

NAIST-IS-MT9851014

修士論文

全方位ステレオ画像センサによる 実環境の仮想環境への取り込み

戎野 聡一

2000年2月20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。

戒野 聡一

指導教官： 横矢 直和 教授
小笠原 司 教授
竹村 治雄 助教授

全方位ステレオ画像センサによる 実環境の仮想環境への取り込み*

戎野 聡一

内容梗概

6角錐ミラーを用いた全方位ステレオ画像センサは、(1)周囲の情景を高分解能で撮像可能、(2)光学特性が1点透視投影、(3)動的な環境全体をビデオレートで撮像可能、(4)全周囲の奥行き情報を取得可能という特徴を持つ。そのため都市空間等の大規模かつ複雑な実験環境の映像を扱うのに適している。本センサは、高分解能な全周画像を取得する目的で複数のカメラの画像を連結して全周画像を生成している。そのため、センサのキャリブレーションの精度がよくなければ、生成した全周画像は、隣り合うカメラ画像の境界付近で不連続が発生する、2つのカメラ画像でエピポーラ線が一致しないといった問題のために、正確な距離推定が行えないなどの問題がある。本論文では、大型円筒スクリーンを使ってセンサを精度よくキャリブレーションし、センサ周囲を撮像して得られた2枚の全周パノラマ画像からステレオ法により奥行きを推定する手法を提案する。また、より大規模な屋外環境の仮想化を目指すために、2つのカメラ間のステレオ視だけでなくセンサ周囲の情景に存在する特徴点を追跡するモーションステレオを行なうことで、より正確に屋外構造物を仮想環境内に取り込む手法を提案する。実際に屋外環境における実験を通して、本手法の有効性を確認した。

キーワード

全方位ステレオ画像センサ、センサキャリブレーション、モーションステレオ、距離推定

*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-MT9851014, 2000年2月20日.

Capturing the Real Environment with Omnidirectional Stereo Image Sensor*

Soichi Ebisuno

Abstract

This paper proposes a method to virtualize a large real environment such as an urban environment. For this purpose, an omnidirectional stereo imaging sensor with multiple cameras and pyramidal mirrors has been developed. This sensor can obtain a stereo pair of high-resolution panoramic images satisfying the single viewpoint constraint at video rate. However, the calibration of this sensor is difficult because it requires the registration of multiple images from different cameras. In order to solve this problem, a calibration method, which is based on capturing a cylindrical grid pattern projected around the sensor, is proposed. Using the calibrated omnidirectional of sensor, a real scene is captured to construct a virtual environment. To compensate for the accuracy of stereo range data, the proposed method integrates binocular stereo and motion stereo which is based on feature point tracking in consecutive frames. Finally, examples of the constructed virtual environments are shown to confirm the effectiveness of the proposed method.

Keywords:

omnidirectional stereo image sensor, sensor calibration, motion stereo, depth extraction

*Master's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT9851014, February 20, 2000.

目次

1. はじめに	1
2. 関連研究と本論文の概要	3
2.1 仮想現実感を用いた都市環境構築に関する従来研究	3
2.2 3次元形状の獲得に関する研究	4
2.2.1 2眼ステレオ法による3次元形状の獲得	4
2.2.2 動画像を用いた物体の3次元形状の獲得	7
2.3 都市環境内の物体の3次元形状を獲得する際の問題点	9
2.4 全方位画像センサに関する従来研究	10
2.5 本論文の概要	14
3. 全方位ステレオ画像センサのキャリブレーション法	15
3.1 6角錐ミラーを用いた全方位ステレオ画像センサ	15
3.2 Tsaiの手法による幾何学的歪み補正	19
3.3 円筒パノラマ画像の取得	19
3.4 円筒パターンを用いたキャリブレーション	20
3.5 距離定数の決定	22
3.6 カメラ画像間の色・輝度補正	23
4. 全周パノラマ動画像からのシーンの3次元再構成	24
4.1 全周パノラマ動画像によるモーションステレオ投影系	25
4.2 全周パノラマ動画像におけるオプティカルフロー	26
4.2.1 カメラの色・輝度パラメータを考慮したオプティカルフロー	26
4.2.2 平均輝度分割方法	27
4.3 全方位画像センサの移動量推定	30
4.4 2眼ステレオとモーションステレオの距離の統合	32
5. 実験と考察	34
5.1 実験システム	34

5.1.1	移動撮影システム	34
5.1.2	画像入力システム	35
5.2	実験結果	36
5.3	キャリブレーション結果	36
5.4	シーンの3次元再構成	37
5.5	考察	45
6.	おわりに	47
	謝辞	49
	参考文献	50

目 次

1	標準ステレオ撮像系	5
2	全方位画像センサの視野領域	12
3	全周ステレオ画像センサの構成	16
4	全周ステレオ画像センサの外観	16
5	全周パノラマ画像における投影系	18
6	Tsai の手法による幾何学的歪みの補正	19
7	円筒パノラマ画像への変換	20
8	円筒スクリーン面と円筒パノラマ画像間の座標関係	22
9	ステレオとモーション情報による距離の統合手順	25
10	全周パノラマ動画像によるモーションステレオ投影系	25
11	平均輝度光量分割アルゴリズム ケース: 1	29
12	平均輝度光量分割アルゴリズム ケース: 3	29
13	整合の取れたモーションとステレオ対応	31
14	動画像取得システムの構成	35
15	センサ取り付け時の車の外観	35
16	上部および下部パノラマ画像	36
17	全周ステレオ距離画像	37
18	入力画像: 上部下部の全周パノラマ動画像	41
19	Sobel フィルタによる特徴点選択	42
20	ステレオ視の視差マップ: 40 フレーム	42
21	時系列方向の特徴点の動き量	42
22	時系列逆方向の特徴点の動き量	42
23	視点画像 観測方位: 90 度	43
24	視点変更後の画像	43
25	観測方位: 移動方向 移動前 (a) と 移動後 (b)	44
26	ポリゴン生成された街並み: 鳥瞰図 (a) と ワイヤーフレーム表現 (b)	44
27	再構成された建物	44
28	再構成された建物: ワイヤーフレーム表示	45

表 目 次

1	全方位画像センサの比較	13
2	センサの移動量推定に使用した入力パラメータ：時系列方向 . . .	38
3	センサの移動量推定結果：時系列方向	38
4	センサの移動量推定に使用した入力パラメータ：時系列逆方向 . .	39
5	センサの移動量推定結果：時系列逆方向	39

1. はじめに

近年, 都市環境等の大規模かつ複雑な環境を仮想環境内に取り込むことが求められている. 仮想都市の記述と表示に用いられるコンピュータグラフィクス技術は, その表現方法の違いによって, イメージベースレンダリングとポリゴンベースレンダリングに大別することができる. イメージベースレンダリングは, 多視点からの実写画像をあらかじめ蓄積しておき, 観察時には視点の移動に応じた画像を検索して提示する方法である. この手法は, 都市環境の構築が比較的容易であるが, 3次元モデルを持たないためユーザとの対話的処理に乏しい. 一方, ポリゴンベースレンダリングは, 3次元物体の形状をポリゴン(多角形)の集合として表現する方法である. この手法は, 物体の衝突判定や物体に対して高い操作が可能であるという点で, イメージベースレンダリングに対して有利である. 都市環境内の物体をポリゴンで表現するためには, 物体の形状を取得しなければならないので, そのための手法がいくつか提案されている.

都市環境内の物体の形状を取得する手法としては, 能動的な手法と受動的な手法に分けることが出来る. 能動的な手法としては, レーザ計測, モアレ法や照度差ステレオ法などがある [1]. これらの手法は, 物体の形状を高い精度で取得できるが, 特殊な照明や正確に設定された環境が必要であり, 計測範囲が制限されるという問題がある. 一方, 受動的な方法は, ステレオ法によるものが代表的である. これは, 多視点の画像の対応関係を求めることにより 3角測量の原理を用いて物体の3次元形状を取得する方法である. また, 時系列画像 [2, 3] にステレオ法を適用することで, より正確にステレオ画像間の対応を求める手法も提案されている [4, 5]. これらの方法は, 能動的な方法に比べて距離に対する信頼性が乏しいという問題があるものの, 計測範囲が制限されないという利点がある. そのため, 都市環境内での広範囲な物体の形状を求めるには, カメラ画像等を使用した受動的な計測方法が適していると考えられる. カメラ画像を用いて都市環境内に存在する対象物体の形状を取得する方法は, いくつか提案されているが [6, 7], いずれの手法も建物1つを再現するのに多地点からのカメラ画像を必要としている. そのため, 再構成する対象物体が複数になると, より多くの視点から都市環境を撮影する必要があり, 画像収集に多くの時間と労力が必要である.

そこで、本論文では、大規模都市環境の再構築の際の画像収集の労力の多寡を解決するために、全方位画像センサを用いることで、全方位の屋外環境の情報を取得する手法を提案する。提案手法では6角錐ミラーを用いた全方位ステレオ画像センサを使用することで、全方位の情景を高分解能に撮像し、動的な環境全体をビデオレートで撮像することで、広大な都市環境内の物体の形状を効率よく求める。しかし、2眼ステレオによる距離情報だけでは、距離に対する信頼度は低いいため物体の形状を正確に求めることは難しい。そこで、ステレオ視による距離情報と動画像中に存在する特徴点を追跡することで得た動き量(モーション)からの距離情報を統合し、実環境物体の形状を高精度に推定する手法を提案する。また、本手法の有効性を確認するために、得られた距離情報を用いて仮想環境内に実環境を再現するシステムを作成した。その結果、従来手法に比べ正確に現実環境を仮想環境内で再現できることを確認した。

以下、2章では、仮想現実感、3次元形状の獲得に関する従来研究、全方位画像センサに関する従来研究および本論文の概要について述べる。次に、3章では、本研究で用いる6角錐ミラーを用いた全方位ステレオ画像センサのキャリブレーションの手法を示す。そして、4章では、全周パノラマステレオ動画像からのシーンの3次元再構成について述べ、5章では、提案手法の有効性を確認するための実験の結果と考察について述べる。最後に6章で、本論文のまとめを述べる。

2. 関連研究と本論文の概要

2.1 仮想現実感を用いた都市環境構築に関する従来研究

近年, 仮想環境内で, 複数の人が集う都市環境を構築する試みが行なわれている [8]. この種の大規模な都市環境を仮想環境内で描画する方法は, イメージベースレンダリング (IBR), とポリゴンベースレンダリング (PBR) に分けられる. 以下にそれぞれの表現手法における特徴と関連研究について述べる.

イメージベースレンダリング (IBR)

IBR は, 視点位置と視線方向を変化させながら実物体や実環境を撮影し, 一連のカラー画像の蓄積を行う. 表示の際にはユーザの視点位置と視線方向に応じてその一部分を表示することで, 対象環境内にいるような没入感を発生させたり, 物体が存在するように見せることができる [9]. これらは対象物に対して何らの解析を行わないので処理が非常に容易であり, 簡単にシステムが構築できる. また, 移動ベースとして自動車を使用することで, 広大な街並み全体を再構成しようという試みもある [10, 11]. IBR は, 容易に都市環境を構築できるが, 視点位置と視線方向に対応した画像を蓄積しておくため, 膨大な量のデータを扱う必要がある. また, IBR では 3 次元形状の情報を持っていないため, 提示される物体間での衝突判定が不可能であり, ユーザの対話的処理に乏しくなってしまう.

ポリゴンベースレンダリング (PBR)

3 次元コンピュータグラフィクスにおける形状モデルの表現方法として, 3 次元物体の表面形状をポリゴン (多角形) の集合として表現する方法が広く用いられている. ポリゴンによる表現では, 物体の表面形状が既知であるため形状モデルの移動, 衝突判定などが容易に行なえるという利点がある [12]. そのため, ユーザとの対話的処理が可能である. ポリゴンモデル生成のためには, 多角形の頂点の 3 次元位置座標および面の法線情報が必要である.

