

隠消現実感における隠背景投影誤差の軽減(2)

— 周辺参照領域の効果的利用 —

小向 啓文^{*1} 森 尚平^{*1} 柴田 史久^{*1} 木村 朝子^{*1} 田村 秀行^{*2}

あらまし 隠消現実感 (Diminished Reality; DR) は現実世界に実在する物体(除去対象)を隠蔽・消去・透過する技術である。一般的な DR の手法では、除去したい物体の背後の光景を画像として準備・変換し(隠背景投影画像)、現実の光景に重畳描画することによって物体の除去を実現する。しかし、隠背景を事前に観測する場合、シーンの光学的条件の変化によって隠背景投影画像と体験者視点の画像間に光学的不整合が発生する可能性がある。そこで本稿では、背景が平面であるという幾何学的拘束のもと、隠背景投影画像と体験者視点画像とで共通する領域を周辺参照領域として定義し、この領域を利用した色調補正手法を提案する。また、除去対象の写っていない画像を参照画像として比較することによって、提案手法の有効性を示す。

キーワード 隠消現実感, 複合現実感, 光学的整合性, 色調補正

1 はじめに

現実世界において、カメラで捉えた障害物を実時間で視覚的に隠蔽・消去・透過する技術分野は隠消現実感 (Diminished Reality; DR) と呼ばれている[1]。現実世界と仮想世界の実時間での融合・表示を目指す技術である拡張現実感 (Augmented Reality; AR) や複合現実感 (Mixed Reality; MR) [2]は、DR とは逆の概念であると言える。

DR は AR/MR 技術の応用と捉えることができるため、既存の AR/MR 技術を利用して実現することができる。具体的には、現実世界の障害物によって体験者視点から隠される空間(隠背景)を観測・復元し、復元した隠背景のモデルを体験者視点に合わせて投影し、隠背景投影画像として重畳描画することによって障害物の視覚的除去を行うことができる(図 1)。しかし、完全なる視覚的除去を DR における目標とすれば、AR/MR 技術の単純な応用では実現は困難であるため、我々は、こうした DR における技術課題の整理[1]から始め、対象を限定することで順々に問題解決を図ってきた。

DR の実現が AR/MR の単純な応用のみでは困難であるのは、以下の 4 つの理由からであると考えられる。第一に、AR/MR 分野におけるカメラ位置姿勢推定及び計測精度が DR に求められる水準に未だ及ばないことである。これは、隠背景モデル投影時のパースが異なったり隠背景が精確に除去対象の上に重畳表示されなかったりするといった幾何学的不整合の原因となる(以下、隠背景モデルの投影ずれ)。第二に、観測した隠背景をモデル化する際の復元精度が DR に求められる水準

に及ばないことである。これにより幾何学的及び光学的不整合が発生し、DR 体験時のカメラ位置姿勢を精確に得ていたとしても、重畳位置を目立たせる結果となる(以下、隠背景の復元ずれ)。第三に、隠背景観測時と体験時との時間差により対象シーンが幾何学的・光学的に変化することである。この変化は幾何学的及び光学的不整合となって結果に表れる(以下、観測時間差によるずれ)。最後は、隠背景観測用カメラと体験者視点カメラが異なることである。シーンを撮影する光学系に差異がある場合、光学的不整合が発生する原因となる(以下、光学系ずれ)。

本研究では、これらの要因によって発生する幾何学的・光学的不整合などの隠背景投影誤差の軽減を図る。先行研究[3]では、隠背景が平面の組み合わせで構成されているという拘束条件の下、幾何学的不整合の軽減に取り組んだ。まず、隠背景投影誤差の中でも幾何学的な復元ずれに関しては、隠背景の平面拘束によって対処した。また、事前に隠背景を多視点で観測して視点依存画像を得ておくことで、視点に依存して発生するスペキュラ反射などの光学的な復元ずれに対処した。次に、特徴点ベースの対応付けを行うことにより、隠背景モデルの投影ずれの軽減を図った。しかし、観測時間差によるずれに関しては対処しておらず、隠背景観測時と体験時にシーンの光学的条件が変化する場合には視覚的除去結果に不整合が発生するという問題があった。

