

博士学位論文

3次元空間における任意視点画像生成の  
ための光線情報取得に関する研究

2000年12月15日

指導教官 原島 博 教授

東京大学大学院工学系研究科  
電子情報工学専攻 77116

竹内 敬亮

# 目次

---

第 1 章 序論	1
1.1 本研究の背景と目的	2
1.2 本論文の構成	4
参考文献	6
第 2 章 光線による 3 次元空間情報の記述	7
2.1 はじめに	8
2.2 3 次元統合情報環境	8
2.2.1 3 次元画像の基礎技術	8
2.2.2 3 次元画像表示技術の動向	12
2.2.3 3 次元統合情報環境の構想	13
2.2.4 光線に基づく 3 次元情報の中立的な記述方式	14
2.3 3 次元 CG の研究動向	15
2.3.1 3 次元 CG の要素技術	15
2.3.2 Image-Based Rendering	15
2.3.3 Plenoptic Modeling	17
2.4 3 次元情報の光線情報表現に関する研究動向	17
2.4.1 光線の記述	17
2.4.2 光線情報の圧縮符号化	22
2.4.3 光線情報からの画像再構成	23
2.5 光線情報表現のための 3 次元空間情報の実写入力	24
2.5.1 実写による光線取得の必要性	24
2.5.2 多視点での 2 次元画像撮影と光線情報への変換	24
2.5.3 光線取得の具体例	27
2.5.4 各方式の比較	31
2.6 本章のまとめ	33
参考文献	33
第 3 章 距離画像からの光線情報の取得	36
3.1 はじめに	37
3.2 距離画像と光線情報	37
3.2.1 距離画像	37
3.2.2 3 次元形状計測の原理	37
3.2.3 本研究で用いるレンジファインダと距離画像	38
3.2.4 光線情報としての距離画像	38
3.3 距離画像の 4 次元光線情報への変換	40
3.3.1 4 次元情報空間への展開の手順	40

3.3.2	実験	41
3.4	光線情報の補間処理	43
3.4.1	補間処理の必要性	43
3.4.2	距離・色情報の線形内挿	44
3.4.3	4次元情報空間の2次元断面へのメディアンフィルタ処理	44
3.4.4	実験	45
3.5	光線記述を用いた距離画像の融合処理	46
3.5.1	複数の距離画像の統合	46
3.5.2	多眼画像と距離画像の融合	48
3.5.3	実験	49
3.6	本章のまとめ	54
	参考文献	54
第4章	3次元情報の光線記述における標本化の影響	55
4.1	はじめに	56
4.2	光線の標本化	56
4.2.1	光線の取得における標本化	56
4.2.2	各種3次元画像入力方式における光線標本化の具体例	56
4.2.3	光線の記述における標本化	60
4.3	4次元情報空間の離散化の影響	61
4.3.1	方向成分	62
4.3.2	位置成分	62
4.4	標本化の相違の影響	63
4.4.1	原画像の復元誤りのメカニズム	63
4.4.2	誤りの定式化	65
4.5	原画像情報を保存する光線標本化の検討	67
4.5.1	原画像情報を保存する条件	68
4.5.2	標本化の具体例(平面記録方式)	68
4.5.3	標本化の具体例(球面記録方式)	72
4.5.4	実験	77
4.5.5	まとめ	78
4.6	離散データ間の変換における光線の近似に関する検討	78
4.6.1	光線の近似法	78
4.6.2	各近似法によって生じる誤差	79
4.6.3	実験	82
4.6.4	まとめ	84
4.7	本章のまとめ	84
	参考文献	86
第5章	正投影像を利用した光線情報の直接的な取得	87
5.1	はじめに	88
5.2	光線の直接取得	88
5.3	テレセントリックレンズの原理とその性質	89
5.3.1	レンズ系における絞りの作用	89

5.3.2	テレセントリック光学系	91
5.4	テレセントリックレンズによる多視点撮影	93
5.4.1	正投影像と4次元光線情報の関係	93
5.4.2	光線情報の直接取得のための視点配置	94
5.5	テレセントリックレンズを用いた撮像実験	95
5.5.1	実験概要	95
5.5.2	撮影上の注意点	95
5.5.3	多方向からの正投影像の撮影	96
5.5.4	原点の較正	99
5.5.5	任意視点からの透視投影像の合成	99
5.6	本章のまとめ	101
	参考文献	101
第6章	テレセントリックレンズを用いた物体全周撮像システム	102
6.1	はじめに	103
6.2	テレセントリック撮像システム	103
6.2.1	設計指針	103
6.2.2	装置の構成	103
6.3	テレセントリックレンズ単体に対する評価	104
6.3.1	レンズの観察角の評価	104
6.3.2	レンズの歪みの評価	106
6.4	ターンテーブルとカメラの位置に関する評価	108
6.4.1	撮像系の誤差のモデル化	108
6.4.2	画像を用いた誤差の計算	109
6.4.3	回転軸の傾きの許容値	113
6.4.4	誤差の補正	113
6.5	実験	115
6.5.1	透視投影像と角度分解能	115
6.5.2	任意の視点からの透視投影像の合成	118
6.5.3	角度分解能の影響についての考察	118
6.5.4	レンズ歪みの補正	118
6.5.5	ターンテーブルとカメラの位置関係の誤差の補正	125
6.5.6	透視投影による多眼画像との比較	128
6.6	本章のまとめ	128
	参考文献	130
第7章	結論	131
7.1	本論文の主たる成果	132
7.2	今後の課題と展望	133
7.2.1	光線情報の取得について	133
7.2.2	提案手法により取得したデータの利用	134
	参考文献	135
付録A	テレセントリック撮像系の誤差計算式の導出	136



A.1 誤差の計算 . . . . .	136
A.1.1 回転軸の傾きの計算 . . . . .	136
A.1.2 回転軸のずれの計算 . . . . .	138
A.2 回転軸の傾きに伴う誤差の補正 . . . . .	139
A.2.1 光線の方向 . . . . .	139
A.2.2 正投影像の傾き . . . . .	141
付録 B 撮像系の誤差の許容値の算出 . . . . .	142
B.1 $P$ の誤差の上限値 . . . . .	142
B.2 $Q$ の誤差の上限値 . . . . .	143
B.3 回転軸の傾きの許容値 . . . . .	145
付録 C 誤差計算における位置成分の標本化の影響 . . . . .	146
C.1 標本化の影響 . . . . .	146
C.2 計算精度を保証するための条件 . . . . .	147
発表文献 . . . . .	150
謝辞 . . . . .	152

# 目次

---

1.1	本論文の構成	5
2.1	大レンズ法によるステレオ撮影	8
2.2	パララックス・バリア方式の原理 (2 眼の場合)	9
2.3	レンティキュラ方式の原理 (2 眼の場合)	10
2.4	レンティキュラ画像の撮影	10
2.5	インテグラルフォトグラフィ	11
2.6	ホログラムの記録方法	12
2.7	3 次元統合画像通信	14
2.8	光線のパラメータ化	18
2.9	Light Field や Lumigraph における光線記録方式	18
2.10	平面記録方式	20
2.11	光線が通過する平面上の位置 $(P, Q)$ と 3 次元空間内の位置 $(X, Y, Z)$ の幾何学的関係	20
2.12	球面記録方式	21
2.13	透視投影	25
2.14	平行投影	25
2.15	2 次元画像における画素の位置と光線の方向の関係	26
2.16	透視投影像の横幅 $w$ , 水平画角 $\delta$ , および画像面・ピンホール間の距離 $F$ の関係	26
2.17	Light Field データの取得のための撮像システム	28
2.18	移動単眼撮像系	29
2.19	カメラキャリブレーションのための撮影用ステージ	29
2.20	QTVR 撮像系	30
2.21	QTVR 撮像系により撮影された多眼画像からの任意視点画像の合成	30
2.22	16 眼カメラ	31
3.1	スリット光投影法による距離計測	38
3.2	レンジファインダの外観	39
3.3	レンジファインダにより得られるデータ	39
3.4	レンジファインダによる光線の標本化	40
3.5	異なる光線が基準面上の同一の点に記録される例	41
3.6	球面記録方式に基づいて取得した光線情報	42
3.7	図 3.6 の光線情報を用いて合成した画像の例	42
3.8	距離画像情報の 4 次元情報空間への展開	43
3.9	双一次補間	44
3.10	メディアンフィルタ	45
3.11	補間処理前後の $P\theta$ 平面および画像合成結果	47
3.12	穴の部分における補間の誤り	48

3.13 2つの光線情報の重ね合わせ	49
3.14 データ統合前の2つの距離画像から得た光線情報を用いて生成した画像	50
3.15 2つの距離画像を光線レベルで統合したデータから合成した画像	51
3.16 多眼撮影による風景画像の一部	51
3.17 風景画像を4次元情報空間( $P\theta$ 平面)にマッピングした結果	52
3.18 参照テーブルを用いて図3.17の光線情報を補間した結果	52
3.19 風景内に物体を配置した画像の合成結果	53
4.1 マトリックス型カメラ配置による光線の標本化	57
4.2 ウォークスルー型カメラ配置による光線の標本化	58
4.3 球面上にカメラを配置した多眼撮影による光線の標本化	59
4.4 レンジファインダによる光線の標本化	60
4.5 パラメータが離散的な値をとる4次元情報空間の2次元断面	61
4.6 カメラ配置(3次元格子点上に配置した場合)	63
4.7 カメラと基準面の配置	64
4.8 光線情報からの画像 $\hat{I}_{0,0,k}$ の再構成	64
4.9 多眼画像から平面記録方式に基づく光線情報への変換	66
4.10 $n$ と $Q_n$ の関係( $k_m = 5$ )	70
4.11 $Q_n$ を(4.51)式にて定めた場合の $PQ$ 平面における標本点の配置	71
4.12 カメラが $XZ$ 平面上に並ぶ場合の $PQ$ 平面上の標本点配置	73
4.13 $\hat{I}_{i,0,k}$ の復元結果	77
4.14 $P\theta$ 平面における各光線の位置関係	79
4.15 実空間における各光線の位置関係	80
4.16 隣接する画像どうしでの光線の間隔	81
4.17 透視投影像の撮影位置とカメラパラメータの関係	82
4.18 透視投影の多眼画像から生成した正投影像	84
4.19 手法1および手法2を用いて合成した画像	85
5.1 平面記録方式における $P$ 一定の光線群	89
5.2 球面記録方式における $P$ 一定の光線群	90
5.3 球面記録方式における $\theta$ 一定の光線群	90
5.4 物体側テレセントリック光学系	91
5.5 物体側テレセントリック系における結像面のずれの影響	92
5.6 像側テレセントリック光学系	92
5.7 両側テレセントリック光学系	92
5.8 正投影像と光線との関係	93
5.9 光軸が常に1点を向くカメラ配置とそれにより得られる正投影像	94
5.10 テレセントリックレンズにより方向 $(\theta, \phi)$ の光線を取得する方法	95
5.11 多方向の正投影像の撮影	96
5.12 立方体の正投影像	97
5.13 鉢植えの正投影像	98
5.14 原点の較正に必要な点	99
5.15 立方体の正投影像(原画像)と透視投影像(合成結果)	100
5.16 鉢植えの透視投影像の合成結果	100

6.1 撮像系の模式図 . . . . .	104
6.2 撮像系の外観写真 . . . . .	105
6.3 カメラとテスト用物体の配置 . . . . .	106
6.4 図 6.3 の状態でのテスト用物体の写り方 . . . . .	106
6.5 テレセントリックレンズによりテスト用物体を撮影した画像 ( $d_1 = 20\text{cm}$ , $d_2 = 5\text{cm}$ ) . . . . .	107
6.6 レンズの歪曲収差 . . . . .	107
6.7 歪曲収差の例 . . . . .	108
6.8 ターンテーブルとカメラの位置関係 . . . . .	110
6.9 ターンテーブルとカメラの位置関係の誤差の計算のための画像撮影 . . . . .	111
6.10 ターンテーブル A の回転角 $\Delta\theta$ と点の移動量 $\Delta P$ の関係 (A を真上から見た図) . . . . .	115
6.11 透視投影像の横幅 $w$ , 画角 $\delta$ と $\Delta\theta_m$ との関係 . . . . .	116
6.12 $\Delta\theta_m = \Delta\theta_a$ のときの透視投影像の横幅 $w$ と水平画角 $\delta$ の関係 . . . . .	117
6.13 立方体の正投影像 . . . . .	119
6.14 人形の正投影像 (図 6.13 と同じ位置で撮影) . . . . .	120
6.15 鉢植えの正投影像 (図 6.13 と同じ位置で撮影) . . . . .	121
6.16 立方体の透視投影像 (図 6.13 の正投影像群を用いて合成) . . . . .	122
6.17 人形の透視投影像 (図 6.14 の正投影像群を用いて合成) . . . . .	123
6.18 鉢植えの透視投影像 (図 6.15 の正投影像群を用いて合成) . . . . .	124
6.19 角度分解能の異なる 2 種類の正投影像群を用いて合成した透視投影像の比較 . . . . .	124
6.20 テレセントリックレンズの歪み . . . . .	125
6.21 レンズ歪みを補正しない場合の透視投影像 . . . . .	126
6.22 レンズ歪みを補正した場合の透視投影像 . . . . .	126
6.23 ターンテーブルの回転軸が傾いているときの原画像 . . . . .	127
6.24 図 6.23 の正投影像を用いて合成した透視投影像 . . . . .	128
6.25 透視投影像から得た光線情報を用いて合成した画像と正投影像を用いて合成した画像 . . . . .	129

## 第1章

---

## 序論

## 1.1 本研究の背景と目的

「百聞は一見に如かず」という諺が示すように、視覚は、人間の直感に訴えるという点で、文字や音声に比べて極めて有力な情報伝達手段である。視覚に訴えるメディアは、絵画→写真(静止実写画像の記録)→映画(動画像の記録)→テレビ(画像の伝送)という発展を遂げてきた。さらに近年では、JPEGやMPEGなど、画像符号化方式の標準化が進み、画像がコンピュータでの取扱いに便利なデジタル情報としてやりとりされるようになった。このデジタル画像は、西暦2000年に入り、デジタルスチルカメラやDVDビデオの急速な普及、デジタル録画機の登場、BSデジタル放送の開始などもあって、我々にとってますます身近なものになりつつある。

ところで、視覚メディアに関連する技術の歴史の中には、より本物に近い品質の実現への挑戦という流れが存在している。例えば絵画では、写実性の高い作画法として遠近法が登場した。写真術の発明以降は、画質を向上するための技術が数多く開発された。今日、静止画では、従来からの銀塩写真は技術的にはほぼ成熟しているが、デジタル画像の世界では、デジタルカメラの画素数の向上や写真並みの品質が得られるプリンタなど、依然として画質向上への取り組みが続けられている。動画では、ハイビジョンの研究、開発がかねてから行なわれ、BSデジタル放送の開始によって一般に普及しようとしている。

以上はいずれも2次元画像に関する話題であるが、さらに本物に近づき、あたかも「その場に居合わせている」あるいは「目の前に物体がある」かのような感覚を引き起こすためには、2次元画像では不十分であり、観察者に対して立体感を与えることが求められる。この立体感を伴う視覚情報が、広い意味での3次元画像である。

このため、次世代の視覚メディアとして、3次元画像に対する期待は大きい。現状では、表示技術の確立や、膨大な情報の扱いなど、解決すべき様々な課題が残されている。その中の一つに、表示すべき3次元画像を如何にして用意するか、という問題が挙げられる。

3次元画像はもともと、写真技術をベースとして発展してきた。その過程で様々な方式が発明されてきたが、いずれの方式も、写真という一度記録された情報の加工や書き換えができない媒体を利用するため、入力と出力が密接に結び付いたものであった。しかし近年では、電子的に書き換え可能な表示媒体に関する技術の発展と、画像情報をデジタル信号として処理する技術の確立に伴い、入力方式と出力方式の結び付きは必然的なものではなくなりつつある。このような技術動向を踏まえ、用意すべき3次元画像データに求められる条件を考えると、以下のようなものが挙げられる。

- 実写画像とCG画像を区別なく扱えること

コンピュータグラフィックス(CG)による3次元画像の生成は、「3次元画像を如何にして用意するか」という問題に対する一つの解である。しかし、その表現能力には限界があり、また高品質な画像を得るには、データ入力に膨大な労力を費やす必要がある。これに対し、より高い臨場感や質感の表現のため、実写画像を積極的に利用する動きが盛んになりつつある。

例えば、仮想現実感(Virtual Reality; VR)の分野では「複合現実感」と総称される技術が注目されている[1]。これは、現実世界と仮想世界を融合することにより、従来のCGベースで構築された仮想空間における写実性や臨場感の限界を打破しようとするアプローチである。

このような状況においては、実写画像とCG画像とを区別することなく扱うことができるような形式のデータが必要となる。

- 特定のディスプレイ方式に依存しないこと

高い臨場感を実現する上では、立体感や広い視野角の呈示が効果的である。立体感については、古くから様々な光学原理に基づく3次元画像が試みられており、現在研究が進められている3次元表示技術も、基本的には従来からの3次元画像技術を踏襲したものである[2, 4]。また、広視野角の表示については、ヘッドマウントディスプレイや没入型ディスプレイなど、単一の平面ではない様々

な形状のディスプレイが登場している [3, 4]。

このように、一口に高臨場感ディスプレイと言っても、その表示原理や形状は多種多様である。また、それらは目的・用途に応じて使い分けられており、この状況は将来にわたって続くことが予想される。したがって、3次元画像は、特定の表示原理やディスプレイ形状に依存しない形式であることが望ましいと考えられる。

- 矛盾のない立体視が可能なおこと

立体画像では、撮影条件と観察条件の設定が不適切な場合、箱庭効果や書き割り効果など、大きさや奥行き感が歪んで知覚されることが古くから知られている。また、このような歪みが発生しないための撮影および観察条件(無歪み条件)が、幾何学的計算により求められるとともに、その主観評価も行なわれている [5]。しかし、無歪み条件を全て満たすためには、観察者の位置や視線方向などを一定に保つ必要があり、その実現は非常に困難である。

これに対し、視点位置や視線方向の変化に追従して、そのときの正しい見え方を表示することができれば、観察者は、観察条件の制約を受けることなく、正しい立体視が可能になると考えられる。

このうち、特定のディスプレイ方式に依存しないという性質が、3次元画像の伝送・通信を検討する過程で重要になってきた。このような背景から、3次元画像情報を特定の入出力方式に依存しない形式で伝送する「3次元統合画像通信」の概念が提案された [6]。この概念は、通信にとどまらず広い意味で3次元空間情報を統一的に扱う「3次元統合情報環境」へと発展している [7]。さらに、3次元統合情報環境の実現に向けて必要となる、3次元画像情報の中立的な記述形式として、3次元情報を光線の集合として扱う手法が提案されている。

光線を用いて3次元空間情報を記述する手法は、対象の幾何形状が未知であっても、新たな視点の画像を生成し、視点移動の自由度を高めることを可能にしている。そのため、幾何形状情報の取得が困難な、実在の対象を扱う上で有効である。また、対象から発せられる全ての光線を記録しておけば、任意のディスプレイで任意の位置から対象を見たときの画像を合成することができる。これにより、特定のディスプレイ方式に依存せずに矛盾のない立体視が実現できるほか、立体視機能のないディスプレイ上で視点移動に応じて見え方が変化する、いわば擬似的な3次元表示にも対応可能である。

このように、3次元空間における光線を記録したデータは、上に挙げた3次元画像に求められる条件を全て満たすものである。本論文では、この点に着目し、3次元情報を光線の集合として記述する立場から議論を進めていく。この枠組みにおいては、「如何にして3次元画像を撮影するか」という問題は、「3次元空間の記述に必要な光線を如何にして取得するか」と捉え直すことができる。

ところで、3次元空間情報を光線の集まりとして扱う手法は、あらゆる方式の3次元画像入力手段によって得られるデータを統一的に扱うことを可能にしたが、見方を変えると、3次元画像入力方式のさらなる多様化をもたらしているとも言える。その一方で、現状では、光線の集合のデータ(以下、「光線情報」と呼ぶ)の符号化や補間、高速な画像生成処理など、解決すべき課題が多く残されており、それらの研究の発展のためには、性能評価用の標準となるデータが必要である。そして、そのようなデータを得るための標準的な光線情報取得技術の確立が望まれる。

ここで、標準的な光線情報が満たすべき条件について考える。符号化など何らかの処理の性能を公正に評価するためには、その処理以外に劣化の要因を含まないことが望ましい。例えば2次元画像の符号化の場合には、単純に元の画像と比較し、SNRなどの客観的な指標を用いて評価することができる。しかし、光線情報の場合、そのまま利用されることはなく、ディスプレイ方式や視点位置に応じて、適切な画像を合成して表示するという利用形態を前提とする。そのため、標準データとして利用するためには、光線が誤差なく取得され、かつ画像生成処理の過程での誤差も生じないことが要求される。本論文では、このような条件を満たす光線情報を取得するためのデータ入力手段の確立を目的としている。

## 1.2 本論文の構成

本論文の構成は次の通りである。

- 第1章 序論
- 第2章 光線による3次元空間情報の記述
- 第3章 距離画像からの光線情報の取得
- 第4章 3次元情報の光線記述における標本化の影響
- 第5章 正投影像を利用した光線情報の直接的な取得
- 第6章 テレセントリックレンズを用いた物体全周撮像システム
- 第7章 結論

また、各章の関係は図1.1のようになっている。本論文の流れを簡単に説明すると以下の通りである。

第2章では、3次元情報を光線の集合として表現する考え方について概観する。具体的にはまず、現状の3次元画像入出力技術および3次元CG技術について触れ、光線情報表現の概念が提唱されるに至った背景を明らかにする。次いで、光線情報表現の枠組みで現在までに行なわれてきた研究について、光線の取得、記述、符号化、画像生成の4つの要素技術に分けてその動向を概観する。その中でも特に、既存の様々な実写ベースの光線取得の手法(具体的には多視点での2次元画像撮影)を取り上げ、各方式の比較を行なう。

第3章では、多視点撮影以外で広く用いられる3次元入力手段として、3次元形状計測装置(レンジファインダ)に注目し、この装置により得られるデータ(距離画像)を光線の集まりとして記録する方法について述べる。距離画像は、通常の2次元カラー画像とは異なる点が多く、距離画像に特有の処理が必要になる場合もあるため、それについても論じる。さらに、距離画像を光線の集まりとして表現したデータの応用例として、複数の距離画像や異種の3次元画像情報との融合についても紹介する。

第4章では、3次元画像情報の入力が、3次元空間内の光線の標本化に相当するという立場から、第2章および3章で述べた入力手段を用いたときに、どのような光線が標本値として得られるかを明らかにする。また、計算機での利用のために4次元情報空間を離散的なデータ空間とし、これに各種入力手段によって得られたデータを展開した場合の影響について論じる。特に、多数の視点で撮影された画像を離散的な4次元情報空間に展開したときに、異なる視点で撮影された画像どうしの貼り合わせ効果が生じ、原画像を撮影したのと同じ視点位置であっても正しい見え方が再現できない場合があることを説明する。さらに、この問題を回避することを目的として、4次元情報空間の離散化の指針や、入力された画像情報を4次元情報空間に展開する際の光線の近似法についても検討する。

第5章では、第4章で論じた、原情報と4次元情報空間とのデータ構造の相違の問題の解決を目的として、光線情報を離散的な4次元情報空間のデータ配置のままの形で直接取得する手段について検討を行なう。特に、全方向の情報を記述するための光線情報の直接取得法を提案する。具体的には、4次元情報空間に記録される光線情報が、被写体の正投影像の集合としての性質を有することに着目し、正投影像が撮影できるテレセントリックレンズを利用した多視点撮影について検討する。また、実験によりその有効性を検証する。

第6章では、第5章の結果を踏まえ、テレセントリックレンズを利用し、光線情報を正投影像の形で、かつ高い解像度で取得することを目的として開発した撮像装置について述べる。ここでいう「高い解像度」とは、先に述べた「標準データ」として利用可能であるための条件を満たすような解像度を意味する。また、テレセントリックレンズの光学的な誤差や、実際の撮像系の製作工程で生じる設計仕様との誤差についても取り上げ、その補正方法も紹介する。

第7章では、本論文の主たる成果をまとめるとともに、今後の課題や展望についても触れ、本論文全体の結論とする。



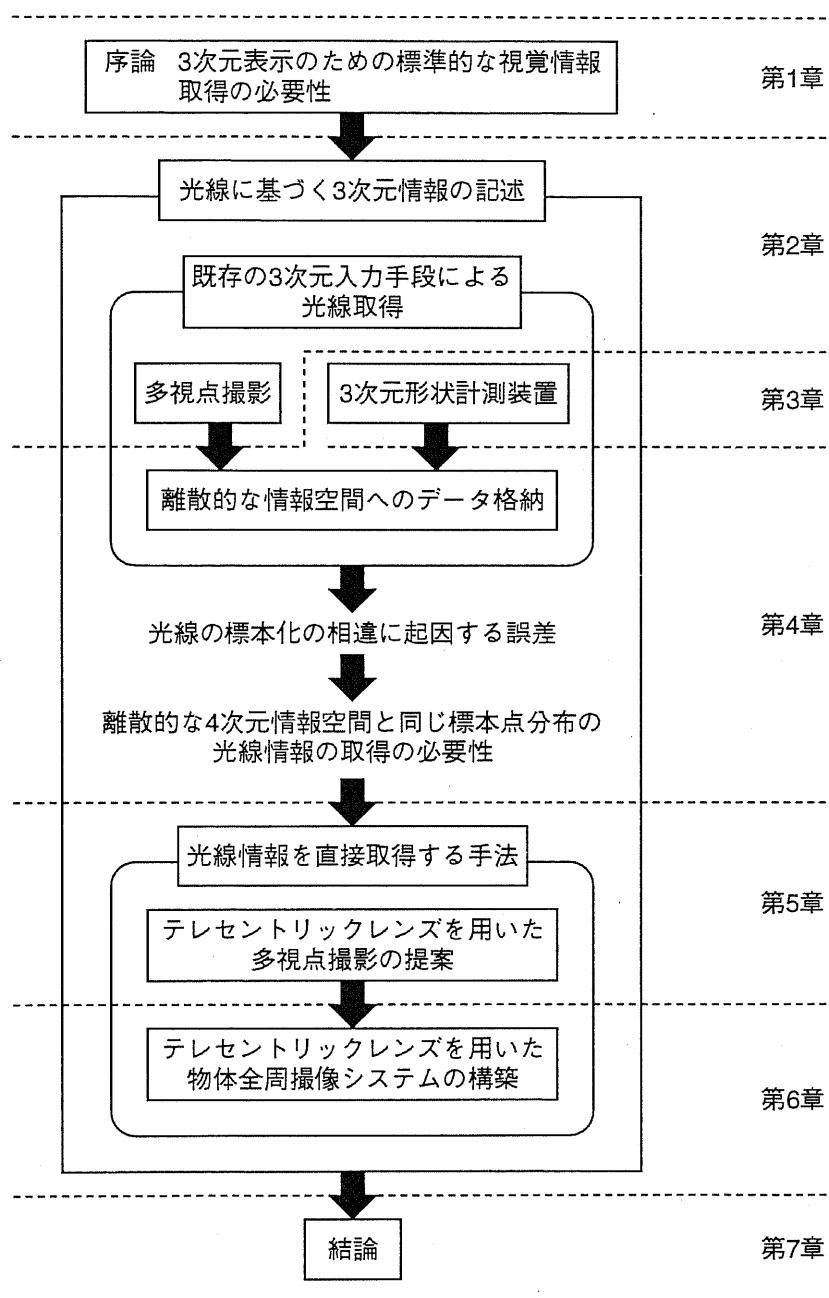


図 1.1: 本論文の構成

## 参考文献

- [1] 田村秀行, 大田友一: “複合現実感”, 映像情報メディア学会誌, Vol.52, No.3, pp.266-272 (1998).
- [2] 磯野春雄: “3次元画像ディスプレイ”, 電子情報通信学会誌, Vol.78, No.7, pp.694-698 (1995).
- [3] 廣瀬通孝: “バーチャルリアリティ用ディスプレイ”, 電子情報通信学会誌, Vol.78, No.7, pp.699-704 (1995).
- [4] “小特集 現実世界のリアリティを目指す高臨場感ディスプレイ”, 映像情報メディア学会誌, Vol.52, No.7, pp.903-928 (1998).
- [5] 山之上裕一, 永山 克, 尾藤峯夫, 棚田 詢: “立体ハイビジョンにおける無ひずみ撮像・観察条件”, 映像情報メディア学会誌, Vol.52, No.3, pp.377-383 (1998).
- [6] 原島 博, 藤井俊彰, 苗村 健: “三次元統合画像通信の構想”, 電子情報通信学会技術研究報告, HC92-58 (1993).
- [7] 苗村 健: “光線記述に基づく空間符号化と空間共有メディアに関する研究”, 東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻博士論文 (1996).

## 第2章

---

# 光線による3次元空間情報の記述

## 2.1 はじめに

本研究は、3次元空間情報を光線の集合として表現する立場から議論を進めていく。そこで本章では、「光線情報表現」の技術的背景ならびに現在の研究動向について概観する。

具体的には、まず、3次元画像入出力技術および3次元CG技術について紹介し、光線情報表現の概念が登場するに至った経緯を明らかにする。次いで、光線情報表現の要素技術として、光線の取得、光線の記述、圧縮・符号化、光線からの画像生成に関する技術の動向を紹介する。

## 2.2 3次元統合情報環境

### 2.2.1 3次元画像の基礎技術

#### ステレオ画像

最も容易に立体視を実現できるのは、両眼に異なる2次元画像を呈示するステレオ表示方式で、その起源は1600年頃の立体作画(左右が見るべき2枚の細密画を並べて描く技術)まで遡ると言われる。ステレオ表示に用いる左右の画像を撮影する場合、容易に考え付く方法としては、

- 2台のカメラを並べて同一の被写体を同時に2方向から撮影する。
- 1台のカメラを横に移動して2方向から撮影する。

が挙げられる。後者は、対象が静止している場合にのみ有効である。

また過去には、図2.1に示すように、被写体から出た光線を、直径75mm以上の大口径レンズとスリット面を通して、左右の画像を得る方式も考案された[2]。これは、人間の両眼間隔(平均65mm)より大きな口径のレンズが、単眼で立体像再生に十分な情報を収集し得ることに着目したものである。

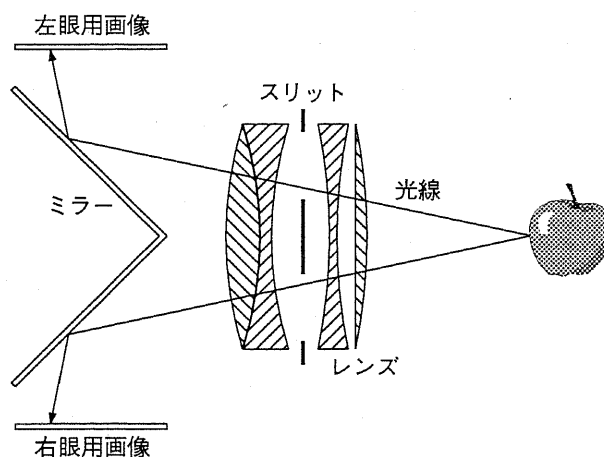


図 2.1: 大レンズ法によるステレオ撮影

ステレオ立体視の方法としては、古くは様々な立体鏡が用いられたが、現在では偏光フィルタや時分割液晶シャッターなどの特殊メガネが広く用いられている。特殊メガネ方式は、左右の画像を分離して呈示する仕組みさえあれば、通常の2次元ディスプレイを利用できるため、大画面化、高解像度化、動画表示、多人数観察を容易に実現することができる。しかし、観察者にとっては、メガネを装着することで生じる疲労感が問題となる。

### パララックス・バリア方式

縦格子状のアパーチャ(AG)の背後に、多眼画像を縦縞状に分割して配置し、これをアパーチャを通して見ることにより、各視差に対応する画像が分離され、3次元画像表示が可能となる。

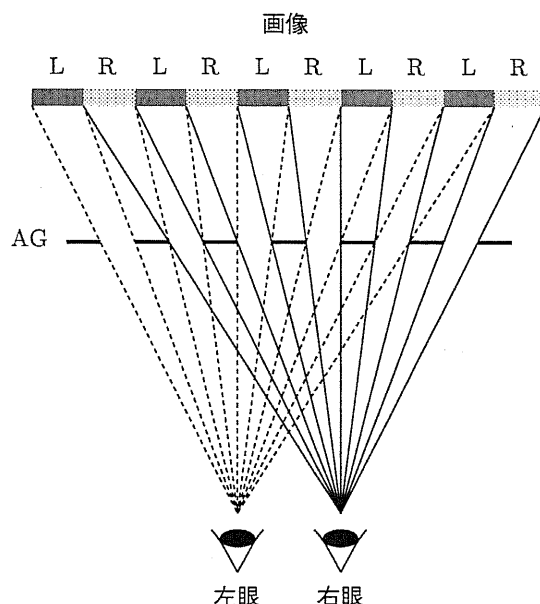


図 2.2: パララックス・バリア方式の原理 (2眼の場合)

図 2.2 は 2 眼式 (パララックス・ステレオグラム) の原理を模式的に示したものである。この方式では、左右両眼立体の情報しか記録されておらず、視点位置が制限されるという問題がある。

これに対し、アパーチャの開口率を下げ、代わりに画像面に複数の視差に対応した画像を配置することにより、任意視点からの 3 次元画像の観測が可能となる。これはパララックス・パノラマグラムと呼ばれる。なお、パララックス・パノラマグラムの撮影方法は、次項のレンティキュラ方式と同じであるため、詳細はそこで述べる。

パララックス・バリア方式では、バリアが目障りになり、これを回避しようとする回折により指向性に広がりを生じる点、およびバリアにより光量が不足する点が欠点として挙げられる。このため、しばらくは実用的な技術として用いられることがなかったが、近年では後述のようにメガネなし 3 次元動画ディスプレイに応用した例も見られる。

### レンティキュラ方式

図 2.3 に示すように、カマボコ状の半円筒レンズを配列したレンティキュラレンズ板の焦点面に、多眼画像を縦縞状に分割して配置し、これをレンズ板を通して見ることにより、各視差に対応する画像が分離され、視点に応じて見え方が変わる画像が観察される。

最も理想的なレンティキュラ画像は、図 2.4(a) のように、レンティキュラ板を重ねた乾板を収めたカメラを横方向に動かし、異なる方向からの画像を順次記録していくことにより得られる。ただし、この方法は取り扱いが難しいため、実際には多数のカメラ (または可動式のカメラ 1 台) を用いて  $N$  方向から見た平面画像を撮影し、これらをカメラと同じ配置の  $N$  台のプロジェクタで投射して生じる 3 次元画像を乾板に焼き付ける方法がとられる (図 2.4(b) を参照)。

レンティキュラ方式では、動画再生、カラー化は容易に実現できるが、大画面化に関しては、大型のレ

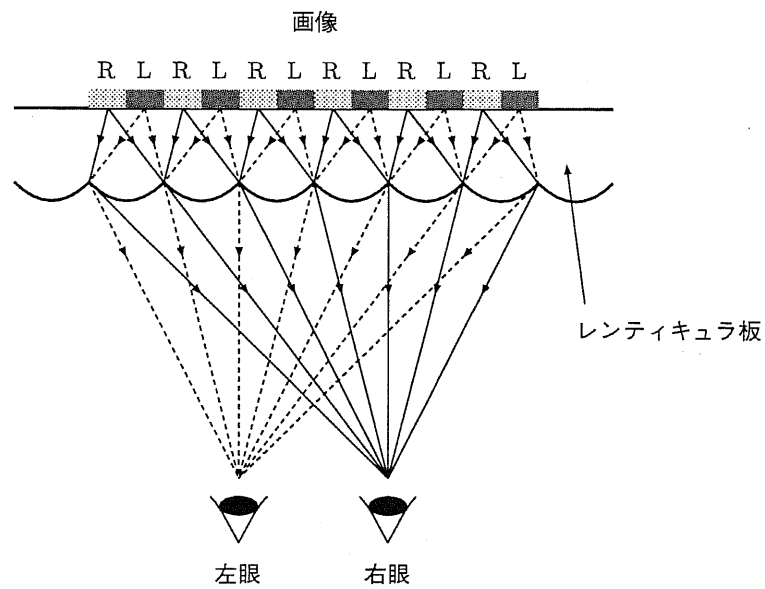


図 2.3: レンティキュラ方式の原理 (2 眼の場合)

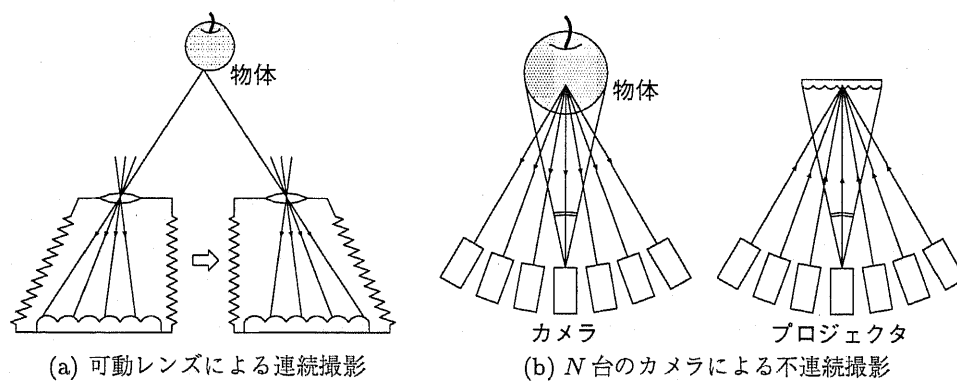


図 2.4: レンティキュラ画像の撮影

ンティキュラ板の製造が課題となるため、主として立体写真やコンピュータ用ディスプレイなどに用いられている。この方式の欠点としては、光線を一定の位置に集めるため、立体視可能な視点位置や人数が制限されることが挙げられる。

### インテグラルフォトグラフィ

レンティキュラ板のカマボコ状レンズの代わりに、2次元平面上に微小なレンズを並べた「ハエの目レンズ」を用いて、縦方向の視差も再現できるようにした表示方式がインテグラルフォトグラフィ(IP)である。簡単に言えば、レンティキュラ方式は縦ラインの見え方が観察位置によって変化するのに対し、IPでは1点の見え方が観察位置によって変化することになる。

IPは、ハエの目レンズの焦点面に写真乾板を置いて、多数の方向から眺めた被写体の微小な倒立像を結像させ、これを現像し写真に焼き付けて作成する(図2.5参照)。再生時にはこれを正確にもとの位置に置き、背面から白色拡散光で照明することにより、もとの被写体の位置に3次元の実像を生じる。

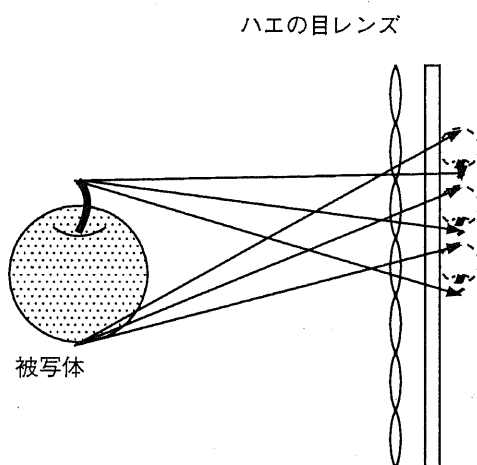


図2.5: インテグラルフォトグラフィ

ただし、上記のような撮影を行なうと、被写体のハエの目レンズを向いた面を裏から見ることになるため、再生像の凹凸が実物とは逆になる(偽像)。そこで、IPから得た裏返しの実像をもう一度IPに撮影し、正しい凹凸の再生像を得る。この手順は二度手間のようにも見えるが、2回目の撮影で陰画から陽画への反転も同時に行なえるため、ハエの目レンズと陽画の正確な位置合わせの手間を省ける利点がある。

### ホログラフィ

上記の各種多眼式3次元画像は、ある点をいくつかの方向から見たときの明るさ、すなわち光線の振幅情報を記録したものである。これに対し、光線の振幅情報と位相情報を、入射光の干渉縞として記録するのがホログラフィである。

撮影時には、図2.6に示すように、空間的・時間的に位相の揃った光線(コヒーレント光)を物体表面に照射し、参照光(コヒーレント光)との干渉パターン(ホログラム)を写真乾板に記録する。このようにして記録されたホログラムに、記録時と同じ参照光の位置からレーザー光を照射し、ホログラムの裏側から観察すると、物体光の波面を再現できるため、元の位置に物体が再現される。

ホログラフィは、レンティキュラ方式やインテグラルフォトグラフィなどのような多眼式3次元表示とは異なり、焦点調節を含めた完全な立体像を再生できるというメリットがある。しかし、情報量が膨大になること、解像度や像サイズが十分でないことが問題となる。

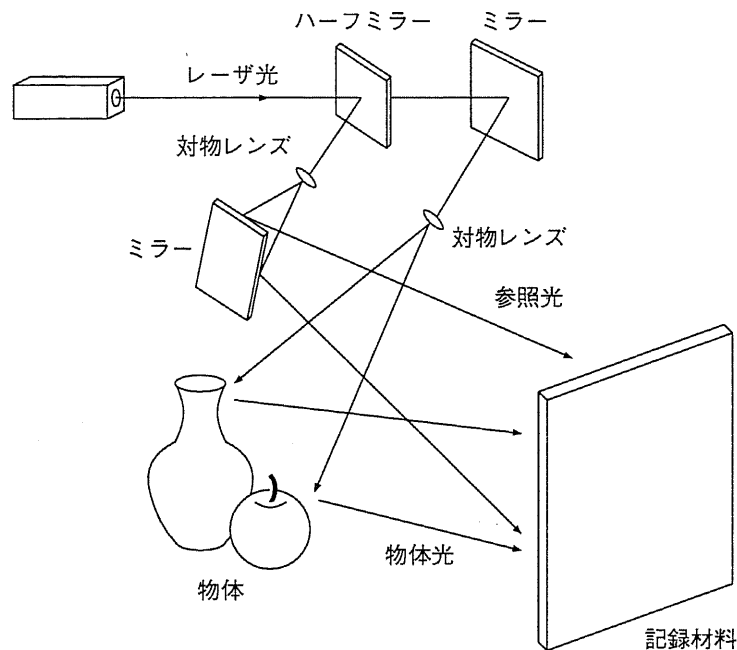


図 2.6: ホログラムの記録方法

### 2.2.2 3次元画像表示技術の動向

次に、前節に述べた技術に基づく3次元ディスプレイの最近の動向について紹介する。

#### メガネなし動画表示立体ディスプレイ

特殊メガネを用いるステレオ立体視では、メガネ着用に伴う疲労感が問題となることから、メガネを用いずに動画の立体視が可能なディスプレイの研究が進められている。中でも、液晶ディスプレイと、パララックス・バリア方式[3]もしくはレンチキュラ方式[4]との組み合わせによって立体表示を行なうディスプレイは、商品化もしくはそれに近い段階にある。

また、IPの原理に基づき、写真乾板をHDTVカメラと液晶ディスプレイに置き換えることで、立体動画を実時間で撮影、表示する試みも見られる[5]。この方式は、IPを用いることで、縦方向視差も再現できるため、寝ながらの立体視も可能という特徴を有する。また、光ファイバをレンズとして利用することにより、偽像の問題と要素画像間のクロストークの問題を同時に解決している。

#### 輻輳と焦点調節の矛盾がないディスプレイ

多眼式3次元表示では、輻輳と焦点調節に矛盾を生じることが問題であり、そのため、調節まで再現できるホログラフィが理想的な3次元画像とされてきた。これに対し、近年では、ホログラフィを用いずに、輻輳と焦点調節の矛盾がない立体視を実現する試みも見られる。

具体的には、レンズまたは表示面を可動式として、注視点の奥行き位置に虚像を移動させる方式[6]や、マクスウェル光学系によって焦点深度を大きくとり、水晶体の厚さによらず網膜に結像させる方式[7]などが、HMDにおけるステレオ表示用に提案されている。また、据置型ディスプレイ用としては、HMDと同様に注視点に応じて虚像位置を移動させる方式[8]の他、人間の眼より細かい間隔で視差像を呈示する超多眼表示[9]、微小開口を高速にスキャンし、細く絞った光線により結像させる光線再現方式[10]が提案されている。



### ホログラフィ

ホログラフィの膨大な情報量を削減するための手法として、多視点からの2次元画像を用いてホログラムパターンを合成し、両眼視差によって立体像を観察する、ホログラフィック・ステレオグラムが考案されている。また、ホログラムを円筒面上に表示し、全周方向で立体視を実現するマルチプレックス・ホログラムなど、ホログラフィック・ステレオグラムによる平面型以外のディスプレイの開発も行なわれている[11]。

また、ホログラフィでは、動画像やカラー画像の再生が大きな課題であり、これに関する研究が現在盛んに進められている。動画再生に関しては、感光材料の代わりに、液晶ディスプレイ[12]や音響光学変調器[13]など、リアルタイムで書換えが可能な素子にホログラムパターンを表示することによって実現されている。カラー像の再生には、RGB3色のレーザを必要としてきた[14]が、光学系が複雑になることから、白色光源によるカラー像再生も検討されている[15]。

### まとめ

本節で紹介した3次元ディスプレイの各方式の比較を表2.1にまとめる。なお、表中の多眼方式とは、レンティキュラやバララックス・バリアなどを用いて、水平方向にのみ3眼以上の視差を呈示するものを指し、インテグラルフォトグラフィは含まない。

表 2.1: 各種3次元ディスプレイ方式の比較

	ステレオ方式	多眼方式	IP	ホログラフィ
特殊メガネ	必要	不要	不要	不要
動画再生	○	○	△	△
フルカラー化	○	○	○	△
大画面化	○	△	△	×
高解像度化	○	○	△	△
焦点調節	×	×	×	○
視点位置制限	あり	あり	なし	なし

このように、3次元画像表示技術は、現在のところ様々な方式のものが提案されているが、いずれも、大画面化や高解像度化、動画表示、カラー化、多人数での観察、自由度の高い視点移動など、通常の2次元ディスプレイで実現されていることを全て満足するには至っていない。そのため、決定版といえる方式がまだ存在していないのが現状である。

### 2.2.3 3次元統合情報環境の構想

上記にて概観したような現状では、少なくとも近未来において、特定の一つの方式が主流になるのではなく、いくつかの方式が並立し、用途に応じて使い分けられると予想される。したがって、3次元画像通信システムの構築にあたっては、複数の方式の共存を前提とすべきである。

また、3次元情報の入力方式や蓄積形態に関しても、現状では表示方式への依存が強いと言える。例えば、多眼カメラによる撮影は、レンティキュラ式などの多眼ディスプレイへの表示のために利用されることが多く、ホログラム像として記録された情報は、ホログラフィによる表示にしか利用されていない。しかし、写真乾板のような書き換え不可能な記録媒体に代わり、デジタル情報として計算機内で処理されるようになったことで、これらの依存関係の必然性はなくなりつつある。むしろ、同じ被写体であれば本

質的に同じはずの情報を、個々の表示方式に応じて別々に入力し蓄積していたのでは、データ量の点でも撮影の手間という点でも非効率的であると考えられる。

以上のような背景から、将来あるべき3次元画像通信の形態として、「3次元統合画像通信」の概念が提唱されている[16]。これは、全ての入出力方式に共通の、中間的な3次元情報の記述を導入することにより、入力・表示を独立に規定できることを目指すものである。

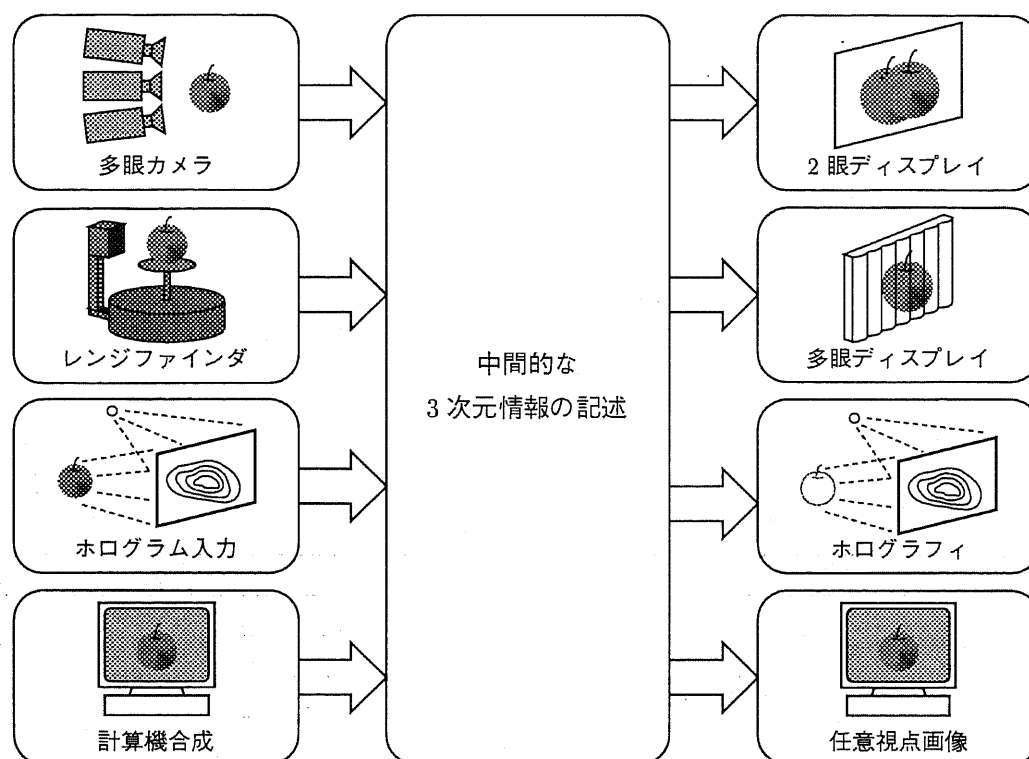


図 2.7: 3次元統合画像通信

3次元情報を特定の入出力方式に依存しない形で記述することの利点は、単に入力・表示方式の相互変換に留まらない。例えば、ホログラム入力や一部のレンジファインダは、その原理上、風景のような無限の範囲にわたるものには適さない。そのため、これらの入力手段の利用範囲は、専ら物体の入力に限られており、従来のような入出力方式に依存したフォーマットでは、物体を限られた数だけ表示するといったアプリケーションにしか利用できない。

しかし、これらの手段を用いて入力した3次元画像を中間的な形式のデータに変換することにより、他の3次元画像との融合が可能となる。そのため、レンジファインダやホログラムにより入力したオブジェクトを実写多眼画像の風景の中に配置することも容易に実現でき、3次元入力装置の利用範囲が一層広がると考えられる。

## 2.2.4 光線に基づく3次元情報の中立的な記述方式

3次元統合画像通信の実現のためには、3次元的な視覚情報の中間的な記述手法が不可欠となる。そこで、3次元的な視覚情報の本質について考えてみる。

現代の視覚心理学によれば、人間は、両眼視差（左右の像がずれて見える現象）、輻輳（両眼の視線がなす交角を一定にする働き）、調節（水晶体の焦点を合わせる働き）などの要因によって3次元を知覚する。それらの要因に働きかける視覚情報は、観察対象が3次元構造を有し、その構造に基づいて発せられた光線

が人間の両眼に到達することによって与えられる。

よって、いかなる入出力方式であっても、人間の眼に到達する光線が正しく記録され、また正しく呈示することができれば、人間は3次元情報を知覚することができることになる。すなわち、3次元的な視覚情報の中間的な記述方式として、光線を用いた表現が有効である。なお、光線を具体的にどのようにして記述するかについての詳細は、2.4.1節にて説明する。

## 2.3 3次元CGの研究動向

近年の3次元CG技術の発展は目覚ましいものがあり、かつては高価なワークステーションを用いなければ実現できなかったような3次元CGが、現在では家庭用ゲーム機で実現可能となっている。このようなCG技術の普及に伴い、その品質に対する要求はさらに高まりつつある。そこで本節では、高い写実性を実現するためのCG技術の動向について概観する。

### 2.3.1 3次元CGの要素技術

3次元CGは、描画対象の幾何形状モデルを計算機に入力し(モデリング)、これと視点位置や視線方向などから画像を合成する(レンダリング)という2つのプロセスからなる。

#### モデリング

3次元CGでは、描画対象をコンピュータで処理するための幾何形状表現をモデルと呼び、このモデルを構築する作業がモデリングである。

最も広く用いられるのは、3次元形状を多数の三角形の平面パッチにより近似したポリゴンモデルである。しかし、曲面を滑らかに描くためには、膨大なポリゴンが必要になる。その他には、NURBS曲面など、有限個の点から何らかの数式に従って生成される曲面を用いた例も見られる。

#### レンダリング

コンピュータ内に構築したモデルから、最終的な画像を生成するプロセスがレンダリングであり、基本的には以下の3つの処理からなる。

- 2次元平面への投影  
まず視点位置に応じて対象に平行移動や回転を施し(モデリング変換)、次いで2次元平面への投影処理を行なう(投影変換)。2次元への投影は通常、透視投影(2.5.2節を参照)が用いられる。
- 表面模様の貼り付け(テクスチャマッピング)  
表面模様を2次元画像の形で用意し、これをモデルに貼り付ける。表面に凹凸をつける処理も、同様に于行なうことができる(バンプマッピング)。
- 陰影処理(シェーディング)  
光源と立体表面の法線との関係から、面の明るさを求める。さらに、写実性を高めるために、拡散反射や鏡面反射などの局所的な反射特性モデル、あるいは光の相互反射を扱うレイトレーシング法やラジオシティ法などが用いられる。

### 2.3.2 Image-Based Rendering

上述のような幾何形状モデルを用いた手法により、写実性の高い3次元CGを合成しようとした場合、以下に挙げる2つの大きな問題点が内在する。

- モデリングの困難さ、表現能力の限界
- レンダリングの計算量

モデリングに関しては、距離計測やコンピュータビジョン (CV) 技術による自動化の試みがなされているものの、現状では、特に複雑な形状に対しては、人がある程度の操作を加える必要がある。また、人の髪の毛など、形状モデルによる表現が困難な対象も存在する。さらに、画像の品質を上げるために複雑なモデルを用いると、それに伴ってレンダリングの計算量が膨大なものになる。

以上のような幾何形状モデルを用いた手法の限界を打破する手法として、Image-Based Rendering (IBR) と呼ばれる手法が注目されている。これは、幾何形状モデルを用いずに、予め撮影した多数の画像の貼り合わせや変形などの処理により、新たな画像を生成する手法である。IBR で用いられる画像処理技術には、以下のものがある。

- Image warping  
画像上に設定した制御点を動かし、それに追従するように画像全体を変形させる処理。
- Image morphing  
Image Warping と同様にして、画像の形と色を同時に変化させる処理。
- Image stitching  
複数の画像を「縫い合わせて」一つの画像を生成する処理。

次に、現在までに行なわれている IBR の具体例を紹介する。

#### 視線移動の実現

最も初期の IBR として位置付けられているのは、1980 年に Lippman によって提案された Movie-Map [19] である。このシステムは、予め複数方向の動画像を記録・蓄積しておき、ユーザの指示に応じて然るべき画像を選択し表示するものである。

視点を固定した状態での視線移動は、視線方向ごとに別の画像を用意する代わりに、全周の画像を1枚の円筒や球面に投影しておき、視線方向に応じて必要な部分を投影し直すことによって実現できる。このような手法を environment mapping という。

Environment mapping の実装の具体例としては、QuickTime VR [20] が知られている。QuickTime VR には、周囲を見渡すパノラマムービーと、物体をあらゆる方向から眺めるオブジェクトムービーの2つのフォーマットがあり、そのうちの前者に environment mapping が用いられている (後者は Movie-Map と同様)。パノラマムービーは、ある経路に沿って離散的に設定された各視点において、水平方向に 360° 分の 2 次元画像を撮影し、これらに image warping と stitching を施して円筒面にマッピングすることによって作成される。

#### 視点移動の実現

Movie-Map や QuickTime VR は、予め撮影された位置での画像のみが表示可能であるため、不連続な視点移動しか実現することができない。これに対し、視点移動に対する自由度を与えるためには、実際に撮影されていない位置での画像を合成する必要がある。

Chen らは、多視点画像の morphing と stitching により、撮影点の間の視点における画像の合成を行なっている [27]。Morphing を行なうためには、2つの画像の間で対応点を求める必要があるが、本手法では予め取得した奥行き情報から計算している。

これに対し、片山らは、エピソード平面画像 (EPI) を利用し、距離情報を明示的に利用しない view interpolation を行なっている [28]。EPI とは、各カメラの光軸を平行かつ等間隔に配置して撮影した多視

点画像から、同じ位置の水平ラインを取り出して視点位置の順に並べたときに現れるパターンであり、空間内の1点が1本の直線となって現れるという性質を有する。本手法では、この性質に着目し、EPI上で直線検出を行なうことで、撮影点の間の視点における画像の補間合成を実現している。

### 2.3.3 Plenoptic Modeling

1995年、McMillanとBishopは、以上のような各種のIBR手法を、光線を記述する関数であるPlenoptic Functionの離散的な標本値からその連続的な値を得る処理として一般化し、Plenoptic Modelingの概念を提唱した[22]。これは、2.2.4節に述べた光線記述の考え方に他ならない。

Plenoptic Functionとは、1991年にAdelsonとBergen[21]によって提唱された、あらゆる光線を表現する単一の関数である。光線は、通過する位置の3次元座標 $(X, Y, Z)$ 、経度・緯度に対応する方向角 $(\theta, \phi)$ 、波長 $\lambda$ 、時間 $t$ を属性として有するため、Plenoptic Functionは、

$$p = P(X, Y, Z, \theta, \phi, \lambda, t) \quad (2.1)$$

という7次元の関数となる。ただし、詳細は後述するが、実際にはここまで一般化せずに、より少ない次元の関数として表すことが多い。

McMillanらのいう「Plenoptic Functionの標本値」とは、ある点を中心とした球面の一部または全面へのenvironment mapであり、これは様々な方向から3次元空間内の1点に到達する光線の集まりに相当する。そして、view morphingやview interpolationなど、それまでに提案されてきたIBRのための様々な手法を、Plenoptic Functionの標本化、再構成、再標本化という3つの主要なプロセスとして位置付けている。

## 2.4 3次元情報の光線情報表現に関する研究動向

前節までに、3次元空間情報を光線の集まりとして表現するという考え方が、3次元画像通信と3次元CGの双方の立場から生まれた経緯について述べた。本節では、その後現在までにどのような研究が行なわれているかについて概観する。

光線情報表現に基づく3次元空間共有通信や3次元画像データベースなどのシステムを想定した場合、以下の4つのプロセスを順に経ることになると考えられる。

1. 3次元画像情報の取得
2. 3次元画像情報の光線としての記述
3. 光線データの圧縮符号化
4. 光線データからの表示画像の生成

このうちの取得に関しては後に詳述することにして、本節では他の3つの要素技術に関する動向を紹介する。なお、現状の研究成果を見ると、上記のプロセスを全て包含し、1つのシステムとして研究が進められている場合が多いが、ここではそのような場合も敢えて上記の4つの要素技術に分けて論じることにする。

### 2.4.1 光線の記述

Plenoptic Functionの定義にあるように、各々の光線は、通過位置(3次元)、伝搬方向(2次元)、人間の眼が知覚し得る何らかの物理量(例えば色や波長、強度など)を表す情報(1次元)、時間変化(1次元)を属性として有する。Plenoptic Functionは、これらの属性値を全て独立変数と考え、光線を7次元の関数で表現していた。

しかし、色や強度などの量は、他の属性とは独立に変化するのではなく、位置、方向、および時間によって一意に定まると考えられる。そこで、時間変化がない場合を考えると、色などの情報は、位置  $(X, Y, Z)$  および方向  $(\theta, \phi)$  の関数として、 $f(X, Y, Z, \theta, \phi)$  の形で表現することができる。よって、静的な3次元空間を表す光線の情報は、5次元情報空間に記録される。

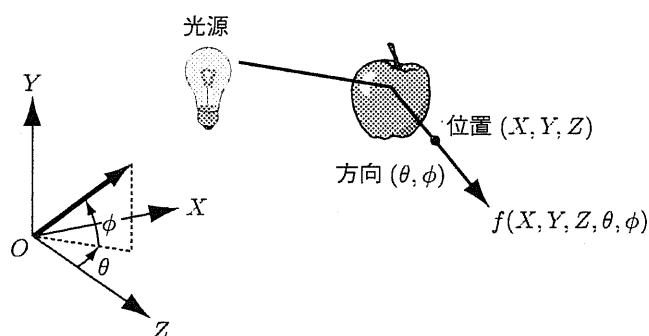


図 2.8: 光線のパラメータ化

光が3次元空間内を伝搬する過程で、干渉や減衰などの影響を受けて変化することがないと見なすことができる場合には、各々の光の伝搬経路上の全ての点における情報を記録する必要はなく、ある1点の情報を記録すれば十分である。このとき、伝搬経路に沿った1次元分の位置情報を削減できるため、光線の情報が記録される空間は4次元となる。以下、現在提案されている4次元情報空間への射影法を紹介する。

### Light Field と Lumigraph

1996年に入り、Plenoptic Function を4次元の関数として表現する手法として、Light Field Rendering [23] や Lumigraph [24] が相次いで提案された。これらは名称が異なるだけで、光線の記述方法自体は同じであるが、撮像方式や符号化など、付随する処理に差異が見られるため、以下では必要に応じて区別して扱うことにする。