IBR と比較して PBR による都市環境構築は, 物体の形状を取得できれば, 衝突判定や, 視点の位置変化など物体の操作性が高い. ポリゴン作成に必要な 3 次元

形状獲得手法に関する研究については次節にて述べる。

2.2 3次元形状の獲得に関する研究

3次元形状を獲得する方法は、大きくわけて能動的な手法と受動的な手法に分けられる。能動的計測は、対象とする物体に何らかのエネルギーを照射し、その反射を測定することにより対象までの距離を測定する方法である。受動的計測は、対象に対して何ら影響を与えることはなく、カメラ等の光学センサを用いることにより、得られた画像の対応関係を求めることで距離を測定する方法である。一般に、能動的な手法は受動的なものより信頼性が高くなる。しかし、屋外環境で用いる場合は、計測ハードウェアに何らかのエネルギーを投影するプロジェクタが必要であり、都市環境内での使用は難しい [1]。そのため、都市環境内における3次元形状の獲得の方法は、カメラ等を使用した受動的な手法が適する。本節では、受動的な距離計測方法である両眼ステレオ法と動画像を用いたオプティカルフローに関して述べ、都市環境内で物体の形状を獲得する際の問題点について述べる。

2.2.1 2眼ステレオ法による3次元形状の獲得

ここでは、2眼ステレオ法の基本原理や、画像間の対応問題、カメラキャリブレーションについて述べる。

2眼ステレオ法の原理

2眼ステレオ法は、カメラなどの視覚センサを左右に2台並べ両眼立体視により3次元情報を獲得する方法であり、もっとも一般的な距離測定法である。2眼ステレオ法では、異なる位置に設置された2つのカメラで捉えた2枚の画像上での物体像の位置のずれ(視差)から三角測量原理に基づいてカメラから物体までの距離を計算する。図1に示すような、左右のカメラの光軸が平行な標準ステレオ・カメラ・モデルを考える。情景は、それぞれの画像平面に焦点距離 r で中心投影される。左右の投影中心を結ぶ線分を基線 b 、この基線を含む任意の平面をエピポーラ線と呼ぶ。ここで、環境中の点 P の座標を2つのカメラの光軸を原点として定め、 X 軸を基線と平行な方向、

Y 軸を基線と光軸に垂直な方向とし、 Z 軸を光軸と平行な方向として、点 P の左画像平面上の像が (x_l, y_l) で、それに対応する点が右画像平面上の像で (x_r, y_r) で検出されたならば、点 P の座標値 (x, y, z) は、以下の式で与えられる。

$$x = \frac{b \cdot (x_l + x_r)}{2 \cdot (x_l - x_r)} \quad (1)$$

$$y = \frac{b \cdot (y_l + y_r)}{2 \cdot (x_l - x_r)} \quad (2)$$

$$z = \frac{b \cdot r}{x_l - x_r} \quad (3)$$

ただし、ステレオの画像上での対応点の座標は、エピポーラ拘束により y_l と y_r は等しくなり、左右画像の対応関係を知る大きな手がかりになっている。つぎに、ステレオ視を行なう際に問題となる対応点探索問題について述べる。

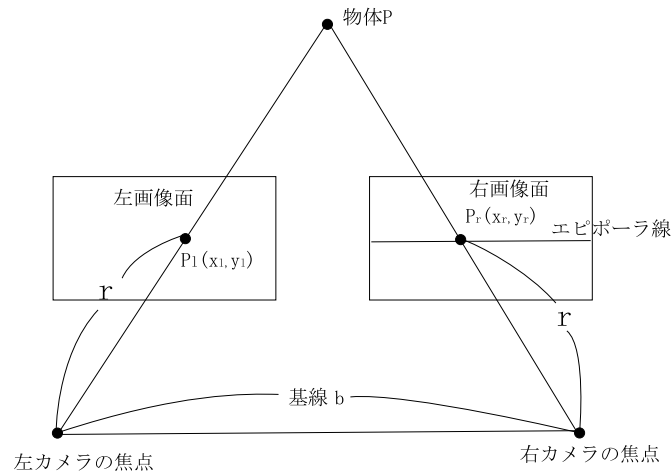


図 1 標準ステレオ撮像系

対応点探索問題

複数のカメラを用いて多視点からステレオを行なう場合は、カメラの色・輝度パラメータ、照明条件、光学系、アナログ回路など、様々な要因によって同じ光量がカメラの投影面に入射しても、各カメラ画像上では異なる輝度値と

して出力される。仮に、2つのカメラ f, g に、光量 L が入射した場合、2つのカメラの画像上での輝度 $f(x, y), g(u, v)$ は、以下のような式で示される。

$$f(x, y) = A_f \cdot L + B_f + n_\sigma \quad (4)$$

$$g(u, v) = A_g \cdot L + B_g + n_\sigma \quad (5)$$

ここで、 A_f, A_g は、定数倍の明度変化を、 B_f, B_g は、明度のバイアス分を表す各カメラ固有の色・輝度パラメータである。また、 n_σ は撮像画像中にあるガウスノイズの項である。よって、2つの輝度の関係は、次の式のようになる。

$$f(x, y) = A_{fg} \cdot g(u, v) + B_{fg} + n_\sigma, \quad (6)$$

2つのカメラが同じ情景を撮影しても、線形な形で明度変化 A_{fg} と明度のバイアス B_{fg} 差が生じる。そのため、カメラ画像間の対応関係を求めるためには、各カメラごとの線形な明度変化に影響されない類似度評価尺度を用いる必要がある。この線形な明度の差に影響を受けない手法として正規化相互相関によるテンプレートマッチングがある [13, 14].

正規化相互相関によるテンプレート マッチング

テンプレートマッチングとは、基準画像上のある画素を中心に切り出した矩形画像 (テンプレート) が参照画像上のどの部分と照合するかを探索する方法である。基準画像 I_r 上の注目点、照合を行なうテンプレートをウインドウ W 、テンプレートとなる部分画像の画素単位の輝度値を $f(x, y) ((x, y) \in W)$ とする。また、対応点探索を行なう参照画像 I_s 上のある位置 (u, v) のウインドウによって得られる部分画像の画素単位の輝度値 $g(x, y; u, v)$ で表し、対応点の探索範囲 S はウインドウの位置 (u, v) の集合とする。 (u, v) は画素単位の座標として表され、その場合 $g(x, y; u, v) = I_s(u + x, v + y)$ となる。ここで、マッチング処理を行なうウインドウ W の大きさは $M \times N$ の矩形領域とすれば、正規化相互相関 $Corr(f, g, u, v)$ は以下の式で表される。

$$Corr = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (f(x, y) - \bar{f}) \cdot (g(x, y; u, v) - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (f(x, y) - \bar{f})^2} \sqrt{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (g(x, y; u, v) - \bar{g})^2}} \quad (7)$$

正規化相互相関は、相関を求めるベクトルを各画素の要素を輝度値として、2つのテンプレートベクトル間の余弦の値を示している。そのため、定数倍の明度変化を吸収できる。また、各輝度値をテンプレート内の輝度値の平均で引くことにより、明度のバイアス分の明度差を吸収できる。この正規化相互相関の値は -1 から $+1$ の範囲をとり、 $+1$ の時最も相関があり 0 の場合は全く相関がない。ちなみに、 -1 の場合は逆の相関がある。ステレオ撮像により距離推定を行なう場合は、基準画像上の座標 $f(x, y)$ と探索範囲で最も高い相関値 $Corr$ を持つ参照画像上の座標 $(u + x, v + y)$ を対応させることで視差 d を求めることができる。

カメラキャリブレーション

式 (3) からカメラの外部パラメータである 2 眼ステレオの間の基線 b の距離や、内部パラメータであるカメラのレンズの焦点距離 r は、測定対象の大きさ、つまり測定空間のサイズを変化させる。そのため、ステレオによる 3 次元計測を行なう場合は、基線と焦点距離を求める必要があるが、レンズの焦点距離を実測したり、カメラ間の距離を測定する方法は、不正確であり時間もかかる。そこで、3 次元位置が既知の基準となる物体を利用し、それをステレオ計測することによって逆にカメラパラメータを求める方が実用的である。そのなかでも、Tsai の方法は、ロボットビジョンにおけるハンドアイ較正 (*hand-eye calibration*) 問題を扱ったものであり、ロボットの手の座標と目の座標の関係から、非線形最適化問題を解くことによって、カメラの外部パラメータおよび内部パラメータを同時に求めることができる [31]。

2.2.2 動画像を用いた物体の 3 次元形状の獲得

ここでは、動画像を使用することで物体の 3 次元形状を求める手法について述べる。動画像において連続するフレーム間の対応する点を画像上で結ぶベクトルをオプティカルフローとよぶ。以下に、基本的なオプティカルフローの算出方法である勾配法 [15] と、ブロックマッチング法について述べ、動画像から 3 次元形状を獲得する手法について述べる。

勾配法

まず, 連続する 2 フレーム間で物体の輝度変化が微小であると仮定する. このとき物体の輝度を $I(x, y, t)$, ((x, y) は画像上の点の座標, t は時刻) とすると以下の式が成り立つ.

$$I(x, y, t) \approx I(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t)$$

右辺を Taylor 展開すると

$$I(x, y, t) \approx I(x, y, t) + \frac{\partial I}{\partial x} \delta x + \frac{\partial I}{\partial y} \delta y + \frac{\partial I}{\partial t} \delta t + O^2$$

となる. ここで O^2 は I の 2 次以上の微分の項である. 両辺から $I(x, y, t)$ を引き, 2 次以上の項 O^2 は微小であることから無視すると

$$\frac{\partial I}{\partial x} \delta x + \frac{\partial I}{\partial y} \delta y + \frac{\partial I}{\partial t} \delta t = 0$$

と書ける. ここで $(\partial I / \partial x, \partial I / \partial y)$ は求めるオプティカルフローベクトルであることから, この拘束式を利用することでオプティカルフローを算出する手法である. しかし, この場合拘束式が 1 種類しか得られない. そこでこの解決法として, 画像に 2 種類のフィルタリングを行い複数の拘束式を成立させる手法 [16] や画像の色情報を利用して複数の拘束式を構成する手法 [17] などが提案されている. しかし, 一般に勾配法によるオプティカルフローは, 計算コストが低く密な移動量を得ることができるという利点があるものの, 照明条件に左右されやすいため, 屋外環境中で高い精度を得ることは難しい.

ブロックマッチング法

連続する 2 フレーム間で対応する点をテンプレートマッチングを用いて探索することでオプティカルフローを算出する手法である. 具体的には最初のフレームのある画素を中心に切り出した矩形画像 (テンプレート) が次のフレームの画像上のどの部分と照合するかを探索していく方法である. 探索範囲は, 最初のフレームで, 切り出した位置の近傍位置を設定する. そして探索範囲中でもっとも高い相関値を示した位置が, 切り出した位置の次フレームでの位置である. これにより, 最初のフレームの座標と次フレームの

座標の対応関係からオプティカルフローを算出する。テンプレートと参照画像の類似度を評価する尺度としては、2.2.1節であげた正規化相互相関があげられる。この方法は、計算時間が多大にかかるという問題があるが、勾配法にくらべて照明条件に左右されにくく、屋外環境中でも比較的正確なフローを得ることができる。

動画画像から 3 次元形状を獲得する手法

動画画像から対象の 3 次元形状を得る方法は、オプティカルフローから、動画画像の初期画像と終了画像の対応を求め、3 角測量を行なうことで求められる。または、カメラの移動に一定の拘束条件を用いることで、安定した距離情報を求められるエピポーラ平面解析がある [18]。これは、カメラを平行運動させながら静止物体を観測する際に、光軸をその移動方向に対して垂直に設定し、走査線方向で時空間画像を切断すると、特徴点の動きの軌跡が直線になることを利用している。また、因子分解法 [19] は、移動カメラで取得した時系列画像上の特徴点の対応を取り、その各画像上の対応点の位置を成分を持つ計測行列 W を、カメラまたは対象の運動を表現する行列 M と対象の形状を表現する行列 S の積に $W = MS$ と分解することで、動画画像から対象物体の形状と各時系列画像間の相対位置を同時に求める手法がある。

2.3 都市環境内の物体の 3 次元形状を獲得する際の問題点

ステレオ撮像においてエピポーラ線が、対応点探索に際して重要な手がかりになっていることは 2.2.1 節で述べた。これは、探索する範囲が 1 次元の場合と 2 次元の場合とでは、その困難さと計算コストに大きな差があるからである。エピポーラ線は、室内での狭い計測範囲ならば正確にカメラの位置および方位を設定できる。しかし、都市環境内でのステレオの場合は、対象の物体が複数あると撮影する場所の間隔が広くなり、カメラの位置や方位を正確に求められないため、エピポーラ線を完全に平行化できない欠点がある。そのため、広大な都市環境内の複数の建物の 3 次元形状を獲得するためには、多視点からのカメラ画像およびカメラの正確な位置と方位を効率的に求める必要がある。

また、動画画像から対象の 3 次元形状を獲得する際も同様に、カメラの正確な位

置および方位に加えて、移動速度を求める必要がある。エピポーラ平面解析はカメラが等速で並進運動しているという仮定があるため、都市環境内で行なう場合は、なんらかの計測機器で速度を求め補間する必要がある。また、因子分解法によるカメラの運動解析は、相対距離のため、実環境の距離を求めるためには、初期フレームでのカメラの位置方位および終了フレームまでの平均移動量を求める必要がある。

2.4 全方位画像センサに関する従来研究

広大な都市環境全体を仮想環境に取り込むためには、建物全体、街全体などの情景情報を計算機に入力する必要がある。このため広い視野角を持つ画像センサを用いることで、多くの画像を効率的に収集できる。従来、広い視野を持つ画像センサは、全方位画像センサとしていくつか提案されている [20]。以下に代表的な全方位画像センサの例をあげる。

