

複数の全方位画像を用いた広範囲なウォークスルーの実現

富手 要 山澤 一誠 横矢 直和

奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

あらまし 近年, バーチャルリアリティの世界に現実環境を取り込み, 写実性の高い見回し可能なウォークスルー環境を実現する研究が行われている. これらの研究はリアリティが要求されるシミュレータの構築やウォークスルー可能なテレプレゼンスの実現などに応用することが可能である. そこで本研究では, 現実世界の情景を仮想環境に取り込み, 360°の見回しが可能で広範囲なウォークスルー環境を構築することを目的とする. 提案手法では, 全方位画像センサを用い, 現実環境中の複数の地点で全方位画像を取得し, 画像間の対応を与えることにより任意視点における全方位画像を生成し, さらに全方位画像からユーザの視線に追従した透視投影画像を生成・提示する. 実験では 20 枚の全方位画像を用いてウォークスルー環境を構築し, 屋内のウォークスルーを行うことにより, 手法の有効性を確認した.

Wide Area Walkthroughs from Multiple Omnidirectional Images

Kaname Tomite, Kazumasa Yamazawa, and Naokazu Yokoya

Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

Abstract Recently, the walkthrough which enables us to look around a virtualized real world has been widely investigated. The walkthrough system can be applied to simulation, telepresence, and so on. This paper describes a method of interactive walkthrough which takes a real scene and enables us to look around in the virtualized scene. Our method is based on acquiring omnidirectional images at multiple points in the real world by using an omnidirectional camera. The method generates an omnidirectional image at an arbitrary location from captured omnidirectional images, and presents a user a converted perspective image according to user's viewing direction. In the experiment, we made the walkthrough using indoor omnidirectional images and confirmed the feasibility of the method.

1 はじめに

近年, 実写画像を仮想環境内に取り込むことにより, 都市の景観, 建築物の内部, 自然環境といった写実性の求められる環境を仮想環境内に再現し, 任意の視点における自由な見回しを実現するための研究が盛んに行われている [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. これらの研究はドライブシミュレータや防災シミュレータなどのリアリティが要求されるシミュレータの構築や仮想観光などに応用することが可能であり, 都市計画, 交通工学, 教育やアミュ・ズメントなどの幅広い分野での活用が期待されている. そこで本研究では, 複数枚の入力画像から, ユーザにとって自由な視点位置で見回すことが可能で, かつ広範囲にわたってウォークスルー可能なシステムを構築することを目的とする.

本研究では, 全方位画像センサ HyperOmni Vision [8] を用いて, 全方位画像センサの世界座標系における位置, 姿勢が既知の画像を複数箇所を取得する. そして, 全方位画像間の対応点の位置関係に基づき, 入力として与えられる全方位画像 (以下, 入力画像) をブレンドし, 任意の視点位置における全方位画像を生成する. ここで任意の視点位置における全方位画像を生成するのは, 見回しに関して高速に計算するためである. 最後に, 生成した全方位画像をユーザの視線情報に基づいて平面透視投影画像に変換し, 提示することによって任意視点における自由な見回しを実現する.

以下, 2 章では, 全方位画像センサで取得した画像から三次元復元を行い, 任意視点の全方位画像上における対応点を決定する方法について述べ, 任意視点にお

る全方位画像の生成方法について述べる。3章では、実際に20枚の全方位画像を入力として使用し、部屋全体のワークスルーを行い、提案手法の有用性について考察する。最後に4章で、本稿のまとめと今後の課題を述べる。

2 複数の全方位画像からの任意視点画像の生成

2.1 概要

提案手法ではデジタルスチルカメラに搭載した全方位画像センサを用い、図1のように複数箇所ですべて全方位画像を取得する。このとき、各撮影地点における全方位画像センサはセンサ軸が平行で、かつ投影中心が同一平面（以下、センサ面と呼ぶ）上になるように配置する。入力画像の撮影地点とセンサ面上のユーザの視点位置、および対応点の情報から任意視点画像を生成することにより、ユーザは入力画像の撮影地点によって形成される多角形の内部をワークスルーすることが可能である。提案手法のフローチャートを図2に示す。全方位画像センサの位置、姿勢、および入力画像と入力画像間の対応点を入力とする。入力画像間の対応点はあらかじめ手動または自動により求められているものとする。まず、生成画像の視点位置における全方位画像上の対応点の位置を算出する。次に、得られた対応点に対し三角形パッチを生成する。生成された三角形に対応する三角形の画像を各入力画像から切り出し、生成画像の視点位置に基づいて重み付けを行いブレンドし、任意の視点位置における全方位画像を生成する。最後に、生成された全方位画像をユーザの姿勢に基づき平面透視投影画像に変換し提示する。

