

遮蔽空間の立体モデル化と MR によるその可視化法

橋本 直[†] タン ジュークイ[†] 金 亨燮[‡] 石川 聖二[†]
^{† ‡} 九州工業大学

E-mail: [†] {hasimoto, etheltan, ishikawa}@ss10.cntl.kyutech.ac.jp, [‡] kim@cntl.kyutech.ac.jp

あらまし 本論文では複合現実感技術 (Mixed Reality : MR) の新しい応用として、物体によって遮蔽された空間内を可視化する方法を提案する。提案手法では、物体によって遮蔽された動的なシーンを高速に仮想空間内に立体モデル化し、それをユーザが装着したヘッドマウントディスプレイ上に出力することにより、遮蔽空間の可視化を実現する。この技術を用いて、建物などの遮蔽物によって生じた死角の内部を透視することができれば、出会い頭の衝突などの危険を未然に回避することが期待できる。本論文では、まず遮蔽空間の可視化を行うシステムの原理について述べ、次に高速に立体モデルを作成する方法について述べる。最後に実験を通して提案手法の有用性を示す。

キーワード 複合現実感, 三次元復元, シースルービジョン, コンピュータビジョン

3D-Modeling of an Invisible Space and a Method of Its Visualization Based on MR

Sunao HASHIMOTO[†], Joo Kooi TAN[†], Hyoungseop KIM[‡], and Seiji ISHIKAWA[†]
^{† ‡} Kyushu Institute of Technology

E-mail: [†] {hasimoto, etheltan, ishikawa}@ss10.cntl.kyutech.ac.jp, [‡] kim@cntl.kyutech.ac.jp

Abstract This paper describes a method of visualization of an invisible space as a new application of the mixed reality (MR) technique. In the proposed method, an invisible dynamic scene occluded by a certain object, a wall, for example, is taken images and modeled in a three-dimensional way in a virtual space at high speed. The image of the virtual space is then displayed to a head-mounted-display (HMD) of an observer, taking the observer's viewing direction into account. In this way, visualization of the invisible dynamic scene is achieved. Future application of the preset technique may include its installation to various corners in the building or to the intersections on roads with bad visibility. This may contribute to reducing traffic accidents in future.

Key words Mixed reality, 3-D recovery, See-through vision, Computer vision.

1. はじめに

人の目には見えないものを、コンピュータ処理によって見るようにする技術は可視化と呼ばれる。現在、可視化の分野における要素技術として、三次元モデル化技術と複合現実感技術 (Mixed Reality : MR) が注目を浴びている。三次元モデル化技術は、カメラなどのセンサを用いて対象物体の位置・姿勢・形状といった三次元的特徴をコンピュータ上の三次元空間に復元する技術である。三次元復元することによって物体の位置関係や形状を任意の視点から観察できるという利点がある。一方、MR は、人が生活する物理的な現実空間と、コンピュータによって電子的に表現された三次元の仮想空間を違和感なく融合する技術の総称である[1]。MR 技術を活用することにより、多様な情報を現実の空間に三次元的に付加することが可能となる。MR は Virtual Reality (VR) の技術が

基礎となっており、VR と同様に、三次元の仮想空間を作成する際に三次元モデル化技術が重要な要素技術となる。これらの要素技術を可視化の分野に活用することによって、人体の臓器の可視化や、史跡の可視化[2]など、有用性の高い情報可視化が実現できる。

我々の日常生活に存在する不可視な情報の例として、物体によって視界が遮られた空間 (遮蔽空間) が挙げられる。建物や大型車両の陰は人間の死角となり、時として事故などの危険な状況を生む原因となる。もし、こうした遮蔽物体を通してその向こうの様子を見ることができれば、事故を未然に防ぎ、人の行動を危険から守ることが期待できる。

そこで本研究では、三次元モデル化技術と MR の技法を用いて、遮蔽空間を可視化するシステムの開発を行う。コンピュータビジョンの技法により建物の壁を透明にする研究として[3]がある。この論文では、ステ

レオカメラを使って建物の一部の立体モデルを作成し、手前の壁を半透明にすることにより遮蔽された部分の可視化を実現している。しかし、この方法は静的なシーンの透明な立体モデルを提示しているだけでユーザーが存在する実空間と連動することはない。また、ステレオマッチングを行っているため実時間で進行する動的なシーンには適さない。

