

NAIST-IS-MT9551065

修士論文

HyperOmni Vision を用いた全方位ステレオ視 による 3 次元情報の獲得

茶園 篤

1997年2月14日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報システム学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

茶園 篤

指導教官： 横矢 直和 教授
千原 國宏 教授
竹村 治雄 助教授

HyperOmni Vision を用いた全方位ステレオ視 による 3 次元情報の獲得*

茶園 篤

内容梗概

周囲の 3 次元環境を理解するには、全方位の奥行き情報ならびに高さ情報といった 3 次元情報を獲得する必要がある。本論文では、観測対象に何ら影響を与えず、測定対象を制限することなく全方位の 3 次元情報を獲得する手法を提案する。提案手法では、入力画像を得るために、双曲面ミラーを用いた全方位視覚センサとして提案されている HyperOmni Vision を用いる。また、画像から 3 次元情報を獲得するために、画像間の対応関係と三角測量の原理から距離情報を獲得できる両眼ステレオ視を適用する。まず、HyperOmni Vision を垂直方向に高さの異なる位置に配置し、全方位ステレオ画像を取得する。次に、得られた全方位ステレオ画像に対して両眼ステレオ視を適用し、画像間の対応関係を求めることで全方位の 3 次元情報を獲得する。最後に、実画像を用いた実験により提案手法の有効性を検証し、得られた 3 次元情報から両眼ステレオ画像を作成した例を示す。

キーワード

HyperOmni Vision, 全方位ステレオ視, 奥行き抽出, ロボットビジョン, 人工現実感

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT9551065, 1997年2月14日.

Acquisition of Three-dimensional Information by Omnidirectional Stereo Using HyperOmni Vision*

Atsushi Chaen

Abstract

To recognize the whole three-dimensional environments, it is necessary to obtain depth and height information that are called three-dimensional information. In this thesis, an omnidirectional stereo method is presented, which can obtain three-dimensional information simultaneously in all direction. The method first takes a pair of omnidirectional images at different heights using the omnidirectional sensor, HyperOmni Vision, and then detects corresponding points between the pair of images and obtains three-dimensional information simultaneously in all direction. Experimental results show the feasibility of the proposed method with real omnidirectional images. This thesis also shows the computation of common horizontal binocular stereo images from a pair of omnidirectional images.

Keywords:

HyperOmni Vision, omnidirectional stereo, depth extraction, robot vision, augmented reality

*Master's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT9551065, February 14, 1997.

目次

1. はじめに	1
2. 関連研究と本研究の方針	3
2.1 全方位視覚センサ	3
2.2 ステレオ視	6
2.3 本研究の方針	8
3. 全方位視覚センサ HyperOmni Vision	10
3.1 HyperOmni Vision の特徴	10
3.2 全方位画像の特徴	12
4. 全方位ステレオ視	15
4.1 全方位ステレオ画像の取得	15
4.2 全方位ステレオ画像間の関係	16
4.3 テンプレートマッチングによる対応点探索	19
4.4 テンプレートマッチングの評価関数	22
4.5 3次元情報の獲得	22
5. 実験および考察	26
5.1 実験条件	26
5.2 実験結果	26
5.2.1 視差抽出結果	26
5.2.2 3次元情報獲得結果	28
5.3 考察	31
6. 両眼ステレオ画像表示への応用	33
7. むすび	36
謝辞	37

目 次

2.1	全方位視覚センサの視野領域	4
2.2	標準ステレオ撮像系	6
3.1	全方位視覚センサ HyperOmni Vision	11
3.2	3次元空間内の点 P と写像点 p との関係	13
3.3	全方位画像の例	13
3.4	写像点の方位と実対象の方位の関係	14
3.5	通常のカメラ画像 (左) と全方位画像 (右) との関係	14
4.1	全方位画像の取得に関する考察	17
4.2	全方位画像間関係	18
4.3	極座標表現	18
4.4	全方位画像上の対応点間関係	19
4.5	実画像を用いた全方位画像上での対応関係の例	20
4.6	対応点探索範囲	21
4.7	3次元ワールド座標系の設定	23
5.1	全方位ステレオ画像	27
5.2	全方位視差画像	28
5.3	全方位奥行き画像	29
5.4	全方位高さ画像	29
5.5	透視投影画像	30
5.6	奥行き画像	30
5.7	高さ画像	31
6.1	双曲面ミラー焦点から3次元空間内の点 P までの直線距離の関係	34
6.2	両眼視差画像	34
6.3	両眼視差を基に作成した両眼ステレオ画像	35

表 目 次

5.1	HyperOmni Vision のパラメータ値	28
6.1	両眼ステレオ画像作成に用いたパラメータ値	33

1. はじめに

ロボットのナビゲーションや遠隔地における操作支援などを行なう上で、全方位の3次元環境を理解する必要性が高まってきている。全方位の3次元環境を理解するためには、観測地点の周囲360度において観測対象の奥行き情報、高さ情報といった3次元情報を獲得しなければならない。しかし、全方位の3次元情報を獲得する手法は確立されておらず、獲得手法の確立が望まれている。全方位の3次元情報を獲得するには、各方向で順に情報を獲得していくことも考えられるが、この方法では全方位の3次元情報を獲得するまでに時間を必要とする。よって、リアルタイムで全方位の3次元情報を獲得するなどの拡張は困難である。そのため、全方位で画像などの情報をセンサにより同時に取得し、センサで取得した情報から観測地点の周囲の3次元情報を同時に獲得する方が望ましい。従来、全方位の環境情報の取得に関する研究、ならびに3次元情報の獲得手法に関する研究は、それぞれ独立なものとして研究されてきているため、以下では、これらの研究についてそれぞれ概略を述べる。

ロボットビジョンの分野で、ロボットの周囲360度の画像を同時に取得できる全方位視覚センサの研究が盛んに行なわれている。ロボットのナビゲーションを行なう際には、ロボットの周囲の状況を理解し、適切な判断を行なう必要がある。そのためには、ロボットにセンサを搭載して、センサからの情報をもとに自律移動しなければならない。センサの中でも、視覚センサは画像で情報を取得できるため、ロボットの周囲の状況を知る上で有効なセンサとして注目されている。しかし、従来の視覚センサは、標準レンズを取り付けたカメラが多く利用されているために、観測視野がレンズの画角により限定され、環境全体の画像を同時に取得することが困難という問題点がある。この問題を解決するために、観測位置において周囲360度の画像を同時に取得できるさまざまな全方位視覚センサが提案されている。例えば、カメラを回転する方法 [1]、球面や双曲面などのミラーを用いる方法 [2-5] などである。

これら全方位視覚センサにより、視覚センサを中心にした全方位の画像を同時に得ることはできるが、得られる画像は環境の3次元情報を表しているわけではない。よって、得られる画像から3次元情報を獲得する手段が必要となる。

このための3次元情報獲得の手段としては、環境中の観測対象に光などのエネルギーを照射することで3次元情報を獲得する能動的手法と、環境中の観測対象に何ら影響を与えることなく、得られるカメラ画像のみから3次元情報を獲得する受動的手法がある [6]. 受動的手法の代表にステレオ視がある. 本研究では、測定対象を制限することなく3次元情報を獲得するためにステレオ視を用いる. ステレオ視は、画像の入力が容易、自然光での3次元情報の獲得が可能などの理由から、数多くの研究がなされている [7-22]. ステレオ視を適用することで、画像のみから3次元情報を獲得することが可能である.

本論文では、周囲の3次元環境を理解するために、全方位の3次元情報を同時に獲得する手法を提案する. 本手法では、観測領域ならびに光学系の特性から、全方位視覚センサとして提案されている HyperOmni Vision [4] を用いて垂直方向に高さの異なる位置で全方位画像を取得し、得られた全方位ステレオ画像間で対応点探索を行なうことにより全方位の3次元情報を同時に獲得する [23, 24]. 本手法は、環境中の観測対象の方位角、ならびに奥行き情報、高さ情報といった3次元情報を同時に求めることができる.

以下、2章では、関連研究ならびに本研究の方針について述べる. 3章では、画像を取得するために用いる全方位視覚センサ HyperOmni Vision について述べる. 4章では、全方位ステレオ画像ならびに提案手法である全方位ステレオ視による3次元情報の獲得について述べる. 5章では、実画像を用いた実験について述べる. 6章では、提案手法により得られた3次元情報から、両眼ステレオ画像を提示する応用例について述べる. 最後に、7章では、本論文のまとめとして、結論と今後の課題について述べる.

2. 関連研究と本研究の方針

全方位の3次元情報を獲得することは、周囲の環境を理解することが必要なロボットのナビゲーションや、遠隔地における操作支援などを行なう上で有用である。周囲の3次元環境を理解するには、ロボットなどの全方位において対象の奥行き、高さ情報といった3次元情報を獲得する必要がある。

本研究では、全方位の3次元情報を獲得するために、全方位視覚センサを用いて全方位の画像を同時に取得し、測定対象を制限することなく全方位の3次元情報を同時に獲得するためにステレオ視を適用する。

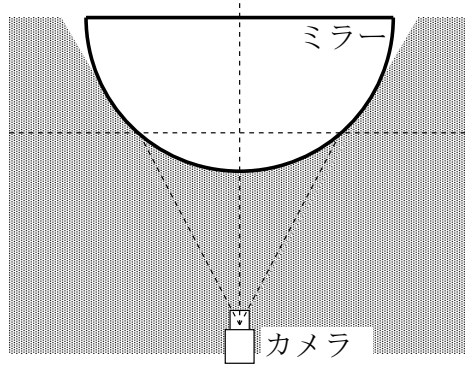
以下では、本研究で画像を取得するために用いる全方位視覚センサに関する研究、3次元情報を獲得する手法であるステレオ視に関する研究、ならびに本研究の方針について述べる。

2.1 全方位視覚センサ

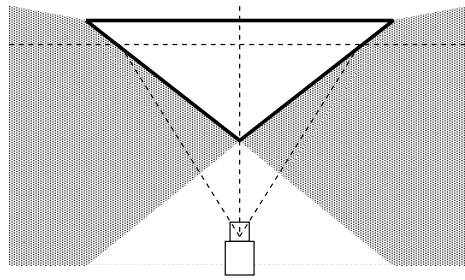
ロボットビジョンの分野で視覚センサに関する研究が盛んに行なわれてきている [6]。視覚センサは観測地点からの画像が直接取得できるため、周囲の状況を知る上で有効なセンサとして有望視されている。その中でも、観測地点における全方位の画像を同時に取得することができる、全方位視覚センサが注目されている。これまで、さまざまな全方位視覚センサが提案されているので、以下に代表的な研究をあげる。

- カメラを回転する方法 [1].

