

NAIST-IS-MT0551109

修士論文

被写体距離を考慮した Image-Based Rendering
による広域屋外環境のステレオ画像生成

堀 磨伊也

2007年3月9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。

堀 磨伊也

審査委員：

横矢 直和 教授 (主指導教員)

千原 國宏 教授 (副指導教員)

被写体距離を考慮した Image-Based Rendering による広域屋外環境のステレオ画像生成*

堀 磨伊也

内容梗概

遠隔地の情景をユーザに提示し、あたかもその場にいるのと同様の感覚を与える仮想現実感技術はテレプレゼンスと呼ばれ、いかに遠隔地の情景を臨場感豊かに提示するかが課題となっている。広域屋外環境のように複雑な形状を持つ対象が多数存在する場合には Image-Based Rendering (IBR) を用いた試みが多く行われている。本研究では、広域屋外環境を対象とした高い臨場感を与えるテレプレゼンスシステムの構築を目的とし、IBR を用いて自由経路で撮影された全方位動画像と RTK-GPS・慣性航法装置を統合した高精度なセンサにより得られるカメラ位置・姿勢情報から両眼ステレオ画像を生成する手法を提案する。従来、撮影位置が異なる画像を同時に使用したときに撮影位置が異なることにより生じる縦視差を考慮しない場合には、生成画像において歪みが生じる問題があった。本研究ではこの歪みを軽減するために、撮影位置が異なり、かつ同等の光線情報を持つ複数の画像からパターン類似度を用いて DP マッチングを行うことにより、簡易的に被写体距離を推定し、推定された被写体距離を考慮して IBR による画像生成を行う。実験では、広域屋外環境のステレオ画像を生成し、没入型ディスプレイに表示することで、自由な見回しと立体視が可能なテレプレゼンスシステムへの応用の可能性を示す。

* 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-MT0551109, 2007年 3月 9日.

キーワード

Image-Based Rendering , ステレオ画像 , 広域屋外環境 , 全方位画像 , テレプレゼンス

Novel Stereoscopic View Generation by Image-Based Rendering Coordinated with Depth Information*

Maiya Hori

Abstract

This paper describes a method of stereoscopic view generation by image-based rendering in wide outdoor environments. The stereoscopic view can be generated from an omnidirectional image sequence by a light field rendering approach which generates a novel view image from a set of images. The conventional methods of novel view generation have a problem such that the generated image is distorted because the image is composed of parts of several omnidirectional images captured at different points. To overcome this problem, we have to consider the distances between the novel viewpoint and observed real objects in the rendering process. In the proposed method, in order to reduce the image distortion, stereoscopic images are generated considering depth values estimated by dynamic programming (DP) matching using the images that are observed from different points and contain the same ray information in the real world. In experiments, stereoscopic images in wide outdoor environments are generated and displayed on an immersive spherical surface display.

Keywords:

Image-Based Rendering, Stereoscopic Image, Outdoor Environment, Omnidirectional Image, Telepresence

* Master's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT0551109, March 9, 2007.

目次

1. はじめに	1
2. テレプレゼンスの関連研究と本研究の位置づけ	4
2.1 遠隔地の情景提示に関する従来研究	4
2.1.1 撮影画像を提示する手法	4
2.1.2 自由視点画像を提示する手法	5
2.1.3 ステレオ画像を提示する手法	9
2.2 本研究の位置づけと方針	11
3. 屋外環境の自由経路で撮影された全方位動画からのステレオ画像生成	13
3.1 ステレオ画像生成手法の概要	13
3.2 全方位画像とカメラ位置・姿勢情報の取得	13
3.3 見回し時の視点画像生成に用いる光線の選択	17
3.3.1 生成するステレオ画像の視点位置の設定	17
3.3.2 ステレオ画像生成に用いる光線の選択	17
3.4 DP マッチングを利用した被写体距離の推定	21
3.5 被写体距離を考慮したレンダリング	27
4. 実験	28
4.1 広域屋外環境を対象としたステレオ画像生成	28
4.1.1 全方位画像の撮影環境	28
4.1.2 ステレオ画像生成結果	28
4.1.3 考察	31
4.2 ステレオ画像を用いたテレプレゼンスシステム	39
5. まとめ	42
謝辞	43
参考文献	44

目 次

1	QuickTime VR[11]におけるパノラマ画像（上）と透視投影画像（下）	5
2	池田らのテレプレゼンスシステム [12]	6
3	光線の記述	7
4	Concentric Mosaics	8
5	山口ら [7]による自由視点画像生成	10
6	提案手法の処理手順	14
7	全方位カメラを搭載した撮影車両	15
8	全方位画像の取得位置（上から見た図）	15
9	位置姿勢計測ハイブリッドセンサ	16
10	生成を行うステレオ画像の視点位置（上から見た図）	18
11	見回し時の視点画像生成（上から見た図）	20
12	生成に用いる全方位画像群	20
13	カメラ本体によるオクルージョン	21
14	生成画像における歪みの例	22
15	歪みの発生原因	23
16	歪みの影響の大きさ	23
17	DP マッチングの際に使用する同等の光線情報を持つ画像（上から見た図）	24
18	各画像のエッジ同士のDP マッチング	25
19	DP マッチングの経路	25
20	各エッジまでの距離推定	26
21	提案手法のレンダリング	27
22	撮影経路	29
23	全方位パノラマ画像の例	30
24	被写体距離を一定と仮定して生成した画像（従来手法）	32
25	使用した全方位画像の取得位置	32
26	被写体距離の推定に用いた画像	33

27	被写体距離の推定結果	33
28	生成画像における歪みの軽減例	34
29	生成されたステレオ画像	35
30	テレプレゼンスシステムの構成	40
31	テレプレゼンスの様子	41
32	ユーザ外観	41

表 目 次

1	ハイブリッドセンサの性能	17
2	各機器の計測情報	29
3	システムの機器構成	40

1. はじめに

遠隔地の情景をユーザに提示し、あたかもその場にいると同様の感覚を与える仮想現実感技術はテレプレゼンス [1] と呼ばれ、教育や医療、エンターテインメントなどの様々な分野で応用が期待されている。テレプレゼンスにおいて遠隔地の情景を提示する手法として、多地点で撮影された画像から3次元復元によって仮想環境を構築・提示する Model-Based Rendering[2] (以下、MBR) と撮影環境を明示的に3次元復元することなく画像の変形・合成により仮想環境を構築・提示する Image-Based Rendering[3] (以下、IBR) がある。MBR では仮想空間内に存在する物体の3次元形状と反射特性など材質の光学特性を取得する必要があるが、屋外環境などの大規模なモデルの構築を自動化することは困難であった。一方IBR では、光線空間内の光線の分布すべてを記録する必要があるが、形状が複雑で MBR ではモデル化が困難な物体の場合にも実物体と近い見え方を再現することが可能であるため、広域屋外環境では写実性の高いIBR を用いた試みが多く行われている [4]。テレプレゼンスでは遠隔地の情景を臨場感豊かに提示することが重要となるため、写実性が高いことのほかに、没入感が高いことや視線変更による自由な見回しが行えること、両眼立体視が可能であることなどが望まれる。

1台のカメラから撮影された単眼画像を提示する場合、カメラを回転させることにより自由な見回しが可能である。しかし、奥行き感がないため臨場感が低い問題がある。そこでステレオカメラを回転させながら撮影を行うことにより、ユーザは立体視を行うことが可能となるが、撮影地点でしか立体視が行えないため、ユーザが移動した場合に、すべての視点で立体視を行うためには、膨大なデータ量が必要である。また、いずれの場合もカメラを回転させることにより画像提示を行うため、テレプレゼンスを行う際に時間遅延が発生する問題がある。一方、遅延のない見回しを行う方法として、周囲360度の情景を一度に全方位カメラを用いて取得する方法がある。撮影された全方位画像から視線方向に応じた画像を提示することにより、ユーザは遅延なく見回しを行うことが可能である。しかし、撮影地点からの画像しか表示できないために立体視を行うことは困難である。そこで、撮影時の画像からIBRにより異なる視点での画像を生成する手法がある [5]。IBR で画像を生成するためには、撮影時の正確なカメラ位置情報が必要とな

る。しかし、広域屋外環境をテレプレゼンスの対象とした場合には、正確なカメラ位置情報を取得することが難しいため、精度のよい画像を生成することは困難であった。このように広域屋外環境において、見回しと立体視を同時に実現するテレプレゼンスシステムを構築することは難しい。

そこで本研究では、広域屋外環境において左右の視点画像を生成し、ユーザに両眼ステレオ画像を提示することにより立体視を可能とし、より臨場感の高いテレプレゼンスシステムの構築を目的とする。ステレオ画像は、広域屋外環境において自由経路で撮影された全方位動画像と位置姿勢センサから得られる撮影位置・姿勢情報を用いて、ユーザのすべての視線方向に対して生成を行う。従来、IBRの一手法である Light Field Rendering[6] の原理を用いてステレオ画像を生成する手法 [7] が提案されているが、生成画像において被写体距離を考慮しないために縦視差の影響で歪みが生じることがあった。提案手法は、Light Field Renderingの原理に基づき、左右それぞれの視点画像を生成するが、被写体距離を考慮してレンダリングを行うことにより生成画像の歪みの軽減を行う。被写体距離の推定はマルチベースラインステレオ [8] などの手法で行うことが可能であるが、推定に多くの時間がかかるため、本手法では撮影位置が異なり、かつ同じ光線が撮影された2枚の画像においてパターン類似度を用いた Dynamic Programming (DP) マッチング [9] によりエッジの対応をとり、センサから得られる撮影位置情報を用いることにより簡易的に被写体距離の推定を行う。広域屋外環境において自由視点画像生成を行う従来手法 [10] では、撮影時にカメラの動作範囲に制限があったが、本手法では高精度な位置姿勢センサを搭載した車両を用いて撮影を行うことにより広域屋外環境を自由経路で撮影した全方位画像を使用し、ステレオ画像を生成することが可能である。テレプレゼンスを行う際には、没入型のディスプレイにステレオ画像を提示し、立体視と自由な見回しが可能な臨場感の高いシステムの構築を行う。

以下、2章では、テレプレゼンスに関する従来研究を概観し、本研究の位置づけと方針について述べる。3章では、提案する全方位動画像からステレオ画像を生成する手法について詳述する。4章では、提案手法を用いて屋外環境のステレオ画像を生成し、見回しと立体視が可能なテレプレゼンスシステムの構築を行っ

た結果を示す．最後に5章で，まとめと今後の展望を述べる．

2. テレプレゼンスの関連研究と本研究の位置づけ

テレプレゼンスにおいて、臨場感豊かに遠隔地の情景を提示することは重要な課題である。その中でも広域屋外環境をテレプレゼンスの対象とした場合には、様々な問題が生じる。本章では、情景提示を行う際に用いられる IBR というアプローチについて概観し、本研究の位置づけと方針について述べる。

2.1 遠隔地の情景提示に関する従来研究

遠隔地の情景を提示する手法として、多地点で撮影された画像から 3 次元復元によって仮想環境を構築・提示する MBR と撮影環境を明示的に 3 次元復元することなく画像の変形・合成により仮想環境を構築・提示する IBR の 2 つのアプローチがある。MBR では、明示的に形状モデルを持つことにより物体の操作が行うことが容易であるが、複雑な形状を持つ物体の表現や忠実な質感の再現を自動的に行うことが困難であった。一方、実画像を用いて新たな画像を生成する手法である IBR は、対象物体の形状を考慮する必要がないため、モデル化の困難な物体に対しても適用することができる。このため、複雑な形状を持つ物体が多数存在する屋外環境のテレプレゼンスでは、写実性の高い IBR を用いた試みが多く行われている。以下、IBR を用いた情景提示に関する従来研究について述べる。