稲見ら[4]は、VR の力覚提示装置を視覚的に消去する目的で、再帰性反射材を物体に貼ることにより、物体を透明化する手法を提案している。この方法は、ユーザーの頭部に取り付けられたプロジェクタから、遮蔽物の背後の画像を再帰性反射材に対して投影することによって透明化を実現している。この方法では、背景が動的に変化するシーンに対しても適用可能であるが、再帰性反射材が貼られている範囲、そして投影光が届く範囲でしか透明化が実現できないという問題がある。

本論文で提案する手法は、遮蔽された動的なシーンを高速に仮想空間内に三次元モデル化し、それをユーザーが装着したヘッドマウントディスプレイ (HMD) 上に出力することにより、遮蔽空間の可視化を実現する。三次元モデル化の処理は単眼カメラによる簡易モデル化手法を用いて高速に行う。復元された三次元モデルは HMD 上で実空間と合成される。このとき遮蔽空間内のモデルが実空間の遮蔽物に重畳して表示されるため、ユーザーは遮蔽物の向こう側をあたかも透視しているかのような感覚で見ることができる。MR 技術によって屋外の死角を透視する研究として[5]があるが、この研究では監視カメラの映像を建物のテクスチャとすることによって仮想空間を構築している。このためカメラの向きとユーザーの視線方向が大きく異なる場合には、物体の位置関係を正しく提示することが困難である。一方、提案手法では死角内に存在する物体を三次元復元しているため、ユーザーの視線方向によらずに常に正しい位置に物体を表示することができる。この点が、本法の大きな特徴である。

本稿では可視化の原理と三次元モデル化の方法について述べ、開発したシステムによる実験結果を示す。

2. システムの概要

システムの構成を図1に示す。基本となるハードウェアはビデオカメラ、PC、HMD、視点位置・方向計測センサである。各装置間の接続は有線・無線を問わない。カメラは遮蔽空間内の画像情報を取得する目的で、遮蔽空間内に設置される。なお、カメラの位置は固定である。また、提案手法において使用するカメラは1台である。広範囲の視野を獲得するために、魚眼

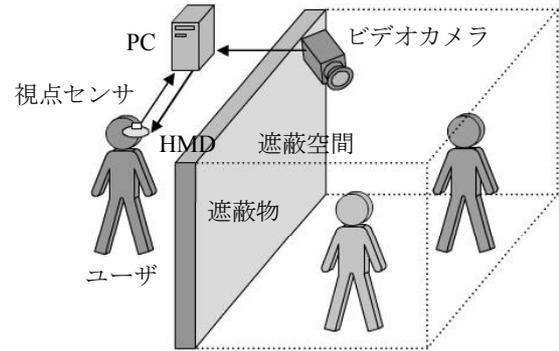


図1 システムの構成

レンズなどの広い画角のレンズを使用する。MR の提示装置として HMD を使用する。実空間と仮想空間を融合する際の位置あわせの目的で、ユーザーの視点の位置と方向を計測するセンサを HMD に装着する。

処理の流れは以下のとおりである。まず、遮蔽空間に設置されたカメラによって得られた画像情報が PC に入力され、それをもとに三次元仮想空間が構築される。そして視点位置・方向計測センサからの情報を元に仮想空間内のユーザー視点の映像が作り出され、その映像が HMD に出力される。HMD を装着したユーザーは、仮想空間内の映像と実空間の融合表示により、壁などの遮蔽物体を透過してその向こう側を見ることができ

3. 三次元モデル化

3.1 基本原理

提案手法では単眼カメラ画像から高速に三次元復元を行う。この手法の基本的な考え方は、二次元の実写画像を物体ごとに切り分け、それぞれを、前後に距離を置いて配置された衝立（レイヤ）上に置くことによって三次元仮想空間を構築する[6][7]。

レイヤのサイズはカメラのレンズ中心からの距離に比例して大きくなる。これはちょうど画像を空間に対して逆投影することと等価である。

本手法では、物体の切り出しは背景差分によって行い、奥行き情報は物体が地面に接地していることを前提として、画像中の物体の接地位置から算出する。

3.2 カメラキャリブレーション

三次元の仮想空間に二次元の画像平面を逆投影するために、XYZ 世界座標系と xy 画像座標系との関係を導出する必要がある。このため事前のカメラキャリブレーションが必要である。本手法では DLT 法[8]を用いてカメラキャリブレーションを行う。画像座標系の座