本章では、まず全方位画像センサについて述べた後、入力データから重みを計算し、対応点の三次元位置を推

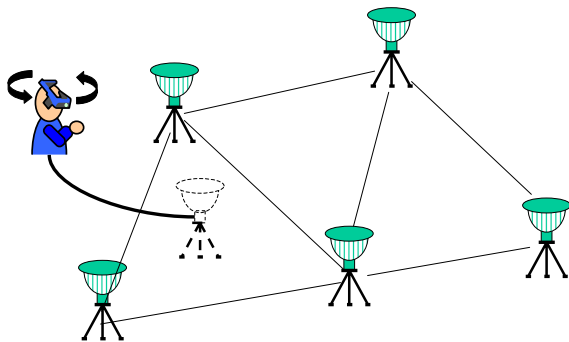


図1: 提案手法の概念図

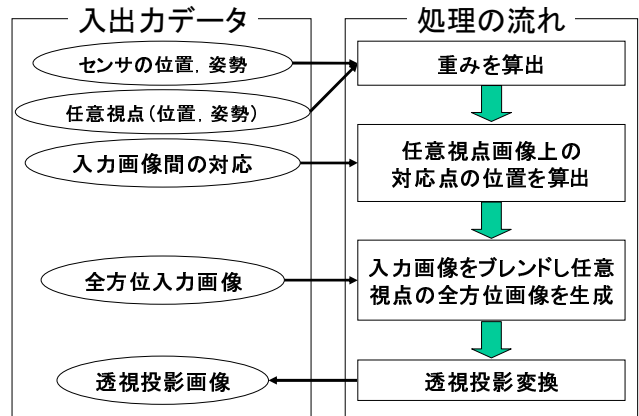
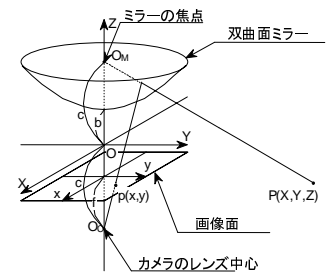


図2: 提案手法のフローチャート



(a)



(b)

図3: 全方位画像センサ搭載デジタルカメラ

定する手法について述べ、さらに任意視点における全方位画像上の対応点の位置の算出方法について述べる。最後に、任意視点における全方位画像の生成手法について述べる。

2.2 全方位画像センサ

本研究では、デジタルスチルカメラに搭載した全方位画像センサを用いる。図3(a)はNikon CoolPix990に全方位画像センサを搭載した図である。全方位画像センサは図3(b)に示すように、鉛直下向きに取り付けられた双曲面ミラーに写り込む像をその下部に取り付けたデジタルカメラで撮像するものである。ミラー部の双曲面には回転二葉双曲面を用い、図3(b)に示すように二焦点 O_M, O_C が存在し、カメラのレンズ中心が O_C に位置するように設置される。さらに、 Z 軸を鉛直軸とする三次元世界座標系 (X, Y, Z) を考えると、双曲面ミラーの面、ミラー焦点 O_M 、およびカメラのレンズ中心 O_C は式(1)で表せる(a, b は双曲面の形状を定義する定数)。

$$\begin{aligned}
 \text{ミラー曲面} &: \frac{X^2 + Y^2}{a^2} - \frac{Z^2}{b^2} = -1 \\
 \text{ミラー焦点 } O_M &: (0, 0, +c) \\
 \text{レンズ中心 } O_C &: (0, 0, -c) \\
 (c = \sqrt{a^2 + b^2}) &
 \end{aligned} \tag{1}$$