2.1.1 撮影画像を提示する手法

IBR の一手法として、情景提示を行う視点位置で画像を取得し、取得された画像の一部を変形して使用することにより、写実性の高い情景提示を行う手法が提案されている。Chen による QuickTime VR[11] では、図 1 に示すように、カメラを回転させて得られた画像からパノラマ画像を生成し、ユーザの視線方向に応じた透視投影画像を生成する。この手法では、各撮影地点において取得した複数枚の画像を重複領域を利用してつなぎ合わせてパノラマ画像を生成するため、撮影地点において、ユーザの視線方向に応じた画像を提示可能であるが、移動時に提示される画像が離散的になり、違和感が生じる。また画像を撮影した位置からし



図 1 QuickTime VR[11]におけるパノラマ画像（上）と透視投影画像（下）

か画像の提示を行えないため、奥行き感がなく臨場感が低い問題がある。

一方、池田らは、遠隔地の情景をユーザに提示し、図2に示すようなユーザからの指示に従い、インタラクティブに自由に視線方向を変更することができるシステム[12]を提案している。このシステムでは、全方位画像からユーザの視線方向に応じた透視投影画像を生成し、ユーザに提示する。撮影に全方位型マルチカメラシステムを用いているため、高解像度の画像を提示可能で、撮影地点の移動時にも連続した画像列を提示可能であるが、QuickTime VR[11]と同様に視点が撮影経路上に限定されるため、奥行き感のない画像が提示され、臨場感が低い問題がある。

2.1.2 自由視点画像を提示する手法

テレプレゼンスを行う際に、臨場感を高めるために撮影経路上から離れた視点位置の画像を生成し、提示する手法がある。撮影時に蓄積された画像群から自由視点画像を生成する手法として、蓄積画像をワーピングやモーフィングにより変換する手法[13, 14]が提案されている。しかし、これらの手法では蓄積された画



図 2 池田らのテレプレゼンスシステム [12]

像間で各特徴点の対応をとる必要があるため，高速に自由視点画像を生成することは困難である．また，生成に必要なデータ量が膨大になる問題が生じた．

一方，光線情報を用いて自由視点画像を生成する手法として Adelson らにより Plenoptic Function[15] が提案されている．これは物体をある方向から見た場合の視線画像は，その物体が存在する空間内において物体表面から視点位置に到達する光線の束により構成されるという考えである．Plenoptic Function では，空間中に存在する光線は視点の座標 (x, y, z) ，光線の向き (θ, ϕ) ，波長 λ および時間 t の 7 次元関数 $f(x, y, z, \theta, \phi, \lambda, t)$ で空間中のすべての光線を記述した．3 次元空間内のすべての光線情報を記述することで，物体の幾何形状モデルを持たずに自由視点画像を生成することができる．しかし，一方でこのような Plenoptic Function に基づく手法では，原理的に対象物体をあらゆる方向から撮影した画像が必要となり，入力画像が膨大となるため，現実的には自由視点画像を生成することは困難である．そこで光線分布を効率よく記述するための研究が盛んに行われている．

McMillan により提案された Plenoptic Modeling[3] では，1 本の光線は同じ色を持ち，時間により変化しないとすることで波長 λ と時間 t を除いた 5 次元の関数

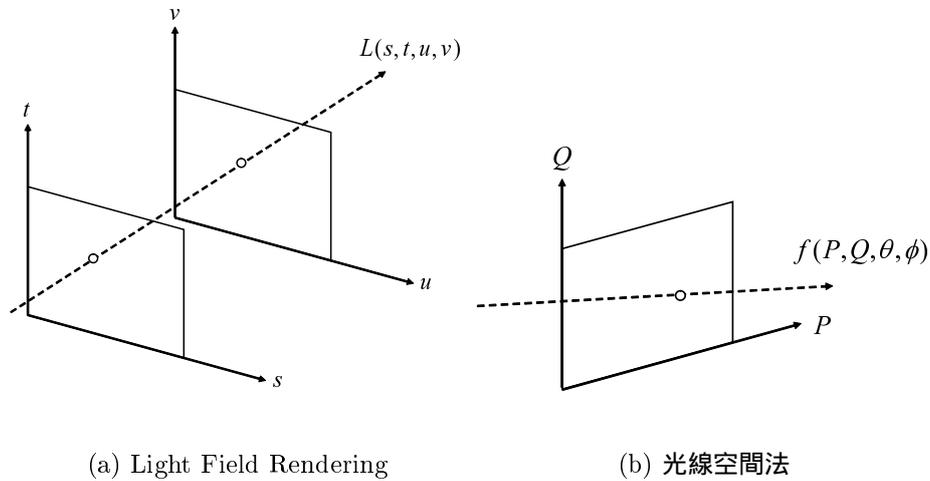


図 3 光線の記述

で3次元空間内を伝搬する光線表現した。しかし、実環境への適用では入力画像が限られ、すべての光線情報を取得することは困難であるため、画像間の対応付けを行い、光線情報の得られない部分を補間しなければならない問題が生じた。

一方、光が空間内を伝搬することにより伴う干渉や減衰などの変化を無視することで関数を5次元から4次元に射影した手法が提案されている。図3に示すように、Light Field Rendering[6]は、光線を2つの平面を通る点の位置 (s, t) と (u, v) により、光線空間法[16, 17]は、1つの平面を通る点の位置 (P, Q) と方向 (θ, ϕ) により光線を記述するが、原理的には同等である。また Lumigraph[18]では、基本原理として Light Field Rendering を採用し、自由視点画像を生成するシステムを構築した。これらの手法では新しい視点の画像に必要な光線と同等の光線を含む画像群を取得すれば、すべての光線の記述を求めることなく、新しい視点の画像を生成することができる。しかし、自由視点画像の生成には多数の画像を必要とするためにデータ量が膨大となる問題がある。

Concentric Mosaics[19]では、図4に示すように新しい視点位置を2次元平面上の円内に制限することで光線を3次元関数 $f(x, y, \rho)$ で記述する。この記述により平面の円内から出るすべての光は、ある半径の円周上のある点から接線方向へ出る光線と同等とすることができる。必要な光線を取得するために円周に沿ってカ

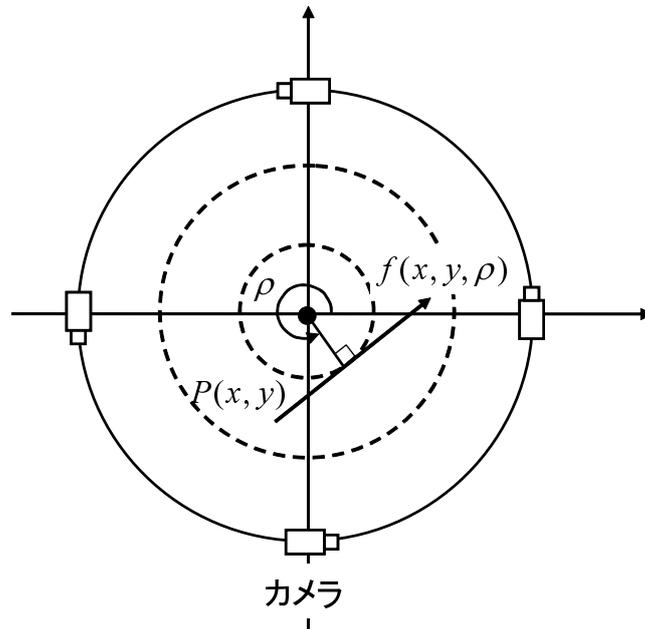


図 4 Concentric Mosaics

カメラを移動させて得られた画像から Manifold Mosaic と呼ばれるパノラマ画像を生成する．このパノラマ画像により，円周上の点から接線方向への光線を得ることができる．同様の方法で生成された同心円のパノラマ画像を複数枚用いることで，異なる半径の円周からの光線を取得する．視点位置を2次元平面上の円内に制限することにより，Light Field Rendering などと比較して必要なデータ量が少なくなる．この手法を用いれば，2次元平面上の円内に位置する任意視点画像を生成することは可能であるが，カメラを回転させて得られた画像から生成するパノラマ画像が複数枚必要となるため，あらかじめ画像の取得を行う必要がある．

高橋らは GPS を用いて撮影位置情報を取得することにより，屋外環境において自由視点画像を生成する手法 [10] を提案している．生成原理は，Light Field Rendering に基づくが，生成する画像を縦の短冊に分割することにより，さらに少ないデータ量で画像生成を可能としている．複数のカメラの光軸が1点で交わるように円筒状に設置することによって全方位画像を取得しているために高解像度の画像を生成可能であるが，被写体距離の推定に Epipolar Plane Image (EPI)[20]

を用いているため，撮影時にカメラ速度が一定である必要がある．また，自由経路で取得された全方位画像群からの自由視点画像生成に対応しておらず，カメラ動作に制限があった．さらに，データ量を少なくするために短冊を用いて画像生成を行っているため，生成画像の各短冊において縦視差が生じ，画像が歪む問題が生じた．

2.1.3 ステレオ画像を提示する手法

臨場感の高い情景提示を行う手法として，ユーザにステレオ画像を提示することにより立体視を可能とした手法がある．ステレオ画像を取得する方法として，ステレオカメラを回転させながら撮影を行う手法があるが，テレプレゼンスで視線方向を変更したときに，カメラを回転させるために画像提示に時間遅延が発生する．また，取得した画像をそのまま提示すると，撮影地点でしか立体視が行えないため，視点移動した場合にすべての視点で立体視を行うためには，膨大なデータ量が必要である．

山口らは撮影位置が既知の全方位画像群から，左右それぞれの視点位置画像を生成することにより，立体視を可能とした手法 [7] を提案している．生成手法は，光が空間内を伝搬することに伴う干渉や減衰などの変化を無視する Light Field Rendering の原理に基づくが，図 5 に示すように生成する画像を縦の短冊に分割することにより，さらに少ないデータ量で画像生成を可能とした．しかし，短冊に分割して画像を生成することにより，生成画像の各短冊において縦視差が発生し，生成画像に縦方向の歪みが発生する問題が生じた．また，入力となる全方位画像は曲面ミラーを用いた 1 台のカメラで撮影しているために解像度の不足や，視線方向による解像度の不均一などの問題があった．さらに撮影を等速直線運動で行わなければならないという制限があるため，屋外などの広域環境には適さなかった．