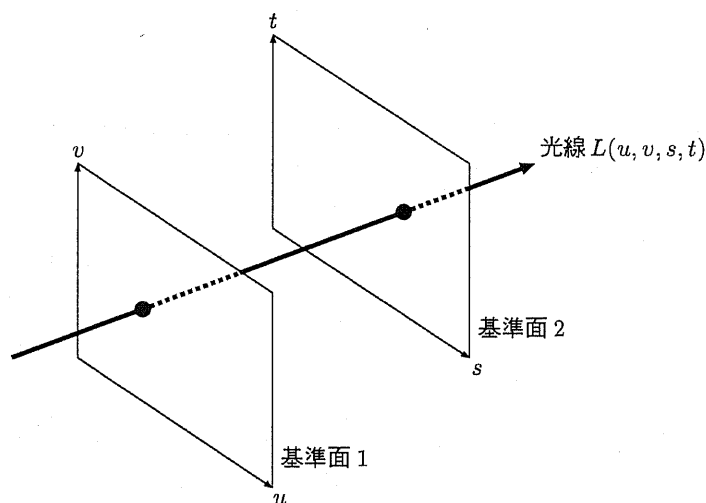


図 2.9: Light Field や Lumigraph における光線記録方式

これらの手法では、図 2.9 のように、実空間内に2枚の平行な平面を仮想的に配置し、各々の面を通過する位置の2次元座標を用いて光線を表現している。なお、2枚の平面が1組だけでは、平面に平行な光

線を表現できないが、Light Field では、2枚1組の平面を、物体を取り囲むように90°おきに配置することで、全ての方向の光線の記録を実現している。

図2.9のパラメータ  $s, t$  の値を固定すると、様々な方向から1点に到達する光線の集まりとなり、これは1枚の2次元画像(透視投影像)に相当する。よって、Light Field ないし Lumigraph のデータは、2次元画像を2次元的に並べた形式と考えることができる。

2枚の平面を用いた光線記述の問題点として、奥行きがほぼ一定の対象に限られる点が挙げられる。すなわち、奥行きが図2.9の  $uv$  平面に近い対象であれば、視覚的に良好な画像が生成できるが、そうでない場合の画像再生では問題を生じる。

Light Field では、奥行きが  $uv$  平面から離れている場合に、ローパスフィルタ処理を行なっている。これにより、再構成画像におけるエイリアシングを防ぐことが可能となるが、該当する箇所がぼやける問題が生じる。一方、Lumigraph では、奥行きを補正する処理を行なっているが、実写を利用する場合には奥行き情報の取得が大きな課題となる。

### Dynamically Reparametrized Light Field

Isaksen らは、Light Field や Lumigraph における上記の問題を解決するために、動的な再パラメータ化(dynamic reparametrization)を提案している[25]。これは、3次元空間内に2枚の基準面とは別に任意の焦点面(focal surface)を設定し、パラメータ  $(s, t, u, v)$  によって表される光線が焦点面上のどの位置を通過するかを記述したものである。焦点面は任意に与えることができるため、任意のフォーカスや絞りの効果を再現することが可能となる。

Light Field や Lumigraph で用いられる4つのパラメータのうち、 $(s, t)$  をカメラの位置、 $(u, v)$  を各々のカメラにおける画素の位置とする。ただし、カメラは平面  $C$  上に並んでいるとする。位置  $(s, t)$  にあるカメラ  $D_{s,t}$  の画素  $(u, v)$  に対応する光線が、焦点面  $F$  上の位置  $(f, g)_F$  を通過するとき、この光線は、元々の Light Field などのように  $L(s, t, u, v)$  と表す代わりに、 $L(s, t, f, g)_F$  と表すことができる。また、3次元空間内の点  $(X, Y, Z)$  から  $D_{s,t}$  の画素  $(u, v)$  への写像を  $P_{s,t}$ 、 $(f, g)_F$  から  $(X, Y, Z)$  への写像を  $T_F$  とするとき、 $(f, g)_F$  から  $D_{s,t}$  の画素  $(u, v)$  への写像を  $M_{s,t}^{F \rightarrow D}$  とすると、

$$M_{s,t}^{F \rightarrow D} = P_{s,t} \circ T_F$$

となる。ここで、 $P_{s,t}$  は一定であり、 $T_F$  はユーザが焦点面  $F$  を与えることによって定まる。

任意の視点から見た画像を生成する際には、必要な光線をその近傍の取得済み光線によって近似する。具体的には、光線  $L(s_0, t_0, f, g)_F$  (ただし  $(s_0, t_0)$  は平面  $C$  上にあるものとする)が必要な場合、 $(s_0, t_0)$  に隣接するカメラを  $D_{s',t'}$  とし、 $(f, g)_F$  に対して  $M_{s',t'}^{F \rightarrow D}$  を適用することにより、 $D_{s',t'}$  の画素  $(u', v')$  を求め、近傍の取得済み光線  $L(s', t', u', v')$  を得る。このようにして複数の取得済み光線を求め、それらに対してフィルタ処理を行なうことで、所望の光線を再現している。

### 平面記録方式

上記の方式では、個々の光線を表現する際に、方向を直接表しておらず、2枚の基準面の通過位置と基準面間の距離から方向が定まるようになっている。即ち、基準面間の距離を暗黙のうちに仮定している。これは、視点から画像面までの距離を、2枚の基準面間の距離と同じにした平面ディスプレイにおける任意視点画像の生成に限定したものと考えことができ、特定のディスプレイに依存しないという条件を満たしていない。

これに対し、方向角をそのまま用いて光線を表現する3通りの記述方法が、Light Field などと同時期に提案された[26]。ここでは、そのうちの一つである平面記録方式について述べる。

単一の平面を通過する光線群のみを記述することを考えると、個々の光線は、その平面における位置と方向を用いて表現することができる。ここで、図 2.10 のように、光線が通過する平面が  $Z = 0$  ( $XY$  平面) となるように  $XYZ$  位置座標系を定義し、この座標軸を基準として方向角  $\theta, \phi$  を図 2.8 のように定義する。このとき、 $XY$  平面上の  $X = P, Y = Q$  の位置を通り、 $(\theta, \phi)$  の方向に進む光線の情報は、

$$f(P, Q, \theta, \phi) \quad (2.2)$$

と表すことができる。

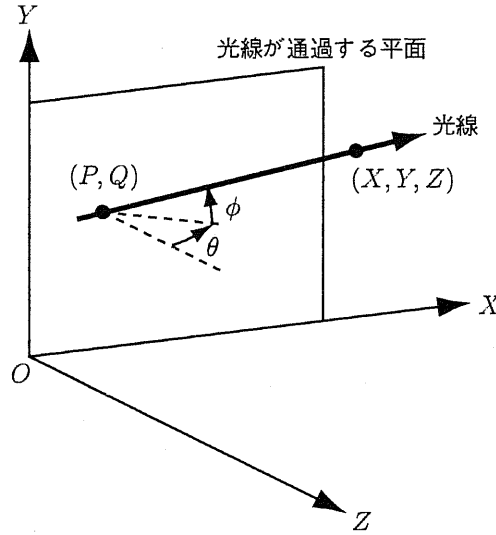


図 2.10: 平面記録方式

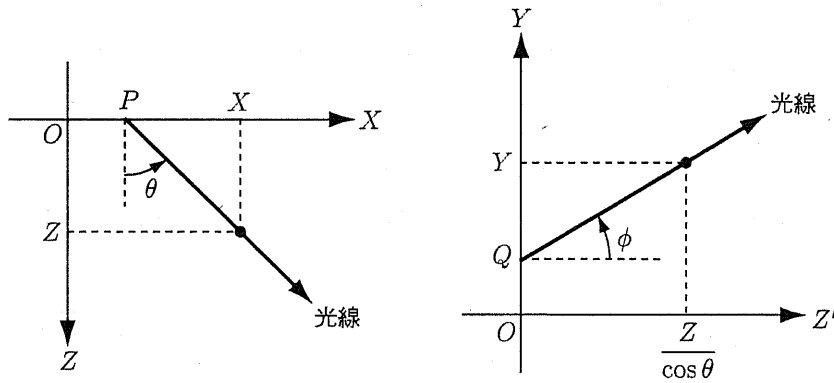


図 2.11: 光線が通過する平面上の位置  $(P, Q)$  と 3 次元空間内の位置  $(X, Y, Z)$  の幾何学的関係 ( $Z'$  軸は  $Z$  軸を  $Y$  軸回りに  $\theta$  回転したもの)

3 次元空間内の位置  $(X, Y, Z)$  を通過して  $(\theta, \phi)$  の方向に進む光線に対する  $P, Q$  は、図 2.11 に示す幾何学的関係より、

$$P = X - Z \tan \theta, \quad Q = Y - Z \frac{\tan \phi}{\cos \theta} \quad (2.3)$$

となる。ここで、光線の方角を、 $\theta, \phi$  の代わりに

$$u = \tan \theta, \quad v = \frac{\tan \phi}{\cos \theta} \quad (2.4)$$



と表すことにすると、(2.3)式は次のように表すことができる。

$$P = X - Zu, \quad Q = Y - Zv \quad (2.5)$$

さらに、方向を表すパラメータとして、 $\theta, \phi$ の代わりに、(2.4)式で定義した $u, v$ を用いることにすると、光線の情報は、

$$f(P, Q, u, v)$$

と表すことができる。このような記録方式は、1枚の平面に全ての光線を記録することから、「平面記録方式」と呼ばれている。

平面記録方式では、(2.4)式からわかるように、 $\theta = \pi/2$ または $\phi = \pi/2$ の光線、即ち基準面に平行な光線を表現することが不可能である。そのため、被写体を任意の方向から眺めた情報や、観察者の周囲を取り囲む空間の情報を完全に記録することはできない。しかし、1枚の平面に多数の方向の光線を記録するという形式は、言い換えれば、「視点によって見え方の変わる平面」ということであるため、平面ディスプレイによる立体表示のための情報の記述には適している。

また、(2.5)式によれば、 $Pu$ 平面あるいは $Qv$ 平面において、実空間内のある1点は直線上に並び、その直線の傾きは実空間内の点の奥行きを表すことになる。この性質を利用し、 $Pu$  ( $Qv$ )平面内での直線検出による対応点検出や補間などが可能となる。なお、 $Pu$ 平面に現れるパターンは、カメラを水平に並べたときのエピポーラ平面画像と等価である。

### 球面記録方式

平面記録方式では、記録する光線を、単一の平面を通過するものに限定していた。これに対し、文献[26]では、光線の方角に関する制約をなくし、全ての方向の光線の記録が可能な手法も提案されている。

図2.12に示すように、3次元空間内に絶対的な位置座標系としてXYZ座標系を定め、光線の方角パラメータはこれを基準にして $(\theta, \phi)$ と表す。また、位置パラメータについては、以下のように定義する。方向成分が $(\theta, \phi)$ の光線に対して、XYZ座標系の各軸を、Y軸を中心として $\theta$ 回転した後、X軸を中心として $-\phi$ 回転する(回転の向きは、各軸の正の方向に右ネジが進む向きを正とする)。これによってX, Y, Z軸が移った先をそれぞれP, Q, R軸とすると、R軸は光線に平行になるため、R座標値は光線の伝搬経路に沿った位置を表す。光線が4次元情報空間に射影できる条件を満たしていれば、この値は不要であるから、残りのP, Q軸を新たな位置座標軸として、光線の位置パラメータを $(P, Q)$ と表すことができる。

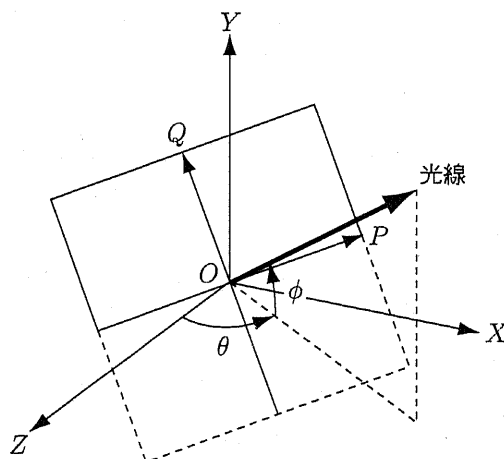


図 2.12: 球面記録方式

上記の位置座標系の定義によれば、 $P, Q, R$ の各座標値は、被写体を $Y$ 軸回りに $-\theta$ 回転した後、 $X$ 軸回りに $\phi$ 回転したときの $X, Y, Z$ の各座標値と等価である。よって、 $X, Y, Z$ 軸を中心とする角度 $\theta$ の回転変換を表す $3 \times 3$ 行列をそれぞれ $R_X(\theta), R_Y(\theta), R_Z(\theta)$ とすると、位置 $(X, Y, Z)$ を通過し $(\theta, \phi)$ 方向に進む光線の $P, Q, R$ 座標値は、

$$\begin{pmatrix} P \\ Q \\ R \end{pmatrix} = R_X(\phi) R_Y(-\theta) \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

により与えられ、この光線の情報は、上式の $P, Q$ を用いて、 $f(P, Q, \theta, \phi)$ と表される。各々の回転行列は、具体的には、

$$R_X(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}, R_Y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix}, R_Z(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

となるため、(2.6)式の具体的な形は次のようになる。

$$\begin{pmatrix} P \\ Q \\ R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ -\sin \theta \sin \phi & \cos \phi & -\cos \theta \sin \phi \\ \sin \theta \cos \phi & \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

以上のようにして個々の光線を記述することにより、XYZ座標系の原点の回りに定義された球面を通過する全ての光線が記録されることから、この記録方式は「球面記録方式」と呼ばれる。

なお、文献[26]では他に、円筒型ディスプレイの情報を記述する目的で「円筒記録方式」を提案しているが、ここでは割愛する。

### 光線情報と平行投影像

4次元情報空間に射影された光線の情報は、射影法の種類に関係なく、一般に $f(p, q, \theta, \phi)$ と表すことができる。ここで、 $\theta, \phi$ の値を固定して考えると、 $f(p, q)$ は平行な光線の集まりを2次元平面で切断した断面であると考えることができる。よって、3次元空間全体を記述する光線情報 $f(p, q, \theta, \phi)$ は、その3次元空間の平行投影像(2.5.2節を参照)の集まりであるという性質を有する。

特に、球面記録方式の場合には、PQR座標系の定義から、PQ平面が方向 $(\theta, \phi)$ の光線に直交するという性質を有する。よって、 $f(P, Q)$ は3次元空間の正投影像(2.5.2節を参照)となる。

### 2.4.2 光線情報の圧縮符号化

3次元空間や物体を記述する光線群のデータ量は膨大なものになるため、データの蓄積や伝送のためには、情報圧縮が不可欠である。

初期のLight Field[23]ではベクトル量子化とエントロピー符号化を適用し、さらにコードブックとインデックスをLempel-Zip法により圧縮している。またLumigraph[24]では、光線データを2次元画像の集まりと見なし、JPEGによる符号化を行なっている。これにより得られた圧縮率は、前者が最大で約1/100、後者が約1/24であった。

これに対しMagnorらは、視差補償符号化を用いて、Light Fieldデータの圧縮率の改善を試みている[30]。この方式では、2次元格子状に並んだ2次元画像のうち、格子の4隅に相当する画像はDCTによるイントラ符号化を行ない、その他は上下左右の隣接4画像から視差マップを生成し、これを元に補間を行なう。これにより、圧縮率は約1/900にまで向上している。

一方、同じく圧縮率の向上を目的として、4次元DCTを用いた符号化方式も提案されている[31]。この方式は、2次元画像符号化で広く用いられる手法を4次元に拡張したもので、具体的には、4次元情報空間をサブブロックに分割し、4次元ジグザグ走査、可変長符号化を適用する。これにより、カメラを細かい間隔で配置して撮影した多眼画像に対しては、画像群を動画シーケンスと見なしてMPEG2を適用するよりも高い圧縮効率を達成できる。逆に、カメラ間隔が粗い場合には、圧縮効率は低下する。実験結果では、元の4次元情報空間の情報量に対して約1/800の圧縮率となっている<sup>1</sup>。これは、同程度のSNRと比較すると、MPEG2の1/1.6、JPEGの1/5.9の情報量である。

#### 2.4.3 光線情報からの画像再構成

光線情報は、最終的には何らかの表示用の画像として利用される。光線情報から画像を生成するには、その画像がどの光線群に対応するかを計算し、4(5)次元情報空間に格納されているデータから、求めた光線群に対応する部分を読み出せば良い。

しかし、単純に上記の手法を計算機上に実装し、画像生成を高速に行なうには、読み出し速度の遅いディスクではなく、メインメモリなど高速な読み出しが可能な記憶領域に全てのデータを置くことが必要となるが、膨大なデータを全てメモリに展開するのは、現状では困難である。そこで、3次元物体や空間に対するインタラクションなど、実時間での画像生成が要求される場面では、様々な工夫がなされている。

##### 少ないメモリ量での画像生成

計算機のメインメモリからのデータ読み出しのみで画像生成処理を実現するため、参照テーブルと縦方向視差の近似により、必要なメモリ量を削減する試みがなされている[32]。参照テーブルとは、光線情報が得られていない領域に対し、すでに取得されている光線のうちで近似値として最適なものを予め計算し、その光線の4次元情報空間での位置を格納したものである。このテーブルを水平視差についてのみ用意しておき、縦方向の視差は垂直1ラインごとの拡大・縮小によって再現することで、メモリ消費の削減を図っている。

##### CGレンダリング技術の適用

一方、CGハードウェアを活用して、高速な画像生成を行なう試みも見られる。具体的には、従来からの3次元CGと同様に、3次元構造モデルにテクスチャマッピングを行なって画像を生成する。ここで問題となるのが、3次元構造モデルの構築である。

構造モデルを一意に定めるのが困難であることから、不完全なモデルを複数用いる手法が検討されている[7]。具体的には、多眼画像の視差推定に基づき、視点位置に応じて構造モデルを切り替える手法や、多眼画像の領域分割によって対象を複数のレイヤに分割し、各レイヤに別々の構造モデルをあてはめる手法が挙げられる。

また、被写体形状を平面で近似することにより、時間変化のある動空間を任意の視点から見た動画像を実時間で補間合成する試みも見られる[38]。この研究では、カメラマトリックスにて撮影された多眼動画像をグラフィックスワークステーションに入力し、動画像をテクスチャ画像としてテクスチャマッピングを行なう機能を利用することにより、高速な補間処理を実現している。

<sup>1</sup> 多眼撮影により取得した原情報を補間して4次元情報空間を充填しているため、4次元空間の情報量が原情報より増加し、見かけ上の圧縮率は高くなる。原情報との比較では約1/400の圧縮率となる。

## 2.5 光線情報表現のための3次元空間情報の実写入力

### 2.5.1 実写による光線取得の必要性

以上のように、光線情報表現に関して様々な研究が行なわれているが、それらの研究を進めていく上では、元となる光線の集まりのデータを如何にして取得するかが大きな問題となる。

Light field や Lumigraph においては、光線情報を得るための手段として、実写と CG 合成の両方を取り上げている。CG 画像を用いる利点としては、対象の任意の見え方の合成が可能であることが挙げられる。これにより、4次元情報空間を隙間なく充填するデータを得ることができるため、光線の記述や画像再構成の手法の理論的な正しさを検証するシミュレーション目的には適している。

しかし CG 画像では、絵柄や色の変化などが実写と比較すると単純になるため、符号化や補間など、画像の内容に依存した処理の性能を評価するには、CG 画像だけでは不十分である。また、光線による空間記述の発端の一つが、CG 合成の限界の克服を目的とした Image-Based Rendering であったことを考えても、光線情報の CG 合成に注力するのは本末転倒であろう。

このような観点から、実写ベースの光線データの必要性は高いと考えられる。そこで以下では、これまでに行なわれてきた実写による光線取得の試みを概観することにする。

### 2.5.2 多視点での2次元画像撮影と光線情報への変換

実写により光線を取得する手段として、最も容易に実現できるものは、通常のカメラを用いて多数の視点から2次元画像を撮影する方法である。2.2.1 節で述べたように、多眼撮影は立体写真の時代から用いられてきた手法であるが、今日では、画像情報の電子的な処理と、カメラ位置を制御する技術の発展に伴い、カメラの配置方法は多様化しつつある。しかし、多眼画像を光線の集まりとして4次元情報空間に記録する手順は、いかなるカメラ配置の場合も共通である。

#### 透視投影像と正投影像

具体的な変換手順の説明に先立ち、3次元空間を2次元平面に投影する方法について触れておく。

##### ●透視投影

我々が通常手にすることのできる写真カメラやビデオカメラで撮影を行なうと、近くのものが大きく、遠くのものが小さく写った画像が得られる。このような2次元画像を与える投影法を透視投影 (perspective projection) という。

透視投影によって得られる2次元画像 (透視投影像) は、対象から1点に集まる光束を2次元平面で切ったときの断面に相当し (図 2.13 参照)、各々の画素の位置は光線の方向に対応する。

##### ●平行投影・正投影

設計図を作成する場合には、対象物の大きさが視点からの距離によらず一定になるように描かれる。このような2次元画像を与える投影法を平行投影という。平行投影によって得られる2次元画像 (平行投影像) は、対象から発せられる平行な光線を2次元平面で切った断面に相当する (図 2.14 参照)。

平行投影のうち、光線を切断する2次元平面が光線に垂直である場合を、正射影または正投影 (orthogonal projection) という。平行投影像や正投影像 (正投影によって得られる2次元画像) では、各々の画素の位置は、光線の通過する位置を表している。

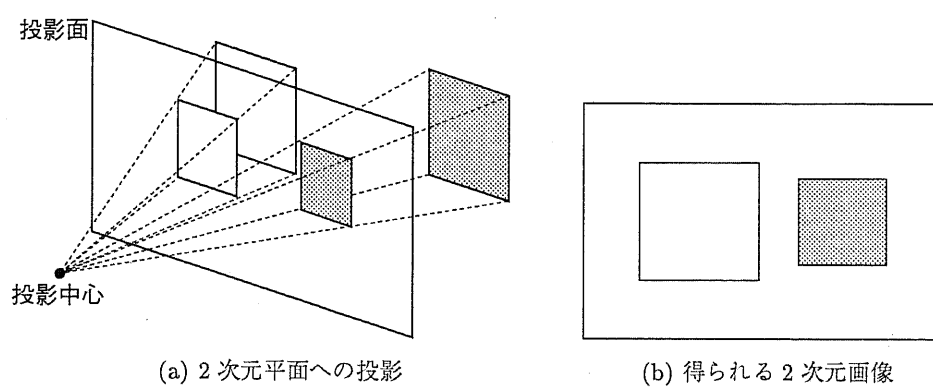


図 2.13: 透視投影

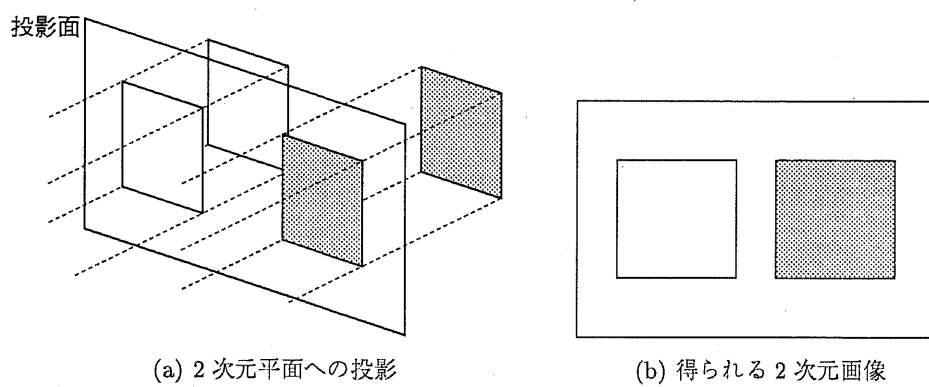


図 2.14: 平行投影

## 2次元画像から光線情報への変換の手順

以下、本章では透視投影像を多視点で撮影する場合を考える。上述のように、透視投影像は1点に集まる光線の集合であり、カメラのモデルをピンホールカメラで近似すると、ピンホールの位置に光線が集まると考えることができる。ピンホールの位置を  $(X_0, Y_0, Z_0)$  とすると、この点における画像情報は、

$$f(\theta, \phi) \big|_{(X,Y,Z)=(X_0,Y_0,Z_0)} \quad (2.9)$$

と表される。点  $(X_0, Y_0, Z_0)$  における画像の撮影は、(2.9) 式で表される光線を5次元情報空間に記録することであり、逆に  $(X_0, Y_0, Z_0)$  から実空間を眺めた画像の合成は、5次元情報空間から(2.9)式で表される光線を読み出すことに相当する。

(2.9) 式によれば、画像中の個々の画素は、それぞれ異なる方向から到達した光線に対応している。カメラの光軸の絶対的な方向を  $(\theta, \phi)$  とし、この光軸方向で撮影された2次元画像において、光軸を基準とした相対方向を  $(\theta', \phi')$  とする。このとき、2次元画像上での位置  $(x, y)$  と  $(\theta', \phi')$  との幾何学的な関係は、図2.15のようになっている。

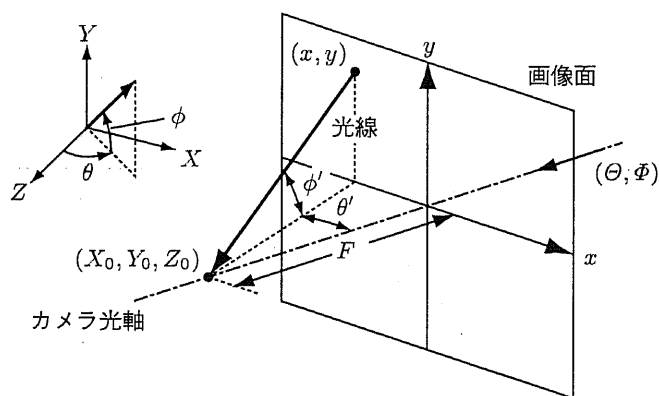


図 2.15: 2次元画像における画素の位置と光線の方向の関係

図2.15に示す光線について考えると、 $(x, y)$  と  $(\theta', \phi')$  との関係は次のようになる。

$$\tan \theta' = -\frac{x}{F}, \quad \frac{\tan \phi'}{\cos \theta'} = -\frac{y}{F} \quad (2.10)$$

ここで  $F$  は画像面からピンホールまでの距離であり、これと画像の横幅  $w$  および水平画角  $\delta$  との間には、図2.16に示すような関係がある。

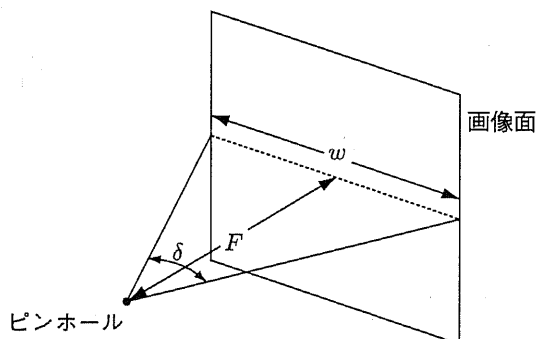


図 2.16: 透視投影像の横幅  $w$ 、水平画角  $\delta$ 、および画像面・ピンホール間の距離  $F$  の関係

よって  $F$  は以下のようにして求められる。

$$F = \frac{w/2}{\tan(\delta/2)} \quad (2.11)$$

方向成分  $(\theta', \phi')$  は、カメラの光軸を基準とした相対的な角度を表すものである。しかし、画像を光線情報として表現するためには、方向成分を、XYZ座標系の座標軸を基準とした角度  $(\theta, \phi)$  で表現する必要がある。カメラの光軸方向が  $(\Theta, \Phi)$  であるとき、 $(\theta', \phi')$  の光線の絶対的な方向を表すベクトル  $(r_X, r_Y, r_Z)^T$  は次式により求められる。

$$\begin{pmatrix} r_X \\ r_Y \\ r_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \Theta & -\sin \Theta \sin \Phi & \sin \Theta \cos \Phi \\ 0 & \cos \Phi & \sin \Phi \\ -\sin \Theta & -\cos \Theta \sin \Phi & \cos \Theta \cos \Phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin \theta' \cos \phi' \\ \sin \phi' \\ \cos \theta' \sin \phi' \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

この  $r_X, r_Y, r_Z$  を用いて、 $\theta, \phi$  は次式により求められる。

$$\theta = \arctan \frac{r_X}{r_Z}, \quad \phi = \arctan \frac{r_Y}{\sqrt{r_X^2 + r_Z^2}} \quad (2.13)$$

以上のようにして、2次元画像を、5次元情報空間の中の(2.9)式で表される部分空間における光線群の情報として表現することが可能となる。さらに、4次元情報空間に記録する場合には、得られた  $(X, Y, Z, \theta, \phi)$  から、必要な4つのパラメータを求める。

逆に、4次元情報空間に記録された光線のデータから、表示用の2次元画像を合成するには、画像の視点位置、視線方向、画角、画素数から、上記のようにして、光線を表現する4つのパラメータを求め、そのパラメータにより表される部分の情報を読み出せば良い。

### 変換に必要な情報

上記の議論をもとに、2次元画像を光線の集合として4次元情報空間に展開するために、どのような情報を知る必要があるかを整理する。

まず、(2.9)式に示すように、1枚の画像は空間内のある1点を通過する光線の集合であるから、その点の位置が既知である必要がある。この情報は、厳密にはカメラの主点位置であり、複数のカメラを用いる場合には、個々のカメラについて主点を求めておく必要がある。また、カメラを回転させる場合には、回転中心と主点との位置関係もわかっているなければならない。

次に、(2.10)～(2.13)式を用いて、画素の位置から光線の方向を求めるためには、カメラの画角もしくは画像面から主点までの距離、それにカメラの光軸の方向の情報が必要となる。以上の情報は、カメラパラメータと呼ばれる。

カメラパラメータのうち、カメラの画角(または画像面と主点の距離)については、ズーミングやフォーカシングなどの操作を行わない限り変化しないと考えられるため、測定などにより一度求めてしまえば良い。そのため、多眼撮影において主として問題になるのは、撮影の度に値が変化する、カメラの位置および光軸方向である。

### 2.5.3 光線取得の具体例

ここでは、多眼撮影により3次元空間や物体を記述する光線の取得を行なった実例を紹介する。ただし、実際に光線情報をデータベースとして蓄積せずに、光線記述の考え方に基づいて原画像から直接画像生成処理を行なった例も含む。

## (1) Light Field の取得 [23]

Levoy らは、CG および実写画像の双方から Light Field データを取得する方法について、検討を行なっている。その中で、実写によるデータ取得の手段として、カメラパラメータの制御が可能な移動単眼式の撮像系を開発している。

この撮像系は、図 2.17 に模式的に示すように、移動可能なカメラと水平に回転するターンテーブルにより構成される。カメラは鉛直な平面に沿った平行移動と、レンズの主点を中心としたパン、チルトが可能となっている。よって、物体を取り囲む円筒面およびその接平面上を通過する光線が取得される。

また、この装置では、ターンテーブルの回転と同期して照明光源が回転するようになっている。これにより、被写体と光源との相対的な位置関係が一定に保たれ、ある照明条件での物体を記述する光線の情報を、照明条件まで含めて正しく取得することができる。

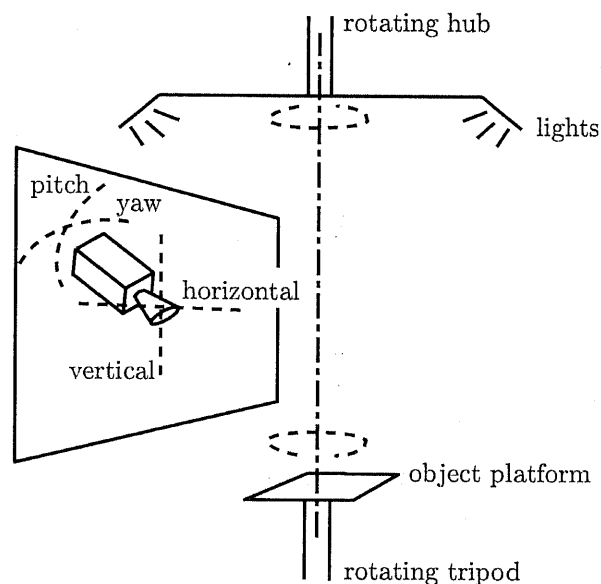


図 2.17: Light Field データの取得のための撮像システム [23]

文献 [23] における実写からの光線取得の実験では、 $100\text{cm} \times 50\text{cm}$  の垂直面内を  $3.125\text{cm}$  間隔で撮影を行なっている。

## (2) 水平移動単眼撮像系 [33]

文献 [33] では、カメラの水平位置と方向を制御しながら、空間内のウォークスルー画像が撮影できる装置の開発を行なっている。

この装置は、XYプロッタ上にターンテーブルを介して NTSC カメラを設置しており (図 2.18)、移動範囲は基準点から  $X$  軸方向に  $-430\text{mm} \sim 430\text{mm}$ 、 $Y$  軸方向に  $570\text{mm} \sim 1430\text{mm}$  となっている。また、各点において、 $-90^\circ \sim 90^\circ$  の範囲で、光軸を水平方向に回転できるようになっている。カメラの画像面と主点との距離  $F$  は、いくつかのズーム値について光学測定を行ない、それ以外のズーム値については測定値から線形補間を行なって求めている。

この装置によって撮影した多視点画像を用いて、実写空間に対するインタラクティブ操作 [32]、4次元 DCT による空間符号化 [31] などが行なわれている。また、第3章および第4章における実験でも、この装置を用いた画像を使用している。これらの実験では、水平面上に格子状に視点を配置して撮影を行なっている。



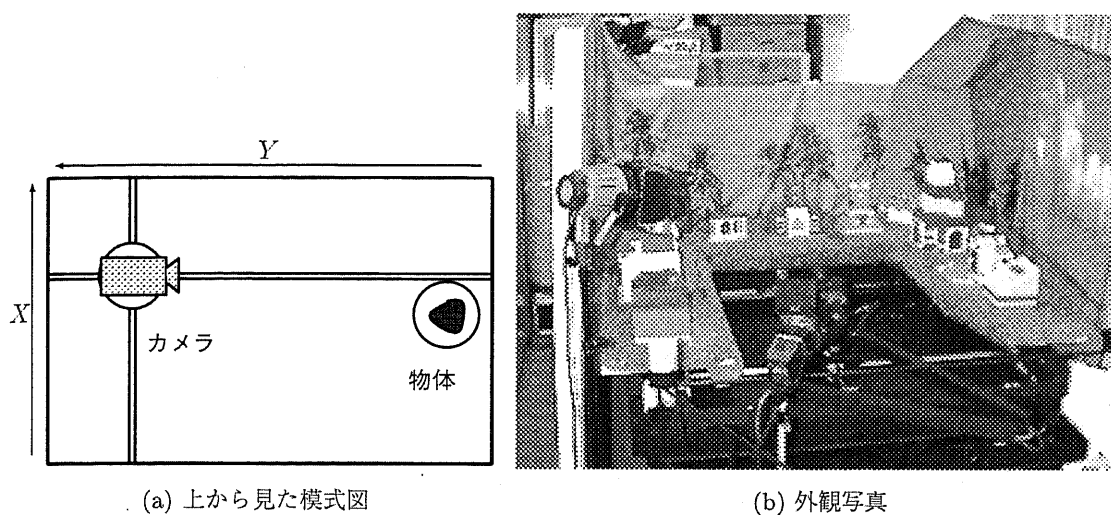


図 2.18: 移動単眼撮像系 [33]

また、本装置を用いて、視点位置を適応的に制御し、光線情報を効率的に取得する研究も行なわれている [34]。この研究では、未取得の光線のうち、4次元情報空間において周囲から予測や補間ができないものを優先的に取得するように、視点位置の逐次制御を行なっている。

### (3) Lumigraph データの取得 [24]

Gortler らは、特別な装置を構築せず、手持ち撮影での物体全周の情報の取得を試みている。このときに必要なカメラキャリブレーションを容易に行なうために、図 2.19 のような、位置に応じて決められたマークが描かれたステージ上で撮影を行なう。

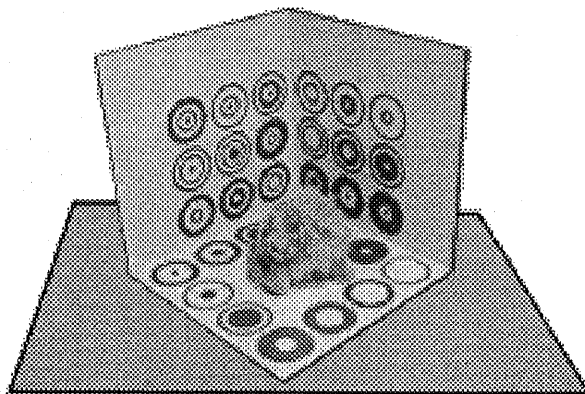


図 2.19: カメラキャリブレーションのための撮影用ステージ [24]

マークは2値化処理によって検出し、その位置・大きさ・形状を求めることで、カメラの位置・光軸方向・焦点距離が推定できる。さらに、推定結果をディスプレイ上に表示し、どの点で撮影を行なったかを直観的に知らせるユーザインタフェースも用意されている。

この方式では、視点位置を自由に設定することができるため、視点の配置や移動の順序などについては特に触れていないが、前述のユーザインタフェースにおいて、物体を取り囲む球面を覆い尽くすまで撮影を行なう必要があるとしている。

## (4) QuickTime VR オブジェクトムービー撮像系 [36]

物体を多方向から見回した画像を撮影できる装置として、市販の QuickTime VR オブジェクトムービー撮影装置 (テクネ (株) 製 Auto QTVR; 以下 QTVR 撮像系と表記) を利用し、これによって得られる多眼画像を光線情報として扱うことを試みる。なお、この成果は、山崎貴氏 (1997 年度受託研究員) との共同研究によるものである。

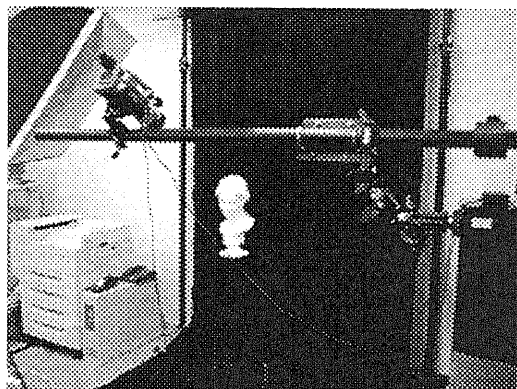
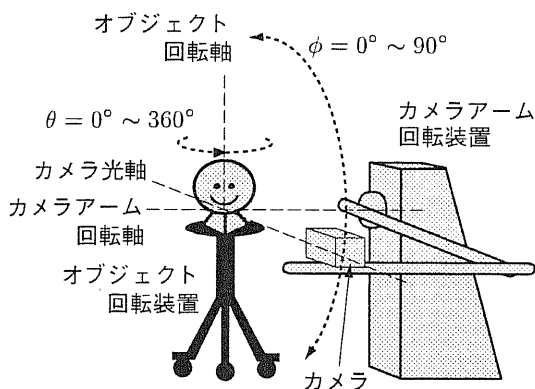
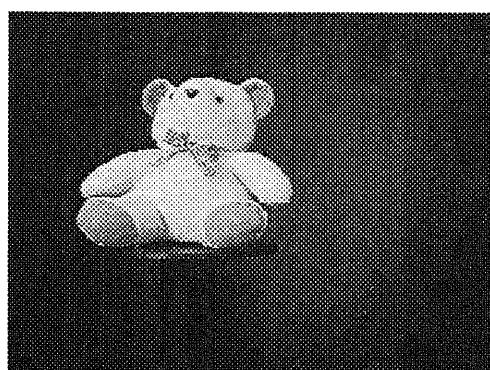


図 2.20: QTVR 撮像系

撮像系の構成は図 2.20 のようになっており、カメラを取り付けたアームとターンテーブルの回転角は、コンピュータにより制御される。これにより、大まかに見ると、物体を取り囲む球面上に、経度、緯度とも等間隔に視点が配置され、カメラの光軸が球面の中心を向いた形になる。しかし、カメラの光軸とアーム、テーブルの回転中心は必ずしも 1 点で交わっていないため、厳密な撮影位置情報は未知である。また、カメラの焦点距離情報も未知である。

QuickTime VR オブジェクトムービーは、多方向から撮影した物体の画像を、単に視点に応じて切り替えて表示するアプリケーションであるため、このような仕様で問題はないが、光線の取得に利用するためには、カメラキャリブレーションを行なう必要がある。カメラキャリブレーションには、2 枚以上の画像における同一の長方形領域を手がかりとする推定手法 [37] を適用する。



(a) 原画像



(b) 被写体に近付いた様子

図 2.21: QTVR 撮像系により撮影された多眼画像からの任意視点画像の合成

図 2.21 は、QTVR 撮像系によって撮影された原画像のうちの 1 枚、およびこれらを用いて、撮影時より被写体に近付いたときの被写体の見え方を合成した結果である。ただし、原画像を 4 次元情報空間に展開する操作は行わず、原画像から直接新たな画像を合成している。図 2.21(b) の合成結果を見ると、被

写体のぬいぐるみが、図 2.21(a) の原画像と比べて起き上がって見えており、単なる原画像の拡大ではないことがわかる。

#### (5) カメラマトリックス

これまでに紹介した例は、いずれも移動単眼カメラによる多視点撮影である。しかし、動的な対象を撮影する場合には、多数のカメラを用いた多眼撮影が必要になる。

視点移動の自由度を持たせた動画を撮影する目的で、16 眼カメラによる撮像系が構築されている [38]。この装置では、16 台の小型カメラを、各レンズの光軸を平行にして  $4 \times 4$  の正方格子状に配置している (図 2.22)。カメラの主点位置も含めた個体差の補正については、実時間処理の実現のため、厳密な処理は行わず、16 枚の画像の対応点 (手動で選択) が規則的に並ぶように平行移動を行なっている。また、カメラの画角は一定とし、合成画像の画角もこれと同じに設定している。

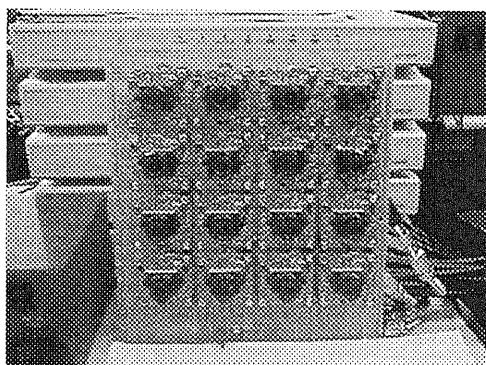


図 2.22: 16 眼カメラ [38]

### 2.5.4 各方式の比較

以上、種々の多視点撮影方式の中から、3次元空間や物体を記述するための光線の取得や、光線記述に基づく画像生成のための利用の実例を紹介した。しかし、これまでの研究では、上記の各方式のいずれについても、光線情報として4次元情報空間に記録したり、任意視点画像を生成したりした例が示されているだけで、各方式の利点や問題点、あるいは適する用途などに関する議論は十分になされていない。そこで本節では、前節に紹介した方式の相互比較を行なう。

まず、各方式の比較項目とその意味について明らかにしておく。

#### ● カメラの個数

広い意味での多眼撮影には、多数のカメラを用いる方式 (狭義の多眼カメラ) と、単一のカメラを移動させながら撮影を行なう方式 (移動単眼カメラ) がある。前者は、多視点での撮影を同時に行なえるため、動的な対象にも利用することができる。一方、後者は、単一のカメラを用いるため、多眼カメラのような個々のカメラの個体差を考慮する必要がない点が利点として挙げられる。

#### ● カメラの位置・方向情報の取得方法

前述のように、多視点での撮影においては、カメラの位置および方向の情報を何らかの形で取得する必要があり、特に移動単眼カメラによる撮影の場合には重要な問題である。

そのための手段の一つとして、カメラの動作を制御できる機構を有する装置の利用が考えられる。このアプローチでは、特殊な機構を必要とし、またカメラの移動可能範囲が制限されるが、高い精度でカメラパラメータを得ることができる。特に、規則的な視点配置を実現する場合には有効である。

一方、上記のような特殊な装置を用いず、撮影された画像からの推定や、位置・方向センサを用いた計測などにより、カメラパラメータを取得するアプローチも見られる。この場合、カメラの動作を制御できる撮像系と比較して、得られるカメラパラメータの精度は低下するが、視点配置の自由度が高く、広範囲での光線取得が可能である。

#### ●カメラ配置

詳細は第4章で論じるが、多眼撮影の本質は、対象から発せられる光線の標本化である。どのような光線が標本化されるかについては、カメラの配置方法(位置関係、密度)によって異なってくる。

また、前章で挙げた様々な配置方法は、一般的に、対象を取り囲むような配置とそうでない配置とに大別することができ、この違いによって用途が異なってくる。前者の場合、限られた少数の物体を様々な方向から見回すような用途に限られる。これに対し、後者は、少数の物体だけでなく、より広範囲の空間の全体または一部を対象とすることができる。

以上の3つの項目に注目し、前節で挙げた(1)~(5)の各方式を比較した結果を、表2.2にまとめておく。

表 2.2: 多眼撮影による光線取得の比較

方式	カメラ台数	カメラの位置・方向	視点配置	用途
(1)	1台	既知(制御)	光軸に垂直な平面	静止物体・空間
(2)	1台	既知(制御)	光軸に平行な平面	静止空間
(3)	1台	未知	任意	静止物体・空間
(4)	1台	厳密には未知	擬似的な球面	静止物体
(5)	多数	既知(固定)	光軸に垂直な平面	動物体・空間

3つの項目のうち、カメラの台数(1台か複数台か)およびカメラの位置・方向情報の取得方法(装置による制御か推定か)については、目的によってある程度決まってくる。これに対し、カメラの配置方法は、用途だけでなく、どのような光線が取得できるかという観点からも考える必要がある。

5つの方式のうち、(3)以外は、規則的なカメラ配置により撮影を行なっている。このうち方式(1)と(5)は、カメラの個数や位置・方向の情報を取得する方法は異なっているが、視点配置はいずれも、カメラを同じ方向に向けて上下左右に並べたものとなっている。また方式(4)は、使用する装置の特性により「擬似的な球面」となっているが、厳密な球面上に配置することも技術的には困難ではない。以上を踏まえると、これまでに提案されている規則的な視点配置方法は、次の3種類に分類できる。

#### ●マトリックス型…(1), (5)

全ての視点をレンズの光軸に垂直な平面上に配置する方式。

#### ●ウォークスルー型…(2)

全ての視点をレンズの光軸に平行な平面上に配置する方式。

#### ●球面移動型…(4)

全ての視点を物体を取り囲む球面上に配置し、カメラの光軸を常に球面の中心に向ける方式。

これらの方式を用いることで、4次元情報空間のどの部分空間に属する光線群が取得されるかについては、第4章にて詳細な議論を行なう。

## 2.6 本章のまとめ

本章では、3次元空間情報を光線の集合として表現する手法の技術的背景および現在までの研究動向について明らかにした。本手法は、3次元画像通信の分野で、多様な入出力方式に対する統一的なデータ記述法として、また3次元CGの分野では、個々のImage-Based Rendering技術を一般化した概念として、時をほぼ同じくして提唱された。そして現在では、双方の分野で研究が進められている。

光線情報表現の研究動向に関しては、光線の取得、記述、圧縮、画像生成の4つ要素技術について概観した。光線の情報は時間変化を除いて本質的に5次元の情報となるが、光の伝搬経路方向の冗長性が高いと考えられるため、この成分を除いた4次元情報として効率的に記述する手法が提案されている。圧縮については、2次元画像符号化で用いられる手法をそのまま、もしくは拡張した手法を適用した例が見られる。画像生成については、実時間での合成を実現するために、必要なメモリ容量の削減やCG技術の適用などが試みられている。

実写による光線取得の手段としては、現状では多数の視点から2次元画像を撮影するのが一般的である。しかし、視点配置には様々な方式が見られ、それぞれの方式によってどのような光線が取得されるかについては、十分な議論がなされていない。

そこで、光線情報取得を目的として現在までに提案されている様々な多視点撮影方式を取り上げ、それらの比較を行なった。特に、カメラ配置によって、適する被写体の性質(動きの有無、物体が空間か、など)だけでなく、標本化される光線も変わることから、カメラ配置に重点を置いて比較を行なった結果、既存のカメラ配置はマトリックス型、ウォークスルー型、球面移動型の3種類に大別されることが明らかになった。光線の標本化に関する議論は第4章で行なうが、ここでは本章の結果に基づいて3種類のカメラ配置方式を取り上げる。

## 参考文献

- [1] 大越孝敬:『三次元画像工学』, 朝倉書店 (1991).
- [2] C. Kennedy: "The Development and Use of Stereo Photography for Educational Purposes", Journal of SMPTE, Vol.26, No.1 (1936).
- [3] 井上益孝, 濱岸五郎, 坂田政弘, 山下敦弘, 増谷 健: "シフトイメージスプリッタ方式SXGA メガネなし 3D ディスプレイ", 3次元画像コンファレンス 2000, 4-1 (2000).
- [4] 猪口和隆, 能瀬博康, 森島英樹, 谷口尚郷, 松村 進: "広い垂直視域を有するメガネなし 3D ディスプレイ (リアクロスレンチ方式)", 3次元画像コンファレンス'98, 1-5 (1998).
- [5] 洗井 淳, 星野春男, 岡野文男, 湯山一郎: "屈折率分布レンズを用いたインテグラルフォトグラフィ撮像実験", 3次元画像コンファレンス'98, 3-2 (1998).
- [6] 杉原敏昭, 宮里 勉, 中津良平: "焦点調節補償機能を有する HMD: 3DDAC Mk.4", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.1, pp.261-268 (1999).
- [7] 稲見昌彦, 川上直樹, 柳田康幸, 前田太郎, 舘 暲: "マクスウェル光学系による広視野立体ディスプレイ", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.1, pp.287-294 (1999).
- [8] 大村克之, 志和新一, 宮里 勉: "リアルタイム視線検出を利用した焦点調節補償型立体表示装置", 3次元画像コンファレンス'96, 4-7 (1996).

- [9] 梶木善裕, 吉川 浩, 本田捷夫: “集束化光源列 (FLA) による超多眼式立体ディスプレイ”, 3次元画像コンファレンス'96, 4-4 (1996).
- [10] 須藤敏行, 尾坂 勉, 谷口尚郷: “光線再現方式による3次元像再生”, 3次元画像コンファレンス 2000, 4-4 (2000).
- [11] 阪本邦夫, 上田裕昭, 高橋秀也, 志水英二: “全周型リアルタイム3次元ディスプレイの一方式”, 3次元画像コンファレンス'96, 4-2 (1996).
- [12] N. Hashimoto, S. Morokawa and K. Kitamura: “Real-Time Holography using the High-resolution LCTV-SLM”, SPIE Proceedings, Vol.1461, pp.291-302 (1991).
- [13] P. St. Hilaire, S. A. Benton, M. Lucente, M. L. Jepsen, J. Kollin, H. Yoshikawa and J. Underkoffler: “Electronic Display System for Computational Holography”, SPIE Proceedings, Vol.1212, pp.174-182 (1990).
- [14] P. St. Hilaire, S. A. Benton, M. Lucente and P. M. Hubel: “Color images with the MIT holographic video display”, SPIE Proceedings, Vol.1667, pp.73-84 (1992).
- [15] 高野邦彦, 金子傑周, 南 典宏, 佐藤甲癸: “白色光によるカラーホログラフィ立体テレビの検討”, 3次元画像コンファレンス 2000, 6-5 (2000).
- [16] 原島 博, 藤井俊彰, 苗村 健: “三次元統合画像通信の構想”, 電子情報通信学会技術研究報告, HC92-58 (1993).
- [17] 藤井俊彰: “3次元統合画像符号化の基礎検討”, 東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻博士論文 (1994).
- [18] A. Watt and F. Policarpo: *The Computer Image*, Addison-Wesley (1998).
- [19] A. Lippman: “Movie Maps: An Application of the Optical Videodisc to Computer Graphics”, *Computer Graphics* (Proceedings of SIGGRAPH'80), pp.32-43 (1980).
- [20] S. E. Chen: “QuickTime VR – An Image-Based Approach to Virtual Environment Navigation –”, *Computer Graphics* (Proceedings of SIGGRAPH'95) (1995).
- [21] E. H. Adelson and J. R. Bergen: “The Plenoptic Function and the Elements of Early Vision,” *Computational Models of Visual Processing*, Chap.1, Edited by M. Landy and J. A. Movshon, The MIT Press (1991).
- [22] L. McMillan and G. Bishop, “Plenoptic Modeling: An Image-Based Rendering System”, *Computer Graphics* (Proceedings of SIGGRAPH'95), pp.39-46 (1995).
- [23] M. Levoy and P. Hanrahan, “Light Field Rendering”, *Computer Graphics* (Proceedings of SIGGRAPH'96), pp.21-30 (1996).
- [24] S. Gortler, R. Grzeszczuk, R. Szeliski and M. Cohen: “The Lumigraph”, Proceedings of ACM SIGGRAPH'96, pp.43-54 (1996).
- [25] A. Isaksen, L. McMillan and S. J. Gortler: “Dynamically Reparameterized Light Fields”, Proceedings of ACM SIGGRAPH2000 (2000).

- [26] 苗村 健, 柳澤健之, 金子正秀, 原島 博: “光線情報による3次元実空間の効率的記述へ向けた光線空間射影法”, 電子情報通信学会技術研究報告, IE95-119 (1996).
- [27] S. E. Chen and L. Williams: “View Interpolation for Image Synthesis”, *Computer Graphics* (Proceedings of SIGGRAPH'93), pp.279-288 (1993).
- [28] 片山昭宏, 田中宏一良, 押野隆弘, 田村秀行: “多視点画像の補間・再構成による視点追従型立体画像表示法”, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol.J79-D-II, No.5, pp.803-811 (1996).
- [29] 亀井克之, 丸山 稔, 瀬尾和男: “実環境再現を目的とした部分画像の検索転写による情景画像の生成”, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol.J81-D-II, No.2, pp.331-341 (1998).
- [30] M. Magnor and B. Girod: “Hierarchical Coding of Light Fields with Disparity Maps”, Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP-99), Vol.3, pp.334-338 (1999).
- [31] 高野孝英, 苗村 健, 金子正秀, 原島 博: “光線情報に基づく空間符号化—光線情報の局所的展開—”, 映像情報メディア学会誌, Vol.52, No.9, pp.1321-1327 (1998).
- [32] 石川彰夫, 苗村 健, 金子正秀, 原島 博: “光線記述に基づく3次元実写空間のインタラクティブ操作”, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol.J81-D-II, No.5, pp.850-860 (1998).
- [33] 石川彰夫, 苗村 健, 金子正秀, 原島 博: “光線空間情報取得のための移動単眼撮像システムの開発”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, D-300 (1996).
- [34] 村上智一, 苗村 健, 金子正秀, 原島 博, 市川忠嗣: “逐次的カメラ制御による光線情報の効率的サンプリング”, 映像情報メディア学会誌, Vol.52, No.9, pp.1366-1369 (1998).
- [35] T. Fujii, T. Kimoto and M. Tanimoto: “A New Acquisition System of Arbitrary Ray-space”, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems VI, Proceedings of SPIE, Vol.3639, pp.314-320 (1999).
- [36] 山崎 貴, 竹内敬亮, 苗村 健, 原島 博: “QuickTime VR オブジェクトムービーからの光線情報取得”, 1998年電子情報通信学会総合大会, D-11-194 (1998).
- [37] 馬場健介, 苗村 健, 金子正秀, 原島 博: “光線情報取得のための多眼カメラパラメータの同時推定”, 映像情報メディア学会誌, Vol.52, No.3, pp.345-355 (1998).
- [38] 苗村 健, 原島 博: “Video-Based Rendering の基礎検討”, 3次元画像コンファレンス'98, 5-6 (1998).

