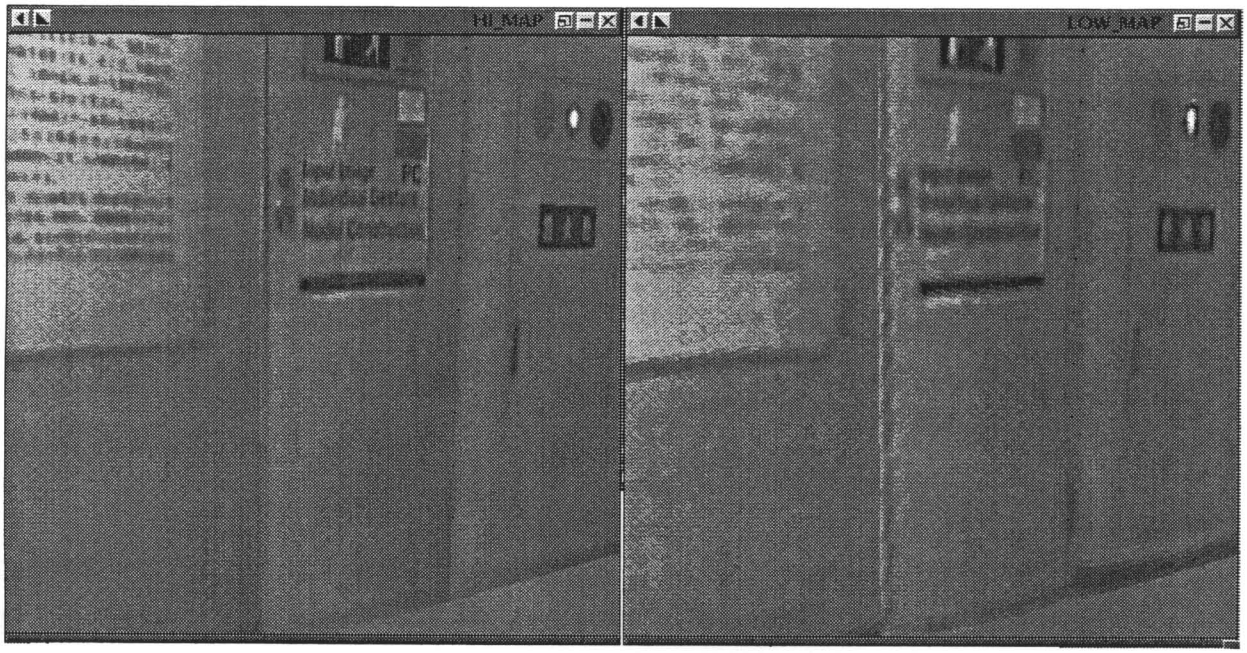
図 4.20: 仮想視点位置と視野方位

4.7 本章のまとめ

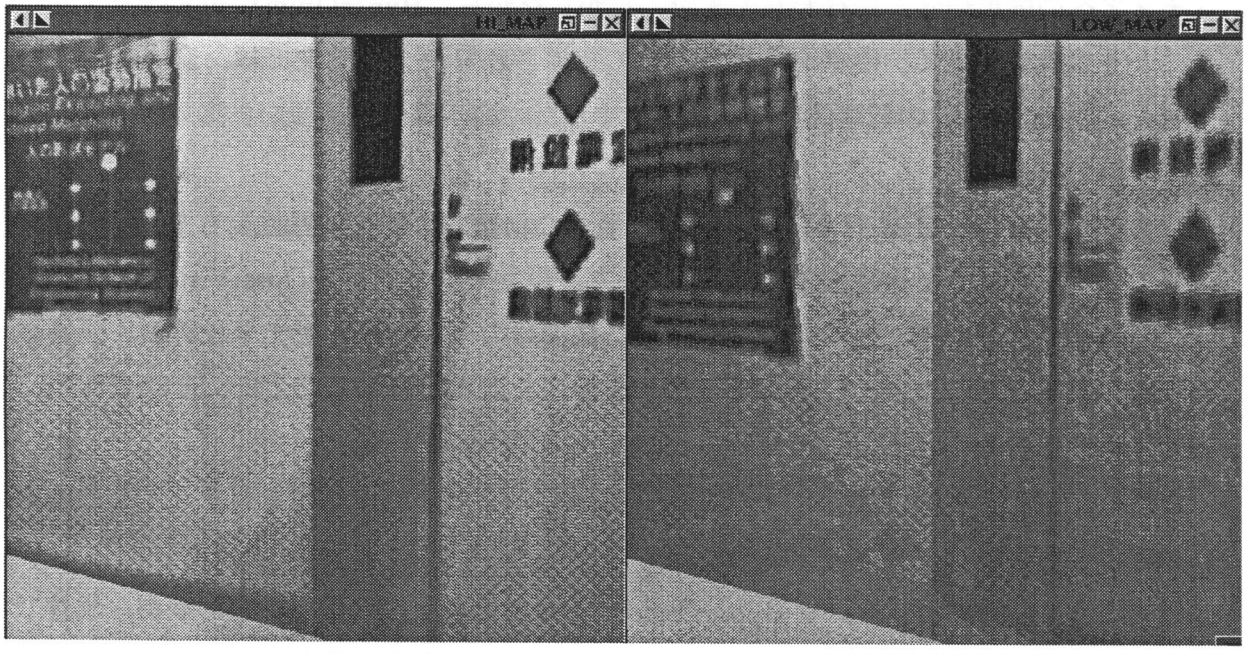
本章では，全方位視覚センサ HyperOmniVision により移動しながら撮像された画像列から，環境の三次元幾何モデル及びテクスチャを抽出することにより，三次元環境をモデル化する手法を提案した．本手法により得られた三次元モデルから仮想視点の画像を構築できるため，任意の視点での広角映像が忠実に生成でき，さらに少ないデータで広域の再現が可能となる．また本手法は，全方位ビデオストリームのみから環境モデリングが行えるため，撮像やモデル構築の時間と手間のコストを軽減できる．

さらに本手法では，イメージモザイキング及び画素ずらしによる超解像の考え方より環境モデリングに用いる画像列から高解像度化を行うことで，従来指摘されていた全方位視覚センサを用いた場合の低解像度問題を改善できた．また，解像度重みテーブルを用いることで，HyperOmniVision 特有の俯角に依存した解像度差や環境中の撮像位置における解像度の違いに対応した．

しかしながら，実際の実験結果において，照明の変化により画像に不連続な部位が現れた．この照明条件の変化への対応については，今後の課題とする．また，現在手動で行っている，不要エッジの削除と対称平面の両エッジの組合せの選択を自動化したいと考える．さらに，特徴量を垂直エッジがら一般的な特徴点に変更して，平面制約のないより複雑なシーンについて拡張したいと考える．



(a) 視点 A



(b) 視点 B

図 4.21: 生成されたモデルを用いた仮想視点画像
(左: 高解像度テクスチャ, 右: 1 枚の入力画像によるテクスチャ)

Chapter 5

おわりに

全方位視覚センサ HyperOmniVision は，全方位を一度に撮像でき，かつその光学特性から人が直観的に理解しやすい通常のカメラ画像やパノラマ画像に無歪みでシームレスに変換できる特徴をもつ．このような特徴により，カメラ映像を基にした監視システムならびに人工現実感や複合現実感のためのレンダリングなど，人への視覚提示を目的とした視覚メディアへの応用が盛んに行われてきた．しかしながら，HyperOmniVision はセンサの構造により解像度が低く，従来から問題として指摘されてた．本論文では，全方位視覚センサ HyperOmniVision の低解像度問題を改善するために，画像列情報から高解像度化する手法について述べた．

全方位視覚センサ HyperOmniVision は，特殊な構造および光学特性をもち，当然ながら従来のビデオカメラとは異なる．3章では全方位視覚センサ HyperOmniVision の高解像度化のために，その構造，光学特性を考慮し，撮像時のセンサ操作や光学設計および処理についての最適化を行なった．異なる三種類の手法を比較検証することで，それぞれの高解像度化性能を含めた長所・短所を明らかにし，応用への指針を述べた．

また 4章では，全方位視覚センサ HyperOmniVision を用いた環境モデリングとこの応用における高解像度化アルゴリズムを提案した．

以上より，全方位視覚センサ HyperOmniVision の低解像度問題を限定的ながら改善できたと考える．映像メディアの広がりと共に今後ますます映像の撮像，提示デバイスの広視野角化が進むと考えられる．全方位視覚センサの高視野角撮像の特徴を生かしたさらなる応用の広がりと実現を期待する．

謝辞

本研究を行うにあたり，その機会と環境を与えてくださりました，大阪大学大学院基礎工学研究科谷内田正彦教授に心より深く感謝致します．また，研究においての御助言や御指導を頂いたことを重ねて感謝致します，さらに国内学会や国際学会での発表機会を頂いたことは，本研究の位置づけ知ることや研究の遂行において得難い経験となりました．

副査を引き受けて頂きました大阪大学大学院基礎工学研究科井口征士教授，同西田正吾教授には，学位審査ならびに本研究をまとめるにあたり御厚情あふるる御指導および数々の有益な御教示を頂いたことを心より深く感謝致します．

八木康史助教授には，研究の遂行，論文の執筆，実験補助など多数の御指導，御助言を賜わりました．また，八木助教授からは深夜に及ぶ実験や締切間際の論文添削など，非常に多くの御助力を賜わり，心より深く感謝致します．

また，本研究ならびに本論文作成にあたり，直接的にも間接的にも様々な御助言，御指導を賜わりました岩井儀雄助手，砂山渡助手，山口智浩助教授 (奈良工業高等専門学校)，大澤幸生助手 (現筑波大学大学院助教授) に心から深く感謝致します．

本研究を進めるにあたり，日頃からの研究に関する議論や深夜に渡る実験を共同で行って頂きました浜田博昭氏 (現シャープ)，間下以大氏 (修士課程 1 回生) に感謝致します．

ならびに，日頃の討論や助言を頂いた，横山太郎氏 (現本田技研)，上古琢人氏に深く感謝致します．そして，日頃から研究および研究室生活において，各方面でお世話になりました，谷内田研究室の皆さんに感謝致します．

最後に，私の研究生活を理解し，陰ながら応援してくれた両親に感謝致します．

参考文献

[Barth 96] M. Barth, C. Barrows: "A fast panoramic imaging system and intelligent imaging techniqe for mobile robots", *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robotics and Systems*, pp.626-633, 1996.