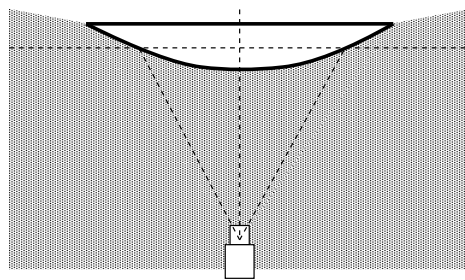
通常のカメラ1台を回転させることで、全方位画像(パノラマ画像)を得る方法である。この方法は、後に述べる全方位視覚センサに比べて、全方位で高い解像度の画像を取得することができるが、全方位の3次元環境を撮影するのに時間がかかるために、全方位の3次元情報をリアルタイムで同時に獲得するなどの拡張には不向きである。また、カメラを回転させる方法では全方位の画像が取得できるが、円筒系のパノラマ画像領域しか得られない。



(a) 球面ミラー



(b) 円錐ミラー



(c) 双曲面ミラー

▨ : 視野領域

図 2.1 全方位視覚センサの視野領域

- 球面ミラーを用いる方法 [2].

図 2.1(a) から分かるように，球面ミラーを鉛直下向きに取り付け，鉛直上向きに取り付けたカメラで球面ミラーに写った環境を下から撮る方法である．この方法は，下方半球を同時に撮影することができる．しかし，画像中にカメラ自身の写り込みや床面を多く含むので，環境を理解する上で重要である側方領域の情報はあまり得られないという欠点がある．

- 円錐ミラーを用いる方法 [3].

図 2.1(b) から分かるように，鉛直下向きの円錐ミラーと鉛直上向きに取り付けたカメラで構成されている．この方法は，側方領域の情報を多く含んだ画像が得られる．しかし，足元の情報を得るにはミラーとレンズの関係(光学系)を十分に考慮する必要がある．

- 双曲面ミラーを用いる方法 [4].

図 2.1(c) から分かるように，鉛直下向きの双曲面ミラーと鉛直上向きに取り付けたカメラで構成される．この方法は，側方領域の情報を多く含み，さらに，足元の情報も含んだ画像が得られる．

カメラを回転させる方法と双曲面ミラーを用いる方法以外の全方位視覚センサは，光学系の特性が透視射影ではない．このために，既存の画像処理の手法をそのまま適用することができない．これに対して，双曲面ミラーを用いる全方位視覚センサは，通常のカメラと同様に光学系の特性が透視射影であるため，既存の画像処理の手法を適用できる．

本研究では，全方位の画像を取得するために，双曲面ミラーを用いた全方位視覚センサとして提案されている HyperOmni Vision[4] を利用する．これにより，以下の利点が得られる．

- 全方位の画像を同時に取得できる．
- 画像中に側方領域の情報を多く含んでいる．
- 既存の画像処理の手法を適用できる．

2.2 ステレオ視

両眼ステレオ視は、左右一対のカメラにより撮影された画像 (両眼ステレオ画像) をもとにして、三角測量の原理から環境中の観測対象への奥行き情報を獲得する手法である。この手法は、レーザ光などを観測対象に照射する能動的な手法とは異なり、観測対象に何ら影響を与えることなく、2 台の通常のカメラのみで距離情報を獲得することができる。また、自然光での距離情報の獲得が可能なので、通常の室内環境、屋外環境を問わず利用できる最も汎用的な手法である。

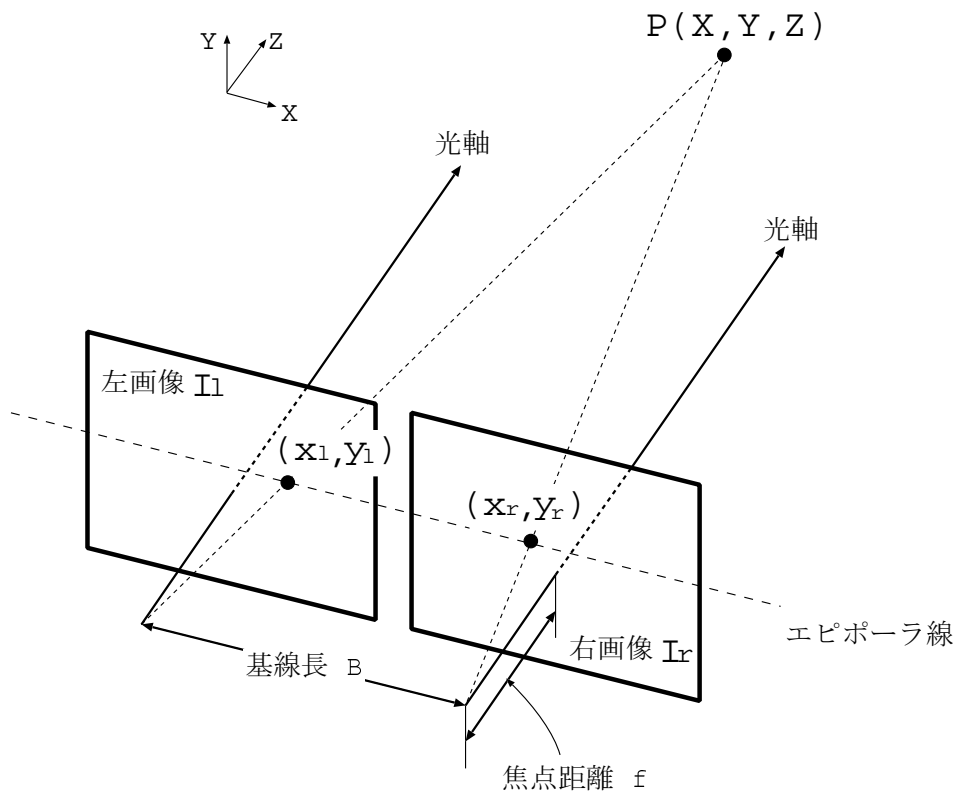


図 2.2 標準ステレオ撮像系

図 2.2に示すように、左右のカメラの光軸が平行な標準ステレオ撮像系を考える。対象となる 3 次元環境はそれぞれの画像平面に焦点距離 f で透視投影される。左右のカメラ中心を結ぶ線分を基線 (長さを基線長 B という)、この基線を含む

任意の平面をエピポーラ面，エピポーラ面と画像平面との交線をエピポーラ線と呼ぶ。

ここで，3次元環境の世界座標系の原点を2つのカメラレンズ中心の中点に， X 軸を基線と平行な方向に， Y 軸を基線と光軸に垂直な方向に， Z 軸を光軸方向に設定する．3次元環境中の点 $P(X, Y, Z)$ が，左右画像平面の $(x_l, y_l), (x_r, y_r)$ に現れたとすると，点 P の座標 (X, Y, Z) は式(1)で与えられる．このとき，標準ステレオ撮像系では，右画像の注目点 (x_r, y_r) に対する左画像の対応点 (x_l, y_l) の位置は，右画像上で見える位置よりも必ず右方向にあり $(x_l > x_r)$ ，対応するエピポーラ線上にある $(y_l = y_r)$ ．これをエピポーラ拘束と呼ぶ．注目点と対応点間の位置ずれ $x_l - x_r$ を両眼視差と呼ぶ．

$$\left. \begin{aligned} X &= B \frac{(x_l + x_r)/2}{x_l - x_r} \\ Y &= B \frac{(y_l + y_r)/2}{\frac{x_l - x_r}{y_r}} \\ &= B \frac{y_r}{x_l - x_r} \\ Z &= B \frac{f}{x_l - x_r} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)に示したように，3次元環境中の点 $P(X, Y, Z)$ は，左右のステレオ画像に対する各写像点の座標から求めることができる．よって，両眼ステレオ視により3次元位置を求めるためには，右の画像中の点が左画像のどこに対応しているかを求める，対応点探索を行なわなければならない．基線長 B ならびに焦点距離 f は既知であるとする．エピポーラ拘束が成立しているため，右画像の注目点 (x_r, y_r) に対する左画像の対応点 (x_l, y_r) は，エピポーラ線上でテンプレート・マッチングを行なうことにより求めることができる．つまり，エピポーラ線上で式(2)を計算し，この最小自乗誤差和(SSD :Sum of Squared Differences)の値が最小となる部分を対応点とすればよい．ここで， $I_l(i, j), I_r(i, j)$ は左右画像上の点 (i, j) での輝度値とし，探索窓を W とする．

$$SSD(x_r, y_r; x_l) = \sum_{i, j \in W} \{I_l(x_l + i, y_r + j) - I_r(x_r + i, y_r + j)\}^2 \quad (2)$$

しかし，式(2)を用いた方法では画像中のエッジやテクスチャのはっきりした部

分でしか正確な対応を求めることができないことが多い。このために、従来からさまざまな方向で研究がなされている [10]。対応点を求める際に、ある適切な拘束条件を用いて解を導き出す正則化 [25, 26] の枠組を用いる手法 [8, 9, 14, 20] や、対応点探索を一種の最適化問題と考え動的計画法の枠組で解を導き出す手法 [7, 18]、適応型窓を用いる手法 [16, 17, 19] など他にも多くの手法がある [11–13, 15, 21, 22]。

2.3 本研究の方針

前述したように、全方位視覚センサの研究、ならびにステレオ視の研究が行なわれている。しかしながら、全方位の 3 次元情報を同時に獲得する手法は確立されていない。本研究においては、周囲の 3 次元環境を理解するために、全方位の 3 次元情報を同時に獲得することを目的とする [23, 24]。

全方位の 3 次元情報を獲得する手法に、通常のカメラを回転させることによって全方位のパノラマ画像を取得し、得られた複数のパノラマ画像間でステレオ視を行なう手法が提案されている [27]。しかしながら、この手法では 3 次元環境の撮影に時間を必要とする上に、円筒系のパノラマ画像領域でしか 3 次元情報を得ることができない。さらに、リアルタイムで対応点探索を行ない 3 次元情報を獲得するようなシステムへの拡張には不向きである。

本研究では、今後のリアルタイム処理への拡張性、測定対象の制限を考慮し、以下の方針で全方位の 3 次元情報を獲得する手法を提案する。

- 全方位視覚センサ HyperOmni Vision による画像の取得。

全方位視覚センサを用いることにより、全方位の画像を同時に取得することができる。これにより、将来のリアルタイム処理への拡張が望める。HyperOmni Vision に関しては、3章で述べる。