内側の焦点 O_M に集まる像は双曲面ミラーに反射して、外側の焦点 O_C に集まる。ここで、 O_C にレンズ中心を置いたカメラで全方位の画像を撮影すると、双曲面の特性により、三次元空間中の点 $P(X, Y, Z)$ と全方位画像上の写像点 $p(x, y)$ の間には式 (2) の関係が成立する (f は CCD カメラの焦点距離)。

$$\begin{aligned} x &= \frac{Xf(b^2-c^2)}{(b^2+c^2)(Z-c)-2bc\sqrt{X^2+Y^2+(Z-c)^2}} \\ y &= \frac{Yf(b^2-c^2)}{(b^2+c^2)(Z-c)-2bc\sqrt{X^2+Y^2+(Z-c)^2}} \end{aligned} \quad (2)$$

したがって、式 2 により入力全方位画像をミラー焦点 O_M から見た平面透視投影画像に変換することも可能である [8]。提案手法ではこの平面透視投影画像をユーザへの提示画像として利用するため自由な見回しが可能となる。

2.3 任意視点画像生成のための重みの導入

本研究では、ウォークスルーの品質を高めるため、ユーザの視点位置が入力画像の撮影地点に近い場合には、生成した画像が入力画像に近い画像となるようにする。そこで、提案手法では三次元空間中の点の位置推定と入力画像のブレンドの際に任意視点位置に応じた重みを導入する。重みは任意視点が入力画像の撮影地点と一致した際には、生成される全方位画像と入力画像が一致するように決定する。

図 4 は入力画像の撮影地点と任意視点の位置関係を図示したものである。ここで、任意視点の位置 $P_v(X_v, Y_v)$ は w_1, w_2, w_3 と入力画像の撮影地点 $P_1(X_1, Y_1), P_2(X_2, Y_2), P_3(X_3, Y_3)$ によって以下のように表わすことが可能である。

$$\begin{aligned} X_v &= w_1X_1 + w_2X_2 + w_3X_3 \\ Y_v &= w_1Y_1 + w_2Y_2 + w_3Y_3 \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 $w_1 + w_2 + w_3 = 1$

上の連立方程式を解くことにより得られる w_1, w_2, w_3 を重みとし、対応点の三次元位置の推定と入力画像のブレンド処理の際に使用する。

2.4 対応点の三次元位置の推定

三地点で取得された全方位画像上の対応点の座標 $p_1(x_1, y_1), p_2(x_2, y_2), p_3(x_3, y_3)$ から、その三次元位置 $T(X, Y, Z)$ を推定する。図 5(a) は全方位画像上の対応点の位置とセンサの投影中心とを結ぶ直線を上から見下ろした図であり、図 5(b) は推定される対応点の三次元

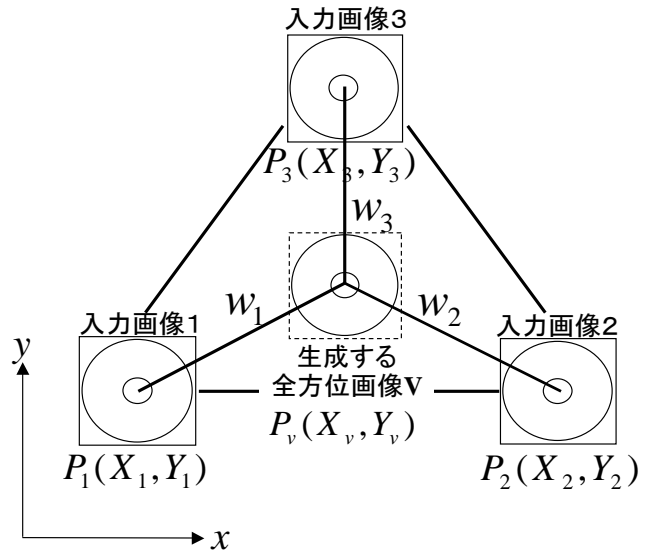


図 4: 重みとセンサの位置関係

位置の周辺を拡大表示したものである。全方位画像上の対応点とセンサの投影中心とを結ぶ直線は量子化誤差などの影響により一般には一点で交わらない。そこで、これらの直線との距離の二乗和が最小となる点を推定位置 T' とする。

