

平面上の拡張現実感マーカ除去におけるハイライトの再現

中村 勇貴^{*1} 河合 紀彦^{*1} 佐藤 智和^{*1} 横矢 直和^{*1}

Reproduction of Highlights for Hiding an Augmented Reality Marker on a Plane

Yuki Nakamura^{*1}, Norihiko Kawai^{*1}, Tomokazu Sato^{*1}, and Naokazu Yokoya^{*1}

Abstract – In augmented reality (AR) applications, a marker is often used for its robustness for camera pose estimation and its easiness for placing virtual objects on user’s desired positions. However, AR markers in video may prevent from seamlessly fusing real environments and virtual objects. Therefore, plausibly hiding AR markers is desired in AR applications. As technology that can be applied to marker hiding, diminished reality (DR) has been investigated to visually remove real objects from video in real-time by generating plausible background images on them. However, conventional DR methods cannot correctly reproduce background images with highlights on a specular surface. This paper proposes a method that plausibly removes AR markers on a specular surface by estimating an illumination environment from images and reproducing highlights on a background image according to camera poses. Experiments show the effectiveness of the proposed method by placing an AR marker on various environments and comparing results obtained by the proposed and conventional methods.

Keywords : Marker hiding, Diminished Reality, Augmented Reality, Highlight, Specular reflection, Light source map

1 はじめに

撮影した映像中に仮想物体を重畳する拡張現実感 (Augmented Reality:AR) が近年注目されている。拡張現実感のアプリケーションでは、実シーンと仮想物体の幾何学的な位置合わせが重要であり、それを実現するための撮影画像を用いたカメラ位置姿勢推定手法として、拡張現実感マーカ (以下、AR マーカ) を用いる手法 [1, 2] や画像中の特徴点や輝度値を用いるマーカレスの手法 [3, 4, 5, 6] が提案されている。近年では後者の手法が盛んに研究されているが、カメラの位置姿勢の推定精度が環境に大きく依存する。このため、実用的なアプリケーションにおいては、環境のテクスチャに関わらずカメラの位置姿勢を頑健に推定でき、また仮想物体をユーザの希望位置に容易に配置できる前者の手法が広く用いられている。

AR マーカを用いた拡張現実感の具体的な応用例として、AR マーカを配置した室内を撮影し、映像中に仮想的な家具を重畳することで、家具を購入する前に家具と部屋との親和性を確認することができる家具配置シミュレーションなどが挙げられる。しかし、従来実用化されている家具配置システムでは映像中に映り込む AR マーカによって、仮想家具と部屋との親和性を確認しづらくなる場合がある。このため、AR マーカを違和感なく映像中から取り除くことが望まれて

いる。

このような AR マーカの除去にも応用できる技術として、様々な実物体を映像中からリアルタイムに除去する隠消現実感 (Diminished Reality:DR) に関する研究が行われおり、その手法は、想定するアプリケーションに応じて、(a) リアルタイムの複数カメラ画像を補完的に用いる手法 [7, 8, 9, 10, 11], (b) 毎フレームの画像修復適用により背景画像を生成する手法 [12, 13, 14], (c) 事前に観測または生成した背景画像を毎フレーム調整し合成する手法 [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23] の3種類に分類できる。本研究での除去対象は通常何かの上に設置される AR マーカであるため、AR マーカの背景を原理的に撮影できない手法 (a) は適さない。このため以下では、AR マーカ除去に適用可能な後の2手法 (b), (c) に注目し、従来手法および提案手法について述べる。

ここで、隠消現実感に関する研究において取り組むべき課題として、合成する背景画像とその周辺のテクスチャの位置ずれに関する幾何学的整合性、および輝度や画質のずれに関する光学的整合性を高める必要があるが、本研究では特に光学的整合性に着目する。光学的整合性の解決においては、大局的な輝度変化と局所的な輝度変化で対応が分かれる。ここで、大局的な輝度変化とは、環境全体の照度や色合いの変化、ホワイトバランス等のカメラの光学的パラメータの変化によって、画像全体の輝度が変化することを意味し、局

^{*1}奈良先端科学技術大学院大学

^{*1}Nara Institute of Science and Technology

所的な輝度変化とは、局所的な強い光の照射、遮蔽物によるキャストシャドウ、鏡面反射による光源の映り込み（ハイライト）等によって、画像の一部分だけ大きく輝度が変化することを意味する。

毎フレームの画像修復適用により背景画像を生成する手法 (b)[12, 13, 14] では、フレーム毎に対象領域周辺のテクスチャを事例として対象領域にテクスチャを合成するが、照明環境の変化に応じて周辺のテクスチャの輝度が変化した場合にも、そのテクスチャを用いて背景画像が合成されるため、大局的な輝度変化を反映できる。しかし、これらの手法が用いる画像修復 [24, 25] は、原理的に同一画像中に存在しないテクスチャを対象領域内に再現することはできない。従って、局所的な輝度変化として、対象領域内に鏡面反射によるハイライトが生じる場合において、他の領域にハイライトが存在しない場合には、これを対象領域内に再現できないという問題がある。

一方、事前に観測または生成した背景画像を毎フレーム調整し合成する手法 (c) のうち、手法 [18, 19, 20, 21, 22, 23] では、背景画像の取得・生成時から大局的な輝度変化が生じた場合には、除去対象物体周辺の輝度変化に合わせて背景画像の輝度調整を行うことで、対象領域とその周辺領域間の光学的な不整合を解消している。一方、局所的な輝度変化への対応に関しては、唯一手法 [18] のみを取り扱っており、この手法では対象領域周辺にキャストシャドウが生じた場合、それを直線的に結ぶことによってキャストシャドウを対象領域内に再現している。