[Cao 86] Z. L. Cao, S. J. Oh and E. L. Hall: "Dynamic omnidirectional vision for mobile robots", *J. Robotics Systems*, Vol.3, No.1, pp.5-17, 1986.

[Cheeseman 94] P. Cheeseman, B. Kanefsky, R. Kraft and J. Stutz: "Super-resolved surface reconstruction from multiple images", *Technical Report FIA-94-12*, NASA Ames Research Center, Artificial Intelligence Branch, 1994.

[遠藤 87] 遠藤ほか: "カラーシンクロビジョン CCD", テレビジョン学会誌, Vol.41, No.11, pp.1068-1074, 1987.

[浜田 00] 浜田 博明, 八木 康史, 谷内田 正彦: "全方位視覚センサを用いた環境地図とロボットの自己位置・姿勢推定法", 情報処理学会研究報告, CVIM-121-14, pp.105-101, 2000.

[Hong 91] J. Hong, X. Tan, B. Pinette, R. Weiss and E. M. Riseman: "Image-based homing", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp.620-625, 1991.

[Irani 91] M.Irani and S. Pelg: "Improving resolution by image registration", *Computer Vision Graphics and Image Processing: Graphical models and image precessing*, Vol.53, pp.231-239, May, 1991.

[Ishiguro 90] H. Ishiguro, M. Yamamoto and S. Tsuji: "Analysis of omni-directional views at different location", *Proc. IEEE Int. Conf. Intelligent Robotics and Systems*, pp.659-664, 1990.

[金子 97] 金子 卓, 多矢 信之, 川原 信章, 秋田 成行, 服部 正: "可変焦点レンズを用いた長焦点深度視覚機構", 電気学会マイクロマシン研究会, 1997.

[Kaneko 97] T. Kaneko, T. Ohmi, N. Ohya, N. Kawahara, and T. Hattori: "A New Compact and Quick-Response Dynamic Focusing Lens", *Transducers'97*, 1997.

[川西 97] 川西, 山澤, 岩佐, 竹村, 横矢: "六角錐ミラーを用いた全方位ステレオ画像センサによる高解像度ステレオパノラマ動画像の生成", 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU-118, pp.51-58, 1997.

[川崎 99] 川崎 洋, 谷田部 剛志, 池内 克史, 坂内 正夫: "Omni ビデオカメラからの 3 次元都市の自動生成", 情報処理学会研究報告, CVIM-199-4, pp.25-32, 1999.

[川崎 01] 川崎 洋, 池内 克史, 坂内 正夫: "車載全方位カメラ映像からの建物画像の超解像度化", 情報処理学会研究報告, CVIM-125-13, pp.95-102, 2001.

[Keren 88] D. Keren, S. Pelg, and R. Brada: "Image sequence enhancement using sub-pixel displacements", *Proc. IEEE Int. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.742-746, Jun, 1988.

[児玉 97] 児玉 和也, 大西 隆之, 相沢 清晴, 羽鳥 光俊: "反復法に基ずく複数画像からの任意焦点画像の生成", 映像メディア学会誌, Vol. 51, No. 12, pp.2072-2081,1997.

[小松 91] 小松, 相沢, 斎藤: "2 台のカメラを用いる超高精細画像取得法の提案とその理論的解析", テレビジョン学会誌, Vol.52, No.10, pp.1256-1262, 1991.

[Morita 89] T. Morita, Y. Yasukawa, Y. Inamoto, T. Uchiyama and S. Kawakami: "Meaurement in three dimentions by motion stereo and spherical map-

ping", *Proc. IEEE Int. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.422-434, 1989.

[長原 01] 長原 一, 八木 康史, 谷内田 正彦: "全方位視覚センサを用いた高解像度3Dモデリング", 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU2000-152, pp.39-46, 2001.

[内藤 96] 内藤 将彦, 児玉 和也, 相沢 清晴, 羽鳥 光俊: "複数の異なる焦点画像からの焦点外れ画像生成を利用した全焦点画像の強調的取得", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J79-D-II, No.6, pp.1026-1053, 1996.

[Nayer 97] Shree K. Nayer: "Catadioptric omnidirectional camera", *Proc. IEEE Int. Conf. Conputer Vision and Pattern Recognition*, pp.482-488, 1997.

[Nayer 00] Shtee K. Nayer and Amruta Karmarkar: "360 x 360 mosics", *Proc. IEEE Int. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, 2000.

[Peri 96] V. Peri and S. K. Nayer: "Omnidirectional Video System", *Proc. U.S.-Japan Graduate Student Forum in Robotics*, pp.28-31,1996.

[Sarachik 89] K. B. Sarachik: "Characterizing an indoor environment with a mobile robot and uncalibrated stereo", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp.984-989, 1989.

[島村 00] 島村 潤, 山澤 一誠, 竹村 治雄, 横矢 直和: "全周実画像と CG モデルの合成による仮想環境の構築", 画像の認識・理解シンンポジウム, Vol.2, pp.367-372, 2000.

[高橋 99] 高橋 拓二, 川崎 洋, 池内 克史, 坂内 正夫: "全方位画像によるレンダリングの手法", 情報処理学会研究報告, CVIM-199-5, pp.33-40, 1999.

[Tanahashi 00] H. Tanahashi et al.: "Development of a stereo omnidirectional-image system (SOS)" , *Proc. IEEE Int. Conf. Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, pp.289-294, 2000.

[Tomasi 96] C. Tomasi and T. Kanade: "Shape and motion from image streams under orthography: A factorization method" , *Int. J. Computer Vision*, Vol.9, No.2, pp.137-154, 1996.

[Tsai 84] R. Y. Tsai and T. S. Huang: "Multi-frame image restoration and registration", *Advances in Computer Vision and Image Processing* , Vol.1, pp.317-339, JAI Press, 1984.

[辻 96] 辻, 加藤: " 環境構造変化の認知", 平成 7 年度科研重点知能ロボット成果報告書, pp.98-101, 1996.

[上原 00] 上原 将文, 塩崎 剛志, 全 炳東: "数値地図と動画像解析による都市空間モデリング", 画像の認識・理解シンポジウム, Vol.2, pp.373-378, 2000.

[八木 91] 八木, 川戸: "円錐ミラーを用いた全方位視覚センサによる位置情報の獲得", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J74-D-II, No.1, pp.19-26, 1991.

[Yagi 95] Y.Yagi, Y. Nishizawa and M. Yachida: "Map-based navigation for a mobile robot with omnidirectional image sensor COPIS", *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.11, No.5, pp.638-648, 1995.

[山口 99] 山口 晃一郎, 山澤 一成, 竹内 治雄, 横矢 直和: "全方位移動画像を用いた任意視点方向ステレオ画像の実時間生成と提示", 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU-99-159, 1999.

[Yamazawa 95] K. Yamazawa, Y. Yagi and M. Yachida: New real-time omnidirectional image sensor with hyperboloidal mirror, *Proc. IEEE Int. Conf. Image Analysis*, Vol.2, pp.1381-1387, 1995.

[Zheng 90] J. Y. Zheng and S. Tuji: "Parametric representaion of scenes for route understanding", *Proc. IEEE Int. Conf. Pattern Recognition*, pp.161-167, 1990.

研究業績

学術論文

[1] Hajime Nagahara, Yasushi Yagi, and Masahiko Yachida: "Super-resolution for Omnidirectional Vision Sensor", Advanced Robotics Vol.14, No.5, pp.427-429, 2000.

[2] 長原 一, 八木 康史, 谷内田 正彦: "全方位画像列からの高解像度化", システム情報制御学会誌, Vol. 14, No. 6, 2001. (掲載予定)

[3] 長原 一, 八木 康史, 谷内田 正彦: "多重焦点全方位画像列を用いた高精細化", 電子情報通信学会論文誌 D-II (採録決定)

[4] 長原 一, 八木 康史, 谷内田 正彦: "全方位視覚センサを用いた高解像度 3D モデリング", 情報処理学会論文誌コンピュータビジョンとイメージメディア (投稿中)

国際会議

[1] Hajime Nagahara, Yasushi Yagi, and Masahiko Yachida: "Super-resolution from an omnidirectional image sequence", Proc. IEEE Int. Conf. Industrial Electronics,Control and Instrumentation, pp.2559-2564, 2000.