そこで本論文では、体験時と隠背景観測時との照明条件が異なる場合を想定し、重畳した隠背景投影画像に対して、後に定義する周辺参照領域を利用した色調補正を加え、観測時間差による光学的不整合の軽減を図る手法を提案する。

*1 立命館大学大学院 情報理工学研究所

*2 立命館大学 総合科学技術研究機構

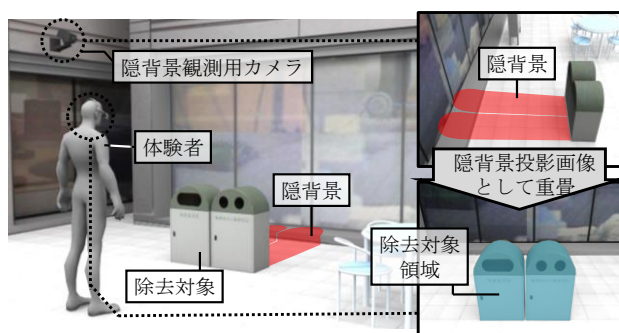


図1 隠消現実感の実現

Fig. 1: Realization of diminished reality

2 関連研究

DRの実現方法は、隠背景の観測方法により2種類に大別される。1つは、隠背景を事前に観測するという方法であり、もう1つは隠背景を体験時に実時間で観測するという方法である。

事前準備として除去対象を対象シーンから物理的に取り除き、隠背景を観測できることを想定するならば、事前に隠背景を観測しておき、体験時に除去対象を視覚的に除去する際に必要な情報を事前取得することができる。そのため、効果的な視覚的除去を期待できる。ただし、本稿で想定するように隠背景観測時と体験時で光学条件が変化した場合、体験時にシーンと隠背景投影画像とで光学的不整合が発生する要因となる。隠背景を事前に観測する例として、Coscoら[4]は、体験時にImage-based Rendering (IBR)により除去対象となる力覚デバイスを消して見せた。事前準備として除去対象を物理的に取り除いた状態で隠背景を観測し、画像群とその撮影地点でのカメラ位置姿勢を保存することによって、事前に撮影した画像を視点依存画像としてIBRに利用することで対象を視覚的に除去した。

一方、体験時に隠背景を観測すれば、事前準備で観測する手法よりも観測時間差が発生しない。Barnumら[5]は、壁に隠された隠背景を透視するため、またDR体験時に変化する隠背景を観測するために隠背景観測用カメラを設置した。しかし、体験者視点と隠背景観測用カメラが離れた位置に存在する場合、体験者視点とは見え方の異なる隠背景の画像を得ることになるため、幾何学的不整合への対処が必要となる。

2つの隠背景観測方法のうち、特に隠背景の事前観測を行う手法においては、隠背景投影画像の合成時に補正処理を加えることが重要となる。そのために従来研究では、体験者視点の画像と比較するための指標となるものを用意しているものが多い。竹村ら[6]はHMDを視覚的に除去し、装着者の視線情報を復元する際、カラーチャート等で事前に取得した色情報を利用して隠背景投影画像の修正を行った。また、榎本ら[7]は、体験者のカメラ位置姿勢推定用に利用するARTag [8]の

白色部分を使って明度補正を行った。一方、中島ら[9]は比較するための指標となるものは利用せず、除去対象領域外の画像中に明度比較のための領域を設け、その領域を基準に隠背景投影画像の明度補正を行った。しかし、隠背景投影画像全体に対しての一律な補正しか行っておらず、シーンに局所的な照明条件の変化が起こった場合には対処していなかった。

本稿では、隠背景を事前に観測するという方法を取った上で、カラーチャートやARTagといった校正用の物体は利用せず、次章で定義する周辺参照領域を利用することによって隠背景投影画像の色調補正を行う。その際、隠背景投影画像の一律でない色調の変化にも対処を図る。