- カメラを回転する方法 [21, 22]

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、他の全方位画像センサに比べて、全方位で高い解像度の画像を取得することができるが、全方位の実環境を撮影するのに時間がかかるために、全方位の情景情報をビデオレートで同時に獲得するなどの拡張には不向きである。視点を中心にしてカメラを回転させる方法を用いれば、1 点透視投影の光学特性をもつ円筒パノラマ画像を得ることができるので、通常のカメラ画像に再変換することが可能である。また、回転カメラを上下に 2 台用いてステレオ撮像を行うことが出来る。

- 魚眼レンズを用いる方法 [23]

魚眼レンズ方式は、通常のカメラのレンズを超広角のレンズに交換することで、全方位の実環境を撮影する方法である。回転カメラ方式と違い、全方位の動的な環境を撮影することが出来る。しかし、上方の領域は、高い情報が得られるものの、側方領域の情報は乏しく、ステレオ撮像を行なう場合は、工夫が必要である。また、得られる全方位画像は、完全な一点透視投影では

ない。

- 球面ミラーを用いる方法 [24]

図 2(a) のように，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，下方半球を中心に側方領域まで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，環境を提示する上で重要である側方領域の情報は少ないという欠点がある．また，得られる画像は，一点透視投影ではない．

- 円錐ミラーを用いる方法 [25]

図 2(b) のように，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．また，得られる画像は，一点透視投影ではない．

- 双曲面ミラーを用いる方法 [26]

図 2(c) のように，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．また，得られる画像は，一点透視投影である．

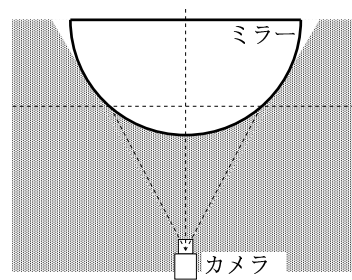
- 放物面ミラーを用いる方法 [27]

双曲面ミラーを用いる方法と同様に，鉛直下向きの放物面ミラーと鉛直上向きに取り付けられたカメラで構成される．カメラに一般の透視投影カメラでなく，正射影カメラを用いる．撮像される画像の特性は双曲面ミラーを用いた場合と同じであり，透視投影の光学特性を持つ．キャリブレーションは双曲面ミラーを用いる場合よりも容易である．

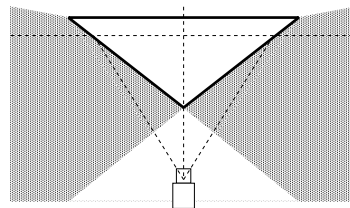
- 6 角錐ミラーを用いる方法 [28]

一点透視投影の光学特性を持つ全方位画像 (パノラマ画像) を得る方法である．6 台のカメラが鉛直上向きに配置されており，それぞれのカメラが，6 角

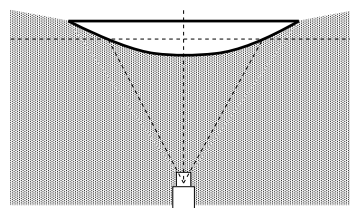
錐ミラーの各側面を覗きこんでいる。全方位の側方視野を高い解像度の画像として取得することができ、かつビデオレートで撮影可能であるが、高い解像度の画像を取得することを目的に複数のカメラ画像を連結して全方位画像を得るため、キャリブレーションが難しい。また、この全方位画像センサを上下に組み合わせることでステレオ撮像を行うことができる。



(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 全方位画像センサの視野領域

カメラを回転させる方法と双曲面ミラー、放物面ミラー、6角錐ミラーを用いる方法以外の全方位画像センサは、光学系の特性が一点透視投影ではないため、通常のカメラ画像へ変換が出来ない。そのため、人間に対する画像の提示を目的に使用するには適さない。これに対して、カメラを回転させる方法は光学特性が一点透視投影であり、高解像度の全周パノラマ画像を撮像できるので静的な現実環境を提示するには適している。しかし、環境全体を撮影するのに時間がかかるために、動的な環境における全方位の情景をビデオレートで同時に獲得するなどの拡張には不向きである。一方、双曲面ミラー、放物面ミラーを用いる全方位画像センサは、光学特性が一点透視投影であり、全方位の映像を一度に撮像できるので、動的な環境をリアルタイムで撮影して利用することが出来る [29, 30]。しかし、全方位の映像を一台のカメラで取得するため、分解能に制限があるという問題がある。最後に、6角錐ミラーを用いる方法は、他の方法より多くの点で優れているが、カメラ画像が均一でないため、すべてのカメラをキャリブレーションすることは容易でない。代表的な全方位センサの能力について以下にまとめる。

表 1 全方位画像センサの比較

名前	1点透視投影	ビデオレート	高分解能	ステレオ
回転カメラ [21]	○	×	○	○
魚眼レンズ [23]	△	○	×	△
球面ミラー [24]	×	○	×	△
円錐ミラー [25]	×	○	×	○
双曲面ミラー [26]	○	○	×	○
放物面ミラー [27]	○	○	×	○
6角錐ミラー [28]	○	○	○	○

2.5 本論文の概要

前述したように、仮想環境内で実際の都市環境を再現する必要性は高い。そこで、本論文においてはカメラ等を使った計測範囲が制限されない受動的な方法で現実環境の街並を仮想環境に取り込むことを目指す。

受動的な方法で広大な都市環境の構築方法としては、IBR の手法を用いて広大な都市環境を構築しようとする試みが提案されている [10, 11]。ユーザの視線方向に合わせた画像を提示する方法である。しかし、搭載したカメラの視点が大きく違うため、得られる全周画像から通常の一点透視投影カメラ画像への変換には、カメラ画像間で補間の処理が必要である。また IBR では、PBR に比べユーザとの対話的処理に乏しく物体操作が行なえない。しかし、PBR の手法を用いて都市環境を表現する場合は、物体の 3 次元形状が必要であり、広大な都市環境の画像を効率良く収集する必要がある。

以上のことから、本論文では、一点透視投影の光学特性を持つ全方位画像センサを移動させながら都市環境を撮影することで物体の形状を求め、PBR で仮想環境内に都市環境を 3 次元再構築することで、対話的処理を可能とする手法を提案する。本論文では、2.4 節での議論に基づいて、6 角錐ミラーを用いた全方位ステレオ画像センサ [28] を使用する。

しかし、2 眼のステレオ撮像では距離に関する信頼性に乏しく、奥行き解像度も不十分である。そこで、全周パノラマ動画像中の特徴点を追跡し、ステレオ撮像による距離と特徴点の移動量により求めた距離の両方を用いることで、ステレオ撮像による距離推定の信頼性を向上させる手法を提案する。また、得られた信頼性の高い距離情報を使用して、ドローニー三角分割法 [35] によりポリゴン生成し、仮想環境内に街並みを取り込む実験を行なった。

3. 全方位ステレオ画像センサのキャリブレーション法

2.4節で述べたとおり 6 角錐ミラーを用いた全方位ステレオ画像センサは、全方位の画像を高い解像度で撮像することが出来る。しかし本センサは複数のカメラ画像を連結しているため、カメラの調整が十分でないと隣合うカメラ画像間で視覚的な連続性および上下のカメラ画像間でエピポーラ線が一致しないという問題がある。川西ら [28] は、撮像画像上にある鏡面領域を等しくすることで各カメラの光軸方向の調整を行い、隣り合う画像の連続性と上下の画像のエピポーラ線が一致するように撮像画像と全周画像との対応点を求め画像を切り出した。しかし、この手法はカメラの調整が隣接する画像間および上下の全周画像間の相対的な調整のため誤差の蓄積が大きく、パラメータの調整が煩雑なため、キャリブレーションの精度が悪かった。そこで、本章では、大型円筒スクリーン上に投影されている位置が既知である格子パターンを使用することで、蓄積誤差の無いセンサのキャリブレーションを行ない、ステレオ撮像における精度を向上させる手法を提案する。

まず、3.1節で 6 角錐ミラーを用いた全方位ステレオ画像センサについて述べ、3.2から 3.6節でセンサのキャリブレーションについて述べる。

3.1 6 角錐ミラーを用いた全方位ステレオ画像センサ

6 角錐ミラーを用いた全方位ステレオ画像センサの構成および外観

全方位画像を取得するための各構造は、上部カメラを例にすると図 3 のように鉛直上向きの 6 角錐ミラーとその上に鉛直下向きに配置した 6 台の CCD カメラから構成される。6 角錐ミラーを使用することで、虚像上でカメラのレンズ中心が 1 点に重なるため 1 点透視投影の光学特性を持つ全周パノラマ画像を得ることが出来る。図 4 に本センサの外観図を示す。

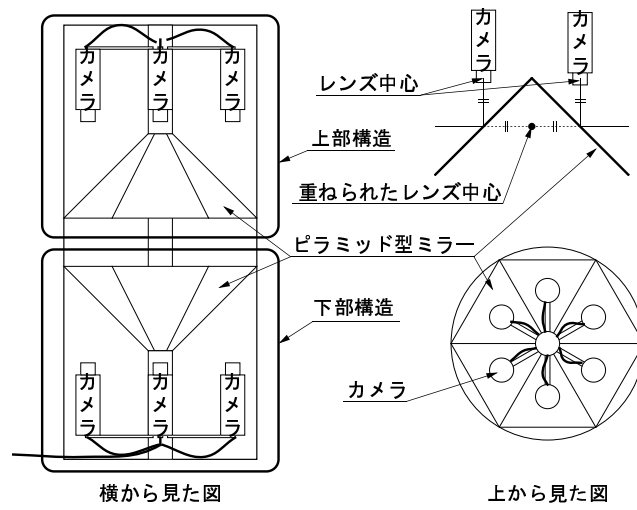


図 3 全周ステレオ画像センサの構成



図 4 全周ステレオ画像センサの外観

上下カメラ間のステレオ撮像系

上下の全周パノラマ画像から、全周ステレオ画像上の点を図 5 のように縦方向の基線を持ったステレオ座標系で表現する。ワールド円筒座標系の点 $P(\Theta, H, L)$ が、上下の円筒面画像座標系の座標 $p_u(\theta_u, h_u)$, $p_d(\theta_d, h_d)$ にそれぞれ現れたとするとエピポーラ拘束により、

$$\theta_u = \theta_d \quad (8)$$

が成立し、点 $P(\Theta, H, D)$ の座標はそれぞれ次のように表すことができる。

$$\Theta = \theta_u = \theta_d \quad (9)$$

$$H = \frac{b \cdot (h_u + h_d)}{2(h_d - h_u)} \quad (10)$$

$$L = \frac{b \cdot f}{h_d - h_u} \quad (11)$$

式 (11) より、 b, f が固定であれば奥行きは視差 $d \equiv h_d - h_u$ のみに依存することがわかる。本センサでは、上下の全周パノラマ画像は、上下の全周パノラマ画像の円筒座標系の視差を算出することで、実環境中での、センサから物体までの距離を推定できる。次に、上下パノラマ画像間の対応点決定に用いる正規化相互相関について述べる。

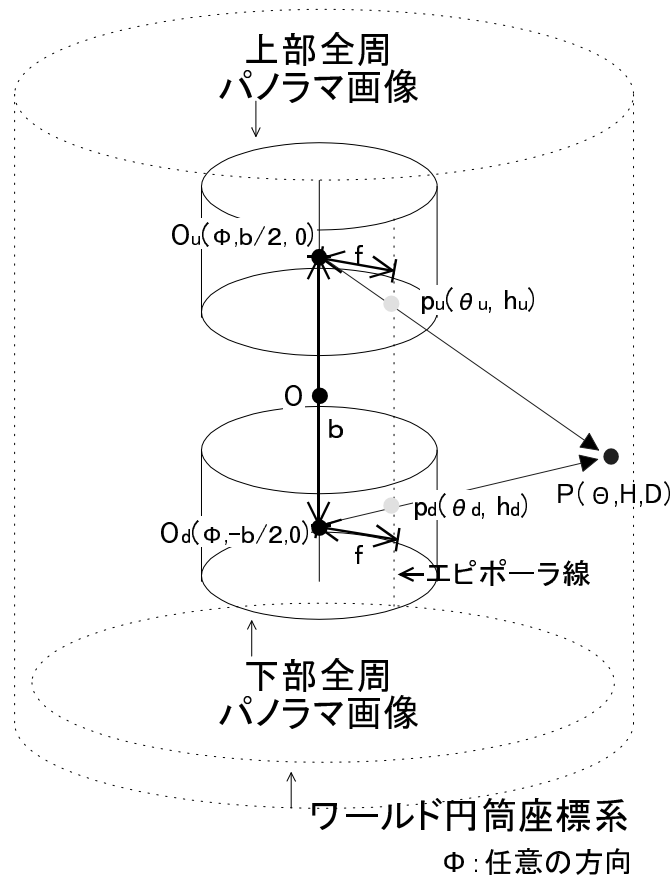


図 5 全周パノラマ画像における投影系

正規化相互相関

正規化相互相関は、2.2.1節で述べたが、パノラマ画像では座標系が異なるため、その式の説明を行なう。基準画像 P_r 上の注目点に関して、照合を行なう領域をウィンドウを W 、テンプレートとなる部分画像の画素単位の輝度値を $P_r(\theta_r, h_r)$ ($(\theta_r, h_r) \in W$) とする。また、対応点探索を行なう参照画像 P_s 上のある位置 (θ_s, h_s) のウィンドウによって得られる部分画像の画素単位の輝度値を $P_s(\theta_r, \theta_s)$ で表し、対応点の探索範囲 S はウィンドウの位置 (θ_s, h_s) の集合とする。ここで、マッチング処理を行なうウィンドウ W の大きさは $M \times N$ の矩形領域とすれば、正規化相互相関 $Corr(f, g, u, v)$ は以下の式で