標値と世界座標系の座標値の対応関係は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} x &= \frac{A_1 X + A_2 Y + A_3 Z + A_4}{C_1 X + C_2 Y + C_3 Z + 1} \\ y &= \frac{B_1 X + B_2 Y + B_3 Z + B_4}{C_1 X + C_2 Y + C_3 Z + 1} \end{aligned} \quad (1)$$

$A_i (i=1,2,3,4)$, $B_j (j=1,2,3,4)$, $C_k (k=1,2,3)$ がキャリブレーションによって決定されねばならない DLT 法のパラメータである。これら 11 個のパラメータは 6 組以上の対応点があれば最小 2 乗法によって求められる。

3.3 奥行き情報の取得

本手法では 1 台のカメラを用いて奥行き推定を行う。地面を世界座標系の Z 軸を法線とするような面と仮定し、地面上の点が $Z=0$ であるとすれば、式(1)より、地面における画像座標と世界座標の対応関係は二次元射影変換 H として次のように与えられる。

$$\begin{bmatrix} X_g \\ Y_g \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ 1 \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_4 \\ B_1 & B_2 & B_4 \\ C_1 & C_2 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \quad (2)$$

式(2)を用いれば、画像上の点 (x_g, y_g) に対応する地面上の点 $(X_g, Y_g, 0)$ が求められる。したがって画像上で、地面上の点に対応する点が指定されれば、その画像座標からその点の地面上の三次元位置、すなわち奥行き情報が得られる。

3.4 処理の流れ

まず、入力画像と、あらかじめ撮影しておいた背景画像との間で背景差分を行い、レンズ歪み補正を行う。背景差分によって遮蔽空間内に存在する物体の候補領域を抽出し、メディアンフィルタ、膨張・収縮フィルタ、面積演算等によりノイズ除去を行った後、ラベリングにより領域のセグメンテーションを行う。次にラベル付けされた各領域において重心を求める。求めた重心座標を領域の最下部まで垂直に移動させた点の座標を、その物体と地面との接地点の座標とする。

式(2)を用いて、画像上の接地点の世界座標系における位置、すなわち物体の接地点座標 $(X_g, Y_g, 0)$ を求める。次に世界座標系において、物体の接地点からカメラの光軸に下ろした垂線の足を求める。光軸上の点を含み、光軸と直交する平面がその物体のテクスチャが表

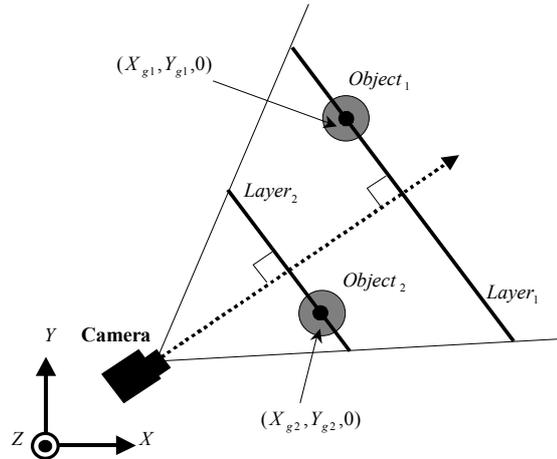


図2 物体とレイヤの配置

示されるレイヤとなる。物体が複数あれば、カメラからの距離が異なる物体ごとにレイヤが定義される。最後に、物体のラベル画像によるマスク処理により物体ごとにテクスチャを作成し、それぞれのレイヤにレンダリングする。なお、上述の処理はフレームごとに行われる。

複数の物体がある場合の例を図2に示す。2 個の物体が $(X_{g1}, Y_{g1}, 0)$ と $(X_{g2}, Y_{g2}, 0)$ の位置にある場合、それぞれが仮想空間におけるレイヤ、 $Layer_1$ および $Layer_2$ に表示される。各レイヤはカメラの光軸と直交し、それぞれの接地点を含む。

3.5 復元誤差

提案手法では、カメラ 1 台を用いて奥行き推定を行うため、物体が地面に接地している必要がある。このため、物体が空中に浮いた瞬間は一時的に復元結果に誤差を生じる。これを **Jump Error** と呼ぶ。また、奥行き方向に存在する複数の物体が入力画像において重なった場合、ラベリングの際に 1 個の領域と見なされるため、奥に存在する物体における復元結果に誤りが生じる。これを **Overlap Error** と呼ぶ。