[2] Hajime Nagahara, Yasushi Yagi, and Masahiko Yachida: "Resolution improving method from multi-focal omnidirectional images", IEEE Int. Conf. Image Processing, 2001.(発表予定)

国内会議

[1] 長原 一，間下 以大，八木 康史，谷内田 正彦: "全方位視覚センサの超解像度化", 第17回日本ロボット学会学術研究予稿集, Vol.3, 3B11, pp.783-784, 1999.

[2] 長原 一，八木 康史，谷内田 正彦: "エッジ情報に基づく高解像度全方位画像の生成", 第17回日本ロボット学会学術研究予稿集, Vol.3, 3B12, pp.785-786, 1999.

[3] 長原 一，八木 康史，谷内田 正彦: "全方位時空間画像からの超解像度化", 情報処理学会研究報告,CVIM-121, pp.97-104, 2000.

[4] 長原 一，八木 康史，谷内田 正彦: "多重焦点全方位画像がらの超解像度化", 第18回日本ロボット学会学術研究予稿集, Vol.2, pp.783-784, 2000.

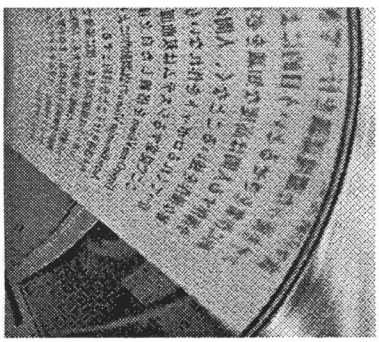
[5] 長原 一，浜田 博昭，八木 康史，谷内田 正彦: "全方位視覚センサを用いた高解像度3D環境モデリング", 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU-2000-152, pp.39-46, 2001.

特許

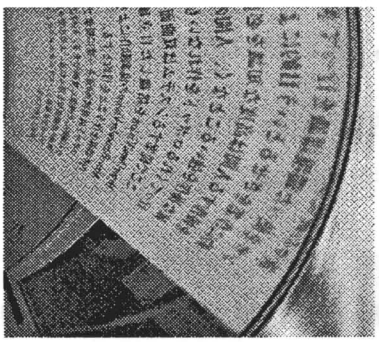
[1] 八木 康史，谷内田 正彦，長原 一: "多重焦点全方位画像装置", 特願2001-053554, 2001.

付録

A. 固定焦点入力画像列

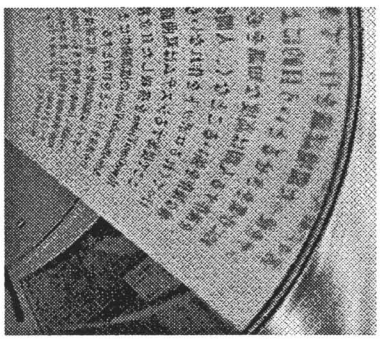


Frame 00: f_{20}, 0.0[deg.]

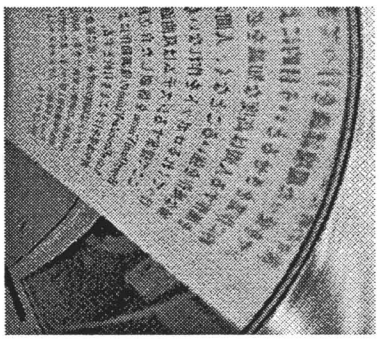


Frame 01: f_{20}, 0.13[deg.]

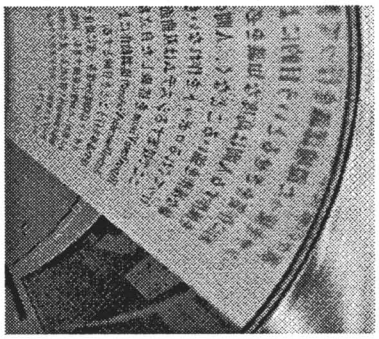
Frame 02: f_{20}, 0.26[deg.]



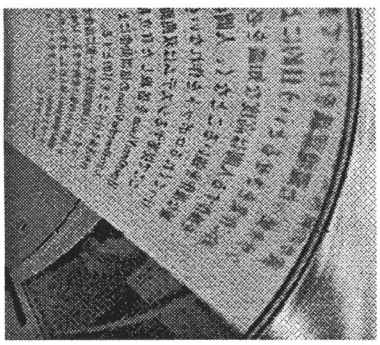
Frame 03: f_{20}, 0.39[deg.]



Frame 04: f_{20}, 0.52[deg.]

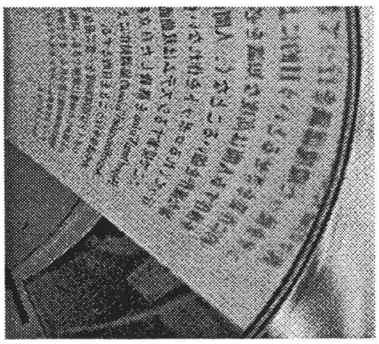


Frame 05: f_{20}, 0.65[deg.]

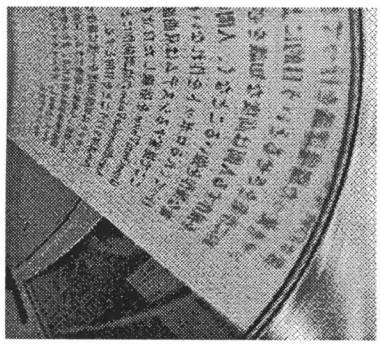


Frame 06: f_{20}, 0.78[deg.]

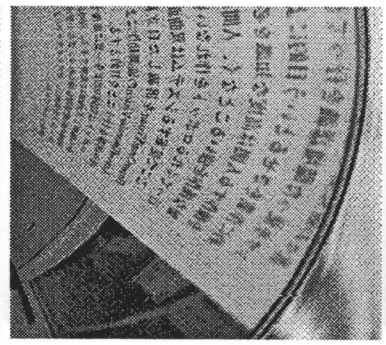
Frame 07: f_{20}, 0.91[deg.]



Frame 08: f_{20}, 1.04[deg.]

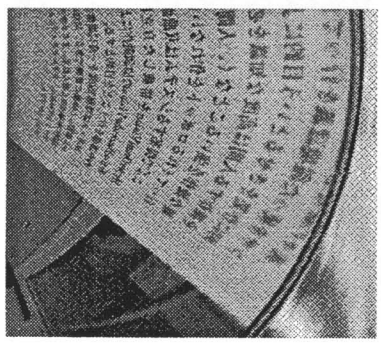


Frame 09: f_{20}, 1.17[deg.]



Frame 10: f_{20}, 1.3[deg.]

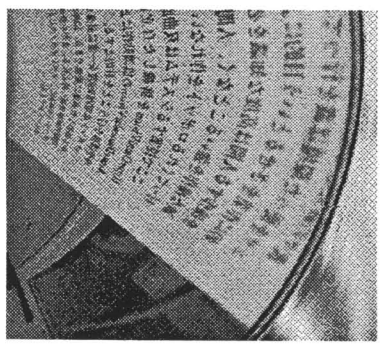
Frame 11: f_{20}, 1.43[deg.]



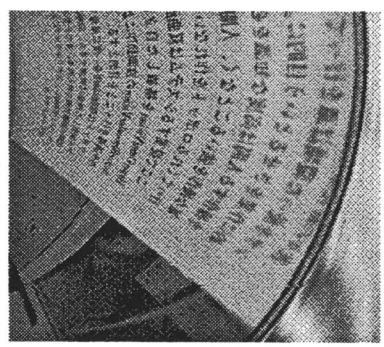
Frame 12: f_{20}, 1.56[deg.]

Frame 13: f_{20}, 1.69[deg.]

Frame 14: f_{20}, 1.82[deg.]

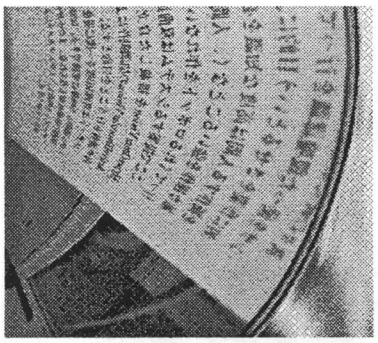


Frame 15: f_{20}, 1.95[deg.]

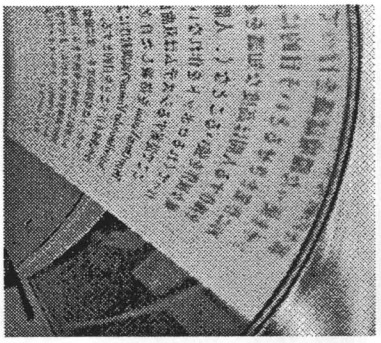


Frame 16: f_{20}, 2.08[deg.]

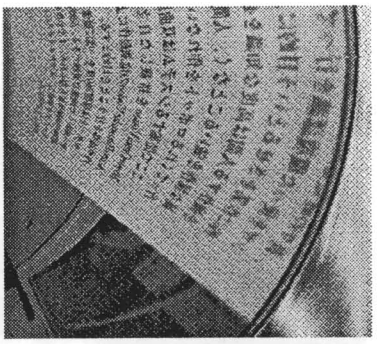
Frame 17: f_{20}, 2.21[deg.]



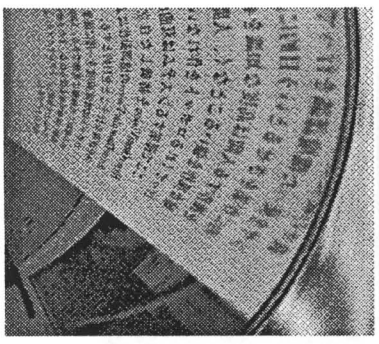
Frame 18: f_{20}, 2.34[deg.]