表される.

$$Corr =$$

$$\frac{\sum_{j=-\frac{N}{2}}^{+\frac{N}{2}} \sum_{i=-\frac{M}{2}}^{+\frac{M}{2}} \{P_r(\theta_r + i, h_r + j) - \overline{P_r}\} \cdot \{P_s(\theta_s + i, h_s + j) - \overline{P_s}\}}{\sqrt{\sum_{j=-\frac{N}{2}}^{+\frac{N}{2}} \sum_{i=-\frac{M}{2}}^{+\frac{M}{2}} (P_r(\theta_r + i, h_r + j) - \overline{P_r})^2 \cdot \sum_{j=-\frac{N}{2}}^{+\frac{N}{2}} \sum_{i=-\frac{M}{2}}^{+\frac{M}{2}} (P_s(\theta_s + i, h_s + j) - \overline{P_s})^2}} \quad (12)$$

3.2 Tsai の手法による幾何学的歪み補正

本センサに使用されているカメラは、広角カメラ特有の幾何学的歪みを起こす。そこで、図 6 の (a) のような位置が既知の格子をカメラ画像内に投影し、Tsai のキャリブレーション法 [31] を使用して、幾何学的歪みを補正した。図 6 の (b) に補正後の画像を示す。



(a) 補正前

(b) 補正後

図 6 Tsai の手法による幾何学的歪みの補正

3.3 円筒パノラマ画像の取得

補正された各カメラ画像を、6 角柱側面へ投影した全周パノラマ画像から円筒パノラマ画像へ変換するには円筒パノラマ画像上の点 (θ, h) と撮像画像上の点 (x, y) の対応を求める必要がある。この対応関係は、以下の式と図 7 で表される。

$$x = C_x + R \cdot \tan \theta \quad (13)$$

$$y = C_y + \frac{h \cdot R}{r \cdot \cos \theta} \quad (14)$$

ここで, R : カメラの焦点距離 (画素), r : 生成する全周パノラマ画像の半径 (画素), C_x, C_y : 切り出す画像領域の中心座標, θ : 各カメラの光軸方向となす角度, h : 光軸方向からの高さ (画素), を表す. 従って, 撮像画像から円筒パノラマ画像への変換には, 各カメラの R, C_x, C_y を決定する必要がある.

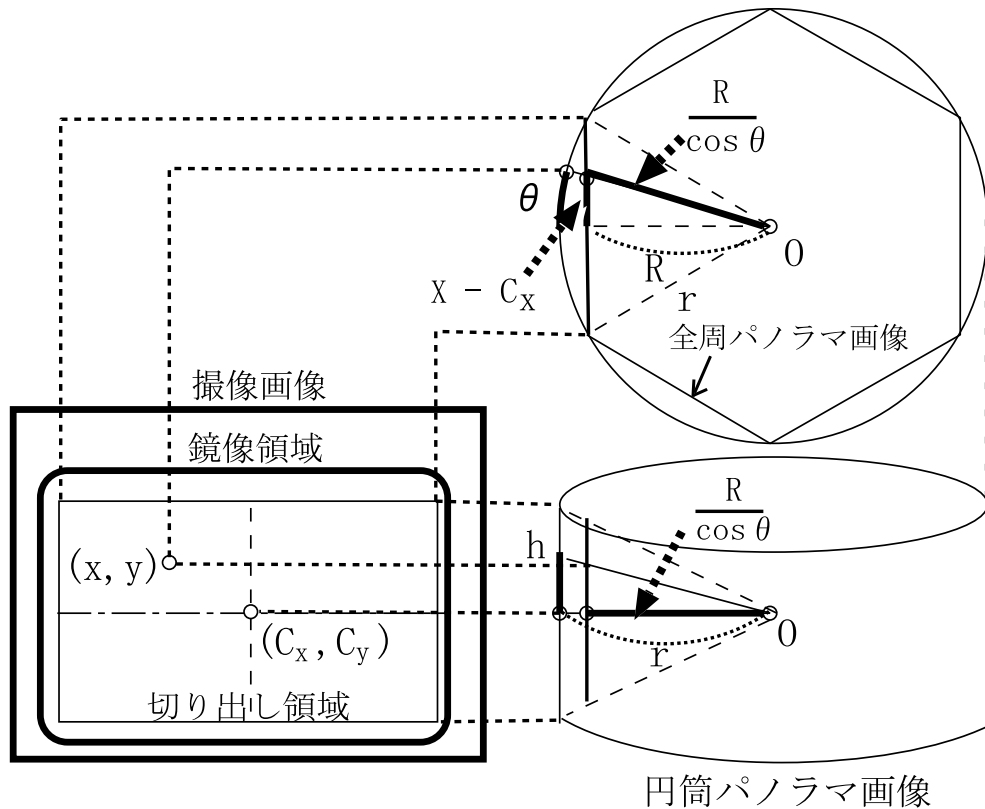


図 7 円筒パノラマ画像への変換

3.4 円筒パターンを用いたキャリブレーション

図 8 のように円筒スクリーンを中心に本センサを置き, 格子パターンを表示したスクリーン面を撮像し, 円筒スクリーンの表示通り円筒パノラマ画像に変換できるパラメータ (R, C_x, C_y) を求める. 最初に, 円筒スクリーンの中心に本センサを置き, 円筒スクリーンに 30 度毎に縦線を表示することで, 各カメラが 60 度毎に重なりなく撮像できるようにセンサを調整し, 各カメラの撮像画像の中程に映っている縦線の座標を各カメラの C_x とすることで, 隣のカメラとの光軸方向を 60

度にする。次に、各撮像画像上の縦線の位置から 60 度の画角を持つ領域の幅 W (画素) を求めることで、以下の式から焦点距離 R を求める。

$$R = \frac{W}{2 \cdot \tan 30^\circ} = \frac{\sqrt{3}}{2} W \quad (15)$$

この焦点距離 R を用いることにより各カメラの撮像画像から正確に 60 度の領域を切り出すことが出来る。この時、格子の縦の線が垂直に映ってなければ、カメラが回転しているのでレンズ中心を回転軸として、カメラ画像を回転させる。そして、上部、下部レンズ中心の高さを実測で計測し、円筒スクリーン上に同じ高さの水平な横線を表示する。各撮像画像上のこの横線の座標を各カメラの C_y とすることで、隣のカメラとの縦ずれをなくす。最後に、カメラ画像上の格子の間隔が左右でわずかにくい違う場合がある。これは、カメラの光軸方向と鏡面との関係がわずかに傾いているために起こるので、カメラ画像に投影変換を行なうことで補正する。投影変換の式は、画像上の X 軸を中心に $B_x(radius)$ 、Y 軸を中心に $B_y(radius)$ 回転させるとすると以下の式で表される。

$$X = \frac{R \cdot (x - C_x)}{R - \{\tan(B_x) \cdot (x - C_x) + \tan(B_y) \cdot (y - C_y)\}} + C_x \quad (16)$$

$$Y = \frac{R \cdot (y - C_y)}{R - \{\tan(B_x) \cdot (x - C_x) + \tan(B_y) \cdot (y - C_y)\}} + C_y \quad (17)$$

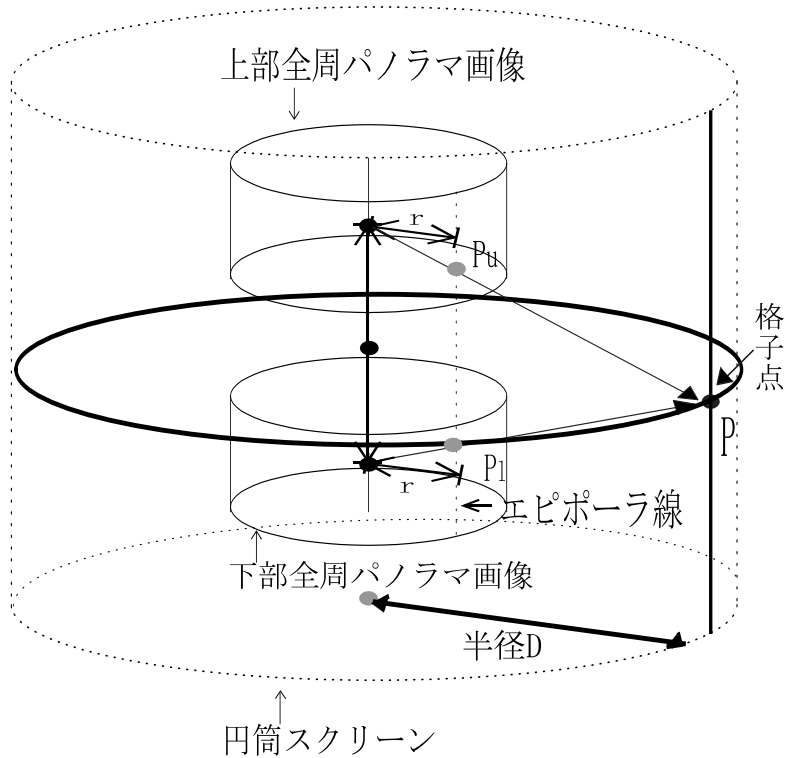


図 8 円筒スクリーン面と円筒パノラマ画像間の座標関係

3.5 距離定数の決定

2.2.1節で、一般のステレオ法においては、環境中の対象までの距離は、視差 d 、基線長 b 、および焦点距離 f から求めることが出来ることを述べた。しかし、本センサにおける焦点距離とは、各カメラの内部パラメータの焦点距離ではなく、鏡面とカメラの投影面との距離である。そのため、各カメラの鏡面に対する距離が違う場合は、一意に焦点距離 f を定めることは難しい。そこで、円筒スクリーンに投影された格子の視差を求めることで、センサ固有の距離定数 K を求める。この距離定数 K を用いることで、上下円筒パノラマ画像間上での視差 d をから、環境中の対象までの距離を求めることが出来る。以下に、距離定数と実環境中の距離との

関係式を示す.

$$L = \frac{K}{dis} \quad (18)$$

ここで, L : 対象までの距離 (m), dis : 対象の上下円筒パノラマ画像間での視差 (画素), K : 距離定数である.

なお, 距離定数 K は, 上下円筒パノラマ画像上に撮像された円筒スクリーン上の格子の視差 d (画素) と円筒スクリーンの半径 $D(m)$ より, $K = D \times d$ で表される.

3.6 カメラ画像間の色・輝度補正

これまでの手法で, 高精度に隣り合うカメラの座標位置を揃えることが出来る. しかし, 構成されたパノラマ画像は, 各カメラの色・輝度パラメータの違いから, 色の連続性がなく視覚的な違和感を感じることもある. 6角錐ミラーを用いた全方位画像センサを用いて構成された全周パノラマ画像の色・輝度補正に関しては, 2つの手法が提案されている. 1つは, 中川 [32] が提案している手法で, 隣合う画像の重複領域の平均輝度を使用して輝度を補正する方法である. しかし, 重複領域を作成するために各カメラのレンズ中心をずらすため, 各カメラの境界付近で, センサに近い物体が2重映りしてしまう可能性がある. もう1つは, 島村 [33] が提案する手法では, 画像の境界付近における色の連続性が均一になるように各カメラ画像の色・輝度パラメータを推定し, 違和感のないパノラマ画像を作成することが出来る. しかし, これらの手法でも各カメラ画像間の色・輝度の違いをすべて吸収することは出来ない.