3 提案手法

3.1 想定シナリオと前提条件

本手法は、先行研究の手法[3] (以後、基本手法)の拡張である。そのため、想定するシナリオや前提条件は基本手法に従う。具体的には、除去対象が壁の前に置かれている、もしくは壁と床といった2平面の前に置かれているとして、自由視点で移動する体験者視点での画像からその除去対象を視覚的に除去する、というシナリオを想定する。また、前提条件は以下の通りである。平面と除去対象の位置関係や除去対象のおおまかな幾何形状は既知であるとする。隠背景の画像は除去対象を物理的に取り除くことで事前に取得しておくことができる。隠背景観測用カメラと体験者視点用カメラは同じであるとし、光学系ずれはないものとする。カメラ位置姿勢はカメラトラックにより既知であるとする。

基本手法は、このカメラ位置姿勢の推定精度が低い場合に、画像処理技術により隠背景投影画像の重畳位置を補正するものである。

よって本手法では、基本手法により隠背景投影画像の重畳がなされているものとする。つまり、体験者視点の画像と隠背景投影画像の間に幾何学的不整合はなく、精確に重畳されているという前提のもと、光学的不整合について対処する。

3.2 周辺参照領域の定義

本手法で重要な役割を果たす周辺参照領域とは、体験者視点における除去対象領域 R_O と隠背景投影画像の領域 R_H があるとき、除去対象周りに現れる $R_H - R_O$ で表される領域 R_S である(図2)。仮に、体験者のカメラ位置姿勢が正しく求まっており、除去対象領域の決定や隠背景のモデル化とそのモデルの投影が正しく行われていた場合、周辺参照領域において隠背景投影画像と体験者視点画像は一致し、画素単位の対応付けが可能となる。

DRにおいては一般に、 R_O と R_H が定義できる限りに

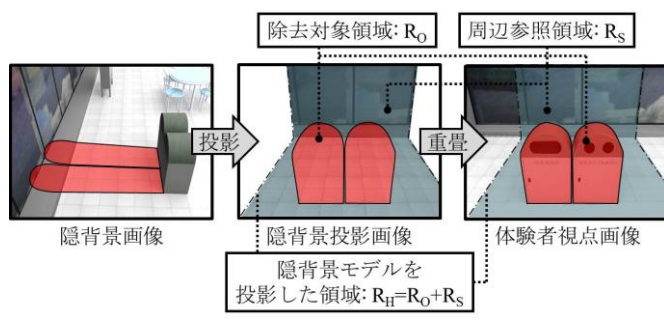


図 2 周辺参照領域の定義

Fig. 2: Definition of surrounding region of interest

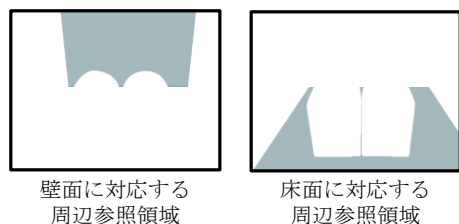


図 3 提案手法における周辺参照領域

Fig. 3: Surrounding region of interest in proposed method

において周辺参照領域を定義することができる。しかし、基本手法を用いた場合に得られる隠背景投影画像は、隠背景の平面拘束を用いているという手法の性質上、シーン中の平面の領域内に限られる。そのため、本手法においての周辺参照領域は、シーン中に存在する平面の数だけ独立して定義されることとなる(図 3)。

3.3 周辺参照領域を用いた色調補正

提案手法では、周辺参照領域内の隠背景投影画像と体験者視点画像が一致するという性質を利用し、この領域を 2 枚の画像間の色調の比較および補正に利用する。処理のアプローチとしては、周辺参照領域全体の色調を補正する大域的な処理と、グリッドに分割して小さな領域ごとに色調を補正する局所的な処理の 2 段階の処理によって色調補正を行う。このアプローチによって、画像全体の色調が大きく変化する場合と、シーンの照明条件が動的に変化する場合など、画像に局所的な色調の変化が起こる状況に対処する。図 4 に示したのは、周辺参照領域を用いた色調補正の流れである。