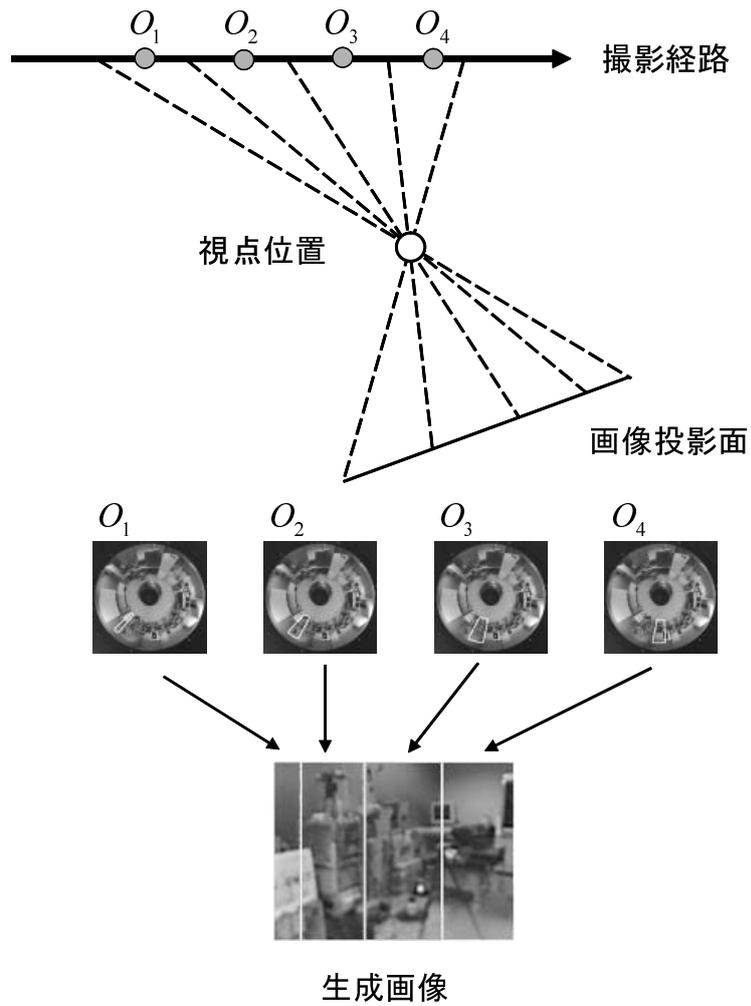


図 5 山口ら [7] による自由視点画像生成

2.2 本研究の位置づけと方針

本研究では、広域屋外環境を対象とした臨場感の高いテレプレゼンスシステムの構築を目的とする。QuickTime VR[11] や池田らの手法 [12] では、全方位画像を用いることにより自由に視線方向を変更することが可能であった。しかし、提示する画像が単眼画像のため、奥行き感のない問題があった。高橋らの手法 [10] では、自由視点画像を生成可能であったが、対象が広域屋外環境となった場合には、正確な撮影位置を取得することが困難であったため、IBR で自由視点画像生成を行う場合には、入力画像の撮影経路が直線経路であるなど、撮影時にカメラの動作範囲に制限があった。山口ら [7] はステレオ画像の提示が可能であったが、入力となる画像の取得位置が、等間隔な直線経路上に限定されていたため、広域屋外環境では画像生成が困難であった。また高橋ら、山口ら、共に、データ量を少なくするために短冊を用いて画像生成を行っているため、生成画像の各短冊において縦視差が生じ、画像が歪む問題が生じた。このように、広域屋外環境を対象とした臨場感の高いテレプレゼンスシステムを構築することは困難であった。

そこで本研究では、広域屋外環境の自由経路で撮影された全方位画像群を用いて、自由な見回しと立体視が可能なステレオ画像の生成法を提案する。本手法では、眼間距離離して固定した全方位カメラ 2 台を用いて撮影された全方位画像群を用いる。これにより、撮影時の進行方向に関しては、撮影された全方位画像を透視投影画像に変換することで、撮影経路に沿ったステレオ画像が生成が可能である。見回し時の視線画像は、撮影された全方位画像群に存在しないため、IBR で生成を行う。IBR でステレオ画像の生成を行うためには、生成に用いる画像の撮影位置が必要となる。本手法では、高精度な位置姿勢センサを搭載した車両を用いて撮影を行うことにより、自由経路で撮影された全方位画像を用いて、撮影経路に沿って自由な見回しを可能とするステレオ画像の生成を試みる。ステレオ画像は、従来手法 [7, 10] と同様に Light Field Rendering の原理に基づいて生成するが、被写体距離を考慮してレンダリングを行うことにより生成画像の歪みの軽減を行う。被写体距離の推定は、マルチベースラインステレオ [8] などの手法で行うことが可能であるが、推定に多くの時間がかかるため、本手法では撮影位置が異なり、同等な光線が撮影された 2 枚の画像においてパターン類似度を用い

た DP マッチング [9] によりエッジの対応をとり，センサから得られる撮影位置情報を用いることにより簡易的に被写体距離の推定を行う．テレプレゼンスを行う際には，没入型のディスプレイにステレオ画像を提示し，液晶シャッター眼鏡を用いることで立体視が可能なシステムの構築を行う．

3. 屋外環境の自由経路で撮影された全方位動画像からのステレオ画像生成

3.1 ステレオ画像生成手法の概要

本章では，広域屋外環境を対象とした自由な見回しと立体視が可能なテレプレゼンスシステムを構築するためのステレオ画像生成手法について述べる．図6に提案手法の処理手順を示す．まず入力として，屋外環境で高解像度の全方位動画像とカメラ位置・姿勢情報の取得を行う．次に，取得されたカメラ位置・姿勢情報を用いて見回し時の視点位置の設定を行い，設定された視点位置において Light Field Rendering により視点画像生成に必要な光線を算出する．続いて，生成画像において縦視差による歪みを軽減するために必要な視点位置からの被写体距離の推定を行い，最後に，推定された被写体距離を考慮してレンダリングを行う．

以降，3.2節では，提案手法の入力となる全方位画像群とカメラ位置・姿勢情報の取得方法(図6(A))について述べ，3.3節では見回し時の視線画像生成手法(図6(B),(C))について詳述する．3.4節では，視点位置からの被写体距離の推定方法(図6(D))について述べる．最後に3.5節では，推定された被写体距離を考慮してレンダリングを行う(図6(E)) ことにより，生成画像の歪みを軽減してステレオ画像を生成する方法について述べる．

3.2 全方位画像とカメラ位置・姿勢情報の取得

本研究は臨場感が高いテレプレゼンスシステムの構築を目的としているため，IBR の概念に基づき，ステレオ画像の生成を行う．IBR では光線空間内の光線の分布を記録するための入力画像が必要であり，広域屋外環境などを対象とした場合，効率よく撮影位置における光線情報を取得することは重要な課題である．本研究では，効率よく光線情報を取得するために入力画像として全方位画像を用いる．ここでは，全方位画像は画像撮影地点から水平方向 360 度すべての光線情報を持っているという意味である．

提案手法では，ステレオ画像生成に必要な光線情報を得るために図7に示すよ

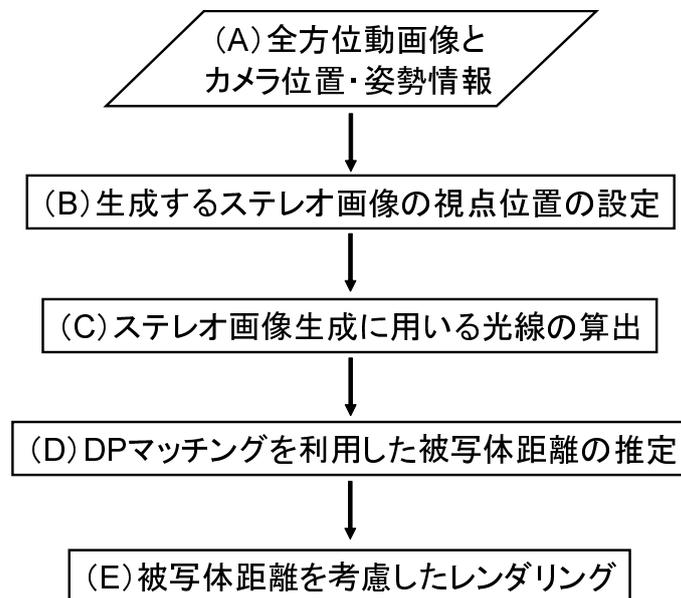


図 6 提案手法の処理手順

うに全方位カメラ 2 台を車両に固定して、移動しながら撮影を行う。2 台の全方位カメラ間の距離を眼間距離に設定することにより図 8 に示すような常に眼間距離離れた位置で全方位画像群を取得することが可能である。眼間距離カメラを離して撮影を行うことにより、撮影時の進行方向の画像をそのまま提示することにより立体視を可能とする。また、1 台のカメラで撮影した場合に困難であった撮影時の進行方向に近い視線方向のステレオ画像生成を可能とする。これについては、3.3 節で詳述する。ここで問題となるのは、IBR で異なる視点画像を生成する場合には、入力画像が撮影された位置情報が必要となる点である。従来は、広域屋外環境において、撮影と同時に正確なカメラ位置・姿勢情報を取得することが困難であったが、提案手法では、リアルタイムキネマティック GPS (RTK-GPS) と小型慣性航法装置 (INS) を統合したハイブリッドセンサ [21] を用いることにより、全方位画像の取得と同時に、正確なカメラ位置・姿勢情報を取得することを可能とした。

以下に、全方位画像の取得とカメラ位置姿勢計測を行うそれぞれのセンサについて詳述する。



図 7 全方位カメラを搭載した撮影車両

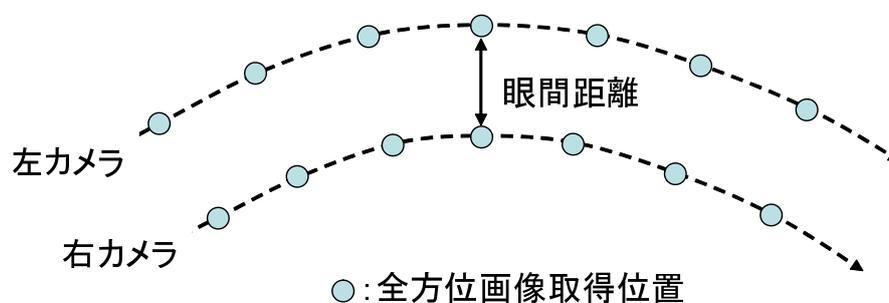


図 8 全方位画像の取得位置（上から見た図）

全方位マルチカメラシステム

全方位画像を取得する方法として、本研究では、複数のカメラを外向きに配置した Point Grey Research 社製の全方位型マルチカメラシステム Ladybug2[22] を用いる。Ladybug2 は横 768 画素、縦 1024 画素の画像を水平方向の 5 台と真上の 1 台の計 6 台の CCD カメラから同期して取得し、上方を含む全方向の約 75% 以上を 30fps の動画像として取得することが可能である。これら 6 台で撮影された画像を結合することにより最大横 3500 画素、縦 1750 画素の高解像度の全方位パノラマ画像を取得することが可能である。

カメラ位置・姿勢計測センサ

カメラの位置・姿勢計測には、図 9 に示すリアルタイムキネマティック GPS



(a) RTK-GPS



(b) INS

図 9 位置姿勢計測ハイブリッドセンサ

(RTK-GPS) と小型慣性航法装置 (INS) を統合したハイブリッドセンサを用いる。RTK-GPS は Nikon-Trimble 社製 LogPakII を、INS は Tokimec 社製 TISS-5-40 を用いる。慣性航法装置は複数の加速度センサから構成されているため、位置と同時にセンサの姿勢も計測することが可能である。方位角に関しては、慣性航法装置単体では蓄積誤差であるドリフト誤差が発生する問題があり、位置に関しては、GPS 単体では計測周期が 1Hz 程度であり、屋外環境で移動計測するには十分な計測レートとはいえない。

ハイブリッドセンサでは、GPS の移動量と慣性航法で得られる移動量の差から方位角を補正することでドリフト誤差を解消する。また、計測周期が 1Hz 程度の GPS と 50Hz で計測可能な慣性航法装置を併用することで 50Hz で位置計測ができ、画像撮影時のカメラ位置を取得することが可能である。このハイブリッドセンサの仕様を表 1 に示す。GPS の欠点である計測周期の低さと INS の欠点である計測誤差の蓄積をお互いに補うことにより高精度で高レートな計測を行うことが可能である。