- ステレオ視による 3 次元情報の抽出。

式 (2) に示した基本的なステレオマッチングの手法を、全方位画像に対して適用する。基本的なステレオ視の手法が適用できれば、将来的に従来研究を用いた手法の改良を行なうことができると考えられる。ステレオ視を適用することで、観測対象に何ら影響を与えることなく、測定対象を制限

されずに，画像のみから全方位の3次元情報を獲得できる．ステレオ視の適用に関しては，4章で述べる．

3. 全方位視覚センサ HyperOmni Vision

HyperOmni Vision は双曲面ミラーを用いた全方位視覚センサであり [4]，センサの周囲 360 度の画像を一度に取得することができる．また，環境の理解に有用な側方領域の情報が多く得られると同時に足元領域の情報も得られるという特徴を持っている．さらに，他の全方位視覚センサとは異なり，光学系の特性が透視射影であり既存の画像処理手法を適用できる．以下では，HyperOmni Vision の特徴，ならびに得られる全方位画像の特徴について述べる．

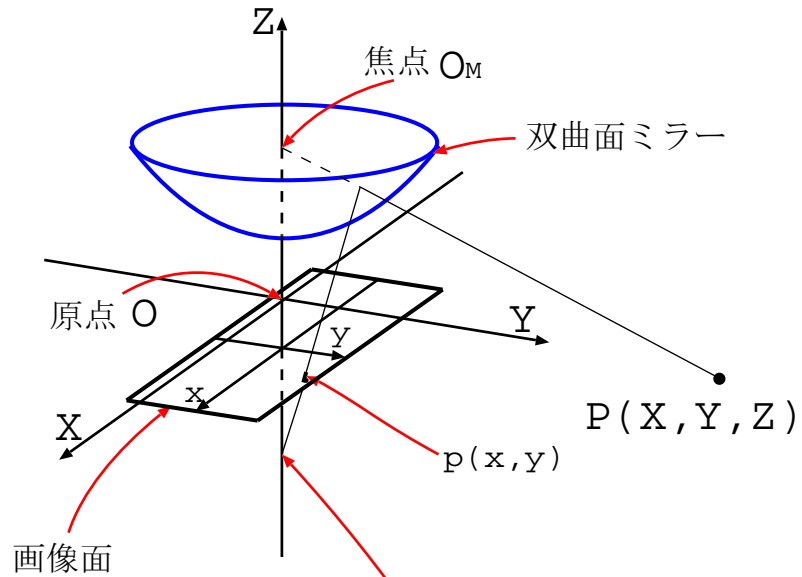
3.1 HyperOmni Vision の特徴

図 3.1 に HyperOmni Vision の光学系の構成および外観を示す．HyperOmni Vision は双曲面に回転 2 葉双曲面を用いており，図 3.1(a) のように 2 焦点 O_M, O_C を持っている．双曲面ミラーの外側にある焦点 O_C にカメラのレンズ中心を設定する．このとき，カメラは 2 焦点 O_M, O_C を通る Z 軸上で鉛直上向きに取り付けている．図 3.1(a) に示すように Z 軸を鉛直軸とする 3 次元ワールド座標系を考える．このとき，双曲面ミラーの面，双曲面ミラーの焦点 O_M ，ならびにカメラのレンズ中心 O_C は次式で表せる (双曲面ミラーの各パラメータ a, b, c は図 3.2 参照)．

$$\left. \begin{array}{l} \text{ミラー面} \quad \quad \quad : \frac{X^2 + Y^2}{a^2} - \frac{Z^2}{b^2} = -1 \quad (Z > 0) \\ \text{ミラー焦点 } O_M \quad \quad : (0, 0, +c) \quad \quad \quad (c = \sqrt{a^2 + b^2}) \\ \text{カメラレンズ中心 } O_C \quad : (0, 0, -c) \end{array} \right\} \quad (3)$$

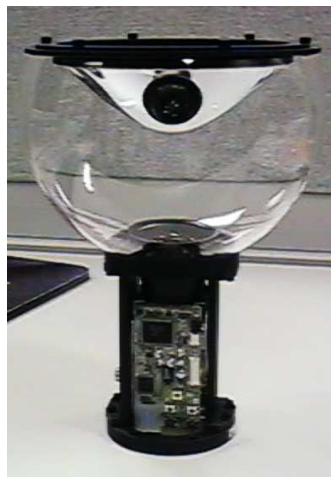
ただし， a, b, c : 双曲面ミラーのパラメータ

カメラのレンズ中心を焦点 O_C に設定することで，2 葉双曲面の特性により以下の関係が成立する．内側の焦点 O_M に集まる像は双曲面ミラーを介して，外側の焦点 O_C に集まる．よって，双曲面ミラーによって画像は反転するが，双曲面ミラーの内側の焦点 O_M から観測領域の対象を双曲面上に透視投影した画像が得られることになる．なお，得られる全方位画像の特徴については 3.2 節で述べる．



焦点 O_C : カメラレンズ中心を設定

(a) 光学系の構成



(b) HyperOmni Vision の外観

図 3.1 全方位視覚センサ HyperOmni Vision

双曲面ミラーの焦点 O_M とカメラのレンズ中心 O_C との関係ならびに双曲面の特性により，双曲面ミラーの焦点 O_M から 3次元環境中の点 $P(X, Y, Z)$ と全方位画像上の写像点 $p(x, y)$ の間には式 (4) の関係が成立する (図 3.2, 図 3.4).

$$\left. \begin{aligned} Z &= \sqrt{X^2 + Y^2} \tan \alpha + c \\ \alpha &= \tan^{-1} \frac{(b^2 + c^2) \sin \gamma - 2bc}{(b^2 - c^2) \cos \gamma} \\ \gamma &= \tan^{-1} \frac{f}{\sqrt{x^2 + y^2}} \\ \theta &= \frac{Y}{X} = \frac{y}{x} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ただし, b, c : 双曲面ミラーのパラメータ

α : ミラー焦点と点 P との伏角

γ : カメラレンズ中心と画像平面上の写像点 p との角

θ : 点 P の方位角

3.2 全方位画像の特徴

HyperOmni Vision を用いて得られる全方位画像の例を図 3.3 に示す. 図 3.3 から分かるように, HyperOmni Vision のカメラを中心にして周囲 360 度の 3次元環境の画像が取得できている. 得られる画像は, 側方領域の情報を多く含んでいるだけでなく, 画像中心部のカメラ自身の写り込みを除いた足元の情報も含んでいる. この全方位画像の特徴として, HyperOmni Vision の 2 焦点 O_M, O_C を通る Z 軸から 3次元環境中の対象物体への方位が, Z 軸上にある画像中心から全方位画像上の写像位置への方位と一致するという点があげられる (図 3.4, 式 (4)). さらに, 得られる全方位画像は光学系の特性により, 双曲面ミラーの焦点 O_M から双曲面上への透視投影画像となっている. そのため, 画像の幾何学的変換により O_M から任意方向を眺めた画像 (通常のカメラにより得られる画像) を切り出すことができる.

全方位画像と通常のカメラから得られる画像との関係は図 3.5 のようになる. 図 3.5 の左側の画像が通常のカメラから得られる画像で, 右側の画像が全方位画像で

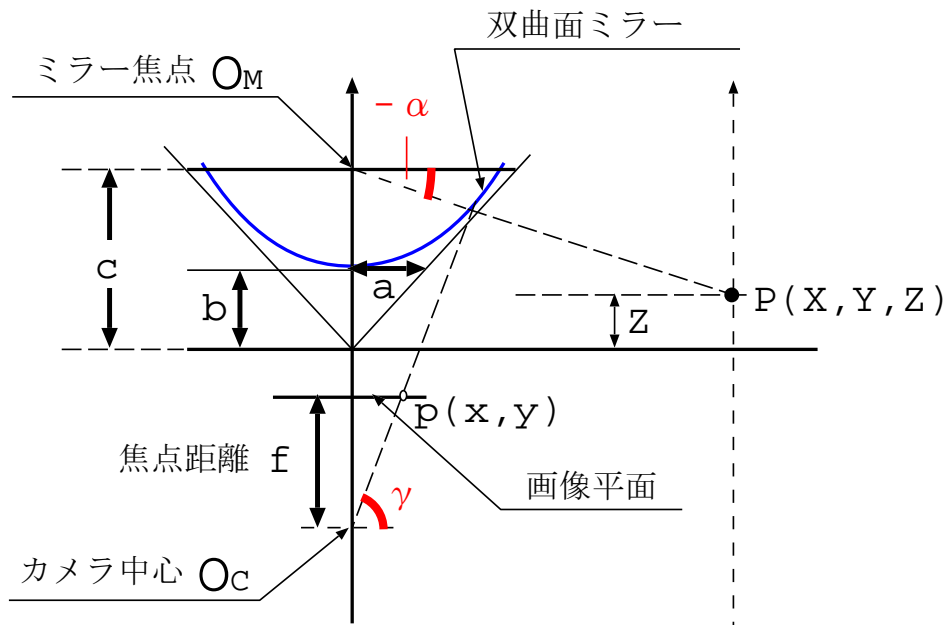


図 3.2 3次元空間内の点 P と写像点 p との関係



図 3.3 全方位画像の例

ある。このとき，図 3.5 から分かるように，全方位画像の中心からの半径により表現される各々の円が通常のカメラから得られる画像の x 軸方向に，また画像中心から伸びる放射線が y 軸方向に相当するという関係がある。