## 第3章

---

# 距離画像からの光線情報の取得



### 3.1 はじめに

実在の対象を3次元的に計算機に入力するための手段としては、前章で紹介した多視点での2次元画像撮影の他に、3次元形状計測装置(レンジファインダ)が挙げられる。レンジファインダは、現状では、カメラと比較すると一般には馴染みが薄いですが、実物体の形状情報を必要とする用途では広く用いられている。特に近年では、小型化・低価格化、動的な対象の計測、建造物など大型で広範囲にわたる対象の計測など、レンジファインダ技術の発展は著しく、今後は一般にも広く普及していく可能性がある。

光線情報が3次元情報の中立的なデータ形式となるためには、レンジファインダによって得られるデータに対しても、多視点画像と同様に、光線の集合として記録するための技術を確立することが不可欠である。そこで本章では、レンジファインダを光線情報取得の手段として用いることを考え、得られるデータを4次元情報空間に展開する手法や、レンジファインダ特有の問題点について検討を行なう。

## 3.2 距離画像と光線情報

### 3.2.1 距離画像

距離画像(range image)あるいはレンジデータ(range data)とは、一般には2次元画像の各画素に、色情報の代わりに物体表面の奥行き値が記録されたデータのことを指す。具体的には、通常の2次元平面の各画素にある位置から被写体表面までの距離を記録したものや、円筒面上の各画素に中心から被写体表面までの距離を記録したものなどがある。

距離画像自体は特定の入力方式に依存するものではなく、様々な方法により取得することが可能であり、例えば移動単眼カメラにより撮影した時空間画像から奥行き値を推定して距離画像を得ている例もある[3]。しかし、移動単眼カメラや多眼カメラなどの受動的な手法では、位置推定に労力を要する上、現状では精度の高い距離情報の取得が困難である。そのため、距離画像の取得には、対象にレーザ光やパルス光などを照射して能動的な距離計測を行なうレンジファインダが用いられることが多い。

レンジファインダの中には、距離計測と同時に、通常のカメラによる2次元カラー画像の撮影も行ない、「奥行き情報付き2次元画像」の形のデータを取得できる装置も存在する。そこで、このようなレンジファインダを用いて取得される、物体の距離画像とカラー画像のセットを、光線情報として利用することを考える。なお、以下では、特に断りのない限り、カラー画像と距離画像がセットになったデータを、単に「距離画像」と記す。

### 3.2.2 3次元形状計測の原理

レンジファインダには様々な計測方式が存在する[1]が、ここでは広く用いられている計測方式として、スリット光投影法もしくは光切断法と呼ばれる方式について述べる。この方式は、被写体の表面にレーザによるスリット光を投影し、その投影像を観測して、三角測量の原理により距離を算出するものである。

スリット光は点光源から光軸方向に放射状に広がるものを使用する。三角測量を行なうためには、カメラで撮影した画像の1本の走査線上で、スリット像が高々1箇所にしかなれないようにする必要がある。この条件を満たすために、光源とカメラレンズの主点を結ぶ直線が走査線に平行になり、かつスリットの長さ方向がこの直線に直交するような配置にする(図3.1参照)。

なお、カラー画像に関しては、光源に隣接してカメラを配置し、近似的にスリットを投射した位置から見た画像を撮影するものや、スリット像を観察するカメラで同時に撮影を行なうものなどがある。

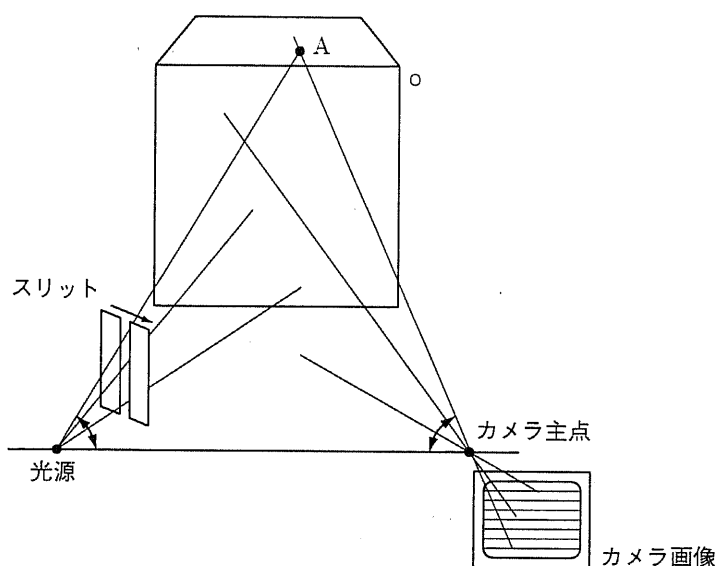


図 3.1: スリット光投影法による距離計測

### 3.2.3 本研究で用いるレンジファインダと距離画像

本研究で用いるレンジファインダは、Cyberware Laboratory Inc. 製 MODEL3030/PS 3次元ディジタルイザである。本装置の外観写真を図 3.2 に示す。

この装置は円筒型レンジファインダであり、物体の上下面を除く全周の距離計測が可能である。また、距離計測と同時に、カラー CCD カメラによる画像撮影が行なわれ、被写体の表面色情報も取得することができる。測定原理はスリット光投影方式で、スリット光は垂直方向に 0.8mm 間隔で最大 512 点に標本化され、各点において、ステージ中心軸からの距離が  $1\mu\text{m}$  の精度で計測される。撮像部が自動的に回転しながら順次計測を行なうことにより、物体の上下面を除く全周の形状と表面色を得ることができる。計測は、撮像部が 1 周する間に、等間隔に 512 点または 1024 点で行なわれる。すなわち、経度方向に 512 または 1024 点、高さ方向に最大 512 点の標本点における距離情報が得られる。

この装置により得られる距離画像およびカラー画像の一例を図 3.3 に示す。縦軸が垂直方向の位置、横軸が経度に相当する。この画像では、物体が存在する範囲を切り出してあり、また距離データについては、最大値が 255 となるように距離の値を正規化し、その値を 256 階調グレースケールの輝度値と見なして表現している (白に近いほど距離が大きい)。

### 3.2.4 光線情報としての距離画像

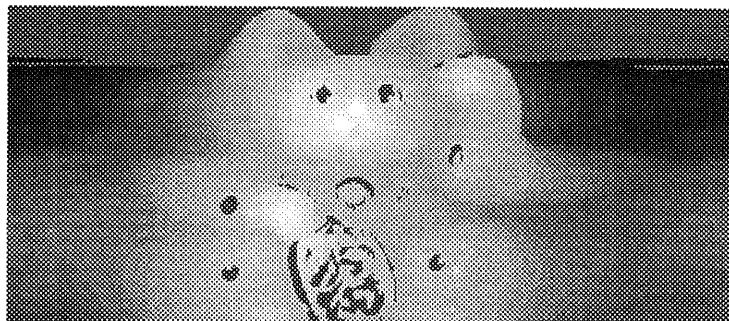
距離画像を光線の集合として見た場合に、どのような光線が取得されているかについて、ここで考察する。具体的には、距離画像に対応する光線の通過位置と伝搬方向を、レンジファインダの測定原理に基づいて考える。

まず、被写体表面上の各点では、距離計測と表面色の撮影が行なわれており、これは被写体表面から発する光線の通過位置と色を求めることに相当する。次に、光線の伝搬方向について見ると、距離計測の際に、被写体表面のスリット像上の各点について、その点で反射されてカメラに到達する 1 本の光線のみを捕らえている (図 3.4 参照)。以上より、3次元形状計測装置によって得られるデータは、被写体表面上の 1 点につき 1 方向の光線の色を記録していることになる。

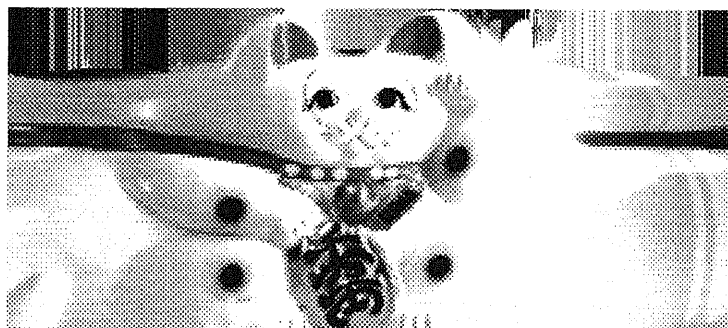
このため、視点位置によって色が変化するような被写体の場合には、現状のレンジファインダでは不十分である。しかし、ある点の色が視点位置によらず不変であるという Lambert 則が、物体表面の全ての点



図 3.2: レンジファインダの外観



(a) 距離画像



(b) カラー画像

図 3.3: レンジファインダにより得られるデータ

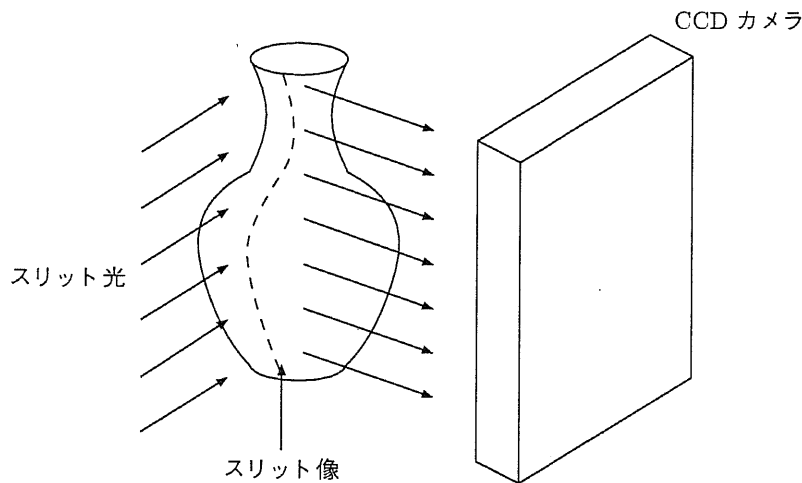


図 3.4: レンジファインダによる光線の標準化

において成立する場合には、ある点から発せられる全ての方向の光線の色が、距離画像に記録されたその点の色に等しくなるため、結果的に、各点から発せられた全ての光線の情報を得ていることになる。よって、Lambert 則が成り立つとみなせる被写体であれば、レンジファインダにより得られる光線情報は、角度成分については無限の解像度を有すると考えることができる。

### 3.3 距離画像の 4 次元光線情報への変換

#### 3.3.1 4 次元情報空間への展開の手順

以下では、光線情報を球面記録方式に基づいて記録することを考える。被写体が Lambert 則を満足する物体であると仮定すると、以下の手順により光線情報が得られる。

1. ある標本点  $(X, Y, Z)$  において  $(\theta, \phi)$  方向に伝搬する光線に対し、(2.6) 式により  $P, Q$  を計算する。
2. 4 次元空間内の点  $(P, Q, \theta, \phi)$  に、標本点  $(X, Y, Z)$  の色情報を記録する。
3. 1.~2. の操作を、全ての  $(\theta, \phi)$  について繰り返す。
4. 1.~3. の操作を、全ての標本点について繰り返す。

ただし、円筒型など、物体を取り囲む形で計測して得られる距離画像では、異なる 2 本以上の光線が  $PQ$  平面上の同一の点に記録されることがある。例えば図 3.5 の場合、点 B から発せられて  $B \rightarrow A$  の方向に進む光線は、 $PQ$  平面において、点 A から発せられて同じ方向に進む光線と同じ点を通過することになるため、4 次元空間内の点  $(P, Q, \theta, \phi)$  に記録される光線が一意に定まらない。前節の 1.~3. の操作を機械的行なった場合、図 3.5 を例にとると、本来であれば点 A の情報が記録されるべきところに、点 B の情報が記録される可能性がある。このような光線情報を用いて新たな画像を合成すると、本来見えるべき部分ではなく、その裏側が見えてしまう。

第 2 章で述べた、4 次元情報空間における  $PQR$  座標系の定義によれば、 $R$  軸は光線に平行で、光線の伝搬する向きを正の向きとする軸であった。したがって、 $R$  座標値が大きい点の方が、観察者から見て、より手前にある点ということになる。

そこで、全周型の距離画像を用いる場合には、 $PQ$  平面に記録される光線を一意に定めるため、 $P, Q$  に加えて、 $R$  の値も計算しておく。4 次元空間内の点  $(P, Q, \theta, \phi)$  に記録される光線が複数存在する場合には、 $R$  座標の値が大きい光線を上書きすることにより、光線情報が正しく記録される。

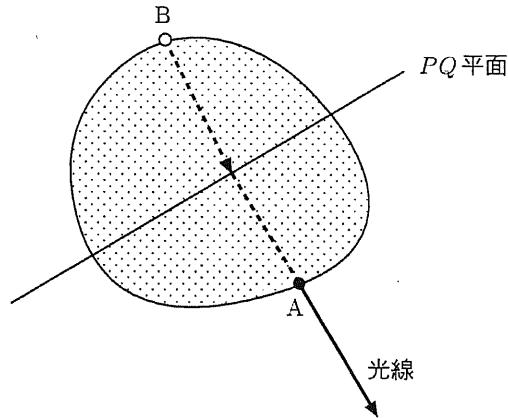


図 3.5: 異なる光線が基準面上の同一の点に記録される例

### 3.3.2 実験

3.2.3節で紹介した円筒型レンジファインダを用いて物体の距離画像を取得し、これを光線の集まりと見なして、上記の手順により4次元情報空間に展開する。次いで、4次元情報空間に記録された情報を用いて、物体の任意の見え方を合成する。

本装置で得られる被写体表面上の標本点 $(\psi, Y)$ の、装置中心からの距離を $r$ とすると、この点の位置 $X$ および $Z$ 座標は次のように表される。

$$X = r \sin \psi, \quad Z = r \cos \psi \quad (3.1)$$

これを(2.6)式に代入して書き下すと、 $P, Q, R$ は次のようになる。

$$P = r \sin(\psi - \theta) \quad (3.2)$$

$$Q = Y \cos \phi - r \cos(\psi - \theta) \sin \phi \quad (3.3)$$

$$R = Y \sin \phi + r \sin(\psi - \theta) \cos \phi \quad (3.4)$$

全ての $\psi, Y, \theta, \phi$ について、上式により $P, Q, R$ を求め、4次元情報空間内の点 $(P, Q, \theta, \phi)$ に、 $R$ がより大きい光線を順次上書きしていくことにより、光線情報を得ることができる。

表 3.1:  $P, Q, \theta, \phi$ の解像度

$P$	$Q$	$\theta$	$\phi$
1mm/pixel	2mm/pixel	6°/pixel	6°/pixel
128pixel	90pixel	60pixel	30pixel

$P, Q, \theta, \phi$ の解像度を表3.1のように設定し、得られた光線情報( $P\theta$ 平面)の一部を図3.6に示す。横軸が $P$ 、縦軸が $\theta$ を表す。また、図3.6に示した光線情報を用いて、視点を変動しながら眺めた画像を合成した例を図3.7に示す。

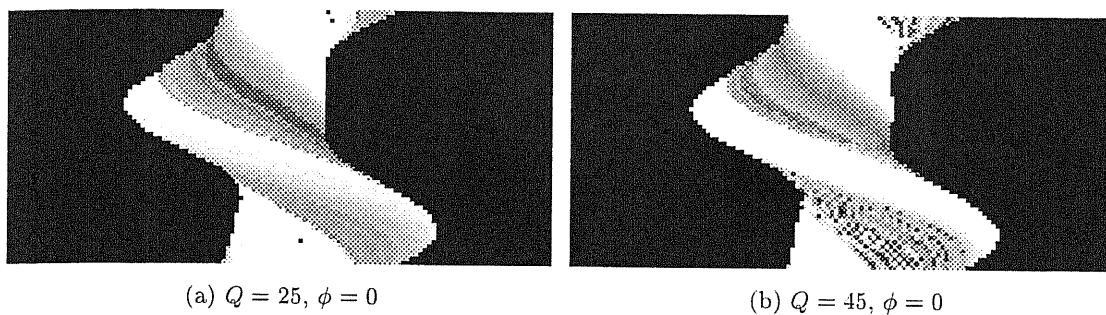


図 3.6: 球面記録方式に基づいて取得した光線情報

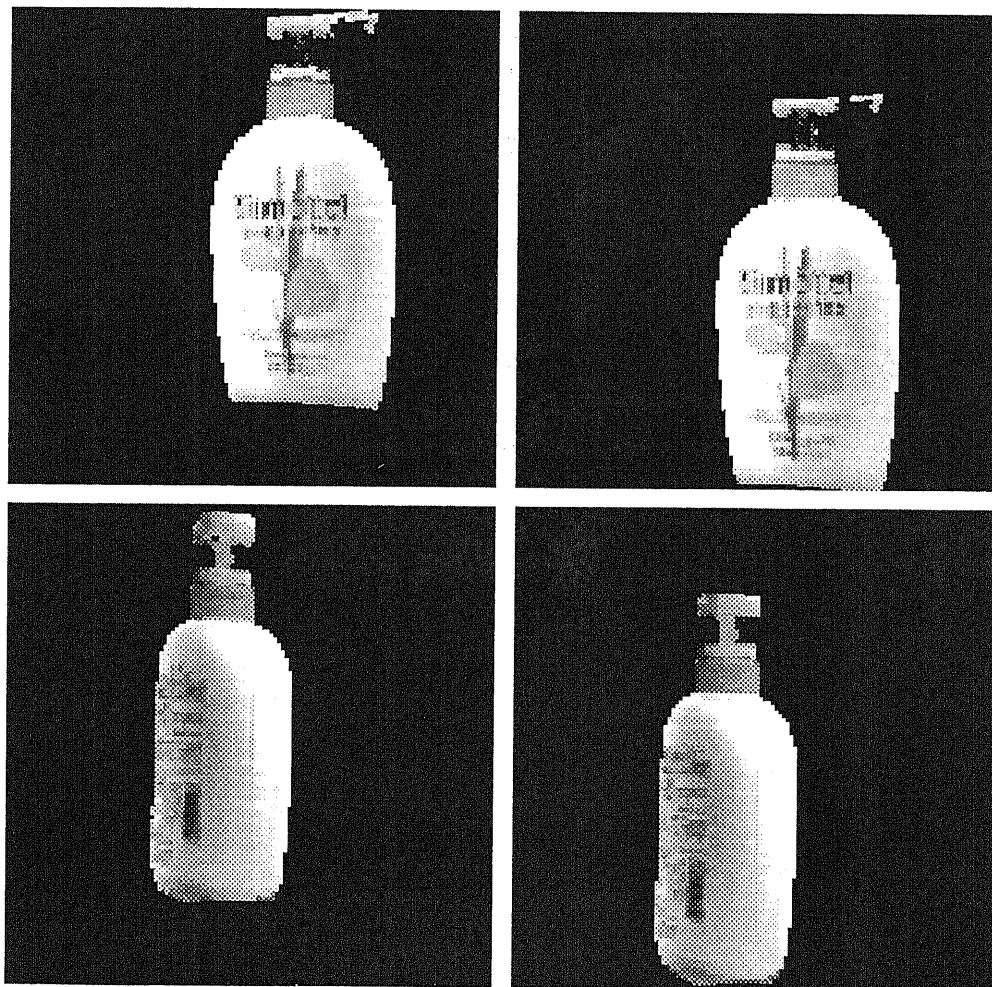


図 3.7: 図 3.6 の光線情報を用いて合成した画像の例

### 3.4 光線情報の補間処理

#### 3.4.1 補間処理の必要性

本研究で用いているレンジファインダの標本点数は、円周方向が1周につき512点または1024点、高さ方向が最大512点である。標本点数が $1024 \times 512$ の場合の水平方向の標本間隔は、半径10cmの物体で約0.6mm/pixelとなる。また、垂直方向の解像度は0.8mm/pixelである。前章の実験では、 $P$ 、 $Q$ の解像度をそれぞれ1mm/pixel, 2mm/pixel程度としていたが、このような解像度設定で得られた光線情報を用いて合成した画像は、テクスチャがぼやけたり、輪郭が滑らかでなくなるなど、品質が高いとはいえない。

しかし、 $P$ 、 $Q$ の解像度を高くして、距離画像の解像度を上回ると、新たな問題が生じる。4次元情報空間の標本間隔が距離画像に比較して細かい場合、距離画像の各画素を4次元情報空間にマッピングすると、色情報不定の画素が多数発生する(図3.8(a)参照)。このようなデータを用いて3次元画像を再生すると、オブジェクト表面に多数のひび割れが入ってしまう。このような場合には、4次元情報空間内の各点を、元の距離画像に逆マッピングし、その点の色を記録していけば、色情報不定の点は生じない(図3.8(b)参照)。

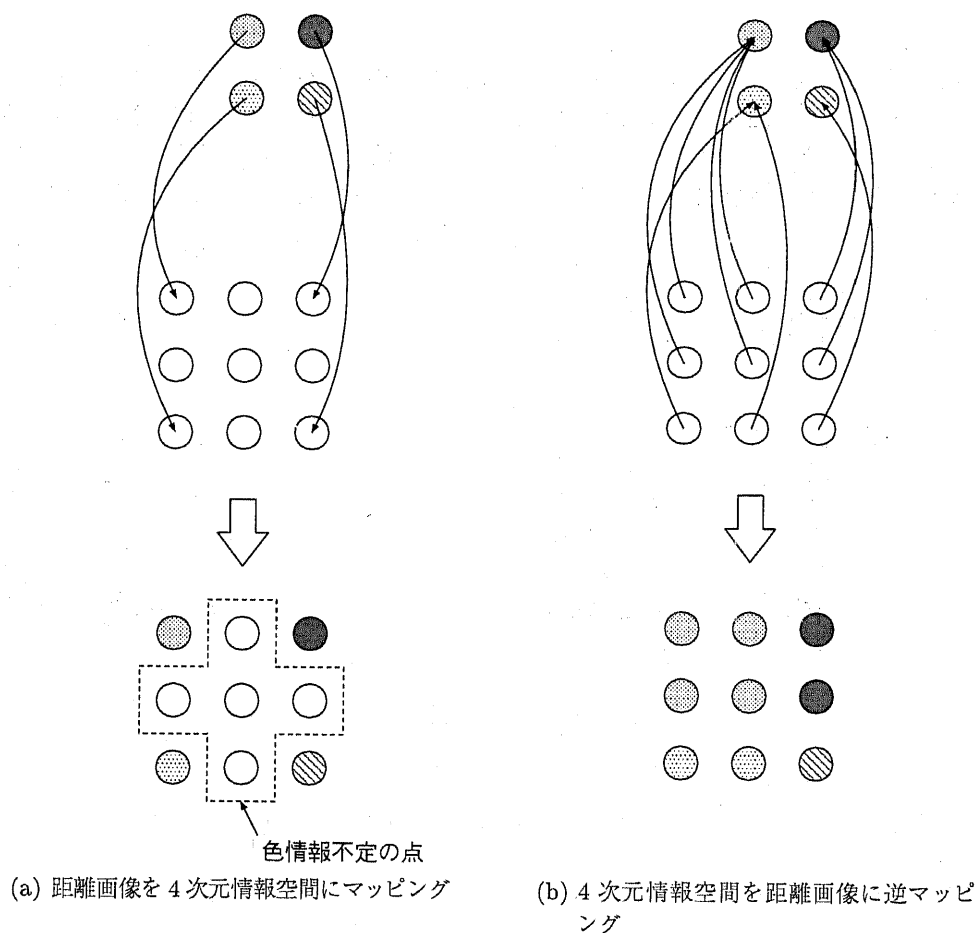


図3.8: 距離画像情報の4次元情報空間への展開

しかし、そのためには、 $P$ 、 $Q$ から、(3.2), (3.3) 式に基づいて、 $\psi$ ,  $Y$ を求めなければならない(球面記録方式の場合)。 $r$ は $\psi$ ,  $Y$ により一意に定まる値であるが、 $\psi$ ,  $Y$ の解析関数ではないため、(3.2), (3.3) 式から解析的に $\psi$ ,  $Y$ を求めることはできない。そのため、全ての $(\psi, Y)$ について、 $r(\psi, Y)$ および $\psi$ ,  $Y$ を(3.2), (3.3) 式に代入し、両式ともに成り立つものを探索することになり、処理に膨大な時間を要する。そ

ここで、レンジファインダで得られたデータを4次元情報空間にマッピングした後、データが得られていない点については補間を行なうことを考える。

距離画像の解像度が光線パラメータの解像度に比べて低い場合、4次元情報空間内のデータがバースト的に抜けることはなく、孤立的な輝度値不定の点が4次元情報空間内に散在する。そのため、輝度値不定の点に対して、その近傍の点の情報を用いた補間が可能になると考えられる。どの段階で補間を行なうかについては、次の2通りのアプローチが考えられる。

1. 3次元構造情報に基づく、距離画像のレベルでの補間。
2. 3次元構造情報を考慮しない、4次元情報空間の中での補間。

ここでは、1.として、距離データおよび色データの線形補間により距離画像の標本点数を疑似的に増すこと(サンプルアップ)による補間を、また2.としては、4次元情報空間の2次元断面を画像と見なし、これに対してメディアンフィルタ処理を施す補間を、それぞれ試みる。

### 3.4.2 距離・色情報の線形内挿

実在する標本点の間を、水平方向に  $N_h$  等分、垂直方向に  $N_v$  等分した各点に、距離を色を補間して疑似的な標本点を内挿し、解像度を見かけ上  $N_h \times N_v$  倍にする。その上で、実在の標本点と内挿した標本点を合わせた全ての点について、前節にて行なったのと同様にして、光線情報を得る。

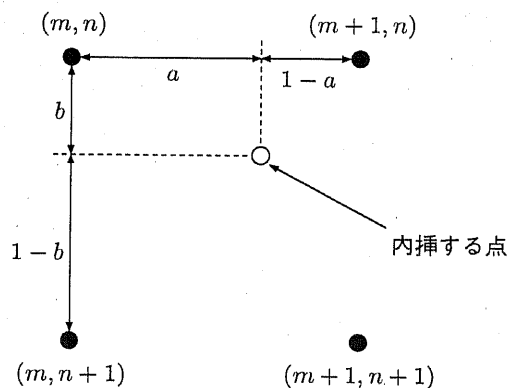


図 3.9: 双一次補間

距離および色の補間には、双一次補間を用いる。双一次補間とは、点  $(m, n)$  における画素値を  $f(m, n)$  とするとき、図 3.9 のように、4つの画素に囲まれた点の画素値を、

$$f(m+a, n+b) = (1-a)(1-b)f(m, n) + a(1-b)f(m+1, n) + (1-a)bf(m, n+1) + abf(m+1, n+1) \quad (3.5)$$

にて求める補間法である。ここでは、物体表面の色情報およびレンジファインダの中心軸からの距離が、画素値  $f(m, n)$  に相当する。

### 3.4.3 4次元情報空間の2次元断面へのメディアンフィルタ処理

4次元情報空間において、2つのパラメータを一定としたときの2次元断面を考える。この2次元断面を画像と見なすと、距離画像の解像度不足に起因するデータの欠落は、画像にランダムなノイズが乗った状態と考えることができる。ランダムなノイズの除去には、その近傍の画素値の平均値や中央値が広く用いられるが、平均値を用いた場合には画像がぼやけることが問題となる。そこで、4次元情報空間の各2次元断面にメディアンフィルタをかけ、データが欠落した点を除去することを考える。



まず、3.4.2 節で述べたような、距離画像に対する標本点の内挿は行わずに、4次元情報空間へのマッピングを行なう。4次元情報空間の2次元断面の画像の中に、色が記録されていない画素が存在する場合、その画素は、

- 本来であれば色が記録されるべきところが、距離画像のデータが不足するために記録されていない画素。
- 背景領域に属し、初めから色が記録されない画素。

の2通りの可能性がある。そこで、色情報不定の画素を中心とする  $M \times M$  の領域に注目し、その中で背景領域に属する画素が過半数に達した場合には、注目する画素は背景領域に属するものと見なし、フィルタ処理は行なわない。一方、背景領域に属する画素数が半数以下であれば、注目する画素には本来データが記録されるものと判断し、メディアンフィルタ処理を行なう。具体的には、 $M \times M$  画素の中から、背景領域に属する画素を除いた残りを輝度値の順に並べ、その中央値を色情報不定の画素の色とする(図 3.10 参照)。

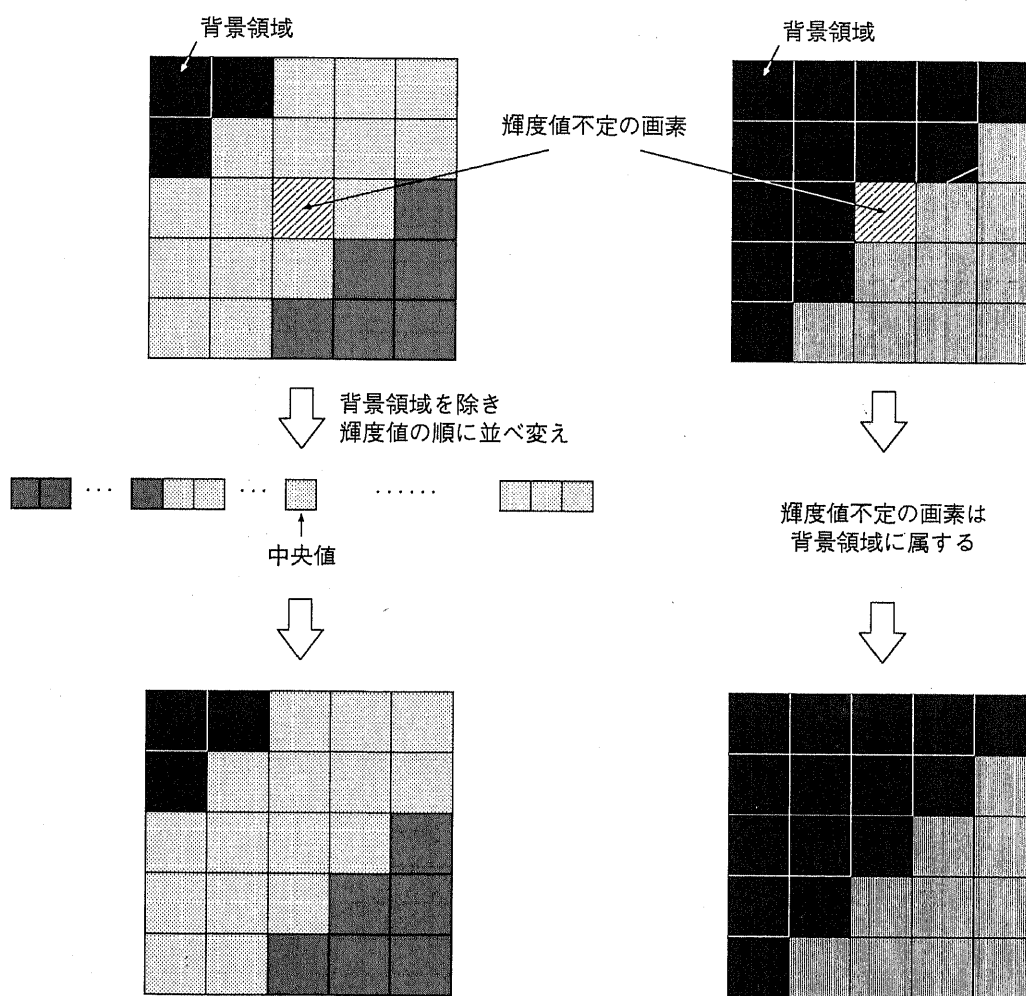


図 3.10: メディアンフィルタ

#### 3.4.4 実験

ここでは、簡単のため、垂直視差がない場合 ( $\phi$  が常に 0) を仮定して実験を行なう。 $P, Q, \theta$  の解像度は表 3.2 のように設定する。

表 3.2: 補間処理実験における  $P$ ,  $Q$ ,  $\theta$  の解像度

$P$	$Q$	$\theta$
0.4mm/pixel	0.8mm/pixel	1°/pixel
256pixel	270pixel	360pixel

距離・色の線形内挿による補間は、4次元情報空間の  $Q$  の解像度が距離画像の垂直解像度に等しいことから、水平方向についてのみ行ない、距離画像の水平(円周方向)解像度を疑似的に元の2倍にする。また、メディアンフィルタ処理については、ウィンドウサイズを  $3 \times 3$  ( $M=3$ ) とする。

図 3.11 に、補間処理の前後の光線情報 ( $P\theta$  平面) および画像の合成結果を示す。補間前には、4次元情報空間の中にデータが記録されていない点があり、そのために合成結果にひび割れが生じていたが、補間処理によってこれらの問題は解消されている。

この例では2つの補間方式に顕著な差は認められていないが、メディアンフィルタによる補間ではデータ欠落部分だけに処理を施すのに対し、距離・色の線形補間ではデータ欠落の有無に関わらず一様に処理を施すため、同程度の補間結果でも処理に時間を要すると考えられる。特に、データ欠落部分が少ない場合には、その差が顕著になることが予想される。

また、この例には現れていないが、距離・色の補間を行なうと、穴が空いた構造を持つ被写体に対して、穴の部分にもデータを内挿するため、誤った光線情報を生成する可能性がある(図 3.12 参照)。これに対し、メディアンフィルタによる補間は、元々データ欠落部分に対してしか補間を行なわないため、穴が空いた部分において誤った補間が行なわれることはない。

以上の点を考慮すると、距離画像を4次元情報空間に展開し、そのデータに対してメディアンフィルタをかける補間の方が有利であると考えられる。

### 3.5 光線記述を用いた距離画像の融合処理

#### 3.5.1 複数の距離画像の統合

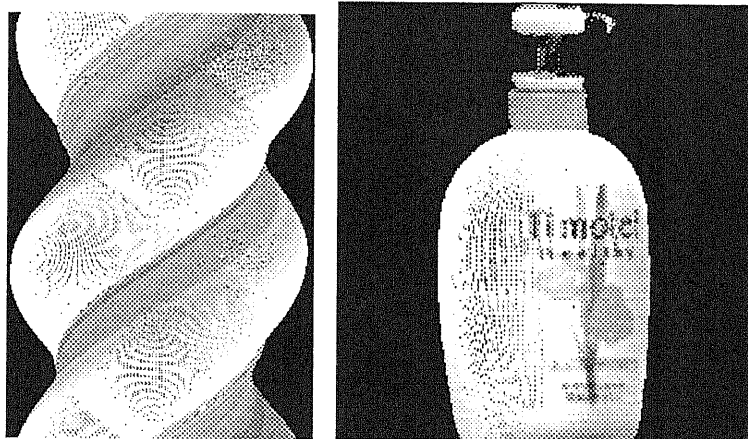
距離画像に特有の問題として、レンジファインダの計測原理に起因する制約により、距離データが部分的に欠落する点が挙げられる。この問題は、同一の物体を、位置や向きを変えながら計測を行なって得られる複数の距離画像をそれぞれ光線情報に変換し、これらを統合することによって対処できる。ただし、そのためには、複数のデータの間で物体の位置と向きを一致させることが必要となる。

ある基準位置に対して、物体が  $Y$  軸を中心として  $\Delta\theta$  回転した後  $X$  軸を中心として  $-\Delta\phi$  回転し、さらに各軸方向に  $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$  だけ平行移動した場合を考える。このとき、物体表面上の点  $(X, Y, Z)$  の移動先を  $(X', Y', Z')$  とすると、 $X', Y', Z'$  は、(2.7) 式で定義した回転行列  $\mathbf{R}_X(\theta)$ ,  $\mathbf{R}_Y(\theta)$  を用いて、以下のように表される。

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \mathbf{R}_X(-\Delta\phi) \mathbf{R}_Y(\Delta\theta) \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

位置や向きを変えて計測を行なうと、 $(X', Y', Z')$  のデータが得られる。そこで、(2.6) 式の代わりに、

$$\begin{pmatrix} P \\ Q \\ R \end{pmatrix} = \mathbf{R}_X(\phi) \mathbf{R}_Y(-\theta) \mathbf{R}_Y(-\Delta\theta) \mathbf{R}_X(\Delta\phi) \left[ \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} \right] \quad (3.7)$$



(a) 補間前



(b) 距離・色の線形内挿による補間結果



(c) メディアンフィルタによる補間結果

図 3.11: 補間処理前後の  $P\theta$  平面 (左) および画像合成結果 (右)

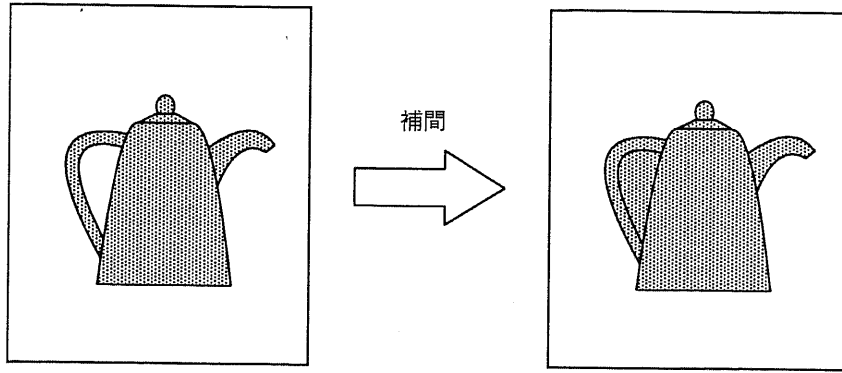


図 3.12: 穴の部分における補間の誤り

を用いて  $P, Q$  を求め、前節に述べた手順に従って 4 次元情報空間に展開することにより、位置と向きを基準に揃えた光線データが得られる。

ここで、行列  $A(\theta, \phi, \Delta\theta, \Delta\phi)$  を次式により定義する。

$$A(\theta, \phi, \Delta\theta, \Delta\phi) = R_X(\phi)R_Y(-\theta)R_Y(-\Delta\theta)R_X(\Delta\phi)R_Y(\theta)R_X(-\phi) \quad (3.8)$$

これを用いて、(3.7) 式は次のように表すことができる。

$$\begin{pmatrix} P \\ Q \\ R \end{pmatrix} = A(\theta, \phi, \Delta\theta, \Delta\phi) \begin{pmatrix} P' \\ Q' \\ R' \end{pmatrix} + R_X(\phi)R_Y(-\theta)R_Y(-\Delta\theta)R_X(\Delta\phi) \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

ただし、 $P', Q', R'$  は、物体に回転・平行移動を施して取得した距離画像をそのまま 4 次元情報空間に記録したときの、位置  $(X', Y', Z')$  の点の  $P, Q, R$  座標値であり、次式により与えられる。

$$\begin{pmatrix} P' \\ Q' \\ R' \end{pmatrix} = R_X(\phi)R_X(-\theta) \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}$$

なお、 $\Delta\phi = 0$ 、すなわち物体を傾けない場合には、

$$R_X(\phi)R_Y(-\theta)R_Y(\Delta\theta) \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta R \end{pmatrix}$$

とおくと、 $P, Q$  は次のようになる。

$$\begin{aligned} P &= -\Delta P + X' \cos(\theta + \Delta\theta) - Z' \sin(\theta - \Delta\theta) \\ Q &= -\Delta Q - X' \cos(\theta + \Delta\theta) \sin \phi + Y' \cos \phi - Z' \cos(\theta + \Delta\theta) \sin \phi \end{aligned} \quad (3.10)$$

このようにして位置を揃えたデータは、同一の完全な光線群を異なる形で標準化したものに相当する。そこで、これらの光線データのうち、 $R$  座標値の大きい (すなわちより手前から発せられた) 光線を上書きしていくことにより、欠損部分が充填された光線データを得ることができる。

### 3.5.2 多眼画像と距離画像の融合

距離画像を光線として記述したデータの新たな利用形態として、他の種類の 3 次元画像入力装置によって得られるデータとの融合が挙げられる。その一例として、水平移動単眼撮像系 (2.5.3 節を参照) を用いて

撮影された風景の多眼画像と、物体の距離画像との融合について紹介する。本研究は、石川彰夫氏 (1997 年修士課程修了) の研究成果である、風景画像の中に物体を表示するアプリケーションにおいて、物体のデータを多視点撮影された画像から距離画像に置き換えたものである。

風景の光線情報を  $f_e(P_e, Q_e, \theta_e, \phi_e)$ 、物体の光線情報を  $f_o(P_o, Q_o, \theta_o, \phi_o)$  とする。ただし、2つの光線情報は同じ位置座標系に基づいて記録されているものとする。物体が風景よりも観察者に近い場合、図 3.13 の模式図に示すように、各軸の原点を移動し、 $f_o$  のデータを  $f_e$  に上書きすることにより、風景内の任意の位置への物体の配置が実現できる。

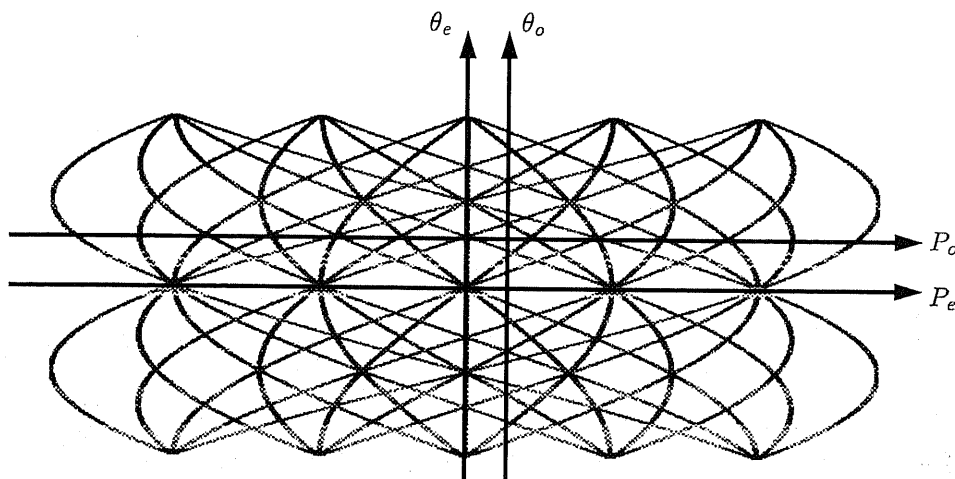


図 3.13: 2つの光線情報の重ね合わせ

物体の任意の位置への配置は、3.5.1 節に述べた、距離画像の光線レベルでの統合処理における位置補正と同様に考えることができる。物体を、 $Y$  軸を中心として  $\Delta\theta$  回転した後  $X$  軸を中心として  $-\Delta\phi$  回転し、さらに原点から  $X, Y, Z$  軸方向にそれぞれ  $(X_o, Y_o, Z_o)$  だけ平行移動して配置するには、

$$P_e = \begin{pmatrix} P_e \\ Q_e \\ R_e \end{pmatrix}, P_o = \begin{pmatrix} P_o \\ Q_o \\ R_o \end{pmatrix}, X_o = \begin{pmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{pmatrix}$$

として、次式により  $P_e, Q_e$  を求め、各  $PQ$  平面について  $f_o(P_o, Q_o, \theta, \phi)$  を  $f_e(P_e, Q_e, \theta, \phi)$  に上書きすれば良い。

$$P_e = R(\theta, \phi) R(-\Delta\theta, -\Delta\phi)^{-1} R(\theta, \phi)^{-1} P_o + R(\theta, \phi) X_o \quad (3.11)$$

ただし、 $R(\theta, \phi)$  は次式で定義する。

$$R(\theta, \phi) = R_X(\phi) R_Y(-\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ -\sin \theta \sin \phi & \cos \phi & -\cos \theta \sin \phi \\ \sin \theta \cos \phi & \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

### 3.5.3 実験

#### 光線情報としての記録

3.3.1 節に述べた手順で、物体の位置と向きを変えて行なった 2 回の計測により得られた 2 つの距離画像を、それぞれ光線として球面記録方式に基づく 4 次元情報空間に展開する。この情報空間における各々のパラメータの分解能は表 3.3 に示す通りである。

表 3.3: 融合処理実験における  $P$ ,  $Q$ ,  $\theta$ ,  $\phi$  の解像度

	$P$	$Q$	$\theta$	$\phi$
(A)	0.26mm/pixel 384pixels	0.94mm/pixel 384pixels	1°/pixel 60pixels	2°/pixel 30pixels
(B)	0.78mm/pixel 256pixels	1.33mm/pixel 180pixels	6°/pixel 60pixels	6°/pixel 30pixels

なお、表 3.3 の設定では、距離画像の空間分解能を上回るため、3.4.3 節に示したメディアンフィルタによる補間処理を行なう。

図 3.14 は、2 つの距離画像をそれぞれ光線として 4 次元情報空間に展開し、そこから透視投影による見え方を再構成した結果である。それぞれの画像で異なる部分のデータが欠落していることがわかる。

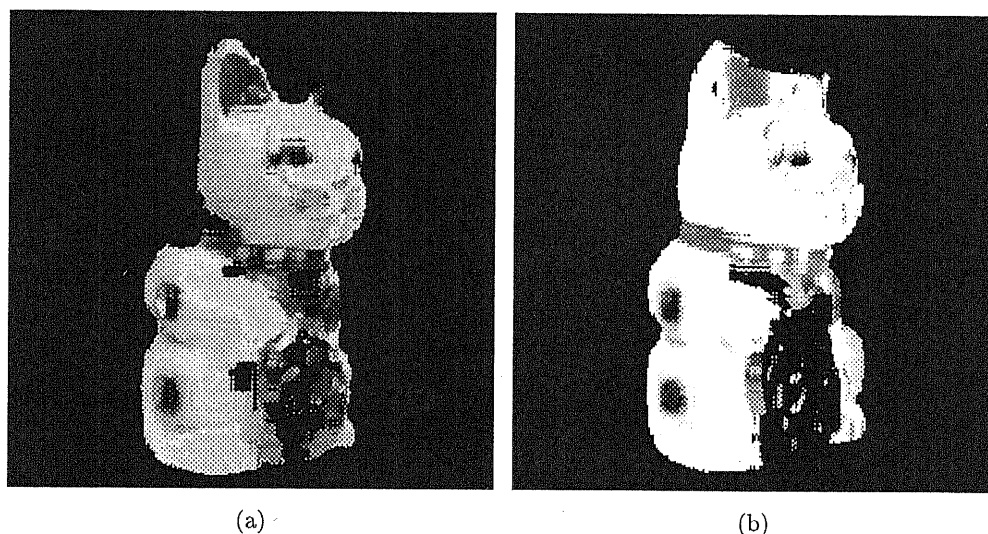


図 3.14: データ統合前の 2 つの距離画像から得た光線情報を用いて生成した画像

## 2 つの距離画像の統合

上記の 2 種類の距離画像を用い、物体の位置情報を予め測定した上で、3.5.1 節に述べた手順で統合し、一つの光線データを得る。各パラメータの分解能は、表 3.3 の (A) のように設定する。

複数のデータに重複して記録された部分の輝度値が等しければ、データの上書きにより完全な光線データが得られるが、輝度値が異なる場合、データの上書きによる統合では、図 3.15(a) に示すように、複数のデータの継ぎ目が目立ち、不自然な再生像になる。なお、図 3.15(a) の合成に用いた光線データは、図 3.14(a) の合成に用いたデータを、図 3.14(b) の合成に用いたデータに上書きしたものである。

そこで、一方のデータにしか色が記録されていない箇所については、その値をそのまま用い、両方に重複して記録されている部分の色は、2 つのデータの値の平均値を用いる。このようにして統合を行なった後、得られた光線データに対してメディアンフィルタをかける。以上の手法により得られた光線データを用いて再構成した画像を図 3.15(b) に示す。輝度値の差が小さくなるため、図 3.15(a) と比較して継ぎ目が目立たなくなっている。

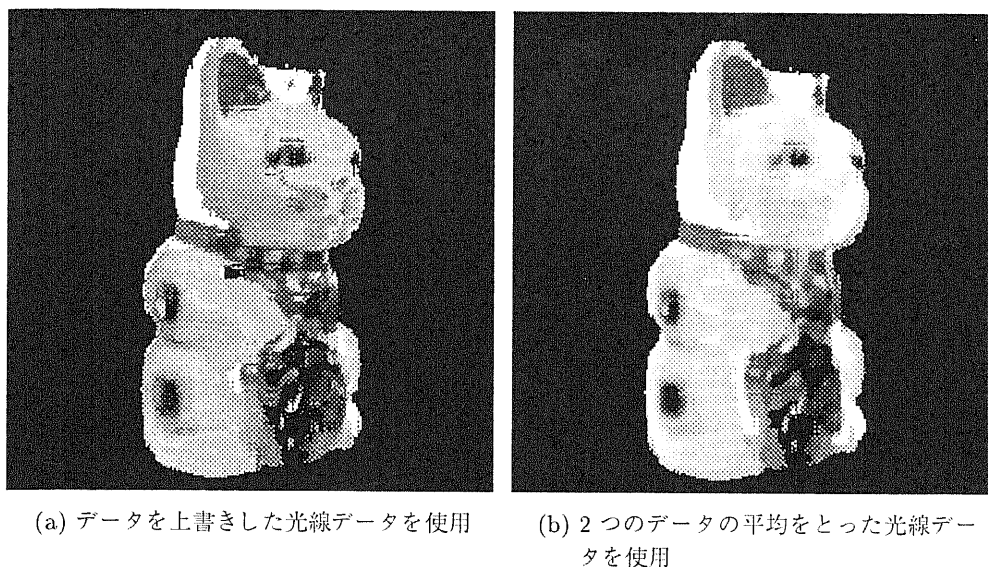


図 3.15: 2つの距離画像を光線レベルで統合したデータから合成した画像

#### 距離画像と多眼画像の融合

次に、同じ距離画像を用いて、多眼画像として得られた風景画像の中への配置を行なう。各パラメータの分解能は、表 3.3 の (B) のように設定する。

多眼画像は、移動単眼撮像系を使用して撮影した。撮影位置は 3cm おきに格子状に並んだ  $5 \times 5$  点とし、1 点につき  $20^\circ$  おきに 9 方向の撮影を行なった。画像 1 枚の大きさは  $640 \times 480$  画素である。多眼画像の一部を図 3.16 に示す。

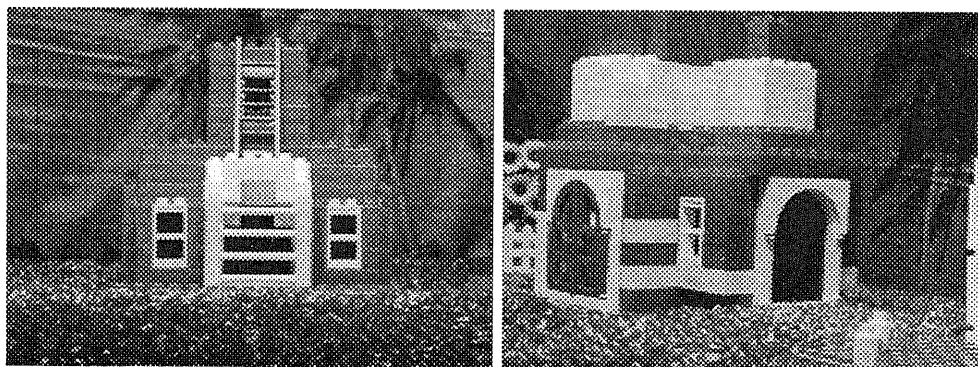


図 3.16: 多眼撮影による風景画像の一部

これらの多眼画像から得られた光線データを図 3.17 に示す。上記のような撮影条件では、このように極めて疎なデータしか得られないため、参照テーブル [4] を作成し、光線情報を予め補間しておくとともに、光線情報からの風景の再構成を少ないメモリ量で実現する。参照テーブルに基づいた光線情報の補間結果を図 3.18 に示す。風景画像の再構成時には、例えば図中の正弦曲線で示した部分が読み出される。

物体が配置された風景を再構成した例を図 3.19 に示す。これらの画像は、物体の向きを変えた上で視点位置と視線方向を変えた様子を再現したものである。ここでは、限られたメモリ量で物体と風景の光線データを読み出すため、物体 (近景) については 4 次元光線情報を用いて垂直視差を再現しているが、風景 (遠景) については垂直視差を無視し、垂直 1 ラインごとの拡大・縮小によって近似している。また、物体と

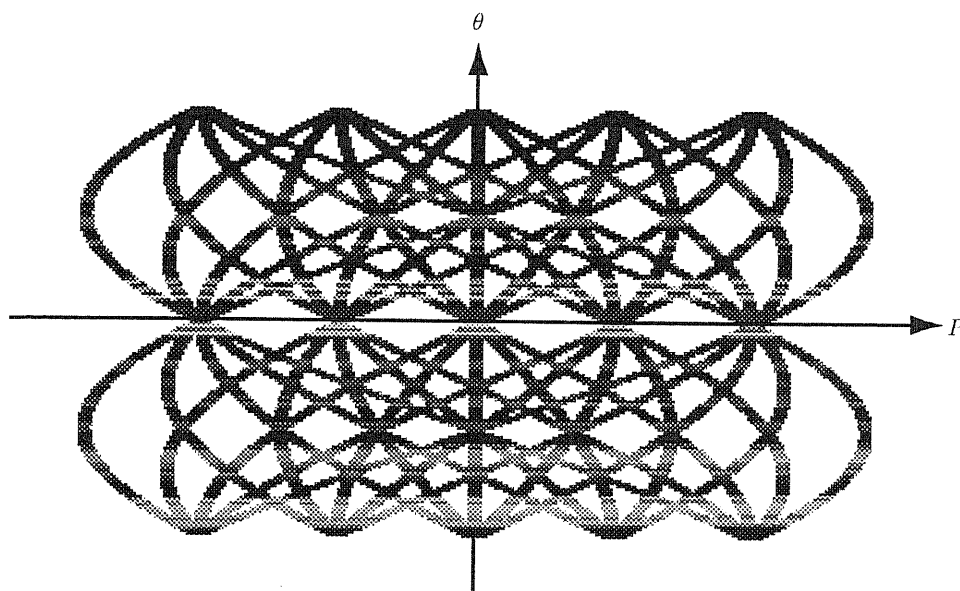


図 3.17: 風景画像を 4 次元情報空間 ( $P\theta$  平面) にマッピングした結果

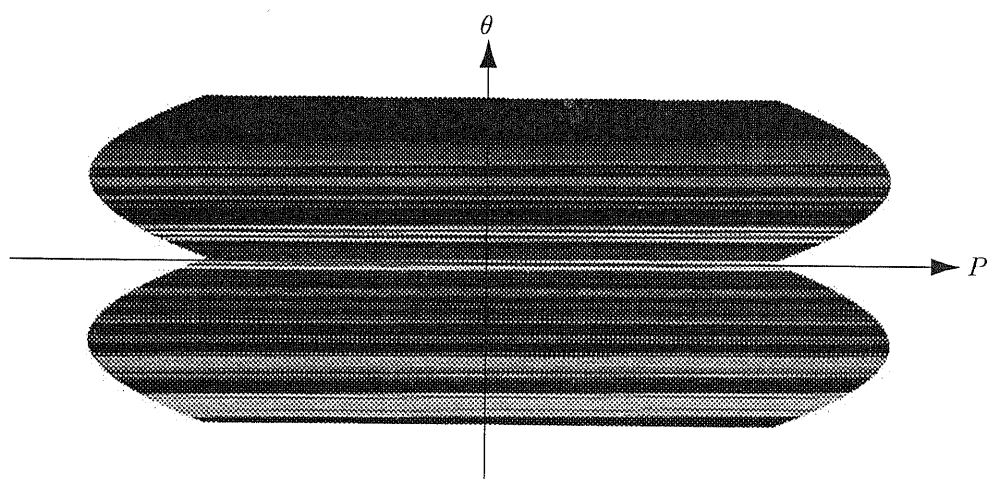


図 3.18: 参照テーブルを用いて図 3.17 の光線情報を補間した結果



風景とを別々に撮影しているため、照明条件の違いが問題となるが、ここでは手作業で輝度レベルの調整を行なっている。

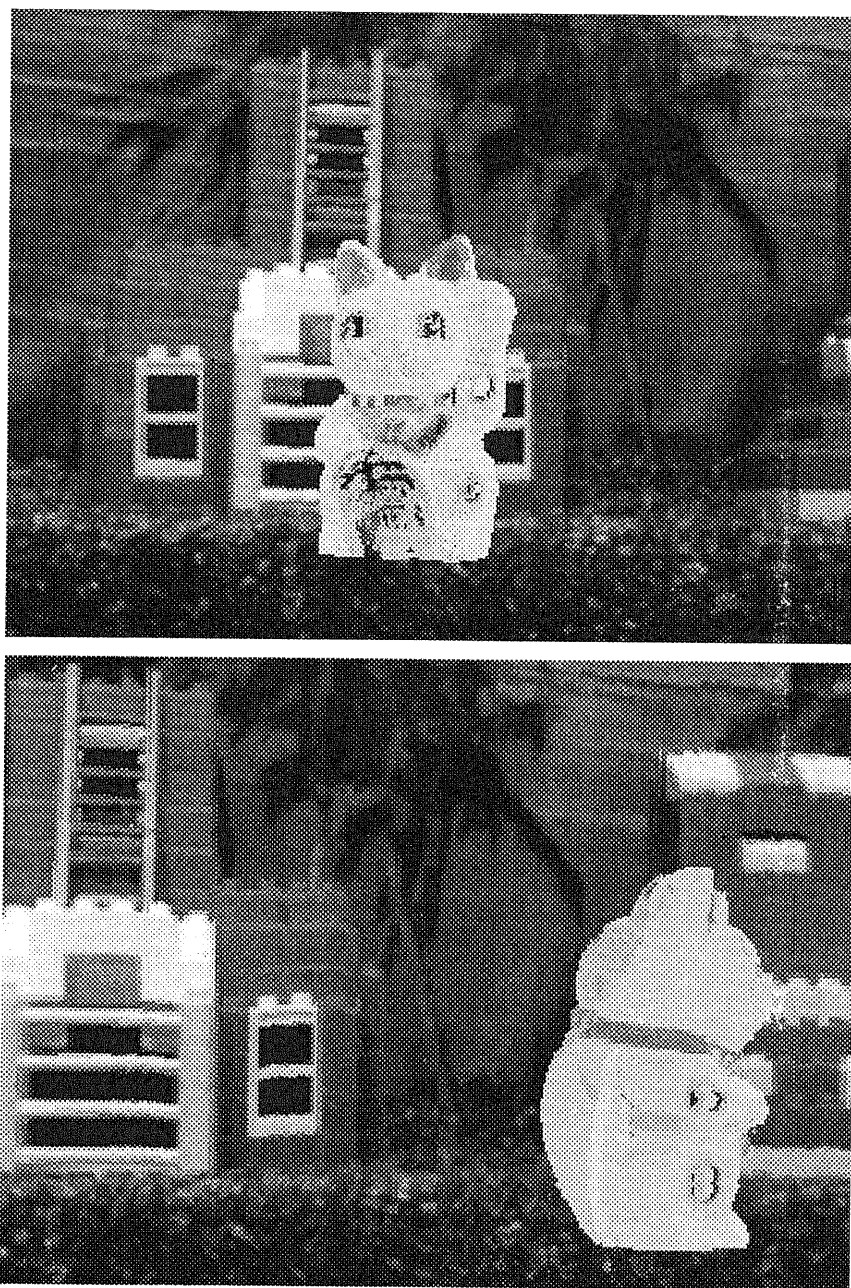


図 3.19: 風景内に物体を配置した画像の合成結果

図 3.19 の例に示されているように、光線情報表現を用いることにより、異なる装置を用いて入力した物体と背景とを矛盾なく融合し、かつ視点位置や視線方向と、物体の位置や向きとを独立して操作することが可能となる。

### 3.6 本章のまとめ

本章では、被写体の形状と表面色が同時に取得できる型の3次元形状計測装置(レンジファインダ)を、光線取得の手段として利用することを考え、距離画像を光線情報として記録するための手法を構築した。レンジファインダは、利用に適さない被写体も一部に存在するが、計測時間や4次元情報空間へのデータ展開処理の点で、効率的な光線取得手段となり得る。実験で用いた装置は、空間解像度が不十分であるため、メディアンフィルタなどによる補間処理を必要とした。しかし現在では、より空間解像度の高い装置も開発されており、これを用いれば、補間処理を行なうことなく、密な光線情報の取得が可能になるものと考えられる。また、3次元CGハードウェアを用いて距離画像から正投影像を生成することで、光線情報への変換処理の高速化が期待できる。

また、光線として記述することで、複数の距離画像のデータ統合や、他の方式の入力装置によって得られた3次元画像情報との融合など、距離画像の新しい利用形態が実現できることを示した。後者については、実験の結果、風景と物体の多視点画像の融合処理に対して、物体をレンジファインダ入力のものに置き換えても、正しく融合が行なわれることが、実験により確認された。すなわち、光線情報に変換することで、入力装置に関係なく扱うことが可能になることが示された。

### 参考文献

- [1] 井口征士, 佐藤宏介:『三次元画像計測』昭晃堂(1990).
- [2] V. Sequeira, J. G. M. Gonçalves and M. I. Ribeiro: "3D Recontruction of Indoor Environnments", Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP-96), Vol.II, pp.405-408 (1996).
- [3] 全 炳東, 納富幹人, 小澤史朗: "動画像解析による仮想化都市空間の構築", 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU96-126 (1996).
- [4] 石川彰夫, 苗村 健, 金子正秀, 原島 博: "光線記述に基づく3次元実写空間のインタラクティブ操作", 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol.J81-D-II, No.5, pp.850-860 (1998).