3.3.1 ヒストグラム変換

隠背景投影画像全体の大域的な色調補正には、ヒストグラム変換と呼ばれる手法を用いる。これは、処理対象とする画像全体の画素値の平均と分散を利用し、2 枚の画像間の色調差を補正する手法である。任意の画像 I_c と I_v の間でヒストグラム変換を行い、 I_c の色調を I_v に合わせる処理を行う式は次のようになる(式 (1))。

$$I_c'(x, y) = \frac{\sigma_v(I_c(x, y) - m_c)}{\sigma_c} + m_v \quad (1)$$

ここで、 $I_c'(x, y)$ は I_c を I_v の色調に合わせて変換し

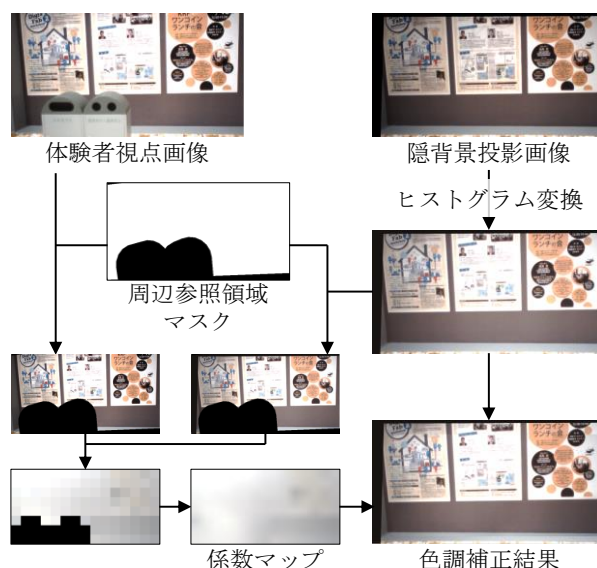


図 4 隠背景投影画像の色調補正

Fig. 4: Color correction of projected hidden area image

た後の画素値、 $I_c(x, y)$ は I_c の画像座標 (x, y) 上の画素値、 m_v, σ_v はそれぞれ I_v での周辺参照領域中の画素値の平均と標準偏差、 m_c, σ_c はそれぞれ I_c での周辺参照領域中の画素値の平均と標準偏差である。前提から周辺参照領域は既知であるので(図 4 中の周辺参照領域マスク)、体験者視点画像と隠背景投影画像それぞれにおける周辺参照領域をマスク処理によって抽出し、抽出された領域を処理対象とする。更に、これらの処理を隠背景投影画像の RGB の各色成分に対して独立して行うことで、画像全体の色調を合わせる。

3.3.2 係数マップによる色調補正

前項の処理により隠背景投影画像全体の色調補正を施した後、隠背景投影画像のより局所的な色調変化に対処するため、画像中の画素値に対応する係数マップを作成し、それを用いて色調補正を施す。係数マップとは、画像上の全画素にそれぞれ独立した係数を対応付けるものである。つまり、最終的に作成される係数マップの大きさは、補正を行う画像の大きさ(解像度)と等しくなる。

係数マップを作成するにあたって、まず体験者視点画像と隠背景投影画像を $m \times n$ のグリッドに分割し、周辺参照領域に含まれる各小領域中の画素値の平均を算出する。グリッド上での位置を (x_G, y_G) として、小領域中の画素値の平均をそれぞれ $I_{v,M}(x_G, y_G)$ 、 $I_{c,M}(x_G, y_G)$ と表したとき、グリッド上での位置 (x_G, y_G) での係数値 $k(x_G, y_G)$ は次の式で表される(式 (2))。