3.5.1 Jump Error の修正

ジャンプしているかどうかを判定するには 3~5 フレーム間の接地点の移動量から評価する必要がある。しかし、ジャンプしていることを判定してから復元位置を修正するのではリアルタイム性が失われる。そこで常時、画像 y 方向での急激な移動を低減する処理を行う。ただし、空間中での上下方向の移動が画像 y 方向での移動に相当するものとする。復元処理において

物体の接地点座標 (x_g, y_g) を求めた際に、次式を用いて y_g を修正する。

$$\begin{aligned} dy &= y_g(i) - y_g(i-1) \\ \bar{y}_g(i) &= y_g(i) - w dy \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $y_g(i)$ は現在のフレームで求めた接地点 y 座標、 $y_g(i-1)$ は直前のフレームより求めた接地点 y 座標、 w ($w=0\sim 1.0$)は重み係数である。この後、修正された接地点 (x_g, \bar{y}_g) を用いて復元処理を行う。

3.5.2 Overlap Error の修正

Overlap Error 発生時に正しい復元を行うためには、重なりが発生している物体のそれぞれの位置を求める必要がある。そこで、物体の移動軌跡の連続性を利用して常時物体の位置を推定し、Overlap Error が発生している間は推定位置を用いて復元を行う。本手法では、過去 n フレームの移動ベクトルの平均から次フレームの物体の位置を推定する。 i 番目のフレームにおける物体の位置を $u(i) = (x_g, y_g)^T$ とすると、 $i+1$ 番目のフレームにおける物体の推定位置 $\hat{u}(i+1)$ は次式で表される。

$$\hat{u}(i+1) = u(i) + \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} (u(i-k) - u(i-k-1)) \quad (4)$$

また、各物体に対して位置推定を行うために、物体ごとにトラッキングを行う必要がある。画像処理による複数物体のトラッキングの手法は多数提案されているが、本手法では現在のフレームと直前のフレームより求めた接地点座標間の距離が最短となるものどうしを同じ物体として対応付けを行う。

物体の重なりによって、ラベル画像中の物体の個数が突然減少した場合にOverlap Errorが発生したと判定する。ただし物体が画面外に出た場合は例外とする。Overlap Errorが発生している間は、誤り発生直前の物体抽出画像と推定位置を用いて現時刻における物体抽出画像を推定し、この画像を元にレイヤの配置処理を行う。Overlap Error発生直前の物体抽出画像を $F(x, y)$ 、そのときの物体の位置を (x_g, y_g) 、Overlap Error発生時の物体の推定位置を (\hat{x}_g, \hat{y}_g) とすると、推定される物体抽出画像 $G(x, y)$ は次式で与えられる。

$$G(x, y) = F(x - (\hat{x}_g - x_g), y - (\hat{y}_g - y_g)) \quad (5)$$

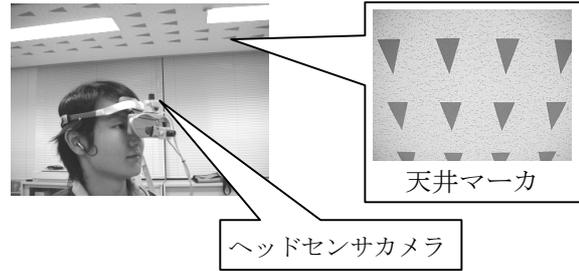


図3 視点位置・方向計測用マーカ

4. ユーザの視点位置・方向の計測

MR用の位置計測センサとしてGPSや三次元磁気センサなどがあるが、精度や計測可能範囲に問題があるので、マーカと小型カメラを使ったビジョンセンシングにより、ユーザの視点の位置と方向を計測する。

図3に示すような、二等辺三角形のマーカを天井に複数枚貼付する。これらのマーカはHMDに鉛直上方向に向けて取り付けられたカメラ(ヘッドセンサカメラ)によって撮影され、マーカの移動量と向きから、相対的にユーザの視点の位置と方向が計測される。本研究では、簡単化のためにユーザの首の回転を左右の回転に限定する。ヘッドセンサカメラの映像はノートPCで処理され、ユーザの頭部位置・方向情報がLANを介して仮想空間を作成するPCに送信される。