## 第4章

---

# 3次元情報の光線記述における 標本化の影響

## 4.1 はじめに

3次元情報を光線の集合として記述する手法は、光線が密に取得され、かつ密に記録されているという前提の下で構築されてきた。しかし現実には、データ量や入力精度の制約、あるいは計算機による処理のために、光線を取得する段階と、記録(記述)する段階の双方において、光線を標本化し、離散的なデータとして扱う必要がある。

ここで、種々の入力手段によって取得される3次元画像情報と、光線を記録する離散的な4次元(または5次元)情報空間におけるデータを比べると、両者はいずれも3次元実空間内に連続的に分布する光線を標本化したものであるが、標本化の仕方は必ずしも同じであるとは限らない。本章では、前章までに論じた既存の3次元入力手段によって得られるデータが、どのような光線を標本化したものであるかを明らかにする。さらに、それらの手段による光線の標本化の仕方が、離散的な情報空間において標本化と異なる場合に、どのような影響が現れるかについて論じる。

## 4.2 光線の標本化

### 4.2.1 光線の取得における標本化

カメラによる撮影や3次元形状計測装置による計測は、3次元実空間内の全ての光線の中から、それらの入力装置の撮像部分に到達する光線のみを取り出して記録することに相当する。すなわち、撮像素子に露光するまでの段階で、第1の標本化が行なわれている。ただしこの段階では、光線はまだ連続的に分布している。

さらに、入力装置では、通過した光線の色や強度など、人間が知覚できる物理量が信号として出力されるが、その物理量を検知するCCDや感光板などの撮像素子は、いずれも有限個の画素が並んだ形をしているため、光線を無限に細かく分解して信号を出力することはできない。そのため、撮影により標本化された連続的な分布の光線が、離散的な有限個の光線に分解され、最終的に我々が利用できるデータとなる。

以上のように、光線の取得は、2段階の光線標本化と考えることができる。ただし、各々の段階で具体的にどのような標本化が行なわれているかについては、撮影原理によって異なっている。

### 4.2.2 各種3次元画像入力方式における光線標本化の具体例

光線取得における標本化の具体例として、第2章および第3章で紹介した各種の3次元画像入力方式を用いたときに、取得される光線がどのように分布するかを以下に示す。ここでは便宜上、4次元情報空間の代わりに、水平方向の位置を表すパラメータと、方向の水平成分を表すパラメータによって張られる2次元平面における光線の分布を考える。

#### マトリックス型多視点カメラ撮影

視点配置がマトリックス型で、かつカメラの光軸方向が全ての視点で同じになるようにして、多視点撮影を行なう場合を考える。このような多視点撮影の例としては、2.5.3節で紹介したLight Field撮像装置やカメラマトリックス<sup>1</sup>の他、インテグラルフォトグラフィ撮像系[5]なども挙げられる。

この視点配置では、視点が並んだ平面を通過する光線のみが取得できることから、平面記録方式の $Pu$ 平面における光線の分布を考える。このとき、位置パラメータ $P$ は視点の水平位置を表すため、個々の画像

<sup>1</sup> 輻輳撮影を行なうものは含まない

における  $P$  の値は一定となる。また、カメラの水平画角を  $\delta$  とすると、

$$-\tan \frac{\delta}{2} \leq u \leq \tan \frac{\delta}{2} \quad (4.1)$$

となる。よって、図 4.1 のように、 $Pu$  平面の  $u$  軸に平行な直線の (4.1) 式で表される部分に沿った光線が取得される (図中では  $\tan(\delta/2) = u_0$  とする)。

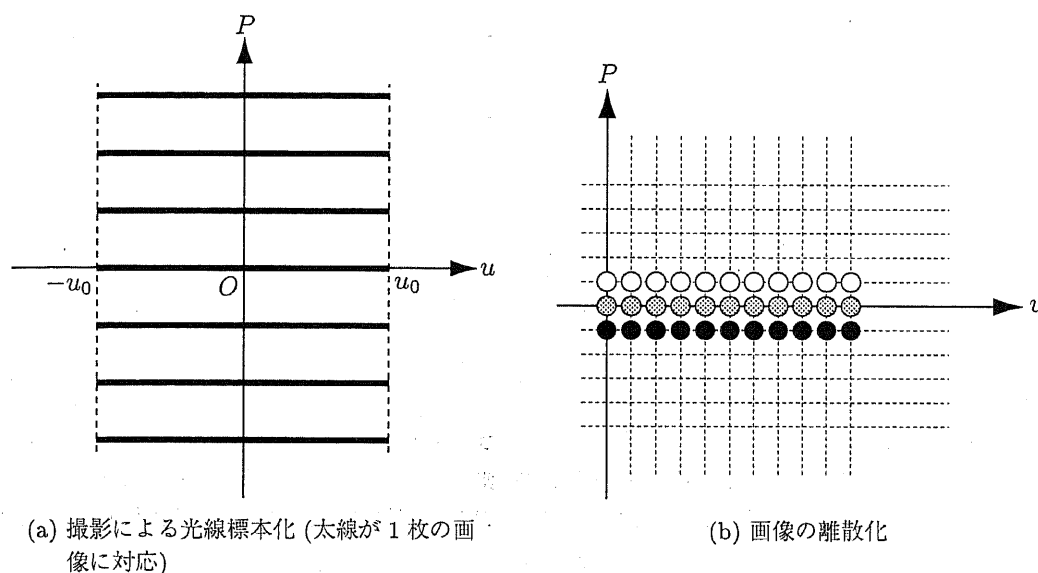


図 4.1: マトリックス型カメラ配置による光線の標本化

次に、1枚の画像を有限個の画素に分解し、そのときの標本点の分布を考える。ただし、画素は正方格子状に並んでいるものとする。透視投影像では、2.5.2 節で述べたように、画像内の水平位置は  $u$  に比例し、その比例係数は画像の画素数と画角によって定まる。よって、全ての視点位置において、画素数と画角がともに等しいことが保証されていれば、標本点は  $Pu$  平面において  $u$  軸に平行な直線上に一定間隔で分布する。さらに、全ての視点位置で光軸方向も揃っていれば、標本点は  $P$  軸方向に完全に揃った形で分布する。

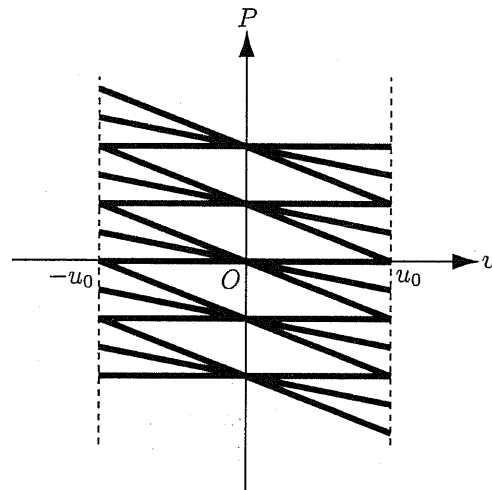
以上の議論は、平面記録方式の  $Qv$  平面についても全く同様に成り立つ。なお、インテグラルフォトグラフィ撮像系のように、レンズが正方格子状ではなく最密格子状に配置されている場合には、4次元情報空間における位置成分は完全に揃っていない。

#### ウォークスルー型多視点カメラ撮影

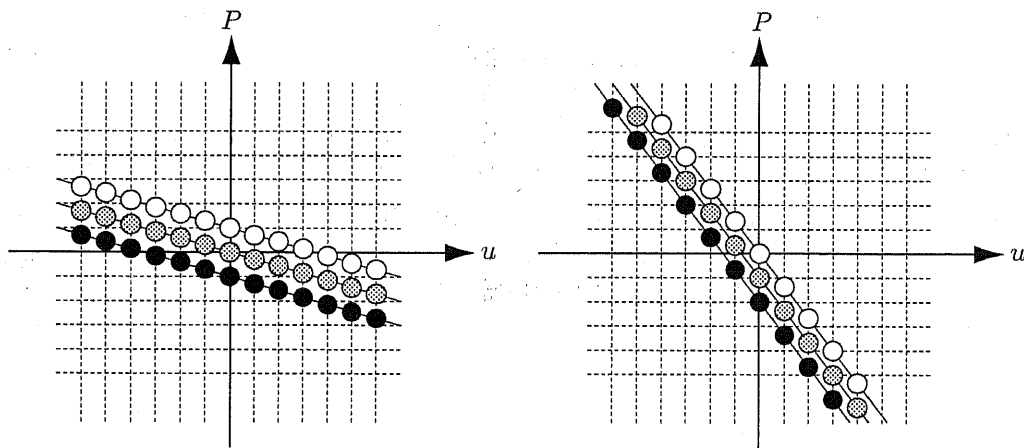
ウォークスルー型の視点配置の場合も、マトリックス型と同様に、カメラの光軸方向が全ての視点で同じ状態で多視点撮影を行なうと、取得される全ての光線が同一の平面を通過する。そこで、平面記録方式の  $Pu$  平面における光線の分布を考える。

視点  $(X, Z) = (X_0, Z_0)$  にて撮影された画像を考えると、(2.5) 式より、 $Pu$  平面におけるこの画像の軌跡は、 $u = 0$  のとき  $P = X_0$  で傾き  $Z_0$  の直線となる。また、カメラの水平画角が  $\delta$  のとき、 $u$  の取り得る値の範囲は (4.1) 式で表される通りである。よって、ウォークスルー型視点配置の多視点撮影によって取得される光線は、図 4.2 のようになる。

1枚の画像を有限個の画素に分解した場合については、全ての視点で画素数と画角がともに等しいことが保証されていれば、標本点は  $u$  座標値が等間隔で揃った形で上記の直線上に並ぶ。ただし、直線の傾きは一般には 0 でないため、 $P$  座標値は揃っていない。



(a) 撮影による光線標本化 (太線が1枚の画像に対応)



(b) 画像の離散化

図4.2: ウォークスルー型カメラ配置による光線の標本化

## 球面移動型多視点カメラ撮影

視点を球面上に配置する場合には、全方向の光線を記述するために、球面記録方式を用いる必要がある。そこで以下では、球面記録方式の  $P\theta$  平面における光線の分布を考える。

視点が配置される球面の半径を  $r$  とすると、視点の位置座標は次式のように表される。

$$X = r \sin \Theta \cos \Phi, Y = r \sin \Phi, Z = r \cos \Theta \cos \Phi \quad (4.2)$$

この位置で撮影される画像に対応する光線の  $P$  座標は、(2.8) 式より、

$$P = (r \sin \Theta \cos \Phi) \cos \theta - (r \cos \Theta \cos \Phi) \sin \theta = -r' \sin(\theta - \Theta) \quad (4.3)$$

となる。ただし、 $r' = r \cos \Phi$  である。また、光軸が常に球面の中心を向いているため、(4.2) 式で表される位置で、水平画角  $\delta$  のカメラによって撮影される画像に対応する光線が取り得る  $\theta$  の値は、

$$\theta - \frac{\delta}{2} \leq \theta \leq \theta + \frac{\delta}{2} \quad (4.4)$$

となるため、 $P$  の取り得る値の範囲は、 $\theta$  に関係なく次式のようになる。

$$-r' \sin \frac{\delta}{2} \leq P \leq r' \sin \frac{\delta}{2} \quad (4.5)$$

よって、球面移動型の多視点撮影を行なうと、図 4.3 のように、振幅  $r'$  の正弦曲線のうちの (4.5) 式で表される部分が多数並ぶ形で光線が標本化される。

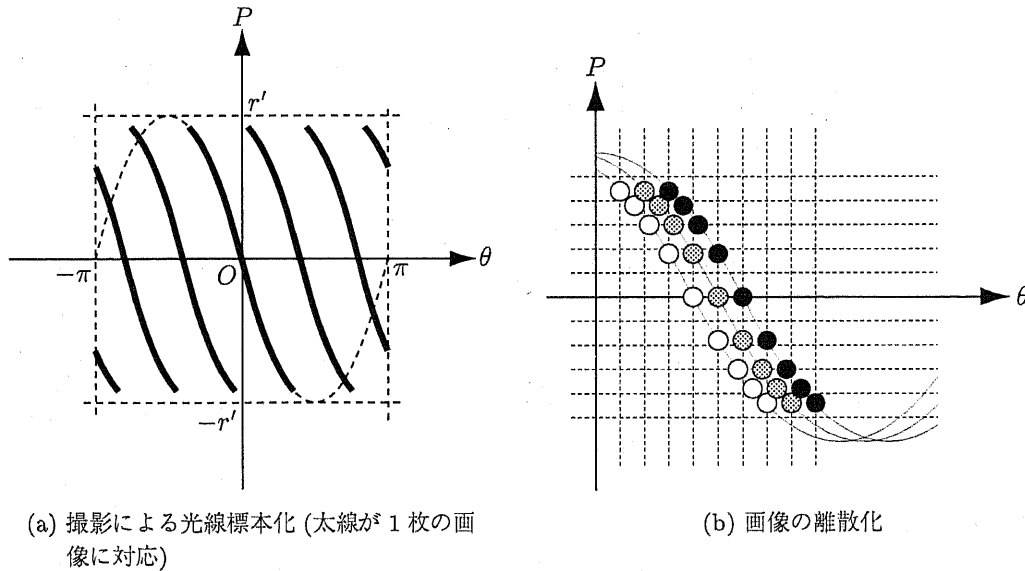


図 4.3: 球面上にカメラを配置した多眼撮影による光線の標本化

各々の画像を、画素が正方格子状に並ぶように離散化した場合、画像上の水平位置座標は  $\theta$  ではなく  $\tan \theta$  に比例するため、 $\theta$  方向の分布は等間隔ではない。しかし、各々の画像の間で  $\theta - \Theta$  が取り得る値は同じであるため、標本点の  $P$  座標値は揃っている (ただし等間隔ではない)。

## レンジファインダ

距離計測と同時に被写体のカラー画像も撮影できるタイプのレンジファインダは、3.2.4 節で論じたように、被写体表面上の 1 点につき、1 つの方向の光線を取得する。また、距離データは、基準となる 2 次元

画像に対する奥行きという形式になっている。したがって、位置・方向パラメータによって張られる2次元平面では、図4.4のように、1点(図中の●印)とその点を通る直線(図中の破線)の傾きが記録される。

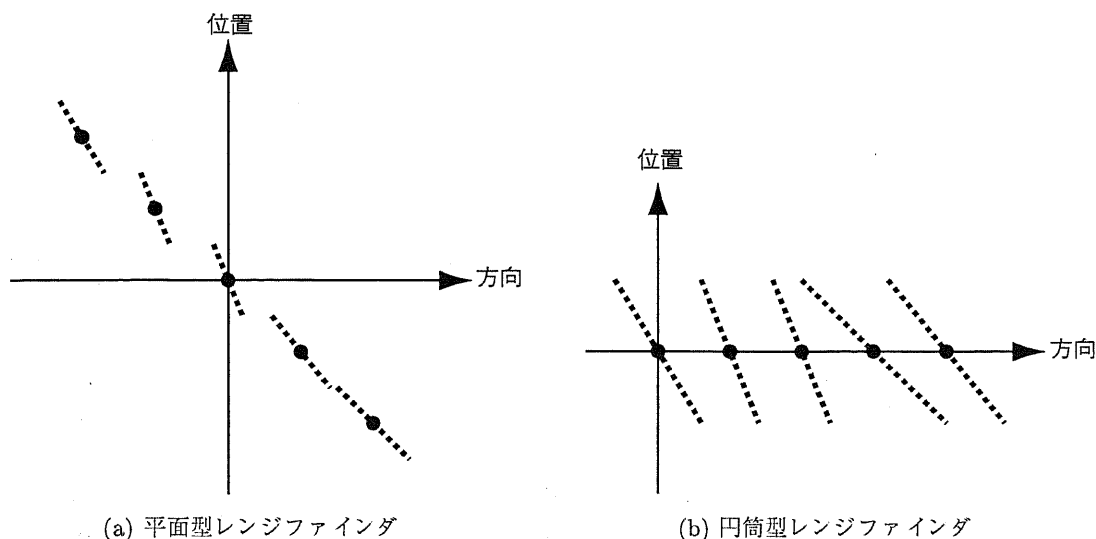


図4.4: レンジファインダによる光線の標本化

2次元平面型のレンジファインダでは、画像が透視投影により撮影されていると考えると、情報が記録されている点は、図4.4(a)のように、原点を通る直線上に分布する。また、円筒型レンジファインダでは、円筒の中心を位置パラメータの原点と考えると、情報が記録される点は、図4.4(b)のように、方向を表す軸上に分布する。実際の装置では、いずれの方式の場合も、空間分解能が有限であるため、情報が記録されている点は離散的に分布する。

図4.4の各点において、記録されている傾きをもつ直線を引き、その点の色を塗ると、4次元情報空間内をほぼ充填する光線情報が得られる。第3章で述べた内容は、本質的にはこの処理に他ならない。このとき、各々の直線に沿った光線は連続的に分布するが、直線自体の分布は離散的である。

#### 4.2.3 光線の記述における標本化

光線情報を格納する4次元ないし5次元の情報空間では、4個または5個のパラメータにより光線が一意に定まる。このとき、光線が連続的に分布する状態は、光線を記述するためのパラメータが連続的な値をとることに相当する。

しかし、そのためには膨大な量のデータを蓄積する手段が必要となり、実際にはその実現は不可能である。また、計算機で扱うためには、全てのデータが離散的な数値として扱えることが要求される。このような理由により、現実には、光線を表すパラメータを離散的な量として扱われ、ここでも光線は標本化されることになる。なお、以下では、4次元情報空間のパラメータを離散的な値で表すことを、「4次元情報空間の離散化」と呼ぶことにする。

光線を格納する4次元情報空間の部分空間として、光線方向および位置を表すパラメータによって張られる2次元平面を考える。この平面に記録されている光線の中から、方向成分の値が等しいものを取り出すと、それらは方向の軸に直交する直線、すなわち位置の軸に平行な1本の直線上に並ぶ。よって、方向成分が離散的な値をとる場合、位置の軸に平行な直線群に沿った光線のみが記録される(図4.5(a)参照)。位置成分に関しても同様のことが言える(図4.5(b)参照)ため、両方の成分が離散的な値をとる場合には、平面上の格子点に対応する光線のみが記録されることになる(図4.5(d)参照)。以上は、光線の記述方式の



違いに関係なく成り立つ。

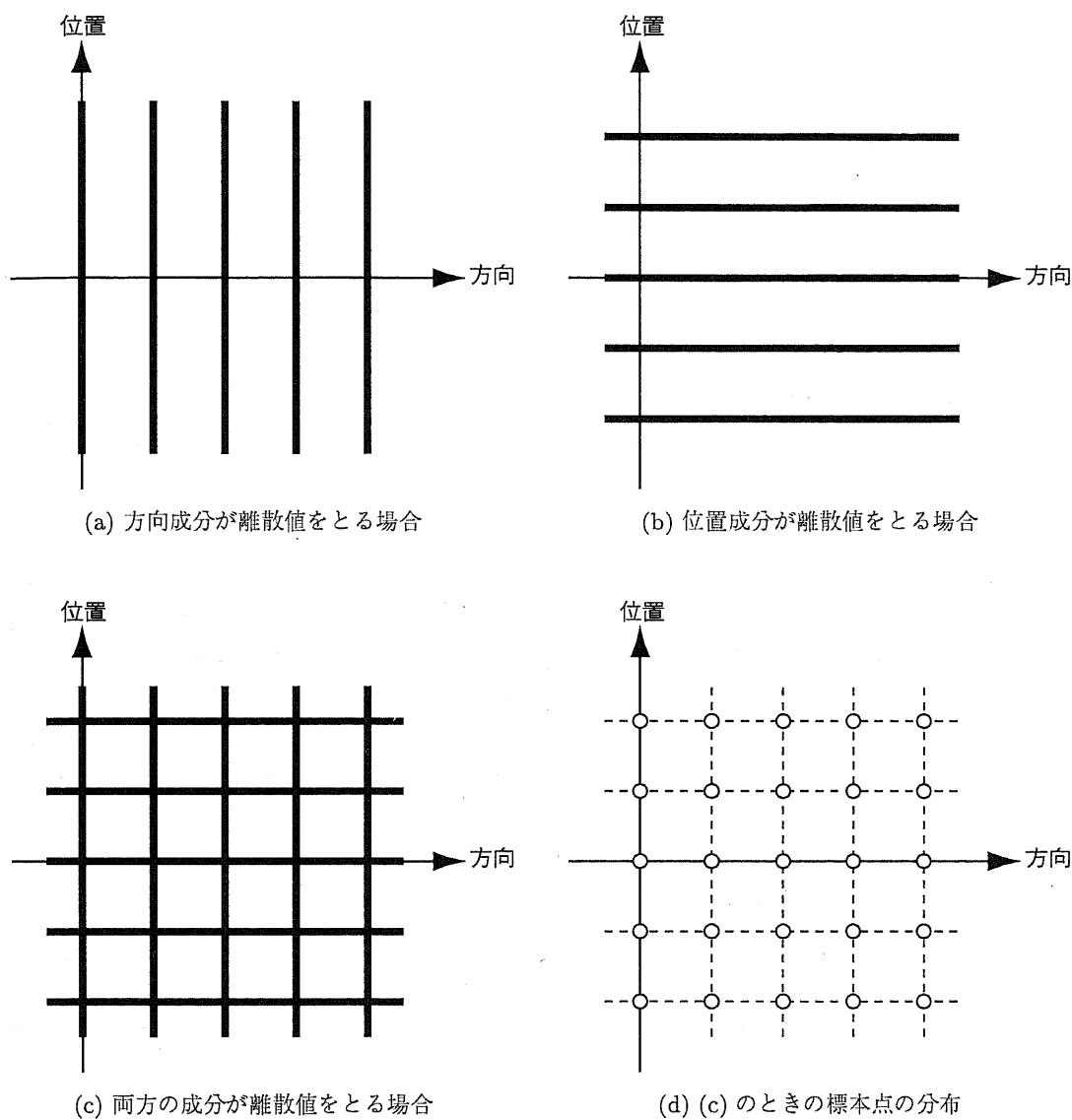


図 4.5: パラメータが離散的な値をとる 4次元情報空間の2次元断面

光線を表すパラメータの値の離散化には様々な方法があり得るが、最も単純なものとしては、各成分の値を整数値などに丸め処理することが考えられる。この場合、光線を一定間隔で標本化することになり、標本点は空間内に均等に分布する。

### 4.3 4次元情報空間の離散化の影響

光線情報は、最終的には表示装置に適した形の画像に変換して利用される。そこで、4次元情報空間の離散化が、光線情報から合成される画像に与える影響について考える。

### 4.3.1 方向成分

図2.15に示したように、透視投影像においては、画素の位置が光線の方角に対応する。したがって、光線の方角成分の標本化は、画像の解像度に影響を与える。

平面記録方式においては、透視投影による2次元画像の画素  $(x, y)$  と光線の方角成分  $(u, v)$  の間に次の関係がある。

$$u = -\frac{x}{F}, \quad v = -\frac{y}{F} \quad (4.6)$$

ただし  $F$  は画像面からピンホールまでの距離である(図2.15参照)。上式は、言い換えると  $u, v$  がそれぞれ  $x, y$  に比例することを意味する。多くの撮像素子では、画素は正方格子状に並んでいると考えられるため、 $u, v$  も等間隔で標本化すれば良い。

一方、球面記録方式においては、 $(\theta, \phi)$  をともに等間隔に分割すると、経度方向に関して、球面の赤道付近では粗く、また両極付近では必要以上に細かく標本化されることになる。これは情報量の観点からは無駄が多いため、標本点密度が球面上で均一になるような標本化が試みられている。

文献[1]では、測地ドームを用いて球面を等面積に分割し、各領域の中心を標本点とする手法を提案している。また、文献[2]では、計算量の抑制のため、 $\theta$  の標本間隔  $\Delta\theta$  を、

$$\Delta\theta = \frac{\Delta\theta_0}{|\cos\phi|}$$

とする手法を提案している。このとき、球面上における経度方向の標本点の間隔は  $\Delta\theta_0$  となる。

### 4.3.2 位置成分

離散的に配置されたカメラの位置を  $(X_i, Y_j, Z_k)$  ( $i, j, k$  は整数) と表し、視点  $(X_i, Y_j, Z_k)$  における見え方を光線情報を用いて再構成した画像情報を  $\hat{I}_{i,j,k}$  とすると、

$$\hat{I}_{i,j,k} = f(P, Q, \theta, \phi) |_{P=p(i,j,k,\theta,\phi), Q=q(i,j,k,\theta,\phi)} \quad (4.7)$$

となる。ただし、 $p(i, j, k, \theta, \phi)$ ,  $q(i, j, k, \theta, \phi)$  はそれぞれ、点  $(X_i, Y_j, Z_k)$  を通り  $(\theta, \phi)$  方向に進む光線の  $P$ ,  $Q$  の値である。

$\theta, \phi$  が十分に密に記録されているという仮定の下で、 $P, Q$  が離散値をとる場合、連続的な値をとる変数  $x$  を離散化する演算を  $[x]$  と表記すると、(4.7) 式は次のように表される。

$$\hat{I}_{i,j,k} = f([P], [Q], \theta, \phi) |_{P=p(i,j,k,\theta,\phi), Q=q(i,j,k,\theta,\phi)} \quad (4.8)$$

ここで、方向  $(\theta_0, \phi_0)$  に進む2本の異なる光線を考える。即ち、各々の光線が通過する点を  $(X_{i_1}, Y_{j_1}, Z_{k_1})$  および  $(X_{i_2}, Y_{j_2}, Z_{k_2})$  とするとき、

$$(X_{i_1}, Y_{j_1}, Z_{k_1}) \neq (X_{i_2}, Y_{j_2}, Z_{k_2}) \quad (4.9)$$

であり、かつ

$$p(i_1, j_1, k_1, \theta_0, \phi_0) \neq p(i_2, j_2, k_2, \theta_0, \phi_0) \quad (4.10)$$

$$q(i_1, j_1, k_1, \theta_0, \phi_0) \neq q(i_2, j_2, k_2, \theta_0, \phi_0) \quad (4.11)$$

の少なくとも一方が成り立つとする(両方とも成り立たなければ、光線は一致する)。その上でさらに、

$$[p(i_1, j_1, k_1, \theta_0, \phi_0)] = [p(i_2, j_2, k_2, \theta_0, \phi_0)] = [P] \quad (4.12)$$

$$[q(i_1, j_1, k_1, \theta_0, \phi_0)] = [q(i_2, j_2, k_2, \theta_0, \phi_0)] = [Q] \quad (4.13)$$

なる条件が成り立つ場合、2つの光線は異なるにも関わらず、その値は4次元情報空間内の同一の点に記録され、また画像合成時には同一の値  $f([P], [Q], \theta_0, \phi_0)$  となる。そのため、例えば

$$f([P], [Q], \theta_0, \phi_0) = f(p(i_1, j_1, k_1, \theta_0, \phi_0), q(i_1, j_1, k_1, \theta_0, \phi_0), \theta_0, \phi_0)$$

であったとすると、画像合成時に、 $(X_{i_2}, Y_{j_2}, Z_{k_2})$  を通り、 $(\theta_0, \phi_0)$  方向に進む光線が、 $(X_{i_1}, Y_{j_1}, Z_{k_1})$  を通り、同じ方向に進む光線によって近似されることになる。このため、 $(X_{i_2}, Y_{j_2}, Z_{k_2})$  を通る光線に対応する画素は誤りとなり、特に、両者の色が大きく異なっていると、その誤りが視覚的に目立つことになる。

## 4.4 標本化の相違の影響

### 4.4.1 原画像の復元誤りのメカニズム

図4.6のように、撮影点が  $X, Y, Z$  軸方向にそれぞれ、 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$  の間隔で、3次元格子点上に並んでいる場合を考える。この場合、カメラの位置は、 $(X_i, Y_j, Z_k) = (i\Delta X, j\Delta Y, k\Delta Z)$  と表すことができる。

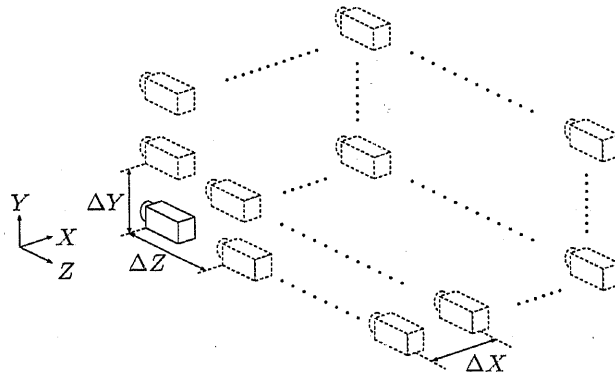


図4.6: カメラ配置 (3次元格子点上に配置した場合)

平面記録方式に基づく光線情報は、基準面 ( $XY$  平面) 上にカメラを並べて撮影された2次元画像の集合と考えることができる。したがって、マトリックス型の視点配置では、視点が並ぶ平面を基準面とすれば、画像の撮影が位置成分の標本化に、また各々の画像のデジタル化が方向成分の標本化に相当する。

一方、ウォークスルー型の視点配置では、視点が並ぶ平面を基準面とすると、基準面に平行な光線、具体的には画像中央の水平ライン上の画素の情報が記録できなくなる。そこで、撮影点が並ぶ平面に直交する平面を基準面とし、光線を標本化することを考える。すなわち、カメラが  $XZ$  平面上に並んでいるものとする。

簡単な例として、図4.7に示すように、カメラが  $Z$  軸上に1列に並んでいる場合を考え、 $Q$  の標本化に伴う影響について論じる。なお、 $Q$  軸のみを扱う根拠は、4.5.2節にて述べる。

図4.8のように、点  $(0, 0, Z_k)$  を通過し、方向が  $(u, v_A), (u, v_B), (u, v_C), (u, v_D)$  の光線をそれぞれ  $A, B, C, D$  とする。また、点  $(0, 0, Z_k)$  を通過し、方向が  $(u, v)$  である光線の  $Q$  の値を  $q(k, u, v)$  と表す。このとき、画像  $\hat{I}_{0,0,k}$  において、 $(u, v)$  方向に進む光線に対応する画素の色  $f_o(k, u, v)$  は次式で与えられる。

$$f_o(k, u, v) = f(P, [q(k, u, v)], u, v) \quad (4.14)$$

$Q$  の最近傍の標本値を  $[Q]$  として用いることにすると、図4.8より次の関係が成り立つ。

$$[q(k, u, v_A)] = [q(k, u, v_B)] = Q_n, \quad [q(k, u, v_C)] = [q(k, u, v_D)] = Q_{n+1} \quad (4.15)$$

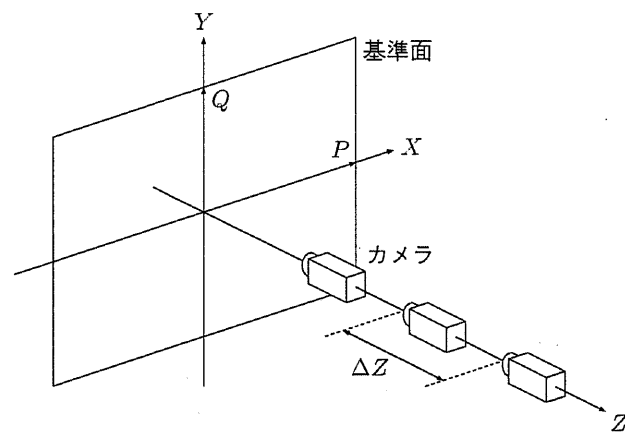


図 4.7: カメラと基準面の配置

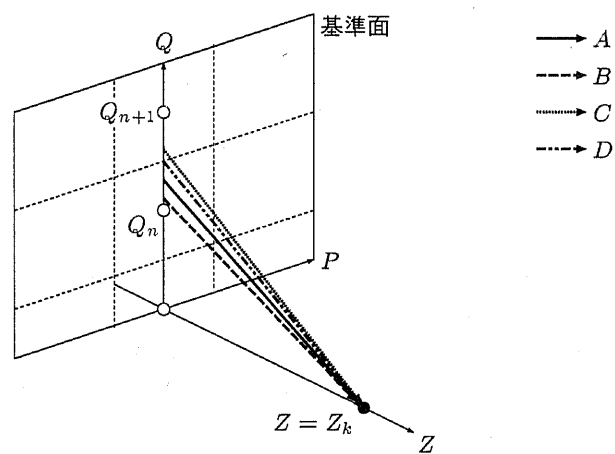


図 4.8: 光線情報からの画像  $\hat{I}_{0,0,k}$  の再構成

よって、光線  $A, B, C, D$  に対応する画素の色はそれぞれ、次式にて与えられる。

$$f_o(k, u, v_A) = f(P, Q_n, u, v_A) \quad (4.16)$$

$$f_o(k, u, v_B) = f(P, Q_n, u, v_B) \quad (4.17)$$

$$f_o(k, u, v_C) = f(P, Q_{n+1}, u, v_C) \quad (4.18)$$

$$f_o(k, u, v_D) = f(P, Q_{n+1}, u, v_D) \quad (4.19)$$

次に、もとの多眼画像を、平面記録方式における4次元情報空間に展開する過程について考える。図4.9は、その過程を模式的に示したものである。具体的には、

1. 最も近い視点を算出する (図4.9(a) 参照)。
2. 算出された視点において撮影された原画像の中から、同じ方向の光線に対応する画素を選び、その色を求める光線の色とする (図4.9(b) 参照)。

という手順を、 $Q$  軸上の各標本点を通過する各方向の光線について行なう。なお、図4.9(a)において、光線が領域  $S_k$  を通過すれば、その光線に最も近い視点は  $(0, 0, Z_k)$  となる。

図4.9(a)の場合、 $Q$  の  $n$  番目の標本値を  $Q_n$  とするとき、任意の  $P$  に対し、 $(P, Q_n)$  を通過し、方向が  $(u, v_A)$  の光線  $A'$  は、 $XZ$  平面において領域  $S_k$  を通過するため、最も近い視点は  $(0, 0, Z_k)$  である。よって光線  $A'$  は、 $(0, 0, Z_k)$  を通過する方向  $(u, v_A)$  の光線  $A''$  によって近似される。同様に、図4.9(a)の光線  $B', C', D'$  はそれぞれ、図4.9(b)の光線  $B'', C'', D''$  によって近似される。

視点  $(X_i, Y_j, Z_k)$  において撮影された原画像情報を  $I_{i,j,k}$  とし、画像  $I_{0,0,k}$  における方向  $(u, v)$  の光線に対応する画素の色情報を  $f_i(k, u, v)$  とすると、光線  $A', B', C', D'$  の色情報はそれぞれ以下ようになる。

$$f(P, Q_n, u, v_A) = f_i(k, u, v_A) \quad (4.20)$$

$$f(P, Q_n, u, v_B) = f_i(k-1, u, v_B) \quad (4.21)$$

$$f(P, Q_{n+1}, u, v_C) = f_i(k+1, u, v_C) \quad (4.22)$$

$$f(P, Q_{n+1}, u, v_D) = f_i(k, u, v_D) \quad (4.23)$$

(4.16)~(4.19) 式と (4.20) ~ (4.23) 式とを比較すると、原画像と再構成画像との間には次のような関係が成り立つ。

$$f_o(k, u, v_A) = f_i(k, u, v_A) \quad (4.24)$$

$$f_o(k, u, v_B) = f_i(k-1, u, v_B) \quad (4.25)$$

$$f_o(k, u, v_C) = f_i(k+1, u, v_C) \quad (4.26)$$

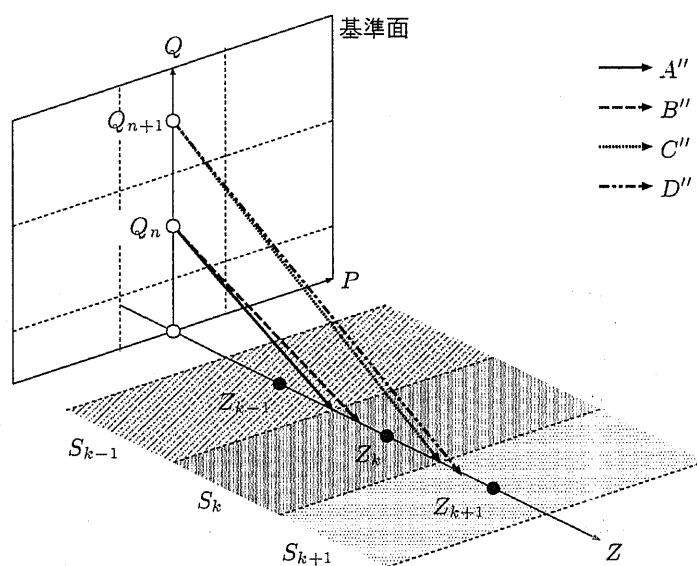
$$f_o(k, u, v_D) = f_i(k, u, v_D) \quad (4.27)$$

これによると、 $I_{0,0,k}$  において、方向  $(u, v_A)$  および  $(u, v_D)$  の光線群に対応する水平ラインについては、 $I_{0,0,k}$  の画素がそのまま用いられるため、正しく再構成される。しかし、方向  $(u, v_B)$  および  $(u, v_C)$  の光線群に対応する水平ラインについては、それぞれ  $I_{0,0,k-1}$  および  $I_{0,0,k+1}$  の画素によって近似されることになり、正しく再構成されない。

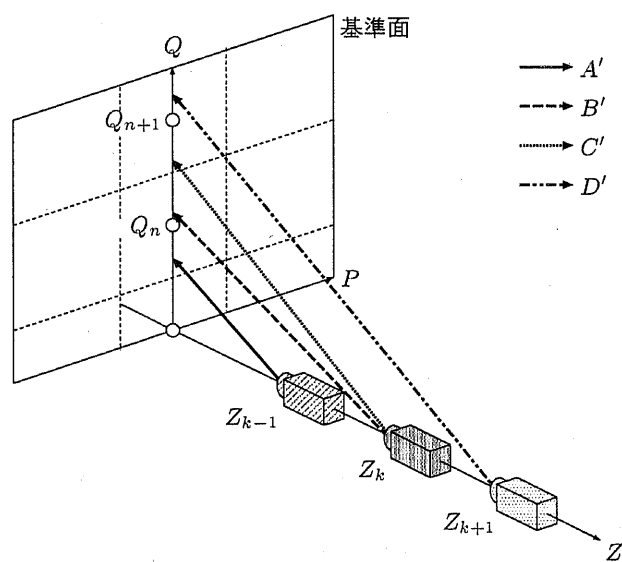
#### 4.4.2 誤りの定式化

ここで、前節にて述べた原画像の復元誤りが生じる条件を考える。簡単のため、 $Q_n > 0, Z_k > 0, v > 0$  とする。原画像を4次元光線情報の形式に変換する際、 $f(P, Q_n, u, v) = f_i(k, u, v)$  が成り立つための条件は、

$$Z_k - \frac{\Delta Z}{2} < \frac{Q_n}{v} < Z_k + \frac{\Delta Z}{2} \quad (4.28)$$



(a)  $Q$  軸上の各標本点を通過する光線に最も近い視点の算出



(b) 算出された視点における原画像情報による光線の近似

図 4.9: 多眼画像から平面記録方式に基づく光線情報への変換

となる。一方、光線情報を用いて画像  $\hat{I}_{0,0,k}$  を再構成する際、 $f_o(k, u, v) = f(P, Q_n, u, v)$  が成り立つための条件は次式の通りである。

$$\frac{Q_{n-1} + Q_n}{2} < Z_k v < \frac{Q_n + Q_{n+1}}{2} \quad (4.29)$$

原画像が正しく再構成される、即ち  $I_{0,0,k}$  以外の画像の画素が  $\hat{I}_{0,0,k}$  に混入しないためには、全ての  $v$  および  $n$  について、

$$f_o(k, u, v) = f(P, Q_n, u, v) \Rightarrow f(P, Q_n, u, v) = f_i(k, u, v) \quad (4.30)$$

である必要があり、これが成り立つのは、全ての  $n$  について、以下の条件が満たされる場合である。

$$\frac{Q_n}{Z_k + \Delta Z/2} \leq \frac{Q_{n-1} + Q_n}{2Z_k} \quad (4.31)$$

$$\frac{Q_n + Q_{n+1}}{2Z_k} \leq \frac{Q_n}{Z_k - \Delta Z/2} \quad (4.32)$$

上の2式は次式と等価である。

$$Q_n \leq \frac{k+1/2}{k-1/2} Q_{n-1} = \frac{2k+1}{2k-1} Q_{n-1} \quad (n=1, 2, \dots) \quad (4.33)$$

よって、 $Q$  の標本値  $Q_n$  を、

$$Q_n = \frac{2k_m+1}{2k_m-1} Q_{n-1} \quad (n=1, 2, \dots) \quad (4.34)$$

にて定めれば、 $k \leq k_m$  の範囲で (4.33) 式が成り立ち、 $\hat{I}_{0,0,k}$  に  $I_{0,0,k}$  以外の原画像の画素が貼り合わされることが回避できる。

逆に、(4.33) 式が成立しない場合には、 $v$  が以下の範囲にある光線に対応する  $\hat{I}_{0,0,k}$  の画素が、 $I_{0,0,k}$  以外の原画像の画素によって近似されることになる。

$$\frac{Q_n}{Z_k - \Delta Z/2} \leq v \leq \frac{Q_{n+1}}{Z_k + \Delta Z/2} \quad (4.35)$$

上式によれば、このような誤りは復元画像中に繰り返し現れる。例えば、 $Q_n = n\Delta Q$  である場合、(4.35) 式は、

$$\frac{n\Delta Q}{Z_k - \Delta Z/2} \leq v \leq \frac{(n+1)\Delta Q}{Z_k + \Delta Z/2} \quad (4.36)$$

となる。(4.36) 式が成り立つのは、

$$\frac{n\Delta Q}{Z_k - \Delta Z/2} < \frac{(n+1)\Delta Q}{Z_k + \Delta Z/2}$$

即ち  $n < k - 1/2$  の場合であるから、復元誤りが生じる領域は、画像の中央付近の、上半分と下半分にそれぞれ  $k-1$  箇所ずつということになる。

## 4.5 原画像情報を保存する光線標本化の検討

前節までの議論の結果、既存の3次元画像入力方式では、光線が記録される離散的な4次元情報空間とは異なる形で標本化が行なわれるために、原情報の損失が生じ、もとの画像も正しく復元できない可能性があることが明らかになった。

この問題に対し、4次元情報空間の離散化を工夫することで、少なくとも原画像情報は正しく再現できるようにすることを考える。すなわち、原画像を4次元情報空間に展開した場合に、元の情報は完全に保存されているような離散化の方法を検討する。なお、元の情報を保存するような原画像から光線情報への変換を、以下では可逆変換と呼ぶことにする。

### 4.5.1 原画像情報を保存する条件

4.3.2節で述べたように、同じ方向に伝搬し  $(P, Q)$  が異なる2つの光線に対し、 $([P], [Q])$  が等しくなる場合に、対応する画素が正しく復元できない可能性がある。逆に、方向成分が同じ光線群の間で  $(P, Q)$  が異なれば  $([P], [Q])$  も異なるように標本化を行えば、復元誤りを回避することができる。

4.3.1節に述べた理由により、方向成分は  $(u, v) = (\mu\Delta u, \nu\Delta v)$  と表すことができる ( $\mu, \nu$  は整数)。光線が  $(X_i, Y_j, Z_k)$  を通過し、方向が  $(\mu\Delta u, \nu\Delta v)$  であるとき、 $P, Q$  はそれぞれ次式で与えられる。

$$P = p(i, j, k, \mu, \nu) = i\Delta X - k\Delta Z \cdot \mu\Delta u \quad (4.37)$$

$$Q = q(i, j, k, \mu, \nu) = j\Delta Y - k\Delta Z \cdot \nu\Delta v \quad (4.38)$$

さらに、 $d_P$  および  $d_Q$  を以下のように定義する。

$$\begin{aligned} d_P &= |p(i_1, j_1, k_1, \mu, \nu) - p(i_2, j_2, k_2, \mu, \nu)| \\ &= |(i_1 - i_2)\Delta X - (k_1 - k_2)\Delta Z \cdot \mu\Delta u| \\ d_Q &= |q(i_1, j_1, k_1, \mu, \nu) - q(i_2, j_2, k_2, \mu, \nu)| \\ &= |(j_1 - j_2)\Delta Y - (k_1 - k_2)\Delta Z \cdot \nu\Delta v| \end{aligned}$$

ここで、

$$I = i_1 - i_2, \quad J = j_1 - j_2, \quad K = k_1 - k_2 \quad (4.39)$$

とおくと、 $d_P$  および  $d_Q$  は以下のように表される。

$$d_P = |I\Delta X - K\mu\Delta Z\Delta u| \quad (4.40)$$

$$d_Q = |J\Delta Y - K\nu\Delta Z\Delta v| \quad (4.41)$$

なお、 $(X_{i_1}, Y_{j_1}, Z_{k_1})$  と  $(X_{i_2}, Y_{j_2}, Z_{k_2})$  が異なる点であると仮定しているため、 $I, J, K$  は同時に0になることはない。

$(u, v)$  が同じで  $(P, Q)$  が異なる2つの光線に対し、 $([P], [Q])$  が必ず異なるためには、 $P, Q$  の標本間隔がそれぞれ、方向が同じ任意の2本の光線の  $P, Q$  軸方向の距離よりも小さくなれば良い。したがって、とり得る全ての  $I, J, K, \mu, \nu$  について、 $d_P, d_Q$  の0でない最小値を求め、 $P, Q$  をそれより小さい間隔で標本化すれば、原画像を正しく復元することができる。

### 4.5.2 標本化の具体例 (平面記録方式)

カメラが  $X$  軸または  $Y$  軸上に並ぶ場合

撮影点が  $X$  軸上に並ぶ場合を考えると、 $j = k = 0$  であるから、 $(X_i, 0, 0)$  を通過する任意の方向の光線に対して、

$$P = p(i, 0, 0, \mu, \nu) = i\Delta X \quad (4.42)$$

となる。即ち、 $P$  は  $\Delta X$  の整数倍であるから、標本間隔を

$$\Delta P = \Delta X \quad (4.43)$$

とすれば、 $P$  が異なる光線が異なる標本点を通過するため、可逆変換を実現できる。同様に、撮影点が  $Y$  軸上に並ぶ場合には、 $Q$  を間隔  $\Delta Q = \Delta Y$  で標本化すれば良い。



カメラがZ軸上に並ぶ場合

空間内のウォークスルーなどのように、カメラが画像面に対して垂直に移動する場合は、撮影点がZ軸上に並ぶと考えることができる。このとき、 $i = j = 0$ であるから、

$$P = p(0, 0, k, \mu, \nu) = -k\mu\Delta Z\Delta u \quad (4.44)$$

$$Q = q(0, 0, k, \mu, \nu) = -k\nu\Delta Z\Delta v \quad (4.45)$$

となる。上式によれば、 $P, Q$ はともに、撮影点の位置を表す $k$ に比例するため、 $P$ または $Q$ のいずれか一方について、方向が同じで撮影点が異なる光線が、必ず異なる標本点に記録されるように標本化を行えば良い。

以下では $Q$ の標本化について考えることにする。(4.45)式によれば、 $Q$ は $\Delta Z\Delta v$ の整数倍の値をとる。よって、 $Q$ の $n$ 番目の標本点を $Q_n$ とすると、

$$Q_n = n\Delta Z\Delta v \quad (4.46)$$

とすれば、可逆変換を実現できる。この標本化を行なった場合、 $|Z| \leq k_m\Delta Z$ の範囲で、 $|v| \leq \nu_m\Delta v$ の光線を含む原画像が正しく再現できるために必要な $Q$ の標本点数は、 $Q$ の値の正負も考慮すると $2k_m\nu_m$ となる。

ただし、(4.46)式で表される標本化では、 $Q$ の標本点を、光線の $v$ 成分によらず一様に定義している。(4.46)式の $Q_n$ の中には、実際にはとり得ない値も多数存在するため、この標本化は極めて冗長であると言える。

そこで、 $Q$ の標本点のとり方を $v$ に応じて変えることを考える。(4.45)式は、見方を変えと、「 $v = \nu\Delta v$ の光線の $Q$ 座標は $\nu\Delta Z\Delta v$ の整数倍となる」と見ることができるため、

$$Q_n = n\nu\Delta Z\Delta v \quad (4.47)$$

にて $Q_n$ を定めれば良い。この場合には、 $|Z| \leq k_m\Delta Z$ の範囲で、 $|v| \leq \nu_m\Delta v$ の光線を含む原画像が正しく再現できるために必要な $Q$ の標本点数は $2k_m$ で済む。

次に、標本間隔を可変とし、かつ $v$ の値に依存しない標本点のとり方を考えてみる。4.4.2節に述べたように、 $Q_{n-1}$ が与えられた場合に、 $Q_n$ が(4.34)式を満たせば、 $k = 1, 2, \dots, k_m$ の範囲で、次式が成り立つ。

$$f_o(k, u, v) = f(P, Q_n, u, v) = f_i(k, u, v) \quad (4.48)$$

さらに、この関係は、 $n-1$ における(4.34)式の成立の有無に関係なく成り立つ。よって、

$$Q_n = \left( \frac{2k_m + 1}{2k_m - 1} \right)^{n-N} Q_N \quad (4.49)$$

にて $Q_n$ を定めれば、 $n > N$ に関しては常に(4.48)式が成り立つ。

結局、(4.34)または(4.46)式のいずれか一方が成立すれば、 $\hat{I}_{0,0,k}$  ( $k = 1, 2, \dots, k_m$ )は正しく復元できることになる。後者の場合、 $Q_{n-1}$ と $Q_n$ との関係は、

$$Q_n = \frac{n}{n-1} Q_{n-1} \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (4.50)$$

となる。これと(4.33)式とを比較すると、 $n > k_m + 1/2$ のとき、

$$\frac{n}{n-1} < \frac{2k_m + 1}{2k_m - 1}$$

となる。 $n$  および  $k_m$  が整数であることを考慮すると、 $\hat{I}_{0,0,k}$  ( $k = 1, 2, \dots, k_m$ ) を正しく復元するためには、 $Q_n$  を以下のように定義すれば良い。

$$Q_n = \begin{cases} n\Delta Z\Delta v & (n \leq k_m) \\ \left(\frac{2k_m+1}{2k_m-1}\right)^{n-k_m} k_m\Delta Z\Delta v & (n > k_m) \end{cases} \quad (4.51)$$

このとき、必要なデータ量は、(4.46) 式で定義した場合と比較して小さくなる。なぜなら、 $n > k_m$  の範囲では、 $Q$  の標本間隔は  $\Delta Z\Delta v$  より大きくなるためである。

$k_m = 5$  を例にとると、(4.51) 式にて定義される  $Q_n$  と  $n$  との関係は図 4.10 のようになる。なお、この図によれば、 $Q$  の標本点の取り方を  $v$  の値に応じて変える標本化を表す指数曲線が、標本点の取り方を一定にする標本化を表す直線より常に上にあるが、全ての標本点をこの指数曲線で定義すると、 $Q_1$  が (4.46) 式の条件を満たさないため、可逆変換とはならない。

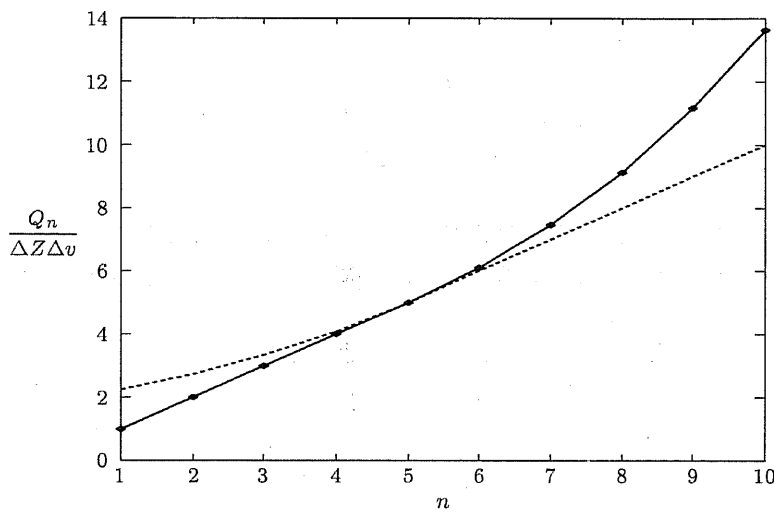


図 4.10:  $n$  と  $Q_n$  の関係 ( $k_m = 5$ )

図 4.11 は、 $Q_n$  を (4.51) 式にて定義した場合の、 $PQ$  平面における標本点の配置を模式的に示したものである。 $|Q| \approx 0$  の範囲では、 $Q$  の標本間隔は等間隔であるが、 $|Q|$  が大きくなるにしたがって、標本間隔も大きくなる。また、全ての  $k$  について、 $k$  と  $Q_n$  とが 1 対 1 に対応するため、原画像を正しく復元することができる。

#### カメラが $XY$ 平面上に並ぶ場合

カメラマトリックスやインテグラルフォトグラフィなどのように、カメラが  $XY$  平面上に並んでいる場合には、 $k = 0$  であるから、任意の方向の光線に対して、

$$P = p(i, j, 0, \mu, \nu) = i\Delta X \quad (4.52)$$

$$Q = q(i, j, 0, \mu, \nu) = j\Delta Y \quad (4.53)$$

となる。即ち、 $P, Q$  はそれぞれ  $\Delta X, \Delta Y$  の整数倍の値をとる。よって、 $P, Q$  の標本間隔をそれぞれ

$$\Delta P = \Delta X \quad (4.54)$$

$$\Delta Q = \Delta Y \quad (4.55)$$

とすれば、可逆変換を実現できる。言い換えれば、視点位置をそのまま  $P, Q$  の標本値とすれば良い。

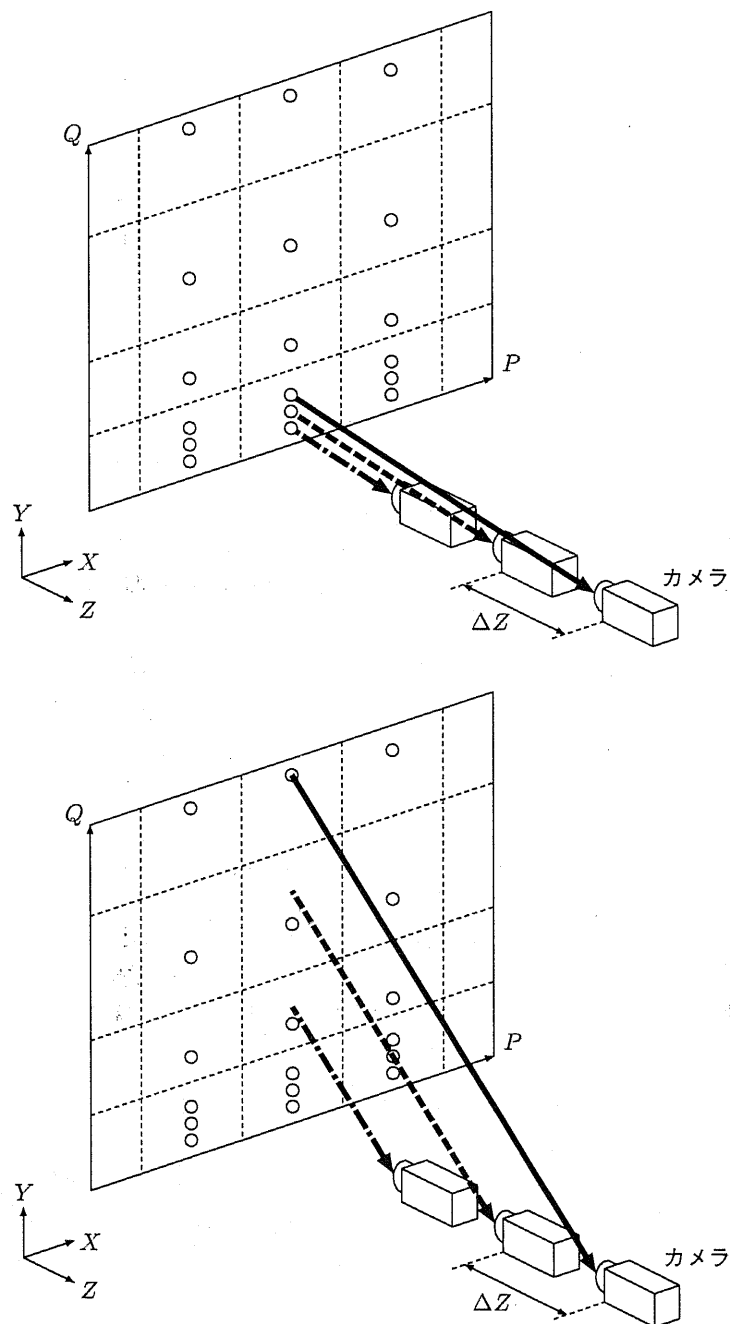


図 4.11:  $Q_n$  を (4.51) 式にて定めた場合の  $PQ$  平面における標本点の配置

カメラが  $XZ$  平面上に並ぶ場合

この場合には、 $j = 0$  であるから、 $Q$  は以下のように表すことができる。

$$Q = q(i, 0, k, \mu, \nu) = -k\nu\Delta Z\Delta v \quad (4.56)$$

となり、これは撮影点が  $Z$  軸上に並ぶ場合と同じである。よって、(4.47) 式または (4.51) 式によって表される標本化がそのまま適用できる。このとき、全ての  $i, \mu, \nu$  に対して次式が成り立つ。

$$k_1 \neq k_2 \Rightarrow [q(i, 0, k_1, \mu, \nu)] \neq [q(i, 0, k_2, \mu, \nu)] \quad (4.57)$$

よって、 $\hat{I}_{i,0,k}$  を正しく再構成するためには。全ての  $k, \mu, \nu$  に対して次式が成り立つように、 $P$  の標本化を行なう必要がある。

$$i_1 \neq i_2 \Rightarrow [p(i_1, 0, k, \mu, \nu)] \neq [p(i_2, 0, k, \mu, \nu)] \quad (4.58)$$

それぞれ  $(i_1\Delta X, 0, k\Delta Z)$  および  $(i_2\Delta X, 0, k\Delta Z)$  を通る、方向の同じ 2 つの光線を考えると、(4.40) 式の  $d_P$  は、

$$d_P = |I\Delta X| \geq \Delta X \quad (4.59)$$

となる。よって、 $P$  は間隔  $\Delta P = \Delta X$  で等間隔に標本化すれば良い。

以上より、可逆な相互変換のための標本点配置を模式的に示すと図 4.12 のようになる。標本点は  $P$  軸方向には一定間隔  $\Delta X$  で並び、また  $Q$  軸方向については、 $v$  の値が大きくなるに従って、標本点間隔も大きくなる。

### 4.5.3 標本化の具体例 (球面記録方式)

均一な標本化

原画像  $I_{i,0,k}$  中の方向  $(\theta, \phi)$  の光線に対応する画素の色情報が、4次元情報空間内の点  $(P_m, Q_n, \theta, \phi)$  に記録されるための条件は、

$$\begin{aligned} X_i &= \left[ P_m \cos \theta - \frac{Q_n \sin \theta}{\sin \phi} \right] \\ Z_k &= \left[ -P_m \sin \theta - \frac{Q_n \cos \theta}{\sin \phi} \right] \end{aligned} \quad (4.60)$$

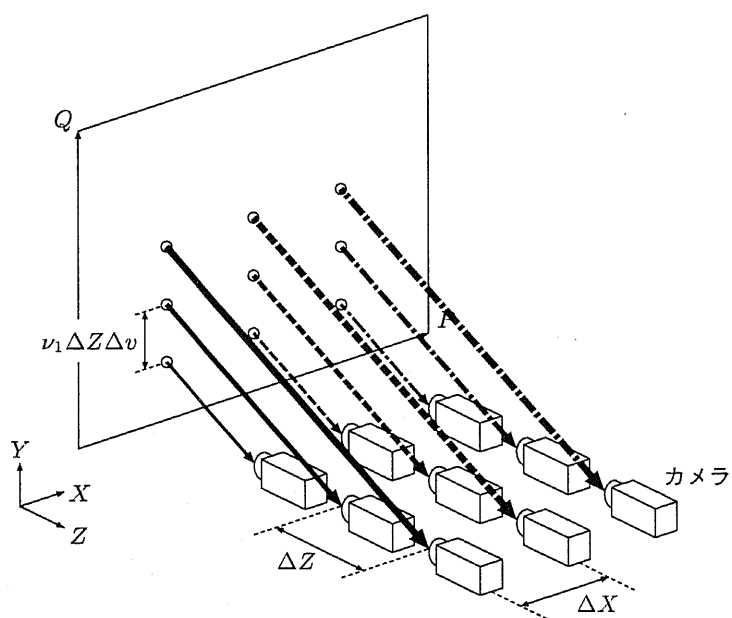
となる (ただし  $\phi \neq 0$  とする)。

一方、画像  $\hat{I}_{i,0,k}$  の復元において、方向  $(\theta, \phi)$  の光線に対応する画素の色情報が、4次元情報空間内の点  $(P_m, Q_n, \theta, \phi)$  から読み出されるための条件は次の通りである。

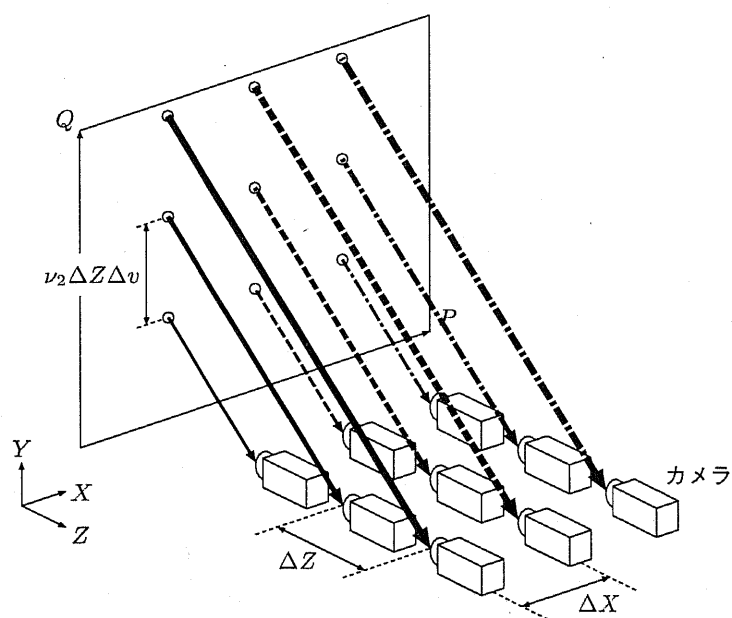
$$\begin{aligned} P_m &= [X_i \cos \theta - Z_k \sin \theta] \\ Q_n &= [(-X_i \sin \theta - Z_k \cos \theta) \sin \phi] \end{aligned} \quad (4.61)$$

画像  $\hat{I}_{i,0,k}$  が正しく復元できるための条件は、

全ての  $(\theta, \phi)$  について、ある  $(P_m, Q_n)$  が (4.61) 式を満たせば、その  $(P_m, Q_n)$  は (4.60) 式も満たす



(a)  $v = \nu_1 \Delta v$



(b)  $v = \nu_2 \Delta v$

図 4.12: カメラが  $XZ$  平面上に並ぶ場合の  $PQ$  平面上の標本点配置

ことである。

ここで、 $x$  の離散化の演算  $[x]$  として  $x$  の最近傍の標本値を仮定する。視点が  $X, Z$  軸方向にそれぞれ一定間隔  $\Delta X, \Delta Z$  で並んでいることを考慮すると、(4.60) 式は次のように表される。

$$\begin{aligned} \left| \left( P_m \cos \theta - \frac{Q_n \sin \theta}{\sin \phi} \right) - X_i \right| &\leq \frac{\Delta X}{2} \\ \left| \left( -P_m \sin \theta - \frac{Q_n \cos \theta}{\sin \phi} \right) - Z_k \right| &\leq \frac{\Delta Z}{2} \end{aligned} \quad (4.62)$$

さらに、 $P, Q$  がそれぞれ一定間隔  $\Delta P, \Delta Q$  で標本化されているとすると、(4.61) 式は次のように表される。

$$\begin{aligned} |(X_i \cos \theta - Z_k \sin \theta) - P_m| &\leq \frac{\Delta P}{2} \\ |(-X_i \sin \theta - Z_k \cos \theta) \sin \phi - Q_n| &\leq \frac{\Delta Q}{2} \end{aligned} \quad (4.63)$$

ここで、 $\Delta X = \Delta Z, \Delta P = \Delta Q = \alpha \Delta X$  ( $\alpha > 0$ ) とおくと、(4.62) 式は次のように表される。

$$\begin{aligned} \left| \alpha \left( m \cos \theta - \frac{n \sin \theta}{\sin \phi} \right) - i \right| &\leq \frac{1}{2} \\ \left| \alpha \left( -m \sin \theta - \frac{n \cos \theta}{\sin \phi} \right) - k \right| &\leq \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (4.64)$$

また、(4.63) 式は次のように表される。

$$\begin{aligned} |(i \cos \theta - k \sin \theta) - \alpha m| &\leq \frac{\alpha}{2} \\ |(-i \sin \theta - k \cos \theta) \sin \phi - \alpha n| &\leq \frac{\alpha}{2} \end{aligned} \quad (4.65)$$

(4.65) 式から、 $m, n$  はそれぞれ、

$$\begin{aligned} m &= \frac{1}{\alpha} (i \cos \theta - k \sin \theta) + A \\ n &= \frac{1}{\alpha} (-i \sin \theta - k \cos \theta) \sin \phi + B \end{aligned} \quad (4.66)$$

と表される。ただし、 $A, B$  は、

$$|A| \leq \frac{1}{2}, \quad |B| \leq \frac{1}{2} \quad (4.67)$$

を満たす数である。このとき、

$$\begin{aligned} \alpha \left( m \cos \theta - \frac{n \sin \theta}{\sin \phi} \right) - i &= \alpha \sqrt{A^2 + \frac{B^2}{\sin^2 \phi}} \cos(\theta + \delta) \\ \alpha \left( -m \sin \theta - \frac{n \cos \theta}{\sin \phi} \right) - k &= -\alpha \sqrt{A^2 + \frac{B^2}{\sin^2 \phi}} \sin(\theta + \delta) \end{aligned}$$

であるから、全ての  $\theta$  に対して次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \left| \alpha \left( m \cos \theta - \frac{n \sin \theta}{\sin \phi} \right) - i \right| &\leq \alpha \sqrt{A^2 + \frac{B^2}{\sin^2 \phi}} \\ \left| \alpha \left( -m \sin \theta - \frac{n \cos \theta}{\sin \phi} \right) - k \right| &\leq \alpha \sqrt{A^2 + \frac{B^2}{\sin^2 \phi}} \end{aligned} \quad (4.68)$$

さらに (4.67) 式より、

$$\alpha \sqrt{A^2 + \frac{B^2}{\sin^2 \phi}} \leq \frac{\alpha}{2} \sqrt{1 + \frac{1}{\sin^2 \phi}} \quad (4.69)$$

であるから、全ての  $\theta$  に対して (4.64) 式が成り立つためには、

$$\frac{\alpha}{2} \sqrt{1 + \frac{1}{\sin^2 \phi}} < \frac{1}{2}$$

であれば良い。よって、 $\Delta P$  および  $\Delta Q$  の満たすべき条件は次のようになる。

$$\Delta P = \Delta Q < \sqrt{\frac{\sin^2 \phi}{1 + \sin^2 \phi}} \Delta X \quad (4.70)$$