対応点の推定位置 T' を任意視点における全方位画像上へ再投影した場合、任意視点が入力画像の撮影地点と一致していても再投影された対応点が撮影地点の全方位画像上の対応点と一致するとは限らない。つまり、撮影地点と任意視点が入力画像の撮影地点と一致した場合でも、生成した全方位画像が撮影した全方位画像と一致するとは限らない。そこで、各直線 l_1, l_2, l_3 上で T' に最も近い点を T_1, T_2, T_3 とし、以下の式により対応点の三次元位置 T を算出する。これにより、撮影地点と任意視点が入力画像の撮影地点と一致していた場合、生成した全方位画像は撮影した全方位画像と一致する。

$$T = w_1T_1 + w_2T_2 + w_3T_3 \quad (4)$$

図 5(c) は点 T_1, T_2, T_3 によってできる三角形に対し、重み w_1, w_2, w_3 を用いて三次元の位置 T を算出した過程を図示したものである。

2.5 全方位画像上の対応点の位置の算出

任意視点における全方位画像上の対応点の位置 $p_v(x_v, y_v)$ は、前節で得られた対応点の三次元座標 $T(X, Y, Z)$ を式 (2) により生成したい全方位画像上へ再投影することにより算出する。このようにして対応点の全組合せに対し任意視点における対応点の位置を算出する。

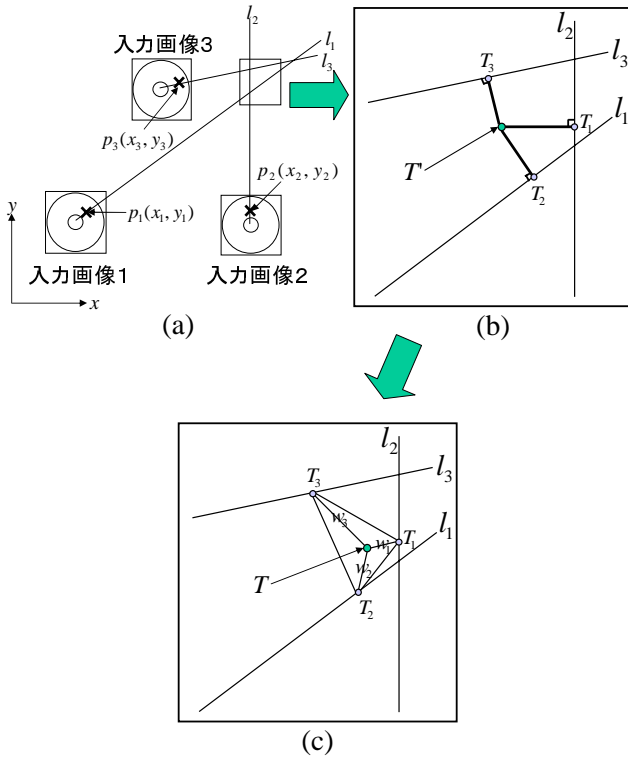


図 5: センサと推定される対応点の位置関係 (a) と拡大図 (b), 重みを用いて算出した三次元位置 T (c)

2.6 任意視点における画像の生成

前節で得られた任意の視点位置における全方位画像上の対応点集合に対し, Delaunay の三角分割法 [9] を適用し, 三角形パッチを生成する. 生成された三角形パッチに対応する各入力画像の三角形画像を切り出し, 任意の視点位置における全方位画像上の三角形と同じ形状に変形する. その後, 各入力画像より得られた三角形の画像に対し, 重み w_1, w_2, w_3 を用いてブレンドを行い, 任意の視点位置における全方位画像を生成する.

このとき, ユーザの視点位置の移動に伴い毎回三角形パッチを生成し直すと三角形パッチの構成が変更され, 視点移動時の映像に不連続が生じる原因になる. そこで, 三角形パッチは, 入力画像の視点位置によって形成される三角形の重心位置を視点とした全方位画像に対して一度だけ三角形パッチを生成する. 図 6 は Delaunay で三角分割を行い入力画像をブレンドした例である.