$$k(x_G, y_G) = \frac{I_{v,M}(x_G, y_G)}{I_{c,M}(x_G, y_G)} \quad (2)$$

分割した小領域中に、周辺参照領域が一部しか存在しない場合には、周辺参照領域に含まれる画素のみで

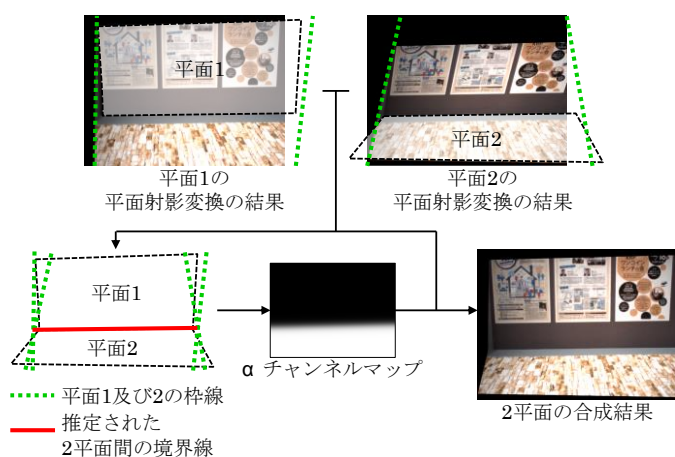


図5 2平面の合成
Fig.5: Composition of two planes

画素値の平均と標準偏差を算出する。ただし、小領域中に周辺参照領域が含まれていない場合には係数値は計算できない。そこで、この領域を係数値で埋めるため、係数マップの8近傍の有効な要素の平均値をとる。

作成された係数マップのサイズはこの時点では $m \times n$ であるが、係数マップは1つの要素が1つの画素値に対応しているため、最終的に色調補正を適用する画像と同じサイズまで拡大する必要がある。そこで、係数マップを内挿により補間し拡大することによってサイズを合わせる(図4中の係数マップ)。なお、内挿の処理にはバイリニア法を用いている。こうして作成された係数マップ内のそれぞれの係数を、隠背景投影画像の対応する画素値に乘算することで、隠背景投影画像の色調補正を行う。この処理も、大域的な処理と同様、画像のRGB色成分ごとに行う。

3.4 2平面への拡張

3.2節で述べたとおり、基本手法を用いて得られる隠背景投影画像は、シーン中の平面の部分のみに対応した部分でかつ、それぞれが独立している。そのため、基本手法を用いた際の位置合わせの結果を含め、これまでに述べた色調補正の処理はそれぞれ単一の平面ごとにしか行うことができない。ここでは、背景が壁と床などの2平面で構成されている場合について述べる。本手法では、各平面でこれまで述べてきた処理を独立に実行し、両結果を合成することで背景が2平面で構成されている場合に対処する(図5)。

それぞれの平面で得られた結果を合成するためには、平面と平面の境界線を精確に推定する必要がある。これまでに説明した手法によって得られる結果は、シーン中の平面の領域のみを考慮したものである。そのため、境界線の推定が精確でなければ、平面以外の領域が結果に使用され、それが不整合の原因となる。

境界線を精確に推定するためにまず、シーン中の2

平面それぞれに対してホモグラフィ推定を行い、隠背景の画像を体験者視点画像に合わせて変換する。これらの処理は、基本手法の処理の過程において行われるものである。図5中に示すように、それぞれの平面の枠線の交点を平面の両端で求め、その交点をつなぐ線分を平面間の境界線とする。そして、この境界線を境に両変換結果を合成する。合成の際は、その境界が目立たぬよう、シグモイド関数を利用して作成した α チャンネルマップを用いて、2平面の α ブレンディングを行う。

4 実験と考察

4.1 実験内容とシステム構成

本手法が有効に機能することを確認するために、隠背景撮影時と体験時とで照明が変化する実験的な対象シーン(ミニチュアセット)において、除去対象を視覚的に除去できるかを確認する。隠背景撮影時(照明条件A)に対してDR体験時には時間が経過したことを想定し、照明条件を変更する(照明条件B)。これにより、意図的に観測時間差による光学的不整合が発生しやすい状況を作り出し、提案手法がこの不整合の軽減に貢献できるかを確かめる。

実験におけるシステム構成は以下の通りである。処理にはWindows XP OS, CPUにIntel Core i7 2.93 GHz, 3.50 GBメモリ, GPUにNVIDIA GeForce GTX 280を搭載するPCを用いた。隠背景の撮影時及び体験時のカメラ位置姿勢取得には、磁気式位置姿勢取得用センサのPolhemus社製Fastrakを利用した。カメラとそのレンズにはPointGrey社製Flea2とミュートロン社製FV0622(水平画角40.5度)を用いた。画像サイズは640×480画素である。統合開発環境にはMicrosoft Visual Studio 2010, 開発言語にはC++を用いた。また、グラフィックスAPIにはDirectX 9を用いた。