$\phi = 0$  の場合を除いて考えると、 $\phi$  の標本間隔が  $\Delta \phi$  のとき、

$$|\sin \phi| \geq |\sin \Delta \phi|$$

であるから、結局、

$$\Delta P = \Delta Q < \sqrt{\frac{\sin^2 \Delta \phi}{1 + \sin^2 \Delta \phi}} \Delta X \quad (4.71)$$

なる間隔で  $P, Q$  を標本化すれば、全ての原画像が正しく再現できる。

しかし実際には、必要な4次元情報空間の大きさが膨大になるため、このような標本化は現実的でない。例えば、対角線での画角  $45^\circ$  のレンズで、 $640 \times 480$  画素の2次元画像を撮影した場合、レンズ主点から画像面までの距離  $F$  は、

$$F = \frac{\sqrt{640^2 + 480^2}}{\tan(\pi/4)} = 800 \text{ [pixels]}$$

であり、これより  $\Delta \phi$  を概算すると、

$$\Delta \phi \approx \frac{1}{F} = 0.00125$$

となる。これを (4.71) 式に代入すると、原画像を正しく再現するための  $\Delta P, \Delta Q$  は、

$$\Delta P = \Delta Q < 0.00125 \Delta X \quad (4.72)$$

となり、 $\Delta X$  の  $1/800$  の間隔で標本化を行なうことになる。一方、 $P$  のとり得る値の範囲は、

$$P = i \Delta X \cos \theta - k \Delta Z \sin \theta = \sqrt{i^2 + k^2} \Delta X \sin(\theta + \gamma)$$

であるから、

$$-\sqrt{i^2 + k^2} \Delta X \leq P \leq \sqrt{i^2 + k^2} \Delta X$$

となる。撮影点数が  $X, Z$  方向にそれぞれ  $2i_m, 2k_m$  であるとき (即ち  $-i_m \Delta X \leq X_i \leq i_m \Delta X, -k_m \Delta Z \leq Z_k \leq k_m \Delta Z$ )、 $P$  の標本点数  $N$  は、

$$N \geq 2\sqrt{i_m^2 + k_m^2} \times 800$$

となる。

## 緯度成分に応じた標本化

上述のように、 $P, Q$  を全て均等に標本化した場合、標本点数は膨大なものになるが、これは  $\phi \approx 90^\circ$  の領域において極めて冗長に標本化を行なっていることによるものである。そこで、 $\phi$  の値に応じて、標本間隔を可変にすることを考える。

$\Delta P = \alpha \Delta X, \Delta Q = \alpha \Delta Q / \sin \phi$  とおくと、(4.62) 式は次のように表される。

$$\begin{aligned} |\alpha(m \cos \theta - n \sin \theta) - i| &\leq \frac{1}{2} \\ |\alpha(-m \sin \theta - n \cos \theta) - k| &\leq \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (4.73)$$

また、(4.63) 式は次のように表される。

$$\begin{aligned} |(i \cos \theta - k \sin \theta) - \alpha m| &\leq \frac{\alpha}{2} \\ |(-i \sin \theta - k \cos \theta) - \alpha n| &\leq \frac{\alpha}{2} \end{aligned} \quad (4.74)$$

(4.65) 式から、 $m, n$  はそれぞれ、

$$\begin{aligned} m &= \frac{1}{\alpha}(i \cos \theta - k \sin \theta) + A \\ n &= \frac{1}{\alpha}(-i \sin \theta - k \cos \theta) + B \end{aligned} \quad (4.75)$$

と表される。ただし  $A, B$  は (4.67) 式を満たす。(4.75) 式より、

$$\begin{aligned} \alpha(m \cos \theta - n \sin \theta) - i &= \alpha \sqrt{A^2 + B^2} \cos(\theta + \delta) \\ \alpha(-m \sin \theta - n \cos \theta) - k &= -\alpha \sqrt{A^2 + B^2} \sin(\theta + \delta) \end{aligned}$$

であるから、全ての  $\theta$  に対して次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} |\alpha(m \cos \theta - n \sin \theta) - i| &\leq \alpha \sqrt{A^2 + B^2} \\ |\alpha(-m \sin \theta - n \cos \theta) - k| &\leq \alpha \sqrt{A^2 + B^2} \end{aligned} \quad (4.76)$$

さらに (4.67) 式より、

$$\alpha \sqrt{A^2 + B^2} \leq \frac{\alpha}{\sqrt{2}} \quad (4.77)$$

であるから、全ての  $\theta$  に対して (4.73) 式が成り立つためには、

$$\frac{\alpha}{\sqrt{2}} < \frac{1}{2}$$

であれば良い。よって、

$$\alpha < \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (4.78)$$

であれば、原画像情報は保存される。撮影点数が  $X, Z$  方向にそれぞれ  $2i_m, 2k_m$  であるときの  $P$  の標本点数  $N$  を求めると、

$$N \geq \sqrt{2(i_m^2 + k_m^2)}$$

となり、緯度成分によらず均一に標本化した場合に比べて標本点数を大幅に削減することができる。



#### 4.5.4 実験

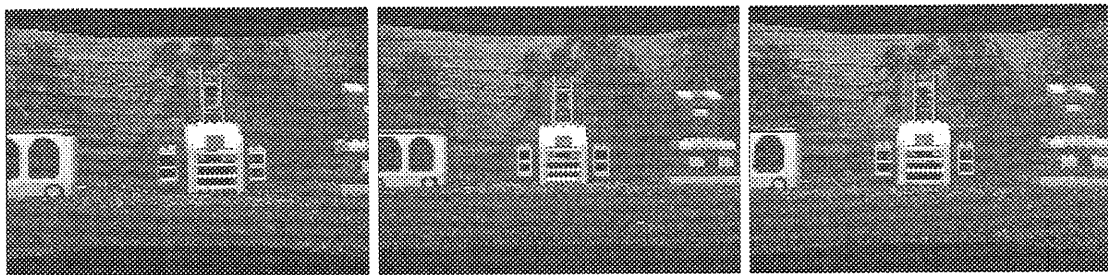
以上の考察の確認のため、多眼画像を異なる標本化に基づいて光線データとし、そこから原画像の復元を行なう。

多眼画像の撮影には、移動単眼撮像系 [33] を用いる。撮影点は、 $XZ$  平面上の  $-10\text{cm} \leq X \leq 10\text{cm}$ ,  $-10\text{cm} \leq Z \leq 10\text{cm}$  の範囲に、 $\Delta X = 1\text{cm}$ ,  $\Delta Z = 2\text{cm}$  として等間隔に配置し、 $u, v$  の標本間隔は  $\Delta u = \Delta v = 1/256$  とする。多眼画像は以下の2通りの標本化に基づいて光線データとする。

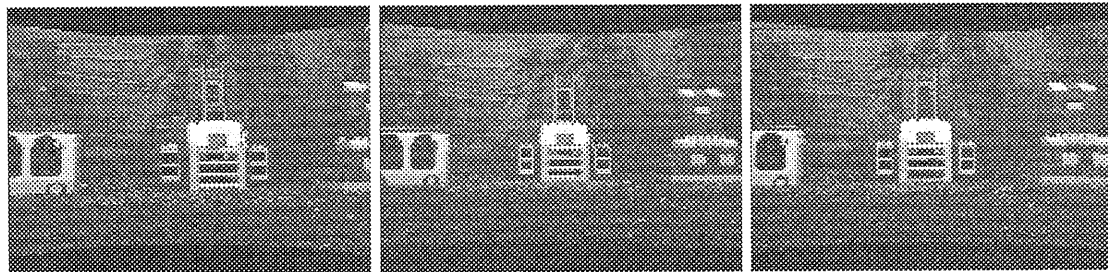
(A)  $Q$  を標本間隔  $\Delta Q = 5\Delta Z\Delta v$  で均一に標本化する。

(B)  $Q$  を (4.46) 式に従って標本化する。

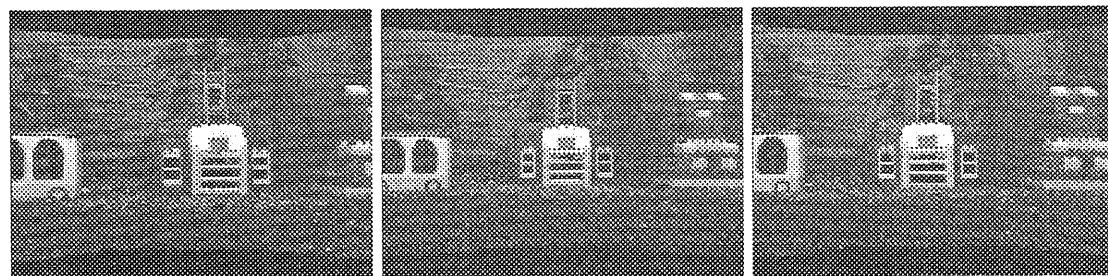
また、いずれのデータも、 $\Delta P = \Delta X$  とする。その上で、それぞれの光線データから、 $\hat{I}_{i,0,k}$  を合成する。



(a) 原画像



(b) データ (A) からの復元結果



(c) データ (B) からの復元結果

図 4.13:  $\hat{I}_{i,0,k}$  の復元結果 (左から順に  $\hat{I}_{-4,0,-4}$ ,  $\hat{I}_{0,0,2}$ ,  $\hat{I}_{2,0,-1}$ )

図 4.13 は 2 つの光線データから、原画像と同じ視点における画像を復元した結果である。図 4.13(b) は (A) の光線データから復元した結果で、標本間隔が光線の最小間隔よりも大きいため、画像中には復元誤りが繰り返し生じている。具体的には、原画像と異なる画像の、同じ位置にある水平ラインが貼り合わされ、垂直方向の段差となって繰り返し現れている。

一方、(B)の光線データから復元した場合は、正しく復元できる条件を満たしているため、図4.13(c)に示すように、図4.13(b)に見られた段差の繰り返しは生じていない。なお、図4.13以外の視点においても、画像は正しく復元されている。

#### 4.5.5 まとめ

$\Delta X = \Delta Y = \Delta Z$ である場合に、原画像情報を保存するために必要な $P, Q$ 軸の標本間隔を表4.1にまとめておく。なお、表中の「カメラ間隔」とは $\Delta X$ を指す。

表4.1: 原画像情報を保存するための光線の標本間隔

記録方式	平面記録		球面記録
カメラ配置	マトリックス型	ウォークスルー型	ウォークスルー型
$P$ 軸の標本間隔	カメラの水平間隔以下	カメラの左右間隔以下	カメラ間隔の $1/\sqrt{2}$ 以下
$Q$ 軸の標本間隔	カメラの垂直間隔以下	(カメラの前後間隔×方向成分の標本間隔)以下	カメラ間隔の $1/\sqrt{2}$ 以下

記録方式やカメラ配置によっても異なるが、原画像の情報を損失なく記録するためには、位置成分を少なくともカメラの間隔より細かく離散化する必要がある。中には、カメラ間隔の $1/1000$ 程度のオーダでの離散化が必要な場合もあり、4次元情報空間内の標本点数は膨大なものになる。さらに、4.5.2節や4.5.3節でも触れたように、膨大な数の標本点を用意しても、そのうち実際にデータが取得される標本点の数は僅かしかないので、効率的な記録の観点からは問題がある。

## 4.6 離散データ間の変換における光線の近似に関する検討

前節では、原画像情報を損失なく記録するための4次元情報空間の離散化を試みたが、このような離散化ではデータを効率的に記録できないことが明らかになった。また、4次元情報空間において正しい光線が記録されているとは限らないため、原画像は正しく再現できたとしても、撮影地点以外の視点の画像は歪みが大きくなる可能性もある。

そこで本節では、原画像情報を損失なく記録することは行わない代わりに、原画像情報を用いて4次元空間情報の各標本点に記録するデータを近似する処理において、色などの値の誤差を小さくすることで、最終的に生成される画像の誤差の低減を図る。その際、原画像情報の損失については特に考慮しない。ここでの議論は、原画像情報を4次元情報空間に展開する場合だけでなく、原画像からImage-Based Renderingにより新たな画像を生成する場合にも有効であると考えられる。

### 4.6.1 光線の近似法

以下、原画像として透視投影で撮影された多眼画像を考え、必要となる光線を $f_0 = f(P_0, Q_0, \theta_0, \phi_0)$ と表すことにする。このとき、まず、読み出し元となる原画像を以下の手順で決定する。

- (1) 各々の原画像の撮影位置を通過し、 $(\theta_0, \phi_0)$ の方向に進む光線の位置成分 $(p_0, q_0)$ を求める。
- (2)  $(P_0, Q_0)$ と $(p_0, q_0)$ の距離が最小となる原画像を、画素値の読み出し元とする。

これにより、必要な光線の最近傍にある光線を含む原画像が選択される。この原画像の中から読み出す画素を決定する手法として、次の2つを考える。

手法1 方向成分が  $(\theta_0, \phi_0)$  に最も近い光線に対応する画素を選択する。

手法2 位置成分が  $(P_0, Q_0)$  に最も近い光線に対応する画素を選択する。このとき選択される画素の方向は、一般には  $(\theta_0, \phi_0)$  と等しくない。

手法2では、選択された原画像の中から、位置成分が  $(P_0, Q_0)$  となる方向  $(\theta, \phi)$  を求め、それに最も近い方向の光線に対応する画素を選ぶ。なお、 $(\theta, \phi)$  は、原画像が撮影された位置を  $(X, Y, Z)$  とすると、次式により求められる。

$$\theta = \arccos \left[ \frac{P_0}{\sqrt{X^2 + Z^2}} \right] - \arctan \left[ \frac{Z}{X} \right] \quad (4.79)$$

$$\phi = \arccos \left[ \frac{Q_0}{\sqrt{(X \sin \theta + Z \cos \theta)^2 + Y^2}} \right] - \arctan \left[ \frac{X \sin \theta + Z \cos \theta}{Y} \right] \quad (4.80)$$

以下、手法1, 2により  $f_0$  の近似として選択される光線をそれぞれ  $f_1, f_2$  と表すことにする。 $f_1, f_2$  が具体的にどのような光線となるかを、球面記録方式における  $P\theta$  平面を用いて模式的に示すと、図4.14のようになる。

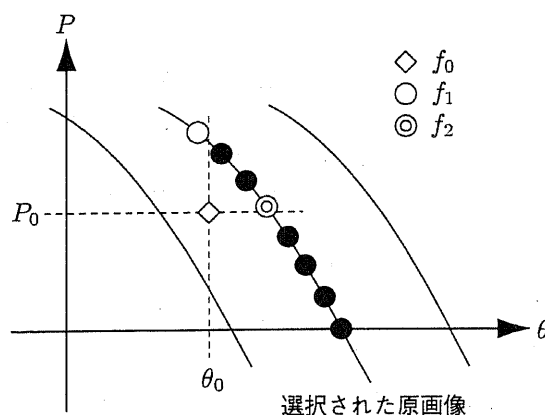


図4.14:  $P\theta$  平面における各光線の位置関係

上記の2種類の近似法は、光線の方向または位置成分のいずれか一方のみの距離が最小となるような標本値を選択するものであり、 $f_0$  の最近傍の光線は、 $f_1, f_2$  のいずれとも異なるものになる可能性がある。しかし、4次元情報空間内で距離を求めるためには、方向成分と位置成分の重み付けが必要になり、重み付けの仕方によって結果が異なる可能性があるため、ここでは取り上げない。

#### 4.6.2 各近似法によって生じる誤差

ここで、 $f_1$  および  $f_2$  の  $f_0$  に対する誤差について考える。簡単のため、誤差は水平方向についてのみ考えることにする。 $f_0 = f(P_0, Q_0, \theta_0, \phi_0)$  に対し、 $f_1, f_2$  を近似的に以下のように表す。

$$f_1 = f(P_0, Q_0, \theta_0 + \Delta\theta, \phi_0)$$

$$f_2 = f(P_0 + \Delta P_1, Q_0, \theta_0, \phi_0)$$

このとき、実空間における  $f_0, f_1, f_2$  の位置関係は図4.15のようになる、

実際に光線が発せられるのは物体の表面であるため、 $f_1, f_2$  のうち、物体表面上で  $f_0$  との交点に近い点を通る方が、色や強度などが  $f_0$  に近くなり、生成される画像における誤差が小さくなる可能性が高いと考

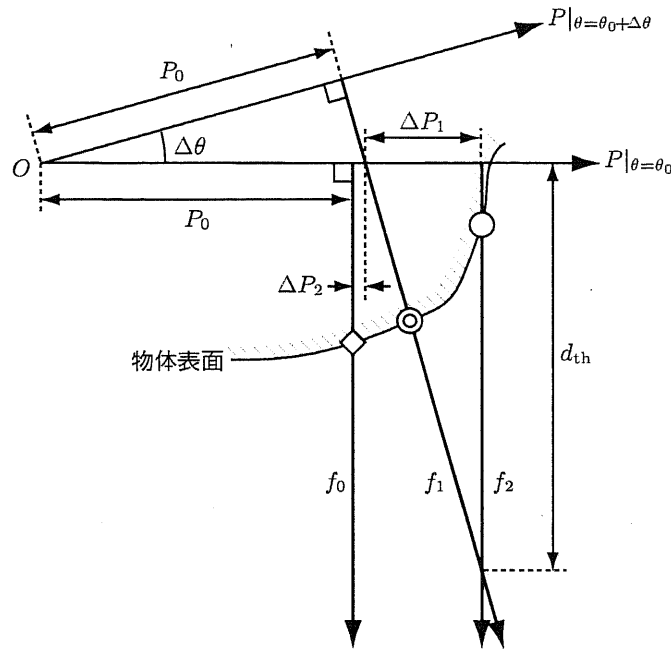


図 4.15: 実空間における各光線の位置関係

えられる。図 4.15 によれば、 $\theta = \theta_0$  における  $P$  軸 (図中では  $P_{\theta_0}$  軸とする) からの距離が  $d_{th}$  以下であれば、 $f_2$  の方が  $f_0$  に近くなる。 $d_{th}$  は、図より、

$$d_{th} = \frac{\Delta P_1 - \Delta P_2}{\tan \Delta \theta} \quad (4.81)$$

により求められる。ただし、 $\Delta P_2$  は次式により与えられる。

$$\Delta P_2 = \left| \frac{P_0}{\cos \Delta \theta} - P_0 \right| = \left| \left( \frac{1}{\cos \Delta \theta} - 1 \right) P_0 \right| \quad (4.82)$$

次に、 $\Delta P_1$ ,  $\Delta P_2$  がどのような値を取り得るかについて考える。 $f_1$  は、近似的には、所望の光線と方向成分が同じ光線である。そこで、 $\theta = \theta_i$ ,  $\theta_{i+1}$  ( $\theta_i = i\Delta\theta$ ) にて撮影された 2 枚の隣接する原画像の間で、方向  $\theta$  の光線どうしの  $P$  軸に沿った距離  $\Delta P_i(\theta)$  を求める。半径  $r$  の球面上を移動し、光軸が球面の中心を向くカメラによる透視投影の多眼画像において、経度  $\theta$ 、緯度  $\phi$  のときの視点の位置座標は、

$$X = r \sin \theta \cos \phi, Y = r \sin \phi, Z = r \cos \theta \cos \phi \quad (4.83)$$

となるから、この点で取得される方向  $\theta$  の光線の  $P$  座標値は次のようになる。

$$\begin{aligned} P &= (r \sin \theta \cos \phi) \cos \theta - (r \cos \theta \cos \phi) \sin \theta \\ &= -r \cos \phi \sin(\theta - \theta) \end{aligned} \quad (4.84)$$

よって、 $\Delta P_i(\theta)$  は、

$$\Delta P_i(\theta) = r' \cos(\theta - i\Delta\theta) \Delta\theta \quad (4.85)$$

となる。ただし、 $r \cos \phi = r'$  とおき、 $\Delta\theta$  は微小な値であると仮定している。

$f_0$  が、 $P\theta$  平面において、 $\theta_i$ ,  $\theta_{i+1}$  で撮影された 2 つの原画像に対応する曲線の間に位置するとき、 $f_1$  は、各々の原画像に含まれる、 $\Delta P_i(\theta_0)$  だけ離れた 2 つの光線のうちの  $f_0$  に近い方となる。よって、 $\Delta P_1$  が取

り得る値の範囲は以下ようになる。

$$\Delta P_1 \leq \frac{|\Delta P_i(\theta_0)|}{2} = \left| \frac{r'}{2} \cos(\theta_0 - i\Delta\theta) \Delta\theta \right| \quad (4.86)$$

一方  $f_2$  は、近似的には、所望の光線と位置成分が同じ光線となる。隣接する2枚の原画像の間で、 $P$ 成分が同じ光線どうしの  $\theta$  軸に沿った距離  $\Delta\theta_p$  は、図4.16より、 $P$ の値に関係なく、

$$\Delta\theta_p = \Delta\theta \quad (4.87)$$

であり、 $f_2$ はこの距離だけ離れた2つの光線の内の  $f_0$ に近い方であるから、 $\Delta\theta$ のとり得る値の範囲は次式で与えられる。

$$\Delta\theta \leq \frac{\Delta\theta_p}{2} = \frac{\Delta\theta}{2} \quad (4.88)$$

これと(4.82)式より、

$$\Delta P_2 \leq \left| \left( \frac{1}{\cos(\theta/2)} - 1 \right) P_0 \right| \quad (4.89)$$

となり、さらに、

$$P_0 = r' \sin \left[ \theta_0 - \frac{\Delta\theta}{2} - \theta_i \right] = r' \sin \left[ \theta_0 + \frac{\Delta\theta}{2} - \theta_{i+1} \right] = r' \sin \left[ \theta_0 - \left( i + \frac{1}{2} \right) \Delta\theta \right]$$

であるから、結局  $\Delta P_2$  が取り得る値の範囲は以下の通りである。

$$\Delta P_2 \leq \left| r' \left( \frac{1}{\cos(\theta/2)} - 1 \right) \sin \left[ \theta_0 - \left( i + \frac{1}{2} \right) \Delta\theta \right] \right| \quad (4.90)$$

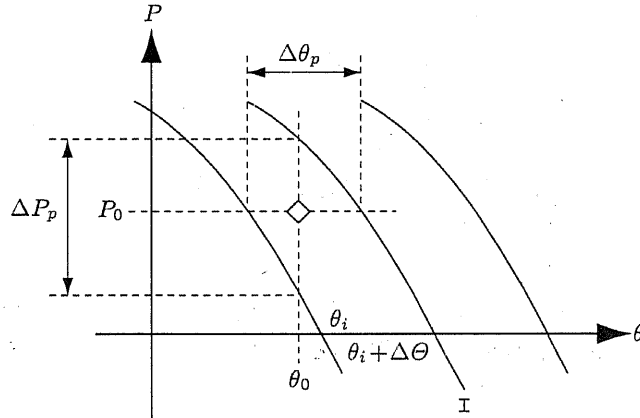


図4.16: 隣接する画像どうしでの光線の間隔

ここで、 $d_{th}$ の具体的な値を求めてみる。撮影間隔を次節に述べる実験と同じ  $\Delta\theta = 0.75^\circ$  とし、 $\theta_0 = \delta/2$ 、 $i=0$ 、 $\Delta\theta = \Delta\theta/2$  とすると、カメラから軌道中心までの距離  $r'$  に対し、

$$d_{th} = 0.98r' \quad (4.91)$$

となり、物体の大きさがこれより大きければ、 $f_1$ の方が  $f_0$ に対する誤差が小さくなる。しかし現実には、(4.91)式の  $d_{th}$ が成立するような状況になる可能性は低い。なぜなら、(4.91)式は物体表面がカメラのピンホールに接近した状態を表しているが、現実には、ピンホールに相当する点の手前にレンズ系や撮像素子などがあるため、ピンホールを物体に接近させるのはほぼ不可能であると考えられるためである。また、 $d_{th}/r' \approx 1$ とならない場合には、物体の大きさが  $d_{th}$ を上回る可能性があるが、 $d_{th}/r'$ がそのような値をとるのは超広角レンズを用いた場合に限られる。以上より、ほとんどの場合、手法2を選んだ方が、誤差を低減することができると考えて良い。

### 4.6.3 実験

以上の検討結果を確認するため、上記の2通りの光線選択アルゴリズムを適用して、透視投影により撮影された多眼画像から新たな画像を生成し、その結果を比較する。

#### 多眼撮影

通常の透視投影の画像が得られるNTSCビデオカメラ(ソニー DCR-VX1000)を用いて、カメラが物体を取り囲む球面上を移動するのとはほぼ等価な多眼撮影を行なう。撮影間隔は、経度方向、緯度方向ともに $0.75^\circ$ 間隔とし、撮影点1箇所につき $640 \times 480$ 画素の透視投影像を撮影する。カメラパラメータを一定に保つため、ズームおよびフォーカスは固定しておく。

#### カメラの画角とピンホール位置の推定

透視投影で撮影された多眼画像を光線情報に変換するためには、カメラパラメータ(カメラの光軸の方向、ピンホールの位置、カメラの画角)を求める必要がある。ここでは、回転角を制御できるターンテーブルを利用して物体を回転させるため、光軸の方向は既知であると考えられる。そこで、残りのピンホール位置および画角を求めることが必要になる。

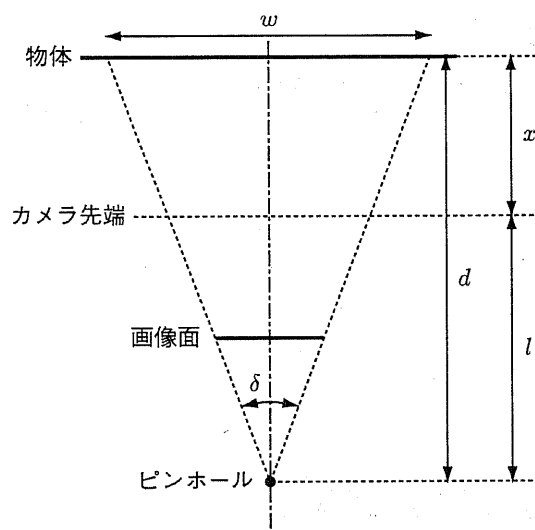


図 4.17: 透視投影像の撮影位置とカメラパラメータの関係

水平画角  $\delta$  のカメラを用いて、ピンホールから水平距離  $d$  の位置にある物体を撮影したとき、画面内に収まっている部分の実際の横幅が  $w$  であるとする。このとき、図 4.17 より、 $\delta$ ,  $d$  および  $w$  の間には次のような関係が成り立つ。

$$w = 2d \tan \frac{\delta}{2} \quad (4.92)$$

しかし、実際のカメラでは、ピンホールの位置は不明であるため、例えばカメラの先端など、距離計測のための適当な基準点を取り、予め設定した位置座標の原点からカメラの基準点までの距離を  $x$  とする。その上で、 $x = 0$  のときの物体からピンホールまでの距離を  $l$  とすると、 $d = x + l$  であるから、上式は次のように書き直すことができる。

$$w = 2(x + l) \tan \frac{\delta}{2} \quad (4.93)$$

よって、多数の  $(x, w)$  の組を求め、最小2乗近似により上式を当てはめれば、 $\delta$  および  $l$  の値を推定することができる。 $(x, w)$  の組は以下の手順により求める。

- (1) ターンテーブルの回転軸が通る位置に、カメラの光軸と垂直に定規を置く。
- (2) カメラのズームおよびフォーカスを、後の多眼撮影と同じ状態に固定する。
- (3) カメラ設置ベースの先端から可動部分の先端までの距離の計測値を  $x$  とし、この値を変えながら定規を撮影する。
- (4) 画像の左右両端の目盛を読み取り、その差を  $w$  とする。

以上のようにして推定した  $\delta, l$  の値は次の通りである。

$$\delta = 0.3668 [\text{radian}] \quad (4.94)$$

$$l = 313.3626 [\text{mm}] \quad (4.95)$$

また、球面の中心と仮定した位置からレンズ光軸までの高さ (すなわちピンホールの高さ)  $h$  については、実測によって求めた結果、

$$h = 11.2 [\text{mm}] \quad (4.96)$$

であった。よって、カメラの基準点の位置が  $x$  のときの視点位置  $(X, Y, Z)$  は、上記の  $l, h$  を用いて、

$$X = (x + l) \sin \Theta \quad (4.97)$$

$$Y = (x + l) \cos \Theta \sin \Phi + h \cos \Phi \quad (4.98)$$

$$Z = (x + l) \cos \Theta \cos \Phi - h \sin \Phi \quad (4.99)$$

により求められる。

#### 4次元情報空間への展開

2.4.1 節で述べたように、光線を球面記録方式によって表現する場合、4次元情報空間に記録される情報は、正投影像の集まりとなる。そこで、透視投影で撮影された多眼画像を正投影像に変換することにより、4次元情報空間に展開する。正投影像の画素数は  $640 \times 480$  画素とし、原画像の撮影時のカメラの光軸方向と同じ方向の光線群に対応するものを合成する。位置成分の分解能 (正投影像の実寸 ÷ 画素数) は、

$$\frac{88.6 \text{ mm}}{640 \text{ pixel}} = 0.138 \text{ mm/pixel}$$

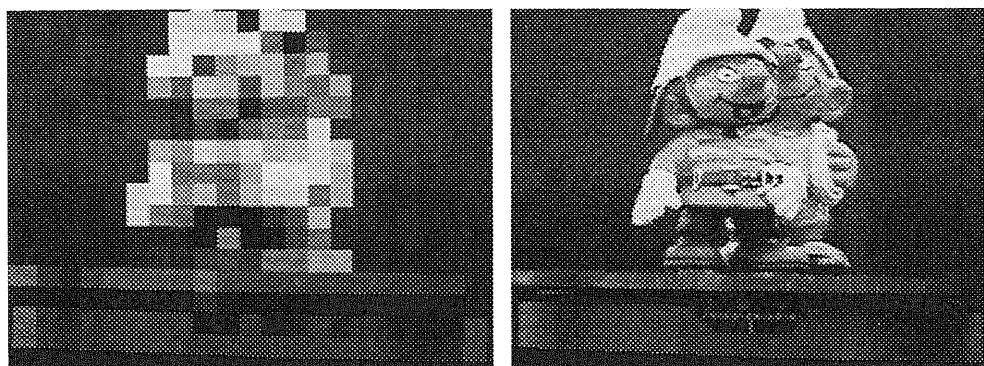
とする。なお、正投影像を上記のように設定した根拠については後述する。

図 4.18 は、2通りの手法により、正投影像を生成した結果である。手法1を用いた場合、図 4.18(a) のように、モザイク状の画像となる。これに対し、手法2を用いた場合には、生成した正投影像は図 4.18(a) に示すようになり、手法1と比較して良好な結果が得られる。ただし、この場合でも、光線を読み出す原画像が切り替わる境界付近で、不連続となっている。

#### 透視投影像からの新たな画像の合成

透視投影の多眼画像から、4次元情報空間に展開する処理を経ずに、直接新たな透視投影像を生成する。なお、多眼撮影時のカメラの位置は  $x = 6.5 \text{ mm}$  ( $d = 319.8626 \text{ mm}$ ) とする。

図 4.19 は、手法1, 2を用いて新たな画像 (透視投影像) を合成した結果である。これによると、手法1では、視点から物体までの距離が撮影時とほぼ同じ  $320 \text{ mm}$  であれば、合成結果には歪みがほとんど見ら



(a) 手法 1 を適用

(b) 手法 2 を適用

図 4.18: 透視投影の多眼画像から生成した正投影像

れない。しかし、撮影時に比べて大きく近付いたり遠ざかったりした場合には、明らかに正しい合成が行われていない。一方、手法 2 を用いた場合には、手法 1 で合成が正しく行なわれなかった視点においても、視覚的に良好な結果が得られている。

#### 4.6.4 まとめ

透視投影の多眼画像を用いて、4次元情報空間への展開や Image-Based Rendering による新たな画像生成を行なう場合に、必要な光線を取得済みの光線で近似するための指針について論じた。その結果、方向成分に近い光線よりも、位置成分に近い光線を用いた方が、多くの場合、実空間内でより所望の光線に近い位置を通過するため、誤差を生じる可能性が少ないという結論が得られ、実験からもそのことが確認された。本節で得られた結果は、最近傍の光線を求める場合や、周囲の光線の重み付け和による近似を行なう場合など、位置と方向の重み付けを行なう上でも参考になると考えられる。

### 4.7 本章のまとめ

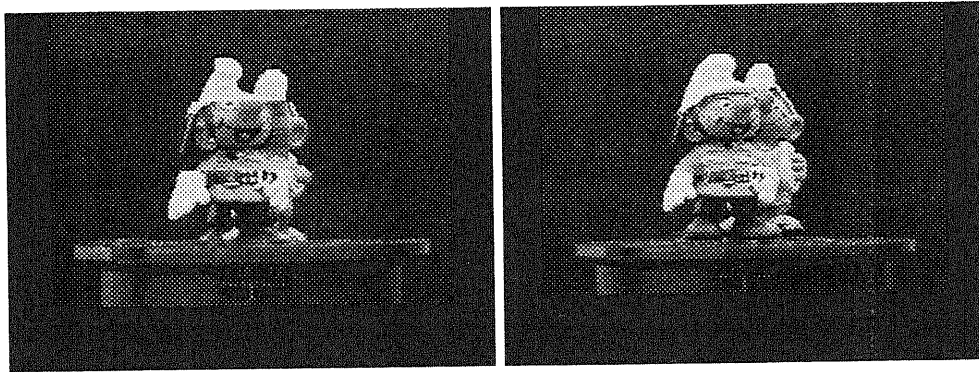
我々が実際に扱う光線情報はデジタルデータであり、光線が連続的なデータであるという、光線記述の手法の理論構築の前提条件は成り立たない。本章ではこの点に着目し、光線を離散的なデータとして扱う場合の影響について論じた。

既存の 3 次元画像入力手段を用いた場合、得られるデータと、それを記録する離散的な 4 次元情報空間とでは、標本点の分布が異なっている。そのため、中立的な光線データとして正しく記録するためには、一度標本化されたデータから、標本化前のデータを復元し、再度標本化することが必要となる。しかし、4 次元情報空間の場合、1 次元信号のような復元アルゴリズムは、現時点では発見されていない。そのため、離散的な 4 次元情報空間の個々の標本点について、その点の色などの情報を、取得済みの光線 (原画像情報) の情報を用いて近似する必要があるが、その方法によっては、原画像さえも正しく復元できなくなることが大きな問題となることが明らかになった。

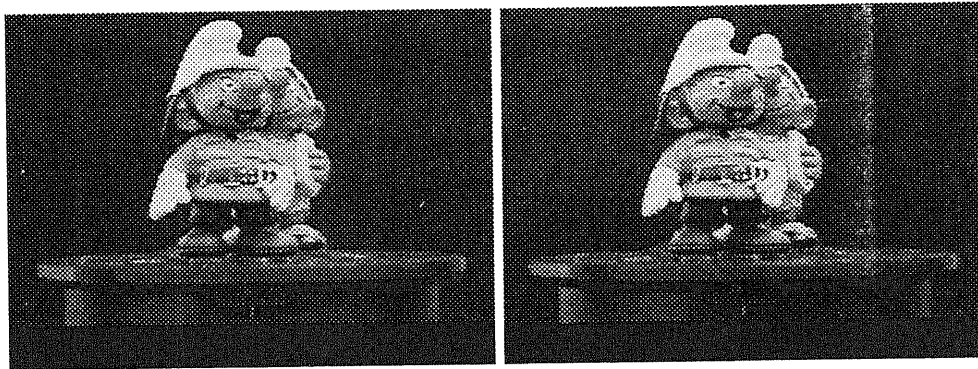
この問題に対して、本章ではまず、多数の視点にて撮影された 2 次元画像群を 4 次元情報空間に展開する際に、少なくとも実際に撮影が行なわれた位置での画像は正しく再現できるようにするという観点から、光線のパラメータの離散化の方法について論じた。しかし、このようなアプローチでは、4 次元情報空間の情報量が、取得したデータに対して膨大なものになる点が問題となる。

次に、多視点画像を離散的な 4 次元情報空間に展開する際に、必要な光線の情報を原画像情報で近似するアルゴリズムを工夫することにより、誤差の抑制を試みた。具体的には、必要な光線を近似する光線と

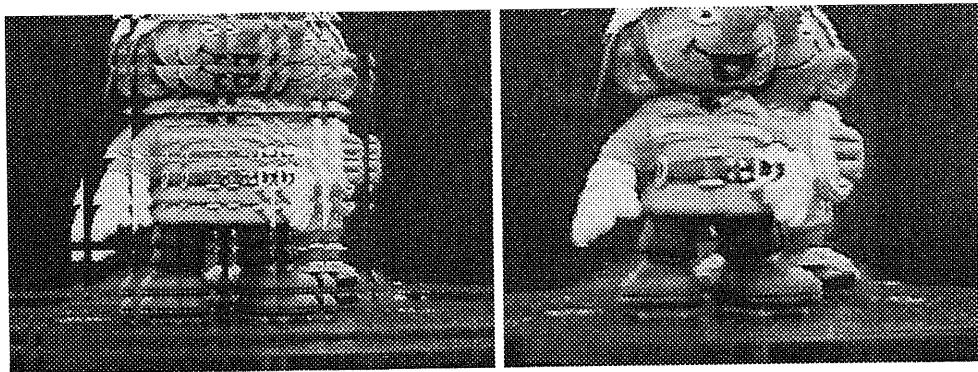




(a)  $r = 400\text{mm}$



(b)  $r = 320\text{mm}$



(c)  $r = 200\text{mm}$

図 4.19: 手法 1 (左) および手法 2 (右) を用いて合成した画像

して、方向パラメータの値が最も近い光線と、位置パラメータの値が最も近い光線を用いた場合とで、所望の光線との誤差について検討した。その結果、位置パラメータが近い光線の方が、所望の光線に近い位置から発せられるため、誤差が小さくなる可能性が高いという結論に至り、実験結果からもそのことが確認された。

本章で述べた手法は、標本化の相違に起因する最終的な表示用画像の歪みを抑制し、画質を改善する目的においては有効である。また、本章では、必要な光線を、取得済みの光線のうちのただ1つの光線によって近似しているが、複数の光線の重み付け和などを用いることで、さらに画質改善を図ることも考えられる。

しかし、本章の手法は、取得されるデータと蓄積されるデータで標本点分布が異なるという、根本的な問題の解決とはなっていない。実験の結果を見ても、4次元情報空間に展開した際の誤差を完全に除去するには至っていない。その限りにおいては、画質の改善に限界があり、また圧縮などの処理を行なう上でも問題になると考えられる。

そこで次章では、離散的な4次元情報空間における各々の標本点に対応する光線を、別の標本点から近似するのではなく、直接取得することを考える。すなわち、4次元情報空間と標本点分布が同じになるような撮影方式について検討を行なう。

## 参考文献

- [1] 藤井俊彰, 木本伊彦, 谷本正幸: “縦方向視差を有する光線空間データの構造化の検討”, 3次元画像コンファレンス'97, 5-3 (1997).
- [2] 苗村 健, 金子正秀, 原島 博: “3次元空間情報の光線記述における光線方向の量子化”, 情報理論とその応用シンポジウム (SITA'97), II, pp.685-688 (1997).

## 第5章

---

# 正投影像を利用した光線情報の 直接的な取得

## 5.1 はじめに

第4章で論じたように、既存の3次元入力手段によって取得したデータを、位置・方向のパラメータが離散的な値をとる4次元情報空間に展開すると、3次元実空間内に連続的に分布する光線を一度標本化したデータを、別の標本点で再度標本化することになる。その過程で、誤差を含む可能性があり、再生画像にも影響を与える。

これに対し、離散的なパラメータをもつ4次元情報空間と同じ標本点分布で光線を取得することができれば、再標本化は不要となる。これにより、4次元情報空間に記録されるデータが誤差を含む可能性がなくなり、再構成された画像における誤差の低減が可能となる。

そこで本章では、離散パラメータをもつ4次元情報空間と同じ標本点分布で光線を取得する手法について検討する。このような手法は、取得したデータを、再標本化処理を行わずにそのまま光線情報として利用できることから、以下では「光線の直接取得法」と呼ぶことにする。また、光線の直接取得法の中でも特に、球面記録方式に基づいて表現される光線情報が、被写体の正投影像の集合であることに着目し、正投影像を直接撮影するレンズであるテレセントリックレンズを利用した光線の直接取得法について論じる。

## 5.2 光線の直接取得

4.2.3節にて述べたように、4次元情報空間の離散化は、その情報空間内の格子点に対応する光線のみを選んで記録することに相当する。一方、画像撮影においては、4.2.1節で述べたように、撮像素子への露光と、撮像素子からの有限個の信号値の出力という、2段階の標本化を行なっている。

そこで、光線を直接取得するには、第4章の図4.5(a)または図4.5(b)に示したような標本化を第1段階で行ない、次いでその中のデータを、標本点の位置が揃うように標本化する処理を実装すれば良いと考えられる。ただし、4次元情報空間の上で図4.5(a)や図4.5(b)のように表される標本化が、実空間においてどの光線を取得することに相当するかについては、記述方式によって異なっており、場合によっては実装できない可能性もある。そこで、以下では、各記述方式における具体例を見ることにする。

### 平面記録方式

2.4.1節で述べたように、基準となる単一の平面を通過する光線のみを記述する場合には、平面記録方式が最も容易である。平面記録方式において、位置パラメータ $P, Q$ は、光線の方角に関係なく、基準となる平面における位置を表している。よって、 $(P, Q) = (P_0, Q_0)$ として図4.5(b)のような標本化を行なうと、基準平面上の $X = P_0, Y = Q_0$ の位置に到達する様々な方向の光線が取り出される(図5.1参照)。この標本化を実装するには、 $(P_0, Q_0)$ で表される位置に透視投影のカメラを置いて撮影を行えば良い。

一方、方向パラメータ $u, v$ は(2.4)式で定義されるが、これらは、(2.10)式によれば、光軸を基準面に垂直にして撮影した透視投影像の画素の位置に比例する。

したがって、平面記録方式に基づき、各パラメータの値を離散化した4次元情報空間に格納される光線を直接取得するためには、以下の条件を満たすようにすれば良い。

- 視点が単一の平面上に正方格子状に並ぶ。
- 各々の視点で、画素が正方格子状に並んだ透視投影像が撮影される。
- 全ての視点において、カメラの光軸が、視点の並ぶ平面に対して垂直である。
- 全ての視点において、カメラの画角と透視投影像の画素数が等しい。

このような条件を満たすような撮影方法は、カメラマトリックスとして既に実現されている。また、Light Field データ撮像装置(2.5.3節を参照)のように、1台のカメラが光軸に垂直な平面内を移動するような移

動単眼方式も、上記の条件を満たす撮影方式の一例である。

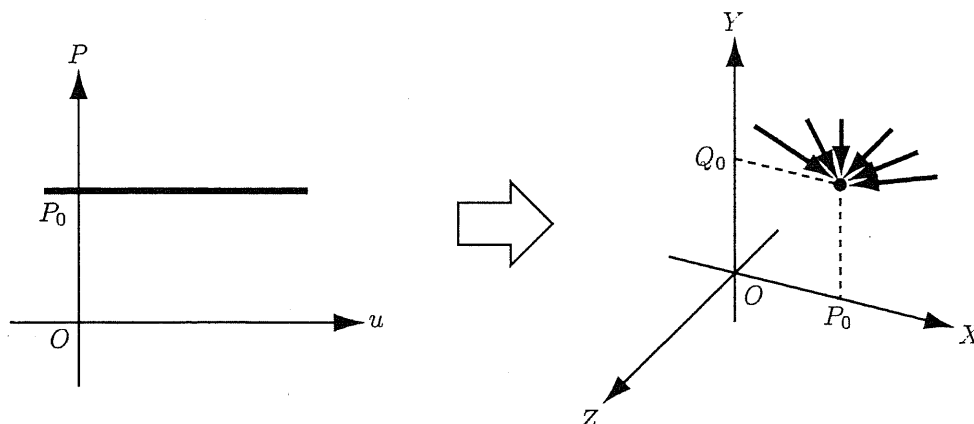


図 5.1: 平面記録方式における  $P$  一定の光線群

### 球面記録方式

一方、物体や空間の全周情報を記述するためには、球面記録方式が必要となる。球面記録方式の方向パラメータ  $\theta, \phi$  は、図 2.12 のように定義した方向角をそのまま用いている。また、位置パラメータ  $P, Q$  は、光線に垂直な平面における通過位置を表す。

平面記録方式の場合は、位置パラメータ  $(P, Q)$  で表される 3 次元空間内の位置にカメラを置くことで、図 4.5(b) の標本化を実装することができた。しかし、球面記録方式では、位置パラメータ  $(P, Q)$  で表される 3 次元空間内の位置は、 $(P, Q) = (0, 0)$  の場合を除き、光線の方角に応じて異なっており (図 5.2 参照)、かつ各々の点では 1 本の光線しか記録されない。そのため、図 4.5(b) のような標本化の実装は現実的でない。

一方、図 4.5(a) のような標本化は、図 5.3 に示すように、平行な光線群を一度に取得することに相当する。したがって、平行投影像を撮影する手段があれば、この標本化を実装することができる。さらに、2.4.1 節で言及したように、球面記録方式に基づく光線情報は、正投影像の集合としての性質を有し、位置パラメータ  $(P, Q)$  は、正投影像における位置を表している。

したがって、被写体の正投影像が撮影でき、かつ各々の正投影像の画素が正方格子状に並んでいれば、球面記録方式に基づく光線のデータの直接取得が実現できることになる。

## 5.3 テレセントリックレンズの原理とその性質

前節の議論によれば、全周情報の記録のための光線の直接取得を実現するための重要な要素となるのは、正投影像を撮影する手段である。その一つに、光学的に正投影像を結像するテレセントリックレンズが挙げられる。本節では、テレセントリックレンズが正投影像を結像する原理について説明する。

### 5.3.1 レンズ系における絞りの作用

光学系は一般的に、その系を通過できる光束の範囲を制限する作用をするものを有し、これを広い意味で絞りという。具体的には、レンズの枠や縁、あるいは写真レンズの光量を調節する機構 (狭義の絞り) など挙げられる。広義の絞りのうち、系を通過できる光束を決定するものを開口絞りという。

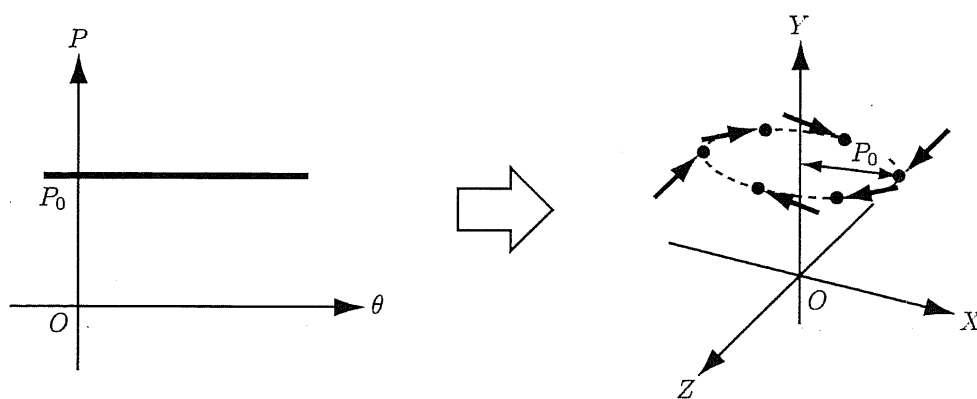


図 5.2: 球面記録方式における  $P$  一定の光線群

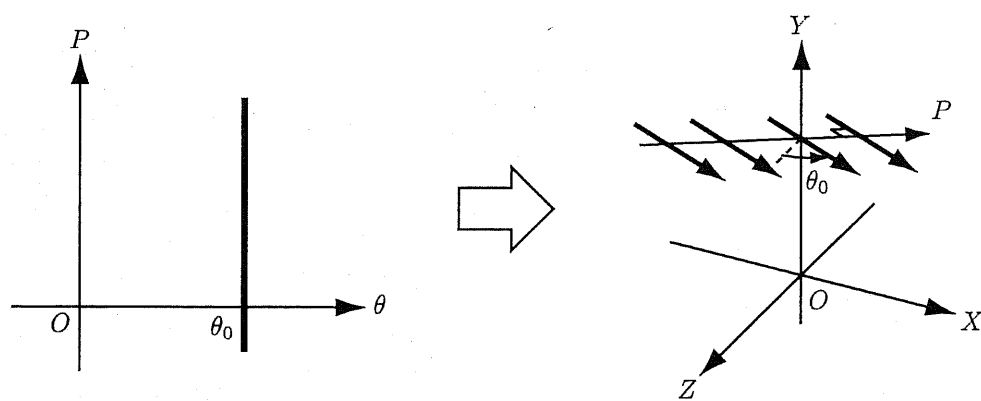


図 5.3: 球面記録方式における  $\theta$  一定の光線群

系が複雑になるに従って、絞りの数も増加するため、直観的に開口絞りを特定するのが困難になる。その場合、開口絞りの像を考えることがある。開口絞りの像のうち、開口絞りより物体側にあるレンズ(系)によって結像される像を入射瞳、像側にあるレンズ(系)による像を射出瞳と呼ぶ。このとき、入射瞳は系に入る光束の開きを制限し、また射出瞳は系から出て像点に収束する光束の開きを制限する。

開口絞りの径を小さくしていくと、最終的には開口絞りの中心に入射する光線のみが光学系を通過でき、結像に関与することになる。このような光線を主光線という。

### 5.3.2 テレセントリック光学系

開口絞りをレンズの焦点の位置に置くと、入射瞳または射出瞳が無窮遠に位置し、物体側もしくは像側で主光線が光軸に平行になるような光学系となる。このような光学系をテレセントリック光学系 (telecentric system) という。テレセントリック光学系には、物体側か像側のいずれが一方で主光線が平行になる片側テレセントリック系と、いずれの側でも主光線が平行になる両側テレセントリック系がある。

#### 物体側テレセントリック光学系

片側テレセントリック光学系のうち、図 5.4 のように、開口絞りまたは射出瞳が像側焦点の位置にあるものを、物体側テレセントリック系という。この系における主光線は、像空間において焦点を通過するため、物体空間においては光軸と平行に進む。よって、このレンズが結ぶ物体の像は平行投影像である。さらに、CCD やフィルムなどの平面状の撮像素子を、光軸と直交するようにして結像位置に置けば、物体の正投影像を得ることができる。

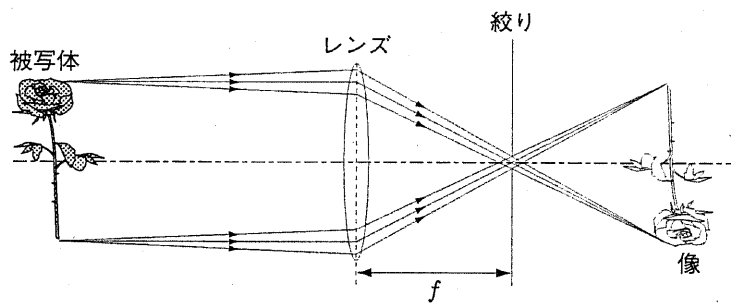


図 5.4: 物体側テレセントリック光学系

物体側テレセントリック光学系は、物体の平行投影像を結ぶ性質を利用して、同じく平行投影により描かれる設計図と実際の製品の形状を照合する検査用途に用いられることが多く、そのためのレンズもすでに市販されている。また、360°の視界を撮影する全方位カメラに用いた例も見られる [5]。

物体側テレセントリック光学系では、像空間で主光線が 1 点に集まるため、結像面の位置により像倍率が変わる (図 5.5)。そのため、計測用途に利用する場合には、撮像面の取り付け精度や、カメラに対するレンズの取り付け精度に留意する必要がある。

#### 像側テレセントリック光学系

図 5.6 のように、開口絞りまたは入射瞳が物体側焦点の位置にある場合には、像側テレセントリック光学系という。この系では、主光線は全て物体側焦点を通過するため、レンズを出た後は像空間を光軸と平行に進む。そのため、撮像面を光軸に沿って移動しても、像倍率は一定に保たれ、画像のぼけ具合のみが変化するという性質をもつ。

像側テレセントリック光学系は、上記の性質に着目し、合焦位置の異なる複数の画像を用いた奥行き推定 (Depth from Defocus 法) [2][3] や、露光装置における位置決め誤差の吸収に利用されている。また、ディ

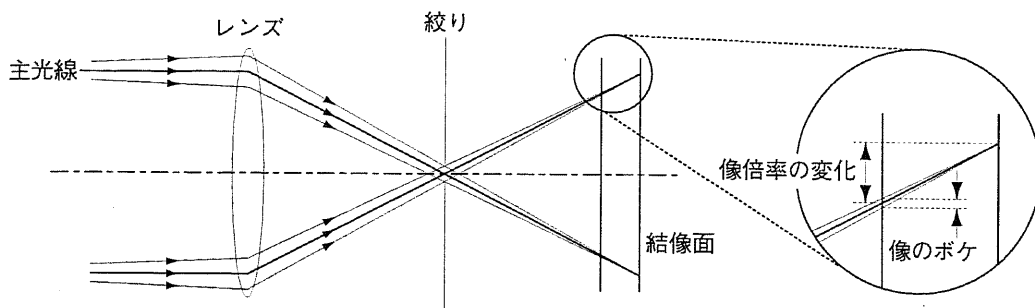


図 5.5: 物体側テレセントリック系における結像面のずれの影響

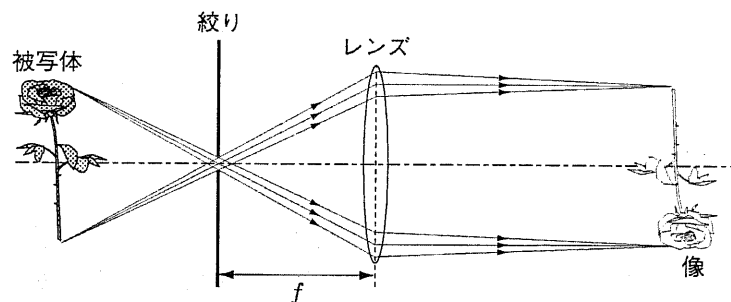


図 5.6: 像側テレセントリック光学系

デジタルカメラの中には、斜めからの入射光に感光しにくく、特に画角の広いレンズを使用すると画像端部の光量が不足するという CCD の欠点を補うため、像側テレセントリック光学系を用いて、光を結像面に対してほぼ垂直に入射するようにしたものがある。

#### 両側テレセントリック光学系

図 5.7 のように、2つのレンズを、物体に近い方のレンズの像側焦点がもう一方のレンズの物体側焦点に一致するように配置し、共通の焦点の位置に開口絞りを置く。言い換えれば、物体側テレセントリック系と像側テレセントリック系を、同じ光軸上に開口絞りを共有する形で配置する。このような配置にすることで、物体側、像側双方の空間において主光線が光軸に平行になる。このような系を両側テレセントリック光学系という。

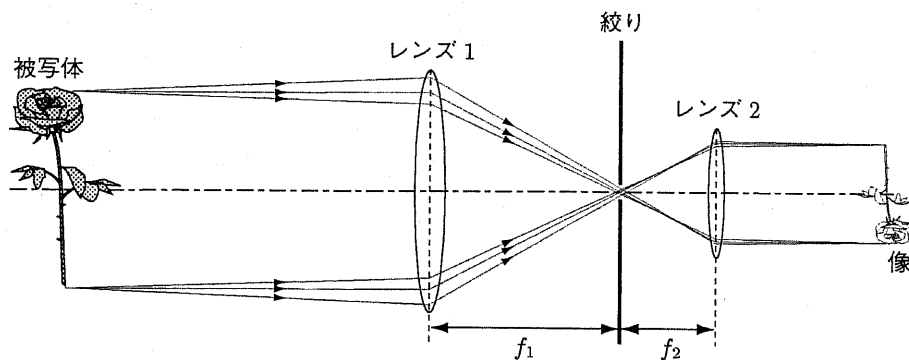


図 5.7: 両側テレセントリック光学系

両側テレセントリック系は、2種類の片側テレセントリック系の性質を併せ持ち、被写体と撮像素子の双方の位置決め誤差を吸収することができる。そのため、片側テレセントリック系と比較して高い精度の計測が可能である。ただし、上記のようなレンズ配置のため、全長が長くなり、用途によっては問題と



なる場合もある。

#### 正投影像の撮影のためのレンズ

本研究では、正投影の撮影を目的とするため、物体空間で光束が平行になることが必要となる。3種類のテレセントリック光学系のうち、この性質を満たすのは、物体側テレセントリック系と両側テレセントリック系である。以下では、単に「テレセントリックレンズ」と記す場合は、特に断りのない限り、上記の2種類を指すものとする。

### 5.4 テレセントリックレンズによる多視点撮影

#### 5.4.1 正投影像と4次元光線情報の関係

透視投影像の場合と同様に、テレセントリックレンズで撮影した正投影像を光線の集合として記録する場合にも、各画像の個々の画素がどの光線に対応しているかを知る必要がある。

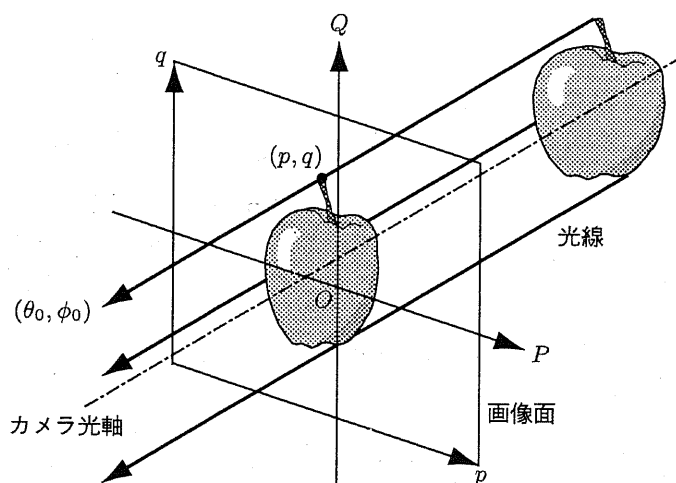


図 5.8: 正投影像と光線との関係

テレセントリックレンズを用いて撮影した正投影像と光線群との関係は図 5.8 のようになる。1枚の正投影像は同じ方向に進む光線の集まりであり、その方向  $(\theta_0, \phi_0)$  はレンズの光軸に平行である。よって、4次元情報空間に記録するには、まずカメラの光軸方向を知る必要がある。次に、正投影像のある画素の位置を  $(p, q)$  とすると、この値は光線の通過位置を表している。しかし、 $PQ$  座標系における絶対値は未知であり、これを定めるためには、 $PQ$  座標系の原点を求める必要がある。

光軸を  $(\theta_0, \phi_0)$  方向に向けて撮影した正投影像において、 $PQ$  座標系の原点が  $(p_0, q_0)$  である場合、 $(p, q)$  と  $(P, Q)$  との関係は次のようになる。

$$P = p - p_0, \quad Q = q - q_0 \quad (5.1)$$

また、正投影像は  $f(P, Q, \theta, \phi)$  の部分空間

$$f'(p, q) \big|_{\theta=\theta_0, \phi=\phi_0} = f(p - p_0, q - q_0) \big|_{\theta=\theta_0, \phi=\phi_0} \quad (5.2)$$

として表現できる。ただし、正投影像において、左下の点を  $(p, q) = (0, 0)$  とし、またカメラのロール運動（光軸を中心とする回転）はないと仮定する。

実際には、各々の正投影像に付随して  $(p_0, q_0)$  の情報を記録しておき、画像再構成の際に (5.2) 式にしたがって必要な光線を読み出せば良い。そのため、正投影像に対する変形処理は不要である。

なお、カメラの光軸が空間内のある1点を必ず通る場合には、その点を  $XYZ$  座標系の原点とすれば、その点は  $PQ$  座標系の原点でもあり、かつ必ず正投影像の中心に位置することになる (図 5.9 参照)。よって、原点の較正は特に行なう必要がない。

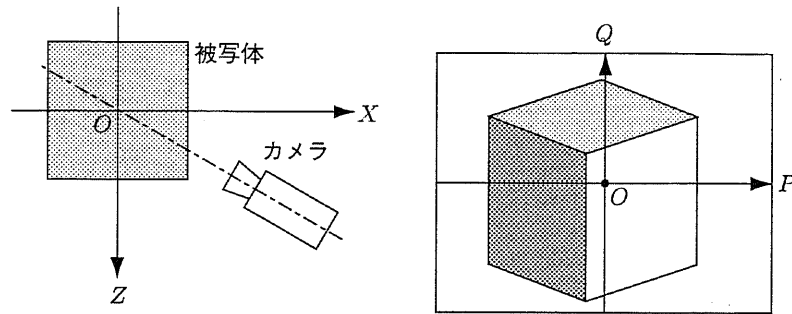


図 5.9: 光軸が常に1点を向くカメラ配置 (左) とそれにより得られる正投影像 (右)

#### 5.4.2 光線情報の直接取得のための視点配置

次に、光線情報の直接取得のための視点配置を考える。まず、正投影像の撮影により図 4.5(a) の標本化が行なわれるが、このとき全ての直線が等間隔に並んでいなければならない。そのためには、カメラの光軸を一定の角度間隔で回転させる必要がある。

次いで、各々の正投影像をデジタル化したとき、図 4.5(c) のように、標本点の位置座標の値が揃うようにする必要がある。先に述べたように、カメラの光軸が常に3次元実空間内のある1点を通っていれば、常に  $P, Q$  座標の原点が画像中心に揃えられる。その上で各々の正投影像を正方格子状に分割すれば、標本点の位置座標が揃うことになる。