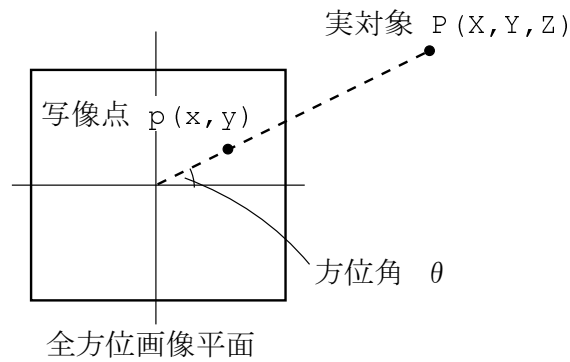


図 3.4 写像点の方位と実対象の方位の関係

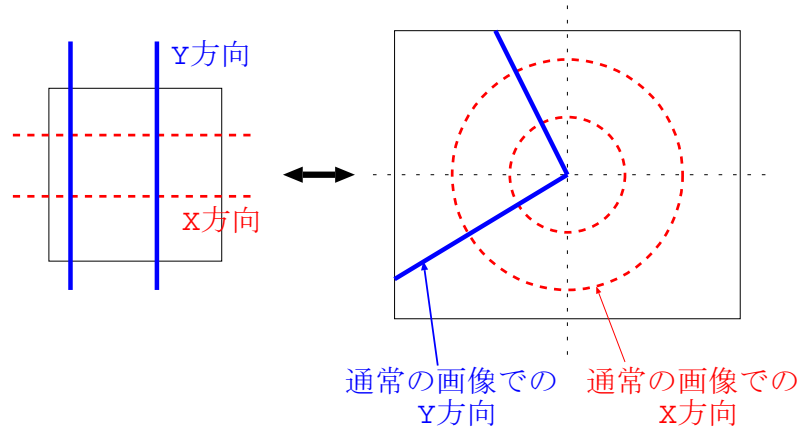


図 3.5 通常のカメラ画像 (左) と全方位画像 (右) との関係

4. 全方位ステレオ視

本章では、提案手法である全方位ステレオ視について述べる。本手法は、HyperOmni Vision を用いて得られた全方位ステレオ画像間において対応点探索を行ない、全方位での視差を抽出することで観測対象の3次元情報を獲得する手法である。以下では、全方位ステレオ画像の取得方法、全方位ステレオ画像上の対応点間の関係、全方位の視差を抽出するための対応点探索手法、対応点探索に関する評価関数の定義、得られた全方位の視差と3次元情報の関係について順に述べる。

4.1 全方位ステレオ画像の取得

本研究の目的は、全方位の3次元情報を獲得することである。全方位の3次元情報を獲得するには、全方位で対応関係が求まる全方位ステレオ画像を取得しなければならない。

全方位ステレオ画像を取得するには、全方位視覚センサ HyperOmni Vision を水平方向に配置する方式と垂直方向に配置する方式が考えられる。図 4.1 から分かるように、水平方向に配置した場合、全方位ステレオ画像間で対応関係が求まる領域がかなり制限される。そのために、全方位の3次元情報を同時に求めることは困難である。また、水平方向に配置することで、対応関係が求まる領域においても、観測対象の3次元位置が決定しないと対応点間の関係が定められないという問題がある。そのために、探索ラインの設定や探索領域の設定が困難になり、対応関係を求める上で適切な配置とはいえない。

垂直方向に配置した場合は、上に配置する HyperOmni Vision に下側の HyperOmni Vision が写り込むために、全方位画像の中心部において対応関係を求められない領域が存在する。しかし、画像の中心部分を除けば全方位において対応関係を求めることが可能な全方位ステレオ画像を取得できる。また、HyperOmni Vision を垂直方向に配置することで、対応点探索も直線上で行なえる利点がある。この利点は、3.2節で述べた全方位画像と通常のカメラから得られる画像との関係から導くことができる。HyperOmni Vision を垂直方向(図 3.1(a) の Z 軸方向)

に配置し高さの異なる位置で2枚の全方位画像を取得することで、全方位ステレオ画像の画像中心からの放射線上でエピポーラ拘束を成立させることが可能となる。放射線上でエピポーラ拘束が成立することにより、全方位ステレオ視における対応点探索を直線上で効率的に行なうことが可能となる。これは通常のカメラを垂直方向に配置し2枚の画像を取得する縦方向の両眼ステレオ視に相当する。

以上の点から、本研究においては、HyperOmni Vision を高さの異なる位置で垂直方向に配置することにより全方位ステレオ画像を取得する。

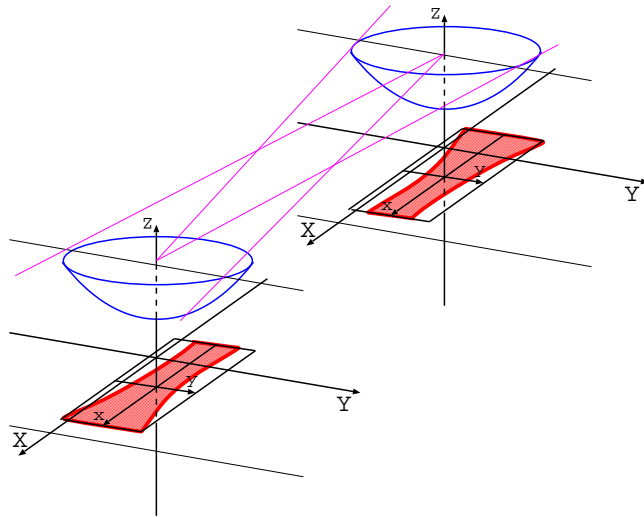
4.2 全方位ステレオ画像間の関係

次に、4.1節で述べたように高さの異なる位置で取得される全方位ステレオ画像間の関係を考える。全方位ステレオ画像を取得する際のHyperOmni Vision の位置関係を図4.2に示す。相対的に低い位置で取得される全方位画像を I_l 、高い位置で取得される全方位画像を I_u とする。以下では、全方位画像上での写像点 p を画像中心からの半径 r ならびに写像点が存在する放射線のなす方位角 θ を用いて極座標 $p(r, \theta)$ で表現する(図4.3)。

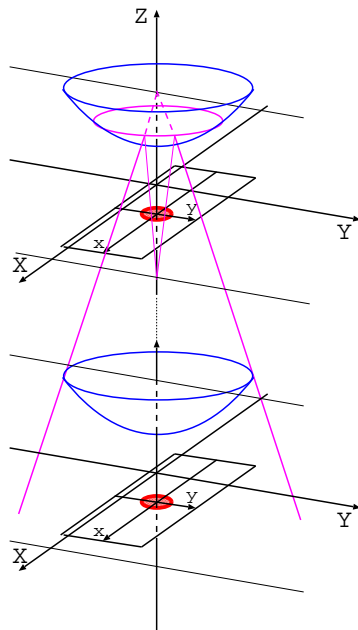
4.1節で述べたように、全方位ステレオ画像間では画像中心から伸びる放射線上でエピポーラ拘束が成立しているので、3次元環境中の点 $P(X, Y, Z)$ の全方位画像 I_l, I_u 上に対する写像点は同一の方位角 θ を持つ。このとき、全方位画像上での写像点の座標をそれぞれ $p_l(r_1, \theta)$ 、 $p_u(r_2, \theta)$ とすると、式(5)の関係が得られる。 d は全方位画像上での位置ずれを表す視差である。

$$r_2 = r_1 - d \quad (5)$$

式(5)ならびに図4.2から分かるように、3次元環境中の同一対象が全方位画像 I_u 上に写像される位置は、全方位画像 I_l 上に写像される位置よりも画像中心に近い内側の位置にある。つまり、3次元環境中の同一対象物体が写像される際の画像中心からの半径は、全方位画像 I_u 上の方が全方位画像 I_l 上に比べて必ず小さいという関係にある($r_2 < r_1$) (図4.4)。例として、実際にHyperOmni Visionにより撮影した実画像を用いて、全方位画像上での対応点の関係を示したものを図4.5に示す。このように、下側の全方位画像 I_l 上の注目点 $p_l(r_1, \theta)$ に対する、上側



水平方向に配置した場合



■ 対応不可能領域

垂直方向に配置した場合

図 4.1 全方位画像の取得に関する考察

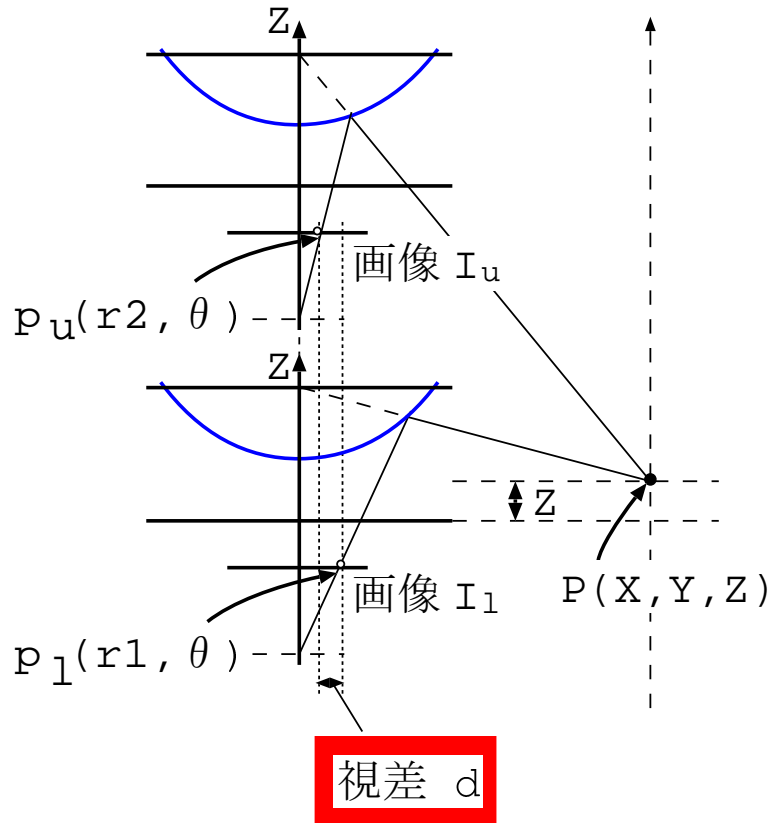


図 4.2 全方位画像間の関係

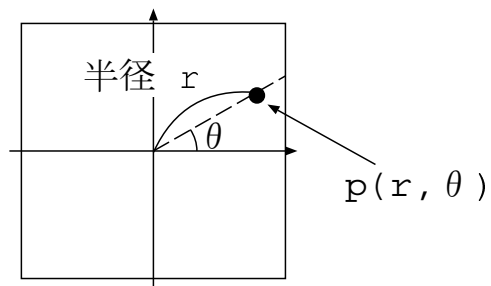


図 4.3 極座標表現

の全方位画像 I_u 上の対応点 $p_u(r_2, \theta)$ は、注目点の半径 r_1 ならびに同一の方位角をなす放射線上での視差 $d(0 < d \leq r_1)$ により表すことができる。