本研究では、局所的な輝度変化の中でも、これまで隠消現実感分野において取り組まれてこなかった、鏡面反射によるハイライトに着目した AR マーカの除去手法を提案する。本研究では事前処理において撮影画像のみからシーンの照明環境を推定し、これを毎フレームの背景画像の輝度調整に反映させることで、鏡面反射が生じるシーンにおいてもハイライトを再現し、違和感なく AR マーカを除去する手法を提案する。ただし、本研究では、一般的な室内での AR を想定し、対象の AR マーカは平面上に設置され、光源は天井などの AR マーカが存在する平面と平行な平面上に存在すると仮定する。また、AR アプリケーションの実行中に照明環境およびマーカ位置は変化しないものと仮定する。

以下、2 節で本研究に関連する画像からの照明環境推定に関する研究について概観し、3 節で提案手法について述べる。4 節で実験およびその考察について述べ、最後に 5 節でまとめと今後の課題について述べる。

2 画像からの照明環境推定に関する関連研究

拡張現実感における仮想物体のシェーディングなどを目的として、リアルタイムまたは短時間で照明環境を推定する手法が研究されており、それらは無限遠光源を仮定する手法と近接光源を仮定する手法に分類できる。

無限遠光源を推定する手法として、ユーザのカメラとは別の魚眼カメラを用いる手法 [26]、ユーザのカメラにより鏡面球を撮影する手法 [27] が提案されている。これらの手法では、リアルタイムの照明変化に対応できる一方、AR マーカとユーザカメラ以外の道具が必要となる。Jachnik ら [28] は、撮影画像から鏡面反射成分を推定し、それを半球面上に登録することで、照明環境マップを生成している。この手法では、リアルタイムでの照明変化には対応できないが、他の道具を必要としない。これらの手法により推定した光源環境をハイライトの再現に用いた場合、無限遠光源仮定が成り立たない室内環境においては、実際のハイライトと再現したハイライトの間で位置ずれが生じるという問題がある。

後者の近接光源を仮定する手法として、2つの鏡面球や中空透明球を用いる手法 [29, 30] が提案されている。これらの手法では光源の三次元位置を推定できるため、室内におけるハイライトの再現には有効であるが、ユーザカメラ以外の道具を用意する必要がある。一方、間下ら [31] は、Jachnik ら [28] と同様に他の道具は何も用いずに、照明の方向と距離を含む照明環境を推定している。この研究では、複数の点光源の方向および距離の推定を実現しているが、照明環境マップの作成を目指しているわけではなく、照明が点光源でない場合には、ハイライトの形状が正しく再現されないという問題がある。

本研究では、文献 [28] と同様に、AR マーカとユーザカメラ以外の道具は用いず、照明環境マップを生成することを目指す。本研究の想定する室内環境において高品位なハイライトの再現を実現するために、提案手法では観測されるハイライトを用いて平面状の照明環境マップを設定するための天井の高さを推定し、また文献 [28] の方法によりマーカ以外の領域の鏡面反射から点光源を仮定しない密な照明環境マップを生成した上で、これを用いることで、位置ずれを抑えたハイライトの再現を実現する。

3 ハイライトを考慮した AR マーカの除去

本研究では、AR マーカとユーザカメラ以外の道具を使用しないことを前提に、Jachnik らの手法 [28] に倣い、画像により取得した画素値は鏡面反射光と拡散反射光のみで構成されるという仮定のもと、入力画像

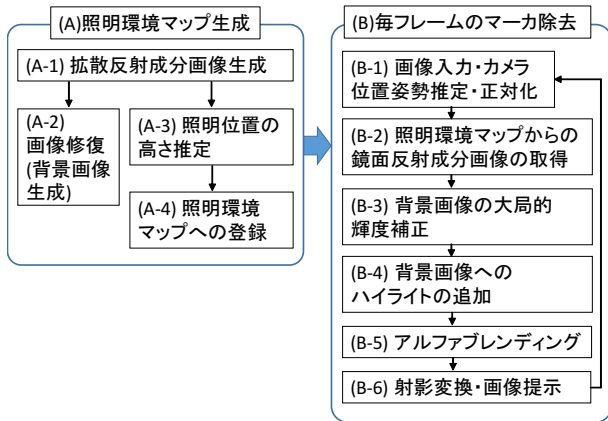


図1 提案手法の処理の流れ

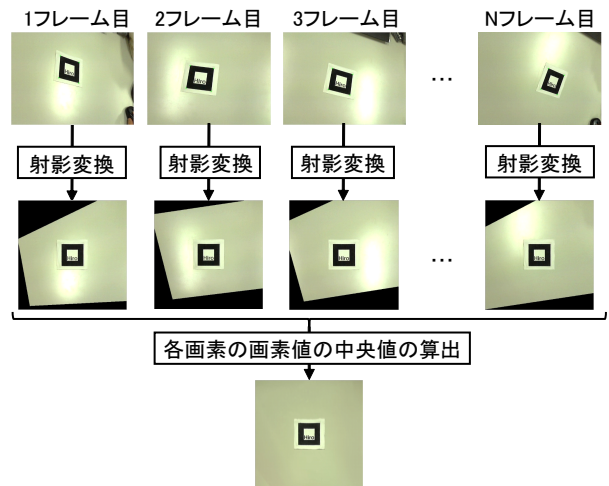


図2 拡散反射成分画像の生成

を拡散反射成分画像および鏡面反射成分画像に分解することで照明環境マップを生成し、それに基づきハイライトの再現を行う。

図1に提案手法の処理の流れを示す。本研究では、まず照明環境マップの生成(A)を行い、その後、毎フレーム鏡面反射によるハイライトを再現したARマーカの除去(B)を行う。なお、提案手法は、ARマーカを設置する前に背景画像を撮影・取得する場合と、画像修復を適用することで背景画像を生成する場合のどちらに対しても適用できる枠組みではあるが、以下では、画像修復を適用する場合における処理を想定し、提案手法を説明する。以下、各処理について詳述する。