実験において、除去対象が消えているかどうかを定量的に示すため、位置繰り返し精度 ± 0.03 mmのエンコーダを内蔵する垂直多関節ロボットであるデンソーウェーブ社製VS-087(以降、ロボットアーム)を用いる。具体的には、除去対象を置いたシーンにて撮影した体験者視点画像シーケンス $I_{v,i}$ と除去対象を物理的に取り除いてシーンを撮影した画像シーケンス $I_{r,i}$ (除去結果 $I_{DR,i}$ の参照画像)を同じカメラパスで撮影し、平均二乗誤差(MSE)により除去結果を評価する(式(3))。

$$MSE_i = \frac{1}{M} (I_{r,i} - I_{DR,i})^2 \quad (3)$$

MSEは、画像の差異の評価法として一般的に利用される指標であり、同一の画像間のMSEは0となることから、算出されたMSEが0に近いほど参照画像に近い結果が生成できたことを示す。実験では、結果画像と参照画像をグレースケール化した上でMSEを算出する。



図 6 実験の様子
Fig.6: Environment of experiments

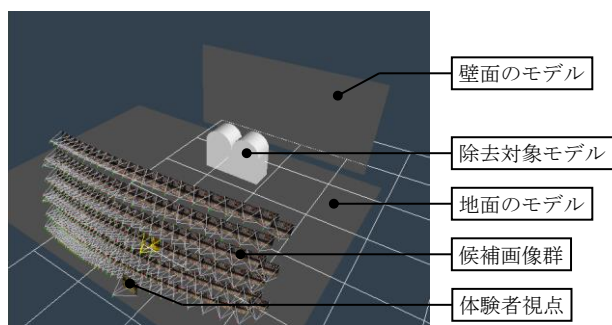


図 7 撮影された隠背景の画像の可視化
Fig.7: Visualization of hidden background images

照明は、太陽光によって照らされる屋外シーンを想定し、キー照明として ARRI 社製 HMI575W を 1 基、アンビエント照明として ARRI 社製 650 Plus を 2 基用いた。アンビエント照明には色変換フィルタを付け、キー照明と同等の色温度に変換した。また、照明条件 A と B は、キー照明の位置のみを変更することで設定した。これは、太陽の位置が変化することを想定している。図 6 に実験の様子を示す。

4.2 実験結果

実験では事前準備として、除去対象設置前のシーンにおいて、体験時に除去対象が置かれる箇所に注視点を置き、その位置を取り囲むように 35 cm 程度離れたところから 200 枚の隠背景の画像を撮影した(図 7)。この時の照明条件は A であり、これは、セットの右手側にキー照明を置いたものである。次に照明条件を B に変更して、定量評価を行うための画像シーケンス(参照画像)を撮影した。照明条件 B ではセットの左手側にキー照明を置いており、照明条件 A と比較して全体にシーンが明るく写っている。定量評価を行うための画像シーケンスは体験者視点画像シーケンスと同じカメラパスで、除去対象を物理的に取り除いたシーンを 300 枚撮影したものである。最後に、照明条件 B の状態でシーンに除去対象を設置し、除去対象から約 35 cm 離れた位置を初期位置とし、体験者視点カメラを 6 自由度で 300 枚の体験者視点画像シーケンスを撮影する。図 8 に示すのは、100, 200, そして 300 フレーム目の体験者視点