表 1 ハイブリッドセンサの性能

位置・姿勢計測	
方位角	$\pm 2^\circ$
経度	$\pm 3.3\text{cm}$ ($\pm 3.0\text{cm}$)
緯度	$\pm 3.3\text{cm}$ ($\pm 3.0\text{cm}$)
計測レート	50Hz (1Hz)

() は RTK-GPS 単体使用時

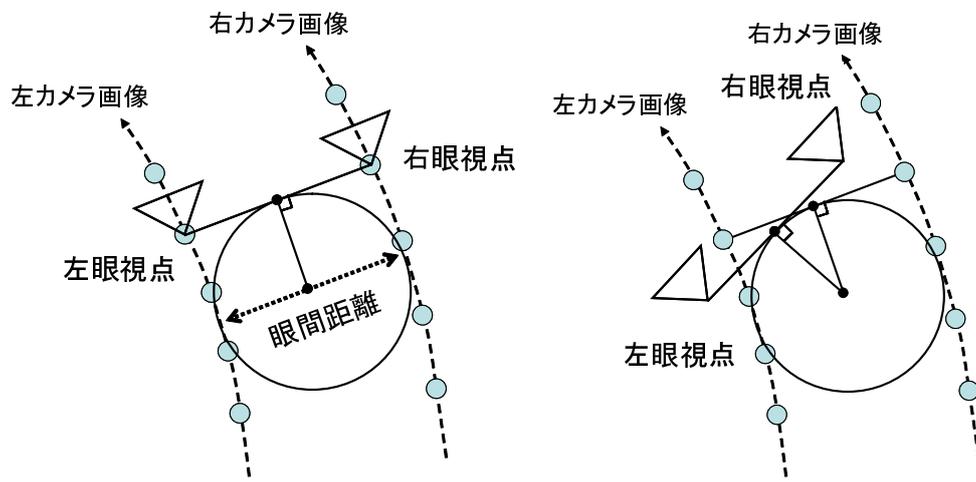
3.3 見回し時の視点画像生成に用いる光線の選択

3.3.1 生成するステレオ画像の視点位置の設定

本研究では，ユーザが撮影経路に沿って移動したときに自由な見回しと立体視を可能にするために，図 10 のように，左右眼間距離を直径とする円周上を左右の視点の中心が回転した場合のステレオ画像を生成する．設定する視点位置は，ユーザが視線方向を回転させたときの視点位置を近似している．図 10(a) のようにユーザの前方の視線方向を撮影時の進行方向と一致させることにより，ユーザの前方の視線画像を 2 台の全方位カメラで撮影された全方位画像の一部を透視投影画像に変換することにより生成可能である．しかし，図 10(b)-(d) のように見回しを行う際には，左右それぞれの視点での視線画像が撮影時の画像群に存在しないために画像の生成を行う必要がある．見回しを行う際に，撮影された全方位画像群から視点画像を生成する手法を次項で詳述する．

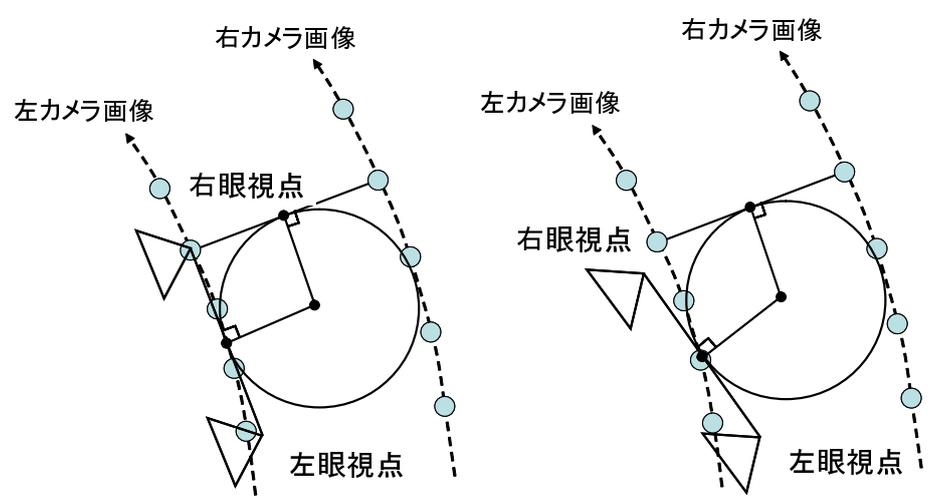
3.3.2 ステレオ画像生成に用いる光線の選択

本手法では，撮影時の全方位画像群から視点位置に応じた視線画像を Light Field Rendering の原理に基づき生成する．Light Field Rendering は，光が空間内を伝搬することにより伴う干渉や減衰などの変化を無視することで，空間内の光線を 2 つの平面を通る点の位置 (s, t) と (u, v) により記述する手法である．



(a) 視線が進行方向の場合

(b) 視線が進行方向に近い場合



(c) 視線が進行方向に対して真横の場合

(d) 視線が進行方向に対して真横に近い場合

図 10 生成を行うステレオ画像の視点位置 (上から見た図)

撮影された全方位画像群が持つ光線情報を用いて、見直し時の視点画像を生成する手法を説明する．ここでは撮影された全方位動画像の各フレームにおいて、撮影されたカメラの位置・姿勢情報が既知であるとする．Light Field Renderingの原理に基づき、光が伝搬により減衰の変化がないとすると、視点位置と生成する画像面が図 11 のような位置関係にあるときに光線 AP と光線 QP を同等の光線とみなすことが可能である．視点 A での画像上の点 P の画素は、撮影経路上の点 Q からの光線情報を用いて生成することができる．そのため、画像を生成する視点を撮影経路周辺の光線が多く存在する場所に限定した場合、視点画像を複数の全方位画像を用いて擬似的に生成することができる．しかし、全方位画像は移動経路上で離散的に存在しているため、光線と経路の接点に全方位画像が存在しない場合がある．その場合には、生成に必要な光線が通過する直線との距離が最も近い位置で撮影された全方位画像から、生成に必要な光線と平行な光線情報を用いて画像生成を行う．生成時には、生成画像を幅 1 画素の縦ラインに分割し、それぞれの縦ラインにおいて生成に必要な光線を各全方位画像から選択を行うことにより、図 11 に示すような各全方位画像から選ばれた光線が、縦の短冊に分割されるような画像となる．

全方位カメラを 2 台固定して撮影を行っているため、画像生成に必要な光線が左右のカメラで撮影されたそれぞれの全方位画像に存在する．本手法は、図 12 に示すように生成する視点位置から近い位置で撮影された全方位画像を用いる．左右のカメラを近接して固定しているため、撮影された全方位画像には図 13 に示すような、もう一方のカメラ本体によるオクルージョンが発生する場所が存在する．この部分に関しては、カメラ本体によるオクルージョンが発生していないもう一方のカメラで撮影された全方位画像を用いる．

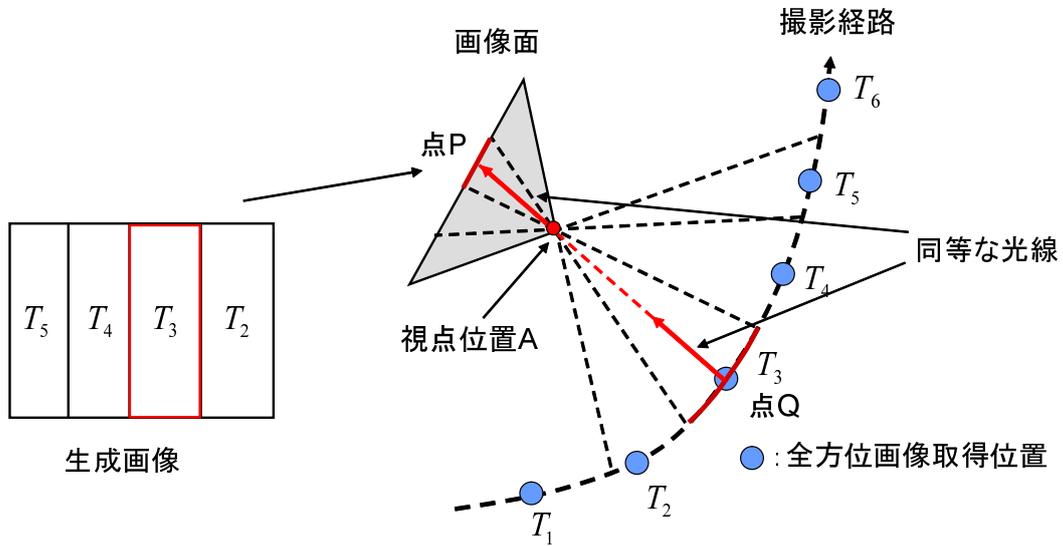
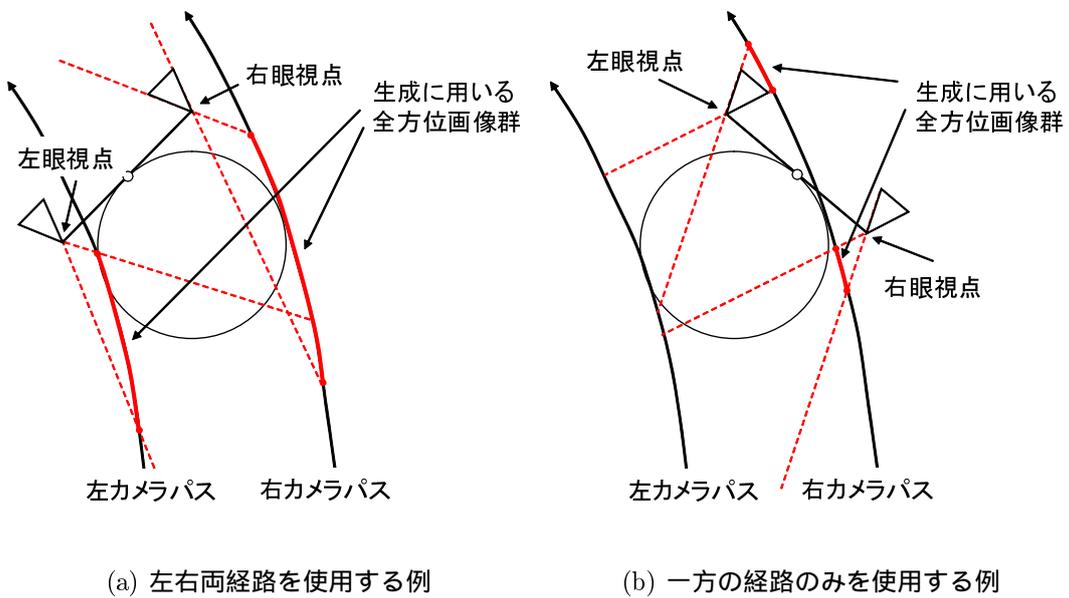


図 11 見回し時の視点画像生成 (上から見た図)