5. 実験

5.1 遮蔽空間の可視化実験

遮蔽物として壁を想定した実験を行った。実験環境の風景を図4に示す。パーティションの右側にユーザが立ち、左側の遮蔽空間内にいる人物の動きを観察するという設定である。遮蔽空間の画像情報を取得するカメラ(遮蔽空間カメラ)にはSONY DCR-VX700に魚眼レンズ(レイノックス DCR-FE180PR)を装着したものを使用した。

HMDにはビデオシースルー方式のHMDであるi-visorを使用し、現実空間のユーザ視点画像を取得するために、小型CCDカメラKEYENCE CK-300をHMDに取り付けた。また、ヘッドセンサカメラにもKEYENCE CK-300を使用した。

遮蔽空間カメラ、ユーザ視点カメラ、ヘッドセンサカメラの画像を秒間30フレームでキャプチャして処理を行った。なお、画像の解像度はそれぞれ 320×240 ピクセルとした。ユーザが観察する可視化画像を図5に示す。また、パーティションのない位置で、実物体と仮想物体の位置と大きさが一致しているかどうかを確認した。この結果を図6に示す。

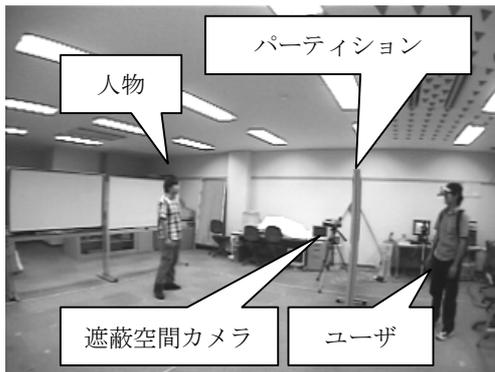


図4 実験環境



図5 可視化画像



図6 実物体と仮想物体の重なり

5.2 復元誤差の修正実験

Jump Error の修正実験として、定位置でジャンプする様子を三次元復元する実験を行った。式(3)において重み係数を $w=0.9$ とした。仮想空間において復元対象の正面から 45 度の位置より観察した結果を図7に示す。次に Overlap Error の修正実験として、2 人の人物が歩行して交差する様子を三次元復元する実験を行った。式(4)において $n=3$ とした。仮想空間において復元対象を上空視点より観察した結果を図8に示す。修正アルゴリズムを使用した場合の 1 フレームにおける平均処理時間はいずれも約 35[ms]となった。

6. 考察

6.1 遮蔽空間の可視化

可視化実験において、壁によって遮蔽された空間内で人物が歩き回る様子を透過して見る事ができた。実験結果より、本手法は動的なシーンに対しても有効であることが示された。遮蔽物がない状態で行った実験では、仮想空間内に復元された人物と、実空間内の実際の人物との間で大きさと位置がほぼ一致した。復元位置の精度に関してはさらに検証が必要であるが、事故防止などへの応用を目的とする場合、数センチメートルのオーダーの誤差ならば十分許容できると思われる。

また、本手法では遮蔽空間内の物体を仮想空間に三次元復元するため、ユーザは任意の角度から観測することができる。しかし仮想空間を厚みのない平面構造により表現しているため、カメラの光軸に対して 45 度を超える角度から観測した場合、物体は厚さを持たず不自然に見える。より自然に見えるようにするためには、複数のカメラを用いて完全な三次元復元を行う必要がある。

6.2 復元誤差の修正

画像 y 軸方向の移動量の低減により Jump Error を低減することができた。また、Overlap Error についても提案した修正アルゴリズムにより修正することができた。しかし、提案した修正アルゴリズムでは、重なりが生じている間に片方の人物が画像の奥行き方向に移動して消失する場合や、3 人以上の人物が複雑に入り乱れる場合において復元誤差を修正するのは困難である。この問題を解決する方法として、上空視点のカメラを用いて物体の位置を正しく計測する方法が考えられる。また、処理速度のある程度の犠牲の元に、2 台以上のカメラを用いて精度の高い三次元復元を行えば解決できる。

実験において、誤差修正アルゴリズムを使用しない場合の平均処理時間は 33[ms]を記録し、ビデオレートでのリアルタイム処理を実現した。誤差修正アルゴリズムを使用した場合の平均処理時間は約 35[ms]であるが、プログラムの改良により、リアルタイム処理は実現可能であると考えられる。