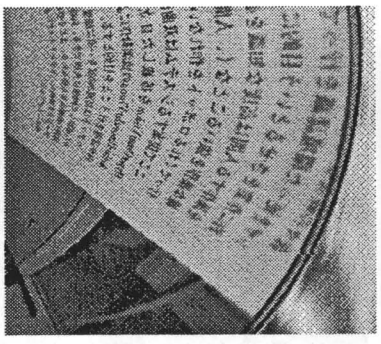
Frame 19: f_{20}, 2.47[deg.]



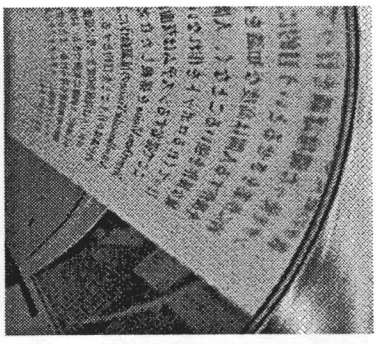
Frame 20: f_{20}, 2.6[deg.]



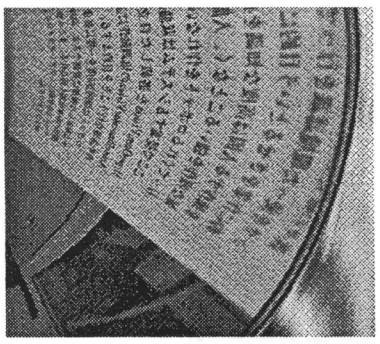
Frame 21: f_{20}, 2.73[deg.]



Frame 22: f_{20}, 2.86[deg.]

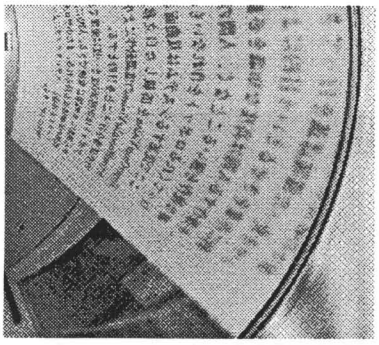


Frame 23: f_{20}, 2.99[deg.]

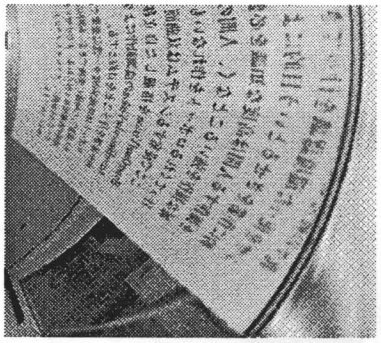


Frame 24: f_{20}, 3.12[deg.]

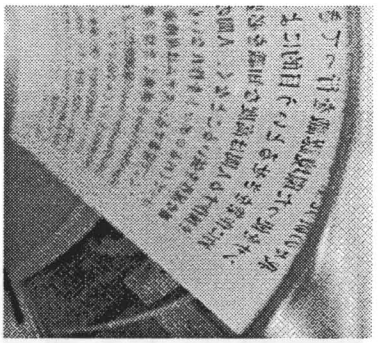
B. 多重焦点入力画像列



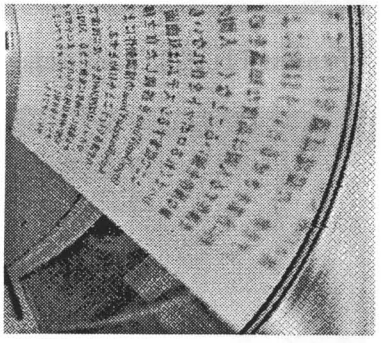
Frame 00: f_{40}, 0.0[deg.]



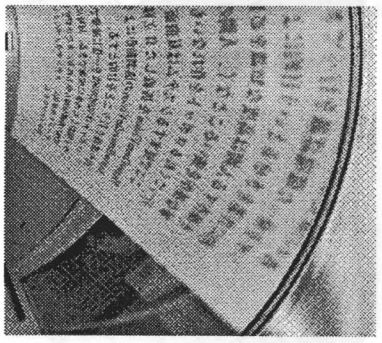
Frame 01: f_{10}, 0.13[deg.]



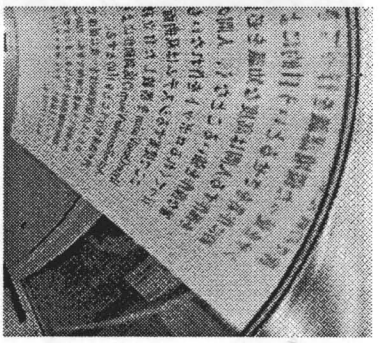
Frame 02: f_{-10}, 0.26[deg.]



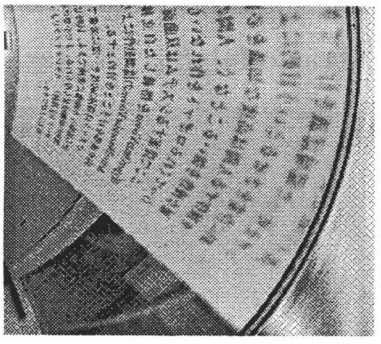
Frame 03: f_{40}, 0.39[deg.]



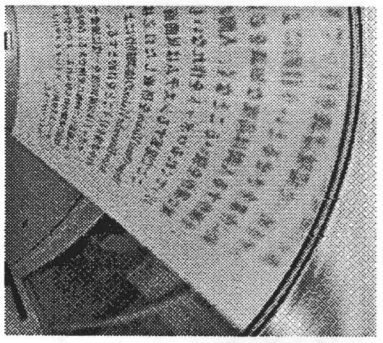
Frame 04: f_{40}, 0.52[deg.]



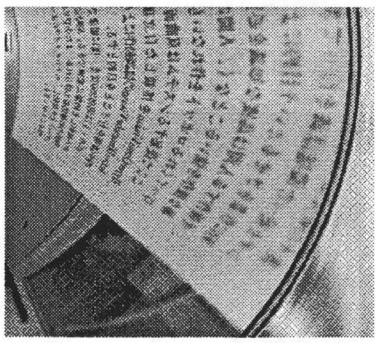
Frame 05: f_{10}, 0.65[deg.]



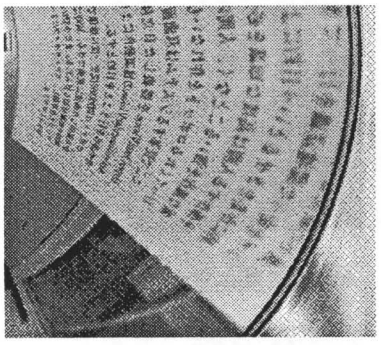
Frame 06: f_{40}, 0.78[deg.]



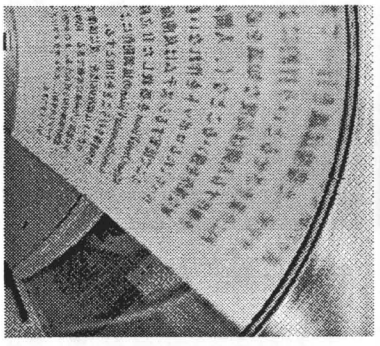
Frame 07: f_{40}, 0.91[deg.]



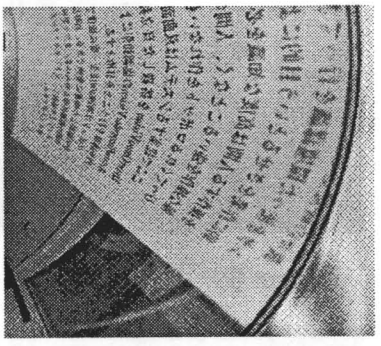
Frame 08: f_{40}, 1.04[deg.]



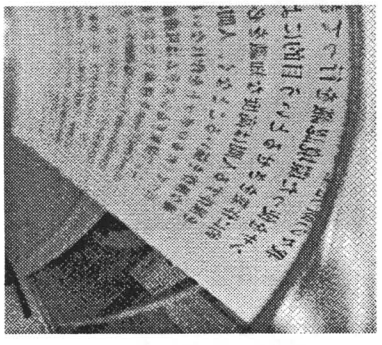
Frame 09: f_{40}, 1.17[deg.]



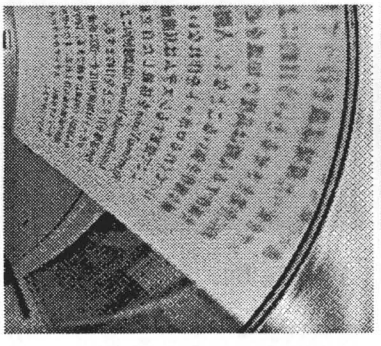
Frame 10: f_{40}, 1.3[deg.]



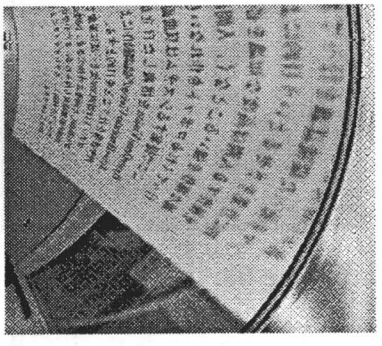
Frame 11: f_{10}, 1.43[deg.]