(a) 左右両経路を使用する例

(b) 一方の経路のみを使用する例

図 12 生成に用いる全方位画像群

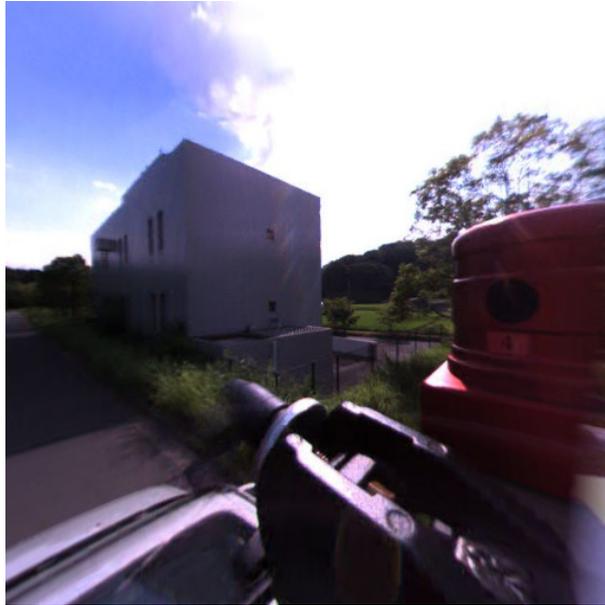


図 13 カメラ本体によるオクルージョン

3.4 DP マッチングを利用した被写体距離の推定

上述の手法において、各視点位置からの被写体距離を一定と仮定してレンダリングを行った場合には、生成画像の隣り合う短冊間において縦方向の歪みが生じることがある。生成画像において歪みが発生した例を図 14 に示す。撮影位置と画像を生成する視点位置が異なるときに、被写体距離を一定と仮定してレンダリングを行った場合には、図 15 実物体が画像中で正しい大きさに表現できないため、隣り合う短冊間で縦視差が生じる。この縦視差は、隣り合う短冊間で生成に用いる画像の取得位置が大きく離れ、被写体までの距離が大きく異なる場合に影響が大きくなる。図 16 に生成に用いる画像取得位置と短冊間の歪みの大きさの関係を示す。図 16(a) に示すように、隣り合う短冊間で生成に用いる画像の取得位置が近い場合は、縦視差の影響が小さいために短冊間の歪みは小さい。一方、図 16(b) に示すように、撮影経路に平行な光線が画像生成に必要な場合は、隣り合う短冊間で生成に用いる画像の取得位置が遠く離れる場合がある。このとき、生成画像の各短冊間の中で歪みの影響が最も大きくなる。

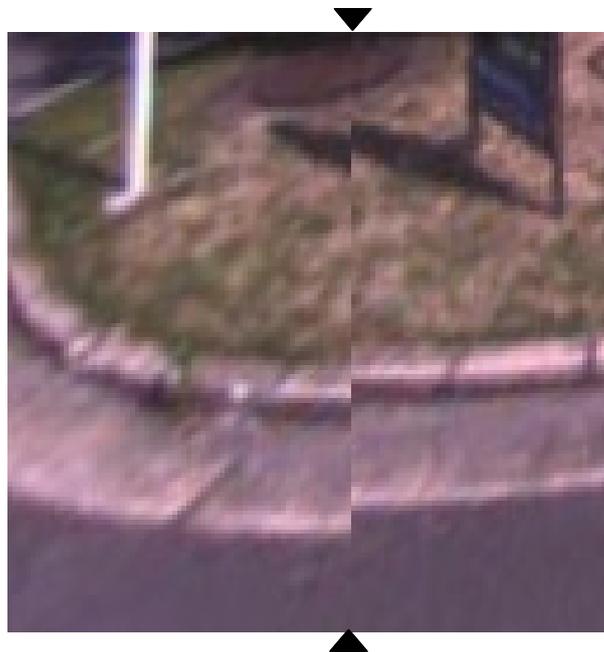


図 14 生成画像における歪みの例

本手法は、この歪みの影響が最も大きくなる短冊間に対して、被写体距離を考慮してレンダリングを行うことにより歪みの軽減を試みる。被写体距離の推定は、マルチベースラインステレオ [8] などの手法で行うことが可能であるが、推定に多くの時間がかかるため、本手法では、撮影位置が異なり、かつ同等の光線が撮影された 2 枚の画像においてパターン類似度を用いた Dynamic Programming (DP) マッチング [9] によりエッジの対応をとり、画像中の各エッジの位置情報とセンサから得られる各画像が撮影された位置情報を用いることにより簡易的に被写体距離の推定を行う。

撮影位置が異なり、かつ同等の光線が撮影された 2 枚の画像は、図 17 に示すような位置で取得される。この 2 枚の画像は、縦方向の歪みが最も大きい短冊間で使用された画像で、それぞれ撮影経路に平行な光線を近似した光線情報を持っている。それぞれの画像間には、図 18 に示すような縦視差があり、この縦視差を利用することにより被写体距離の推定を行う。なお、使用する全方位画像に図 13 のようなカメラ本体のオクルージョンが発生した場合には、同等の光線が撮影

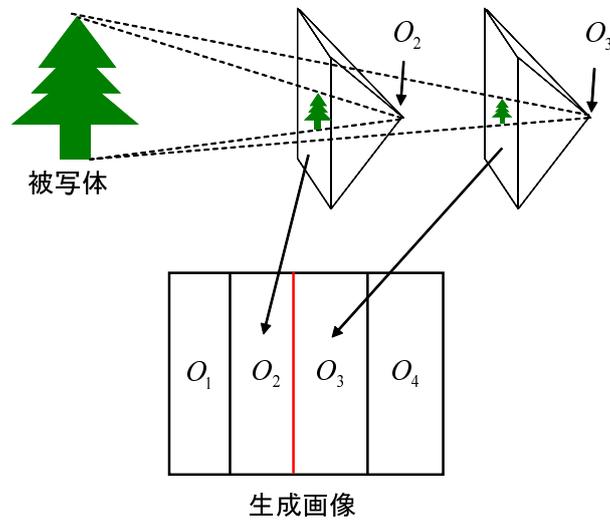
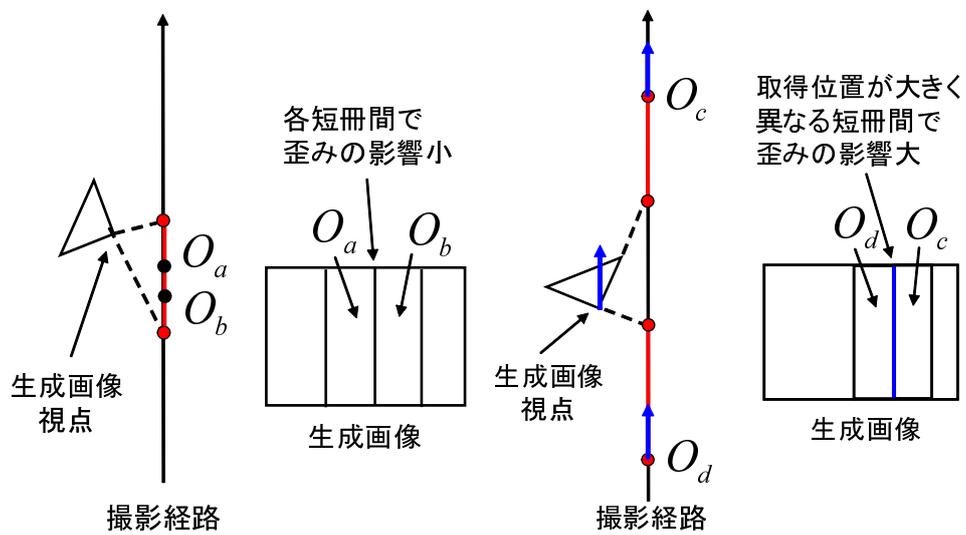


図 15 歪みの発生原因



(a) 隣接短冊の画像選択位置に近い場合

(b) 隣接短冊の画像選択位置が遠い場合

図 16 歪みの影響の大きさ

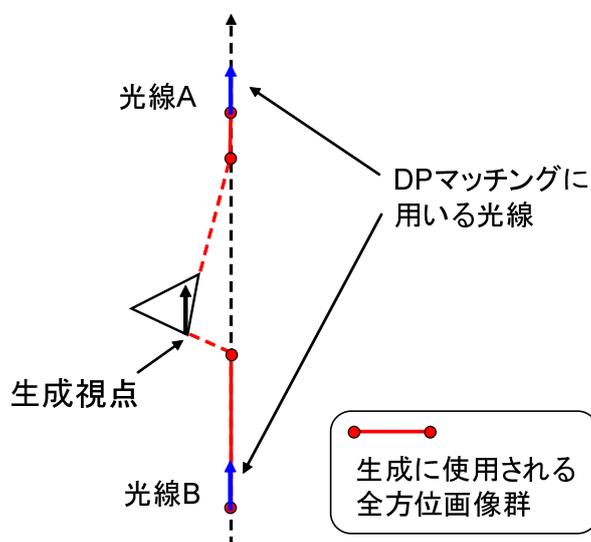
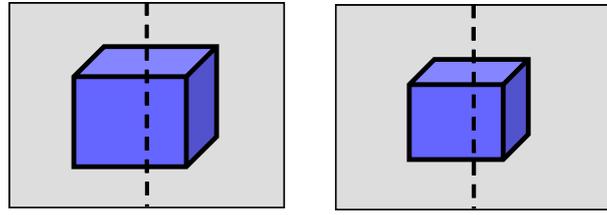


図 17 DP マッチングの際に使用する同等の光線情報を持つ画像（上から見た図）

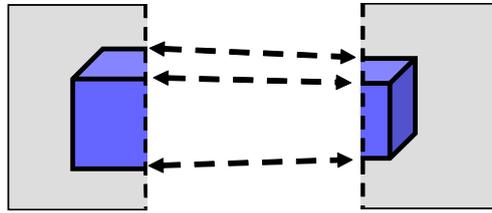
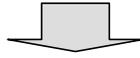
された画像は存在しないが、カメラ本体のオクルージョンが発生する光線方向では、生成に用いられる全方位画像の取得位置が各短冊間で遠くならないため、歪みの軽減を行わない。同等の光線が撮影された2枚の画像からエッジを抽出し、以下の式 (1) に示す DP マッチングにより各エッジの対応をとる。

$$g(L_i, R_j) = \min \begin{cases} g(L_{i-1}, R_j) + d(L_i, R_j) \\ g(L_{i-1}, R_{j-1}) + d(L_i, R_j) \\ g(L_i, R_{j-1}) + d(L_i, R_j) \end{cases}, \quad (1)$$

ここで $L_i (i = 1 \sim I)$ は、一方の画像から抽出された I 本のエッジを、 $R_j (j = 1 \sim J)$ はもう一方の画像から抽出された J 本のエッジを表す。それぞれの画像間のエッジの特徴ベクトル間距離を $d(L_i, R_j)$ とし、 $I = 4, L = 5$ のときの DP マッチングの経路を図 19 に示す。経路上の部分和の計算を式 (1) から算出し、その部分 and $g(L_i, R_j)$ を最小にする経路を算出することによって両エッジのマッチングを行う。なお特徴ベクトル間距離 $d(L_i, R_j)$ は両カメラ画像の画素同士の Sum of