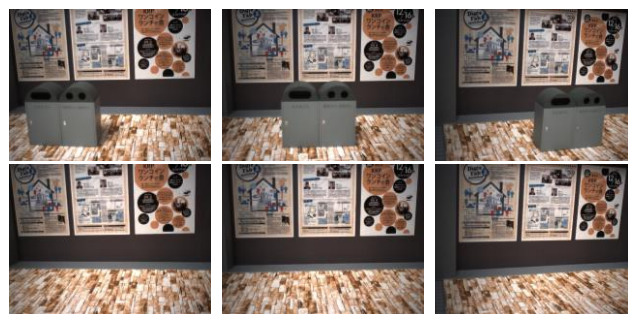


図 8 体験者視点画像シーケンス (上段) と除去結果の参照画像シーケンス (下段) (左から、100, 200, 300 フレーム目)
Fig. 8: Viewer's images (1st col.) and reference images of visual removal (2nd col.) (from left: 100th, 200th, and 300th frame)

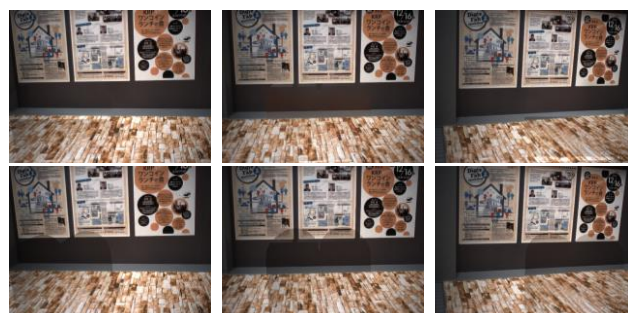


図 9 提案手法 (上段), 基本手法 (下段) の結果 (左から、100, 200, 300 フレーム目)
Fig. 9: Comparison of the proposed method (1st col.), the proposed method (w/o color correction) (2nd col.) (from left: 100th, 200th, and 300th frame)

画像と除去対象の除去結果の参照画像である。

本実験では、提案手法と基本手法の 2 つの手法で除去対象を視覚的に除去した結果を比較する。図 9 に示すのは、上記の 2 つの手法で体験者視点画像から除去対象を視覚的に除去した結果である。処理時間の平均は提案手法と基本手法でそれぞれ約 809 ms, 約 618 ms であった。

図 9 に示されるように、基本手法では、隠背景投影画像の重畳箇所の全体にわたって光学的不整合が発生し、隠背景投影画像の重畳箇所がその周りよりも暗く写っている。一方、提案手法では、こうした観測時間差による光学的不整合が軽減され、除去結果の参照画像に近い結果が得られていることが分かる。また図 10 は、提案手法と基本手法のそれぞれの結果と、参照画像との差分を取ったものである。この画像からも提案手法の結果は、より参照画像に近いものであるということが見て取れる。

更に、図 11 に示す MSE の推移による定量的な評価の結果からも分かる通り、提案手法と基本手法のみを用いる場合には、提案手法の方がより高精度な除去対象の視覚的除去が実現できていることが分かる。尚、提案

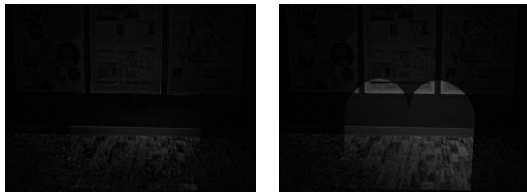


図 10 参照画像との差分画像
(左：提案手法，右：基本手法)

Fig. 10: Subtraction image between result and reference image
(left: the proposed method, right: the proposed method (w/o color correction))

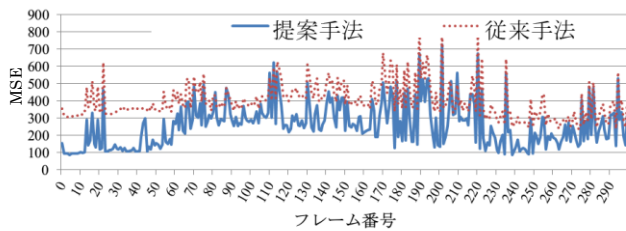


図 11 実験における 2 手法での MSE の比較

Fig. 11: Comparison of MSE b/w two methods



図 12 色調補正処理の失敗例

Fig. 12: Failure cases of color correction process

手法，基本手法の MSE の平均はそれぞれ約 261.44, 398.23 であった。

しかし，フレームによって色調補正が失敗している場合も見られた。これは，基本手法における特徴点ベースの隠背景投影画像の重畳処理を行っても解消しきれなかった隠背景モデルの投影ずれによって提案手法の前提が崩れ，色調補正処理が上手く機能しなかったことが，除去結果に悪影響を与えていることが原因であると考えられる。例えば，図 12 左では中央のポスターの右下が青白く変色しており，同図右では黒く変色しているように見える。