4. 全周パノラマ動画像からのシーンの3次元再構成

この章では、全周パノラマ動画像からシーンを再構成する手法について述べる。3.1節で述べた通り、本論文で使用する全方位ステレオ画像センサは、上部カメラと下部カメラ間の視差を求めることで、物体の距離を推定することができる。しかし、2眼ステレオによる推定距離は、マッチングの信頼性と奥行き解像度の点で不十分である。そこで、上下カメラ間のステレオ視による距離と、全周パノラマ動画像中に存在する特徴点を追跡することでオプティカルフローを算出し、その動き量(モーション)を求めることで、実環境中に存在する物体の距離を高精度で推定する手法を提案する。

本手法の手順は、図9のようになる。ある時刻の上下の全方位パノラマ画像のステレオ視による特徴点の対応関係とその時刻から時系列方向と時系列逆方向の前後フレームに渡ってオプティカルフローを算出して、センサの移動量を計算する。この際、全周パノラマ動画像のオプティカルフロー算出に、カメラ間の色・輝度パラメータの違いから通常のテンプレートマッチングを用いることが出来ない。そこで、カメラ画像間の色・輝度パラメータの違いに影響を受けないように部分画像ごとに平均輝度を求め、各輝度を部分画像の平均輝度で引くことで線形な明度変化に影響されずに特徴点を追跡する。また、オプティカルフローから実環境の距離を求めるためには、センサの移動量を求める必要がある。そこで、オプティカルフローおよびステレオ視による対応関係の整合性の取れた特徴点を使うことで、センサの移動量を推定する。最後に、前後フレームにわたってもとめた2つのモーションによる距離、ステレオ視から推定した距離を統合し、信頼性の低い距離を除くことで、実環境中の物体の形状を推定する。

以下、4.1節で、モーションステレオ撮像系について述べ、4.2節で、動画像中に存在する特徴点の追跡方法、4.3節で、センサの移動量推定について述べ、最後に、4.4節で、距離の統合方法について述べる。

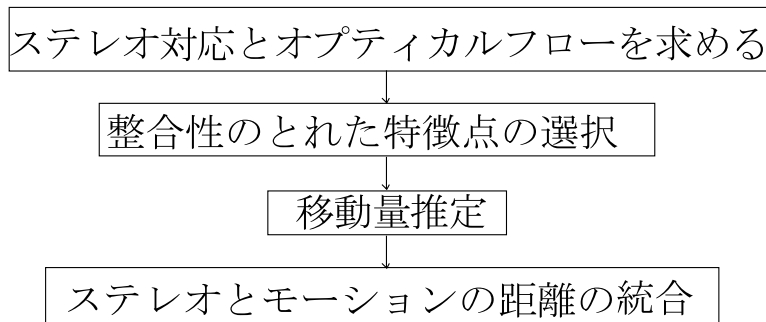


図 9 ステレオとモーシヨン情報による距離の統合手順

4.1 全周パノラマ動画像によるモーシヨンステレオ投影系

全周パノラマ画像における投影系は、図 10で示すように基準位置 P_1 におけるセンサの移動方向に対する観測対象の方位角度を Θ_1 、センサ移動後の位置 P_2 におけるセンサの移動方向に対する観測対象の方位角度を Θ_2 、 P_1 と P_2 間の距離を B とすれば、 P_1 および P_2 からの観測対象の距離 L_1, L_2 は以下の式で求まる。

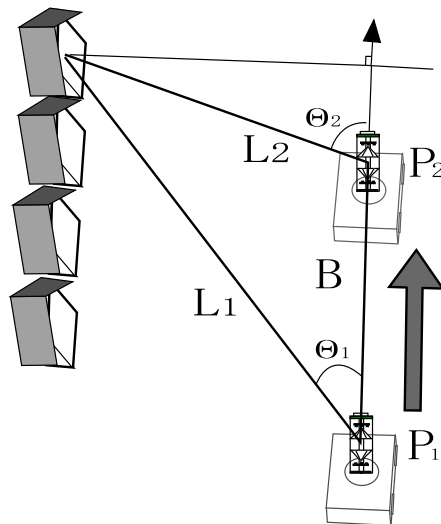


図 10 全周パノラマ動画像によるモーシヨンステレオ投影系

$$L_2 = \frac{B \cdot \tan \Theta_1}{\sin \Theta_2 - \cos \Theta_2 \tan \Theta_1} \quad (19)$$

$$L_1 = \frac{L_2 \cdot \sin \Theta_2}{\sin \Theta_1} \quad (20)$$

ただし, Θ_1, Θ_2 の方位角は, センサの移動方向に対する方位角であって, 全周パノラマ画像上での方位角ではない. 画像上での観測対象の方位角 θ_1, θ_2 とセンサの移動方向に対する方位角 ω_1, ω_2 の関係から, 以下の式のように求める.

$$\Theta_1 = \theta_1 - \omega_1 \quad (21)$$

$$\Theta_2 = \theta_2 - \omega_2 \quad (22)$$

$$(23)$$

ω_1, ω_2 は, P_1, P_2 におけるセンサの画像上での方位と移動方向に対する方位との間の角度 (センサのヨー角) である. 基準位置 P_1 から P_2 にセンサが移動する間, 全周パノラマ画像上にある特徴点を追跡することで, オプティカルフローを算出する. 動き量から実環境中の観測対象の距離を求めるには, カメラ移動量 B および, 画像上での観測対象の方位 θ_1, θ_2 , 移動方向に対するセンサのヨー角 ω_1, ω_2 を求める必要がある. そこで, オプティカルフローとステレオマッチングの整合性の取れた特徴点からセンサの移動量 B , センサのヨー角 ω_1, ω_2 を推定することで, 特徴点の動き量 (モーション) から実環境内の物体の距離を推定する.

4.2 全周パノラマ動画像におけるオプティカルフロー

4.2.1 カメラの色・輝度パラメータを考慮したオプティカルフロー

オプティカルフローを求める方法には, 輝度勾配を用いる方法とブロックマッチングを用いる方法がある. 輝度勾配法は, 計算コストが低く, 密なフローを得やすいという利点があるが, 本センサのように全周パノラマ画像を構成している各カメラの色・輝度パラメータが異なる画像では輝度不変の法則が成り立ちにくい. そのため輝度勾配を用いる方法は適していない. そこで, 2.2.1で述べたように線形な明度変化に影響されない類似度尺度評価である正規化相互相関を用いたブロック

マッチングを用いる。ただし、ステレオ視の時と違い、照合を行なう部分画像が異なるカメラ画像で構成されていると、同じ情景の部分画像であったとしても、構成するカメラ画像の色・輝度パラメータの違いから明度の変化が起こり、照合する部分画像との相関値が低くなってしまう。そこで、各カメラの色・輝度パラメータを考慮したブロックマッチングの手法を提案する。提案手法では、カメラの照合する部分画像ごとに平均輝度を求める。以下、その部分画像の分割方法について述べる。

4.2.2 平均輝度分割方法

ある時刻 t における基準画像から抜きだした矩形画像を基準ウインドウ W_r 、時刻 $t+1$ における参照画像から抜きだした矩形画像を探索ウインドウ W_s とする。基準ウインドウ W_r と探索ウインドウ W_s は、同じ情景の部分画像である。仮に、基準ウインドウにはカメラ画像間の境界を含まず、仮に探索ウインドウ W_s にはカメラ画像間の境界を含んでいるとする。この場合、探索ウインドウ W_s は異なる色・輝度パラメータを持つカメラで撮影されたことになり、基準ウインドウと同じ情景の部分画像であるにもかかわらず、探索ウインドウの境界を越えた情景の部分画像は、明度に変化する。そのため、基準ウインドウ W_r と探索ウインドウ W_s 内の各ピクセルの輝度値を、ウインドウ全体の平均輝度値で引いたとしても、明度の変化を吸収することが出来ず、違う情景の部分画像で構成される探索ウインドウと基準ウインドウとの相関値よりも低くなる場合がある。そこで、基準ウインドウまたは参照ウインドウのいずれかがカメラの境界を含んでいる場合は、カメラ画像の境界で矩形画像を区切り、部分画像ごとに平均輝度を求め、部分画像内の各ピクセルの輝度値を部分画像の輝度平均値で引いてやることで明度の変化を吸収し、参照画像と基準画像のマッチングを行なう。以下に、基準ウインドウ、探索ウインドウがカメラ間の境界を含む場合の部分画像の分割方法に関して、場合ごとにわけて考える。

場合 1: 基準ウインドウには、カメラ間の境界を含まず、探索ウインドウには境界を含む場合

図 11 のように、基準画像から抜きだした基準ウインドウ画像 $W_r(\theta, h)$ が、カ

メラ間の境界を含まず、参照画像中の探索ウインドウ $W_s(\theta, h)$ にはカメラ間の境界を含んでいる。参照ウインドウは、境界によって2つの部分画像 r_1, r_2 に分けられたとする。この時、参照画像の r_1 の部分画像は、基準画像の領域画像と同じカメラ画像であり、明度の変化は微小である。しかし、参照画像の r_2 の部分画像は、違うカメラ画像のため明度が変化する。そこで、参照ウインドウの左端から D_s ピクセルの位置でカメラ間の境界で区切られたなら、基準画像も矩形画像左端から D_s ピクセルの位置で区切り、それぞれの部分画像 r_1, r_2 で求めた平均輝度量で部分画像内の輝度値を引く。これによって、カメラごとの色・輝度パラメータを原因とする明度変化の影響を受けないようにする。

場合 2: 探索ウインドウには、カメラ間の境界を含まず、基準ウインドウには境界を含む場合

場合 1 で行なった作業とは、逆の作業を行なう。基準ウインドウが区切られた位置 D_r で、探索ウインドウを r_1, r_2 の部分画像に区切る。

場合 3: 基準ウインドウおよび探索ウインドウの両方とも、カメラ間の境界を含む場合

基準ウインドウ W_r が、探索ウインドウ W_s ともカメラ画像間の境界を含んでいる。この場合、図 12 のように、基準ウインドウは参照ウインドウの区切られた位置 D_r 、探索ウインドウ D_s は基準ウインドウの位置で、お互いの矩形画像を区切りあう。そのため、場合 1, 2 と違い3つの部分画像 r_1, r_2, r_3 に分割される。

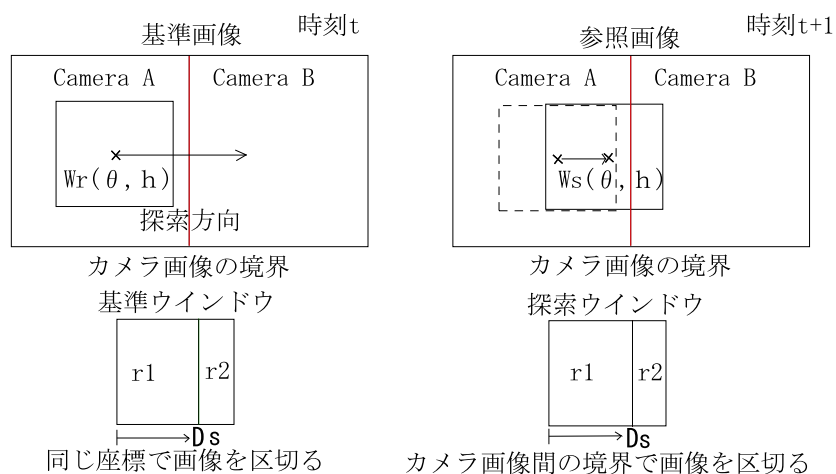


図 11 平均輝度光量分割アルゴリズム ケース: 1

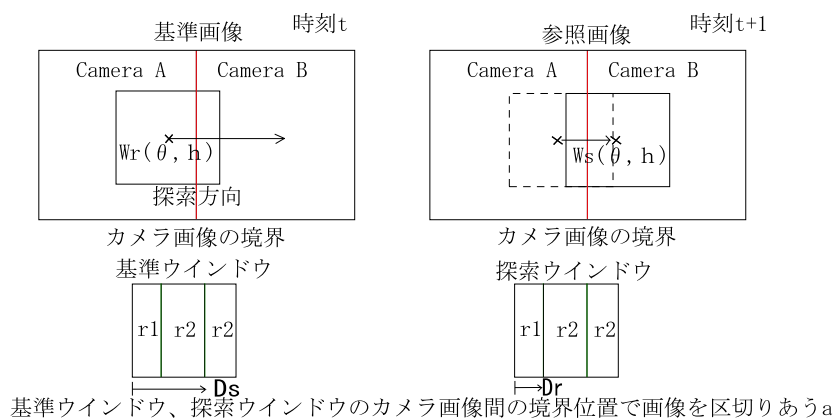


図 12 平均輝度光量分割アルゴリズム ケース: 3

分割された部分画像 r_1, r_2, r_3 ごとに平均輝度値を求める。よって、カメラの境界が、基準ウインドウ、探索ウインドウのいずれかに含まれている場合の正規化相互相関値は、以下の式で求められる。なお、ウインドウ W の大きさは $M \times N$ 、基準ウインドウの部分画像ごとの平均輝度は $\overline{P_r[r_1, r_2, r_3]}$ 、探索ウインドウの部分画像ごとの平均輝度は $\overline{P_s[r_1, r_2, r_3]}$ とする。

$$\begin{aligned}
Corr = & \\
& \frac{\sum_{j=-\frac{N}{2}}^{+\frac{N}{2}} \sum_{i=-\frac{M}{2}}^{+\frac{M}{2}} \sum_{[r_1, r_2, r_3]} \{P_r(\theta_r + i, h_u + j) - \overline{P_r[r_1, r_2, r_3]}\} \cdot \{P_s(\theta_s + i, h_d + j) - \overline{P_s[r_1, r_2, r_3]}\}}{\sqrt{\sum_{j=-\frac{N}{2}}^{+\frac{N}{2}} \sum_{i=-\frac{M}{2}}^{+\frac{M}{2}} \sum_{[r_1, r_2, r_3]} (P_r(\theta_u + i, h_u + j) - \overline{P_r[r_1, r_2, r_3]})^2} \\
& \cdot \sqrt{\sum_{j=-\frac{N}{2}}^{+\frac{N}{2}} \sum_{i=-\frac{M}{2}}^{+\frac{M}{2}} \sum_{[r_1, r_2, r_3]} (P_s(\theta_s + i, h_s + j) - \overline{P_s[r_1, r_2, r_3]})^2}}
\end{aligned} \tag{24}$$