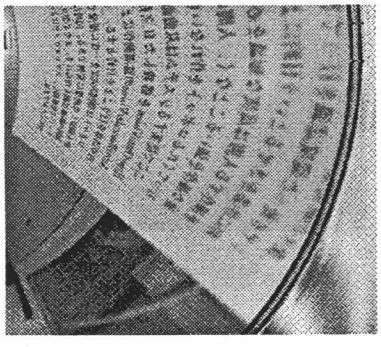
Frame 12: f_{-10}, 1.56[deg.]



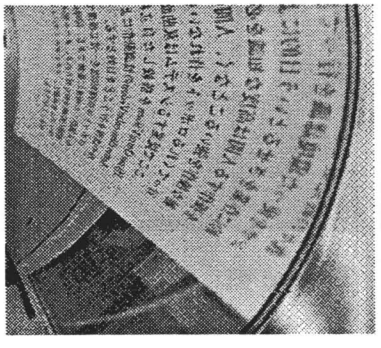
Frame 13: f_{40}, 1.69[deg.]



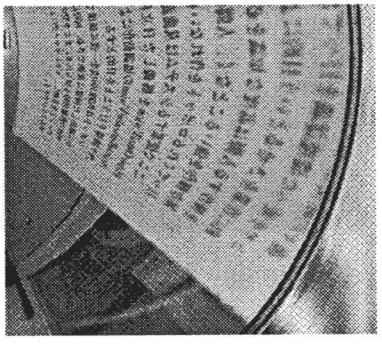
Frame 14: f_{40}, 1.82[deg.]



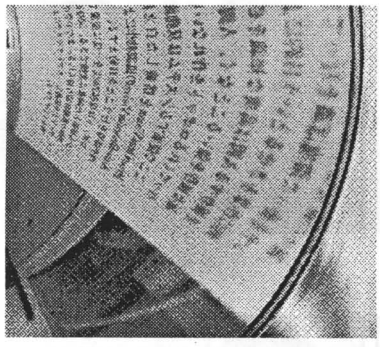
Frame 15: f_{40}, 1.95[deg.]



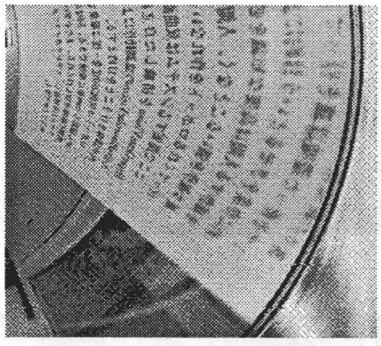
Frame 16: f_{10}, 2.08[deg.]



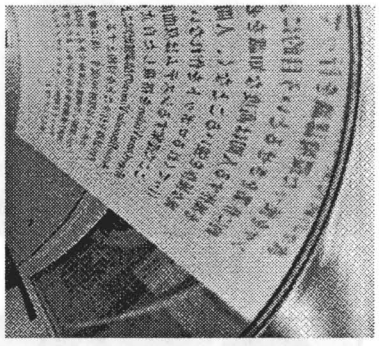
Frame 17: f_{40}, 2.21[deg.]



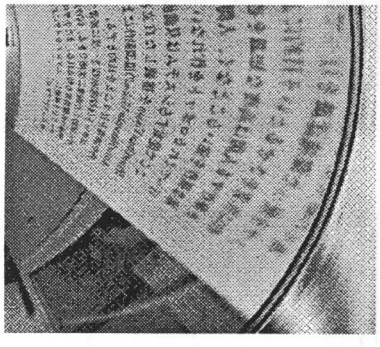
Frame 18: f_{40}, 2.34[deg.]



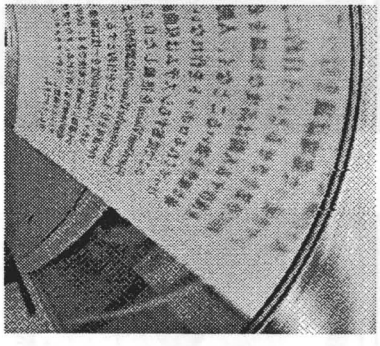
Frame 19: f_{40}, 2.47[deg.]



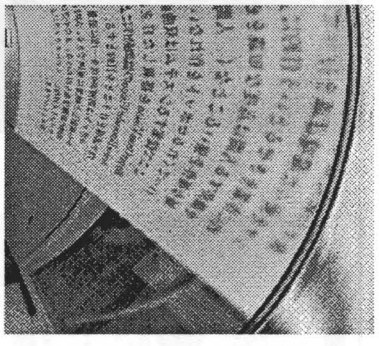
Frame 20: f_{10}, 2.6[deg.]



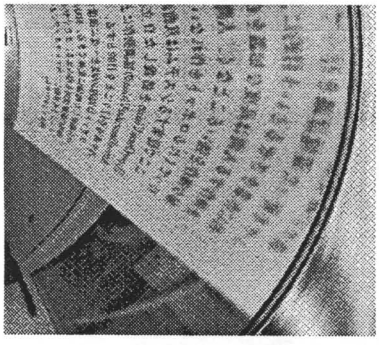
Frame 21: f_{40}, 2.73[deg.]



Frame 22: f_{40}, 2.86[deg.]

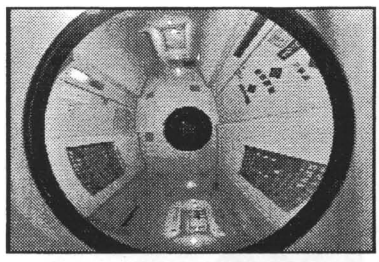


Frame 23: f_{40}, 2.99[deg.]

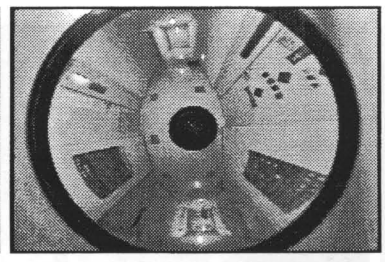


Frame 24: f_{10}, 3.12[deg.]