最後に, 文献 [10] の手法を用いて生成された全方位画像からユーザの姿勢に基づき平面透視投影画像に変換し提示する. このとき, 直接に平面透視投影画像を生成せず一度全方位画像を生成するのは, 見回しと視点の移動を切り離すのが目的である. なぜならジョイスティックなどにより移動し, ヘッドマウントディスプレイなど

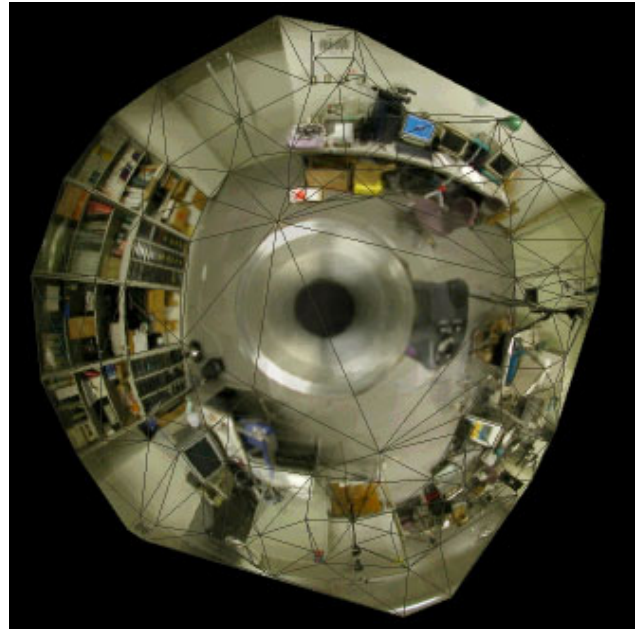


図 6: 生成された全方位画像の例

により見回す場合, 視点の移動より見回しのほうが頻度が高くなる. よって, 一度全方位画像を生成することにより見回しに関する時間遅れを極力少なくする.

3 実験

システムの実時間性と自由な視点移動が行えるかを確認するために人工物の多い複雑な屋内環境のもとでウォークスルーを行う実験を行った. 図 7 は実験に使用した屋内環境を上から図示したものである. 屋内環境ではオクルージョンが生じ易く, 主な撮影対象が近景に存在するという理由から撮影地点間の距離を 1m 間隔として撮影を行った.

最初に全方位画像センサ搭載のデジタルカメラ (Nikon CoolPix990) を使用し, 図 7 に示す 20 地点で撮影を行い入力画像 (1024 × 768 画素) とした. このとき撮影した 20 枚の中から視点の移動経路に近い 4 枚の入力画像をサンプルとし図 8 に示す. 実験では各入力画像上の特徴点として, エッジのコーナーなどを手動で約 120 組ずつ与えた. また, ジョイスティックにより利用者の視点位置と視線方向を制御し, 図 7 の A ~ J 地点を移動経路, 各地点の矢印の向きを視線方向とした. 実験により生成された A ~ J 地点までにおける画像を図 9 に示す. 図 9(a) は A ~ J の各地点で生成された全方位画像であり, 図 9(b) は生成された全方位画像よりその地点での矢印方向の透視投影画像に変換したものである. PC (CPU: Pentium4 Xeon 1.7GHz Dual, Memory: 2GB) を用い, 任意視点の透視投影画像 1 枚を生成するのに平均で 0.1 秒かかり,

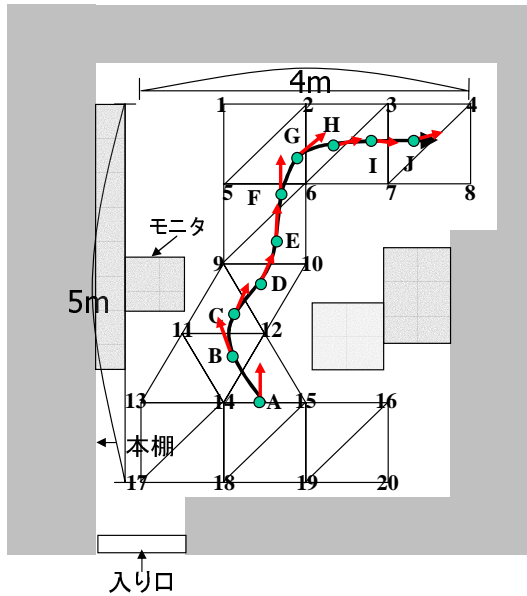


図 7: 実験環境と視点の移動経路

ウォークスルー実験では平均 10fps で描画可能であった。実験結果から実時間で自由な視点移動ができ、さらに運動視差も得られることを確認した。しかし、A~J 地点までの連続的に生成された画像を見たとき、使用する入力画像が切り替わる地点においては三角形パッチの構成が大きく変化し、映像が不連続になった。この問題は入力画像間の対応を視点位置によって徐々に変化させることで軽減できると考えているが、そのアルゴリズムは検討中である。また、オクルージョンにより対応点が与えられない箇所や撮影対象がセンサに近すぎる場合は歪みが大きくなり正しい画像が生成されなかった。