7. おわりに

本研究では、複合現実感と三次元復元を用いて遮蔽空間の可視化を行う手法を提案し、複合現実感技術の新しい応用分野を拓いた。1 台のカメラから得られる画像を元に高速に三次元復元を行って仮想空間を構築

し、これを実空間と映像的に融合することにより遮蔽空間の可視化を実現した。実験において、壁によって遮蔽された空間内を人物が歩き回る様子を透視することができた。

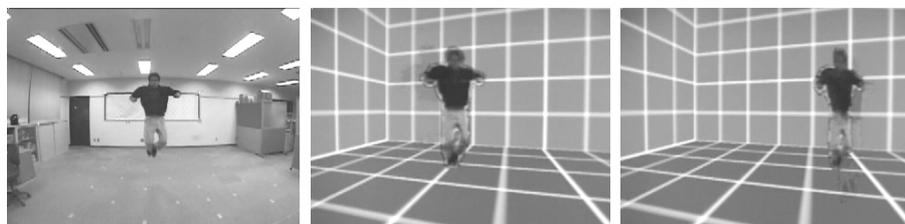
今後の課題としては、三次元復元の精度の向上が挙げられる。提案手法では1枚の画像から復元を行うため、ジャンプや重なりが発生した場合に復元誤差が生じる問題がある。本研究では、物体移動の連続性を利用してこれらの復元誤差の修正を行ったが、一般的な場合には対応しておらず、改良の余地がある。より精度の高い三次元復元を行うためには、2台以上のカメラを使用する手法を導入する必要がある。

本論文で提案した手法は、リアルタイム性を有し、動的なシーンに対しても有効である。また、複数のユーザが同時に任意の位置、角度から観測できるなどの特徴を持つ。このためユーザは提示される可視化映像において奥行き感を覚知することができる。提案したシステムにおいて、映像信号の伝達経路を無線化し、ユーザが装着するMR提示装置をモバイル化することにより、屋外でも使用可能である。

提案手法は、大型車輛の死角や見通しの悪い交差点における事故防止や、建物内のセキュリティなど様々な分野に応用が期待できる。

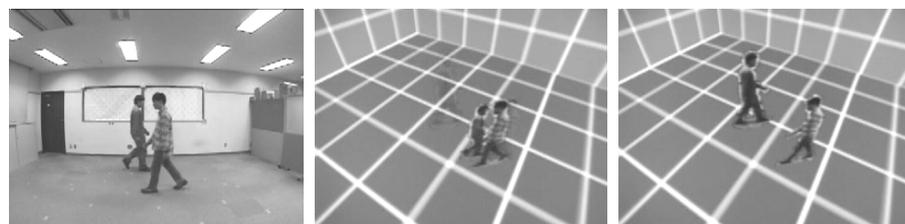
参考文献

- [1] Yuichi Ohta, Hideyuki Tamura: *Mixed Reality - Merging Real and Virtual Worlds*, Ohmsha (1999).
- [2] 天目隆平, 神原誠之, 横矢直和: “拡張現実感を用いたウェアラブル観光案内システム「平城宮跡ナビ」”, 信学技報, PRMU2003-186 (2004).
- [3] 星野准一: “ビデオ映像の透過性表現”, 画像電子学会論文誌, **29**, 5, pp.537-544 (2000).
- [4] 稲見昌彦, 舘暲: “視・触覚 複合現実環境提示技術”, 計測と制御, **41**, 9, pp.639-644 (2002).
- [5] 武政泰輔, 亀田能成, 大田友一: “定点カメラ映像を用いた歩行者のための屋外型複合現実感システム”, 信学技報, PRMU2003, 198, pp.1-6 (2004).
- [6] 廣瀬通孝, 宮田亮介, 谷川智洋: “二次元実写画像を用いた三次元仮想空間の生成”, 信学技報, MVE96-18, pp.19-24 (1996).
- [7] 尾崎信之, 舘暲: “自然風景を仮想空間内で再生するシステムの開発”, 日本バーチャルリアリティ学会論文集, **2**, 2, pp.1-8 (1997).
- [8] 井上康男, 桜井伸二, 矢部京之助: “DLT 法”, *Japanese Journal of Sports Science*, **10**, 3, pp.191-195 (1991).



(a) (b) (c)

図7 Jump Errorの補正。(a) 入力画像, (b) 修正なし, (c) 修正あり。



(a) (b) (c)

図8 Overlap Errorの補正。(a) 入力画像, (b) 修正なし, (c) 修正あり。