部分画像内にある画素の輝度値を画素を含む部分画像の平均輝度で引いてやることで、基準ウインドウ、参照ウインドウの各部分画像に対する線形の明度変化を吸収する。ただし、分割した部分画像間の輝度の勾配は相関値に反映されなくなるので、ウインドウ画像の縦横の幅には、ある程度の大きさが必要である。

4.3 全方位画像センサの移動量推定

全方位画像センサにおける移動量推定の方法は、精度の良い自己位置推定が可能であることが確認されている [34]。しかし、センサの移動量を推定するのに誤った対応関係をもつ特徴点を使用すると、正しい推定結果が得られるとは限らない。そこで、特徴点追跡による前後フレーム間の対応関係とステレオ視による対応関係の整合がとれた特徴点を高い信頼性を持つもつ特徴点として選択する。

信頼性の高い特徴点の選択

図 13のように、 F_t の画像上に存在する特徴点を時系列方向に a フレーム間追跡することで得た対応点を今度は、 $F_t + a$ フレームにおける上部パノラマ画像と下部パノラマ画像間で対応点を求める。次に、下部パノラマ画像対応点の座標を、 $F_t + a$ から F_t の特徴点を時系列とは逆向きに追跡する。結果として、時系列に対する追跡、ステレオ視を行なったにも関わらず、初期座標に戻ってきた点を整合性のとれた特徴点とすることが出来る。このような整合性のとれた特徴点には、誤りや誤差も含まれているが、大部分が正しいと考えられる。

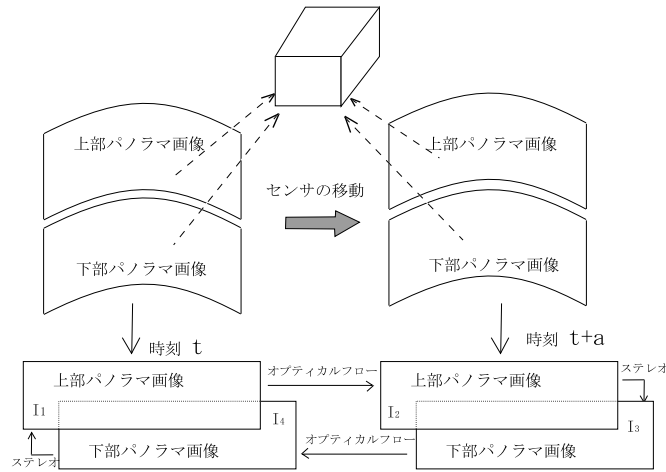


図 13 整合の取れたモーショントステレオ対応

各カメラ画像内で整合性のとれた特徴点の中から各対応点間の座標の差分の大きい特徴点を選択する。これは、移動量が微小な対応関係をもつものは、遠方およびセンサの移動方向に近い特徴点で、ステレオ視のみで整合性をとった特徴点だからである。また、各カメラから1点ずつ特徴点を選択することで角度が分散され、精度の良い移動量推定が行なえる。

移動パラメータ推定手法

図 10から、距離を求めるのに必要なパラメータはセンサの移動量 B および移動方向に対するセンサのヨー角 ω_1, ω_2 である。各カメラの特徴点の画像の観測方位を θ_1^n, θ_2^n 、ステレオ視の視差を Dis_s^n とする。選択した特徴点のステレオの視差 Dis_n からの距離 L_s^n と、未知パラメータセット (B, ω_1, ω_2) によって求めたモーシヨンの距離 L_f の差を足し合わせたものを評価値とし、値が 0 に近づくように未知パラメータセット (B, ω_1, ω_2) を求める。以下にその評価値の式を示す。なお、 K は、ステレオ視におけるセンサの距離定数である。

$$L_f^n = \frac{B \cdot \tan(\theta_1^n - \omega_1^n)}{\sin(\theta_2^n - \omega_2^n) - \cos(\theta_2^n - \omega_2^n) \tan(\theta_1^n - \omega_1^n)} \quad (25)$$

$$L_s^n = \frac{K}{Dis_n} \quad (26)$$

$$E = \sum_{i=1}^6 |L_f^i - L_s^i| \quad (27)$$

なお、このセンサの移動量推定は、既知パラメータが、ステレオの距離、2地点の方位角あわせて18個あり、未知パラメータ (B, ω_1, ω_2) は3つである。しかも、センサの移動方向に対するヨー角方向に関する2つのパラメータ ω_1, ω_2 は、取り得る範囲が狭いことから、推定される結果の差は少ないと考えられる。最適解を導き出す方法は山登り法を使用し、最適解が得られるまで逐次計算を繰り返す。センサの移動量を推定することで、特徴点の動き量 (モーション) から観測対象の距離を推定できる。

4.4 2眼ステレオとモーションステレオの距離の統合

ステレオによって求めた距離とモーションステレオで求めた距離を統合することにより、正確な距離情報のみを取得する。ある特徴点 n に対して、ステレオ視による距離 S_n 、時系列方向に特徴点追跡を行なったモーションステレオの距離 F_n と、時系列逆方向のモーションステレオの距離 R_n の3つの距離が求められる。これらの距離情報が、一定の範囲内であれば、その特徴点の距離情報は信頼性が高いと判断できる。そこで各距離の違いの差の平均が、しきい値 E より低ければ、その特徴点に関する3つの距離は、信頼性の高い値と判断できるので、3つの距離の平均を特徴点の距離 L_n とする。次に時系列方向による距離 L_f 、もしくは逆方向による距離のどちらかが、ステレオ視による距離 L_s との差がしきい値 E 以下とする。この場合、時系列方向もしくは時系列逆方向の特徴点追跡は、隠蔽物 (オクルージョン) のために追跡がうまくいかなかったと考えられるので、しきい値以下で、かつステレオとの距離に近い方のモーションの距離を特徴点の距離 L_n にする。以

下の式にその関係を示す.

$$L^n = \begin{cases} \{F_n + R_n + S_n\}/3 & : \{ |F_n - S_n| + |R_n - S_n| + |F_n - S_n| \} < E \\ F_n & : |F_n - S_n| < E/3, |F_n - S_n| \text{ else if} \\ R_n & : |R_n - S_n| < E/3, |R_n - S_n| \text{ else if} \\ none & : \text{ else} \end{cases} \quad (28)$$

なお, 特徴点がセンサの移動方向に近い場合, 特徴点の動き量は微小なため, モーションによる距離の信頼性が低下するので, ステレオ視による距離を用いる. また, 信頼性の高い特徴点のみを選択するため, 距離情報が偏って分布する. そのため, 疎な部分では違和感のある 3 次元モデルが生成される場合があるので, 疎な部分には移動距離推定で出した整合のとれている特徴点のステレオ視による距離情報を付加する. この距離によって, 屋外環境を模した 3 次元モデルを生成することができる.

5. 実験と考察

5.1 実験システム

5.1.1 移動撮影システム

6角錐ミラーを用いた全方位ステレオ画像センサにより得られた全周ステレオ画像情報は、12台のカメラ毎に別々の平面透視投影画像として記録される。同時刻における全周ステレオ画像を得るためには本センサ上のカメラによるステレオ視、およびオプティカルフローは同期をとって行なわれる必要がある。そこで、本センサでは図14のようにシンクジェネレータが生成する同期信号を各カメラに分配する。また、同時に同期信号をタイムコードジェネレータに与え、同期のタイミングに合わせたタイムコードを生成し、各ビデオデッキに生成したタイムコードを供給する。ビデオデッキは接続したカメラの映像をタイムコードとともにビデオテープに記録する。以上のシステムにより、全方位の画像が時刻情報とともに、12個のビデオテープにビデオレートで記録することが出来る。

データ収集用の移動車両は、NISSAN社製ELGRANDを使用し、12台のビデオデッキ、シンクジェネレータ、タイムコードジェネレータを搭載し、油圧式の昇降柱を使うことで、全方位センサを屋外に出すことが出来る。以下、図15に移動撮影システムの外観を示す。

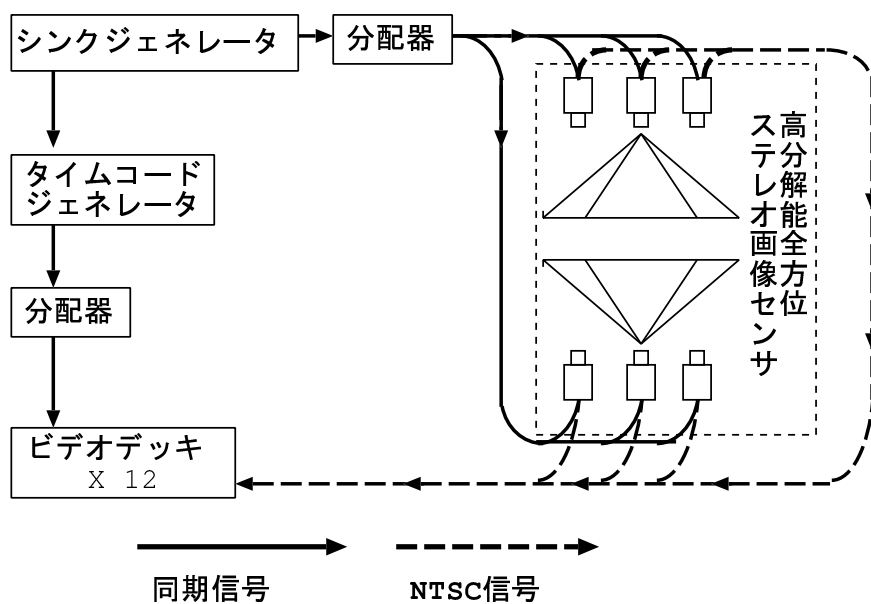


図 14 動画像取得システムの構成



図 15 センサ取り付け時の車の外観

5.1.2 画像入力システム

本センサでは、全周のステレオ画像情報を 12 枚の透視投影画像として記録する。ある時刻の全周ステレオパノラマ画像を生成するためには、撮像した 12 台の

カメラのビデオ画像から、同時刻の画像を切り出し、計算機に入力する必要がある。そこで、本論文ではタイムコード読み取り機能付きビデオプレーヤ、ビデオキャプチャーボード、ワークステーションから構成したシステムを使用した。各カメラ画像の入力時刻を正確に合わせるために、タイムコード読み取り機能付きビデオプレーとワークステーションを RS232C を使って同期を取りながら画像を量子化した。

5.2 実験結果

5.3 キャリブレーション結果

予備実験として、センサのキャリブレーションを行い、全周パノラマ画像と全周ステレオ距離画像を生成した。円筒スクリーンは、半径 $D = 3\text{m}$ の円筒型スクリーン面に、グラフィックワークステーションからの映像を 6 台のプロジェクタで投影するものである。格子パターンとして 10 度ごとの縦線と水平に 7 本の横線を投影した。キャリブレーションを行ったセンサで屋外の撮影を行い、図 16 に屋外環境で撮影して得た上下全周パノラマ画像と、図 17 にステレオ視による全周距離画像 (3006×330 画素) を生成した。この結果から隣り合った画像間で幾何学的に不連続な箇所が無く、キャリブレーションが精巧に行われたことが解る。なお、センサ固有の距離定数 K は、102 と求められた。