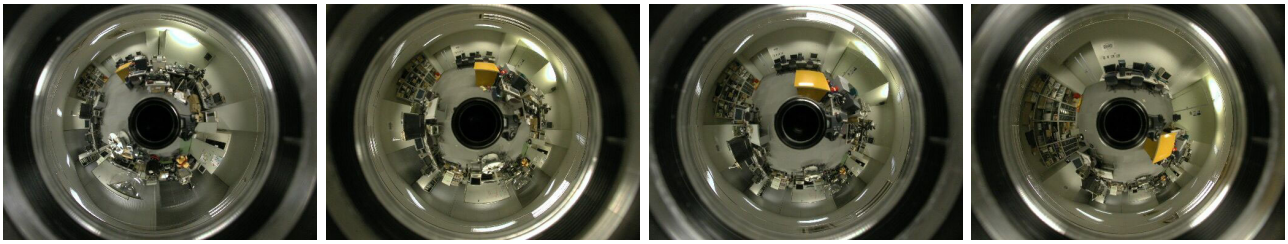
4 おわりに

本稿では、複数地点で撮影した全方位画像とそのセンサ位置の情報から任意視点の全方位画像を生成し、平面透視投影画像に変換してユーザに提示することにより、ウォークスルー環境を構築する手法を提案した。また、平行な 2 つの移動経路の画像を同時に計算することにより、立体視可能なステレオ画像を生成することも可能であった。しかし、撮影対象がセンサに近過ぎる場合や、オクルージョンによって対応点が満身に与えられない場合は生成した画像の歪みが大きくなってしまった。また、視点の移動中に Delaunay の三角分割法で形成される三角形パッチの構成が変更されてしまう場合はユーザに提示される画像が不連続になることも確認された。

今後の課題としては、自動で対応点を求める方法、三角形パッチの構成が変更された場合の不連続の軽減などがある。

参考文献

- [1] D.G. Aliga and I. Carlborm, " Plenoptic Stitching: A Scalable Method for Reconstructing 3D Interactive Walkthroughs ", Proc. SIGGRAPH 2001, pp.443-450, 2001.
- [2] 山口晃一郎, 山澤一誠, 竹村治雄, 横矢直和, " 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.
- [3] S.E. Chen, " QuickTime VR - An Image-based Approach to Visual Environment Navigation ", Proc. SIGGRAPH 1995, pp.29-38, 1995.
- [4] S.E. Chen and L. Williams, " View Interpolation for Image Synthesis ", Proc. SIGGRAPH 1993, pp.279-288, 1993.
- [5] 広瀬通孝, 渡辺真二郎, 谷川智洋, 遠藤隆明, " 実写画像を用いた広域仮想空間構築における画像生成手法の研究 ", Human Interface News and Report, vol.13, pp.173-178, 1998.
- [6] J. Shimamura, H. Takemura, N. Yokoya, and K. Yamazawa, " Construction and Presentation of a Virtual Environment Using Panoramic Stereo Images of a Real Scene and Computer Graphics Models ", Proc. 15th Int. Conf. on Pattern Recognition, Vol.4, pp.463-467, 2000.
- [7] 青木利道, 畑幸一, 栄藤稔, " 多地点全方位画像による環境記述 ", 信学技報 PRMU98-249, pp.57-64, 1999.
- [8] 山澤一誠, 八木康史, 谷内田正彦, " 移動ロボットのナビゲーションのための全方位視覚系 Hyper-Omni Vision の提案 ", 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol. J79-D-II, No. 5, pp.698-707, 1996.
- [9] P. Heckbert, Ed., " Graphics Gems IV ", pp.47-59, Academic Press, 1994.
- [10] 山澤一誠, 尾上良雄, 横矢直和, 竹村治雄, " 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 " 電子情報通信学会論文誌 (D-II), J81-D-II, 5, pp.880-887, 1998.