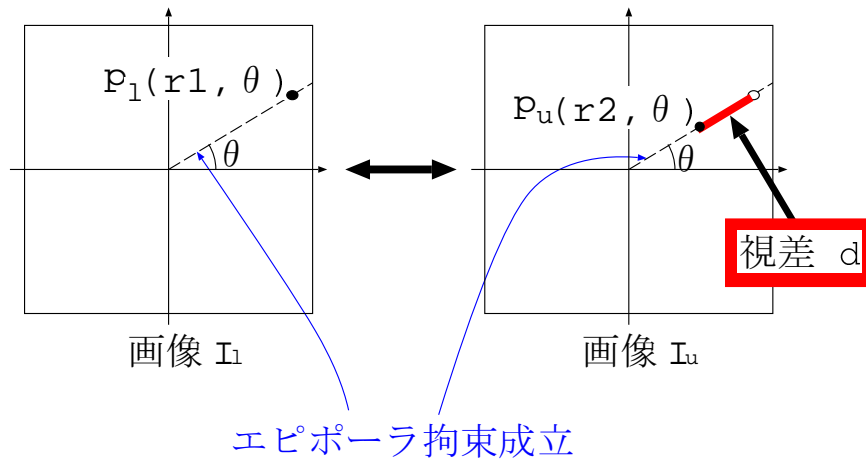


図 4.4 全方位画像上の対応点間の関係

4.3 テンプレートマッチングによる対応点探索

本研究においては、測定対象を制限することなく 3 次元情報を獲得するために、全方位画像に対して両眼ステレオ視を適用する。4.1 節で述べたように、高さが異なる位置で全方位画像を取得することで、全方位ステレオ視が可能である。全方位ステレオ視は、対応点探索を行なうことにより、全方位画像から全方位の視差を抽出することができる。本手法は、3 次元環境の全方位で観測対象の奥行き情報、高さ情報といった 3 次元情報、ならびに方位が同時に得られるという利点がある。以下では、全方位ステレオ画像間に対応点探索を行なう手法について述べる。

全方位ステレオ視により 3 次元情報を獲得するためには、下側の画像中に見える注目点を上側の画像のどの部分に見えているかを求める必要がある。

4.2 節で述べたように、高さが異なる位置で取得される 2 枚の全方位画像 I_l, I_u において、対応点間の関係は下側の画像 I_l での画像中心から注目画素までの半径

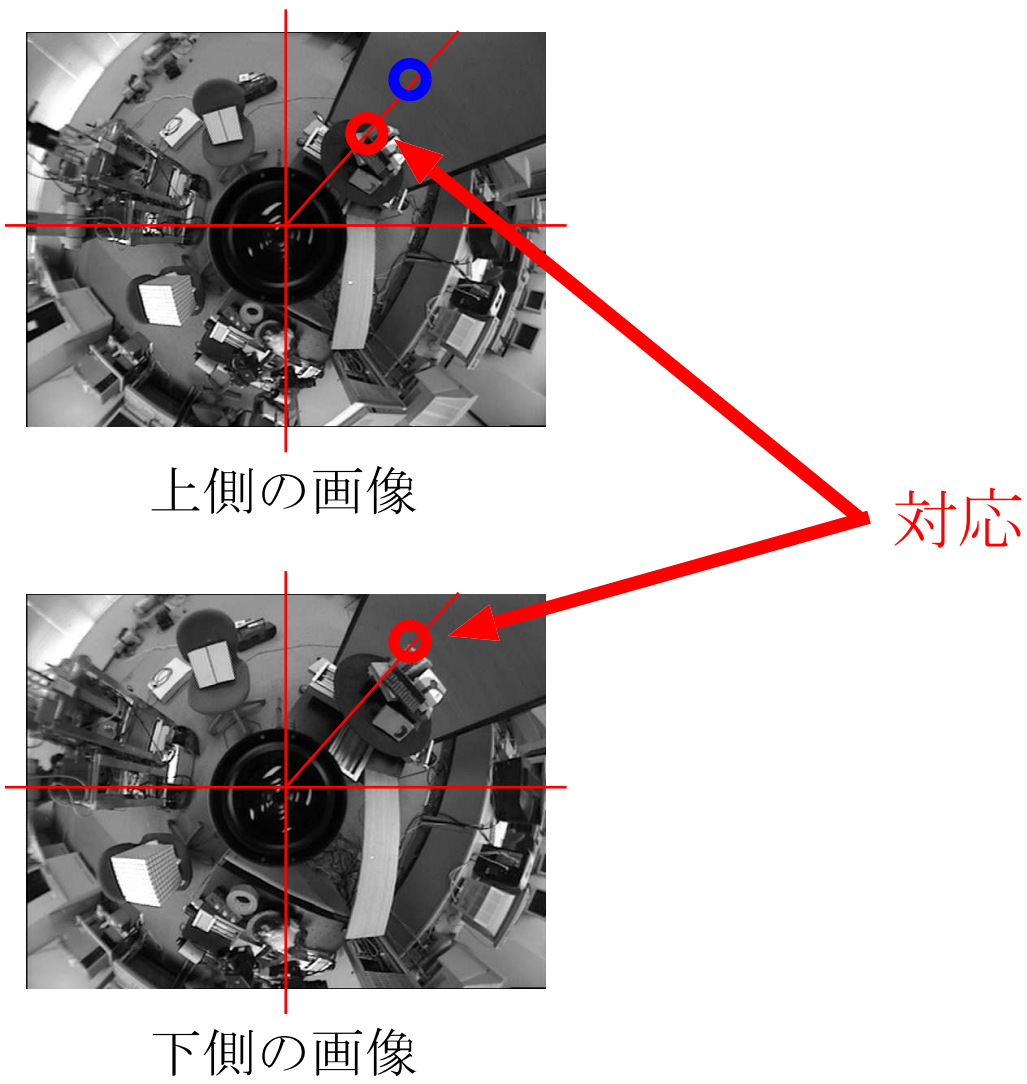


図 4.5 実画像を用いた全方位画像上での対応関係の例

r_1 ならびにエピポーラ拘束の成立している同一の方位角をなす放射線上での視差 d により表される.

以下では, 相対的に低い位置で取得される全方位画像 I_l を基準画像として対応点探索を行なう方法について述べる. 4.2節から分かるように, 基準画像を I_l とすることで, 全方位画像 I_l 上に存在する注目領域は HyperOmni Vision のカメラ自身が写り込む画像中心を除けば, 高い位置で取得した全方位画像 I_u 上に必ず存在することになる. このとき, 全方位ステレオ画像間では中心から伸びる同一の方位角をなす放射線上においてエピポーラ拘束が成立しているので, 対応点探索を行なう際には探索ラインならびに探索範囲が限定できる (図 4.6). 本研究では, 画像の輝度値を特徴量としてテンプレートマッチングを行なうことにより対応点を求め, 全方位ステレオ画像間の各点での視差を抽出する. 図 4.6 に示すように, 基準画像である下側の全方位画像中の探索窓領域 W を表すテンプレート画像 $I_{l_{template}}(r, \theta)$ と, 上側の全方位画像 $I_u(r, \theta)$ の探索ライン上の各点との類似度を計算し, 類似度が最大のところを対応領域とする.

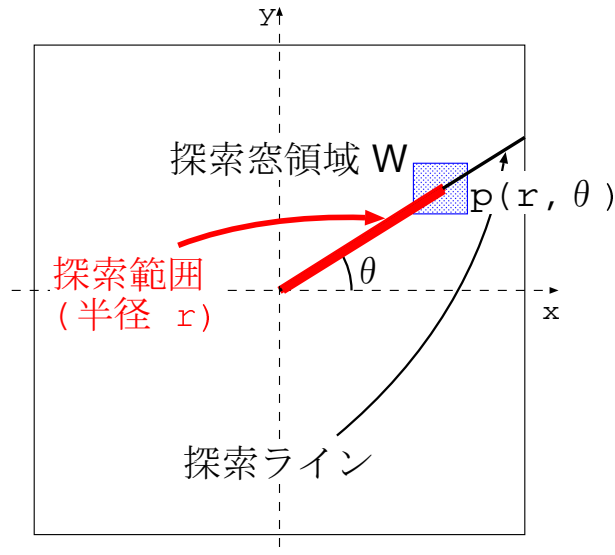


図 4.6 対応点探索範囲

4.4 テンプレートマッチングの評価関数

前節で述べたように，探索ラインは全方位画像 I_l 上での注目画素 (r, θ) が存在する方位角 θ の放射線と同一の方位角をなす全方位画像 I_u 上の放射線上に設定している．また，探索範囲は画像中心からの半径が r 以下となる内側の範囲 $(r-d: 0 < d \leq r)$ のみに限定できる．このことから，全方位ステレオ画像間において以下のような対応点探索の評価式 E が定義できる．ここで， $I_l(r, \theta)$, $I_u(r, \theta)$ は各全方位画像上の画素 (r, θ) における画像輝度値を表している．

$$E(r, \theta; d) = \sum_{r, \theta \in W} \{I_u(r-d, \theta) - I_l(r, \theta)\}^2 \quad (6)$$

式 (6) は全方位画像 I_l 上の注目画素 (r, θ) において，探索窓領域内における画像輝度値の最小自乗誤差和を評価基準とした評価式で，探索窓 W を設定して対応点探索を行なうことを意味している．また，式中の $d(0 < d \leq r)$ は全方位画像 I_l, I_u 間でエピポーラ拘束の成立している，方位角 θ の放射線上における対応点間の位置ずれを表す視差である．最小自乗誤差和を評価基準としているため，対応点探索を行なう際には評価式の値が小さいほど評価が良いことを示している．つまり，評価式の値が小さいほど，下側の全方位画像上での探索窓領域内のテンプレート画像と上側の全方位画像上での探索窓領域内の画像パターンが類似していると考えられる．この評価式を最小とする，全方位画像 I_l 上の注目画素に対する全方位画像 I_u 上の対応画素を探索することにより，視差 d を求めることができる．

4.5 3次元情報の獲得

4.3節では，全方位で視差抽出を行なうための全方位ステレオ画像間における対応点探索の手法を述べた．しかしながら，実際の3次元環境を理解するには対応点探索で得られた全方位の視差情報そのものではなく，視差を基に対象物体の3次元座標を計算する必要がある．以下では，全方位ステレオ視によって得られた視差 d と3次元環境中における対象物体の奥行き D と高さ Z の関係について述べる．