3.1 照明環境マップの生成

照明環境マップの生成(A)では、まず入力画像群から拡散反射成分画像を生成(A-1)する。その画像に対して画像修復を適用し背景画像を生成する(A-2)とともに、拡散反射成分画像と入力画像との差分により鏡面反射成分画像を取得する。次に、ハイライトの領域を検出しその重心位置から照明の高さを推定する(A-3)。最後に、推定した高さに平面状の照明環境マップ(最大輝度値255の2次元RGB画像)を設定し、鏡面反射成分画像から抽出した光源情報を照明環境マップへ登録する。以下、それぞれの処理について詳述する。

3.1.1 拡散反射成分画像の生成

処理(A-1)では、まず図2に示すように、異なる複数地点からARマーカを含むシーンを撮影し、各画像からマーカの4隅を検出し、それらが画像上で同一の正方形になるように射影変換することで、各撮影画像をマーカを正面から見た画像(正対画像)に変換する。次に、射影変換した全ての画像における同一座標の画素値の中央値を算出することで得られる画像を拡散反射成分画像とみなす。

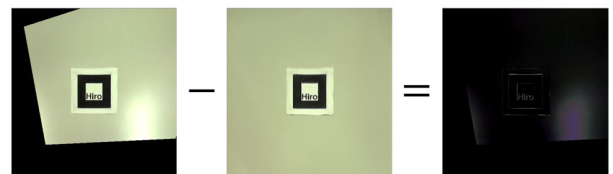


図3 鏡面反射成分画像の生成

3.1.2 ハイライトを用いた照明位置の高さ推定

鏡面反射成分画像は、図3に示すように、各フレームの正対画像の各画素値から拡散反射成分画像の各画素値を引き、正の値の場合はその値、負の値の場合は0とすることで生成する。ここで、鏡面反射成分画像におけるハイライト領域はそれ以外の領域と比較して一般的に画素値が大きくなるため、本研究では、鏡面反射成分画像の各画素値がそれぞれある一定の閾値以上の領域をハイライト領域とし、異なる2カ所のカメラ位置で撮影された画像中のハイライト領域の重心位置をそれぞれ算出し、三角測量によって照明環境マップを設定する高さ z_s を推定する。

ここではユーザがカメラを動かしながらハイライトを含む画像2枚を手動で選択するが、ユーザが1枚目を選択しハイライトの重心を計算した後、2枚目の画像を選択するまでの間、毎フレームハイライトの重心位置を追跡することで、1枚目と2枚目の画像中のハイライトの重心位置を対応付ける。ここでは、フレーム間でハイライトの位置は大きく移動しないという仮定のもと、フレーム間のハイライトの重心位置が一定距離以内の場合、同一照明によるハイライトの重心位置として追跡する。なお、1枚目の画像選択時に、ハイライトが画像中に複数ある場合には、ユーザが高さ z_s の推定に用いるハイライトを指定する。また、高さ z_s を精度よく推定するための2枚の画像の選択基準とし

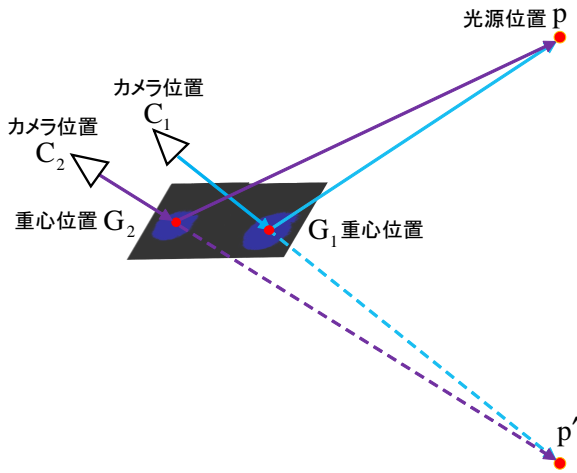


図4 光源位置の高さ推定

て、以下の2点を考慮する必要がある。

- (a) 視差を大きくするため、2視点のカメラ間の距離を長くする。
- (b) ハイライトの重心位置を正しく求めるため、ハイライト領域をマーカと重ねず、かつ正対画像中にハイライト全体を収める。

次に、各カメラ位置から観測されるハイライトの重心位置が三次元空間中の特定の点光源位置 p に対応している (点光源 p の反射位置である) ことを仮定し、点 p の三次元位置を推定する。図4に示すように、具体的にはまず、点 p について、マーカが存在する平面に対して面対象となる点 p' を考え、点 p' およびARマーカから推定されるカメラ位置 C_1, C_2 で構成される三角形の辺がハイライトの重心位置に対応する三次元位置 G_1, G_2 を通過することを利用して、直線 C_1G_1 と C_2G_2 の交点として点 p' の三次元位置を算出する。次に、マーカ平面について点 p' の面対称となる点 p の三次元座標を求め、この高さ z_s を求める。

ここで、上述した仮定からの乖離やハイライトの重心位置の検出誤差によって、2本の直線は一般に三次元空間中で交わらない。そこで、本研究では、2本の光路を最短で結ぶ線分の中点を取る方法 (中点法) により、三次元座標 p' および p を算出し、 z_s の算出に用いる。

3.1.3 照明環境マップへの登録

前処理で求めた高さ z_s に2次元RGB画像平面である照明環境マップを設置し、鏡面反射成分画像上の各画素位置と照明環境マップの画素位置を毎フレーム対応付け、複数フレームにおける鏡面反射成分画像中のマーカ領域以外の領域の画素値の平均値を照明環境マップの画素値として登録する。