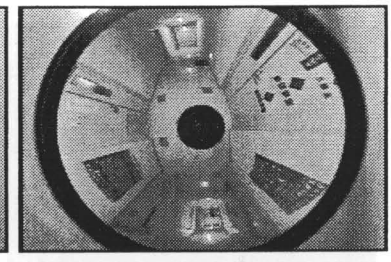
C. モデリングにおける入力画像列



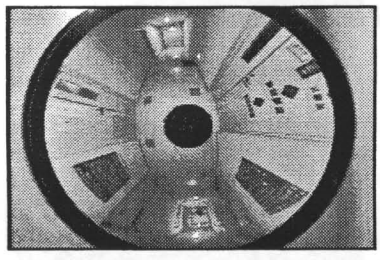
Frame 00



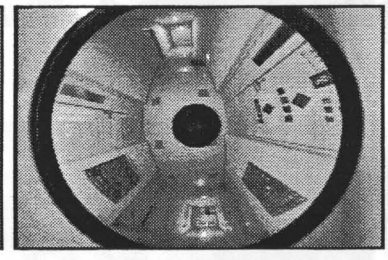
Frame 01



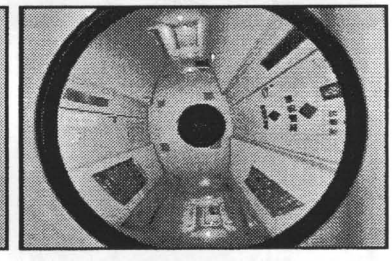
Frame 02



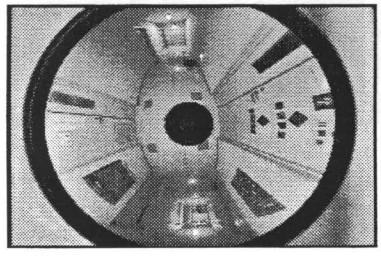
Frame 03



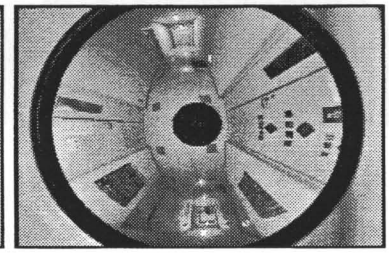
Frame 04



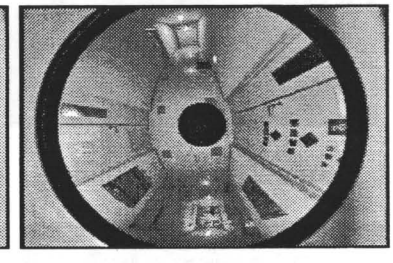
Frame 05



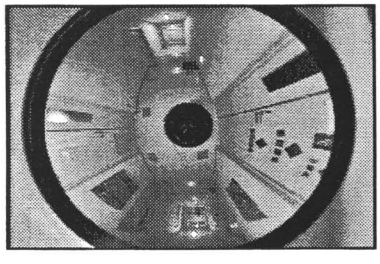
Frame 06



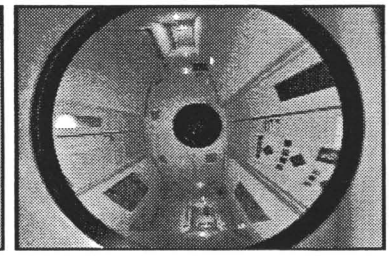
Frame 07



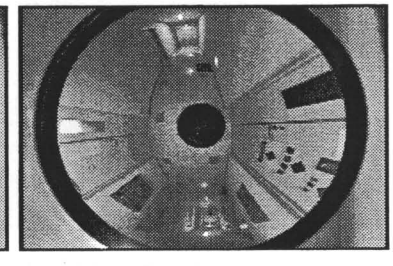
Frame 08



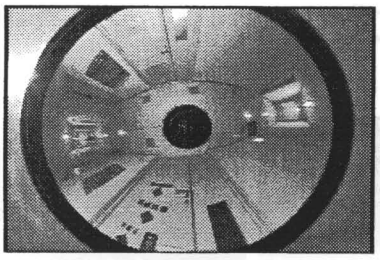
Frame 09



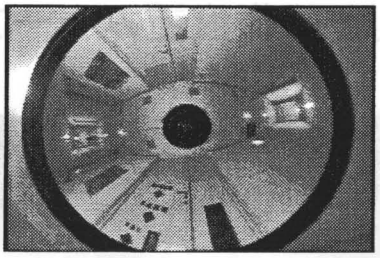
Frame 10



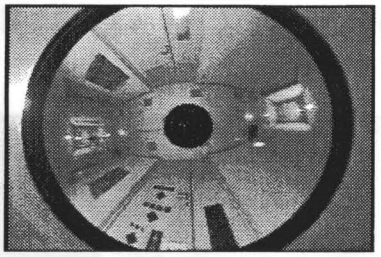
Frame 11



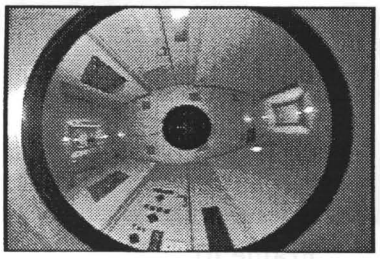