以上をまとめると、光線情報の直接取得のための、カメラの位置および方向に関する条件は、以下のようになる。

- 画素が正方格子状に並んだ正投影像が撮影される。
- 投影面の方向角が等間隔になるように視点を配置する。
- カメラの光軸が常に1点を向く。

物体から発せられて  $(\theta, \phi)$  の方向に進む平行な光線群を、テレセントリックレンズを用いて取得するための方法としては、次の3通りが考えられる。

- (1) 物体を固定しておき、レンズの光軸方向が  $(\theta, \phi)$  となるようにカメラを回転・移動して撮影する (図 5.10(a) 参照)。
- (2) カメラを固定し、物体を経度方向に  $\theta$ 、緯度方向に  $\phi$  回転して撮影する。ただし回転の向きは (1) とは逆向きとする (図 5.10(b) 参照)。
- (3) カメラの移動・回転と物体の回転を組み合わせる。カメラの回転の向きは (1) と同じに、また物体の回転の向きは (2) と同じにする。

次に、位置座標の原点を定める方法について考える。(1) の方式の場合、レンズの光軸が常にある1点を通るように位置制御を行えば、位置座標の原点は常に正投影像の中心に位置する。また、(2) の方式では、物体の回転の2つの軸とレンズの光軸が全て1点で交わるように配置すれば、位置座標の原点が正投

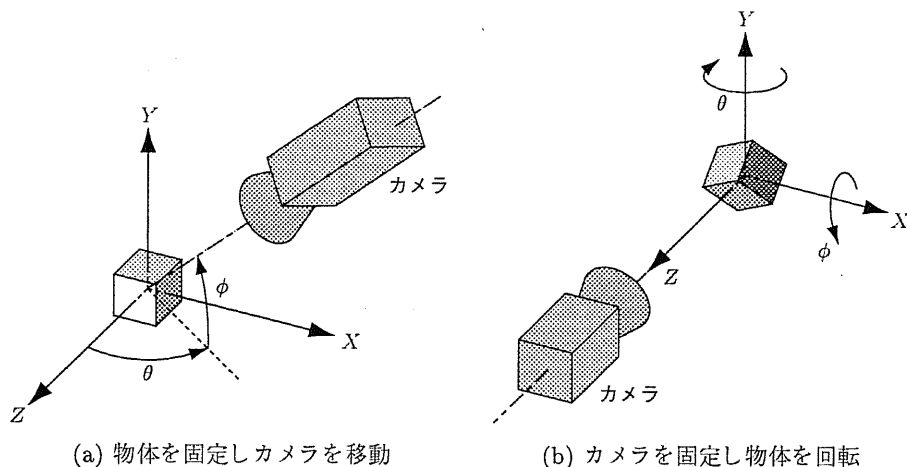


図 5.10: テレセントリックレンズにより方向  $(\theta, \phi)$  の光線を取得する方法

影像の中心に位置する。(3)では、レンズの光軸が常に物体の回転軸上のある1点を通るように姿勢制御を行えば良い。

なお、理想的な正投影像では、被写体からカメラまでの距離による像の変化は生じない。よって、上記の条件を満たし、合焦した像が得られる限り、被写体とカメラとの距離は任意で良い。

## 5.5 テレセントリックレンズを用いた撮像実験

### 5.5.1 実験概要

ここでは、前節までに論じたテレセントリックレンズによる多視点撮影が、3次元情報の記述のための光線の取得方法として有効であることを確認するための予備実験を行なう。具体的には、物体側テレセントリックレンズを用いて、物体を多数の方向から撮影する。次いで、得られた多数の正投影像を、球面記録方式に基づいて記録された光線の標本データと考え、2.5.2節に述べた手順により、物体を任意の視点から透視投影で見たときの画像を合成する。

### 5.5.2 撮影上の注意点

5.3.2節で述べたように、物体側テレセントリックレンズでは、ピント合わせなどの操作により、レンズと結像面との距離を変えると、像の倍率が変化する。しかし、倍率を一定に保つためにフォーカスを固定する(結像面を移動させない)と、奥行きのある被写体では、その一部にしか合焦しない可能性がある。

本研究の用途では、同一の物体を撮影した多数の正投影像の間で、位置成分の解像度を揃えるため、像倍率を一定に保つ必要がある。しかし、その一方で、正投影像は被写体全体に合焦していることが望ましい。以上を踏まえると、開口絞りを絞り込み、被写界深度を大きくした上で、レンズのフォーカスを固定して撮影を行なう必要がある。ここでは、絞り値を  $F = 16$  (使用したレンズでの最大値) とする。

なお、開口絞りを最も絞り込んだ状態で撮影する場合、十分な明るさの照明が不可欠である。本来、静的な空間に配置された物体の記述のためには、光源と被写体との相対的な位置関係が変化しないことが望ましい。しかし、被写体が移動する場合には、光源が被写体とともに移動する機構を用意しなければならない。また、カメラが移動する場合には、カメラが被写体に影を落とさないように注意する必要がある。

本実験では、正投影像と光線記述の理論を用いて、視点に応じて物体の形状や見える箇所が変化する様子が再現できることを目的としており、照明条件を正しく再現することが目的ではない。このような立場か

ら、光源と被写体の相対位置については特に考慮しないこととし、光源の位置を固定して撮影を行なう。このため、正投影像を用いて新たに生成した画像において、照明の影響までは正確に再現されていないことを、予め断っておく。

### 5.5.3 多方向からの正投影像の撮影

図 5.11 に示すように、物体側テレセントリックレンズを装着したカメラを三脚に据え付けて上下移動およびチルトを行ないながら、ターンテーブル上の物体を回転させることにより、正投影像を多数の方向から撮影する。

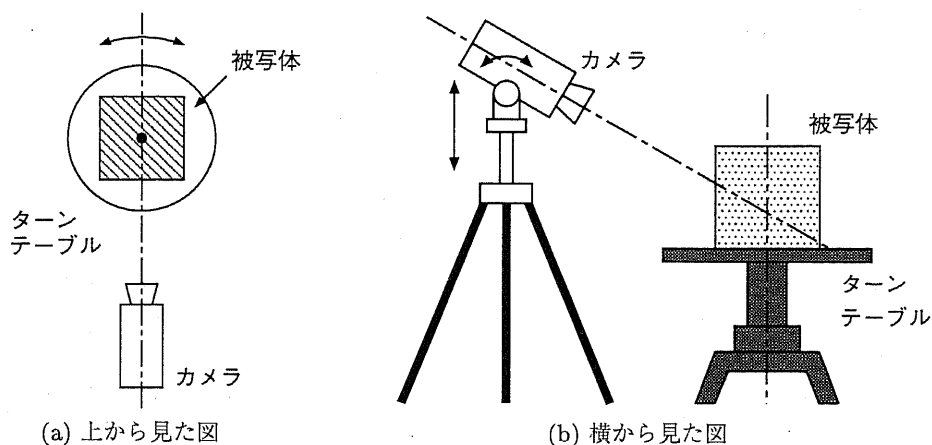


図 5.11: 多方向の正投影像の撮影

レンズはメスグリオ社製 59LGL428 型 (対物部) と 59LGC525 型 (接眼部) を組み合わせ、ソニー製 DXC-151A 型 2/3 インチ CCD カメラに装着して使用する。使用したレンズは、2/3 インチ CCD カメラと組み合わせた場合、88.6mm × 66.5mm の範囲の正投影像を撮影でき、この範囲が 640 × 480 画素の画像に記録される。また、カタログ上の仕様では、レンズの歪率が 2% 以内、観察角が 0.5° となっているが、これについては次章で評価を行なう。

ターンテーブルの回転角はコンピュータにより制御されるが、カメラの高さと俯角の調整は手動により行ない、傾斜計を用いて目視により俯角を合わせる。そのため、角度分解能は、傾斜計の読み取り誤差を考慮し、 $\theta, \phi$  方向ともに 1° とする。撮影範囲は、 $\theta, \phi$  方向について、それぞれ  $0^\circ \leq \theta \leq 80^\circ, 0^\circ \leq \phi \leq 30^\circ$  とする。なお、カメラの高さや俯角を変える際、レンズの光軸が常に 1 点を向くような調整は特に行なっていないため、各々の正投影像について、位置座標の原点がどこにあるかを求める必要がある。これについては次節で述べる。

被写体は立方体と鉢植えの 2 種類を用意し、立方体は中心がターンテーブルの回転軸上に位置するように設置する。撮影条件を揃えるために、カメラの高さと俯角を設定した後、まず立方体を  $0^\circ \leq \theta \leq 80^\circ$  の範囲で撮影し、次いで鉢植えを同じ範囲で撮影するという手順を、各  $\phi$  について繰り返す。

図 5.12, 5.13 はそれぞれ、立方体と鉢植えの正投影像の例である。各被写体とも、上から  $\theta = 0^\circ, 40^\circ, 80^\circ$ 、左から  $\phi = 1^\circ, 15^\circ$  における正投影像を表す。鉢植えではわかりにくいですが、立方体は奥行きによらず至るところで同じ高さに写っており、正投影像となっていることがわかる。

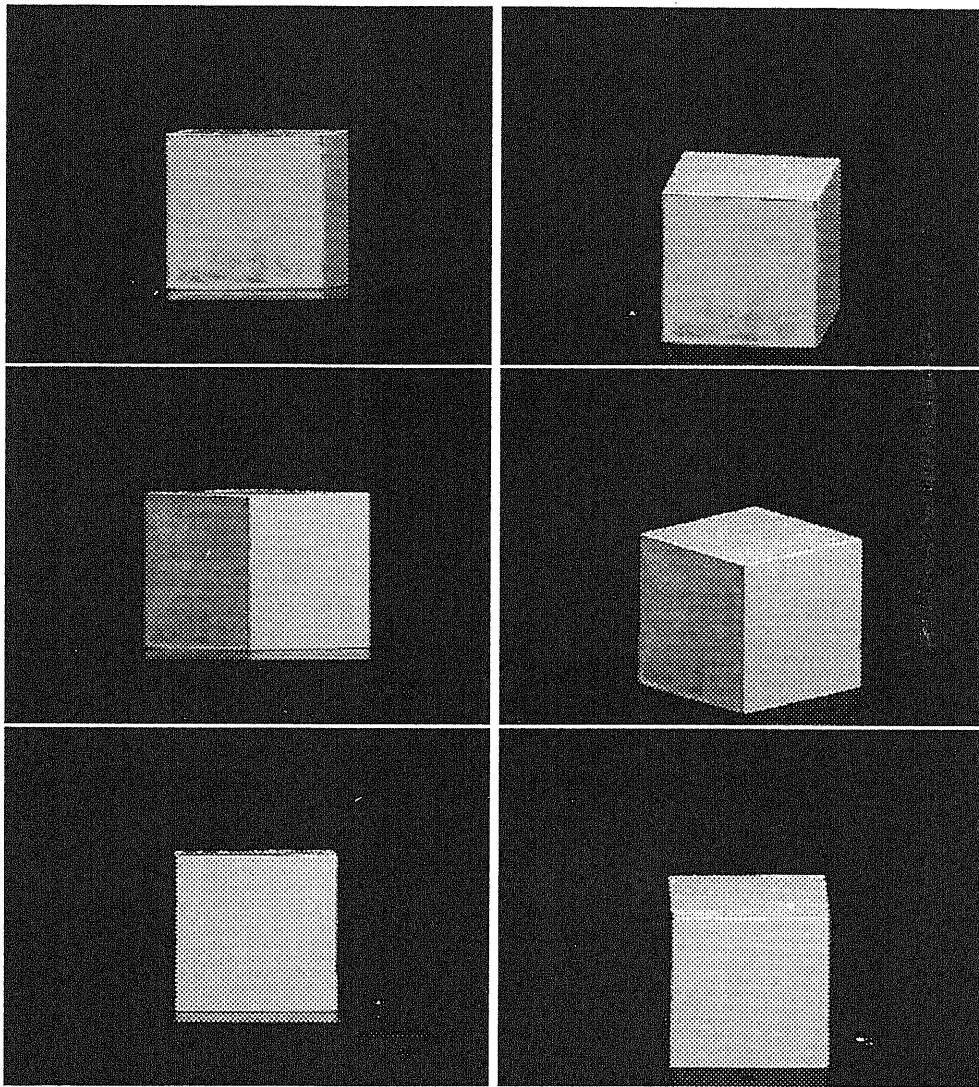


図 5.12: 立方体の正投影像

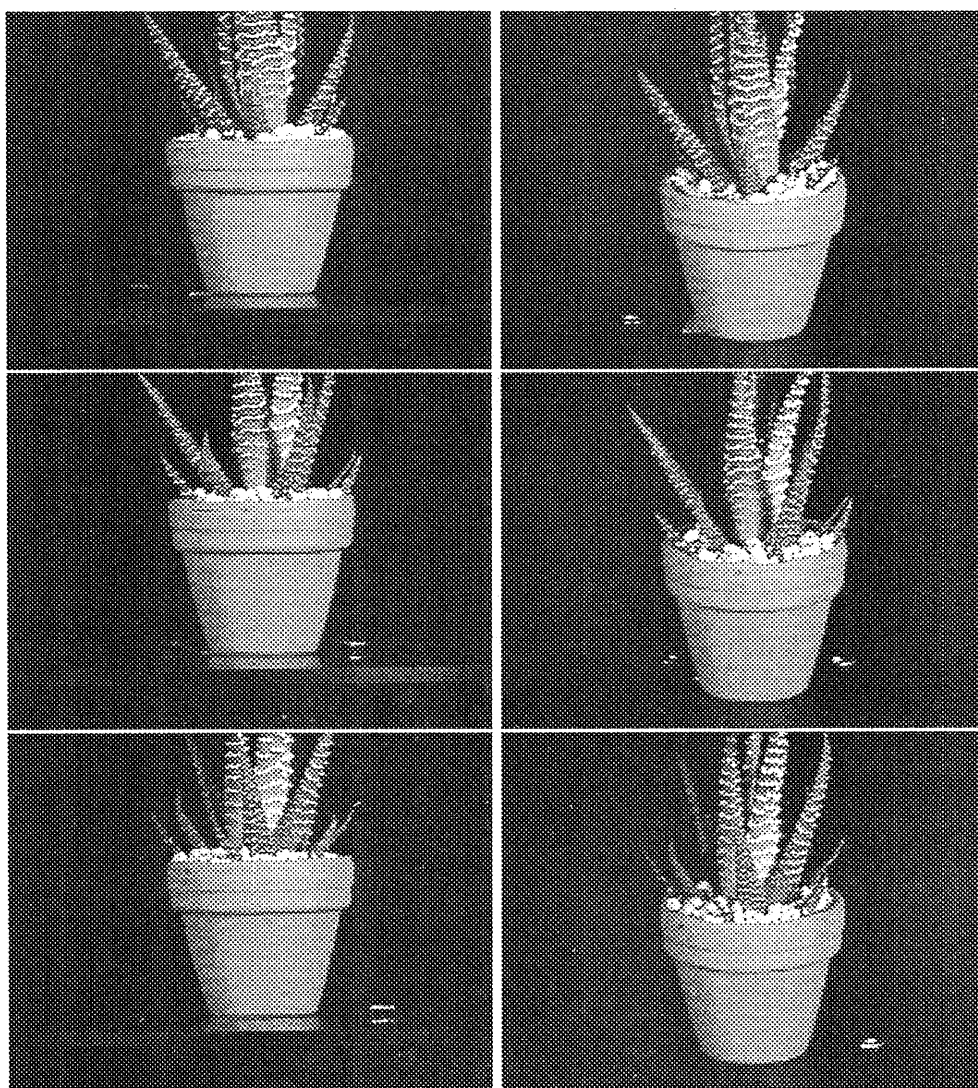


図 5.13: 鉢植えの正投影像

### 5.5.4 原点の較正

本実験における撮影条件では、レンズの光軸が常にある1点を通るようになっていないため、正投影像における位置座標の原点の位置を求める必要がある。2種類の物体を同一の条件で撮影していることから、原点の較正は立方体の画像を用いて行ない、得られた結果を鉢植えの画像に対しても適用する。

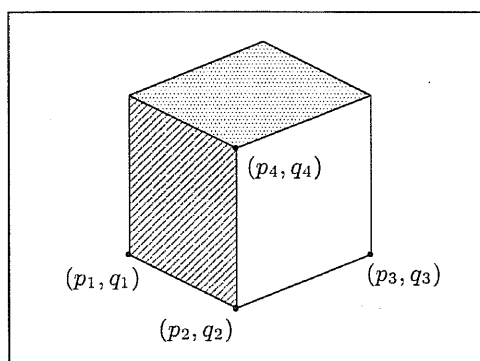


図 5.14: 原点の較正に必要な点

立方体の中心を XYZ 座標系の原点とすると、図 5.14 に示す 4 点の位置が既知であれば、画像中での原点の位置  $(p_0, q_0)$  は以下のようにして求めることができる。

$$p_0 = \frac{p_1 + p_3}{2}, \quad q_0 = \frac{q_1 - q_2 + q_3 + q_4}{2} \quad (5.3)$$

ここで、立方体の中心がターンテーブルの回転軸の上に乗るように設置されていることに着目すると、 $\phi$  が同じ画像どうしであれば、立方体の中心の位置は常に一定となる。なぜなら、カメラが移動せずにターンテーブルのみが回転する場合、回転軸上の点は不動であるためである。そこで、原点の較正は、各々の  $\phi$  について、任意の 1 枚の画像に対してのみ行なう。具体的には、図 5.14 の 4 点の位置を手で入力し、(5.3) 式から原点の位置を求める。求めた原点の位置情報は、正投影像群とともに記録しておき、画像合成の際に利用する。

### 5.5.5 任意視点からの透視投影像の合成

得られた多方向からの正投影像および原点の位置情報を用いて、任意の視点から被写体を眺めたときの見え方を合成する。合成の手順は 2.5.2 節に示した通りであり、求めた  $P, Q, \theta, \phi$  に対して、カメラの方向が  $(\theta, \phi)$  のときの画像から、

$$x = P + p_0, \quad y = Q + q_0 \quad (5.4)$$

で求められる  $(x, y)$  の位置の画素を読み出せば良い。

図 5.15(b) は、立方体を撮影した以外の点から眺めたときの透視投影像の合成結果である。図 5.15(a) に示す原画像 (正投影像) と比較すると、遠近感が再現されていることが分かる。

図 5.16 は、鉢植えの透視投影像の合成結果を示す。これらは、観察者の視点および視線を固定し、鉢植えを左右に平行移動させたときの見え方を再現したものである。このような場合、正投影では単なる平行移動となるが、透視投影では、図の円内の 2 枚の葉の見え隠れが変化していることが分かる。



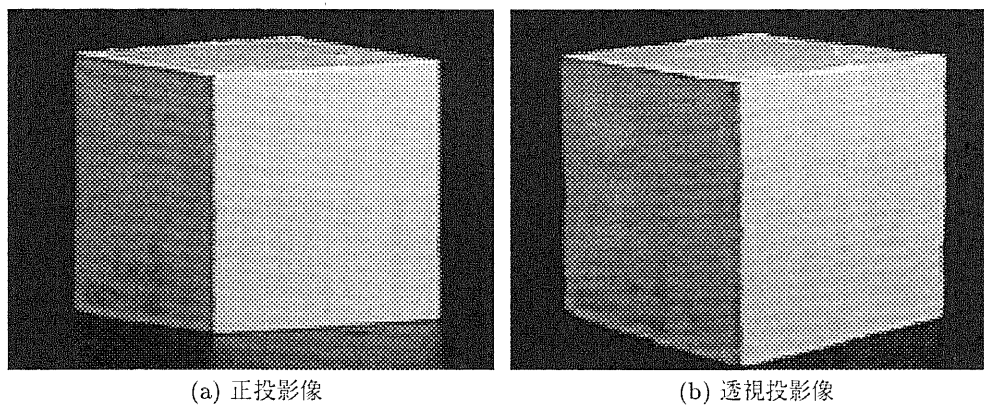


図 5.15: 立方体の正投影像 (原画像) と透視投影像 (合成結果)

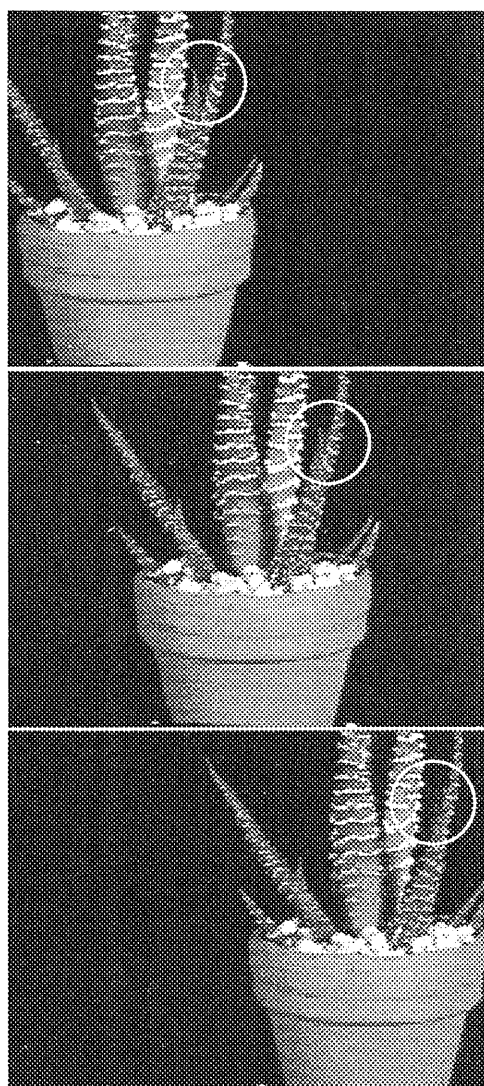


図 5.16: 鉢植えの透視投影像の合成結果



## 5.6 本章のまとめ

既存の3次元入力手段を用いると、4次元情報空間を離散化した場合とは異なる標本データが得られる。このような異なる標本データどうしの変換による誤差の問題を解決するため、本章では、離散化された4次元情報空間に記録すべき光線の標本データを直接取得する手法について論じた。

平面記録方式で十分な場合には、マトリックス型の多視点撮影により、光線情報の直接取得が実現できる。これに対して、光線を球面記録方式によって記録する必要がある場合については、これまで直接取得の手段が存在しなかった。本章では、球面記録方式に基づく光線情報の本質が、3次元空間の正投影像の集合であることに着目し、正投影像を光学的に結像するテレセントリックレンズを利用した多視点撮影により、光線情報を直接取得する方式を提案した。また、物体側テレセントリックレンズを用いた予備実験により、その有効性を確認した。

ただし、本章での実験においては、撮影条件に不完全な点がある。まず第一に、カメラが垂直移動するため、被写体とカメラとの距離が一定でないことが挙げられる。具体的には、 $\phi$ が大きくなるに従ってカメラの位置が高くなるため、被写体との距離も遠くなる。撮影時にはカメラの焦点調節は行なわないため、被写体とカメラの距離が一定でないと、一部の画像で焦点ぼけが生じる可能性がある。

また、本章の実験では、カメラの俯角を合わせる操作や、正投影像中の原点位置を求めるための特徴点の入力は、いずれも手作業にて行なっていた。そのため、光線の方法パラメータの分解能が十分ではなく、位置パラメータについてもその値の信頼性が低い。

以上の問題を踏まえた上で、本章で提案した手法に基づき、物体を任意の方向から見るができるために必要な光線情報を、高精度かつ容易に取得することができる撮像システムの開発を行なった。これについて次章で紹介する。

## 参考文献

- [1] 三宅和夫:『幾何光学』共立出版(1979).
- [2] M. Watanabe and S. K. Nayer: "Telecentric Optics for Focus Analysis", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.19, No.12, pp.1360-1365 (1997).
- [3] 日浦慎作, 松山隆司: "構造化瞳をもつ多重フォーカス距離画像センサ", 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol.J.82-D-II, No.11, pp.1912-1920 (1999).
- [4] S. K. Nayer: "Omnidirectional Video Camera", Proceedings of DARPA Image Understanding Workshop (1997).
- [5] D. Gutchess, *et al.*: "Automatic Surveillance Using Omnidirectional and Active Cameras," Proc. of ACCV2000 (2000).

## 第6章

---

# テレセントリックレンズを用いた 物体全周撮像システム

## 6.1 はじめに

前章では、物体の全周情報を記述するために必要な光線を取得するための手段として、テレセントリックレンズを利用することを提案した。これにより、透視投影による多眼撮影における光線の再標本化が不要となり、再標本化に伴う誤差の問題の解決の可能性が示された。

しかし、前章の実験では、カメラの姿勢制御を手動にて行ない、方向は目視によって合わせていた。さらに、各々の正投影像に対する位置座標の原点の算出のために、基準となる物体の特徴点の位置を、画面上で人手で入力していた。そのため、位置に関する信頼性が低く、また方向角成分の分解能が高い光線標本データの取得が困難であった。

そこで、より高い位置精度と角度分解能を有する光線標本データを容易に取得することを目的として、テレセントリックレンズを利用した物体全周撮像システム(以下、テレセントリック撮像システム)を新たに開発した。本章では、このシステムについて紹介するとともに、その実装において生じる誤差について検討を行なう。また、テレセントリックレンズ単体の評価も併せて行なう。

## 6.2 テレセントリック撮像システム

### 6.2.1 設計指針

本撮像システムの開発の目的は、第5章で論じたテレセントリックレンズによる光線取得の原理に基づき、位置精度と角度分解能を向上することにある。

このうち、位置精度に関しては、正投影像における位置座標の原点が高い精度で求められることが要求される。しかし、前章のような、空間内の特徴点を撮影して原点を求める手法では、特徴点の検出精度が問題となる。これは、第5章の実験のように、特徴点の位置を手で入力した場合だけでなく、画像認識技術を用いて特徴点の自動抽出を行なった場合にも当てはまる。そのため、特徴点検出を行なうことなく原点の位置が定められるように、カメラと物体の位置関係を決定する。

一方、角度分解能に関しては、第5章の実験では、目視にて角度を計測しながら手動で方向を合わせていた。しかし、この方式は、角度の読み取り誤差が生じるため、分解能を低下させる要因となり得る。そこで、角度を高い精度で変えることのできる機構を導入し、コンピュータにより制御を行なう。

### 6.2.2 装置の構成

前章の実験では、5.4.2節に述べた多視点撮影の方法のうち、カメラと物体の双方を可動式とする方式を用いていた。具体的には、カメラの上下移動およびチルトと、ターンテーブルによる物体の水平回転の組み合わせにより、物体から発せられる任意の方向の光線の取得を行なっていた。しかし、テレセントリックレンズの重量が大きいと、カメラを可動とする方式では、カメラのブレが生じる可能性が高く、位置や方向を十分な精度で制御するのが困難であると考えられる。

そこで本装置では、テレセントリックレンズを装着したカメラは固定しておき、物体の水平回転と傾斜により、任意の方向からの正投影像の撮影を行なう。これにより、カメラの移動に伴うブレの影響を排除することができ、高精度な方向制御が可能となる。ただし、このような方式を実現するためには、被写体が剛体で傾けても変形しないことが前提となる。

撮像系の模式図を図6.1に、また実際の装置の外観を図6.2に、それぞれ示す。2台のターンテーブルA、Bおよびカメラは、2つの回転軸とレンズ光軸が1点で交わり、かつ初期状態で各軸が互いに直交するように配置されている。また、レンズ光軸の回りのカメラの傾きを調整し、画面上でAの回転軸が鉛直に、Bの回転軸が水平に写るようになっている。

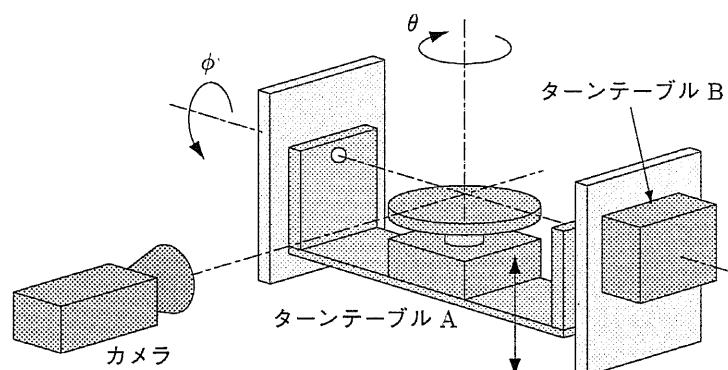


図 6.1: 撮像系の模式図

これにより、A, B それぞれの初期状態からの回転角  $\theta, \phi$  が、そのまま光線方向  $(\theta, \phi)$  に対応する。また、正投影像内の画素位置  $(x, y)$  が光線の位置座標  $(P, Q)$  に対応し、画像中心が原点となる。さらに、撮像素子の画素が正方格子状に並んでいれば、正投影像の各画素の座標値を、そのまま光線の  $P, Q$  座標値 (1 画素の幅を単位長とした値) と読み替えることができる。

2 台のターンテーブルは、RS-232C を介して、Windows NT が稼働するホストコンピュータから制御される。2 台ともに最小分解能は  $0.003^\circ$ 、位置決め精度は  $0.03^\circ$  以下、繰り返し位置決め精度は  $0.005^\circ$  以下となっている。ターンテーブル A は、被写体の位置の調整のため、上下に移動できるようになっている。

レンズおよびカメラは、前章での実験と同じく、メスグリオ製 59LGL428 型、59LGC525 型からなるレンズと、ソニー製 DXC-151A 型カメラを使用する。このカメラ部分は取り外し可能となっており、テレセントリックレンズを装着したカメラの代わりに、一般的な透視投影像が得られるカメラを装着して多眼撮影を行なうことも可能である。また、将来のカメラの高解像度化にも対応することができる。

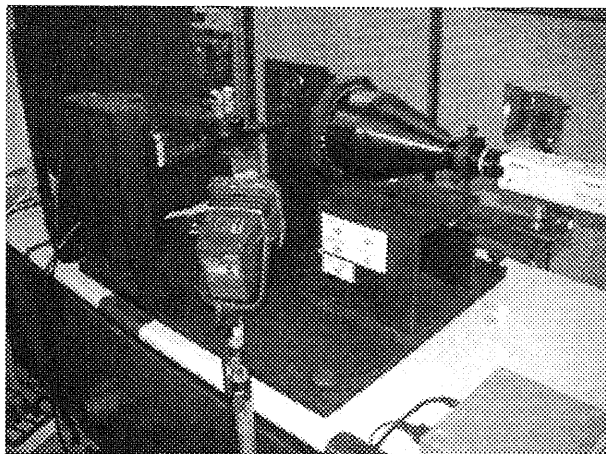
多視点での撮影は、ホストコンピュータ上でユーザが撮影位置を予め指定すると、それに従ってコンピュータの指示でターンテーブルが回転し、所定の位置に到達した後、ホストコンピュータがカメラからの NTSC 映像を静止画として取り込むという手順を繰り返すことにより行なわれる。撮影位置は、現在のところ、撮影間隔を一定とし、経度・緯度方向の撮影範囲と撮影間隔をそれぞれ、ターンテーブルの仕様に従って  $0.003^\circ$  単位で指定するようになっている。ただし、撮影間隔を一定にする必要はなく、原理的には  $0.003^\circ$  単位で任意の撮影点配置を設定することが可能である。

### 6.3 テレセントリックレンズ単体に対する評価

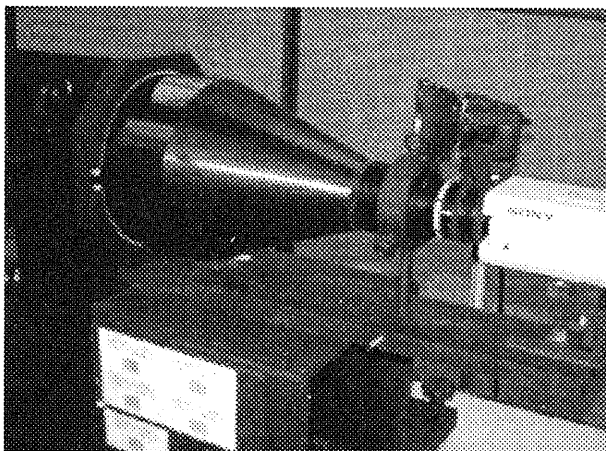
テレセントリックレンズで撮影した画像が厳密に正投影像であるためには、レンズの歪みがなく、また観察角が画面全域で  $0^\circ$  でなければならない。しかし一般に、現実のレンズでこの条件を完全に満たすことは困難である。本装置で用いているレンズでも、5.5.3 節で述べたように、歪み率、観察角ともに完全に 0 にはなっていない。そこで、フォーカスと絞り値を、実際の物体全周の撮影の場合と同じ条件に設定した上で、大きさ・形状が既知のテスト用物体を撮影し、得られる画像と厳密な正投影像との誤差を調べる。

#### 6.3.1 レンズの観察角の評価

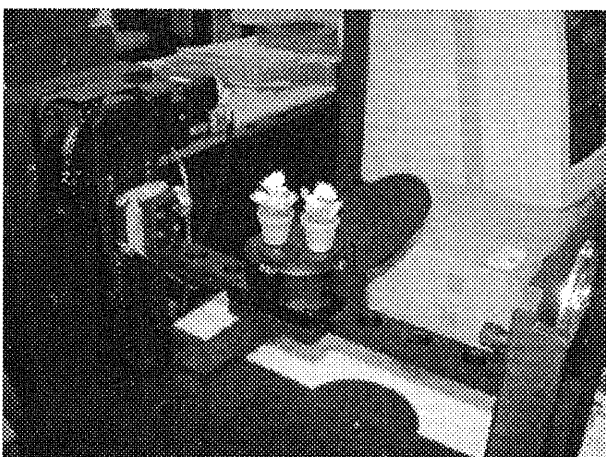
テスト用物体として、透明板に格子パターンを描いたものを 2 個用意する。2 つの格子パターンは、線幅や間隔は全て同じで、線の色のみが異なっている。これら 2 つのテスト用物体を、図 6.3 に示すように、レンズ先端から距離  $d_1$  の位置と、そこから距離  $d_2$  の位置に配置し、レンズを通して 2 つの格子の中心が重なって見えるようにして、撮影を行なう。なお、撮影は  $d_1, d_2$  を変えて繰り返し行なう。



(a) システム全体



(b) カメラおよびテレセントリックレンズ部



(c) ターンテーブル部

図 6.2: 撮像系の外観写真

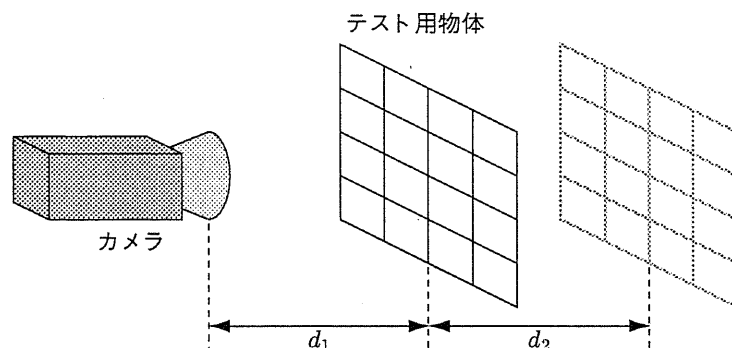


図 6.3: カメラとテスト用物体の配置

以上のようにして撮影された画像において、図 6.4(a) のように、奥の格子が手前の格子に完全に隠れていれば、像の大きさはレンズからの距離によらず一定であり、観察角は  $0^\circ$  であると考えられる。これに対し、図 6.4(b) のように、奥の格子が見えている場合には、観察角は  $0^\circ$  でない。

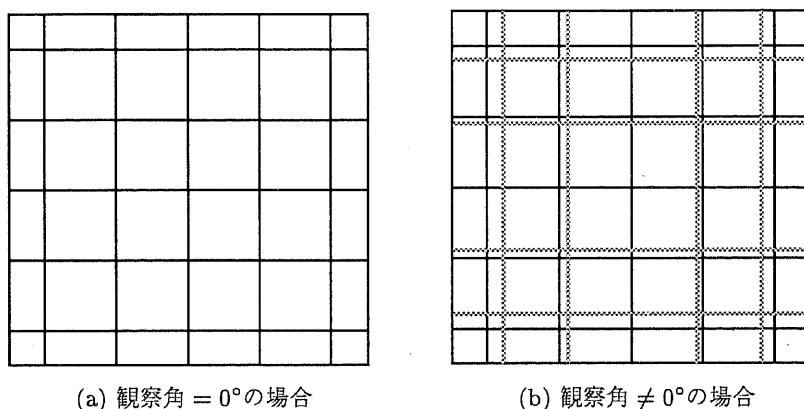


図 6.4: 図 6.3 の状態でのテスト用物体の写り方

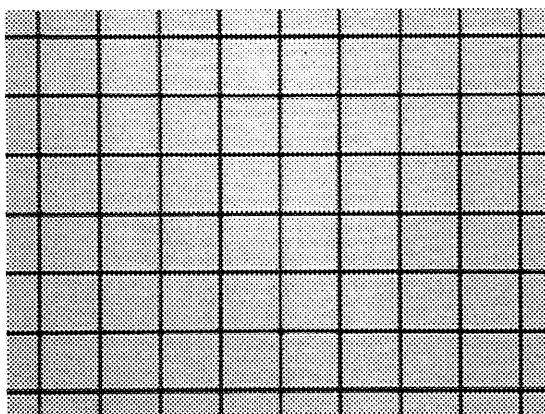
図 6.5 は、 $d_1 = 20\text{cm}$ 、 $d_2 = 5\text{cm}$  のときの画像である。これによると、2つの格子は完全に重なっており、他の  $d_1$ 、 $d_2$  の場合も同様である。よって、光線取得時の撮影条件の下では、主光線はレンズ光軸に平行であり、このレンズの観察角は  $0^\circ$  であると考えて良い。

### 6.3.2 レンズの歪みの評価

光学系による結像を取り扱う場合、光軸に近く、かつ光軸とのなす角が小さい光線（近軸光線）を用いて、理想的な結像を近似する。近軸光線による結像を近軸結像もしくはガウス結像という。テレセントリックレンズによる多眼撮影では、5.5.2 節に述べたように絞り込み撮影を行なうため、近軸結像の条件は概ね満たされると考えられるが、厳密を期すために、理想とのずれについて考察を行う。

近軸結像が成り立たない場合に生じる誤差（収差）には、光の分散によって生じる色収差と、同一波長の光線束によって生じる単色収差がある。単色収差の中で重要になるのはザイデルの 5 収差（球面収差、非点収差、像面湾曲、歪曲収差、コマ）であるが、本研究においては、レンズにより得られる像の形状が問題となるため、以下ではこれに関係する歪曲収差についてのみ考える。

歪曲収差は、像面上において、理想的な像点と光軸を結ぶ方向の結像のずれとなって現れる（図 6.6 参照）。そこで、画像の中央にある水平（垂直）線に沿って、像点の横（縦）方向のずれを求めれば良い。テスト物体には、直線が格子状に等間隔で描かれているため、正しい像点も等間隔な格子になるはずである。

図 6.5: テレセントリックレンズによりテスト用物体を撮影した画像 ( $d_1 = 20\text{cm}$ ,  $d_2 = 5\text{cm}$ )

そこで、CG により作成した等間隔な格子を正しい像と考え、これと撮影された画像における格子点のずれを求める。このようにして、いくつかの像点について、画像中心から正しい結像位置までの距離  $r$  と、像点のずれ  $\Delta r$  のデータが求まる。

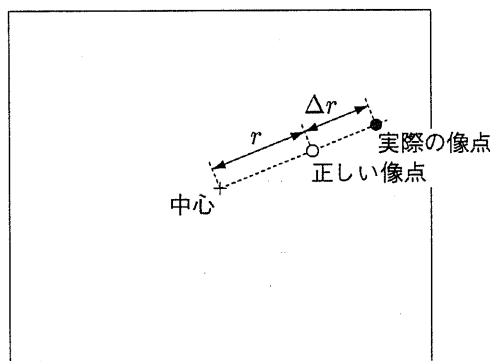


図 6.6: レンズの歪曲収差

次に、任意の  $r$  に対する  $\Delta r$  の計算式を求める。ずれを伴った実際の像点の中心からの距離を  $r'$  とする ( $r' = r + \Delta r$ ) と、 $r$  は  $r'$  の奇数次の多項式で近似されることが知られている [2]。ただし、5 次以降の項の寄与は小さいため、一般には以下のように 3 次式で近似することが多い。

$$r = r' + kr'^3 \quad (6.1)$$

上式において  $k > 0$  であれば糸巻き型歪みを、また  $k < 0$  であれば樽型歪みを生じる (図 6.7 参照)。

(6.1) 式は、実際の (歪みを伴った) 像点を与えられたときに、その正しい像点の位置もしくはずれの量を求める式である。しかし、正投影像から必要な画素を読み出す場合は、正しい像点位置に対するずれの量を求める必要がある。ここでは、 $\Delta r$  が  $r'$  の 3 次式で与えられることと、 $r = 0$  のときに  $\Delta r = 0$  となることを考慮して、以下のように、 $\Delta r$  を  $r$  の 3 次式として近似することを考える。

$$\Delta r = k_1 r + k_2 r^2 + k_3 r^3 \quad (6.2)$$

ただし、この近似式の妥当性 (特に 2 次以下の項) に関しては、後述の実験により検討する。

(6.2) 式の係数が定まれば、正投影像群から新たな画像を生成する際のレンズ歪みの影響は、以下のようにして補正することができる。

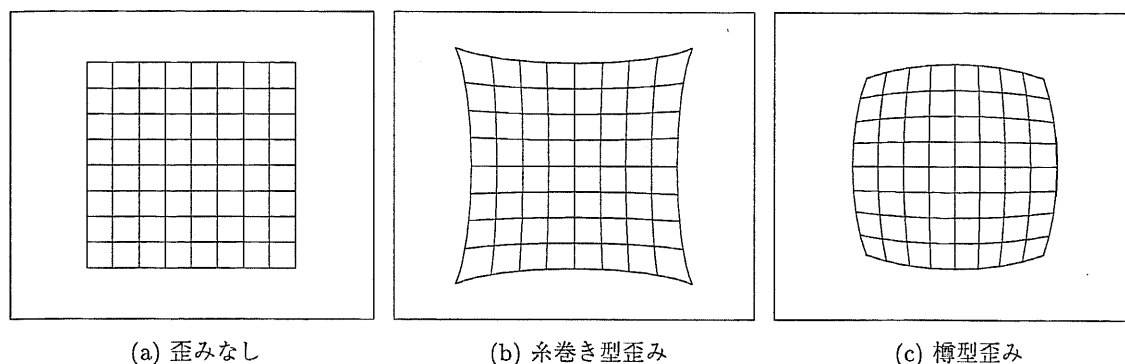


図 6.7: 歪曲収差の例

(1) 画像の生成に必要な光線の位置成分が  $(P, Q)$  であるとき、

$$r = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (6.3)$$

を (6.2) 式に代入して  $\Delta r$  を求める。

(2) 正投影像の  $x = P, y = Q$  の位置の画素の代わりに、

$$x = \left(1 + \frac{\Delta r}{r}\right) P, \quad y = \left(1 + \frac{\Delta r}{r}\right) Q \quad (6.4)$$

の位置の画素の値を読み出す。

## 6.4 ターンテーブルとカメラの位置に関する評価

6.2.2 節に述べたように、本装置では、2 台のターンテーブルとカメラの位置関係は、以下の 2 つの条件を満たすように設計されている。

- ターンテーブル A, B の初期状態からの回転角がそのまま光線の方向  $\theta, \phi$  に対応する。
- 正投影像の画素の位置  $(x, y)$  がそのまま光線の位置成分  $(P, Q)$  に対応する。

しかし厳密には、これらの部品の位置には誤差が含まれている。その影響によっては、上記の 2 つの条件が満たされない可能性もあり、その場合には正投影像を 4 次元光線情報として扱う際に誤差を考慮する必要がある。そこで以下では、2 台のターンテーブルとカメラの位置に関する誤差について検討する。

### 6.4.1 撮像系の誤差のモデル化

本撮像系は、初期状態において、図 6.8(a) に示すように、ターンテーブル A, B の回転軸がそれぞれ Y, X 軸に重なり、カメラが Z 軸上で原点を向くように設計されている。これに対し、次に挙げる 2 つの誤差要因を考える。

(1) ターンテーブルの回転軸の傾き

2 つの回転軸のうち、少なくとも一方が本来の位置から傾いている可能性がある。各軸は XY 平面内にあり、初期状態において A の回転軸と Y 軸とのなす角を  $\alpha$ , B の回転軸と X 軸とのなす角を  $\beta$  とする (図 6.8(b) 参照)。

(2) ターンテーブルの回転軸のずれ



2つの回転軸が1点で交わらない可能性がある。このとき、A, Bの回転軸がそれぞれ  $Z = 0$ ,  $Z_b$  の位置にあるとする (図 6.8(c) 参照)。

誤差のない理想的な状態では、ターンテーブル A, B を図 6.3 に示す向きにそれぞれ角度  $\theta$ ,  $\phi$  回転したときに位置  $(X, Y, Z)$  の点に移る先の座標  $(P, Q, R)$  は、第2章の (2.7) 式で定義した行列  $R_X(\theta)$ ,  $R_Y(\theta)$ ,  $R_Z(\theta)$  を用いて、

$$\begin{pmatrix} P \\ Q \\ R \end{pmatrix} = R_X(\phi) R_Y(-\theta) \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (6.5)$$

となる。このうちの  $P, Q$  がそれぞれ正投影像上での横方向、縦方向の位置を表し、かつ (2.6) 式の  $P, Q$  と一致することがわかる。

一方、上記の誤差を全て考慮に入れた場合には、ターンテーブル A, B をそれぞれ角度  $\theta$ ,  $\phi$  回転したときの  $(P, Q, R)$  は、(6.5) 式の代わりに、

$$\begin{pmatrix} P \\ Q \\ R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ Z_b \end{pmatrix} + R_Z(\beta) R_X(\phi) R_Z(-\beta) \left[ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -Z_b \end{pmatrix} + R_Z(\alpha) R_Y(-\theta) R_Z(-\alpha) \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \right] \quad (6.6)$$

となる。ここで、便宜上、以下のような  $3 \times 3$  行列  $M(\theta, \phi)$  を導入する。

$$M(\theta, \phi) = R_Z(\beta) R_X(\phi) R_Z(-\beta) R_Z(\alpha) R_Y(-\theta) R_Z(-\alpha) \quad (6.7)$$

このとき、(6.6) 式は次のように表される。

$$\begin{pmatrix} P \\ Q \\ R \end{pmatrix} = M(\theta, \phi) \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\sin \beta \sin \phi \\ \cos \beta \sin \phi \\ 1 - \cos \phi \end{pmatrix} Z_b \quad (6.8)$$

行列  $M(\theta, \phi)$  の  $(i, j)$  成分を  $m_{ij}(\theta, \phi)$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) とおくと、上式の  $P, Q$  は次のように表される。

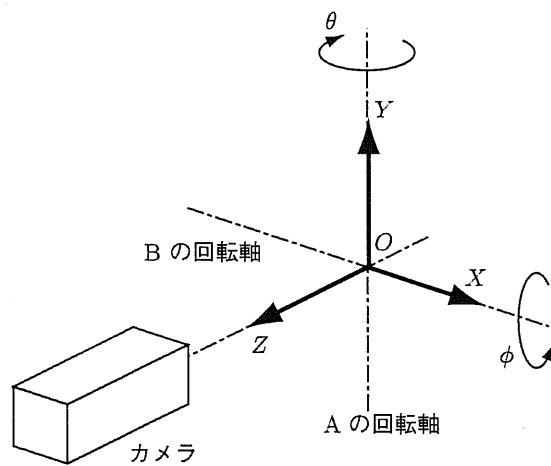
$$P = m_{11}(\theta, \phi)X + m_{12}(\theta, \phi)Y + m_{13}(\theta, \phi)Z - Z_b \sin \beta \sin \phi \quad (6.9)$$

$$Q = m_{21}(\theta, \phi)X + m_{22}(\theta, \phi)Y + m_{23}(\theta, \phi)Z + Z_b \cos \beta \sin \phi \quad (6.10)$$

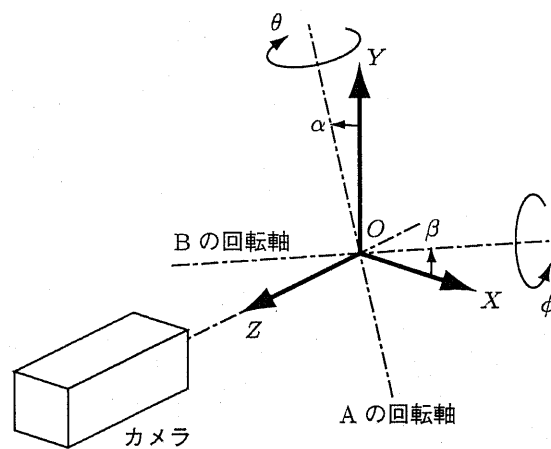
#### 6.4.2 画像を用いた誤差の計算

前節にて、ターンテーブルとカメラの位置関係に関する誤差について論じた。しかし実際には、2つのターンテーブルの回転軸の位置関係を視覚的に確認することは不可能である。そこで、撮像系により得られる透視投影像を用いて、誤差を求めることを考える。ただし、実際には、画像上での座標値の丸め誤差の影響を受けるため、十分な計算精度を得るには、正投影像の画素数を上げる必要がある (詳細は付録 C を参照)。しかし、現状ではカメラの画素数が不十分であるため、本論文では計算の手順を述べるにとどめる。なお、計算式の導出過程の詳細については付録 A を参照されたい。

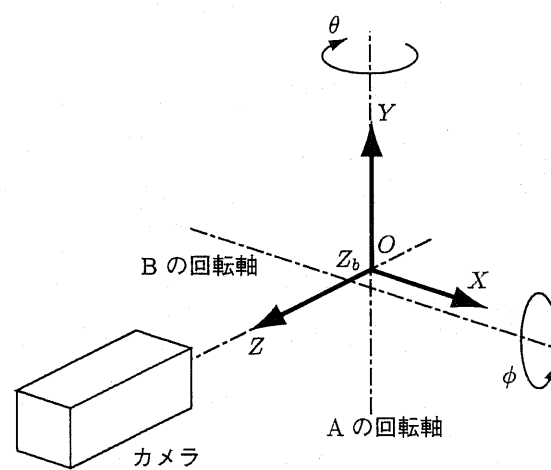
ターンテーブル A, B がそれぞれ初期状態から角度  $\theta_1$ ,  $\phi_1$  だけ回転した位置 (これを基準位置と呼ぶ) にあるとする。ただし、 $\theta_1$ ,  $\phi_1$  の値は未知であるとする。この状態で、直線が描かれた基準物体をステージ上に適当に配置し (図 6.9(a) 参照)、物体の正投影像を撮影する。さらに、A, B の回転角をそれぞれ  $\pm\Delta\theta$ ,  $\pm\Delta\phi$  として、2台のうちのいずれか一方または両方を基準位置から回転した位置で撮影を行なうことで、計 9 枚の物体の正投影像を得る (図 6.9(c) 参照)。ただし、 $\pm\Delta\theta$ ,  $\pm\Delta\phi$  の値は既知であるとする。すなわ



(a) 誤差のない場合



(b) 回転軸が傾く場合



(c) 回転軸が交わらない場合

図 6.8: ターンテーブルとカメラの位置関係

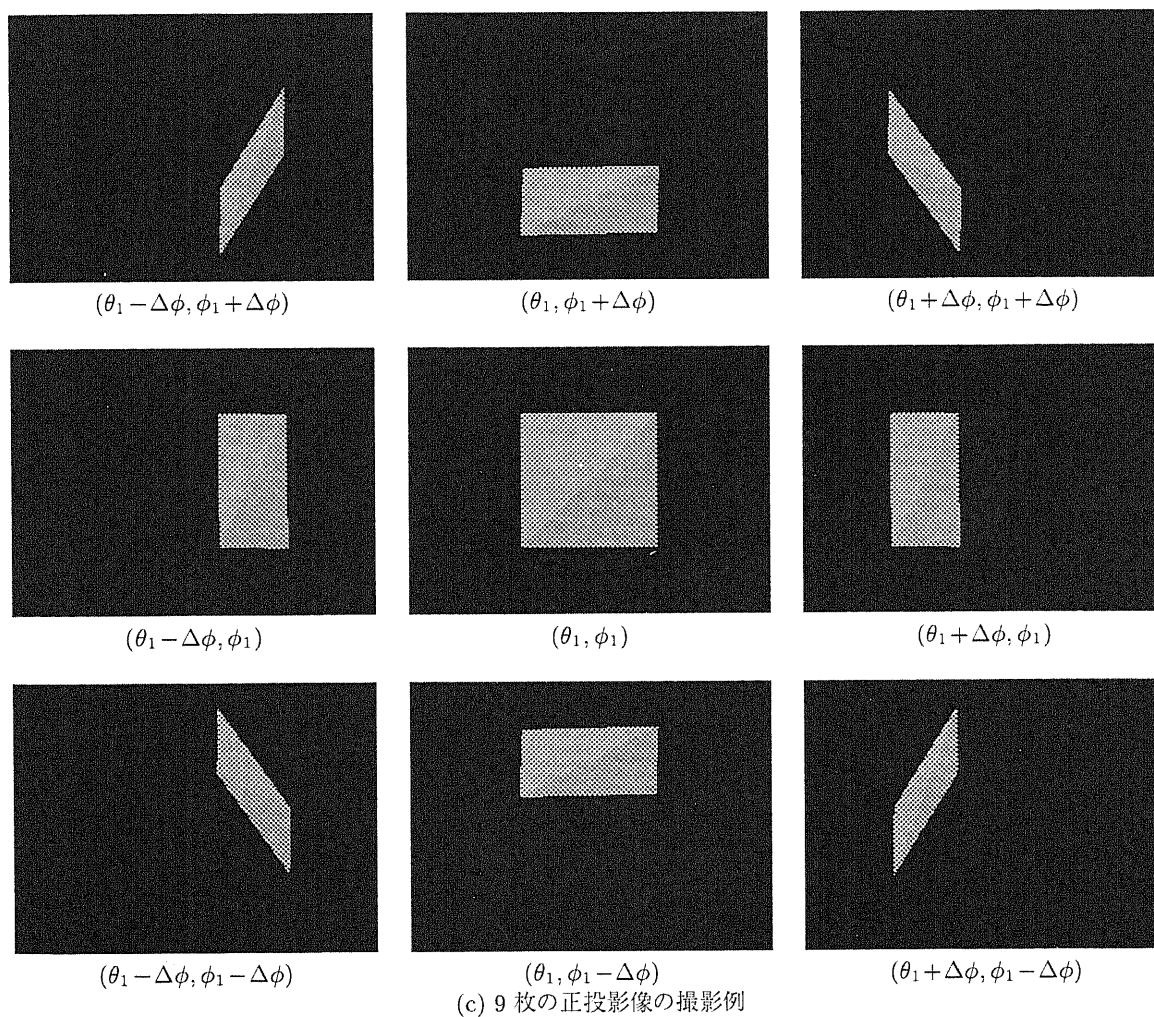
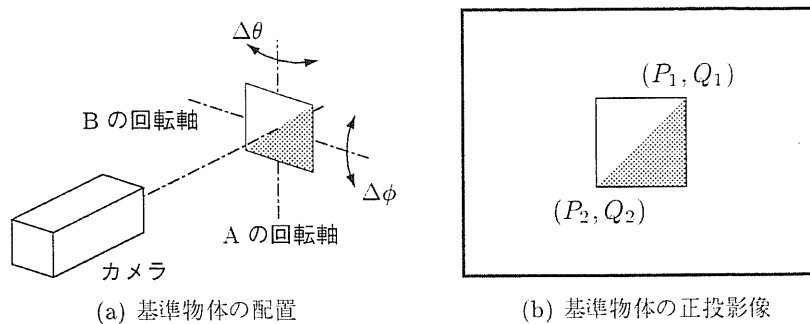


図 6.9: ターンテーブルとカメラの位置関係の誤差の計算のための画像撮影

ち、絶対的な位置が不明な状態から、 $\theta, \phi$  方向にそれぞれ予め決まった量の回転を加えて、物体を撮影する。次に、基準位置からターンテーブル B を  $\pm\Delta\phi'$  (既知であるとする) だけ回転し、その状態から先と同様の手順により、9 枚の正投影像をさらに 2 組撮影する。

ターンテーブル A, B が  $\theta, \phi$  の位置にある状態で撮影された正投影像において、基準線の両端の位置が  $(P_1(\theta, \phi), Q_1(\theta, \phi))$  および  $(P_2(\theta, \phi), Q_2(\theta, \phi))$  であるとする (図 6.9(b) 参照)。このとき、回転軸の傾きは以下の手順で求めることができる。

- (1) 基準位置を中心とする 9 枚の画像全てについて、

$$P(\theta, \phi) = P_1(\theta, \phi) - P_2(\theta, \phi) \quad (6.11)$$

$$Q(\theta, \phi) = Q_1(\theta, \phi) - Q_2(\theta, \phi) \quad (6.12)$$

を求める。

- (2)  $\phi = \phi_1 - \Delta\phi, \phi_1, \phi_1 + \Delta\phi$  のそれぞれについて、次式で定義される  $F_1(\phi), F_2(\phi)$  を求める。

$$F_1(\phi) = P(\theta + \Delta\theta, \phi) + P(\theta - \Delta\theta, \phi) - 2P(\theta, \phi) \cos \Delta\theta \quad (6.13)$$

$$F_2(\phi) = Q(\theta + \Delta\theta, \phi) + Q(\theta - \Delta\theta, \phi) - 2Q(\theta, \phi) \cos \Delta\theta \quad (6.14)$$

- (3) 次式で定義される  $G_1(\phi_1), G_2(\phi_1), H$  を求める。

$$G_1(\phi_1) = 2F_1(\phi_1) - [F_1(\phi_1 + \Delta\phi) + F_1(\phi_1 - \Delta\phi)] \quad (6.15)$$

$$G_2(\phi_1) = 2F_2(\phi_1) - [F_2(\phi_1 + \Delta\phi) + F_2(\phi_1 - \Delta\phi)] \quad (6.16)$$

$$H = F_1(\phi_1 + \Delta\phi) + F_1(\phi_1 - \Delta\phi) - 2F_1(\phi_1) \cos \Delta\phi \quad (6.17)$$

- (4)  $(\theta, \phi) = (\theta_1, \phi_1 \pm \Delta\phi')$  を中心とする 9 枚の画像について、(1)~(3) の手順により、 $G_2(\phi_1 - \Delta\phi'), G_2(\phi_1 + \Delta\phi')$  を求める。

- (5) 次式により  $\phi_1$  を求める。

$$\phi_1 = \frac{G_2(\phi_1 - \Delta\phi') - G_2(\phi_1 + \Delta\phi')}{2G_2(\phi_1) \sin \Delta\phi'} \quad (6.18)$$

- (6) 次式により  $\beta - \alpha$  を求める。

$$\beta - \alpha = \arctan \left[ \frac{H \cos \phi_1}{G_2(\phi_1)} \right] \quad (6.19)$$

- (7) 次式により  $\beta$  を求める。

$$\beta = \arctan \left[ -\frac{G_1(\phi)}{G_2(\phi)} \right] \quad (6.20)$$

- (8) 上で求めた  $\beta - \alpha, \beta$  を用いて  $\alpha$  を求める。

上記により回転軸の傾きが求められれば、回転軸のずれは以下の手順で求めることができる。

- (9)  $\phi = \phi_1 - \Delta\phi, \phi, \phi_1 + \Delta\phi$  のいずれか 1 つについて、次式で定義される  $F'_1(\phi), F'_2(\phi)$  を求める。

$$F'_1(\phi) = P_1(\theta + \Delta\theta, \phi) + P_1(\theta - \Delta\theta, \phi) - 2P_1(\theta, \phi) \cos \Delta\theta \quad (6.21)$$

$$F'_2(\phi) = Q_1(\theta + \Delta\theta, \phi) + Q_1(\theta - \Delta\theta, \phi) - 2Q_1(\theta, \phi) \cos \Delta\theta \quad (6.22)$$

(10) 次式で定義される  $f_{ij}(\phi)$  ( $i, j = 1, 2$ ) を求める。

$$f_{11}(\phi) = \cos(\beta - \alpha) \sin \alpha \sin \beta \cos \phi - \sin(\beta - \alpha) \sin \alpha \cos \beta \quad (6.23)$$

$$f_{12}(\phi) = -\cos(\beta - \alpha) \cos \alpha \sin \beta \cos \phi + \sin(\beta - \alpha) \cos \alpha \cos \beta \quad (6.24)$$

$$f_{21}(\phi) = -\cos(\beta - \alpha) \sin \alpha \cos \beta \cos \phi - \sin(\beta - \alpha) \sin \alpha \sin \beta \quad (6.25)$$

$$f_{22}(\phi) = \cos(\beta - \alpha) \cos \alpha \cos \beta \cos \phi + \sin(\beta - \alpha) \cos \alpha \sin \beta \quad (6.26)$$

ただし、上記の4つを全て求める必要はなく、次で用いる2つのみを求めれば良い。

(11) 以下の2式のうちのいずれか一方を用いて  $Z_b$  を求める。

$$Z_b = \frac{f_{12}(\phi)F'_2(\phi) - f_{22}(\phi)F'_1(\phi)}{2(1 - \cos \Delta\theta) \sin(\beta - \alpha) \cos \alpha \sin \phi} \quad (6.27)$$

$$Z_b = \frac{f_{21}(\phi)F'_1(\phi) - f_{11}(\phi)F'_2(\phi)}{2(1 - \cos \Delta\theta) \sin(\beta - \alpha) \sin \alpha \sin \phi} \quad (6.28)$$