マーカ座標系における鏡面反射成分画像中の画素の

3次元位置 $(x_m, y_m, 0)$ に対応付けられる照明環境マップ中の画素の3次元位置 (a, b, z_s) は、当該フレームのARマーカから推定されるカメラ位置 (x_c, y_c, z_c) を用いて距離の比から以下のように求められる。

$$a = \frac{z_s(x_m - x_c)}{z_c} + x_m \quad (1)$$

$$b = \frac{z_s(y_m - y_c)}{z_c} + y_m \quad (2)$$

この関係から、各鏡面反射成分画像の画素と照明環境マップの画素の対応関係が得られる。

なお、照明環境マップの範囲は、上記の式で求まる天井の3次元位置が照明環境マップ外にならないよう、照明環境マップの1画素の実際の大きさは、照明環境マップ上の1画素がカメラ画像上でおよそ1画素の大きさで観測されるよう、アプリケーションにおいて想定するカメラの移動範囲および天井の高さから決定することで、適切な解像度のハイライトを再現する。

3.2 毎フレームのマーカ除去

毎フレームのマーカ除去処理 (B) においては、現在のフレーム画像を取得し、ARマーカを用いたカメラの位置姿勢推定、および入力画像の正対化の (B-1) 後、照明環境マップから鏡面反射成分画像を取得し (B-2)、画像修復によって得られた背景画像に対して大域的な輝度補正 (B-3) およびハイライト成分の追加 (B-4) を行う。その背景画像をARマーカ領域にアルファブレンディングにより合成し (B-5)、元の見え方に射影変換する (B-6) ことで、ハイライトを再現したマーカ除去を実現する。

具体的には、処理 (B-2) では、照明環境マップへの登録時と同様に、マーカ座標系におけるカメラ位置、照明環境マップの画素位置、正対画像の画素位置の関係を用いて、照明環境マップから鏡面反射成分画像を生成し、画素値が閾値以上の領域をハイライト領域として設定する。次に、処理 (B-3) で、マーカ周辺の輝度の変化から背景画像の大域的な輝度補正を行う。ここでは、背景画像から現フレームへの大域的な輝度変化は、画像中のマーカ領域外においてハイライトが存在しない領域で観測されるとの考えから、図5に示すように、背景画像および現フレームの正対画像内のマーカおよびその周辺領域に矩形を設定し、(i) 撮影画像の範囲外のため画素値が存在しない画素を含む矩形、(ii) ハイライトを含む矩形、(iii) 外枠の矩形以外の内側の矩形、の3領域の集合を大域的輝度変化が観測できない未知領域、それ以外の矩形を大域的輝度変化が観測できる既知領域とし、既知領域における輝度変化率をまず算出し、次に未知領域の輝度変化率を推定する。まず、既知領域の i 番目の矩形 A_i の大域的輝度変化率 α_i を以下のように算出する。

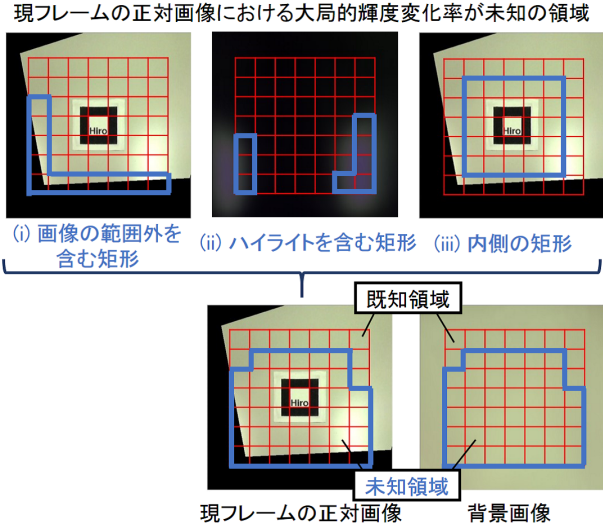


図5 大局的輝度変化率の算出

$$\alpha_i = \frac{\sum_{k \in A_i} I(\mathbf{x}_k)}{\sum_{k \in A_i} B(\mathbf{x}_k)} \quad (3)$$

ただし、 $I(\mathbf{x}_k)$ 、 $B(\mathbf{x}_k)$ はそれぞれ、現フレームの正対画像、背景画像の画素 \mathbf{x}_k の画素値である。次に、未知領域の各矩形の大局的変化率を上記の式で求めた既知領域の大局的輝度変化率を用いて補間する。具体的には、隣接する矩形の輝度変化率が類似するよう、以下のエネルギー E が最小となる各未知領域の大局的変化率を算出する。

$$E = \sum_{(i,j) \in R} (\alpha_i - \alpha_j)^2 \quad (4)$$

ただし、 R は隣り合う矩形のインデックスのペアの集合である。エネルギー E は各未知領域の大局的変化率で偏微分し、連立方程式を解くことで一意に大局解が求まる。最後に、求まった各矩形の大局的変化率をその矩形の中心画素の大局的変化率とし、バイリニア補間により残りの画素の大局的変化率を算出する。これを RGB 値独立に行い、各画素で求まった大局的変化率を背景画像の各画素値に掛けることで大局的な輝度補正を行う。

次に、処理 (B-4) で、照明環境マップから取得した鏡面反射成分画像を用いてハイライトを追加する。ここで、全体的な明るさが変化している場合に、事前処理で得られたハイライトの強度をそのまま用いると、最終的な出力画像の明るさに不整合が生じる場合がある。そこで、本研究では、鏡面反射成分画像から大局的輝度変化により増加した画素値の平均を引いたうえで、大局的な輝度補正を行った背景画像にこれを足しこむことで、ハイライトを再現した背景画像を生成する。ただし、この処理において、鏡面反射成分画像か