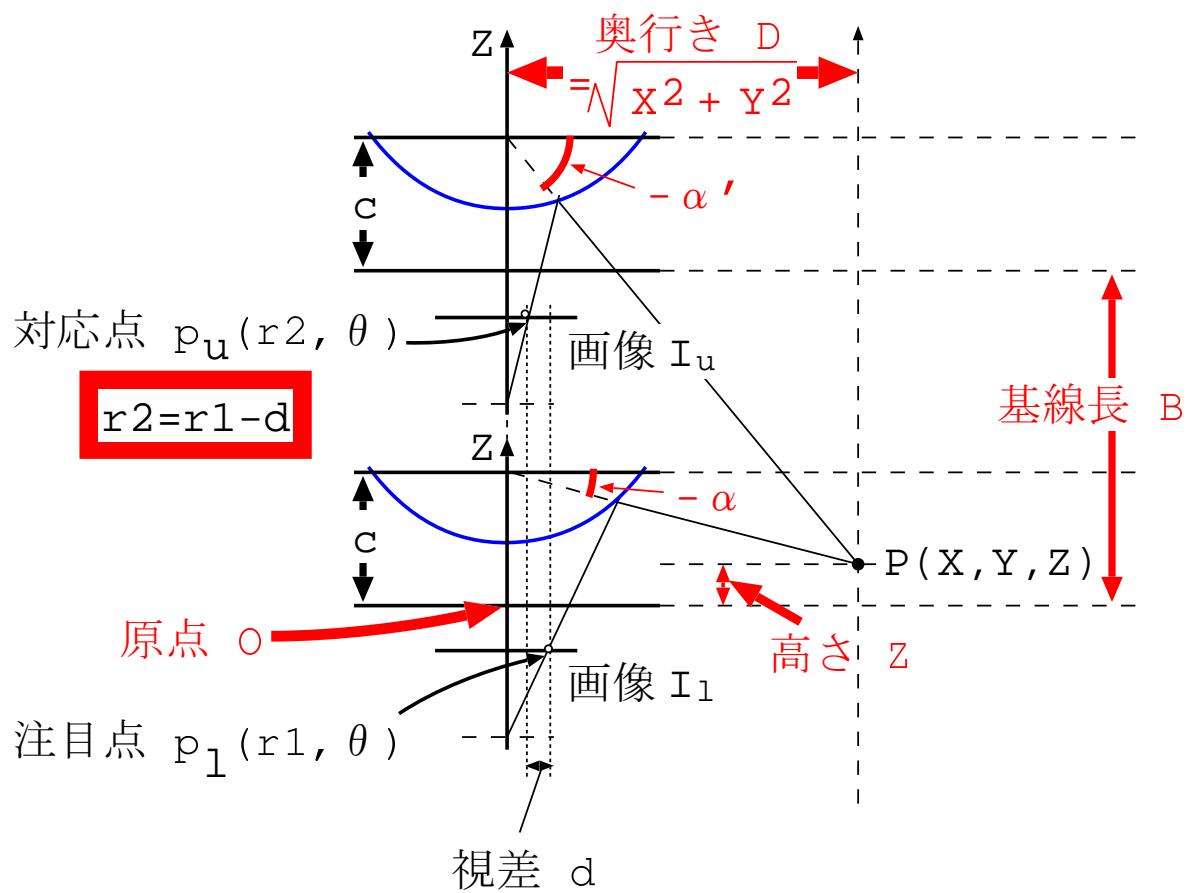


図 4.7 3次元ワールド座標系の設定

まず、座標系の設定を行なう (図 4.7 参照). 3次元ワールド座標系の原点は相対的に低い位置に配置する HyperOmni Vision の光学系の原点とする. 相対的に高い位置に配置する HyperOmni Vision の光学系の原点は、3次元ワールド座標系ではカメラ間の基線長である B を考慮して $(0, 0, B)$ の位置になる. HyperOmni Vision の光学系の原点は双曲面ミラーの焦点とカメラレンズ中心の中間位置に存在する (図 3.1(a) 参照). 奥行き D は HyperOmni Vision の双曲面ミラーの焦点とカメラレンズ中心を通る Z 軸から対象物体までの水平方向の距離とする. このとき、3次元環境中の点 $P(X, Y, Z)$ を対象物体とすると、3.1節で述べた関係式 (4) より全方位ステレオ画像対 I_l, I_u の各々に対して

- 低い位置に配置した HyperOmni Vision では、

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

ここで、奥行き $D = \sqrt{X^2 + Y^2}$ となるので、

$$Z = D \tan \alpha + c \tag{7}$$

- 高い位置に配置した HyperOmni Vision では、基線長 B を考慮して

$$Z = D \tan \alpha' + c + B$$

が成立する.

ただし、 Z : 実環境中での対象物体の高さ

D : 実環境中での対象物体までの奥行き

B : カメラ間の基線長

c : 双曲面ミラーのパラメータ

α, α' : ミラー焦点と対象物体との伏角

以上の関係より、奥行き D はカメラ間の基線長 B と 3次元環境中における対象物体と下側の HyperOmni Vision のミラー焦点との伏角 α ならびに上側でのミラー焦点との伏角 α' を用いて次のように表せる.

$$D = \frac{B}{\tan \alpha - \tan \alpha'}$$

ここで、3次元環境中の対象物体 $P(X, Y, Z)$ に対する全方位ステレオ画像対 I_l, I_u 上での写像点を各 $p_l(r_1, \theta), p_u(r_2, \theta)$ とすると、ミラー焦点との伏角 α および α' は視差 d と対象物体が全方位画像上に写像されている位置での画像中心からの半径 r_1, r_2 を用いて以下の式で表される (式 (4) 参照).

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{(b^2 + c^2) \sin(\tan^{-1} \frac{f}{r_1}) - 2bc}{(b^2 - c^2) \cos(\tan^{-1} \frac{f}{r_1})}$$

$$\alpha' = \tan^{-1} \frac{(b^2 + c^2) \sin(\tan^{-1} \frac{f}{r_2}) - 2bc}{(b^2 - c^2) \cos(\tan^{-1} \frac{f}{r_2})}$$

式 (5) より,

$$= \tan^{-1} \frac{(b^2 + c^2) \sin(\tan^{-1} \frac{f}{r_1 - d}) - 2bc}{(b^2 - c^2) \cos(\tan^{-1} \frac{f}{r_1 - d})}$$

ただし, b, c : 双曲面ミラーのパラメータ

f : カメラの焦点距離

上式から奥行き D は注目画素の半径 r_1 と視差 d から計算できることが分かる. また, 奥行き D を求めることによって, 高さ Z も式 (7) から求めることができる.

5. 実験および考察

本章では，提案した全方位ステレオ視により，観測位置において全方位の3次元情報が獲得できることを確認する．そのために，実画像を用いた実験を行なう．さらに，得られた3次元情報の獲得結果から提案手法が有効であることを示す．

5.1 実験条件

実験に用いた画像の例を図5.1に示す．図5.1は照明条件一定のもとで実験室内を撮影したものである．図5.1(a)が上側の全方位画像で，図5.1(b)が下側の全方位画像である．画像サイズは 640×486 でグレースケール256階調の画像である．全方位ステレオ画像の取得に際しては，三脚を用いて垂直方向でHyperOmni Visionを並行移動し高さの異なる位置で2枚の全方位画像を取得している．HyperOmni Vision間のカメラの基線長は242.0(mm)に設定している．

対応点探索を行なうに当たり，基準画像は下側の全方位画像(図5.1(b))とする．この対応点探索には注目画素を中心にした 5×5 の矩形領域の探索窓を用いる．対応点探索の範囲は注目画素の位置における半径以下で画像中心方向にエピポーラ拘束の成立している放射線上のカメラ自身の写り込み部分を除いた全領域に設定している．

5.2 実験結果

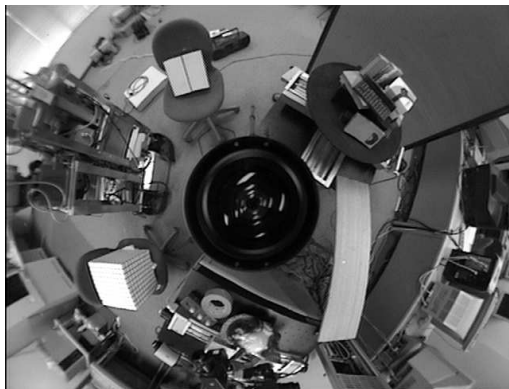
5.2.1 視差抽出結果

図5.1に示した全方位ステレオ画像から，提案手法を用いて全方位での視差を求めた結果を図5.2に示す．図5.2は，得られた視差を基準画像である下側の全方位画像に対して，視差が大きいほど輝度値が高く(画像上で明るいところほど輝度値が高いことを表している)なるように表示したものである．

図5.2から分かるように，提案した探索手法によりHyperOmni Visionを中心にして周囲360度の全領域で視差が抽出できていることが分かる．対応づけの精度に関しては，定量的な評価は行なっていないが，各対象の相対的な位置関係を



(a) 上側の全方位画像



(b) 下側の全方位画像

図 5.1 全方位ステレオ画像

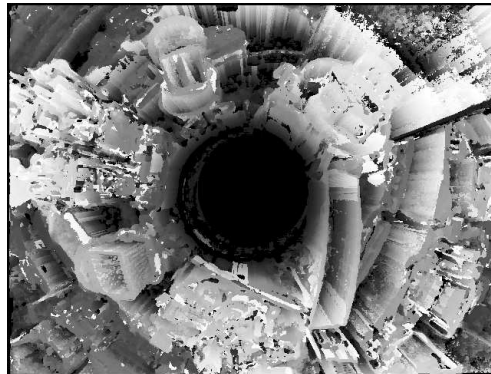


図 5.2 全方位視差画像

理解するには十分である．しかしながら，画像中で輝度，テクスチャの変化が少ない部分とエピポーラ線上に存在するエッジ部分において誤対応が生じている．

5.2.2 3次元情報獲得結果

4.5節で述べた視差と3次元情報の関係を用いて，得られた視差から奥行きと高さを計算した結果を順に示す．3次元情報を計算する際に用いた HyperOmni Vision の双曲面ミラーパラメータ a , b , c ならびに焦点距離 f を表 5.1 に示す．

表 5.1 各パラメータの値

HyperOmni Vision のパラメータ値	
a	42.1 mm
b	42.7 mm
c	59.1 mm
焦点距離 f	1000.0 mm

4.5節で述べた関係を用いて，全方位で得られた視差から全方位での奥行きを計算した結果を図 5.3 に示す．図 5.2 と同様に基準画像である下側の全方位画像上に表示している．この全方位奥行き画像においても，奥行きの値が大きいほど輝

度値が高くなるように表示している。奥行きは、HyperOmni Vision の双曲面ミラー焦点とカメラレンズ中心を通る Z 軸との水平方向の距離を表している (図 4.7 参照)。