### 6.4.3 回転軸の傾きの許容値

前節では、ターンテーブル A, B の両方の傾きを考えていた。しかし実際には、A が可動式であるのに対し、B は固定されているため、軸が傾く可能性があるのは主として A であると考えられる。そこで以下では、簡単のため、A の回転軸のみが傾いていて、B の回転軸は傾いていない ( $\alpha \neq 0, \beta = 0$ ) として議論を進める。

ターンテーブル A の回転軸が傾いた状態で、A, B をそれぞれ初期状態から  $\theta, \phi$  だけ回転させても、得られる正投影像は、物体を  $\theta, \phi$  だけ回転したときの像とはならない。しかし、カメラの解像度が有限であるため、傾きが微小な値であれば、それに伴う誤差も微小になり。画像上には誤差が現れないと考えられる。このような  $\alpha$  の許容値について、以下で考える。

原点からの距離が  $r$  [画素] の点について、 $P, Q$  の誤差をそれぞれ  $\Delta P, \Delta Q$  とすると、 $|\Delta P|, |\Delta Q|$  は以下の条件を満たす (詳細は付録 B 参照)。

$$|\Delta P| \leq |2r \sin \alpha| = |\Delta P|_M \quad (6.29)$$

$$|\Delta Q| < r \sqrt{\sin^2 \alpha + 2(1 - \cos \alpha)} = |\Delta Q|_M \quad (6.30)$$

実際の装置では、 $|\alpha|$  は微小な値をとる (少なくとも  $|\alpha| > \pi/2$  とはならない) から、 $\cos \alpha > 0$  となり、このとき常に  $|\Delta P|_M > |\Delta Q|_M$  が成り立つ。よって、物体が存在し得る範囲の最大の  $r$  ( $r_M$  とする) に対して、 $|\Delta P|_M$  が 0.5 画素以下、即ち

$$|2r_M \sin \alpha| \leq 0.5 \quad (6.31)$$

であれば、回転軸の傾きに起因する誤差が画像上に現れないと考えられる。カメラが横 640 画素であることから、 $r_M = 320$  画素とすると、許容される  $\alpha$  の値は、

$$|\alpha| \leq \frac{0.5}{2 \times 320} = 7.8125 \times 10^{-4} [\text{radian}] \quad (6.32)$$

となる。すなわち、 $|\alpha|$  が  $0.0447^\circ$  より小さければ、回転軸の傾きの影響は正投影像には現れない。ただし、物体が  $r_M < 320$  画素である場合、傾きの許容値は上記の値より大きくなる。

### 6.4.4 誤差の補正

#### 回転軸の傾きの補正

逆に、 $|\alpha|$  が上記の許容値より大きい場合には、正投影像における誤差の影響が無視できなくなる。そのため、何らかの形で誤差の補正を行なう必要が生じる。

本撮像系では、回転軸が傾いている場合でも、撮影時に剛体の回転変換と正射影を行なっているという点では同じであり、撮影によりある方向に進む平行な光線群が取得できるはずである。ただし、A, B をそれぞれ  $\theta, \phi$  だけ回転したとしても、得られる光線群の方向は  $(\theta, \phi)$  とは異なる。

方向に関する誤差を補正する方法としては、ターンテーブルを  $\theta, \phi$  だけ回転して撮影した画像に対して、それに対応する光線の正しい方向を計算するアプローチも考えられる。しかし、ここでは、ターンテーブルの回転角がコンピュータによって自由に制御できることを利用し、取得したい光線の方向が与えられたときに、必要となる回転角を計算し、それに従ってターンテーブルを回転することで補正を行なう。

取得したい光線の方向を  $(\theta_0, \phi_0)$  とし、そのために必要な A, B の回転角をそれぞれ  $\theta, \phi$  とすると、まず、

$$\phi = \pm \arcsin \left[ \frac{\sin \theta_0 \cos \phi_0 \sin \alpha - \sin \phi_0 \cos \alpha}{\cos \alpha} \right] \quad (6.33)$$

により  $\phi$  が求められる。ただし、符号は  $|\phi_0 - \phi|$  が小さくなる方を選ぶ。次に、上で求めた  $\phi$  の値を用いて、下式により  $\theta$  を求める。

$$\theta = \arctan \left[ \frac{\sin \phi \cos \phi \sin \alpha \pm (\sin \theta_0 \cos \phi_0 \cos \alpha + \sin \phi_0 \sin \alpha) \cos \theta_0 \cos \phi_0}{(\sin \phi \sin \alpha)^2 - (\cos \theta_0 \cos \phi_0)^2} \right] \quad (6.34)$$

ただし、符号は  $|\theta_0 - \theta|$  が小さくなる方を選ぶ。

これにより得られる正投影像は、回転軸のずれがなければ、 $\alpha = 0$  の状態で A, B を  $\theta_0, \phi_0$  回転して撮影される正投影像  $I_0(\theta_0, \phi_0)$  を回転した画像となる。その回転角  $\gamma$  は、反時計回りを正の向きとすると、

$$\gamma = \arctan \left[ \frac{\sin \alpha \cos \alpha (1 - \cos \theta)}{\sin^2 \alpha \cos \theta \cos \phi + \cos^2 \alpha \cos \phi - \sin \alpha \sin \theta \sin \phi} \right]$$

により与えられる。

### 回転軸のずれの補正

(6.8) 式によれば、回転軸のずれに伴う  $P, Q$  の誤差は  $\phi$  のみに依存する。よって、1枚の正投影像の中では、この誤差は一定である。

そこで、ターンテーブル B の回転角が  $\phi$  のとき、回転軸のずれの影響を補正するには、ずれに伴う  $P, Q$  の誤差  $\Delta P'(\phi), \Delta Q'(\phi)$  を、

$$\Delta P'(\phi) = -Z_b \sin \beta \sin \phi \quad (6.35)$$

$$\Delta Q'(\phi) = Z_b \cos \beta \sin \phi \quad (6.36)$$

にて求め、正投影像を  $P, Q$  軸方向にそれぞれ  $-\Delta P'(\phi), -\Delta Q'(\phi)$  だけ平行移動すれば良い。

### まとめ

撮像システムに誤差がある状態で、 $I_0(\theta_0, \phi_0)$  と同じ正投影像を得るための手順をまとめると、以下のようになる。

- (1) (6.33), (6.34) 式により  $\theta, \phi$  を求め、それぞれ A, B の回転角として正投影像を撮影する。
- (2) (6.35), (6.36) 式により、回転軸のずれに伴う平行移動量  $\Delta P'(\phi), \Delta Q'(\phi)$  を求め、得られた向きと逆に画像を平行移動する。
- (3) (6.4.4) 式により  $\theta$  を求め、画像を時計回りに  $\gamma$  だけ回転する。

## 6.5 実験

本装置の有効性を確認するため、第5章と同様の実験を行なう。具体的には、まず、構築した撮像系を用いて、多数の方向から物体の正投影像を撮影する。次に、得られた多数の正投影像を用いて、2.5.2節で説明した手順により、被写体を透視投影により任意の視点から見た像を合成する。

なお、第5章の実験と同様に、照明光の光源の位置は固定してある。このため、物体の回転に伴って、光源と物体の相対位置が変化し、合成された画像において、照明条件は正しく再現されない。

### 6.5.1 透視投影像と角度分解能

#### 撮像系の有効角度分解能

本装置は、物体の回転間隔を  $0.003^\circ$  単位で設定できる。すなわち、本装置で取得できる光線情報の最小の角度分解能は  $0.003^\circ$  である。しかし、カメラの解像度が有限であるため、必要以上に細かく物体を回転させても、得られる正投影像にはその効果が現れないと考えられる。そこで、実際に撮影される正投影像上に違いが現れる最小の角度分解能 (以下、有効角度分解能と呼ぶ) について検討する。なお、以下では、簡単のため、 $\theta$  方向についてのみ考える。

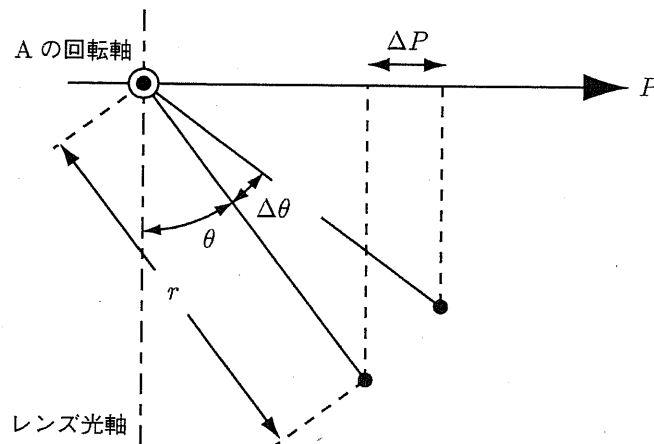


図 6.10: ターンテーブル A の回転角  $\Delta\theta$  と点の移動量  $\Delta P$  の関係 (A を真上から見た図)

ターンテーブル A の回転軸からの距離が  $r$  [画素] の点を、 $\theta$  回転した状態から、さらに  $\Delta\theta$  だけ回転すると、正投影像の上では、横軸 ( $P$  軸) 方向に  $\Delta P$  移動する (図 6.10 参照)。この  $\Delta P$  が 0.5 画素以上であれば、点の移動が正投影像上で識別できると考えられる。ここで、 $\Delta\theta$  が微小角のとき、 $\Delta P$  との間には次の関係が成り立つ。

$$\Delta P = r \cos \theta \cdot \Delta \theta \quad (6.37)$$

$|\Delta P|$  の最大値  $\Delta P_M$  は、正投影像の視野に収まる範囲で最大の  $r$  を  $r_M$  とすると、 $|\cos \theta| \leq 1$  より、

$$\Delta P_M = |r_M \Delta \theta| \quad (6.38)$$

となる。よって、 $\Delta P_M \geq 0.5$  画素であれば、少なくとも  $\theta = 0$  の状態から  $\Delta\theta$  だけ回転したときに、 $r = r_M$  の点が 0.5 画素以上移動するため、有意な違いが現れる。このときの  $\Delta\theta$  の条件を求めると、

$$|r_M \Delta \theta| \geq 0.5 \quad (6.39)$$

であるから、上式を満たす最小の  $|\Delta\theta|$  である有効角度分解能  $\Delta\theta_a$  は次式によって与えられる。

$$\Delta\theta_a = \frac{0.5}{r_M} \quad (6.40)$$

本装置で現在使用しているカメラは横 640 画素であるため、正投影像の視野に収まるのは、 $r \leq 320$  画素の範囲である ( $r_M = 320$  画素)。よって、 $\Delta\theta_a$  の値を求めると、

$$\Delta\theta_a = \frac{0.5}{320} = 1.5625 \times 10^{-3} [\text{radian}] \quad (6.41)$$

となる。この値はカメラの画素数の増加に従って小さくなるため、より高い角度分解能を実現するには、より画素数の多いカメラを用いる必要がある。

(6.41) 式によれば、ターンテーブルの位置決め精度 ( $0.03^\circ$ ) および繰り返し位置決め精度 ( $0.005^\circ$ ) は、いずれも上記の  $\Delta\theta_a$  ( $0.0895^\circ$ ) より小さいため、これらの誤差の影響は無視できると考えられる。また、本装置では、角度を  $0.003^\circ$  単位で設定するため、有効角度分解能は  $0.09^\circ$  となる。

#### 透視投影像の合成に必要な角度分解能

透視投影像の特徴の一つに、各々の画素がそれぞれ異なる方向の光線に対応することが挙げられる。そのため、透視投影像を正しく合成するには、この性質を満たすことが必要となる。

正投影像を用いて透視投影像を合成する場合、上記の条件は、個々の画素の値が、全て異なる正投影像から読み出されることに相当する。これを実現するためには、正投影像を撮影する際の角度分解能を、透視投影像の隣り合う画素に対応する2つの光線のなす角の最小値  $\Delta\theta_m$  以下に設定しなければならない。

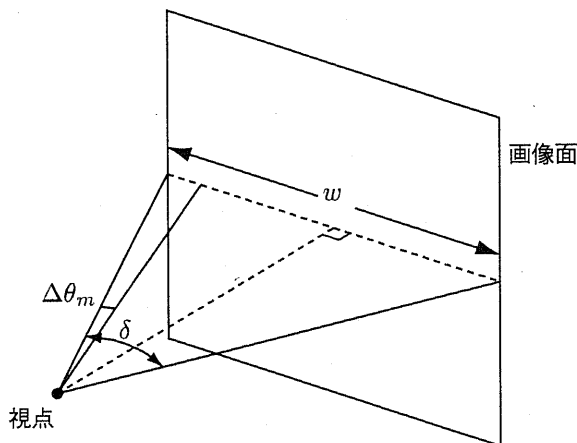


図 6.11: 透視投影像の横幅  $w$ , 画角  $\delta$  と  $\Delta\theta_m$  との関係

透視投影像の横方向の画素数を  $w$ , 画角を  $\delta$  とすると、これらのパラメータと  $\Delta\theta_m$  の関係は図 6.11 のようになる。よって  $\Delta\theta_m$  は次式により求められる。

$$\Delta\theta_m = \frac{\delta}{2} - \arctan \left[ \frac{2(w/2 - 1) \tan(\delta/2)}{w} \right] \quad (6.42)$$

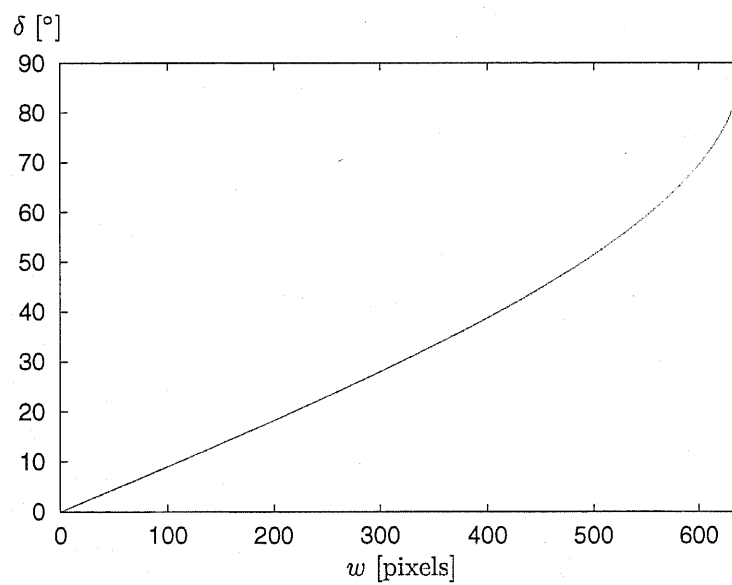
いくつかの  $(w, \delta)$  の組み合わせに対して、 $\Delta\theta_m$  を求めた結果を表 6.1 に示す。 $\Delta\theta_m$  の値は、画像の横幅の増加に従って小さくなり、水平画角が広角になるに従って大きくなる。

図 6.12 は、 $\Delta\theta_m$  がテレセントリック撮像システムの有効角度分解能  $\Delta\theta_a$  と等しくなるときの、透視投影像の横幅  $w$  と水平画角  $\delta$  の関係をグラフにしたものである。 $(w, \delta)$  が図中の曲線より上にあれば、本装置を用いて、必要な角度分解能を有する光線情報を取得することができる。



表 6.1: 横幅  $w$ , 画角  $\delta$  の透視投影像の合成に必要な角度分解能  $\Delta\theta_m$  の例

$w$ [pixels]	$\delta$ [°]	$\Delta\theta_m$ [°]
160	15	0.0927
160	20	0.1225
160	30	0.1792
320	15	0.0463
320	20	0.0612
320	30	0.0896
640	20	0.0306
640	30	0.0448

図 6.12:  $\Delta\theta_m = \Delta\theta_a$  のときの透視投影像の横幅  $w$  と水平画角  $\delta$  の関係

### 角度分解能の選択

表 6.1 によれば、 $w = 320$  画素、 $\delta = 30^\circ$  のとき、 $\Delta\theta_m$  が本装置の最小角度分解能  $0.09^\circ$  とほぼ同等になる。以下では、最小角度分解能での撮影を考慮し、合成する透視投影像の画素数を  $320 \times 240$  画素、画角を  $30^\circ$  とする。

### 6.5.2 任意の視点からの透視投影像の合成

本撮像システムを用いて撮影した正投影像の一部を、図 6.13～6.15 に示す。それぞれの画像群は、ほぼ同じ高さの 2 つの被写体を前後に並べて撮影したものである。いずれの被写体の場合も、肉眼や通常のカメラ用レンズで見ると、遠くの物体の方が小さく見えるはずであるが、画像上では 2 つが同じ大きさに写っており、テレセントリックレンズが正投影像を結像していることがわかる。

図 6.16～6.18 は、視線方向を変えずに視点を移動したときの、各物体の透視投影での見え方を合成した結果である。図 6.16 では、移動に伴って 2 つの立方体の見え方が変化する様子が再現されている。また図 6.17 では、視点移動に伴って奥の人形の隠れ具合が変化したり、被写体に近づくとき人形の大きさが明確に異なって見えるなどの様子が再現されている。同様の性質は、図 6.18 でも見られる。このように、合成された画像が透視投影像となっていることがわかる。

### 6.5.3 角度分解能の影響についての考察

次に、光線の角度分解能が、透視投影像の合成に与える影響について見る。特に、前章の実験において実現可能であった角度分解能との比較や、6.5.1 節における議論の検証を行なう。

図 6.19 は、角度分解能が  $0.9^\circ$  ならびに  $0.09^\circ$  の正投影像群を用いて、同じ視点での透視投影による見え方を合成した結果である。角度分解能  $0.9^\circ$  は、合成した透視投影像の  $\Delta\theta_m$  の約 10 倍の値であるため、透視投影像の約  $10 \times 10$  画素の領域に対応する光線群が、同一方向の光線群 (=1 枚の正投影像) によって近似される。言い換えると、合成された透視投影像は、正投影像を貼り合わせた形になり、貼り合わせの境界部分が不連続になる。

一方、角度分解能  $0.09^\circ$  は、合成した透視投影像の  $\Delta\theta_m$  とほぼ同等であり、透視投影像の各画素は、全て異なる正投影像から読み出されていると考えられる。そのため、視点が被写体に近づいた場合でも、画像の貼り合わせによる歪みは現れていない。

5.5 節の実験では、カメラの方向を目視により合わせていたため、角度計測時の読み取り誤差を考慮すると、 $1^\circ$  程度の角度分解能しか実現できなかった。この値は図 6.19(a) の場合と同等で、透視投影像など新たな画像の合成には不十分であった。これに対し、本撮像系を用いれば、横幅 320 画素以下、水平画角  $30^\circ$  以上の透視投影像の合成に必要な角度分解能を実現することが可能である。

### 6.5.4 レンズ歪みの補正

6.3.2 節に述べたように、格子パターンを描いたテスト物体を撮影し、画像中心から正しい像点までの距離  $r$  と、レンズ歪みによるずれ  $\Delta r$  のデータを求めた。その結果を図 6.20 のグラフに + 印で示す。

次に、得られたデータに対して、(6.2) 式を最小 2 乗近似によって当てはめることにより、 $r$  に対する  $\Delta r$  の計算式を求める。なお、(6.2) 式における 2 次以下の項の寄与を調べるため、当該の項が存在しない (係数が 0 である) 場合も考える。(6.2) 式を再度示すと、

$$\Delta r = k_1 r + k_2 r^2 + k_3 r^3$$

であり、2 次以下の項の有無により 4 通りの近似式を求めた。これらの近似式における各項の係数は表 6.2 の通りである。また、これらの近似式が表す曲線を図 6.20 に示す。

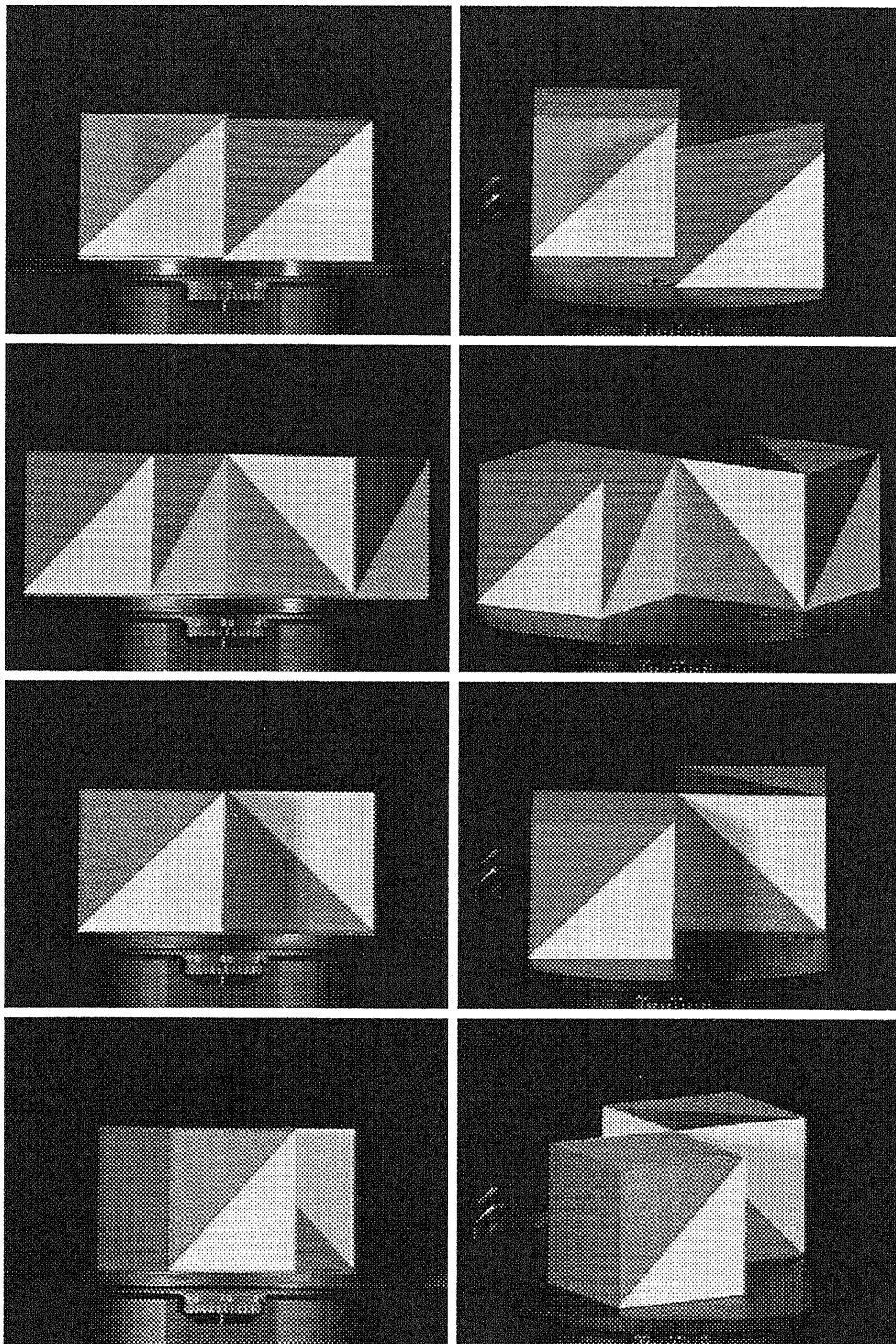


図 6.13: 立方体の正投影像

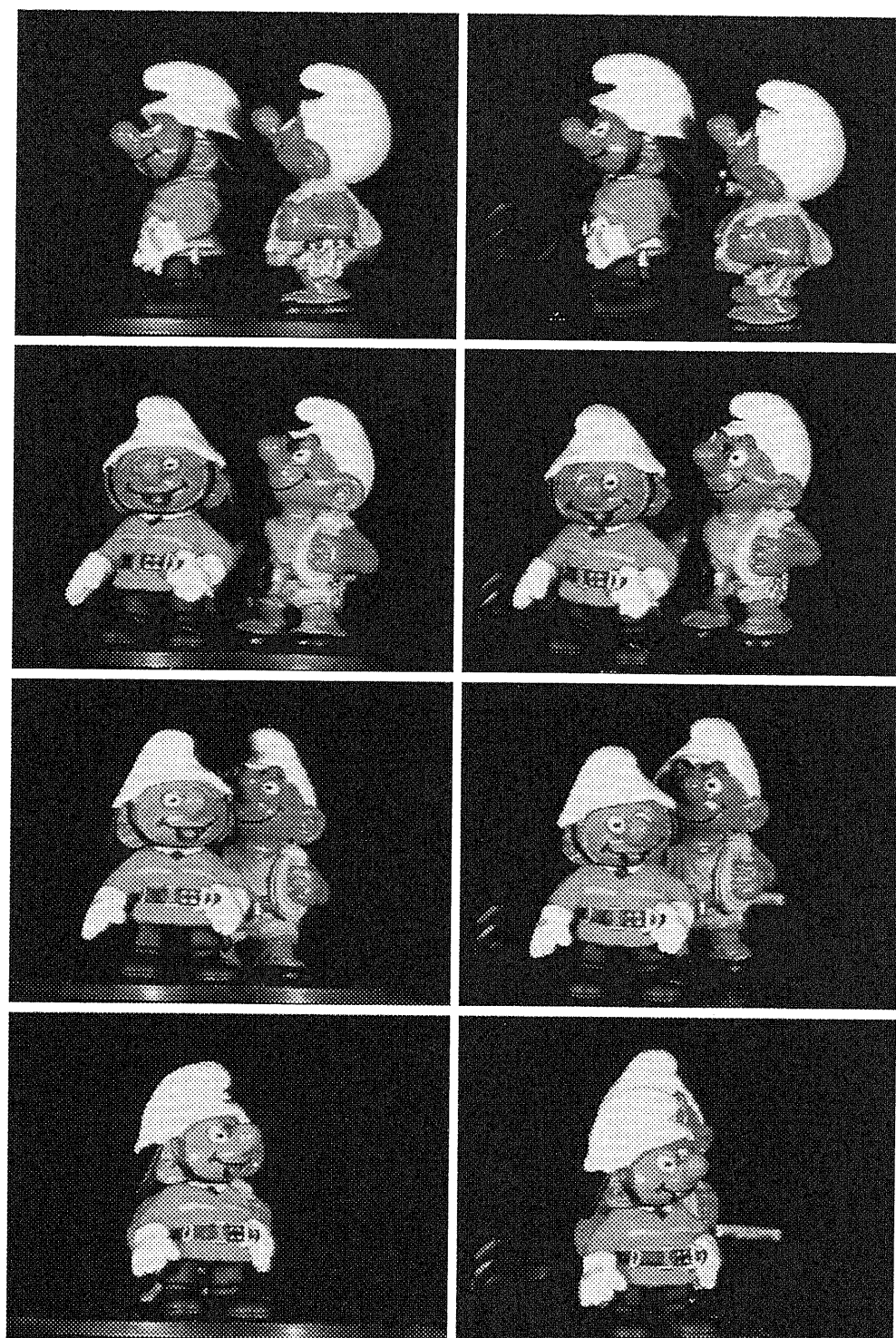


図 6.14: 人形の正投影像 (図 6.13 と同じ位置で撮影)

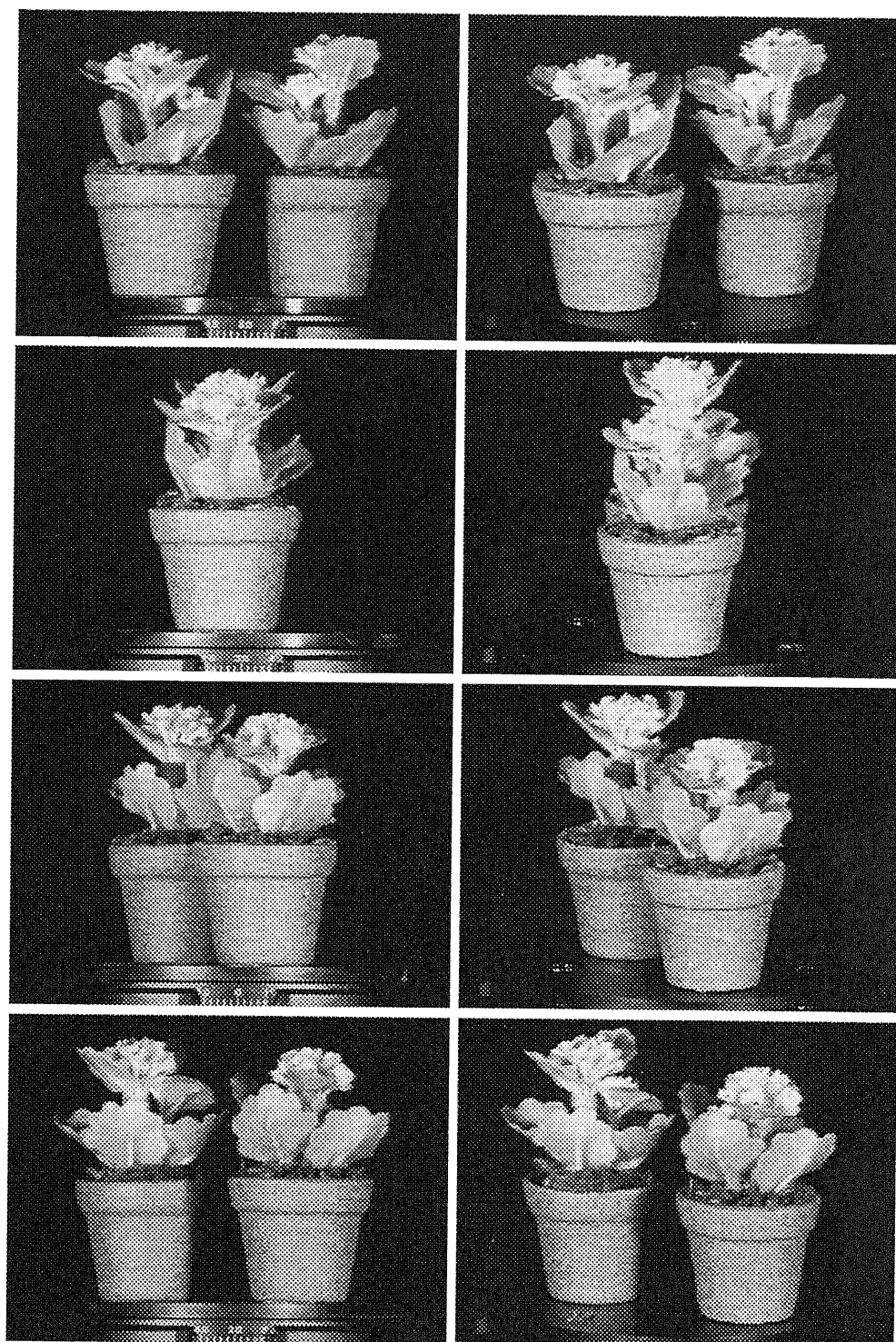
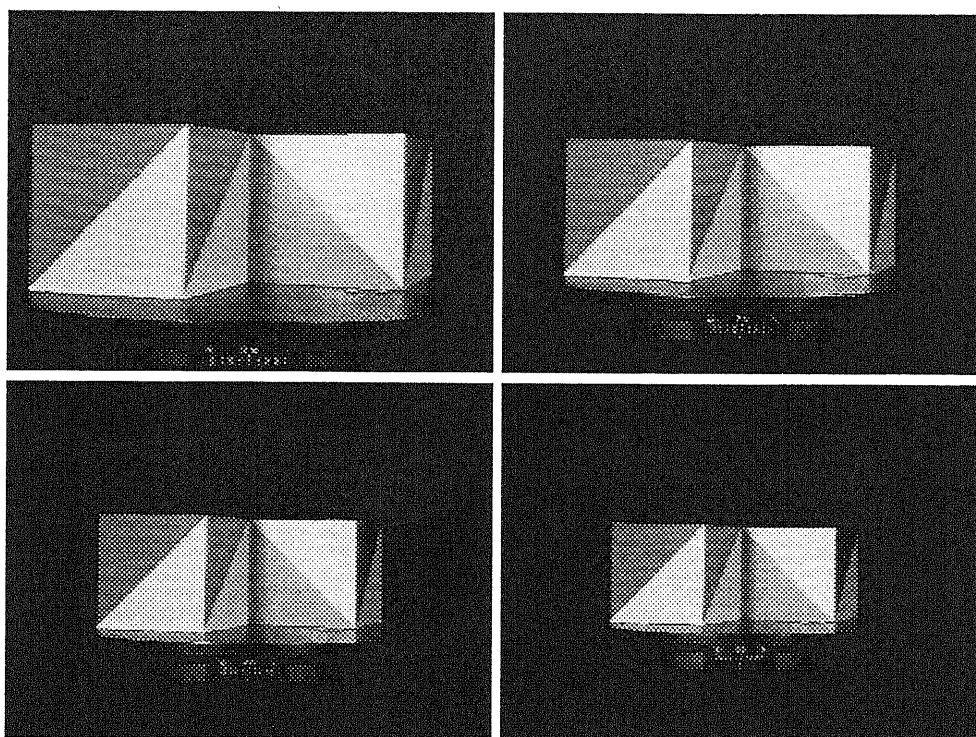
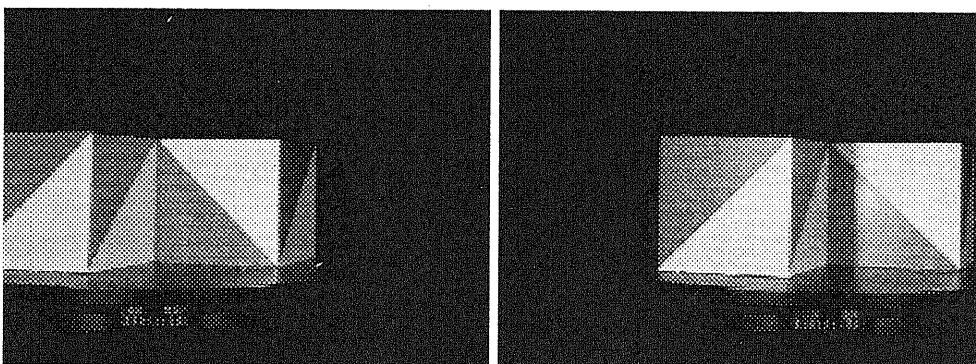


図 6.15: 鉢植えの正投影像 (図 6.13 と同じ位置で撮影)





(前後移動の様子)



(左右移動の様子)

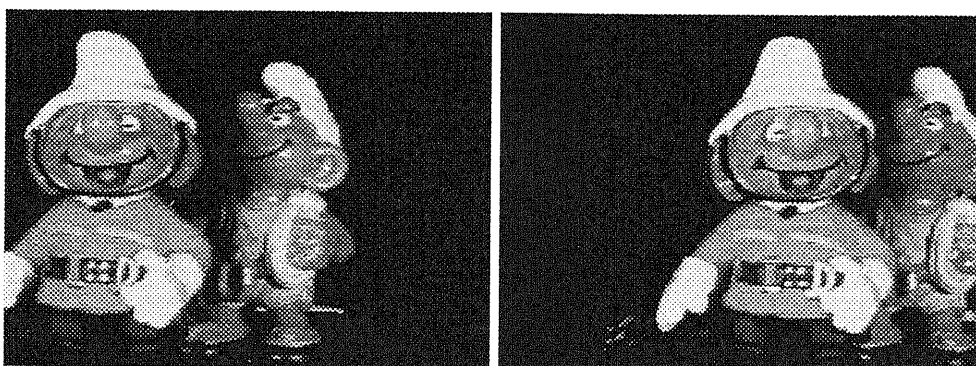
図 6.16: 立方体の透視投影像 (図 6.13 の正投影像群を用いて合成)

表 6.2: レンズ歪みの近似式の各項の係数

近似式	$k_1$	$k_2$	$k_3$
(1)	$-7.627 \times 10^{-3}$	$6.405 \times 10^{-5}$	$-5.069 \times 10^{-8}$
(2)	0	$5.649 \times 10^{-5}$	$-3.3202 \times 10^{-8}$
(3)	$5.2979 \times 10^{-3}$	0	$1.0347 \times 10^{-7}$
(4)	0	0	$1.8397 \times 10^{-7}$



(前後移動の様子)

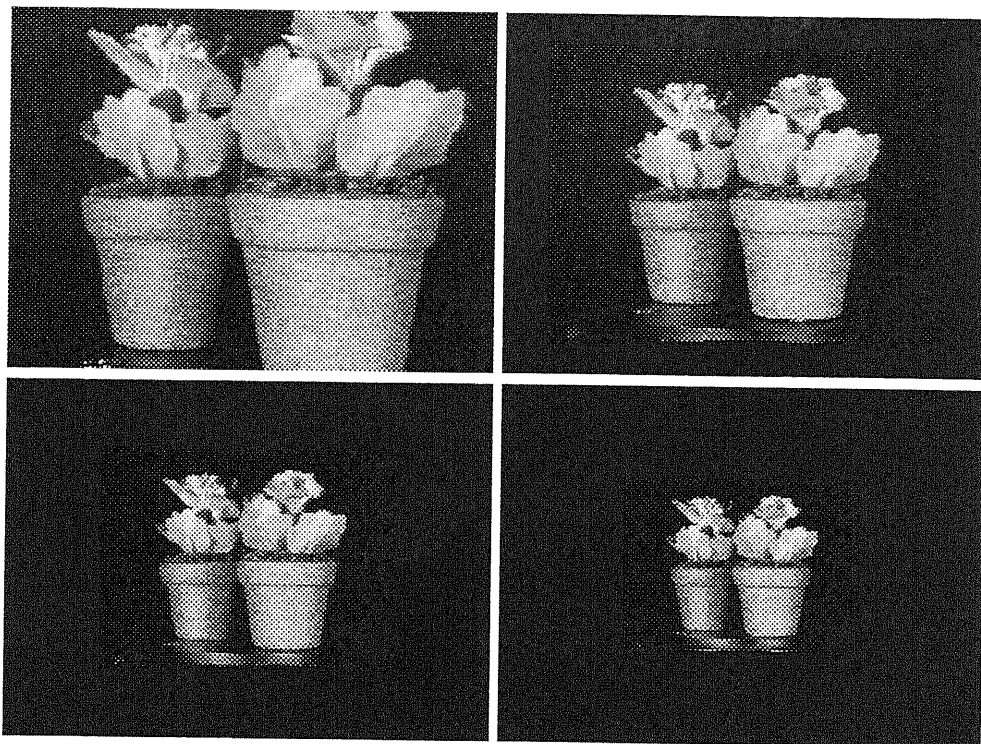


(左右移動の様子・その 1)

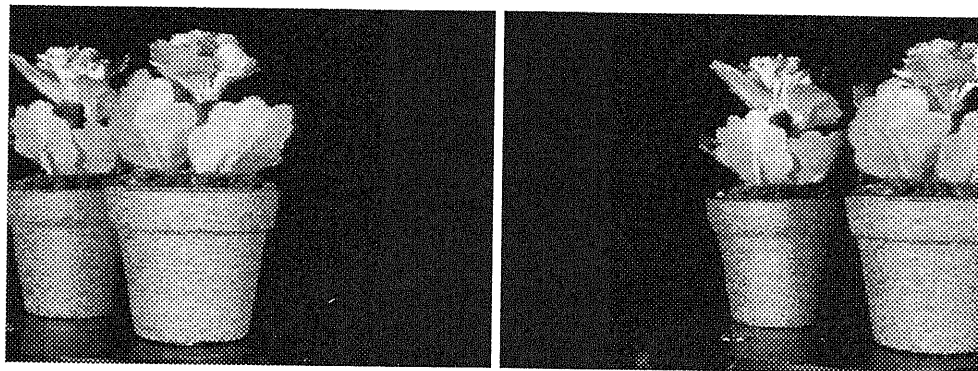


(左右移動の様子・その 2)

図 6.17: 人形の透視投影像 (図 6.14 の正投影像群を用いて合成)

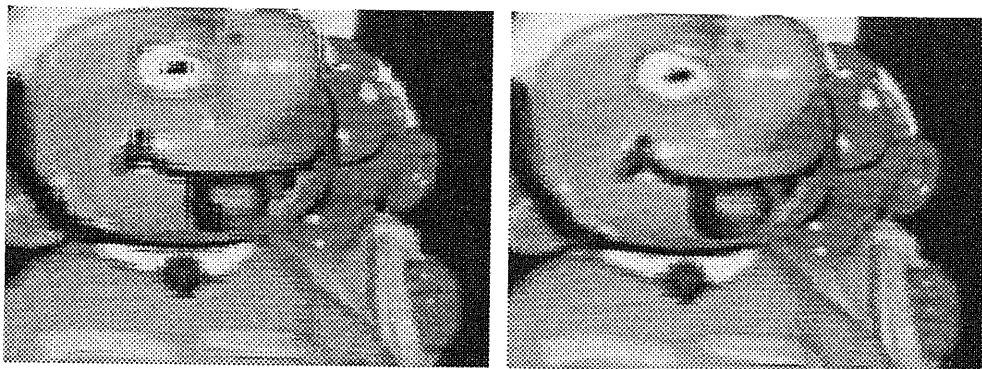


(前後移動の様子)



(左右移動の様子)

図 6.18: 鉢植えの透視投影像 (図 6.15 の正投影像群を用いて合成)



(a)  $0.9^\circ$

(b)  $0.09^\circ$

図 6.19: 角度分解能の異なる 2 種類の正投影像群を用いて合成した透視投影像の比較



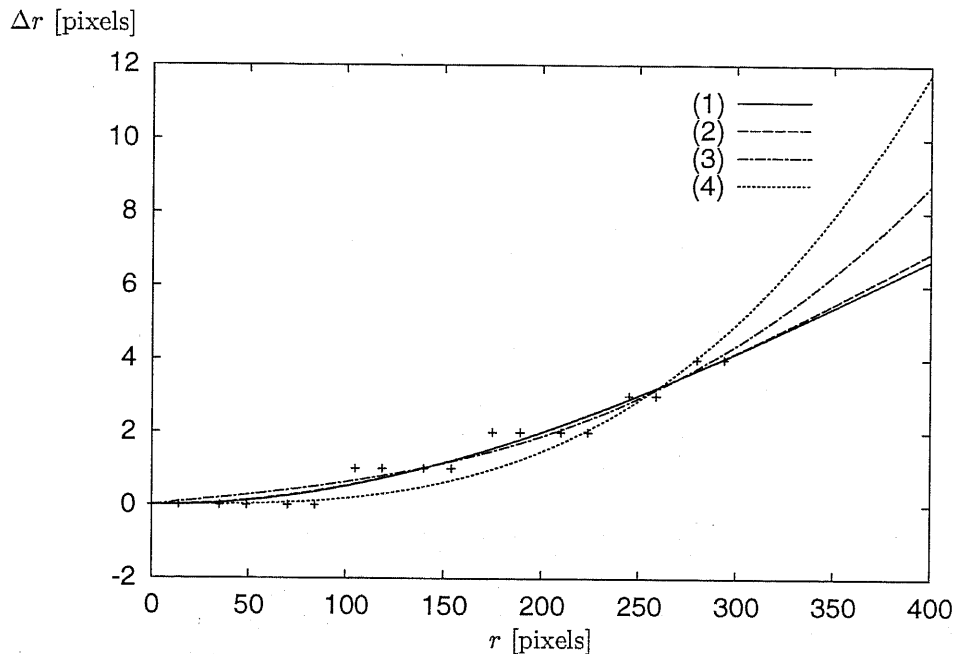


図 6.20: テレセントリックレンズの歪み

得られた近似式の妥当性を検証するために、各々の近似式に基づき、6.3.2 節に述べた手順により、レンズ歪みの影響を補正した透視投影像を合成した。図 6.21 は歪み補正のない透視投影像、図 6.22 は歪み補正を行なった場合の透視投影像の合成結果である。

図 6.21, 6.22 の 5 枚の画像を比較すると、立方体の輪郭部分に僅かな差が見られるが、視覚的にはほとんど識別できない程度の違いでしかない。

図 6.20 によれば、近似式 (4) は、 $r = 100 \sim 150$  画素の部分で、他の近似式と比べて、実測データから大きく外れていることがわかる。また、近似式 (3), (4) では  $r = 400$  画素のとき  $\Delta r > 8$  画素となり、これは歪み率 2% 以下というレンズの仕様を上回る値である。以上を踏まえると、近似式として妥当なのは (1) もしくは (2) であると考えられる。ただし、どちらが妥当であるかについては、ここでの結果のみから判断することはできず、より高い空間分解能を有するカメラでの撮影を行ない、より厳密に歪み量の評価を行なう必要がある。

### 6.5.5 ターンテーブルとカメラの位置関係の誤差の補正

6.4.4 節で述べた手法により、ターンテーブルの回転軸が傾いている場合の誤差の補正を行なう。ただし、6.4.2 節で述べたように、現状では、画像を用いた誤差計算を行なうには、カメラの画素数が不十分である。そこで、軸の傾きは実測により求める。具体的には、各ターンテーブル面が回転軸に垂直であることを前提として、テーブル面に直角定規を当て、その像の傾きを求める。

実測の結果、A の回転軸の傾きは  $0.4223^\circ$  であった。また、B の回転軸については、画像上では傾きを識別できないため、傾いていないと見なす。A の傾きは、6.4.3 節で求めた許容値 ( $0.047^\circ$ ) よりも大きな値であるため、回転角の補正が必要となる。

図 6.23(a) は回転角の補正を行わない場合の正投影像、(b) は補正を行なった場合の正投影像の例である。図では視覚的な差はほとんど見られないが、両者の画像を撮影したときのターンテーブルの回転角は異なっている。

それぞれの正投影像群を用いて透視投影像を合成した結果を、図 6.24 に示す。補正なしで撮影した正投

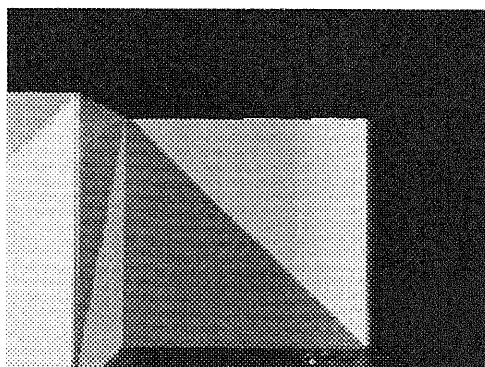
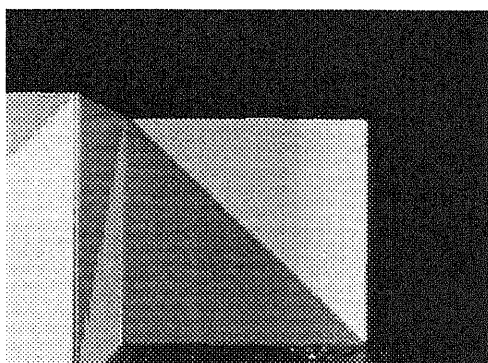
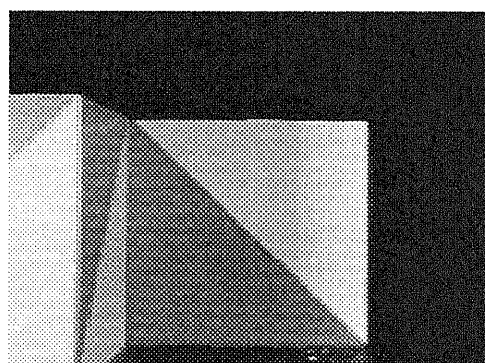


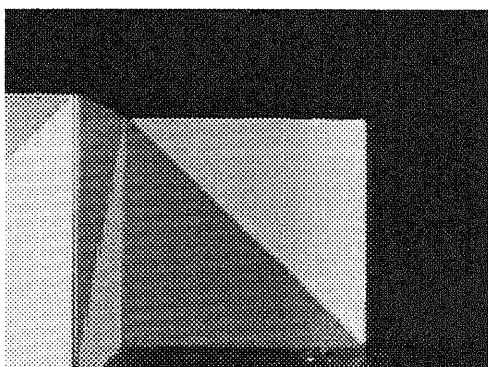
図 6.21: レンズ歪みを補正しない場合の透視投影像



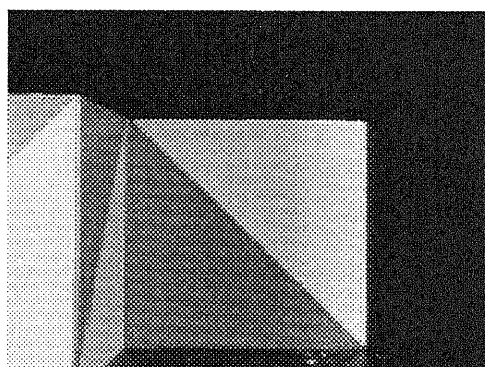
(a) 近似式 (1) による補正



(b) 近似式 (2) による補正

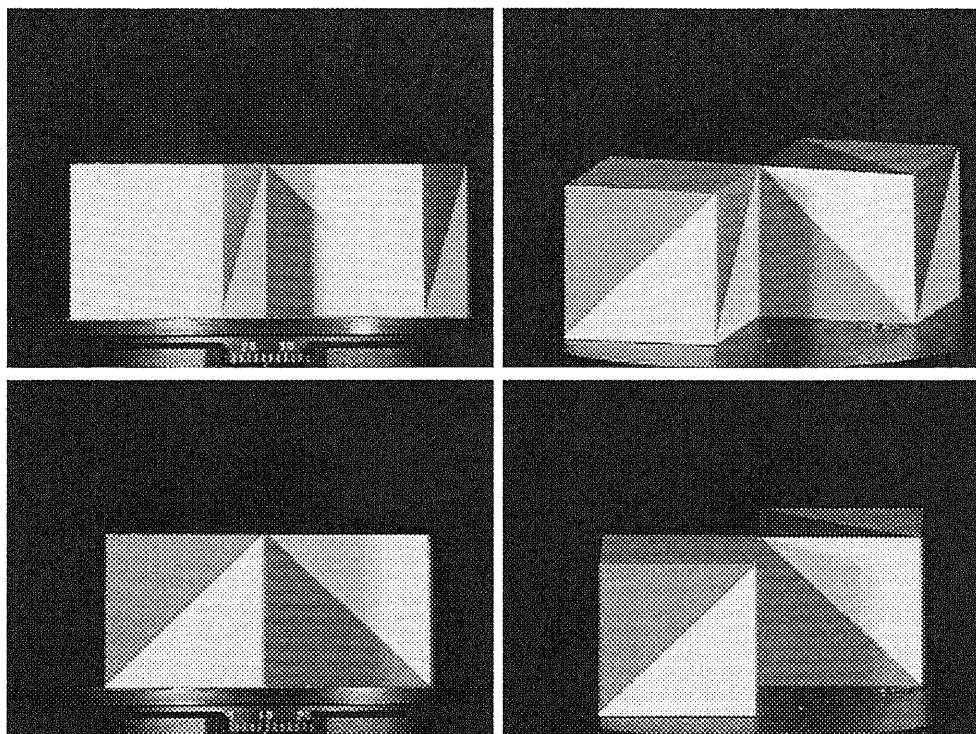


(c) 近似式 (3) による補正

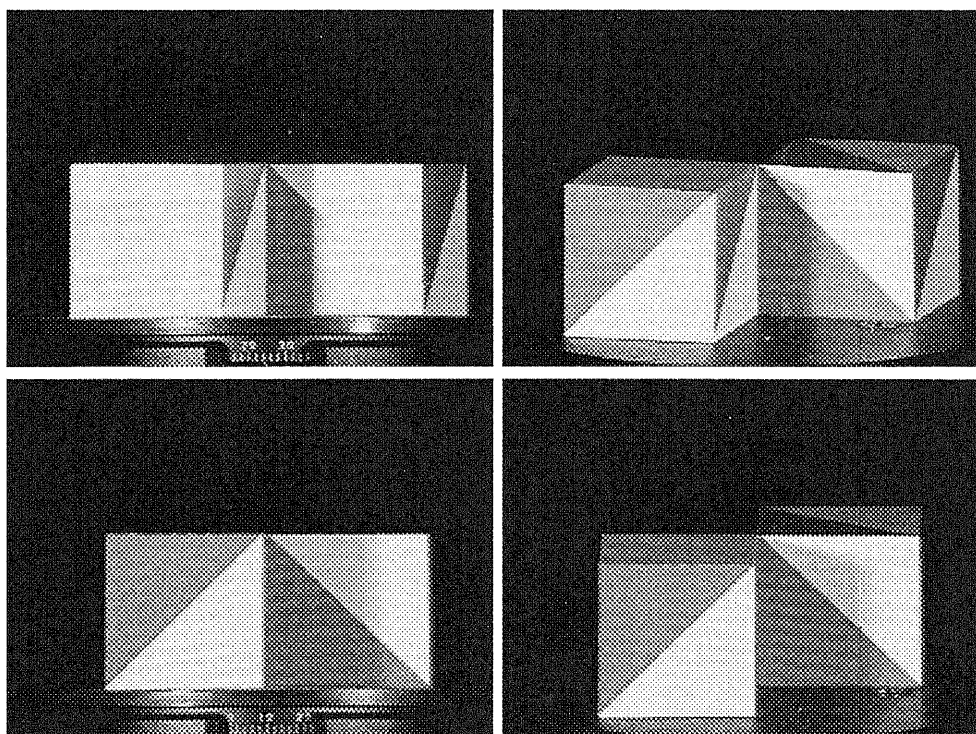


(d) 近似式 (4) による補正

図 6.22: レンズ歪みを補正した場合の透視投影像



(a) 補正なし



(b) 補正あり

図 6.23: ターンテーブルの回転軸が傾いているときの原画像

影像を用いた合成結果の方が、補正を加えた場合に比べてわずかに左に傾いている。ただし、ずれは最大でも3画素程度であり、補正なしでも視覚的にはほとんど識別できない程度の誤差しか現れない。

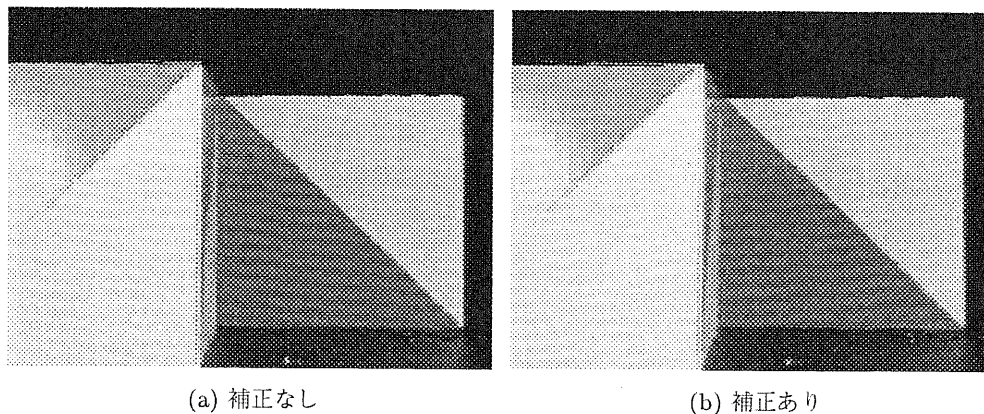


図 6.24: 図 6.23 の正投影像を用いて合成した透視投影像

### 6.5.6 透視投影による多眼画像との比較

光線情報の取得方法として正投影像と透視投影像のどちらが適しているかを調べるために、それぞれの投影方式で多視点撮影された画像群を用いて、新たな画像(透視投影)の合成を行なう。透視投影の多眼画像については、4.6.3 節で撮影した画像群を一旦4次元情報空間に展開し、テレセントリック撮像系で撮影した正投影像群と同じデータ形式(640×480画素の正投影像の集まり)に変換した上で、新たな透視投影像を合成する。角度分解能はいずれのデータも0.75°とする。

図 6.25 は、それぞれの投影方式で撮影した原画像から、ほぼ視点での透視投影像を合成した例である。どちらの場合も、角度分解能の影響で、読み出し元の画像が切り替わる境界付近が不連続になっているが、透視投影像を用いた場合は、これに加えて、被写体の輪郭が滑らかでなくなる傾向がある。これは、透視投影像を4次元情報空間に展開する過程で、標本点分布の相違に起因する誤差が生じたためであると考えられる。

## 6.6 本章のまとめ

本章では、第5章で論じたテレセントリックレンズによる光線取得法に基づき、高い位置精度と角度分解能を有する光線情報を自動的に取得することを目的として開発した、テレセントリック撮像システムについて述べた。また、設計上の理論値と実際の装置との間の誤差について検討を行ない、誤差の計算や補正の方法についても論じた。

本装置は、テレセントリックレンズにより再標本化誤差のない光線取得が可能であることに加えて、横幅が320画素以下で視野角が30°以上の画像の生成に必要な光線を、必要な角度分解能で取得することができる。第5章の段階では、表示用の画像の生成の際に、光線として処理を行なっているが、実質的には正投影像の貼り合わせであった。これに対し、本装置の有効角度分解能(0.09°)にて取得したデータを用いると、正投影像の貼り合わせではなく、光線を1本ずつ読み出して新たな画像を生成する処理が現実可能となる。そのため、貼り合わせによる歪みのない画像を得ることができ、このことは実験によっても確認された。

なお、本章で検討した様々な誤差については、現状では、特に考慮しなくても、最終的な画像への視覚

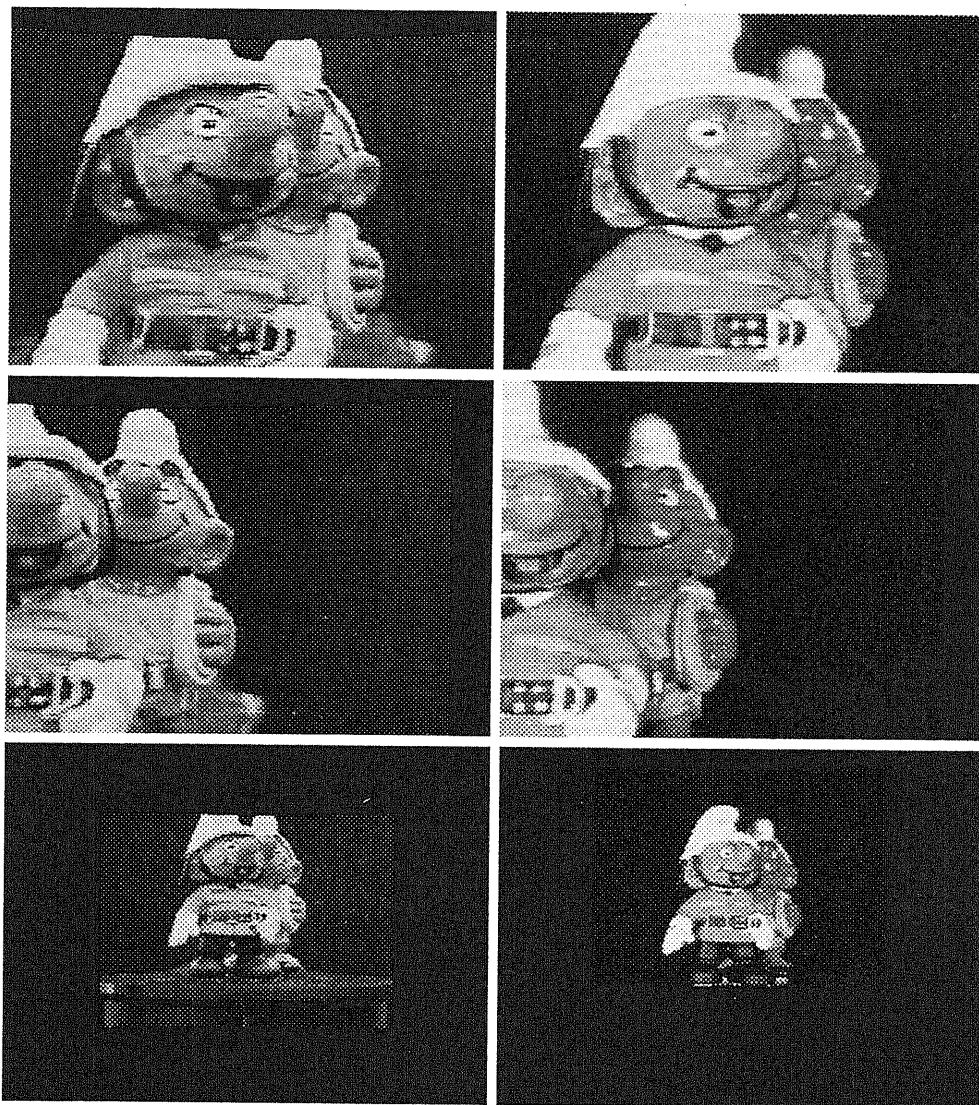


図 6.25: 透視投影像から得た光線情報を用いて合成した画像 (左) と正投影像を用いて合成した画像 (右)

的な影響はほとんど見られない。しかし、今後正投影像の画素数が向上すれば、誤差の影響が現れるようになり、その場合には本章で述べた誤差の計算や補正手法を利用する機会も増えるものと思われる。

## 参考文献

- [1] 写真技術便覧編集委員会 編:『新版 写真技術便覧』コロナ社 (1987).
- [2] A. Kraskna-Krausz, editor: *The Focal Encyclopedia of Photography*, Focal Press, London, 1965 Edition (1965).