同等な光線が撮影された画像



DPマッチング

図 18 各画像のエッジ同士の DP マッチング

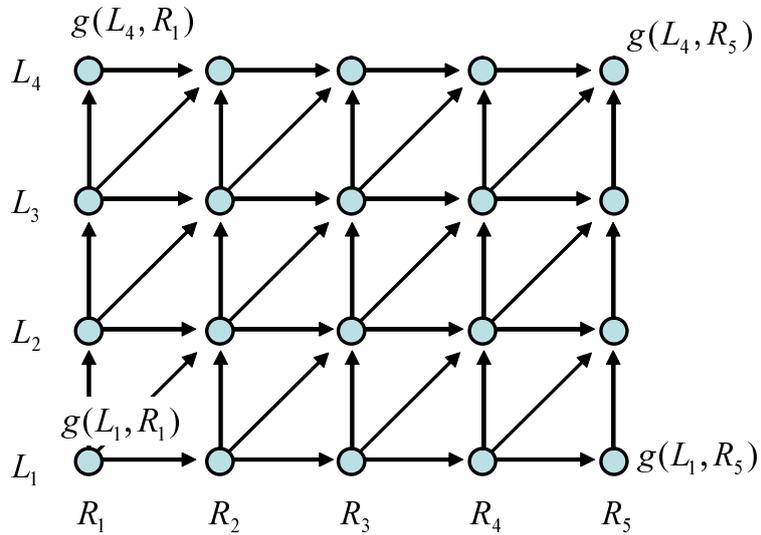


図 19 DP マッチングの経路

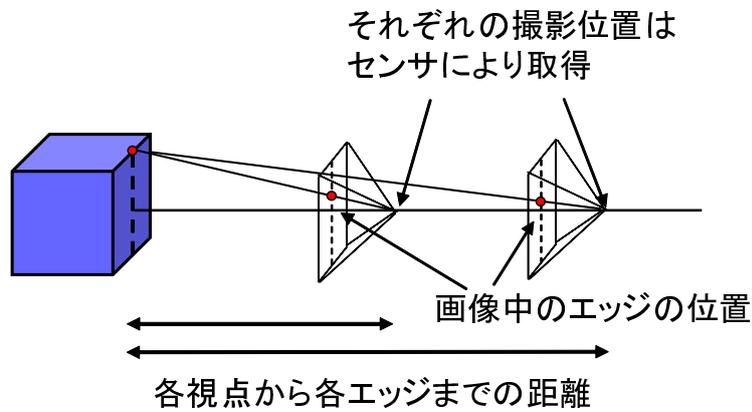


図 20 各エッジまでの距離推定

Squared Differences (SSD) を用いる．SSD は以下の式 (2) で表される．

$$R_{SSD} = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} (I(i, j) - T(i, j))^2, \quad (2)$$

ここでテンプレートの大きさを $M \times N$, テンプレートの位置 (i, j) における画素値を $T(i, j)$, テンプレートと重ね合わせた対象画像の画素値を $I(i, j)$ とする．ただし DP マッチングの特徴としてマッチングを行う際に 1 本のエッジに複数のエッジが対応することがあるが, その場合は複数のエッジの中で SSD の値が最も小さいものを対応エッジとする．このようにして, 撮影位置が異なり, かつ同等の光線情報が取得された 2 枚の画像のエッジの対応をとり, 図 20 に示すように, 各画像が取得された位置情報と各画像中におけるエッジの位置情報を用いて, 各エッジの被写体距離を推定する．

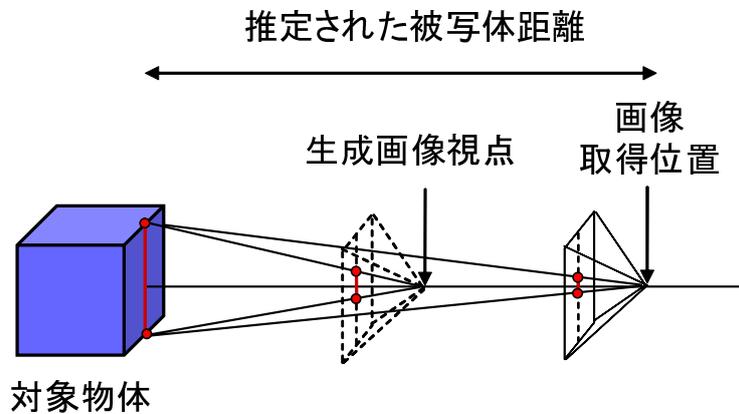


図 21 提案手法のレンダリング

3.5 被写体距離を考慮したレンダリング

生成画像における歪みの影響が最も大きい短冊間の縦ラインにおいて、上述の手法を用いて被写体距離の推定を行う。推定される被写体距離は縦ラインのエッジ上のみであるため、エッジ以外の部分に関しては、線形補間で算出する。このようにして生成画像の歪みの影響が最も大きい短冊間において被写体距離が推定され、図 21 に示すように、画像生成視点位置からの被写体距離を考慮してレンダリングを行う。

レンダリングは、Light Field Rendering の原理に基づき、光が空間内を伝搬することにより伴う干渉や減衰などの変化を無視することにより行う。生成する視点位置からの対象物を通る光線情報は、撮影時の画像が持つ光線情報より取得する。推定された被写体距離を用いることにより、生成する視点位置から対象物を通る光線が、生成する画像の画像面に投影される画素位置の算出が可能である。推定された被写体距離を考慮してレンダリングを行うことにより、対象物が正しい大きさで表現され、生成画像の歪みを軽減することが可能である。

4. 実験

本章では，屋外環境のテレプレゼンスを臨場感豊かに行うことを目的とし，屋外環境で撮影された全方位動画像を用いて，撮影経路に沿って自由な見回しと立体視が可能なステレオ画像の生成を行った結果を示す．

以下，4.1 節では，ステレオ画像生成に用いる全方位画像群とカメラの位置姿勢情報の取得環境について述べ，ステレオ画像の生成結果と生成画像についての考察を詳述し，最後に 4.2 節では，生成したステレオ画像を用いて生成したプロトタイプのテレプレゼンスシステムについて述べる．

4.1 広域屋外環境を対象としたステレオ画像生成

4.1.1 全方位画像の撮影環境

全方位型マルチカメラシステム 2 台と位置姿勢センサを搭載した車両（図 7）を屋外環境の自由経路で移動させながら全方位動画像と撮影位置・姿勢情報を取得した．全方位画像と撮影位置計測に用いたセンサの取得情報を表 2 に示す．全方位動画像は，撮影車両を時速約 8km で移動させながら 15fps で取得した．図 22 に，ハイブリッドセンサにより取得された撮影経路を示す．約 500m の経路上で左右 3500 フレームの全方位画像を取得した．左右 2 台の全方位マルチカメラシステムで取得した全方位パノラマ画像を図 23 に示す．解像度はそれぞれ横 2048 画素，縦 1024 画素である．

4.1.2 ステレオ画像生成結果

前項で取得した全方位画像群とカメラ位置・姿勢情報を用いて，撮影経路上の各地点で見回しを行った際のステレオ画像の生成を行った．被写体距離を考慮してレンダリングを行う提案手法の有効性を示すために，まず，ステレオ画像の生成を行う山口らの手法 [7] と同様に，被写体距離を無限遠と仮定してステレオ画像の生成を行った．図 24 に撮影時の進行方向から左に視線方向を 30 度回転させたときに被写体距離を無限遠と仮定して生成した左眼画像を，図 25 に画像生成に

表 2 各機器の計測情報

計測情報		
全方位型マルチカメラシステム	解像度	2048×1024画素
	計測周期	15fps
位置姿勢計測ハイブリッドセンサ	計測誤差	±3.3cm
	計測周期	50Hz

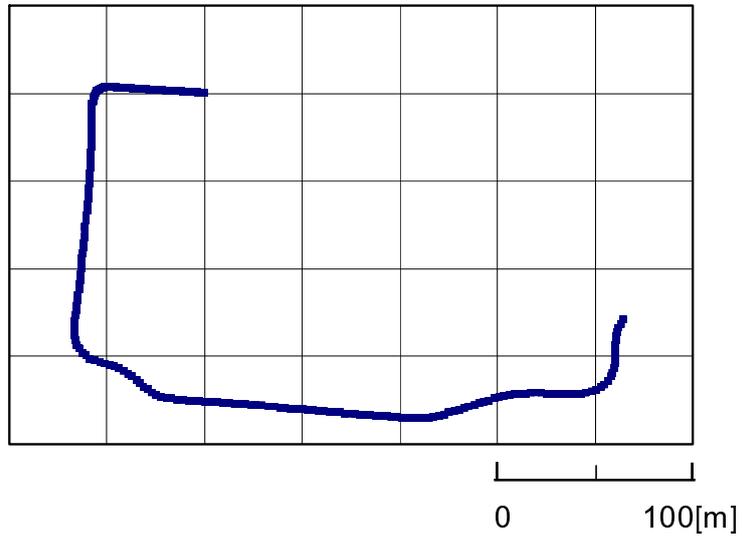


図 22 撮影経路



(a) 左カメラ画像



(b) 右カメラ画像

図 23 全方位パノラマ画像の例

用いた全方位画像の取得位置と画像中の使用位置（x 座標）との関係を示す．図 25 において，全方位画像の取得位置は，視線方向が撮影時の進行方向のときに使用した全方位画像の位置を基準として，前後どの位置の全方位画像を使用したかを表している．図 24 と図 25 より全方位画像の取得位置が隣り合う短冊間で大きく離れた場合に縦視差の影響により縦方向の歪みが生じていることがわかる．

提案手法では，全方位画像の取得位置が大きく離れ，歪みの影響が最も大きい短冊間において，被写体距離を考慮してレンダリングを行うことにより，歪みの軽減を行った．被写体距離の推定に用いた画像を図 26 に示す．図 26 の 2 枚の画像は，図 24 で隣り合う短冊間で最も大きく歪みが生じた場所で使用された同等の光線情報を持つ全方位画像である．各画像中の縦ラインは，被写体距離の推定に用いた同等な光線情報を含む縦ラインを示す．この 2 枚の画像のエッジ画像において，DP マッチングで両エッジの対応をとることにより被写体距離の推定を行った．なお，DP マッチングで用いる SSD の計算は，ウインドウサイズを縦 25 画素，横 25 画素で行った．被写体距離の推定結果を図 27 に，推定された被写体距離を考慮してレンダリングを行った結果を図 28 に示す．被写体距離を考慮してレンダリングを行うことにより，被写体距離を考慮しない場合に生じていた短冊間の歪みが軽減されたことが確認できた．

自由な見回しを行うためには，すべての視線方向のステレオ画像が必要となるため，さまざまな視線方向のステレオ画像の生成を行った．生成されたステレオ画像の例を図 29 に示す．これらは，ユーザが見回しを行った場合のステレオ画像例で，それぞれの画像の解像度は横 1024，縦 768 画素である．なお PC (Pentium D 3.0GHz, メモリ 3.0GB) を使用した場合，両眼 2 枚の画像生成に合計約 11.6 秒を要した．

4.1.3 考察

ステレオ画像生成において，被写体距離を考慮してレンダリングを行うことにより，画像中の隣り合う短冊間で縦視差による歪みを軽減することが可能であった．すべての視線方向のステレオ画像を生成することにより，自由な見回しと立体視が可能であった．しかし，撮影経路が大きく湾曲した場合には，被写体距離



図 24 被写体距離を一定と仮定して生成した画像 (従来手法)