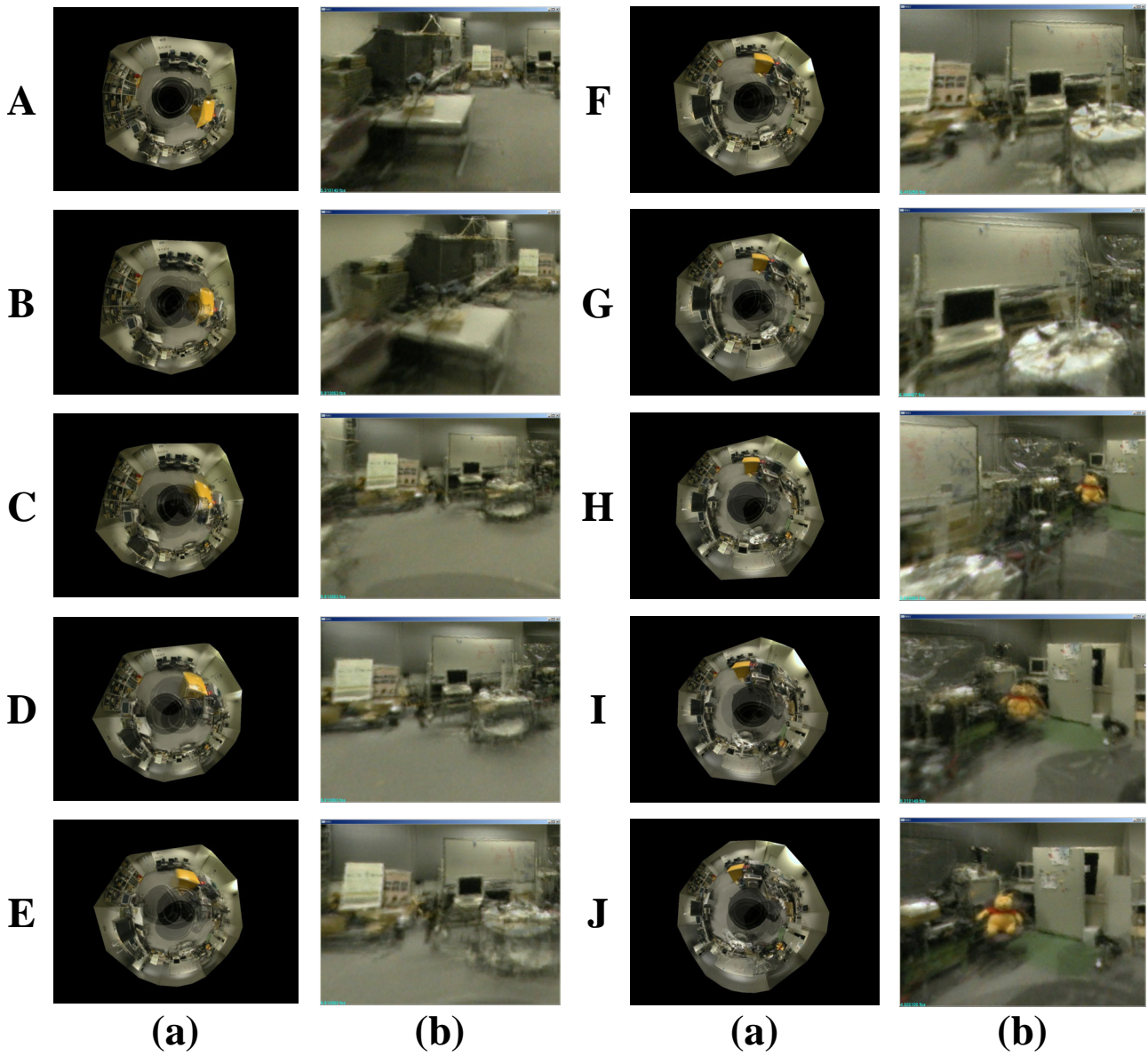
撮影地点 4

撮影地点 6

撮影地点 10

撮影地点 14

図 8: 実験に使用した入力画像のサンプル



(a)

(b)

(a)

(b)

図 9: 屋内環境での実験結果