図 5.4 は、全方位の奥行き情報と表 5.1 に示した HyperOmni Vision のパラメータから、全方位の高さ情報を計算した結果を示したものである。図 5.2, 図 5.3 と同様に高さの値が大きいほど輝度値が高くなるように表示している。

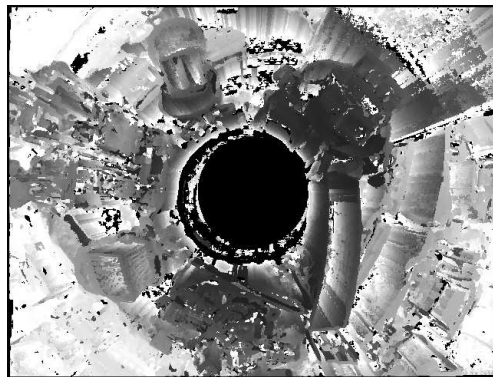


図 5.3 全方位奥行き画像

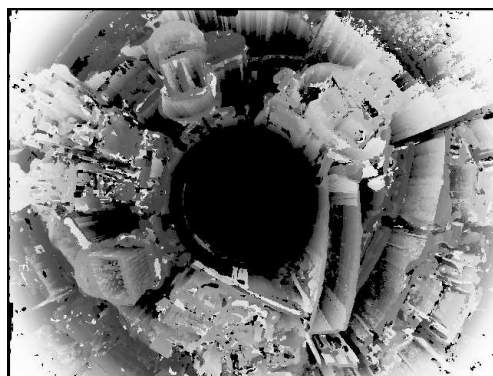


図 5.4 全方位高さ画像

得られた全方位での3次元情報が、実際の3次元環境を理解する上で有用であることを示すために、以下に、全方位画像の一部を平面上に透視投影変換した画像(通常のカメラで得られる画像)について同様に奥行きと高さを示す。この透視投影画像は、HyperOmni Visionの双曲面ミラー焦点の位置から、通常のカメラを用いて3次元環境中の対象を撮影した場合に相当する。図5.5が全方位画像の一部を平面上に透視投影変換した画像で、図5.6、5.7のそれぞれが透視投影画像に対する奥行きならびに高さを示した図である。

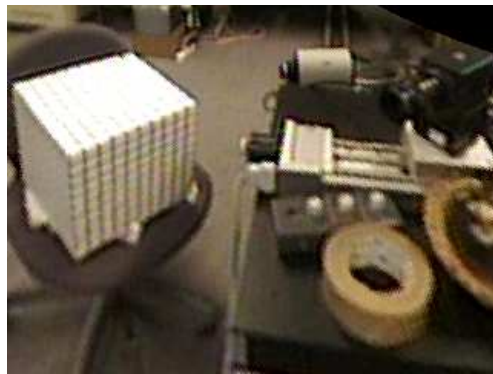


図 5.5 透視投影画像



図 5.6 奥行き画像

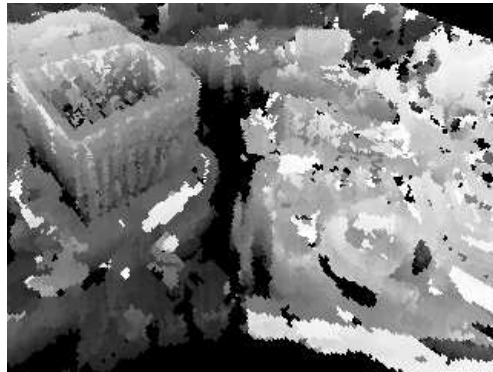


図 5.7 高さ画像

図 5.6から分かるように，画像中の右側にある台の奥行き値が，画像中の左側にある椅子の奥行き値よりも小さい値を示している．よって，台の方が椅子よりも観測位置に近い場所にあることが分かる．また，図 5.7から分かるように，床面の高さの値が，画像中の他の対象物体の高さの値よりも小さい値を示している．よって，床面の位置ならびに対象物体の床面からの高さが分かる．これらの結果は，実際の 3次元環境の状況に合致しており，提案手法により 3次元情報が獲得できていることが分かる．

以上の結果から，提案した全方位ステレオ視により 3次元環境全体を理解する上で必要となる視差を全方位で獲得できていることが分かる．また，全方位での視差を得ることにより，3次元環境における対象物体までの全方位での奥行き情報のみならず全方位での高さ情報が獲得できている．

5.3 考察

実験により，全方位の 3次元情報を獲得できることを確認し，提案手法が有効であることを示した．本手法の問題点として以下の点があげられる．2.2節でも述べたように，従来のステレオ視の問題として次の点があげられる．画像中で特徴が目立ったエッジ部分やテクスチャのはっきりした部分でしか正確な対応を求められない．また，画像中で同じような特徴を持った領域では，誤対応を生じるこ

とがある。実験結果から分かるように、全方位ステレオ視においても同様の傾向が確認できる。具体的には、画像中での輝度変化が少ない部分、局所的に類似したテクスチャが連続して現れている部分、エピソード線上に存在しているエッジ部分に誤対応が生じている。これらの部分では正確な対応関係を求めることが困難なために、誤対応が生じていると考えることができる。これらの対応点探索の問題を解決するために、注目領域だけでなく近傍領域の情報を考慮に入れた探索を行なうことなどが考えられる。

また、全方位ステレオ視に固有の問題として、以下の点が考えられる。全方位ステレオ画像間において、3次元環境中の注目対象は異なる大きさで写像される。そのために、注目画素の位置での探索窓領域中に含まれる視野範囲と、対応画素の位置での窓内に含まれる視野範囲が異なる。この問題を解決するために、対応点探索を行なう際の探索窓の設定に関して検討していく必要があると考えている。

本提案手法で採用した基本的なステレオ視のアルゴリズムでも、環境の3次元情報を抽出できることを示した。本研究では、画像の輝度値の最小自乗誤差和を基準としたテンプレート・マッチングにより対応点探索を行ない、3次元情報を抽出した。2.2節で述べたように、ステレオ視に関するさまざまな研究が行なわれており、それらの手法を全方位ステレオ画像に対して拡張することも考えられる。例えば、上述した全方位ステレオ視の問題に対して、適応型の探索窓を用いた従来研究 [16, 17, 19] を拡張することが考えられる。

HyperOmni Vision を用いて得られる全方位画像から、通常のカメラで得られるような画像への変換は、光学系の特性から既存の画像の幾何学的変換を行なうことで可能である。よって、全方位画像を通常のカメラで得られるような画像に変換してから、変換画像に対して通常のステレオ視を行なうことも考えられる。しかし、変換画像を用いる場合には、変換の際に量子化誤差が生じる。そのために、変換後のステレオ画像間での対応点探索精度の向上を図ることは困難である。これに対して、全方位画像を直接用いることにより、量子化誤差の影響を受けず対応点探索を行なうことができる。

6. 両眼ステレオ画像表示への応用

人工現実感などへの応用においては、人間が立体視することのできる通常の横方向視差を有する両眼ステレオ画像を提示する必要がある。4.1節で述べたように、全方位ステレオ視は通常の縦方向のステレオ視に相当する。このことから、得られた全方位の視差は縦方向の両眼視差に相当する。

以下では、全方位の視差から横方向の両眼視差を計算する方法と、計算した両眼視差を基にして任意方向の両眼ステレオ画像が作成できることを示す。

4.5節で述べたように、全方位の視差から各対象への奥行き情報を求めることが可能である。このとき図 6.1 から分かるように、得られる奥行き D を用いて、双曲面ミラーの焦点 O_M から各対象 P への距離 L を式 (8) により計算することができる。

$$L = \frac{D}{\cos \alpha} \quad (8)$$

両眼ステレオ画像を作成する際の両眼間隔を B_b 、焦点距離を f_b 、両眼視差を d_b とすると、得られた直線距離 L との間に式 (9) の関係が成り立つ。 B_b 、 f_b を設定することで、作成したい両眼ステレオ画像の各対応画素での両眼視差 d_b を求めることができる。

$$d_b = B_b \frac{f_b}{L} \quad (9)$$

前述した式 (8)、(9) を用いて、図 5.5 の画像に対する両眼視差を計算した例を図 6.2 に示す。設定したパラメータ値は表 6.1 に示す。

表 6.1 両眼ステレオ画像の各パラメータの値

両眼ステレオ画像作成に用いたパラメータ値	
両眼間隔 B_b	60.0 mm
焦点距離 f_b	300.0 mm

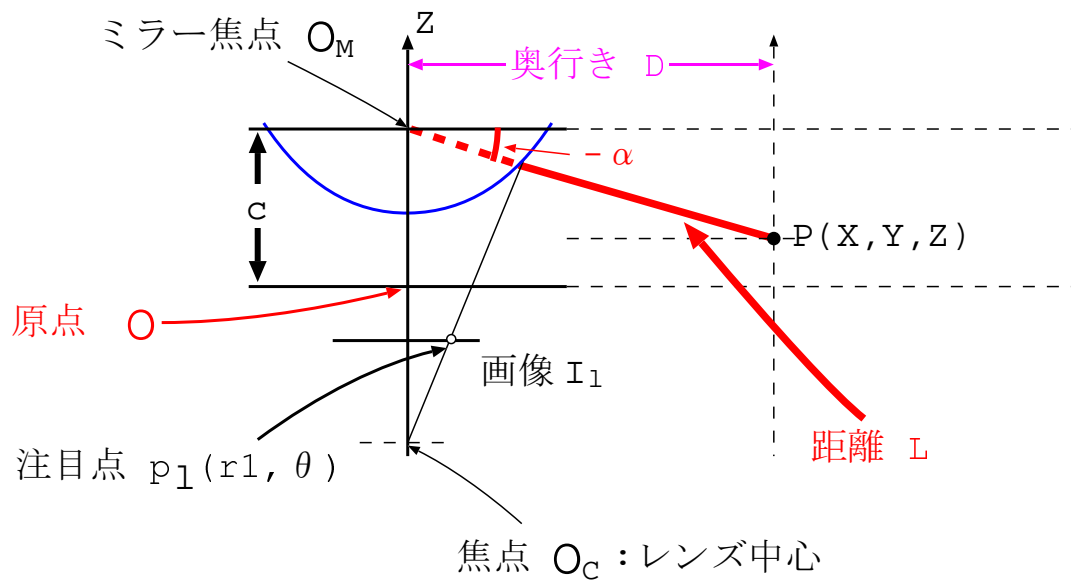


図 6.1 双曲面ミラー焦点から 3 次元空間内の点 P までの直線距離の関係



図 6.2 両眼視差画像

図 5.5の画像に対して，得られた両眼視差を基に左右の両眼ステレオ画像を生成した例を図 6.3に示す．

このように，ユーザの視点方向での両眼ステレオ画像を作成することで，ユーザは3次元環境の理解を行なう上で重要な観測対象の配置，形状などを知覚できる．両眼ステレオ画像の提示を行なうことにより，人工現実感の分野のように臨場感を必要とする場合や，ロボットのナビゲーション，遠隔地での操作支援などのように周囲の状況を理解することが必要なアプリケーションへの応用が可能となる．