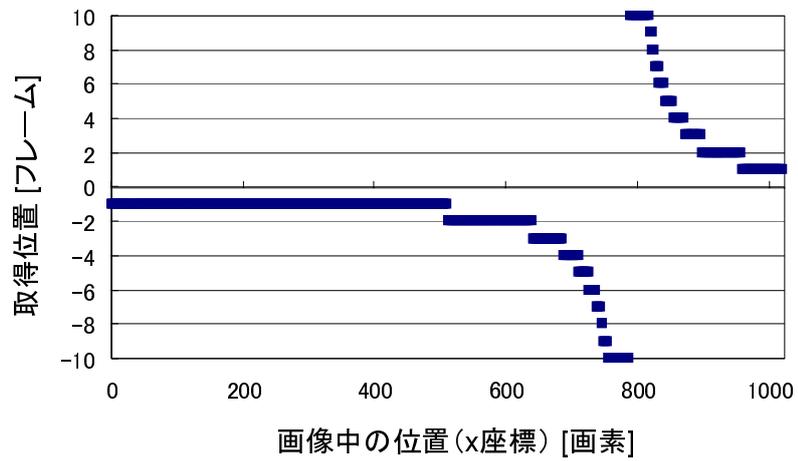
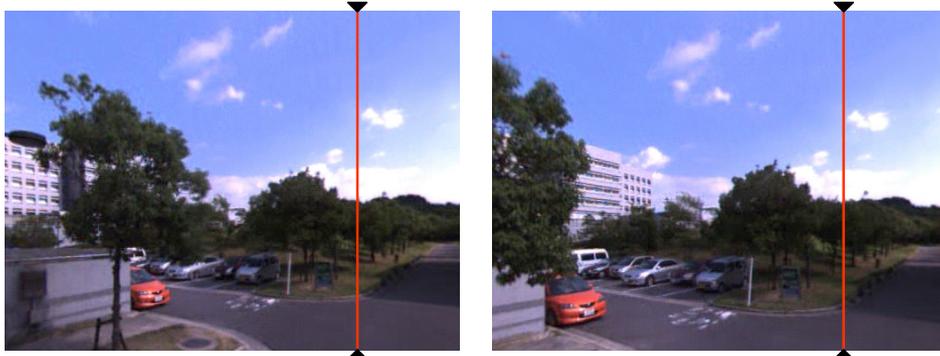


図 25 使用した全方位画像の取得位置



(a)

(b)

図 26 被写体距離の推定に用いた画像

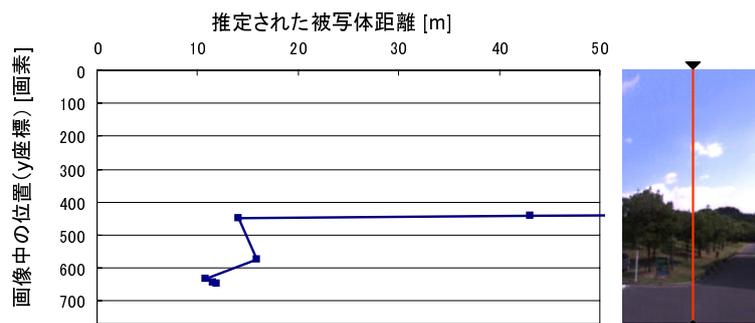
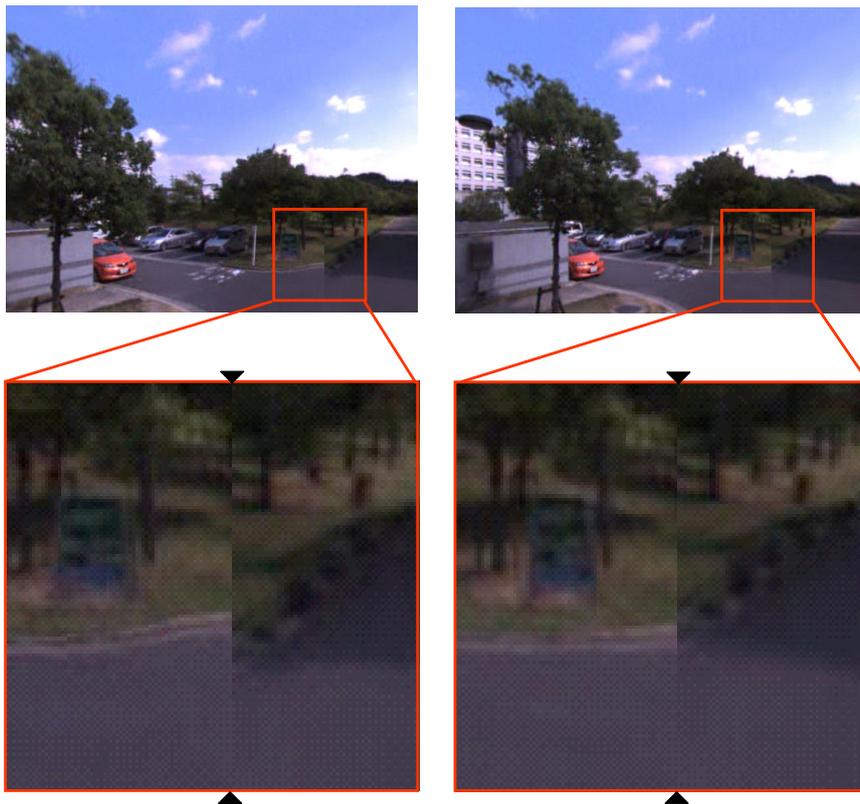


図 27 被写体距離の推定結果



(a) 被写体距離を無限遠と仮定して生成した画像

(b) 推定された被写体距離を考慮してレンダリングを行った画像

図 28 生成画像における歪みの軽減例



(i) 進行方向の視線画像



(ii) 進行方向に対して視線を 30 度回転した視線画像



(iii) 進行方向に対して視線を 60 度回転した視線画像

(a) 左眼画像

(b) 右眼画像

図 29 生成されたステレオ画像 (1/4)



(iv) 進行方向に対して視線を 90 度回転した視線画像



(v) 進行方向に対して視線を 120 度回転した視線画像



(vi) 進行方向に対して視線を 150 度回転した視線画像

(a) 左眼画像

(b) 右眼画像

図 29 生成されたステレオ画像 (2/4)



(vii) 進行方向に対して視線を 180 度回転した視線画像



(viii) 進行方向に対して視線を 210 度回転した視線画像



(ix) 進行方向に対して視線を 240 度回転した視線画像

(a) 左眼画像

(b) 右眼画像

図 29 生成されたステレオ画像 (3/4)



(x) 進行方向に対して視線を 270 度回転した視線画像



(xi) 進行方向に対して視線を 300 度回転した視線画像



(xii) 進行方向に対して視線を 330 度回転した視線画像

(a) 左眼画像

(b) 右眼画像

図 29 生成されたステレオ画像 (4/4)

の推定に用いる 2 本の光線が同一のものではない場合があり，被写体距離が正確に推定されない可能性があるため，今後は推定精度を評価する必要があると考えられる．

また，生成に用いる全方位画像群の取得位置が大きく異なる場合に，それぞれの全方位画像が撮影された照明条件が異なるなど，生成画像に違和感が生じる場合があった．このように複数の全方位画像を用いて画像を生成する場合には，それぞれの全方位画像において，光学特性を考慮する必要がある．

本手法は，オフラインで画像を生成・蓄積を行うため，自由な見回しを可能とするためには，膨大なデータ量の画像を生成する必要がある．今後は，撮影された全方位画像群からリアルタイムでステレオ画像の生成を行うことにより，蓄積するデータ量の削減を行う必要がある．

4.2 ステレオ画像を用いたテレプレゼンスシステム

広域屋外環境を仮想化し，1つの経路上を移動する感覚を再現する視点移動型テレプレゼンスシステムの構築を行った．テレプレゼンスシステムの構成を図 30，機器構成を表 3 に示す．4.1.1 項の図 22 に示す経路を移動した場合のステレオ画像の提示を行った．撮影経路に沿って自由に見回しを行った場合の画像は，すべての視線方向の画像が必要となるが，本手法では，画像をオフラインで生成しているため，撮影経路に沿った 100 地点で視線方向を 5 度ずつ回転させて生成した画像（合計 14400 枚）を用いて自由な見回しを可能とした．臨場感の高いテレプレゼンスを行うために，本手法で生成したステレオ画像を図 31 で示す没入型ディスプレイに提示した．ステレオ画像は，すべての方向の視線画像をあらかじめオフラインで生成し，ユーザが指示をした視線方向の画像をインタラクティブに提示した．テレプレゼンス中のユーザの外観を図 32 に示す．ユーザは，液晶シャッター眼鏡を通してステレオ画像を見ることで立体視が可能である．視点移動インタフェースは，ゲームコントローラを用いて，撮影経路に沿った視点移動と自由な見回しを可能とした．

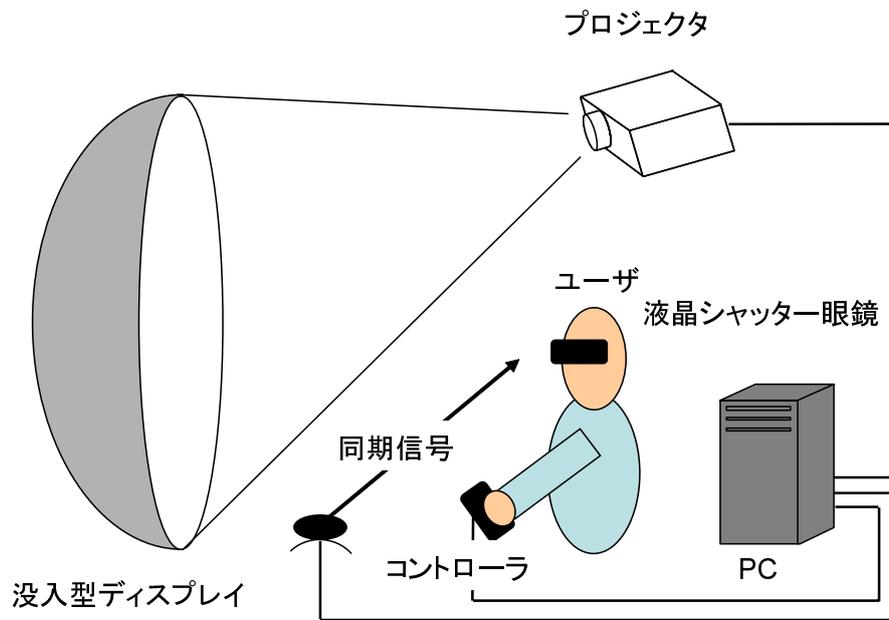


図 30 テレプレゼンスシステムの構成

表 3 システムの機器構成

ディスプレイ	直径: 4.0m
	画角: 水平114° 垂直77°
プロジェクタ	解像度: 1280 × 1024 (SXGA)

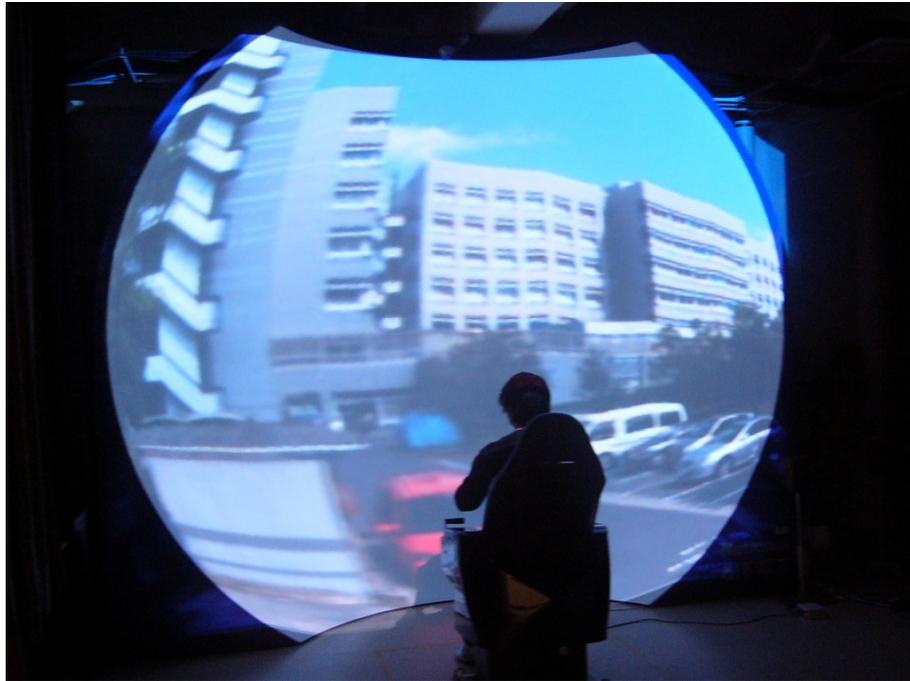


図 31 テレプレゼンスの様子



図 32 ユーザ外観

5. まとめ

本論文では、広域屋外環境において曲線経路を含む自由経路で撮影された全方位動画像群と撮影位置・姿勢情報を用いて、任意方向のステレオ画像を生成する手法を提案した。入力となる全方位画像は、全方位型マルチカメラシステムを用いることにより高解像度のステレオ画像を生成可能である。生成するステレオ画像は、ユーザの進行方向の視線画像は、眼間距離離して固定した2台の全方位カメラで撮影された画像の一部を用いて生成し、見回し時の視線画像は、撮影された全方位画像群からIBRにより生成を行った。IBRでステレオ画像の生成を行うためには、撮影時のカメラ位置・姿勢情報が必要となるが、RTK-GPSとINSを用いたハイブリッドセンサを用いることにより、高精度で高レートな位置・姿勢情報を取得可能である。