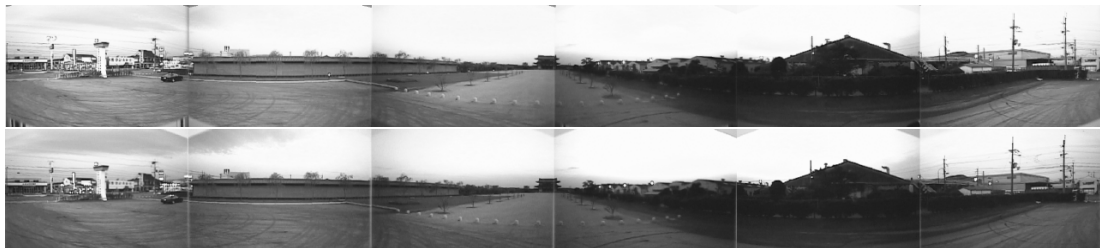


図 16 上部および下部パノラマ画像

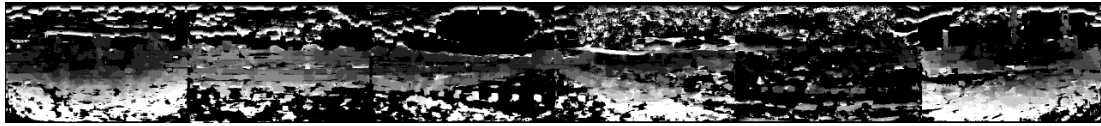


図 17 全周ステレオ距離画像

5.4 シーンの 3 次元再構成

本手法の有効性を検証するために、5.1.1節で挙げたシステム構成で実験を行なった。実験を行なう環境は、一般的な住宅地を選んだ。得られたビデオ画像から任意に 60 フレーム (約 2 秒間) を計算機に入力し、全周パノラマ動画画像を生成した。

得られた全周パノラマ動画画像の 30 フレーム目を基準位置として、ステレオ視を行なった。また、時系列方向、時系列逆方向の前後 30 フレーム (約 1 秒) の間特徴点を追跡した。図 18 に全周ステレオ画像センサから得たパノラマステレオ動画画像を示す。

特徴点の選択

特徴点の選択は、Sobel フィルタによりエッジ部分を抽出し、ある一定のしきい値以上の値をもつものを特徴点として選択した。特徴点として選択した画像を図 19 に示す。なお、しきい値は経験的に求めたものである。

ステレオ視

Sobel フィルタにより選択した特徴点を、基準位置 (30 フレーム) の上下のパノラマ画像間でステレオ視を行なった。図 20 に、その結果を示す。結果の濃淡画像において、明るい点ほど近くにあることを示している。

特徴点追跡

選択した特徴点を時系列方向、時系列逆方向へ前後フレームに渡って追跡した結果を図 21, 22 に示す。結果の濃淡画像において、明るい点ほど動き量は大きいことを示している。

移動量推定

時系列方向, 時系列逆方向に対するセンサの移動距離推定結果を以下の表 2, 3, 4, 5に示す.

表 2 センサの移動量推定に使用した入力パラメータ : 時系列方向

選択した特徴点 (カメラ番号)	30 フレームでの 観測方位 θ_1 (<i>degree</i>)	60 フレームでの 観測の方位 θ_2 (<i>degree</i>)	30 フレームでの 視差 (画素)
1	38.80	35.56	19
2	62.87	56.64	14
3	161.31	160.95	14
4	213.29	216.88	11
5	239.76	247.06	22
6	311.61	314.97	9

表 3 センサの移動量推定結果 : 時系列方向

30 フレームでの センサの方位 (<i>degree</i>)	60 フレームでの センサの方位 (<i>degree</i>)	推定距離 (<i>m</i>)	評価値 (<i>m</i>)
177.83	178.99	0.631	4.72

表 4 センサの移動量推定に使用した入力パラメータ：時系列逆方向

選択した特徴点 (カメラ番号)	0 フレームでの 観測方位 $\theta_1(\text{degree})$	30 フレームでの 観測の方位 $\theta_2(\text{degree})$	30 フレームでの 視差 (画素)
1	41.55	48.02	24
2	93.89	104.55	25
3	121.19	227.78	10
4	227.78	221.43	11
5	250.05	239.28	19
6	304.67	297.36	12

表 5 センサの移動量推定結果：時系列逆方向

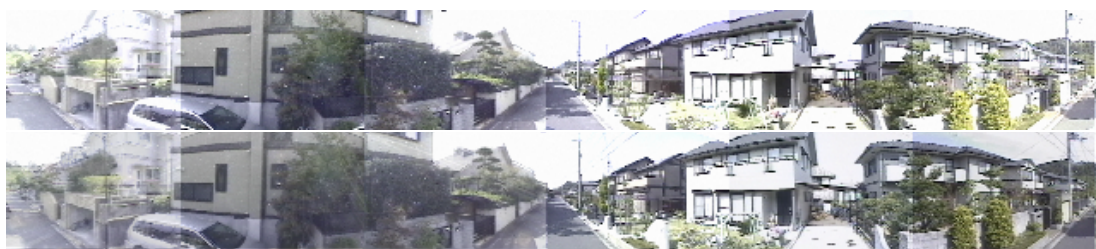
0 フレームでの センサの方位 (degree)	30 フレームでの センサの方位 (degree)	推定距離 (m)	評価値 (m)
180.259	179.401	0.592	5.86

ステレオとモーションの距離の統合によるシーンの再構成

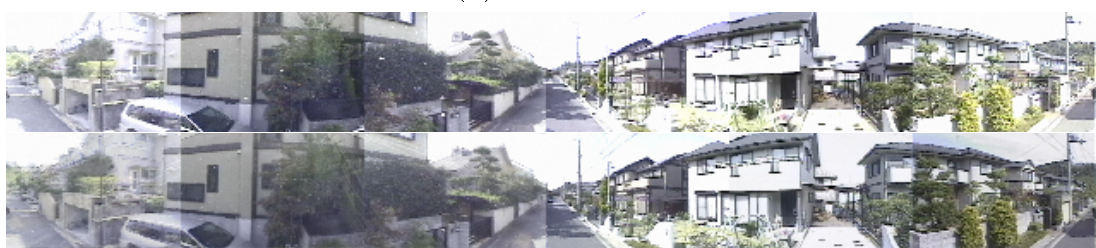
推定された距離をもちいて、ステレオ視による距離とモーションによる距離を統合した。なお、ステレオ視による距離とモーションによる距離の差のしきい値 E は移動量推定の誤差を考慮して $3.0(m)$ とした。信頼性の高い距離情報のみを用いて、デローニーの 3 角分割法 [35] によりポリゴン生成した。以下、図 23 に移動方向に対して 90 度の視点画像、図 24 に同方向の平行移動画像を示す。図 25 に移動方向に対する視点画像、視点変更画像を示す。また、図 26 に作成したモデルを上から見た画像を示す。

図 21 と図 22 の結果から特徴点の追跡が安定して行え、またセンサの移動方位付近の特徴点の動き量が小さいことが解る。図 23 から、図 26 の結果から、ステレオ

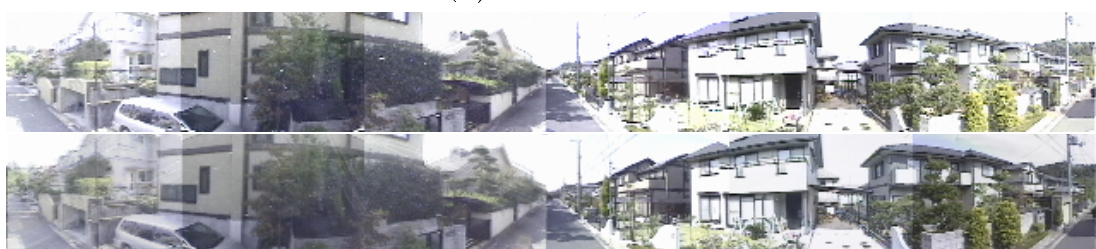
視より作成したモデルに比べ、距離に対する信頼性が向上したことが解る。しかし、得られた 3 次元モデルは、距離データがほぼ正確と思われる箇所も視点移動に対して違和感を感じる部分がある。これは、図 27, 28 の家にみられるように、建物の手前に構造物 (ブランコ) があり、物体のない所にポリゴンが生成されているからである。このような偽ポリゴンは、物体の模様 (テクスチャー) 画像を必要以上に伸ばしてしまうため、違和感を感じる。



(a) 0 フレーム



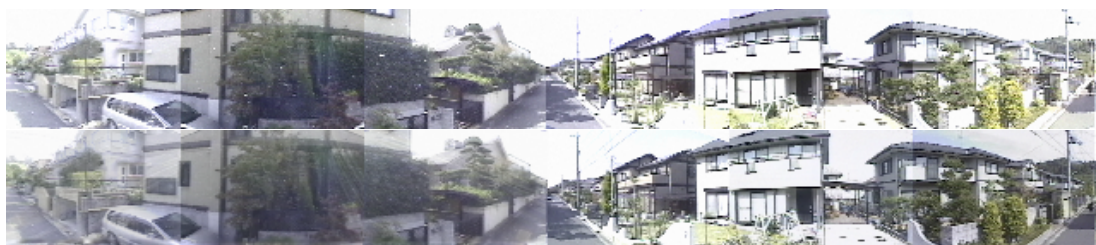
(b) 15 フレーム



(c) 30 フレーム



(d) 45 フレーム



(e) 60 フレーム

図 18 入力画像: 上部下部の全周パノラマ動画像



図 19 Sobel フィルタによる特徴点選択

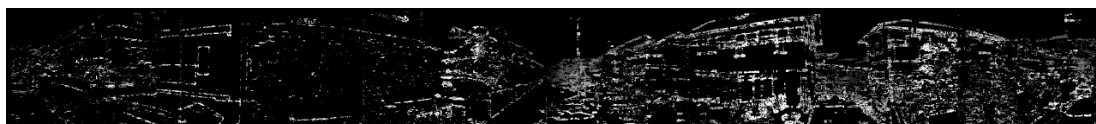


図 20 ステレオ視の視差マップ : 40 フレーム

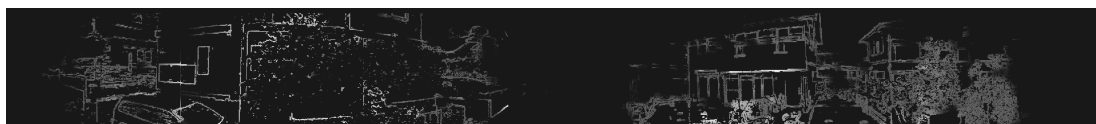


図 21 時系列方向の特徴点の動き量

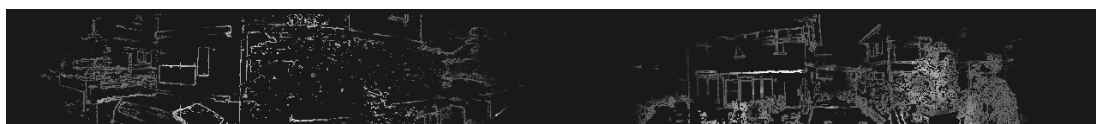


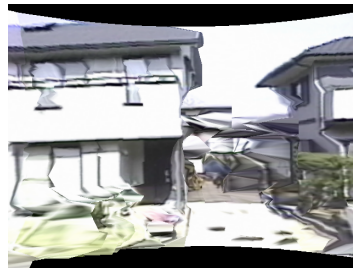
図 22 時系列逆方向の特徴点の動き量



図 23 視点画像 観測方位：90 度



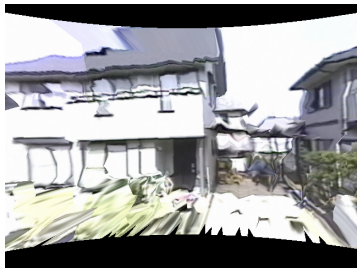
(a) 前進



(c) 左平行移動



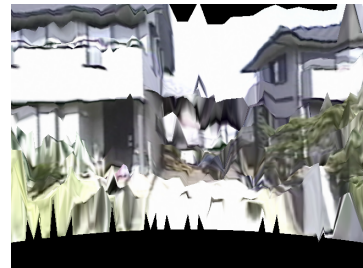
(e) 上昇



(b) 後退



(d) 右平行移動

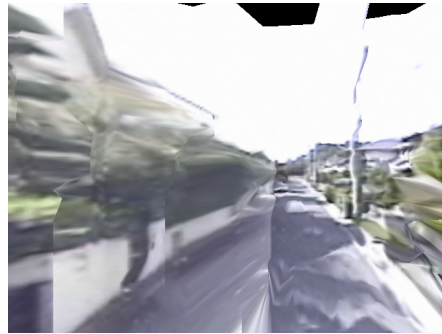


(f) 下降

図 24 視点変更後の画像



(a) 移動前

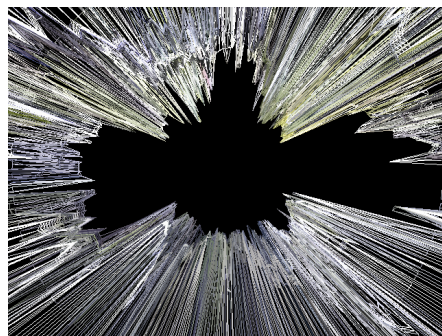


(b) 移動後

図 25 観測方位：移動方向 移動前 (a) と 移動後 (b)