Frame 12



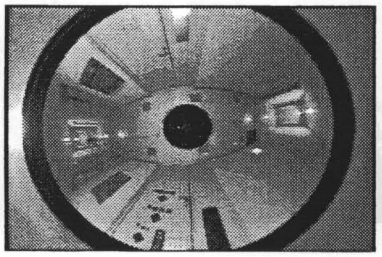
Frame 13



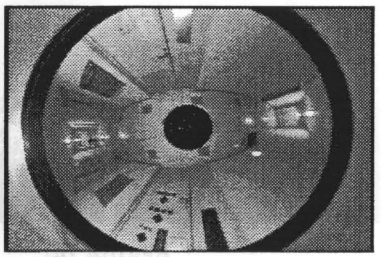
Frame 14



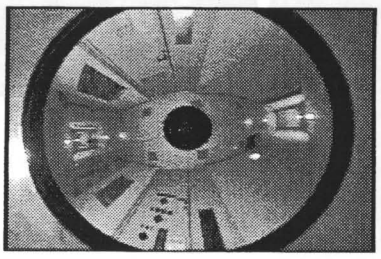
Frame 15



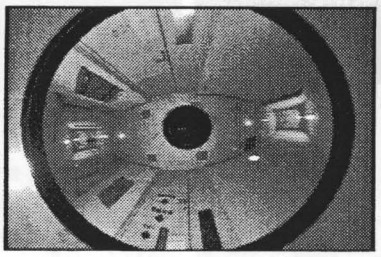
Frame 16



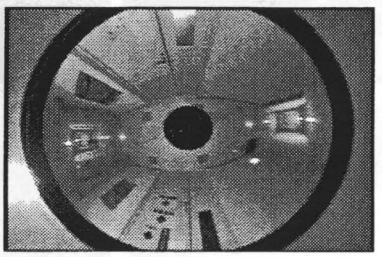
Frame 17



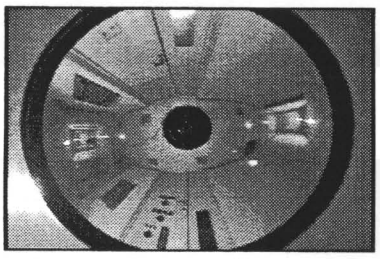
Frame 18



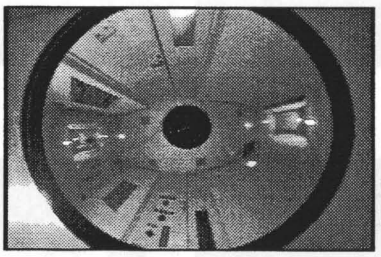
Frame 19



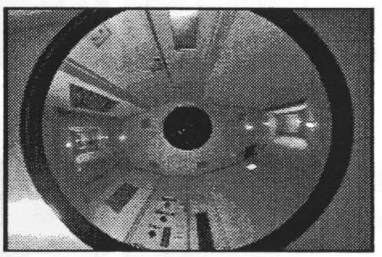
Frame 20



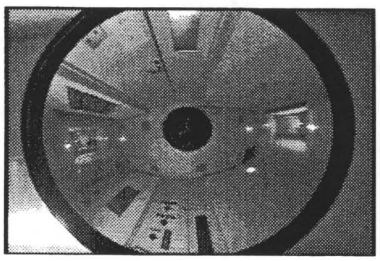
Frame 21



Frame 22

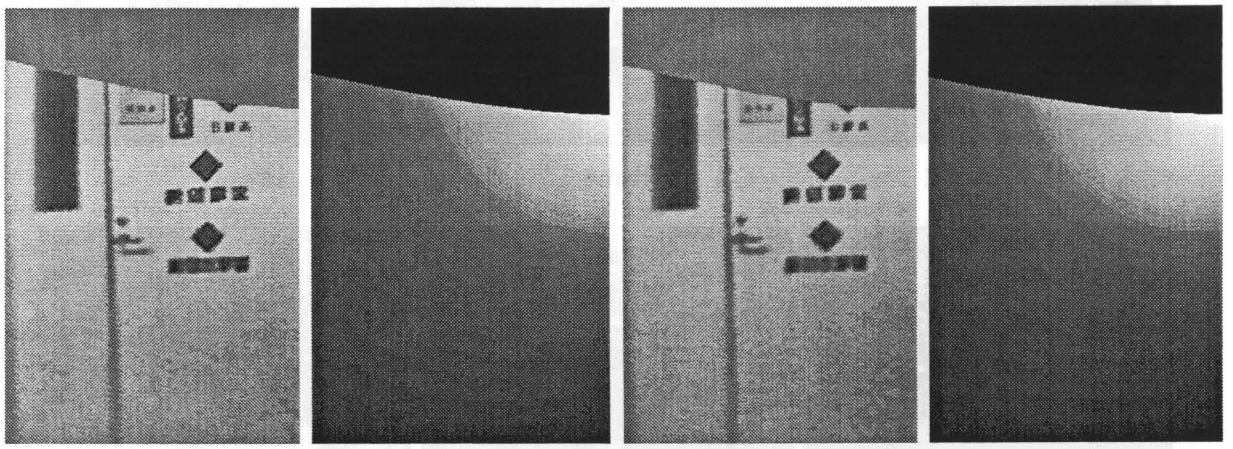


Frame 23

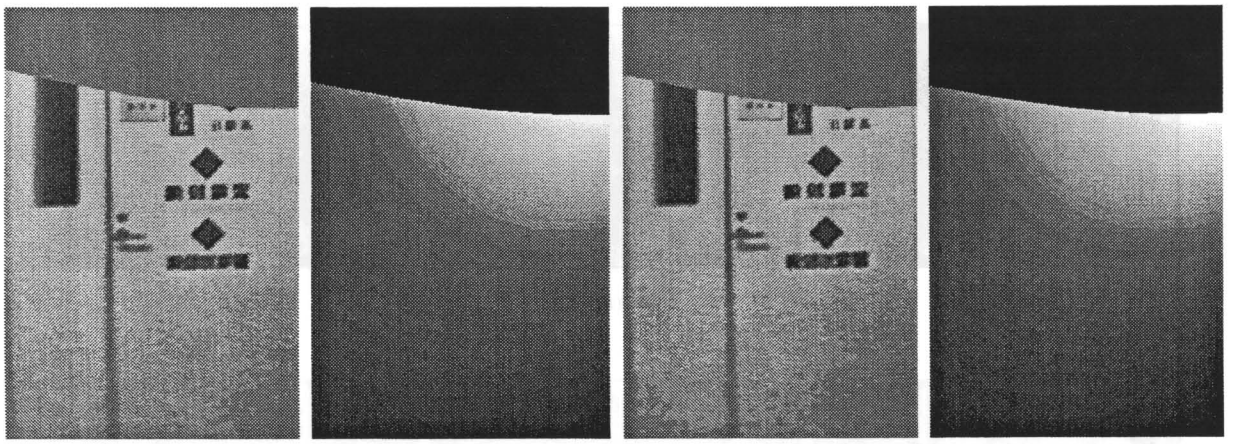


Frame 24

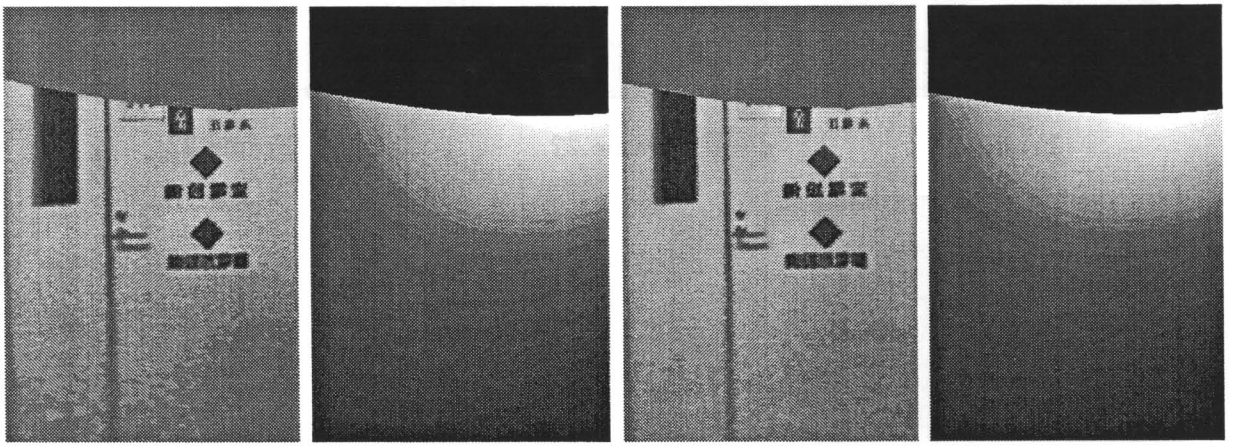
D. テクスチャ画像列と解像度重みテーブル



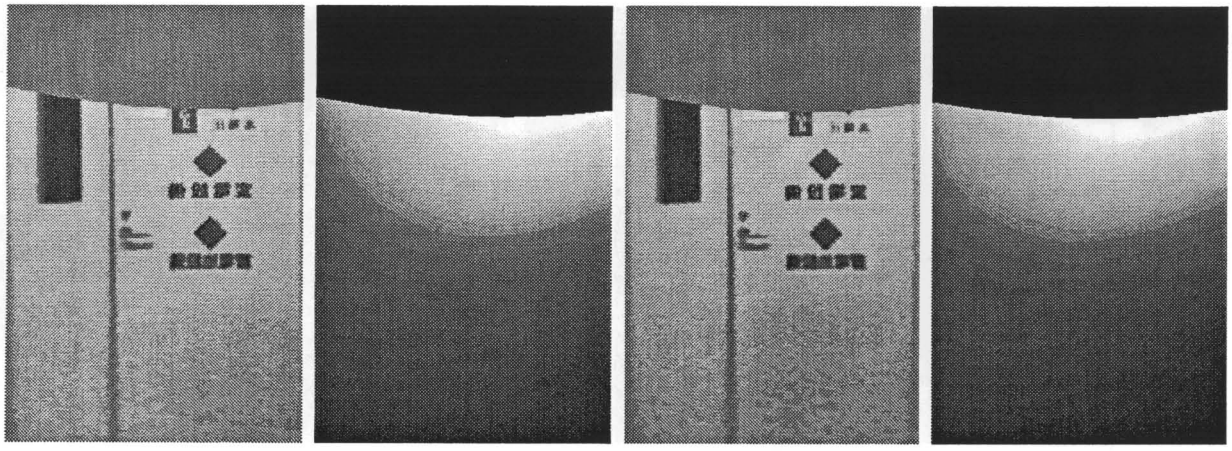
Frame 00　　Frame 01