## 第7章

---

## 結論



## 7.1 本論文の主たる成果

高い臨場感を実現する次世代の視覚メディアにおいては、立体感の呈示が有力であるが、そのための視覚情報を如何にして用意するかが大きな問題である。次世代ディスプレイとして多様な方式が並立している現状では、3次元情報を光線の集まりとして記述するアプローチが有力である。

光線記述の枠組みにおいては、様々な入力手段を利用することができる。しかし、この分野に関連する様々な技術的課題が残されている現状では、それらの課題の解決に向けた研究に必要なデータを得るための、標準的な光線情報取得方法の確立が望まれる。

本論文では、このような現状を踏まえ、実在する3次元空間を任意の視点から見たときの画像を正しく再現するための光線情報取得に関する研究を行なった。以下に本論文の主たる成果をまとめる。

### 既存の3次元画像入力装置の位置付け

光線による3次元情報の記述する手法は、特定の入出力方式に依存しないことを特徴とする。しかしそのことが、実在の対象を3次元画像として入力する手法のさらなる多様化にもつながっている。

実写による3次元画像入力方式のうち、光線取得の手段として広く用いられているのは、多数の視点から2次元画像を撮影する方式である。そこで、従来研究の中から、光線として記述することを目的とした多視点撮影の事例を紹介し、それらの相互比較を行なった。特に視点の配置方法に着目して比較したところ、3通りの方式に分類できることが明らかになった(第2章)。

また、実在の対象を3次元的に入力する既存の手段としては、3次元距離計測装置(レンジファインダ)も考えられる。ただし、光線として記述する目的ではこれまで利用されていない。そこで本論文では、レンジファインダにより得られる距離画像を光線の集合として記録する手法について検討を行なった。併せて、多眼画像との融合など、距離画像を光線として記述することにより実現できる新たな利用法を示した(第3章)。

### 光線情報の標本化に伴う問題点の考察

第2章および3章に示した手法に基づき、既存の3次元画像入力手段により取得したデータを光線として記録した場合、離散的な4次元情報空間に本来記録されるべき光線とは異なる光線が標本データとして得られることを明らかにし、それが原因で表示用の画像に生じる誤差について論じた。また、光線の集まりのデータから生成される表示用画像の誤差を低減することを目的として、4次元情報空間の離散化の方法や、3次元画像情報を4次元情報空間に展開する際の光線の近似法についても検討した(第4章)。

原画像を正確に復元することを考えると、4次元情報空間を非常に高い分解能で離散化する必要がある、データ量が膨大なものになる。しかし、誤差の低減のみを目的とするのであれば、光線の近似を工夫することにより、細かい離散化を行なわなくても効果が得られる。

### 光線情報の直接取得法の提案と実装

第4章の議論によれば、既存の3次元画像入力手段では、光線の集まりとして記録されるデータから生成される表示用画像の誤差を抑制することは可能である。しかし、光線の標本化の仕方が異なるため、誤差を完全に取り除くことは本質的に不可能である。

この問題の解決のため、離散的な4次元情報空間と標本点分布が同じになるような光線取得方式(光線の直接取得法)について検討を行なった。現状では、平面ディスプレイに限定した光線情報の直接取得の手段は既に存在するが、全方向の光線情報を直接取得する方法は確立されていない。そこで、物体全周の情報を記述するための光線情報の直接取得法として、テレセントリックレンズによる多数の方向からの正投影像を撮影を提案した(第5章)。さらに、この原理に基づいて、高い精度で光線を取得できる撮像装置を



開発し、実際の物体の撮影を行なうとともに、誤差の計算や補正、実現可能な角度分解能に関する検討を行なった(第6章)。

本論文で提案した正投影像の多方向撮影を用いると、光線情報を画像としてではなく、光線の形のままで取得することが可能である。また、本論文にて開発された撮像装置で取得されるデータは、表示画像の生成において、画像の貼り合わせによる近似ではなく、純然たる光線読み出しによる生成処理を実現するものである。

以上をまとめると、本論文では、3次元情報を記述するための光線情報を、従来のように画像として取得する場合の問題点を明らかにし、その解決手段として、光線を画像として近似するのではなく、入力から表示まで光線のデータ形式そのままの形で扱うことのできる光線取得方法を提案した。本研究の成果は、空間共有通信システムの構築のための、実世界情報の取得技術の確立に貢献するものである。

## 7.2 今後の課題と展望

### 7.2.1 光線情報の取得について

本論文で提案した、正投影像撮影に基づく光線取得方式の実装において、現状では実現できていない点や、現状から改良すべき点を以下に挙げておく。

#### 分解能の向上

第6章にて開発したテレセントリック撮像システムでは、現在、無歪みで合成できる透視投影像の画素数は横320画素以下であるが、この値はディスプレイ装置の高解像度化、大画面化が進んでいる中においては不十分である。

本撮像系では、実現できる光線の分解能は、位置成分、方向成分ともに、カメラの画素数によって規定される。そのため、いずれのパラメータの分解能の向上のためにも、カメラの画素数の向上が必要となる。

また現状では、カメラ側の分解能の限界により、第6章にて検討した様々な誤差を考慮しなくても、生成される表示用画像には視覚的な影響はほとんど見られない。しかし、分解能の向上に伴って、誤差の影響は無視できなくなると考えられるため、より画素数の多いカメラを用いる場合には併せて検討と誤差評価を行なう必要がある。

#### 両側テレセントリックレンズの利用

本研究では、物体側テレセントリックレンズを使用して正投影像の撮影を行なった。しかし、物体側テレセントリックレンズでは、撮像面の取り付け精度や、絞り込み撮影が必要となることなどが問題点として挙げられる。

これらの問題の解決手段として、両側テレセントリックレンズが有効である。両側テレセントリックレンズを用いると、像倍率が撮像面の位置によらず一定の正投影像を得ることができる。そのため、開口絞りを絞り込まずに物体全域に合焦した正投影像を撮影することも、原理上は可能である。

#### 照明条件の考慮

Image-Based Renderingにおいては、撮影時の照明条件しか再現できない点が本質的な課題の一つとなっている。特に、現状でのテレセントリック撮像システムにおいては、固定光源によるスポット照明の中を物体が移動しながら絞り込み撮影を行なうため、被写体表面に陰影やハイライトが生じ、かつそれらが合成画像において正しく再現されない点が問題となる。

照明条件の変化しない静的な空間における光線情報を正しく取得するためには、図 2.17 に示したように、多眼撮影時に被写体と光源との相対位置が変化しないような照明が必要となる。また、スポット照明を用いず、明るさが均一になるような照明により、被写体表面の明るさの局所変化が現れないようにするアプローチも考えられる。これに関しては、写真撮影の現場で蓄積されている様々な技術や経験 [1] が参考になると考えられる。

さらに、リアリティの高い空間表現のためには、任意の照明条件の再現も今後必要になると考えられる。実写画像を用いて任意の照明条件を再現する試みとして、異なる照明条件の下で撮影された画像を組み合わせる手法 [2] が提案されている。これらの手法はテレセントリック撮像システムにおいても有効であると考えられる。

### 7.2.2 提案手法により取得したデータの利用

これまでも述べたように、本論文の提案手法を用いて取得されるデータは、制約条件はあるものの、3次元情報の光線記述に関する様々な研究を行なう上での標準的なデータとして利用することができる。標準データを得るための手段が整ったことにより、以下のような方向での研究の発展が期待される。

#### 光線情報の符号化・圧縮

2.4.2 節で紹介したように、膨大なデータ量となる光線情報の圧縮に関する研究が進められているが、現在までの成果は、CG 画像や、補間処理を加えた実写多眼画像データへの適用にとどまっている。

これらの成果を標準データに対して適用することにより、実空間情報の符号化方式としての有効性を公正に評価することが可能になる。また、符号化においては、2次元画像と同様に、光線情報の統計的性質の解析が重要な役割を果たすが、実在の対象についてこの解析を行なう上でも有効である。

また、本論文で提案した光線取得方式では、正投影の2次元画像の集まりとしてデータが記録されるため、JPEG や MPEG をはじめとする既存の2次元画像符号化を容易に適用することができる。これにより、2次元画像符号化と、4次元情報に特化した符号化との性能比較も容易に行なうことができる。さらに、JPEG や MPEG など圧縮した正投影像を用いて合成された画像に現れる影響など、新たな興味深い知見が得られることも期待される。

#### 光線情報への電子透かしの埋め込み

近年のインターネットの急速な普及に伴い、画像や音楽などのデジタルコンテンツにおける著作権保護が課題となっており、そのための手段として、電子透かし情報の埋め込みが注目されている [4]。光線情報についても、3次元空間共有通信においてネットワーク上を伝送する際には、電子透かし情報の埋め込みが必要になることが予想される。

光線情報の利用形態は、符号化を行なって伝送し、所望の画像に変換して表示するのが前提となる。そのため、電子透かし方式には、圧縮符号化および光線から画像への変換の双方の処理への耐性を有することが求められる。

#### 画像生成処理の高速化

2.4.3 節に述べたように、光線情報から任意の視点における画像を高速に生成する各種アルゴリズムでは、必要な光線を厳密に計算して読み出すのではなく、何らかの近似を加えてデータ量の削減や CG 手法の適用を行なうことにより、処理の高速化を図っている。

しかし、近似処理を行なった場合、合成される画像の品質の劣化が避けられないため、今後は近似を加えない厳密な画像生成の高速化が望まれる。厳密な画像生成処理を実時間で行なうには、計算機のメモリの

大容量化と高速アクセス技術が不可欠である。また、実時間処理が困難な状況でも、WWWで用いられる2次元静止画のインタレース表示と同程度の所要時間で、階層的に表示できるようにすることが望ましい。これらの処理においては、メモリ上でのデータ配置や、データの読み出し順序の工夫が重要になる。

3次元情報を光線として記述する手法に関する研究は、基本概念が提案されてから数年しか経過していない新しい分野であり、現状では上記のように解決すべき課題が山積している。本論文では、これらの課題の解決に向けた研究のために、必要なデータを用意する方法を示した。本手法が諸問題の解決の一助となることを願ってやまない。

## 参考文献

- [1] 『最新ライティングマニュアル』写真工業出版社 (1997).
- [2] 苗村 健, 金子正秀, 原島 博: “光線記述に基づく仮想光源画像の合成”, 映像情報メディア学会誌, Vol.52, No.9, pp.1328-1335 (1998).
- [3] 苗村 健: “光線記述に基づく空間符号化と空間共有メディアに関する研究”, 東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻博士論文 (1996).
- [4] “「電子透かし」がマルチメディア時代を守る”, 日経エレクトロニクス 1997年2月号, pp.99-124 (1997).

## 付録 A

# テレセントリック撮像系の 誤差計算式の導出

### A.1 誤差の計算

6.4.2 節において、テレセントリック撮像系のターンテーブルの回転軸の傾きおよびずれを、画像を用いて求める手法を紹介した。このときに用いる計算式の導出過程について、その詳細を説明しておく。

#### A.1.1 回転軸の傾きの計算

(6.7) 式の行列  $M(\theta, \phi)$  の成分  $m_{ij}(\theta, \phi)$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) に対して、 $f_{ij}(\phi)$ ,  $g_{ij}(\phi)$ ,  $h_{ij}(\phi)$  をそれぞれ以下のように定義する。

$$f_{ij}(\phi) = \frac{m_{ij}(\theta + \Delta\theta, \phi) + m_{ij}(\theta - \Delta\theta, \phi) - 2m_{ij}(\theta, \phi) \cos \Delta\theta}{2(1 - \cos \Delta\theta)} \quad (\text{A.1})$$

$$g_{ij}(\phi) = \frac{2f_{ij}(\phi) - [f_{ij}(\phi + \Delta\phi) + f_{ij}(\phi - \Delta\phi)]}{2(1 - \cos \Delta\phi)} \quad (\text{A.2})$$

$$h_{ij} = \frac{f_{ij}(\phi + \Delta\phi) + f_{ij}(\phi - \Delta\phi) - 2f_{ij}(\phi) \cos \Delta\phi}{2(1 - \cos \Delta\phi)} \quad (\text{A.3})$$

ただし、 $\Delta\theta$ ,  $\Delta\phi$  の値は既知であるとする。

撮像系の初期状態において、基準物体に描かれた基準線の両端の位置が  $(X_1, Y_1, Z_1)$ ,  $(X_2, Y_2, Z_2)$  であるとし、これらがターンテーブルの回転によりそれぞれ  $(P_1, Q_1, R_1)$ ,  $(P_2, Q_2, R_2)$  に移るものとする。ターンテーブル A, B の回転角がそれぞれ  $\theta$ ,  $\phi$  のとき、 $P_i = P_i(\theta, \phi)$ ,  $Q_i = Q_i(\theta, \phi)$  ( $i = 1, 2$ ) とすると、

$$P_i(\theta, \phi) = m_{11}(\theta, \phi)X_i + m_{12}(\theta, \phi)Y_i + m_{13}(\theta, \phi)Z_i - Z_b \sin \beta \sin \phi \quad (\text{A.4})$$

$$Q_i(\theta, \phi) = m_{21}(\theta, \phi)X_i + m_{22}(\theta, \phi)Y_i + m_{23}(\theta, \phi)Z_i + Z_b \cos \beta \sin \phi \quad (\text{A.5})$$

となる。よって、

$$P(\theta, \phi) = P_1(\theta, \phi) - P_2(\theta, \phi), \quad Q(\theta, \phi) = Q_1(\theta, \phi) - Q_2(\theta, \phi),$$

$$X = X_1 - X_2, \quad Y = Y_1 - Y_2, \quad Z = Z_1 - Z_2$$

とおくと、

$$P(\theta, \phi) = m_{11}(\theta, \phi)X + m_{12}(\theta, \phi)Y + m_{13}(\theta, \phi)Z \quad (\text{A.6})$$

$$Q(\theta, \phi) = m_{21}(\theta, \phi)X + m_{22}(\theta, \phi)Y + m_{23}(\theta, \phi)Z \quad (\text{A.7})$$

となる。これに対し、 $F_1(\phi)$ ,  $F_2(\phi)$  を以下のように定義する。

$$F_1(\phi) = P(\theta + \Delta\theta, \phi) + P(\theta - \Delta\theta, \phi) - 2P(\theta, \phi) \cos \Delta\theta \quad (\text{A.8})$$

$$F_2(\phi) = Q(\theta + \Delta\theta, \phi) + Q(\theta - \Delta\theta, \phi) - 2Q(\theta, \phi) \cos \Delta\theta \quad (\text{A.9})$$

さらに、 $G_1(\phi)$ ,  $G_2(\phi)$ ,  $H$  をそれぞれ以下のように定義する。

$$G_1(\phi) = 2F_1(\phi) - [F_1(\phi + \Delta\phi) + F_1(\phi - \Delta\phi)] \quad (\text{A.10})$$

$$G_2(\phi) = 2F_2(\phi) - [F_2(\phi + \Delta\phi) + F_2(\phi - \Delta\phi)] \quad (\text{A.11})$$

$$H = F_1(\phi + \Delta\phi) + F_1(\phi - \Delta\phi) - 2F_1(\phi) \cos \Delta\phi \quad (\text{A.12})$$

$f_{13}(\phi) = 0$ ,  $f_{23}(\phi) = 0$  となることを利用すると、

$$G_1(\phi) = 4(1 - \cos \Delta\theta)(1 - \cos \Delta\phi)[g_{11}(\phi)X + g_{12}(\phi)Y] \quad (\text{A.13})$$

$$G_2(\phi) = 4(1 - \cos \Delta\theta)(1 - \cos \Delta\phi)[g_{21}(\phi)X + g_{22}(\phi)Y] \quad (\text{A.14})$$

$$H = 4(1 - \cos \Delta\theta)(1 - \cos \Delta\phi)[h_{11}X + h_{12}Y] \quad (\text{A.15})$$

となり、具体的には以下のような形をとる。

$$G_1(\phi) = 4(1 - \cos \Delta\theta)(1 - \cos \Delta\phi) \cos(\beta - \alpha) \sin \beta \cos \phi (X \sin \alpha - Y \cos \alpha) \quad (\text{A.16})$$

$$G_2(\phi) = -4(1 - \cos \Delta\theta)(1 - \cos \Delta\phi) \cos(\beta - \alpha) \cos \beta \cos \phi (X \sin \alpha - Y \cos \alpha) \quad (\text{A.17})$$

$$H = -4(1 - \cos \Delta\theta)(1 - \cos \Delta\phi) \sin(\beta - \alpha) \cos \beta (X \sin \alpha - Y \cos \alpha) \quad (\text{A.18})$$

ここで、 $\phi$  が未知であるとして、その値を求めることを考える。(A.16) 式より、ある  $\Delta\phi'$  (値は既知とする) に対して、

$$\frac{G_1(\phi + \Delta\phi')}{G_1(\phi)} = \frac{\cos(\phi + \Delta\phi')}{\cos \phi} = \frac{\cos \phi \cos \Delta\phi' - \sin \phi \sin \Delta\phi'}{\cos \phi} = \cos \Delta\phi' - \tan \phi \sin \Delta\phi'$$

となるから、 $\phi$  は次式により求められる。

$$\tan \phi = \frac{1}{\sin \Delta\phi'} \left[ \cos \Delta\phi' - \frac{G_1(\phi + \Delta\phi')}{G_1(\phi)} \right] \quad (\text{A.19})$$

あるいは、以下のいずれか 1 つを用いても良い。

$$\tan \phi = \frac{1}{\sin \Delta\phi'} \left[ \cos \Delta\phi' - \frac{G_2(\phi + \Delta\phi')}{G_2(\phi)} \right] \quad (\text{A.20})$$

$$\tan \phi = \frac{G_1(\phi - \Delta\phi') - G_1(\phi + \Delta\phi')}{2G_1(\phi) \sin \Delta\phi'} \quad (\text{A.21})$$

$$\tan \phi = \frac{G_2(\phi - \Delta\phi') - G_2(\phi + \Delta\phi')}{2G_2(\phi) \sin \Delta\phi'} \quad (\text{A.22})$$

上記にて求めた  $\phi$  と (A.17), (A.18) 式から、 $\beta - \alpha$  は次式にて求めることができる。

$$\beta - \alpha = \arctan \left[ \frac{H \cos \phi}{G_2(\phi)} \right] \quad (\text{A.23})$$

一方、(A.16), (A.17) 式から、 $\beta$  は次式にて求めることができる。

$$\beta = \arctan \left[ -\frac{G_1(\phi)}{G_2(\phi)} \right] \quad (\text{A.24})$$

(A.23), (A.24) 式より、 $\alpha, \beta$  が求められる。

上記の手順により、 $X, Y, Z, \theta, \phi$  が未知の状態から  $\alpha, \beta$  を求めることができる。よって、基準物体を撮影する前に、物体の位置ならびにターンテーブルの回転角  $\theta$  の位置を厳密に合わせておかなくても、その状態からの回転角だけがわかっているならば、回転軸の傾きを求めることができる。

### A.1.2 回転軸のずれの計算

ターンテーブル A, B の回転軸がともに傾いており (傾き角は既知とする)、かつ各々が  $Z = 0, Z_b$  の位置にあるとする。ある基準点の回転角  $\theta$  のときの位置を  $(X_0, Y_0, Z_0)$  とすると、A, B の回転角がそれぞれ  $\theta, \phi$  のとき、この点の正投影像上での水平位置  $P(\theta, \phi)$  および垂直位置  $Q(\theta, \phi)$  は、

$$P(\theta, \phi) = m_{11}(\theta, \phi)X_0 + m_{12}(\theta, \phi)Y_0 + m_{13}(\theta, \phi)Z_0 - Z_b \sin \beta \sin \phi \quad (\text{A.25})$$

$$Q(\theta, \phi) = m_{21}(\theta, \phi)X_0 + m_{22}(\theta, \phi)Y_0 + m_{23}(\theta, \phi)Z_0 + Z_b \cos \beta \sin \phi \quad (\text{A.26})$$

となる。この  $P(\theta, \phi), Q(\theta, \phi)$  に対し、 $F_1(\phi), F_2(\phi)$  を (A.8), (A.9) 式で定義する。(A.1) 式の  $f_{ij}(\phi)$  を用いると、 $F_1(\phi), F_2(\phi)$  は次のように表される。

$$F_1(\phi) = 2(1 - \cos \Delta\theta)[f_{11}(\phi)X_0 + f_{12}(\phi)Y_0 - Z_b \sin \beta \sin \phi] \quad (\text{A.27})$$

$$F_2(\phi) = 2(1 - \cos \Delta\theta)[f_{21}(\phi)X_0 + f_{22}(\phi)Y_0 + Z_b \cos \beta \sin \phi] \quad (\text{A.28})$$

これから  $Y_0$  を消去すると次のようになる。

$$\begin{aligned} & f_{22}(\phi)F_1(\phi) - f_{12}(\phi)F_2(\phi) \\ &= 2(1 - \cos \Delta\theta) [\{f_{11}(\phi)f_{22}(\phi) - f_{21}(\phi)f_{12}(\phi)\}X_0 - \{f_{22}(\phi)\sin \beta + f_{12}(\phi)\cos \beta\}Z_b \sin \phi] \end{aligned} \quad (\text{A.29})$$

ここで、

$$f_{11}(\phi)f_{22}(\phi) - f_{21}(\phi)f_{12}(\phi) = 0 \quad (\text{A.30})$$

$$f_{22}(\phi)\sin \beta + f_{12}(\phi)\cos \beta = \sin(\beta - \alpha)\cos \alpha \quad (\text{A.31})$$

を用いると、(A.29) 式は次のようになる。

$$f_{22}(\phi)F_1(\phi) - f_{12}(\phi)F_2(\phi) = [2(1 - \cos \Delta\theta)\sin(\beta - \alpha)\cos \alpha \sin \phi] Z_b \quad (\text{A.32})$$

よって、 $Z_b$  の計算式は下式のようになる。

$$Z_b = \frac{f_{12}(\phi)F_2(\phi) - f_{22}(\phi)F_1(\phi)}{2(1 - \cos \Delta\theta)\sin(\beta - \alpha)\cos \alpha \sin \phi} \quad (\text{A.33})$$

あるいは、下式を用いても良い。

$$Z_b = \frac{f_{21}(\phi)F_1(\phi) - f_{11}(\phi)F_2(\phi)}{2(1 - \cos \Delta\theta)\sin(\beta - \alpha)\sin \alpha \sin \phi} \quad (\text{A.34})$$

ただし、 $\alpha = \beta$  の場合は、(A.27), (A.28) 式はそれぞれ、

$$F'_1(\phi) = 2(1 - \cos \Delta\phi)\sin \alpha [(X_0 \sin \alpha - Y_0 \cos \alpha)\cos \phi - Z_b \sin \phi] \quad (\text{A.35})$$

$$F'_2(\phi) = -2(1 - \cos \Delta\phi)\cos \alpha [(X_0 \sin \alpha - Y_0 \cos \alpha)\cos \phi - Z_b \sin \phi] \quad (\text{A.36})$$

となり、いかなる  $\phi$  に対しても、これらを連立させて解くことが不可能である。この場合は、相異なる  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  に対して、 $F'_1(\phi_1)$  と  $F'_1(\phi_2)$  を連立させて解けば良い。結果を示すと次のようになる。

$$Z_b = \frac{F'_1(\phi_1) \cos \phi_2 - F'_1(\phi_2) \cos \phi_1}{\sin(\phi_1 - \phi_2)} \quad (\text{A.37})$$

上記の手法では、 $\alpha, \beta, \phi$  が既知であれば、 $X_0, Y_0, Z_0$  の値が未知であっても  $Z_b$  を求めることができる。 $\alpha, \beta, \phi$  は、前節の手法を用いると、 $X_0, Y_0, Z_0$  の値が未知の状態から求めることができる。よって、 $Z_b$  も、最初に厳密な位置合わせを行わなくても求めることができる。

## A.2 回転軸の傾きに伴う誤差の補正

### A.2.1 光線の方向

回転軸が傾いている状態でターンテーブル A, B をそれぞれ  $\theta, \phi$  だけ回転させたとき、実際に得られる光線の方向が  $(\theta_0, \phi_0)$  であるとする。ただし、回転軸が傾いている状態で A, B をそれぞれ  $\theta_0, \phi_0$  だけ回転して撮影される正投影像と比較すると、画像全体が傾いている（像が画像面内で回転している）可能性がある。この傾き角を  $\gamma$  とすると、回転変換は、(6.7) 式で定義した行列  $M(\theta, \phi)$  を用いて、次のように表すことができる。

$$M(\theta, \phi) = R_Z(\beta) R_X(\phi) R_Z(-\beta) R_Z(\alpha) R_Y(-\theta) R_Z(-\alpha) = R_Z(\gamma) R_X(\phi_0) R_Y(-\theta_0) \quad (\text{A.38})$$

ターンテーブルの回転によって得られる光線の方向は、回転後に Z 軸と平行になるベクトルの、回転前の方向に等しい。よって、(A.38) 式で表される回転操作によって得られる光線の方向  $(\theta_0, \phi_0)$  は、

$$\begin{pmatrix} r_X \\ r_Y \\ r_Z \end{pmatrix} = M(\theta, \phi)^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.39})$$

として、

$$\theta_0 = \arctan \frac{r_X}{r_Z}, \quad \phi_0 = \arctan \frac{r_Y}{\sqrt{r_X^2 + r_Z^2}} \quad (\text{A.40})$$

で求められる。

逆に、回転軸が  $\alpha, \beta$  だけ傾いている状態で、方向  $(\theta_0, \phi_0)$  の光線を取得するためには、ターンテーブルの回転角  $\theta, \phi$  をいくらにすれば良いかを考える。上と同様に、回転により Z 軸と平行になるベクトルを考えると、(A.38) 式より、

$$M(\theta, \phi)^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = R_Y(\theta_0) R_X(-\phi_0) R_Z(-\gamma) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.41})$$

となり、両辺を書き下すと次のようになる。

$$-(1 - \cos \theta) \sin \phi \sin(\beta - \alpha) \sin \alpha - \cos \theta \sin \phi \sin \beta + \sin \theta \cos \phi \cos \alpha = \sin \theta_0 \cos \phi_0 \quad (\text{A.42})$$

$$(1 - \cos \theta) \sin \phi \sin(\beta - \alpha) \cos \alpha + \cos \theta \sin \phi \cos \beta + \sin \theta \cos \phi \sin \alpha = \sin \phi_0 \quad (\text{A.43})$$

$$\sin \theta \sin \phi \sin(\beta - \alpha) + \cos \theta \cos \phi = \cos \theta_0 \cos \phi_0 \quad (\text{A.44})$$

ここで、(A.42)  $\times \cos \alpha +$  (A.43)  $\times \sin \alpha$  として両式の左辺第 1 項を消去すると、

$$-\cos \theta \sin \phi \sin(\beta - \alpha) + \sin \theta \cos \phi = \sin \theta_0 \cos \phi_0 \cos \alpha + \sin \phi_0 \sin \alpha \quad (\text{A.45})$$

となり、さらに (A.44)<sup>2</sup> + (A.45)<sup>2</sup> として  $\theta$  を消去すると、

$$\begin{aligned} \sin^2 \phi \sin^2(\beta - \alpha) + \cos^2 \phi \\ = 1 - \cos^2(\beta - \alpha) \sin^2 \phi = (\sin \theta_0 \cos \phi_0 \cos \alpha + \sin \phi_0 \sin \alpha)^2 + (\cos \theta_0 \cos \phi_0)^2 \end{aligned} \quad (\text{A.46})$$

となる。よって  $\phi$  は次式にて求められる。

$$\begin{aligned} \sin \phi &= \pm \frac{\sqrt{1 - (\sin \theta_0 \cos \phi_0 \cos \alpha + \sin \phi_0 \sin \alpha)^2 - (\cos \theta_0 \cos \phi_0)^2}}{\cos(\beta - \alpha)} \\ &= \pm \frac{\sin \theta_0 \cos \phi_0 \sin \alpha - \sin \phi_0 \cos \alpha}{\cos(\beta - \alpha)} \end{aligned} \quad (\text{A.47})$$

ただし、符号は  $|\phi_0 - \phi|$  が小さくなる方を選ぶ。

次に、上で求めた  $\phi$  を用いて  $\theta$  を求める。(A.44) 式で  $\tan \theta = u$  とおくと、

$$\frac{u}{\sqrt{1+u^2}} \cdot \sin \phi \sin(\beta - \alpha) + \frac{1}{\sqrt{1+u^2}} \cdot \cos \phi = \cos \theta_0 \cos \phi_0 \quad (\text{A.48})$$

となり、上式の両辺を 2 乗して整理すると、

$$\begin{aligned} [\sin^2 \phi \sin^2(\beta - \alpha) - \cos^2 \theta_0 \cos^2 \phi_0] u^2 + 2 [\sin \phi \cos \phi \sin(\beta - \alpha)] u \\ + [\cos^2 \phi - \cos^2 \theta_0 \cos^2 \phi_0] = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.49})$$

となるため、 $\theta$  は次式により求められる。

$$\begin{aligned} u = \tan \theta &= \frac{-\sin \phi \cos \phi \sin(\beta - \alpha) \pm \cos \theta_0 \cos \phi_0 \sqrt{\cos^2 \phi + [\sin \phi \sin(\beta - \alpha)]^2 - (\cos \theta_0 \cos \phi_0)^2}}{[\sin \phi \sin(\beta - \alpha)]^2 - (\cos \theta_0 \cos \phi_0)^2} \\ &= \frac{-\sin \phi \cos \phi \sin(\beta - \alpha) \pm \cos \theta_0 \cos \phi_0 (\sin \theta_0 \cos \phi_0 \cos \alpha + \sin \phi_0 \sin \alpha)}{[\sin \phi \sin(\beta - \alpha)]^2 - (\cos \theta_0 \cos \phi_0)^2} \end{aligned} \quad (\text{A.50})$$

ただし、符号は  $|\theta_0 - \theta|$  が小さくなる方を選ぶ。

なお、 $\alpha = \beta$  の場合の  $\theta$  については、(A.44) 式で  $\alpha = \beta$  とおくと、

$$\cos \theta \cos \phi = \cos \theta_0 \cos \phi_0$$

となる。よって、(A.47) 式により求めた  $\phi$  を用いて、次式により求められる。

$$\cos \theta = \frac{\cos \theta_0 \cos \phi_0}{\cos \phi} \quad (\text{A.51})$$

また、 $[\sin \phi \sin(\beta - \alpha)]^2 - (\cos \theta_0 \cos \phi_0)^2 = 0$  の場合には、(A.49) 式より、

$$u = \tan \theta = \frac{\cos^2 \theta_0 \cos^2 \phi_0 - \cos^2 \phi}{\sin \phi \cos \phi \sin(\beta - \alpha)} \quad (\text{A.52})$$

となる。



### A.2.2 正投影像の傾き

以下では、方向が  $(\theta_0, \phi_0)$  の光線の取得に必要なターンテーブルの回転角  $\theta, \phi$  の値は既知であるとする。  
(A.38) 式より、

$$\mathbf{R}_Z(-\gamma)\mathbf{M}(\theta, \phi) = \mathbf{R}_X(\phi_0)\mathbf{R}_Y(-\theta_0) \quad (\text{A.53})$$

であり、垂直な直線 ( $X = 0, Z = 0$ ) を回転する場合を考えると、

$$\mathbf{R}_Z(-\gamma)\mathbf{M}(\theta, \phi) \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \mathbf{R}_X(\phi_0)\mathbf{R}_Y(-\theta_0) \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{A.54})$$

となる。ここで、上式の第 1 成分を書き下すと、

$$m_{12}(\theta, \phi) \cos \gamma + m_{22}(\theta, \phi) \sin \gamma = 0$$

となるから、 $\gamma$  は次式により求められる。

$$\gamma = \arctan \left( -\frac{m_{12}(\theta, \phi)}{m_{22}(\theta, \phi)} \right) \quad (\text{A.55})$$

なお、 $m_{12}(\theta, \phi), m_{22}(\theta, \phi)$  は、具体的には以下のようになる。

$$\begin{aligned} m_{12}(\theta, \phi) = & \sin(\beta - \alpha) \sin \alpha \sin \beta \cos \theta \cos \phi + \cos(\beta - \alpha) \sin \alpha \cos \beta \cos \theta \\ & - \cos(\beta - \alpha) \cos \alpha \sin \beta \cos \phi + \sin \alpha \sin \beta \sin \theta \sin \phi + \sin(\beta - \alpha) \cos \alpha \cos \beta \end{aligned} \quad (\text{A.56})$$

$$\begin{aligned} m_{22}(\theta, \phi) = & -\sin(\beta - \alpha) \sin \alpha \cos \beta \cos \theta \cos \phi + \cos(\beta - \alpha) \sin \alpha \sin \beta \cos \theta \\ & + \cos(\beta - \alpha) \cos \alpha \cos \beta \cos \phi - \sin \alpha \cos \beta \sin \theta \sin \phi + \sin(\beta - \alpha) \cos \alpha \sin \beta \end{aligned} \quad (\text{A.57})$$

## 付録B

# 撮像系の誤差の許容値の算出

### B.1 $P$ の誤差の上限値

撮像系の誤差として、ターンテーブル A の回転軸の傾きのみを考える ( $\alpha \neq 0, \beta = 0, Z_b = 0$ )。このとき、(6.7) 式の  $m_{ij}(\theta, \phi)$  ( $i = 1, 2, j = 1, 2, 3$ ) は次のようになる。

$$m_{11}(\theta, \phi) = \cos^2 \alpha \cos \theta + \sin^2 \alpha \quad (\text{B.1})$$

$$m_{12}(\theta, \phi) = \cos \alpha \sin \alpha \cos \theta - \cos \alpha \sin \alpha \quad (\text{B.2})$$

$$m_{13}(\theta, \phi) = -\cos \alpha \sin \theta \quad (\text{B.3})$$

$$m_{21}(\theta, \phi) = \sin \alpha \cos \alpha \cos \theta \cos \phi - \sin \alpha \cos \alpha \cos \phi - \cos \alpha \sin \theta \sin \phi \quad (\text{B.4})$$

$$m_{22}(\theta, \phi) = \sin^2 \alpha \cos \theta \cos \phi + \cos^2 \alpha \cos \phi - \sin \alpha \sin \theta \sin \phi \quad (\text{B.5})$$

$$m_{23}(\theta, \phi) = -\sin \alpha \sin \theta \cos \phi - \cos \theta \sin \phi \quad (\text{B.6})$$

この条件の下で、2 台のターンテーブルを初期状態からそれぞれ  $\theta, \phi$  だけ回転したとき、位置  $(X, Y, Z)$  の点に移る先の  $P$  座標の誤差  $\Delta P$  は次式のようにになる。

$$\begin{aligned} \Delta P &= (X \cos \theta - Z \sin \theta) - [m_{11}(\theta, \phi)X + m_{12}(\theta, \phi)Y + m_{13}(\theta, \phi)Z] \\ &= (X \sin \alpha - Y \cos \alpha) \sin \alpha \cos \theta - Z(1 - \cos \alpha) \sin \theta - (X \sin \alpha - Y \cos \alpha) \sin \alpha \\ &= \sqrt{(X \sin \alpha - Y \cos \alpha)^2 \sin^2 \alpha + Z^2(1 - \cos \alpha)^2} \cos(\theta + \xi) - (X \sin \alpha - Y \cos \alpha) \sin \alpha \end{aligned} \quad (\text{B.7})$$

ここで、物体上の点を以下のようにおく (角度の取り方が回転角  $\theta, \phi$  と異なることに注意)。

$$X = r \cos \Theta \cos \Phi, \quad Y = r \sin \Theta \cos \Phi, \quad Z = r \sin \Phi \quad (\text{B.8})$$

このとき、 $P$  の誤差  $\Delta P$  は次式のように表される。

$$\Delta P = r \sqrt{\sin^2(\alpha - \Theta) \cos^2 \Phi \sin^2 \alpha + \sin^2 \Phi (1 - \cos \alpha)^2} \cos(\theta + \xi) - r \cos \Phi \sin(\alpha - \Theta) \sin \alpha \quad (\text{B.9})$$

$\theta$  を変数とすると、 $|\Delta P|$  が最大になるのは  $\cos(\theta + \xi) = 1$  のときで、そのときの  $|\Delta P| = |\Delta P|_M$  は、

$$|\Delta P|_M = r \sqrt{\sin^2(\alpha - \Theta) \cos^2 \Phi \sin^2 \alpha + \sin^2 \Phi (1 - \cos \alpha)^2} + r \cos \Phi \sin(\alpha - \Theta) \sin \alpha \quad (\text{B.10})$$

となる。ここで、 $|\Delta P|_M/r = D$  において  $\theta$  で微分すると、

$$\frac{\partial D}{\partial \Phi} = -\cos(\alpha - \theta) \cos \Phi \sin \alpha \left[ \frac{\sin(\alpha - \theta) \cos \Phi \sin \alpha}{\sqrt{\sin^2(\alpha - \theta) \cos^2 \Phi \sin^2 \alpha + \sin^2 \Phi (1 - \cos \alpha)^2}} + 1 \right] \quad (\text{B.11})$$

となり、これが 0 となるのは  $\cos(\theta - \alpha) = 0$  のときに限られる。よって、 $\theta$  を変数とするときの  $D$  の最大値  $D_M$  は、

$$D_M = \sqrt{\sin^2 \alpha - 2 \cos \alpha (1 - \cos \alpha) \sin \Phi} + \cos \Phi \sin \alpha \quad (\text{B.12})$$

となる。これをさらに  $\Phi$  で微分すると次式の通り。

$$\frac{\partial D_{\max}}{\partial \Phi} = -\sin \Phi \left[ \frac{2 \cos \alpha (1 - \cos \alpha) \cos \Phi}{\sqrt{\sin^2 \alpha - 2 \cos \alpha (1 - \cos \alpha) \sin \Phi}} + \sin \alpha \right] \quad (\text{B.13})$$

これが 0 になるのは  $\sin \Phi = 0$  のときに限られる。よって  $|D_M|$  の最大値は、

$$|D_M| = |\sqrt{\sin^2 \alpha} + \sin \alpha| = |2 \sin \alpha| \quad (\text{B.14})$$

となり、結局  $|\Delta P|$  は以下の関係を満たす。

$$|\Delta P| \leq |2r \sin \alpha| = \Delta P_M \quad (\text{B.15})$$

## B.2 $Q$ の誤差の上限值

2 台のターンテーブルを初期状態からそれぞれ  $\theta, \phi$  だけ回転したとき、位置  $(X, Y, Z)$  の点に移る先の  $Q$  座標の誤差  $\Delta Q$  は次式のようになる。

$$\begin{aligned} \Delta Q &= -X \sin \theta \sin \phi + Y \cos \phi - Z \cos \theta \sin \phi \\ &\quad - [m_{21}(\theta, \phi)X + m_{22}(\theta, \phi)Y + m_{23}(\theta, \phi)Z] \\ &= \{(X \cos \alpha + Y \sin \alpha)(1 - \cos \theta) + Z \sin \theta\} \sin \alpha \cos \phi \\ &\quad + \{(X \cos \alpha + Y \sin \alpha) - X\} \sin \theta \sin \phi \end{aligned} \quad (\text{B.16})$$

ここで、 $\Delta Q = A \cos(\phi + \eta)$ ,  $X \cos \alpha + Y \sin \alpha = W$  とおくと、

$$\begin{aligned} A^2 &= -\frac{1}{2} \{(W - X)^2 + (Z^2 - W^2) \sin^2 \alpha\} \cos 2\theta - WZ \sin^2 \alpha \sin 2\theta \\ &\quad - 2W^2 \sin^2 \alpha \cos \theta + 2WZ \sin^2 \alpha \sin \theta + \frac{1}{2} \{(W - X)^2 + (Z^2 - W^2) \sin^2 \alpha\} + 2W^2 \sin^2 \alpha \end{aligned} \quad (\text{B.17})$$

となり、これは少なくとも次の不等式を満たす。

$$A^2 < (W - X)^2 + (Z + W)^2 \sin^2 \alpha = A_M^2 \quad (\text{B.18})$$

$X, Y, Z$  を (B.8) 式のようにおき、 $\theta - \alpha = \psi$  とすると、上式で導入した  $A_M$  は次式のようになる。

$$\frac{A_M^2}{r^2} = (\cos \psi - \cos \theta)^2 \cos^2 \Phi + (\sin \Phi + \cos \psi \cos \Phi)^2 \sin^2 \alpha \quad (\text{B.19})$$

$\theta$  を消去して上式を整理すると、

$$\begin{aligned} \frac{A_M^2}{r^2} &= \frac{\cos \psi (1 - \cos \alpha)}{2} \sqrt{\{\cos \psi (1 - \cos \alpha) + 2 \sin \psi \sin \alpha\}^2 + 4(1 + \cos \alpha)^2 \cos(2\Phi + \rho)} \\ &\quad + \frac{1}{2} \cos \psi (1 - \cos \alpha) \{\cos \psi (1 - \cos \alpha) + 2 \sin \psi \sin \alpha\} + \sin^2 \alpha \\ &= \frac{\cos \psi (1 - \cos \alpha)}{2} \left\{ \sqrt{a^2 + 4(1 + \cos \alpha)^2} \cos(2\Phi + \rho) + a \right\} + \sin^2 \alpha \end{aligned} \quad (\text{B.20})$$

となる。ただし、 $a$  は次式により定義する。

$$a = \cos \psi (1 - \cos \alpha) + 2 \sin \psi \sin \alpha \quad (\text{B.21})$$

よって、 $A_M^2/r^2$  の最大値  $B$  は、

$$B = \frac{\cos \psi (1 - \cos \alpha)}{2} \left\{ \sqrt{a^2 + 4(1 + \cos \alpha)^2} + a \right\} + \sin^2 \alpha \quad (\text{B.22})$$

となる。これを  $\psi$  で微分すると、

$$\frac{\partial B_M^2}{\partial \psi} = \frac{1 - \cos \alpha}{2} \left\{ \sqrt{a^2 + 4(1 + \cos \alpha)^2} + a \right\} \left\{ -\sin \psi + \frac{\partial a}{\partial \psi} \cdot \frac{\cos \psi}{\sqrt{a^2 + 4(1 + \cos \alpha)^2}} \right\} \quad (\text{B.23})$$

であり、 $\psi = \psi_0$  のときに上式が 0 になるとすると、 $\psi_0$  は次式の関係を満たす。

$$\sqrt{a^2 + 4(1 + \cos \alpha)^2} = \frac{\cos \psi_0}{\sin \psi_0} \cdot \frac{\partial a}{\partial \psi} \bigg|_{\psi=\psi_0} \quad (\text{B.24})$$

これを (B.22) 式に代入すると、 $B$  の極値は次のようになる。

$$B = \frac{1}{\tan \psi_0} (1 - \cos \alpha) \sin \alpha + \sin^2 \alpha \quad (\text{B.25})$$

ここで、(B.24) 式を解くと、

$$\tan \psi_0 = \frac{\sin \alpha}{2} \text{ or } -\frac{\sin \alpha}{1 + \cos \alpha} \quad (\text{B.26})$$

となる。このうち、 $B$  が最大となるのは、

$$\tan \psi_0 = \frac{\sin \alpha}{2}$$

のときで、このときの  $B$  の値を  $B_M$  とすると、

$$B_M = \sin^2 \alpha + 2(1 - \cos \alpha) \quad (\text{B.27})$$

となる (もう一方の  $\psi_0$  のときは  $B = 0$ )。

結局、 $|\Delta Q|$  の取り得る値は以下の条件を満たす。

$$|\Delta Q| < r\sqrt{B_M} = r\sqrt{\sin^2 \alpha + 2(1 - \cos \alpha)} = \Delta Q_M \quad (\text{B.28})$$

ただし  $\Delta Q_M$  は  $|\Delta Q|$  の最大値ではない ( $|\Delta Q| = \Delta Q_M$  とはならない)。

### B.3 回転軸の傾きの許容値

A の回転軸の傾き  $\alpha$  の影響が正投影像上に現れないためには、被写体の大きさが  $r = r_M$  [画素] 以下であるとして、その  $r_M$  に対して、 $|\Delta P|, |\Delta Q|$  がいずれも 0.5 画素以内、即ち

$$\Delta P_M \leq 0.5, \quad \Delta Q_M \leq 0.5$$

の 2 式がともに成立することが必要である。ここで、 $r = r_M$  のときの  $\Delta P_M$  と  $\Delta Q_M$  の大小関係を求めると、

$$\begin{aligned} \Delta P_M^2 - \Delta Q_M^2 &= (2r_M \sin \alpha)^2 - r_M^2 [\sin^2 \alpha + 2(1 - \cos \alpha)] \\ &= -r_M^2 (3 \cos^2 \alpha - 2 \cos \alpha - 1) \\ &= -r_M^2 (3 \cos \alpha + 1)(\cos \alpha - 1) \end{aligned}$$

であるが、実際には  $|\alpha|$  は微小な値をとる (少なくとも  $|\alpha| > \pi/2$  となることはない) から、 $\cos \alpha > 0$  と考えて良い。よって、

$$\Delta P_M \geq \Delta Q_M \tag{B.29}$$

となるから、許容される  $\alpha$  の値は以下の条件を満たすものとなる。

$$|2r_M \sin \alpha| \leq 0.5 \tag{B.30}$$

## 付録 C

# 誤差計算における位置成分の 標本化の影響

### C.1 標本化の影響

以上のように、撮像系の2つのターンテーブルの回転軸の傾きやずれは、理論上は、適当に配置された基準物体を一定の角度間隔で回転しながら撮影した画像を用いて求めることができる。しかし、実際には、撮影された画像において、 $P(\theta, \phi)$ ,  $Q(\theta, \phi)$  は離散的な値をとり、正確な値との間に誤差が生じる。

具体例として、(A.24) 式により  $\beta$  を計算する場合、この式の分子  $G_1(\phi)$  は、

$$\begin{aligned} G_1(\phi) = & 2[P(\theta+\Delta\theta, \phi) + P(\theta-\Delta\theta, \phi) - 2P(\theta, \phi) \cos \Delta\theta] \\ & - [P(\theta+\Delta\theta, \phi+\Delta\phi) + P(\theta-\Delta\theta, \phi+\Delta\phi) - 2P(\theta, \phi+\Delta\phi) \cos \Delta\theta] \\ & - [P(\theta+\Delta\theta, \phi-\Delta\phi) + P(\theta-\Delta\theta, \phi-\Delta\phi) - 2P(\theta, \phi-\Delta\phi) \cos \Delta\theta] \end{aligned} \quad (C.1)$$

により計算される。この式によれば、 $\beta$  の計算に使用する画像のうちの1枚において、 $P$  の値が正確な値から  $\Delta P$  だけずれると、 $G_1(\phi)$  は少なくとも  $|\Delta P|$  の大きさの誤差を生じる。同様に、(A.24) 式の分母  $G_2(\phi)$  は、 $Q$  の値が正確な値から  $\Delta Q$  だけずれたとき、少なくとも大きさ  $|\Delta Q|$  の誤差を生じる。

$G_1(\phi)$ ,  $G_2(\phi)$  の正しい値をそれぞれ  $g_1, g_2$  とし、離散値をとる  $P(\theta, \phi)$ ,  $Q(\theta, \phi)$  から計算した  $G_1(\phi)$  の値を  $g'_1, g'_2$  とする。誤差を最も少なく見積もった場合、 $g'_1, g'_2$  はそれぞれ以下ようになる。

$$g'_1 = g_1 + \Delta P \quad (C.2)$$

$$g'_2 = g_2 + \Delta Q \quad (C.3)$$

ここで、現実に回転軸の傾きを求める場面を考えると、傾きは一見してわかるような大きなものではなく、極めて0に近いと考えられる。 $\beta$  が0に近い値のとき、 $g_1 \approx 0$  となる。ここで、

$$g_1 \Delta P < 0, \quad |g_1| < |\Delta P|$$

ならば、 $g_1$  と  $g'_1$  の符号が逆転する。即ち、実際とは逆に傾いているという計算結果となる。

$G_1(\phi)$ ,  $G_2(\phi)$  の誤差がそれぞれ  $\Delta P, \Delta Q$  のとき、 $\tan \beta$  の誤差  $D$  は次式のようにになる。

$$D = \frac{g_1 + \Delta P}{g_2 + \Delta Q} - \frac{g_1}{g_2} = \frac{g_2 \Delta P - g_1 \Delta Q}{g_2(g_2 + \Delta Q)} \quad (C.4)$$

ここで、 $g_1 \approx 0$  とすると、

$$D \approx \frac{\Delta P}{g_2} \quad (\text{C.5})$$

となる。(A.16), (A.17) 式によれば、 $G_1(\phi)$ ,  $G_2(\phi)$  の値は基準線の長さ  $X$ ,  $Y$  や、ターンテーブルの回転角の間隔  $\Delta\theta$ ,  $\Delta\phi$  の値に応じて変化する。これに対し、誤差  $\Delta P$ ,  $\Delta Q$  は、 $X$ ,  $Y$  によらず、数画素程度の大きさとなる。よって、 $\beta$  の誤差を小さくするには、 $|g_2|$  の値を大きくすれば良い。

$\alpha \approx 0$ ,  $\beta \approx 0$  とすると、 $|g_2|$  は、

$$|g_2| \approx 4(1 - \cos \Delta\theta)(1 - \cos \Delta\phi)|Y \cos \phi|$$

となる。このうち、 $\cos \Delta\theta$ ,  $\cos \Delta\phi$ ,  $\cos \phi$  の値は有限であるから、 $|g_2|$  が  $|\Delta P|$  に比べて十分大きな値となるためには、基準物体の  $Y$  を大きくする必要がある。

## C.2 計算精度を保証するための条件

$\beta$  について

離散的な  $P(\theta, \phi)$ ,  $Q(\theta, \phi)$  の値を用いて、(A.24) 式により  $\beta$  を求めることを考える。 $G_1(\phi)$ ,  $G_2(\phi)$  の正しい値をそれぞれ  $g_1$ ,  $g_2$  とし、離散化に伴う誤差をそれぞれ  $\Delta g_1$ ,  $\Delta g_2$  とする。このとき、離散的な  $G_1(\phi)$ ,  $G_2(\phi)$  は次のように表すことができる。

$$G_1(\phi) = g_1 + \Delta g_1, \quad G_2(\phi) = g_2 + \Delta g_2 \quad (\text{C.6})$$

よって、離散的な  $P(\theta, \phi)$ ,  $Q(\theta, \phi)$  の値を用いて求めた  $\beta$  の値を  $\hat{\beta}$  とすると、 $\hat{\beta}$  は次式のように表される。

$$\tan \hat{\beta} = -\frac{g_1 + \Delta g_1}{g_2 + \Delta g_2} \quad (\text{C.7})$$

ここで、 $\tan \beta$  の正しい値を  $u$  とすると、 $u$  は

$$u = -\frac{g_1}{g_2} \quad (\text{C.8})$$

により与えられるため、

$$D = \tan \hat{\beta} - u = -\frac{g_1 + \Delta g_1}{g_2 + \Delta g_2} + \frac{g_1}{g_2} = \frac{g_1 \Delta g_2 - g_2 \Delta g_1}{g_2(g_2 + \Delta g_2)} = -\frac{u \Delta g_2 + \Delta g_1}{g_2 + \Delta g_2} \quad (\text{C.9})$$

となる(ここで再度 (C.8) 式の関係を利用していることに注意)。

一方、 $\hat{\beta} = \beta + \Delta\beta$  ( $\beta$  は正しい値を意味する),  $\tan \Delta\beta = b$  とおくと、 $D$  は次の関係を満たす。

$$D = \tan(\beta + \Delta\beta) - u = \frac{u + b}{1 - bu} - u = \frac{(1 + u^2)b}{1 - bu} \quad (\text{C.10})$$

(C.9), (C.10) 式から、正しい  $\beta$  と  $\hat{\beta}$  との誤差が  $\Delta\beta$  となるような  $g_2$  ( $= \tilde{g}_2$  とする) を求めると、

$$\tilde{g}_2 = -\frac{(u \Delta g_2 + \Delta g_1)(1 - bu)}{(1 + u^2)b} - \Delta g_2 \quad (\text{C.11})$$

となる。(A.10), (A.11) 式によれば、 $|\Delta g_1|$ ,  $|\Delta g_2|$  のとり得る最大値は同じと考えて良い。その値を  $\Delta g$  とすると、上式は次のようになる。

$$\tilde{g}_2 = -\frac{(1 - b)u + (1 + b)}{b(1 + u^2)} \Delta g \quad (\text{C.12})$$

(C.12) 式は、 $\tan \beta$  の正しい値が  $u$  である場合に、 $\beta$  の正しい値に対する誤差が  $\Delta \beta$  以下となるための  $g_2$  の最小値を与える。よって、任意の  $\beta$  に対して誤差が  $\Delta \beta$  以下となるためには、 $u$  を変化させたときの  $\tilde{g}_2$  の最大値を求め、 $g_2$  をそれ以上に設定すれば良い。

(C.12) 式を  $u$  で微分すると、

$$\frac{\partial \tilde{g}_2}{\partial u} = \frac{\Delta g}{b} \cdot \frac{(1-b)u^2 + 2(1+b)u - (1-b)}{(1+u^2)^2}$$

となるから、 $\partial \tilde{g}_2 / \partial u = 0$  となる  $u$  は、

$$u = \frac{-(1+b) \pm \sqrt{2(1+b^2)}}{2b} \quad (\text{C.13})$$

である。ここで、 $b > 0$ ,  $\Delta g > 0$  とすると、 $\tilde{g}_2$  が最大値をとるのは、

$$u = \frac{-(1+b) - \sqrt{2(1+b^2)}}{2b} \quad (\text{C.14})$$

のときで、このとき  $\tilde{g}_2$  の最大値は

$$\tilde{g}_2 = \frac{-(1-b) + \sqrt{2(1+b^2)}}{2b} \Delta g \quad (\text{C.15})$$

となる。

$\phi$  について

(A.22) 式により  $\phi$  を求める場合も、上記と同様に考えることができる。

$G_2(\phi - \Delta \phi') - G_2(\phi + \Delta \phi)$  の正しい値を  $g_d$ 、離散化に伴う誤差を  $\Delta g_d$  とすると、

$$G_2(\phi - \Delta \phi') - G_2(\phi + \Delta \phi) = g_d + \Delta g_d \quad (\text{C.16})$$

となる。また  $G_2(\phi)$  については (C.6) 式のようになる。よって、離散的な  $Q(\theta, \phi)$  などの値を用いて求めた  $\phi$  の値を  $\hat{\phi}$  とし、 $\tan \phi$  の正しい値を  $t$  とすると、

$$D' = \tan \hat{\phi} - t = \frac{g_2 \Delta g_d - g_d \Delta g_2}{2g_2(g_2 + \Delta g_2) \sin \Delta \phi'} \quad (\text{C.17})$$

となる。ここで、 $|\Delta g_2|$  の最大値を  $\Delta g$  とすると、 $G_2(\phi + \Delta \phi')$ ,  $G_2(\phi - \Delta \phi')$  のそれぞれが  $\pm \Delta g$  の誤差を含む可能性があるから、 $|\Delta g_d|$  の最大値は  $2\Delta g$  となる。よって、

$$D' = \frac{2g_2 \Delta g - g_d \Delta g}{2g_2(g_2 + \Delta g) \sin \Delta \phi'} = \frac{1 - td}{(g_2 + \Delta g)d} \Delta g \quad (\text{C.18})$$

となる ( $d = \sin \Delta \phi'$ )。一方、

$$\hat{\phi} = \phi + \Delta \bar{\phi}, \quad \tan \Delta \bar{\phi} = c, \quad \tan \phi = t \quad (\text{C.19})$$

とおく (ただし  $\phi$  は正しい値を表す) と、

$$D' = \frac{(1+t^2)c}{1-ct} \quad (\text{C.20})$$

である。よって  $\tilde{g}_2$  は次式により表される。

$$\tilde{g}_2 = \left( \frac{1}{cd} \cdot \frac{cdt^2 - (c+d)t + 1}{1+t^2} - 1 \right) \Delta g \quad (\text{C.21})$$



次に  $t$  を変化させたときの  $\tilde{g}_2$  の最大値を求める。両辺を  $t$  で微分すると、

$$\frac{\partial \tilde{g}_2}{\partial t} = \frac{\Delta g}{cd} \cdot \frac{(c+d)t^2 - 2(1-cd) - (c+d)}{(1+t^2)^2}$$

となるから、 $\partial \tilde{g}_2 / \partial t = 0$  となる  $t$  は、

$$t = \frac{(1-cd) \pm \sqrt{(1+c^2)(1+d^2)}}{c+d} \quad (\text{C.22})$$

である。ここで、 $c > 0, d > 0, \Delta g > 0$  とすると、 $\tilde{g}_2$  が最大値をとるのは、

$$t = \frac{(1-cd) - \sqrt{(1+c^2)(1+d^2)}}{c+d} \quad (\text{C.23})$$

のときで、このとき  $\tilde{g}_2$  の最大値は、

$$\tilde{g}_2 = \frac{(1-cd) + \sqrt{(1+c^2)(1+d^2)}}{2cd} \Delta g \quad (\text{C.24})$$

となる。

# 発表文献

---

- [1] 竹内敬亮, 苗村 健, 金子正秀, 原島 博: “距離・色データを用いた 3 次元物体の光線データ取得”, 映像情報メディア学会誌, Vol.51, No.12, pp.2090-2096 (1997).
- [2] 竹内敬亮, 苗村 健, 原島 博: “テレセントリックレンズによる光線情報の取得”, 映像情報メディア学会誌, Vol.54, No.10, pp.1474-1477 (2000).
- [3] 竹内敬亮, 金子正秀, 原島 博: “レンジデータに基づく光線空間の構築”, 1996 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, D-301 (1996).
- [4] 竹内敬亮, 苗村 健, 金子正秀, 原島 博: “複数の距離画像の光線に基づく統合における輝度値決定法”, 1997 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, D-11-69 (1997).
- [5] 山崎 貴, 竹内敬亮, 苗村 健, 原島 博: “QuickTime VR オブジェクトムービーからの光線情報取得”, 1998 年電子情報通信学会総合大会, D-11-194 (1998).
- [6] 竹内敬亮, 苗村 健, 原島 博: “3 次元空間の光線情報記録方式における離散化の影響”, 映像情報メディア学会年次大会, 16-9 (1998).
- [7] 竹内敬亮, 苗村 健, 原島 博: “テレセントリックレンズを用いた光線情報の取得”, 1999 年電子情報通信学会総合大会, D-11-146 (1999).
- [8] 新田拓哉, 竹内敬亮, 苗村 健, 原島 博: “高精細全周実写画像を用いた没入型ウォークスルー”, 日本バーチャルリアリティ学会第 4 回大会, 14A2 (1999.9)
- [9] 竹内敬亮, 金子正秀, 原島 博: “レンジデータに基づく光線情報の記述と取得”, 画像電子学会第 152 回研究会講演予稿, 96-02-03 (1996).
- [10] 竹内敬亮, 金子正秀, 原島 博: “レンジデータに基づく 3 次元物体の光線情報取得—オブジェクト位置の補正と垂直視差情報の記録”, 画像符号化シンポジウム (PCSJ'96), P-3-22 (1996).
- [11] 竹内敬亮, 金子正秀, 原島 博: “複数の距離画像を用いた光線空間における欠損情報の補間”, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU96-125 (1996).
- [12] 竹内敬亮, 石川彰夫, 苗村 健, 金子正秀, 原島 博: “光線情報表現による距離画像と多眼画像の融合”, 3 次元画像コンファレンス'97, 5-5, pp.150-155 (1997).
- [13] 竹内敬亮, 苗村 健, 金子正秀, 原島 博: “全周型ディスプレイへの実空間情報の表示”, 映像メディア処理シンポジウム (IMPS'97), I-6.9 (1997).
- [14] 竹内敬亮, 苗村 健, 原島 博: “画像情報と光線情報の相互変換における可逆性”, 電子情報通信学会技術研究報告, IE98-25 (1998).

- [15] 竹内敬亮, 苗村 健, 原島 博: “多眼画像と光線情報の可逆な相互変換のための光線標本化”, 映像メディア処理シンポジウム (IMPS'98), I-5.11 (1998).
- [16] 竹内敬亮, 苗村 健, 原島 博: “3次元物体の光線記述のためのテレセントリック撮像系”, 電子情報通信学会技術報告, OFS2000-36 (2000).
- [17] K. Takeuchi, M. Kaneko and H. Harashima: “Acquisition of Object-based Ray Data for Integrated 3-D Visual Communication”, PCS'97, pp.681-686 (1997).
- [18] K. Takeuchi, T. Naemura and H. Harashima: “Mutual Conversion between 3-D Images and Light Rays”, Visual Communication and Image Processing, Proceedings of SPIE, Vol.3653, pp.1341-1352 (1999).
- [19] K. Takeuchi, T. Naemura and H. Harashima: “Acquisition of Light Rays using Telecentric Lens”, Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP-99), Vol.III, pp.943-947 (1999).

## 謝辞

---

本論文の研究を進めるにあたり、適切な御指導と御指示を頂きました原島博教授に厚く御礼を申し上げます。そして、数々の有益な御助言を頂きました苗村健講師、ならびに電気通信大学の金子正秀助教授に深甚なる謝意を表します。

また、原島・苗村研究室の田中崇助手、松尾達郎元技官ならびに秘書の方々、諸先輩・後輩の方々には研究活動のみならず公私両面にわたってお世話になりました、ここに深く感謝の意を表します。

さらに、株式会社エム・アール・システム研究所の片山昭宏博士、名古屋大学の藤井俊彰博士には、学会活動を通じて数々の御教示を頂きました。共信電気株式会社の高橋喜彦氏、株式会社 SFC の橋口克幸氏には、撮像系の製作に御協力頂きました。そのほか多数の方々の御協力により、本論文をまとめることができました。皆様に心より感謝致します。