図6 実験環境

ら大局的輝度変化の増加分を引く際、引いた値が0より小さくなる場合は0とする。

次に、処理 (B-5) で、輝度補正した背景画像を現フレームの正対画像に合成するが、ここでは設定した矩形領域の外側から一定範囲ではアルファブレンディングを行う。これにより、合成の境界領域における違和感を低減する。最後に、処理 (B-6) で、輝度補正した背景画像を射影変換により元の見え方に戻しユーザに提示することで、ハイライトを再現したマーカ除去を実現する。

4 実験

提案手法の有効性を示すために、図6に示す4環境でARマーカの除去実験を行った。各環境はそれぞれ以下のような特徴を持つ。

- ・環境1：灰色一色で模様のない平面・細長い蛍光灯
 - ・環境2：表面に模様のある平面・電球
 - ・環境3：表面に細かい凹凸があり光沢が強い平面・電球
 - ・環境4：鏡面反射の生じづらい平面・細長い蛍光灯
- 実験では、Webカメラ (Logicool HD Webcam C270, 解像度 640×480 画素, 露出・ゲイン・ホワイトバランス 固定), サイズが 80mm×80mm のマーカを用い、計算機としてデスクトップ PC (Windows 10, CPU: Intel Core i7 3.47GHz, メモリ: 12GB), 開発環境として Visual Studio 2013, 開発言語として C++ を用いた。また、カメラのキャリブレーションおよび位置姿勢推定には ARToolkit[1], 画像修復には文献 [25] の手法, 画像の入出力, 射影変換には OpenCV, 処理 (B-3) における式 (4) の最適化には、疎行列で表される連立方程式を比較的高速に解くことができる、行列計算のためのライブラリ Eigen[32] の SimplicialLDLT クラスを用いた。また、室内環境を想定した予備実験を行い、

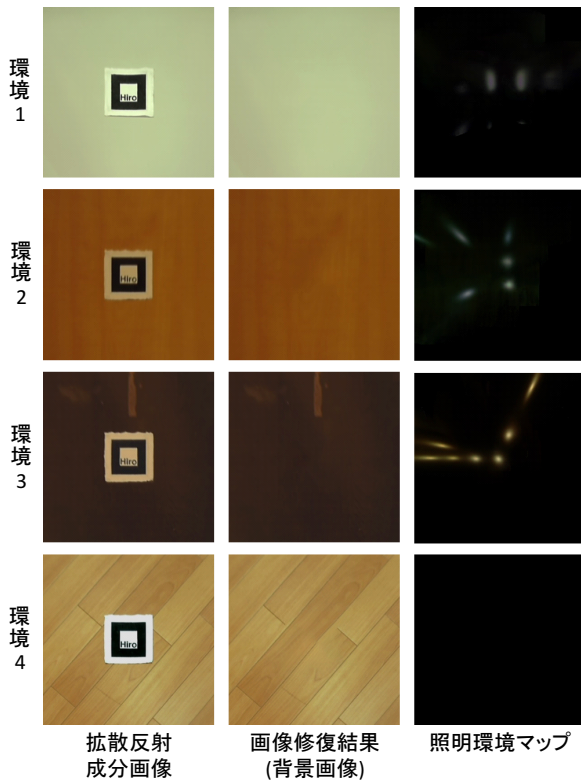


図7 背景画像生成結果と照明環境マップ

画質及び処理速度を考慮した結果、実験におけるパラメータを経験的に表1に示すように決定した。

4.1 背景画像と照明環境マップの生成結果

図7に各環境における画像修復による背景画像生成結果と照明環境マップを示す。いずれの環境においても鏡面反射が取り除かれた拡散反射成分画像を画像修復の対象とすることで、違和感のない背景画像が生成されている。照明環境マップに関しては、環境1から3ではそれぞれの照明環境に応じたマップが生成されているが、環境4では照明が確認できない。これは、対象の平面で鏡面反射がほとんど生じず、鏡面反射成分画像において画素値が閾値以上のハイライト領域が存在しなかったことにより、照明環境マップに輝度値を登録できなかったためである。

表1 実験におけるパラメータ

正対画像の解像度	501×501画素
正対画像上における マーカのサイズ	101×101画素
照明環境マップの解像度	1001×1001画素
照明環境マップの1画素の大きさ	10mm×10mm
ハイライトの閾値	15(最大輝度値255)
アルファブレンディングの境界幅	50画素

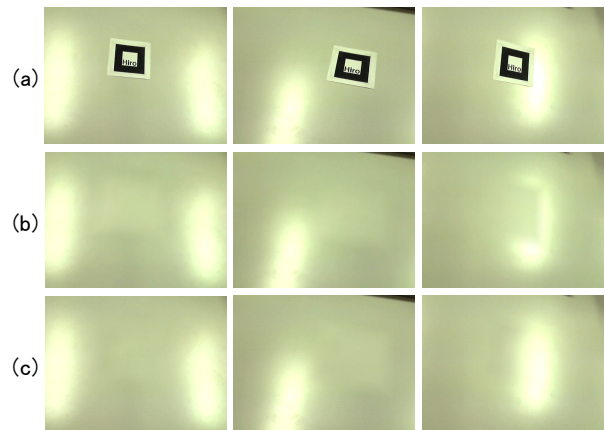


図8 環境1に対する結果

4.2 提案手法と従来手法の比較

提案手法の有効性を示すため、前項の背景画像、照明環境マップを用いた提案手法によるマーカの除去処理の結果と従来手法 [18] の結果を比較する。従来手法 [18] は、大局的な輝度補正およびキャストシャドウに対応した局所的な輝度補正を行うが、本実験の撮影シーンではキャストシャドウが生じなかったため、大局的な輝度補正のみが行われている。図8から12に、各環境におけるマーカの除去結果を示す。各図(a)は入力画像、(b)は従来手法 [18] による結果、(c)は提案手法による結果である。以下、それぞれの環境での結果について順に考察する。