5 まとめ

本論文では，DR における隠背景投影画像の色調補正手法を提案し，光学的不整合の軽減を実現した。色調の補正には，隠背景投影画像の領域と除去対象領域から定義され，それぞれの画像において共通する領域である周辺参照領域を利用した。色調補正のアプローチとして領域全体の大域的な処理と，領域をグリッドに分割した局所的な処理の 2 段階に分けて処理を行う

ことにより，隠背景投影画像の一様でない色調の変化に対処した。

また，隠背景観測時と体験時で照明条件が変化することを想定したシーンにおいて，実験を行った。この実験では，ミニチュアセットとロボットアームを利用して除去結果の参照値となる画像を取得した。具体的には，DR 体験時と同じカメラパスで除去対象が写っていないシーンを撮影しておき，除去結果と比較した。隠背景投影画像の重畳位置ずれを軽減することで幾何学的不整合に対処した先行研究と更に光学的不整合に対処する提案手法の両結果を比較し，提案手法が有効に機能することを示した。今後は，より複雑な隠背景を対象とした手法の開発に取り組む。

謝辞

ミニチュアセットの建設に関してご協力を頂いた東映(株)京都撮影所次長 竹村寧人氏，セットの照明に関する助言を頂いた映画撮影監督 坂本誠吾氏に感謝する。本研究の一部は，科研費・基盤研究 (S)「複合現実型情報空間の表現力基盤強化と体系化」による。

参考文献

- [1] 森尚平，一刈良介，柴田史久，木村朝子，田村秀行：“隠消現実感の技術的枠組みと諸問題～現実世界に実在する物体を視覚的に隠蔽・消去・透視する技術について～”，日本 VR 学会論文誌，Vol. 16, No. 2, pp. 239 - 250, 2011.
- [2] R. T. Azuma: “Recent advances in augmented reality,” *IEEE Computer Graphics and Application*, Vol. 21, pp. 34 - 47, 2001.
- [3] 小向啓文，森尚平，柴田史久，木村朝子，田村秀行：“隠消現実感における隠背景投影誤差の軽減－モザイクキング法を用いた幾何学的不整合への対処－”，第 17 回日本 VR 学会大会論文集，12B-2, pp. 87 - 90, 2012.
- [4] F. I. Cosco, C. Garre, F. Bruno, M. Muzzupappa, and M. A. Otaduy: “Augmented touch without visual obtrusion,” *Proc. ISMAR 2009*, pp. 99 - 102, 2009.
- [5] P. Barnum, T. Sheikh, A. Datta, and T. Kanade: “Dynamic seethroughs: Synthesizing hidden views of moving objects,” *Proc. ISMAR 2009*, pp. 111 - 114, 2009.
- [6] 竹村雅幸，北原格，大田友一：“MR Face 映像における視覚的特性を考慮した光学的整合性の実現”，画像ラボ，Vol. 19, No. 2, pp. 48 - 53, 2008.
- [7] 榎本暁人，斎藤英雄：“複数のハンディカメラの協調利用による遮蔽物体除去映像のオンライン生成”，映情学誌，Vol. 62, No. 6, pp. 901 - 908, 2008.
- [8] M. Fiala: “ARTag, a fiducial marker system using digital techniques,” *Proc. CVPR 2005*, Vol. 2, pp. 590 - 596, 2005.
- [9] 中島武真，一刈良介，柴田史久，木村朝子，田村秀行：“隠消現実感における隠背景面復元の画質的整合の実現”，電子情報通信学会 パターン認識・メディア理解研究会，信学技報，Vol. 110, No. 381, PRMU2010 - 195, pp. 359 - 364, 2011.