また、本手法では画像取得位置から物体までの距離を、同等の光線情報を持つ2枚の画像からDPマッチングを用いて推定し、視点位置からの距離を考慮してレンダリングを行うことにより、生成画像における短冊間で歪みの軽減を行った。実験ではプロトタイプのプレゼンスシステムの構築を行い、ユーザの指示する視線方向のステレオ画像を提示することにより自由な見回しと立体視が可能であることを確認した。

本手法では、オフラインで画像を生成・蓄積を行ったため、自由な見回しを可能とするためには、膨大なデータ量の画像を生成する必要があった。今後は、撮影された全方位画像群からリアルタイムに生成を行うことにより、蓄積するデータ量の削減を行う必要がある。また、本手法では、ステレオ画像生成に用いる全方位画像群は静的な環境で撮影される必要がある。広域屋外環境をテレプレゼンスの対象にした場合、車両や人間といった移動物体が存在する場合を考慮しなければならない。そこで今後の課題として、動的環境下で撮影された全方位画像から動物体を除いてステレオ画像生成を行うことが挙げられる。

謝辞

本研究の全過程を通して，懇切なる御指導，御鞭撻を賜りました視覚情報メディア講座 横矢直和教授に心より感謝いたします．本研究を進めるにあたり，有益な御助言，御指導を頂きました像情報処理学講座 千原國宏教授に厚く御礼申し上げます．本研究を通じて，温かい御指導をして頂きました視覚情報メディア講座 山澤一誠助教授に深く感謝いたします．

そして，本研究を行うにあたり，多大なる御助言，御鞭撻を賜りました視覚情報メディア講座 神原誠之助手に深く御礼申し上げます．また，本研究の遂行に適切な御助言を頂きました視覚情報メディア講座 佐藤智和助手に心より感謝いたします．本研究に関する貴重な御助言や御指摘を頂きました視覚情報メディア講座 池田聖特任助手に深く感謝いたします．本研究の実験を幾度となくお手伝い頂いた河合紀彦氏，松田幸大氏に深く感謝いたします．研究室において物心両面において常に温かい御支援を頂きました視覚情報メディア講座 守屋知代女史に厚く御礼申し上げます．最後に，研究活動だけでなく日々の生活においても大変お世話になりました視覚情報メディア講座の諸氏に深く感謝いたします．

参考文献

- [1] S. Moezzi. Ed.: Special Issue on Immersive Telepresence, IEEE MultiMedia, Vol. 4, No. 1, pp. 17–56, 1997.
- [2] T. Asai, M. Kanbara and N. Yokoya: “3D Modeling of Outdoor Environments by Integrating Omnidirectional Range and Color Images,” Proc. Int. Conf. on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM), pp. 447–454, 2005.
- [3] L. McMillan and J. Bergen: “Plenoptic Modeling: An Image-Based Rendering System,” Proc. SIGGRAPH’95, pp. 39–46, 1995.
- [4] S. Ono, K. Ogawara, M. Kagesawa, H. Kawasaki, M. Onuki, K. Honda and K. Ikeuchi: “Driving View Simulation Synthesizing Virtual Geometry and Real Images in an Experimental Mixed-Reality Traffic Space,” Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp. 214–215, 2005.
- [5] 遠藤, 片山, 田村, 廣瀬: “写実的な広域仮想空間構築のための画像補間手法”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 2, pp. 185–192, 2002.
- [6] M. Levoy and P. Hanrahan: “Light Field Rendering,” Proc. SIGGRAPH’96, pp. 31–42, 1996.
- [7] K. Yamaguchi, K. Yamazawa, H. Takemura and N. Yokoya: “Real-Time Generation and Presentation of View-Dependent Binocular Stereo Images Using a Sequence of Omnidirectional Images,” Proc. 15th IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition (ICPR2000), Vol. IV, pp. 589–593, 2000.
- [8] 佐藤, 神原, 横矢, 竹村: “マルチベースラインステレオ法を利用した動画像からの屋外環境の三次元モデル化”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 2, pp. 275–282, 2002.
- [9] R. Bellman: Dynamic Programming, Princeton Univ. Press, New Jersey, 1957.

- [10] 高橋, 川崎, 池内, 坂内: “全方位画像を用いた広域環境の自由視点レンダリング”, 情報処理学会論文誌, Vol. 42, No. SIG13(CVIM3), pp. 99–109, 2001.
- [11] E. Chen: “QuickTime VR -An Image-Based Approach to Virtual Environment Navigation,” Proc. SIGGRAPH’95, pp. 29–38, 1995.
- [12] 池田, 佐藤, 横矢: “全方位型マルチカメラシステムを用いた高解像度な全天球パノラマ動画の生成とテレプレゼンスへの応用”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 8, No. 4, pp. 443–450, 2003.
- [13] S. E. Chen and L. Williams: “View Interpolation for image synthesis,” Proc. SIGGRAPH’93, pp. 279–288, 1993.
- [14] M. Kato and H. Noyama: “Interactive Visual Simulation in a Quasi-Three-Dimensional World Based on the Structuralization of Images,” Proc. Int. Conf. on Artificial Reality and Telexistence, pp. 101–110, 1995.
- [15] E. H. Adelson and J. R. Bergen: The Plenoptic Function and the Elements of Early Vision, in M. Landy and J. Movshon, ed., Computer Models of Visual Processing, MIT Press., pp. 3–20, 1991.
- [16] 藤井, 木藤, 金子, 原島: “3次元統合画像通信を目指したホログラムと光線空間の相互変換”, 3次元画像コンファレンス’95講演論文集, pp. 220–225, 1995.
- [17] T. Naemura, T. Takano, M. Kaneko and H. Harashima: “Ray-Based Creation of Photo-Realistic Virtual World,” Int. Conf. Virtual Reality and MultiMedia (VSMM’97), pp. 59–68, 1997.
- [18] S. Gortler, R. Grzeszczuk, R. Szeliski and M. Cohen: “The Lumigraph,” Proc. SIGGRAPH’96, pp. 43–54, 1996.
- [19] H. Y. Shum and L. W. He: “Rendering with Concentric Mosaics,” Proc. SIGGRAPH’99, pp. 299–306, 1999.

- [20] R. Bolles, H. Baker and D. Marimont: “Epipolar-Plane Image Analysis: An Approach to Determining Structure from Motion,” *Int. Journal of Computer Vision*, Vol. 1, No. 1, pp. 7–55, 1987.
- [21] 神原, 横矢: “RTK-GPS と慣性航法装置を併用したハイブリッドセンサによる屋外型拡張現実感システム”, *画像の認識・理解シンポジウム (MIRU) 講演論文集*, pp. 933–938, 2005.
- [22] Point Grey Research Inc. <http://www.ptgrey.com/>.
- [23] S. M. Seitz and C. R. Dyer: “View Morphing,” *Proc. SIGGRAPH’96*, pp. 21–30, 1996.
- [24] J. I. Park and S. Inoue: “Image-Based Rendering from Multi-View images,” *Journal of ITE*, Vol. 52, No.3, pp. 371–376, 1998.
- [25] C. J. Taylor: “VideoPlus: A Method for Capturing the Structure and Appearance of Immersive Environments,” *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol. 8, No.2, pp. 171–182, 2002.
- [26] T. Endo, A. Katayama, H. Tamura, M. Hirose, T. Tanikawa and M. Saito: “Image-Based Walk-Through System for Large-Scale Scenes,” *Proc. of 4th Int. Conf. on Virtual Systems and Multimedia (VSMM’98)*, Vol. 1, pp. 269–274, 1998.
- [27] T. Pintaric, U. Neumann and A. Rizzo: “Immersive Panoramic Video,” *Proc. of 8th ACM Int. Conf. on Multimedia*, pp. 493–494, 2000.
- [28] D. Kotake, T. Endo, F. Pighin, A. Katayama, H. Tamura and M. Hirose: “Cybercity Walker 2001: Walking Through and Looking Around a Realistic Cyberspace Reconstructed from the Physical World,” *Proc. 2nd IEEE and ACM Int. Symp. on Augmented Reality*, pp. 205–206, 2001.

- [29] S. F. El-Hakim, C. Brenner and G. Roth: “A Multi-sensor Approach to Creating Accurate Virtual Environments,” *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 53, pp. 379–391, 1998.
- [30] H. Zhao and R. Shibasaki: “Reconstruction of Textured Urban 3D Model by Fusing Ground-Based Laser Range and CCD Images,” *IEICE Trans. on Information and Systems*, Vol. E83-D, No. 7, pp. 1429–1440, 2000.
- [31] S. Ikeda, T. Sato, M. Kanbara and N. Yokoya: “Immersive Telepresence System with a Locomotion Interface Using High-Resolution Omnidirectional Videos,” *Proc. IAPR Conf. on Machine Vision Applications*, pp. 602–605, 2005.
- [32] 山口, 山澤, 竹村, 横矢: “全方位動画像を用いた両眼ステレオ画像の実時間生成によるテレプレゼンス”, *電子情報通信学会論文誌 (D-II)*, Vol. J84-D-II, No. 9, pp. 2048–2057, 2001.
- [33] 大田, 山田: “動的計画法によるパターンマッチング”, *情報処理*, Vol. 30, No. 9, pp. 1058–1066, 1989.
- [34] 磯道, 小川: “動的計画法によるパターン・マッチング”, *情報処理*, Vol. 16, No. 1, pp. 15–22, 1975.
- [35] H. Sakoe and S. Chida: “A Dynamic Programming Algorithm Optimization for Spoken Word Recognition,” *IEEE Tran. on Acoust. Speech and Signal Proc.*, Vol. ASSP-26, No. 1, pp. 43–49, 1978.
- [36] R. Bellman and S. Dreyfus: *Applied Dynamic Programming*, Princeton Univ. Press, New Jersey, 1962.
- [37] 堀, 神原, 横矢: “任意経路で撮影された全方位画像群からのステレオ画像生成”, *情報科学技術フォーラム (FIT) 一般講演論文集*, Vol. 3, pp. 5–6, 2006.

- [38] 堀, 神原, 横矢: “被写体距離を考慮した Image-Based Rendering による広域屋外環境のステレオ画像生成”, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU2006-185, 2007.