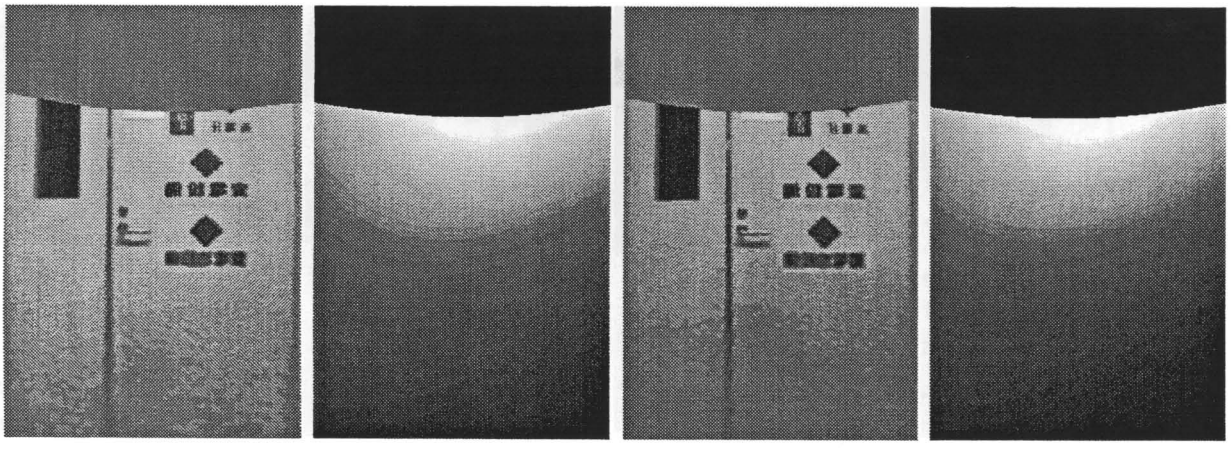
Frame 02　　Frame 03



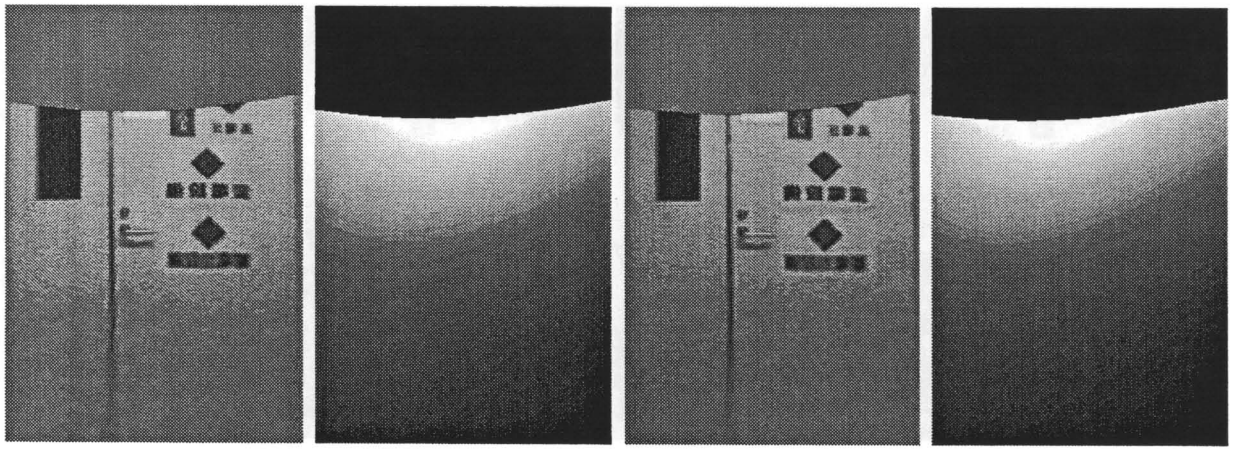
Frame 04　　Frame 05



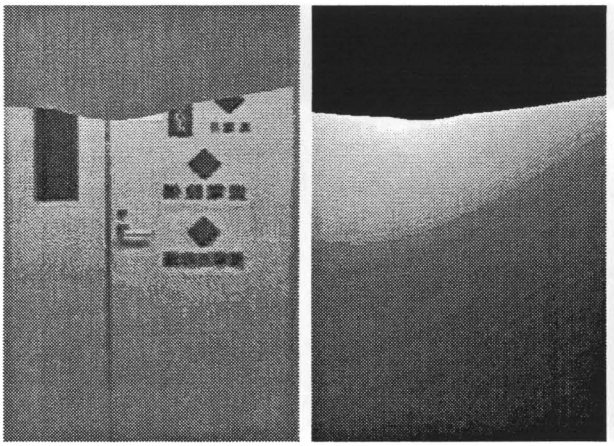
Frame 06 Frame 07



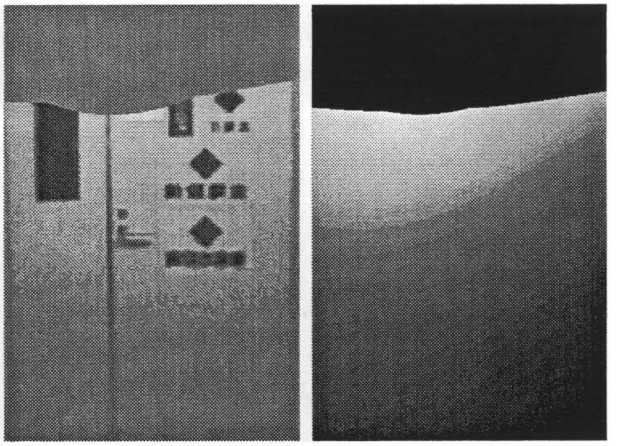
Frame 08 Frame 09



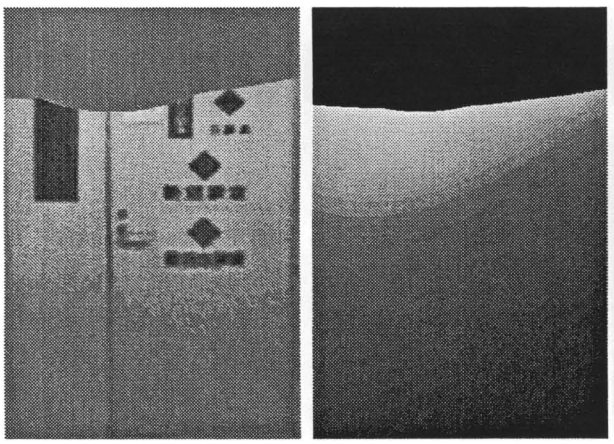
Frame 10 Frame 11



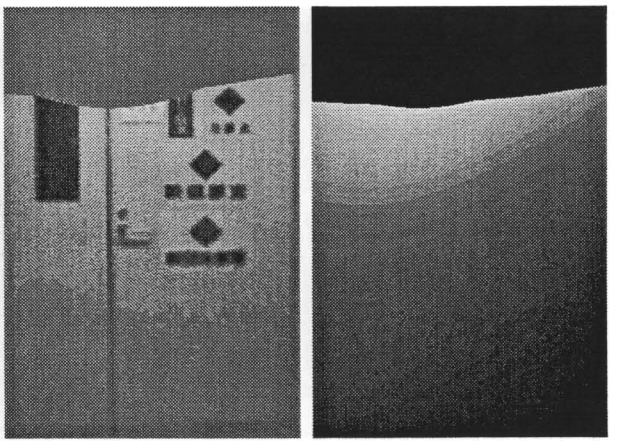
Frame 12



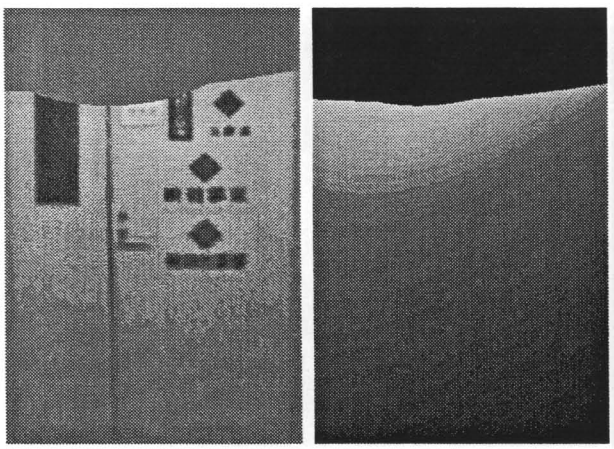
Frame 13



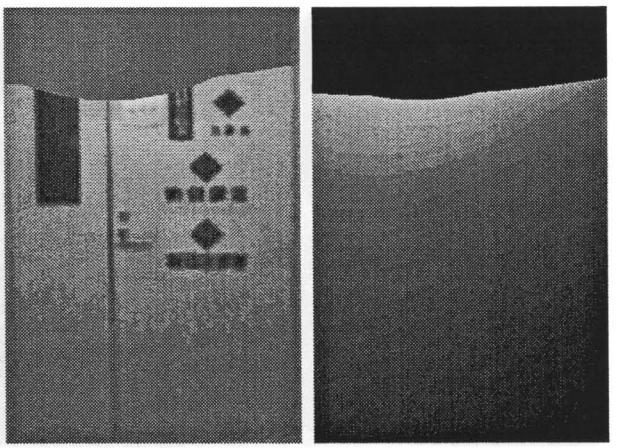
Frame 14



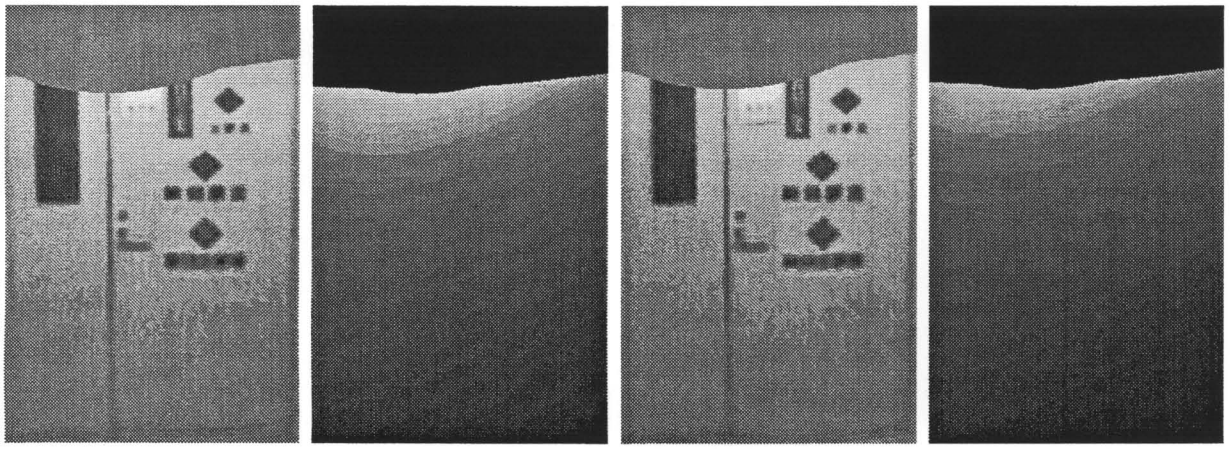
Frame 15



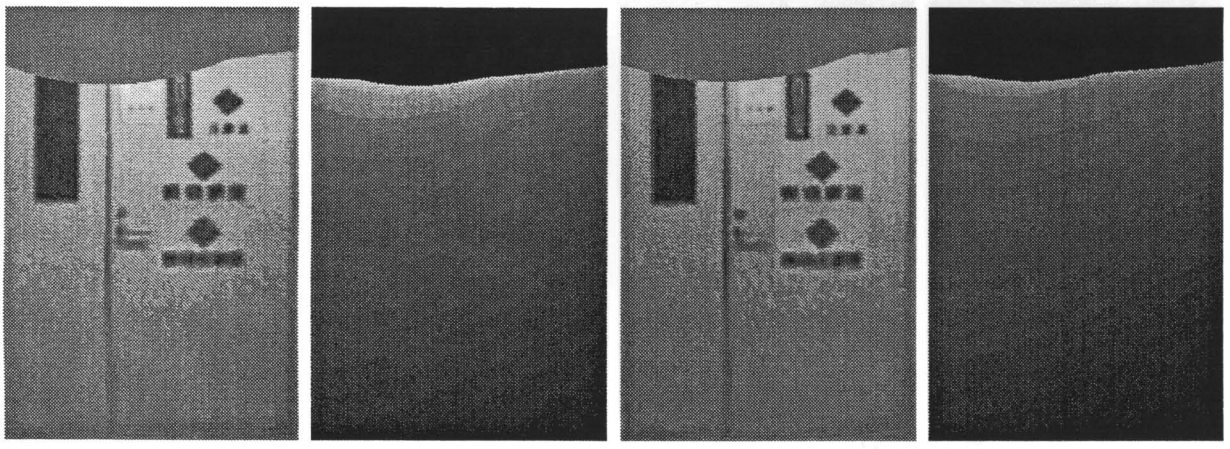
Frame 16



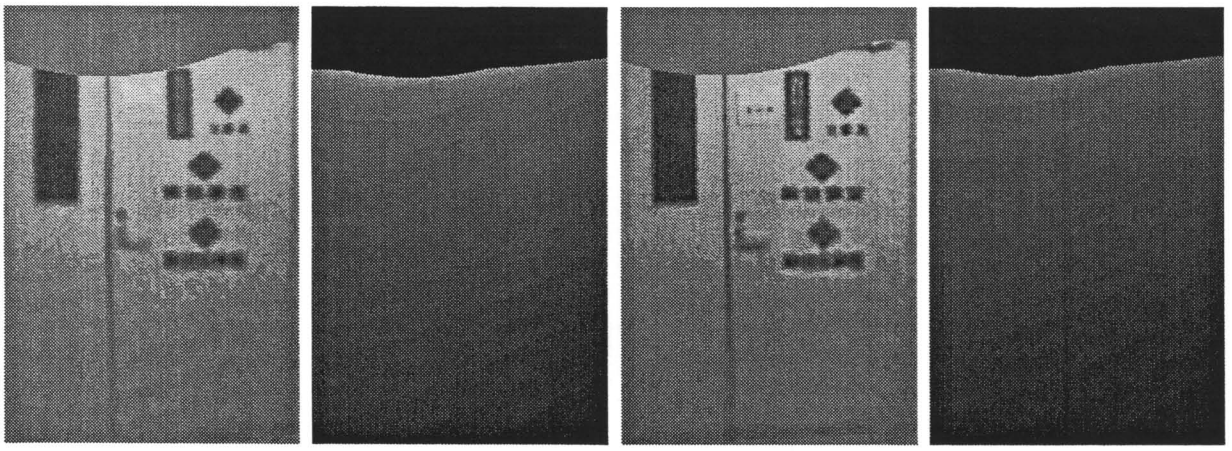
Frame 17



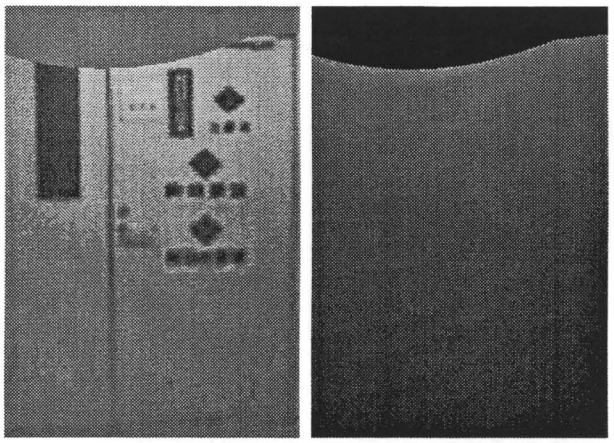
Frame 18 Frame 19



Frame 20 Frame 21



Frame 22 Frame 23



Frame 24