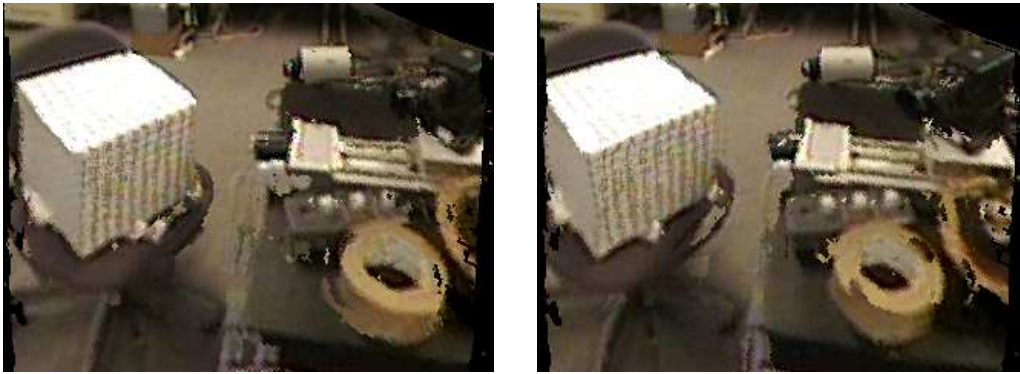


図 6.3 両眼視差を基に作成した両眼ステレオ画像

7. むすび

本論文では、3次元環境全体の状況を理解するために、観測位置において全方位の3次元情報を同時に獲得できる手法を提案した。本手法は、高さの異なる位置で取得した全方位ステレオ画像間の視差を抽出することにより、全方位で対象までの奥行き情報ならびに高さ情報といった3次元情報を獲得することが可能である。また、実画像を用いた実験により全方位の3次元情報が獲得できることを確認し、本手法の有効性を示した。さらに、6章で示したように、人工現実感などへの応用として、全方位画像から人間が立体視することのできる両眼ステレオ画像を作成できることを示した。これにより、ユーザが実際に観測地点にいるかのような状況(テレプレゼンス)を提供することができる。全方位における両眼ステレオ画像の提示は、環境全体の状況を必要とする遠隔地でのロボットの操作(テレオペレーション)を行なう上で有用である。

今後の課題としては以下の点があげられる。実験では、窓のサイズを一定にして対応点探索を行なった。しかし、下側の全方位画像での注目対象は、上側の全方位画像上ではより画像中心近くに存在するために画像中での写像領域が小さくなる。このために、対応点探索を行なう際に放射線上での探索位置により窓のサイズを拡大縮小していくなどの探索手法の改良が考えられる。探索手法の改良に際しては、従来から研究されているさまざまなステレオ視の手法を適用することが考えられる。また、対応点探索を行なう際に矩形領域の窓ではなく、全方位画像に適した形の探索窓の設定を検討していく必要がある。さらに、実験により奥行きおよび高さが得られることを示したが、定量的な評価は行なっていない。得られた奥行きと実際の環境での奥行きから本手法の定量的な評価が必要である。

両眼ステレオ画像の提示に関しては、現段階では、3次元情報の抽出を高速に処理することが困難なため、ユーザの視点に追従してリアルタイムに任意方向のステレオ画像を提示するまでには至っていない。しかしながら、3次元情報の抽出が完了した全方位ステレオ画像に対して、ユーザの視点にリアルタイムで追従する両眼ステレオ画像の提示は可能と考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり，終始暖かくご指導を頂いた ソフトウェア基礎講座 横矢 直和教授 に厚く御礼申し上げます．また，本学での研究におけるあらゆる面で，多大なご助言，ご協力を賜りましたことを深く感謝致します．

副指導教官としてご助言を頂いた 像情報処理講座 千原 國宏教授 ，ならびに ソフトウェア基礎講座 竹村 治雄助教授 に深く感謝致します．

さらに，本研究へのご助言や研究環境の整備にご協力を頂いた ソフトウェア基礎講座 山澤 一誠助手 ，ならびに ソフトウェア基礎講座 岩佐 英彦助手 に深く感謝致します．

ソフトウェア基礎講座の諸氏には，本研究を進めるにあたり多大なる協力を頂きました．ここに，感謝の意を表します．中でも本稿を修正するにあたり，さまざまな助言を頂いた 大隈 隆史氏 ，清川 清氏 ，藤本 泰史氏 ，ならびに 小川 忠氏 に感謝致します．

また，日々の研究室の活動を支えて下さった，ソフトウェア基礎講座 事務補佐員 大隈 和代女史 に感謝致します．

最後に，山口大学を離れる際に温かく送り出して頂いた，山口大学 工学部 知能情報システム工学科 情報機器学講座 古賀 和利助教授 に深く感謝致します．

参考文献

- [1] H.Ishiguro, M.Yamamoto and S.Tsuji: “Omni-directional Stereo for Making Global Map”, *Proc. IEEE 3rd Int. Conf. on Computer Vision*, pp.540–547, 1990.
- [2] J.Hong, X.Tan, B.Pinette, R.Weiss and E.M.Riseman: “Image-based Homing”, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.620–625, 1991.
- [3] 八木, 川戸: “円すいミラーを用いた全方位視覚センサによる位置情報の獲得”, *信学論 (D-II)*, Vol.J74-D-II, No. 1, pp.19–26, 1991.
- [4] 山澤, 八木, 谷内田: “移動ロボットのナビゲーションのための全方位視覚センサ HyperOmni Vision の提案”, *信学論 (D-II)*, Vol.J79-D-II, No. 5, pp.698–707, 1996.
- [5] D. Southwell, A. Basu, M. Fiala and J. Reyda: “Panoramic Stereo”, *Proc. Int. Conf. on Pattern Recognition*, I, pp.378–382, 1996.
- [6] 井口, 佐藤: 三次元画像計測, 昭晃堂, 1990.
- [7] Y.Ohta and T.Kanade: “Stereo by Intra- and Inter-scanline Search Using Dynamic Programming”, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol.PAMI-7, No. 2, pp.139–154, 1985.
- [8] R.March: “Computation of Stereo Disparity Using Regularization”, *Pattern Recognition Letters*, Vol. 8, No. 3, pp.181–187, October 1988.
- [9] R.March: “A Regularization Model for Stereo Vision with Controlled Continuity”, *Pattern Recognition Letters*, Vol. 10, No. 4, pp.259–263, October 1989.
- [10] U.R.Dhond and J.K.Aggarwal: “Structure from Stereo – A Review”, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 19, No. 6, pp.1489–1510, 1989.

- [11] J.S.Chen and G.Medioni: “Parallel Multiscale Matching Using Adaptive Smoothing”, *Proc. European Conference on Computer Vision*, pp.99–103, 1990.
- [12] 奥富, 金出: “複数の基線長を利用したステレオマッチング”, *信学論 (D-II)*, Vol.J75-D-II, No. 8, pp.1317–1327, 1992.
- [13] S.D.Cochran and G.Medioni: “3-D Surface Description from Binocular Stereo”, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 14, No. 10, pp.981–994, 1992.
- [14] 横矢: “多重スケールでの正則化によるステレオ画像からの不連続を保存した曲面再構成”, *信学論 (D-II)*, Vol.J76-D-II, No. 8, pp.1667–1675, 1993.
- [15] 奥富, 吉崎, 富田: “カラーステレオマッチングとその視神経乳頭 3 次元計測への応用”, *信学論 (D-II)*, Vol.J76-D-II, No. 2, pp.342–349, 1993.
- [16] T.Kanade and M.Okutomi: “A Stereo Matching Algorithm with an Adaptive Window : Theory and Experiment”, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 16, No. 9, pp.920–932, 1994.
- [17] J.L.Lotti and G.Giraudon: “Adaptive Window Algorithm for Aerial Image Stereo”, *Proc. 12th IEEE Int. Conf. on Pattern Recognition*, I, pp.701–703, 1994.
- [18] S. S. Intille and A. F. Bobick: “Disparity-Space Images and Large Occlusion Stereo”, *Proc. European Conference on Computer Vision*, pp.179–186, 1994.
- [19] F.Devernay and O.D.Faugeras: “Computing Differential Properties of 3-D Shapes from Stereoscopic Images without 3-D Models”, *Proc. IEEE CS Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.208–213, 1994.
- [20] L.Robert and R.Deriche: “Dense Depth Map Reconstruction : A Minimization and Regularization Approach which Preserves Discontinuities”, *Proc. European Conference on Computer Vision*, I, pp.439–451, 1996.

- [21] T.Kanade: “A Stereo Machine for Video-Rate Dense Depth Mapping and Its New Applications”, *Proc. Image Understanding Workshop*, II, pp.805–811, 1996.
- [22] 中山, 白井: “正規化した明度情報を利用したオクルージョン境界のステレオ対応付け”, *日本ロボット学会誌*, Vol. 14, No. 7, pp.1026–1032, 1996.
- [23] 茶園, 山澤, 横矢, 竹村: “HyperOmni Vision を用いた全方位ステレオ”, *画電学研報*, 96-04-06, pp.21–24, 1996.
- [24] 茶園, 山澤, 横矢, 竹村: “HyperOmni Vision による全方位ステレオ視”, *信学技報*, IE96-122, pp.99–106, 1997.
- [25] T.Poggio, V.Torre and C.Koch: “Computational Vision and Regularization Theory”, *Nature*, Vol.317, No.6035, pp.314–319, September 1985.
- [26] 坂上, 横矢: “弛緩法と正則化”, *情処論*, Vol. 30, No. 9, pp.1047–1057, September 1989.
- [27] S.B.Kang and R.Szeliski: “3-D Scene Data Recovery using Omnidirectional Multibaseline Stereo”, *Proc. IEEE CS Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.364–370, 1996.