灰色一色の平面を持つ環境1に対する実験において、従来手法の結果(図8(b))では、ハイライトがマーカに一部かかる場合においても、マーカ内にハイライトが再現されず、またハイライトが近傍に存在するときにはマーカ領域の背景画像が全体的に明るくなり、マーカが不自然に除去されていることが確認できる。これに対して、提案手法の結果(図8(c))では、大局的輝度変化率の算出においてハイライトの領域を使用しないため、ハイライトがマーカの付近にあっても全体的に明るくなっていない。また、ハイライトがマーカ内に入った場合において、ハイライトが正しい位置に再現されており、マーカを違和感なく除去できている。

また、環境1において、提案手法による結果画像を取得した後、カメラを固定したままマーカを物理的に取り除くことで実際の背景(真値)を取得し、提案手法による結果と真値の比較を行った。図9に、入力画像および、入力画像(図(a))中の枠の領域に対応する、実際の背景、提案手法による結果、およびそれらの差分画像の拡大図を示す。図(d)に示す差分画像の下部の中ほどに大きな差が見られるが、これは実際の背景には部分的に汚れが存在するのに対し、画像修復

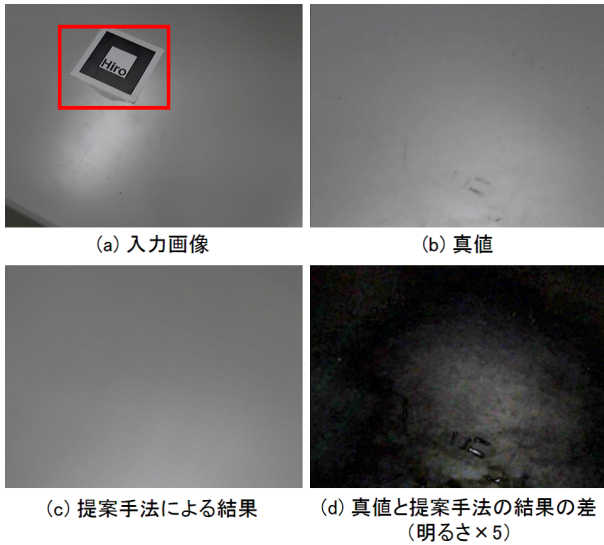


図9 環境1における提案手法の結果と実際の背景（真値）との比較

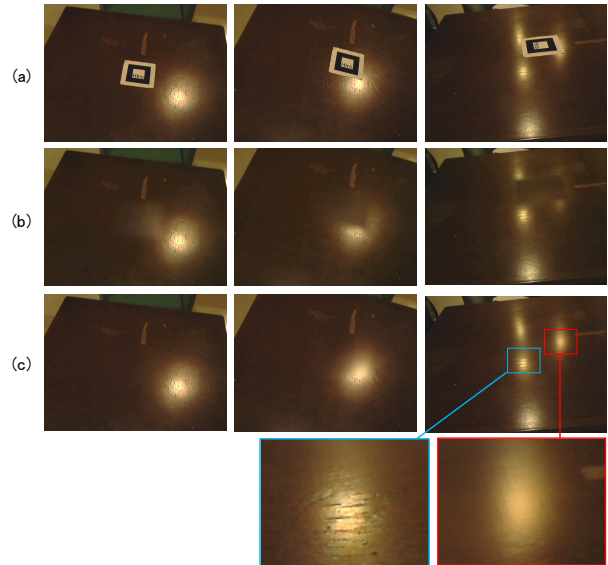


図11 環境3に対する結果

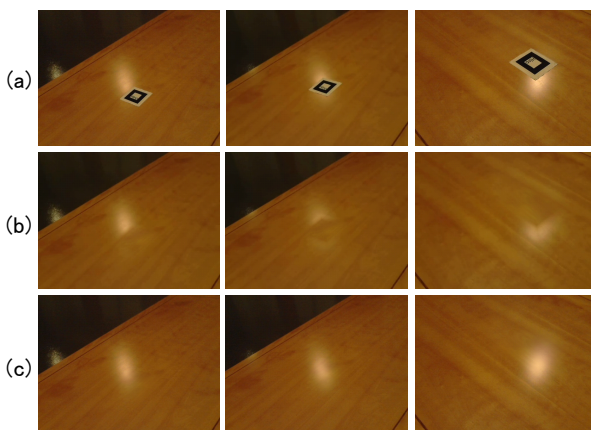


図10 環境2に対する結果

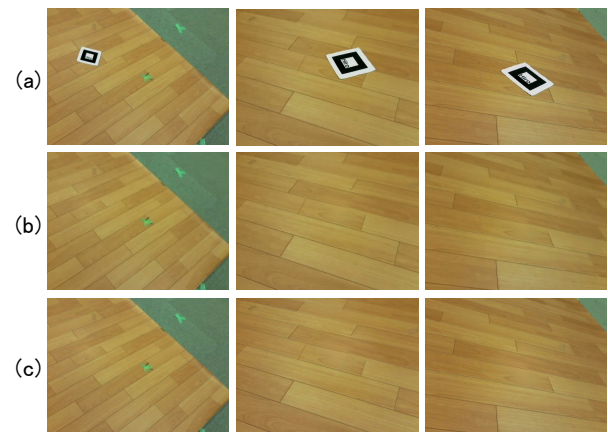


図12 環境4に対する結果

ではこのような汚れは復元されなかったことに起因する。また、ハイライトが再現された領域全体に差が見られ、最大で輝度値24の差を確認した。提案手法では、画像は拡散反射成分と鏡面反射成分で構成されるという仮定に基づき輝度値を再現しているが、実際にはそのような単純なモデルで画像は構成されていないため、このような輝度の誤差が発生したと考える。ただし、ARアプリケーションにおいてマーカを視覚的に違和感なく除去したいという目的に対しては、必ずしも真の背景を復元する必要はないという点で、これらの誤差は許容されるものと考えられる。