(a) 鳥瞰図



(b) ワイヤーフレーム表現

図 26 ポリゴン生成された街並み: 鳥瞰図 (a) と ワイヤーフレーム表現 (b)

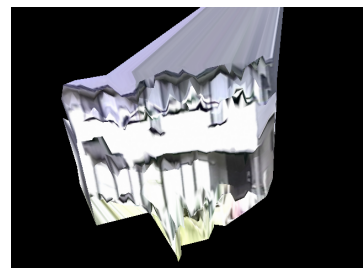


図 27 再構成された建物

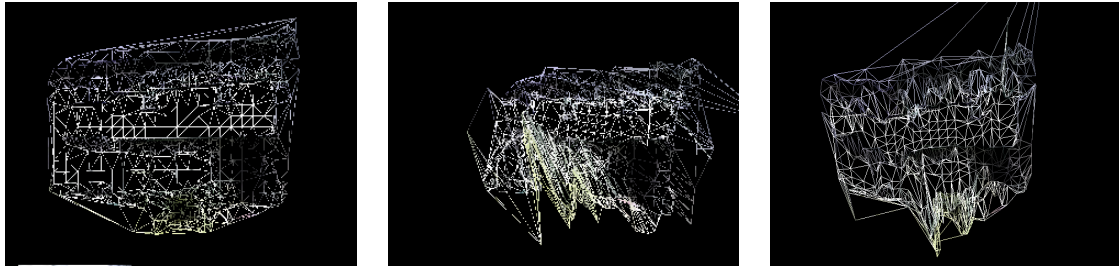


図 28 再構成された建物：ワイヤーフレーム表示

5.5 考察

都市環境内で行なった実験結果から提案手法についての考察を行なう。まず実験では、センサの移動推定を行なった。時系列方向、時系列逆方向のオプティカルフローによる対応とステレオ視による対応の整合性の取れた特徴点を各カメラ内で1点ずつ得て、その特徴点のオプティカルフローの動き量とステレオ視による距離からセンサの移動量を推定した。撮影した家の測量を行なった結果は、約 $0.57(m/s)$ 程度であったため表3, 5から信頼できる値が推定された。しかし、測量による移動量はある区間の平均速度であり、撮影時の速度がどの程度だったかは、解らない。そのため、距離の統合のしきい値を高い値に設定することは出来なかった。

次に、得られた特徴点のモーションとステレオ視による距離を統合し、3次元モデルを作成した。結果としてセンサ移動方向に対して垂直な方向の物体の形状は、ステレオ視だけの距離推定に比べて、高精度に建物の形状を再現できた。しかし、環境全体を一つのモデルとしているため建物と建物の前にある構造物との間に、偽のポリゴンを生成してしまう。そのため視点変更に際して、偽ポリゴンのテクスチャが伸びてしまう問題がある。

また、センサの移動方向の特徴点は、動き量が微小なため追跡が十分に行なえないという問題がある。そのため、移動方向に存在する特徴点は、ステレオ視による距離だけを用いているので誤対応が多く、奥行き解像度も低いため、物体の形状を取得することは出来なかった。しかし、視点の移動に際しての運動視差を得ることは出来た。

次にポリゴン生成時の問題について述べる。ポリゴン生成する際に、信頼性の高い特徴点が、偏って分布された場合、正しいモデルが生成されない。そのため、特徴点が疎に分布している部分には、ステレオ視による距離をそのまま用いている。これにより、大きく誤った距離を算出する箇所が存在する。

以上のことより、モーションにより求めた距離とステレオ視による距離を統合することで、ステレオ視のみの場合に比べ信頼性の高い距離情報を獲得できたが、特徴点の距離の評価尺度にステレオ視による距離を使用しているため、構造物がセンサから遠くになるに従って、信頼性の高い距離情報を獲得するのが難しくなるという問題がある。

6. おわりに

本論文では、都市環境を再構築する際の画像収集を効率的に収集することを目的に、全方位画像センサを用いることで、全方位の屋外環境の情報を取得した。提案手法では、6角錐ミラーを用いた全方位ステレオ画像センサを使用することで全方位の情景を高分解能に撮像し、都市環境内に存在する物体の形状を、ステレオ視による距離情報と動画像中に存在する特徴点を追跡することで得た動き量(モーション)からの距離情報を統合することで高精度に推定できる。

また、実験により全方位の3次元距離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。そのことから、以下のことが解った。センサの移動方向に対する時系列、時系列逆方向への特徴点の追跡が十分に行なえないという問題がある。これは、移動方向に存在する特徴点は、動き量が微小なためである。そのため、移動方向に対する距離は、ステレオ視による距離だけを用いているため、誤対応が多く、奥行き解像度も低いため、物体の形状を取得することは困難である。しかし、実験環境のような街並みではセンサの移動方向は、対象の物体がなく違和感は少ない。また、ステレオ視による距離の信頼性を、モーションステレオにより求めた距離と統合することで距離推定の精度を向上させることが出来た。また、時系列方向、時系列逆方向へ特徴点を追跡して得た2つの距離が、大きく違う場合は、ステレオ視の距離に近い距離を特徴点の距離とすることで、1方向の特徴点追跡では頻繁におこる隠蔽物体に対応できることが解った。

現状では、信頼性の高い特徴点のみで3次元モデルを構築することができず、特徴点の偏って分布していると、分布が疎な部分にはステレオ視の距離を用いている。そのため、ステレオ視から求めた距離のみを用いた特徴点に関しては、大きく誤った距離を算出する箇所がみられた。

今後の課題としては、実環境内の物体を、形が変わらない完全な剛体とみなすことで、距離の精度を向上させることが出来る。この手法は、観察位置 P_1 で算出した3次元の位置座標上での A, B 間の距離と、観察位置 P_2 で算出した3次元の位置座標上での A, B 間の距離は、等しい。この制約条件によって、より正確にステレオ視による距離とモーションによる距離を統合できる。また現状では、1視点のみの距離情報からモデルを生成しているが、広大な都市環境を仮想環境内で表

現するためには、視点同士で生成したモデルを、特徴点追跡することで得た対応関係を用いて統合していく必要がある。

謝辞

本論文を進めるにあたり，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 ロボティクス講座 小笠原 司教授，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。特に，センサの調整作業を手伝っていただいた島村 潤氏には，重ねて感謝致します。

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 福永 博美女史に感謝致します。

それと，センサの調整が出来る程，精度の良い円筒スクリーンを作成してくれた株式会社 イメージニクス の作業員に感謝致します。

そして，本学への入学を推薦して下さった，関西大学総合情報学部 古田 均 教授に深く感謝いたします。

最後に，研究をしたいという私のわがままを受け入れて下さった親族一同に深く感謝致します。

参考文献

- [1] 井口, 佐藤: “三次元画像計測”, 照晃堂, 1990.
- [2] B. K. P. Horn, B. Schunck: “Determining three-dimensional motion and structure from optical flow generated by several moving objects”, *IEEE Trans. PAMI*, Vol.7, No.4, pp.384-401, 1985.
- [3] M. E. Spetsakis and J. Aloimonos: ”Optimal motion estimation”, *Workshop on Visual Motion*, pp.229-2378, 1989.
- [4] 王, 坂上: “モーシヨンステレオによる3次元物体形状の獲得”, 信学論 (D-II), Vol.J81-D-II, No.8, pp.1885-1894, 1998.
- [5] H. Baker and R. Bolles: “Realtime stereo and motion intergration for navigation”, *Proc. of Image Understanding Workshop*, pp.1925-1304, 1994.
- [6] O. Henricsson: ”The Role of Color Attributes and Similarity Grouping in 3-D Building Reconstruction,” *Computer Vision and Image Understanding*, vol.72, No.2, pp. 163-184, 1998.
- [7] A. Benschraier, P. Mische and R. Debrue: “Fast and automatic stereo vision matching algorithm based on dynamic programming method”, *IAPR Pattern Recognition Letters*, Vol.17, No.5, pp.457-466, 1986.
- [8] 廣瀬: “電脳都市の誕生”, PHP 研究所, 1996.
- [9] M. Levoy and P. Hanrahan: “Light field rendering”, *Proc. SIGGRAPH '96*, pp.31-42, 1996.
- [10] 遠藤, 片山, 田村, 廣瀬, 渡辺, 谷川: “移動車両搭載カメラを用いた電脳映像都市空間の構築 (1) -実写画像を用いた広域仮想空間の生成-”, 日本 VR 学会大会論文集, Vol.2, pp.63-66, 1997.

- [11] 廣瀬, 渡辺, 谷川, 遠藤, 片山, 田村: “移動車両搭載カメラを用いた電脳映像都市空間の構築 (2) -実写画像を用いた広域仮想空間の生成-”, 日本 VR 学会大会論文集, Vol.2, pp.67-70, 1997.
- [12] 笠原, 佐藤, 千原: “全周囲距離データとパノラマ画像を利用した VR 環境の構築”, 電気関係学会関西支部連合大会, 1997.
- [13] T. W. Ryan: “The Prediction of Cross-Correlation Accuracy in Digital Stereo-Pair Images”, *PhD thesis, University of Arizona*, 1981.
- [14] C. S. Wiles and M. Brady: “Closing the loop on multiple motions”, *Proc. the 5th ICCV*, pp.308-313, 1995.
- [15] B. K. P. Horn and B. Schunck: “Determining optical flow”, *Artificial Intelligence*, Vol.17, pp.185-203, 1981.
- [16] S. Yamamoto, Y. Mae, Y. Shirai and J. Miura: “Realtime Multiple Object Tracking Based on Optical Flows”, *Proc. International Conference on Robotics and Automation*, pp.2328-2333, 1995.
- [17] V. Markandey and B.E.Flinchbaugh “Multispectral Constraints for Optical Flow Computation” *Proc. 3rd International Conference on Computer Vision*, pp.38-41, 1990.
- [18] 納富, 小澤, 全: “移動体観測による都市モデル構築”, 信学論 (D-II), Vol.J81-D-II, No. 5, pp.872-879, 1998.
- [19] C. Tomasi and T. Kanade: “The Factorization Method for the Recovery of Shape and Motion from Image Streams”, *Proc. Image Understanding Workshop*, pp.459-472, 1992.
- [20] Y. Yagi, “Omnidirectional Sensing and Its Application” , *IEICE Trans*, Vol.E82-D, No.3, 1999.

- [21] K. B. Sarachik: “Characterizing an indoor environment with a mobile robot and uncalibrated stereo”, *Proc. Int. Conf. Robotics and Automation IEEE*, pp.984–989, 1989.
- [22] 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.
- [23] Z. L. Cao, S. J. Oh and E. L. Hall: “Dynamic omnidirectional vision for mobile robots”, *J. Robotic Systems*, Vol.3, No.1, pp. 5–17, 1986.
- [24] J. Hong, X. Tan, B. Pinette, R. Weiss and E. M. Riseman: “Image-based homing”, *Proc. Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 620–625, 1991.
- [25] Y. Yagi, Y. Nishizawa and M. Yachida: “Estimating location and avoiding collision against unknown obstacle for the mobile robot using omnidirectional image sensor COPIS”, *Proc. Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems*, pp. 909–914, 1991.
- [26] 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.
- [27] S. K. Nayar: “Catadioptric omnidirectional camera camera”, *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.482–488, 1997.
- [28] T. Kawanishi, K. Yamazawa, H. Iwasa, H. Takemura and N. Yokoya: “Generation of high-resolution stereo panoramic images by omnidirectional imaging sensor using hexagonal pyramidal mirrors”, *Proc of 14th Int. Conf. on Pattern Recognition*, Vol I, pp. 445-489, 1998.
- [29] 山澤, 尾上, 横矢, 竹村: “全方位画像からの視線追従型実時間画像生成によるテレプレゼンス”, *信学論 (D-II)*, Vol.J81-D-II, No. 5, pp.880–887 1996.

- [30] 尾上 山澤 横矢, 竹村: “全方位画像からの視線追従型実時間画像生成によるテレプレゼンス”, 信学技報, PRMU97-20.1997.
- [31] R. Y. Tsai: “A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses”, *IEEE Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No.4, pp.323-344, 1987.
- [32] 中川: “人物像とパノラマ画像を用いた実世界情報に基づいた仮想世界の構築に関する研究 “ 博士論文, 奈良先端科学技術大学院大学, IS-DT9661018, 1999.
- [33] 島村: “全周パノラマステレオ画像と CG モデルの合成による仮想環境の構成と提示 “ 修士論文, 奈良先端科学技術大学院大学, IS-MT9851050, 2000.
- [34] 青木: “多地点全方位画像を利用した仮想環境の構築”, 修士論文, 奈良先端科学技術大学院大学, IS-MT9751002, 1999.
- [35] 谷口: “FEM のための要素自動分割-デローニー三角分割法の利用” , pp.28-122, 森北出版, 1992.