表面に模様のある平面を持つ環境2に対する実験において、従来手法の結果（図10(b)）では、環境1の場合と同様に、ハイライトがマーカ内に再現されていないことが確認できる。これに対して、提案手法の結果（図10(c)）では、ハイライトが違和感なく再現さ

れており、また、マーカ領域内のテクスチャも確認できる。

表面に細かい凹凸があり光沢が強い平面を持つ環境3に対する実験においては、図11から、提案手法を用いることで、複数のハイライトを正しくマーカ領域内に再現できることがわかる。しかし、同一画像内で実際に観測されている鏡面反射と、マーカ内に再現された鏡面反射を比較すると、再現されたハイライトにぼけが生じている。これは、環境3において、照明環境マップのある画素に対応する各フレーム上の画素が凹凸により様々な方向の法線を持つことで見かけ上の反射率がばらつき、提案手法によってこれらの観測輝度値が平均化されることでぼけたようなハイライトが照明環境マップに登録されることが要因であると考えられる。

鏡面反射が生じづらい平面を持つ環境4においては、照明環境マップが登録されなかったため、従来手法と提案手法の結果（図12(b), (c)）に差はなく、双方と

も違和感のない同等の結果が得られた。

また、各環境に共通して、推定したカメラ位置姿勢の誤差により、連続したフレームで見た場合には、再現したハイライト位置にジッタが生じることも確認した。今後これを解決するためには、マーカ以外の周辺の特徴点等の情報を用いたカメラの位置姿勢推定の高精度化や、リアルタイムで観測されるマーカ周辺のハイライトの位置を利用した、マーカ領域に再現するハイライトの位置の補正方法を検討する必要がある。

各環境における提案手法及び従来手法の処理速度を表2に、環境1での毎フレームのマーカ除去処理(B)における各処理の処理時間を表3に示す。これらの結果より、提案手法においてもARアプリケーションで必要な処理速度を達成できていることがわかる。また、表3からわかるように、提案手法と従来手法の速度の違いは、処理(B-2)、(B-4)の有無である。なお、従来手法においても文献[18]に記載されている速度を大きく上回っているが、これはライブラリEigenの使用の有無による差である。

4.3 照明環境マップ登録時とは異なる光源が存在する場合の結果

環境1に照明環境マップ登録時には存在しなかった色の異なる照明を追加し、撮影シーンの色合いが大局的に変化した場合の影響を検証した。図13に入力画像および提案手法による結果を示す。図より、大局的輝度変化を考慮することによって、マーカ内のハイライト以外の領域では色合いが補正されていることがわかる。しかし、ハイライト領域では、マーカ外のハイライト領域の色と少し異なっていることがわかる。これは、ハイライト領域に関しては照明環境マップ登録時の色がそのまま反映され、その後の照明環境の変化には対応できないためである。従って、この問題を解決するためには、リアルタイムにハイライトの色を補正する枠組みを検討する必要がある。

表2 処理速度 (fps)

	環境1	環境2	環境3	環境4
提案手法	32.1	32.5	32.4	34.5
従来手法 [18]	47.4	46.5	46.3	46.8

表3 提案手法の処理(B)における各処理の速度 (ms)

処理(B-)	1	2	3	4	5	6
提案手法	10	7	3	3	2	4
従来手法 [18]	10	-	3	-	2	4



図13 環境1に新たな光源を追加した場合の結果

5 おわりに

本論文では、画像のみから照明環境マップを生成し、それをARマーカ上に合成する背景画像の輝度調整に利用することで、ハイライトを再現したARマーカの除去を実現する手法を提案した。実験では、様々な環境において従来手法と結果を比較することで提案手法の有効性を示した。今後の課題として、フレーム間におけるハイライト位置のジッタを抑制する手法、および動的な照明環境の変化に対応する手法を検討する必要がある。また本研究では、光源が複数の場合においてもこれらが同一平面上に存在するという仮定をおき、ユーザが手動で2枚の画像を選択することで光源の高さを推定したが、今後は多視点の画像を自動的に選択し、それぞれ高さの異なる複数光源位置を推定することで、より複雑な光源環境に対応するARマーカの除去手法も検討する。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(No.15K16039)の支援による。

参考文献

- [1] H. Kato and M. Billinghurst, "Marker tracking and hmd calibration for a video-based augmented reality conferencing system," Proc. Int. Workshop on Augmented Reality, pp.85-94, 1999.
- [2] M. Fiala, "ARTag, a fiducial marker system using digital techniques," Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, vol.2, pp.590-596, 2005.
- [3] G. Klein and D. Murray, "Parallel tracking and mapping for small AR workspaces," Proc. Int.

- Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp.225–234, 2007.
- [4] R.A. Newcombe, S.J. Lovegrove, and A.J. Davison, “DTAM: Dense tracking and mapping in real-time,” Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision, pp.2320–2327, 2011.
- [5] J. Engel, T. Schöps, and D. Cremers, “LSD-SLAM: Large-scale direct monocular SLAM,” Proc. European Conf. on Computer Vision, pp.834–849, 2014.
- [6] T. Taketomi, T. Sato, and N. Yokoya, “Real-time and accurate extrinsic camera parameter estimation using feature landmark database for augmented reality,” Computers and Graphics, vol.35, no.4, pp.768–777, 2014.
- [7] S. Zokai, J. Esteve, Y. Genc, and N. Navab, “Multiview paraperspective projection model for diminished reality,” Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp.217–226, 2003.
- [8] T. Tsuda, H. Yamamoto, Y. Kameda, and Y. Ohta, “Visualization methods for outdoor see-through vision,” IEICE Trans. on Information and Systems, vol.E89-D, no.6, pp.1781–1789, 2006.
- [9] A. Enomoto and H. Saito, “Diminished reality using multiple handheld cameras,” Proc. ACCV’07 Workshop on Multi-dimensional and Multi-view Image Processing, pp.130–135, 2007.
- [10] P. Barnum, Y. Sheikh, A. Datta, and T. Kanade, “Dynamic seethroughs: Synthesizing hidden views of moving objects,” Proc. Int. Symp. Mixed and Augmented Reality, pp.111–114, 2009.
- [11] S. Jarusirisawad, T. Hosokawa, and H. Saito, “Diminished reality using plane-sweep algorithm with weakly-calibrated cameras,” Progress in Informatics, no.7, pp.11–20, 2010.
- [12] S. Siltanen, “Texture generation over the marker area,” Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp.253–254, 2006.
- [13] J. Herling and W. Broll, “Advanced self-contained object removal for realizing real-time diminished reality in unconstrained environments,” Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp.207–212, 2010.
- [14] J. Herling and W. Broll, “High-quality real-time video inpainting with pixmix,” IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics, vol.20, no.6, pp.866–879, 2014.
- [15] V. Lepetit and M.-O. Berger, “An intuitive tool for outlining objects in video sequences: Applications to augmented and diminished reality,” Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp.159–160, 2001.
- [16] F.I. Cosco, C. Garre, F. Bruno, M. Muzzupappa, and M.A. Otaduy, “Augmented touch without visual obstruction,” Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp.99–102, 2009.
- [17] O. Korkalo, M. Aittala, and S. Siltanen, “Light-weight marker hiding for augmented reality,” Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp.247–248, 2010.
- [18] N. Kawai, M. Yamasaki, T. Sato, and N. Yokoya, “Diminished reality for AR marker hiding based on image inpainting with reflection of luminance changes,” ITE Trans. on Media Technology and Applications, vol.1, no.4, pp.343–353, 2013.
- [19] Z. Li, Y. Wang, J. Guo, L.-F. Cheong, and S.Z. Zhou, “Diminished reality using appearance and 3D geometry of internet photo collections,” Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp.11–19, 2013.
- [20] 森尚平, 小向啓文, 柴田史久, 木村朝子, 田村秀行, “隠消現実感における隠背景平面拘束と周辺参照領域の効果的利用,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.19, no.2, pp.131–140, 2014.
- [21] N. Kawai, T. Sato, Y. Nakashima, and N. Yokoya, “AR marker hiding with real-time texture deformation,” Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality Workshops, pp.26–31, 2015.
- [22] S. Mori, F. Shibata, A. Kimura, and H. Tamura, “Efficient use of textured 3D model for pre-observation-based diminished reality,” Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality Workshops, pp.32–39, 2015.
- [23] N. Kawai, T. Sato, and N. Yokoya, “Diminished reality based on image inpainting considering background geometry,” IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, vol.22, no.3, pp.1236–1247, 2016.
- [24] Y. Wexler, E. Shechtman, and M. Irani, “Space-time completion of video,” IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.29, no.3, pp.463–476, 2007.
- [25] N. Kawai and N. Yokoya, “Image inpainting considering symmetric patterns,” Proc. Int. Conf. on Pattern Recognition, pp.2744–2747, 2012.
- [26] P. Supan, I. Stuppacher, and M. Haller, “Image based shadowing in real-time augmented reality,” International Journal of Virtual Reality, vol.5, no.3, pp.1–7, 2006.
- [27] M. Kanbara and N. Yokoya, “Real-time estimation of light source environment for photorealistic augmented reality,” Proc. Int. Conf. on Pattern Recognition, vol.2, pp.911–914, 2004.
- [28] J. Jachnik, R.A. Newcombe, and A.J. Davison, “Real-time surface light-field capture for augmentation of planar specular surfaces,” Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp.91–97, 2012.
- [29] M.W. Powell, S. Sarkar, and D. Goldgof, “A simple strategy for calibrating the geometry of light sources,” IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.23, no.9, pp.1022–1027, 2001.
- [30] 青砥隆仁, 佐藤智和, 向川康博, 武富貴史, 横矢直和, “中空透明球を用いた近接点光源の位置推定,” 電子情報通信学会論文誌, vol.J98-D, no.3, pp.534–545, 2015.
- [31] 間下以大, 安原広幸, プロブスキアレクサンダー, 清川清, 竹村治雄, “インバースレンダリングに基づく拡張現実感のための光源環境と反射特性のオンライン推定,” 電気学会論文誌 C, vol.134, no.10, pp.1473–1480, 2014.
- [32] G. Guennebaud, B. Jacob, et al., “Eigen v3,” <http://eigen.tuxfamily.org>, 2010.

(2016年8月1日受付)

[著者紹介]

中村 勇貴



2014年鳥取大学工学部知能情報工学科卒業。2016年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。同年日立産業制御ソリューションズ入社、現在に至る。

河合 紀彦 (正会員)



2005年京都大学工学部情報学科卒業。2010年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。同年日本学術振興会特別研究員(PD)兼、カリフォルニア大学バークレー校博士研究員。2011年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教、現在に至る。画像処理、複合現実感に関する研究に従事。博士(工学)。

佐藤 智和 (正会員)



1999年大阪府立大学工学部情報工学科卒業。2003年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。同年同大同研究科助手、2007年同大同研究科助教、2010年～2011年チェコ工科大学客員研究員、2011年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科准教授、現在に至る。コンピュータビジョン、複合現実感に関する研究に従事。博士(工学)。

横矢 直和 (正会員)



1974年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。1979年同大大学院博士後期課程修了。同年通商産業省電子技術総合研究所入所。以来、画像処理ソフトウェア、画像データベース、コンピュータビジョンの研究に従事。1986年～1987年マッギル大学知能機械研究センター客員教授。1992年奈良先端科学技術大学院大学情報科学センター教授(併任)、1993年文部省へ出向、1994年同大情報科学研究科教授。2013年同大理事・副学長兼情報科学研究科教授、現在に至る。工学博士。