

『2017年度AVM研究会最優秀賞受賞記念講演』 事前撮影画像を用いた物体再現拡張現実システムの 幾何変換改良手法と色変換導入手法の提案

三原 翔一郎^{1,a)}

概要：拡張現実において、複雑な光学特性をもつ実物体の写実的な再現は、忠実な光学特性の計測と環境光推定の難しさから未だ解決すべき課題である。筆者はこれまでに、事前に撮影した実画像から表示画像を生成することで、表示対象の光学特性計測および環境光推定を行わずに、実物体の写実的な再現を可能とする新しい拡張現実システムを提案している。本稿では、提案システムの改良手法として、画像の幾何変換による立体物形状の歪みを抑えるために逐次の相似変換手法を提案し、さらに事前撮影画像の撮影時とシステム利用時の照明環境の違いを補正するための色変換技術の導入手法を提案する。これらの提案手法を実装し、実験により提案システムの表示画像において立体物形状の歪みが抑えられ、照明環境の違いが自然に補正されることを示す。

1. はじめに

近年、拡張現実（AR: Augmented Reality）と呼ばれる画像処理技術が広く普及しており、例えば電子商取引においては、IKEA社の「IKEA Place」[1]やAmazon.com社の「AR View」[2]のように、コンピュータグラフィックス（CG: Computer Graphics）で描画した商品をスマートフォンの画面上で現実世界に重ねて表示することで、あたかも商品が手元にあるかのように大きさや外観を閲覧できるサービスが提案されている。

一方で、CGで実物体を写実的に再現するためには、一般に双方向反射率分布関数（BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function）で表される表面反射特性を計測し、それを基にレンダリングを行う必要があるが、織物等有する異方性のあるBRDFを計測するには物体表面で反射した光をあらゆる方向から観察する必要があるため、高価な計測機器と膨大な計測時間が必要となってしまう。半透明物体の光の透過や表面分散も考慮に入れた双方向散乱面反射率分布関数（BSSRDF: Bidirectional Scattering Surface Reflectance Distribution Function）を計測することは更に難しい。

また、ARで実物体を写実的に表示する場合、周囲の環境光を推定し、その情報を基にレンダリングを行う必要が

あるが、そのような推定は高度かつ高負荷な処理を伴うため、計算資源の少ない携帯端末上でリアルタイムに動作させることは未だ解決すべき課題として研究段階にある。

そこで、筆者はこれまでに、ARで実物体を写実的に表示するため、ユーザの把持するカメラの位置姿勢に最も類似した位置姿勢で事前に撮影された画像を実画像群の中から選択し、実画像を基に表示画像を生成する拡張現実システムを提案している[3]。提案システムはCG描画による表示を行わないため上記のような問題を解く必要がなく、従来のARでは難しい異方性反射や複雑な透過屈折を生ずる物体の自然な表示が可能となる。

しかしながら、実画像から表示画像を生成する際に特定の平面間を合致させる射影変換を用いたため、平面拘束に従わない立体物の形状が歪んで表示されてしまうという問題があった。また、実画像群を撮影した時とシステム利用時の照明環境が異なる場合、実際の照明環境にそぐわない色合いの画像が表示されてしまうという問題もあった。そこで本稿では、提案システムの改良手法として、表示画像内の立体物形状の歪みを解消するための逐次の相似変換手法を提案し、さら実画像群の撮影時とシステム利用時の照明環境の違いを補正するための色変換技術の導入手法を提案する。これらの提案手法を実装し、実験により提案システムの表示画像において立体物形状の歪みが抑えられ、照明環境の違いが自然に補正されることを示す。

¹ 株式会社 KDDI 総合研究所
KDDI Research, Inc.

^{a)} sh-mihara@kddi-research.jp

2. 関連研究

実物体の BRDF を計測する最も単純な方法はゴニオリフレクトメータ [4] を用いる方法であるが、光源とセンサを装着したアームを動かして光の入射・反射方向のすべての組み合わせで小領域の BRDF を計測するため、膨大な計測回数が必要になってしまう。そのため、計測を効率化するための研究がこれまでに行われている。向川らはプロジェクタと楕円鏡を利用した機械的駆動のない計測装置を提案し、計測の効率化を行った [5]。プロジェクタの投影パターンを切り替えることで入射方向を容易に変化させて計測可能なため計測時間を短縮できるが、小領域の BRDF 計測を前提としているため、空間的に一様でない BRDF をもつ物体を全体的に計測することは難しい。Tunwattanapongらは大量の光源を取り付けた半円状のアームを回転させながら複数のカメラで対象を撮影することで、計測を効率化する手法を提案した [6]。三次元物体の形状と空間的に一様でない BRDF を 10 分程度で計測することが可能だが、半透明物体や凹面を持つ物体の計測ができないという制約がある。Wardらは光を透過する物体の双方向散乱分布関数 (BSDF: Bidirectional Scattering Distribution Function) を求めるため、ゴニオリフレクトメータで計測した不連続な BSDF を輸送理論に基づいて放射基底関数で補間し、レンダリング可能な形式で表現する手法を提案した [7]。しかしながら、鏡面反射のような急峻な分散をもつ反射特性の表現ができないという課題がある。

また、環境光の影響を考慮して物体を自然に AR で表示する手法がいくつか提案されている。Rohmerらは複数の HDR カメラを用いて PC で環境光を推定し、携帯端末に情報を転送してレンダリングを行うことで、低遅延に環境光の影響を考慮した AR 表示を行った [8]。しかしながら、PC と複数の HDR カメラが必要なため、利用環境が限られるという問題がある。Mandlらは深層学習を用いてカメラ 1 台の情報で環境光を推定し、レンダリングする手法を提案した [9]。GPU を搭載した携帯端末で 7-8fps での動作を実現しており有効な手法であるが、上述したような一様でない複雑な光学特性をもつ物体はそもそも実物に忠実な 3D モデルの生成が困難なため、AR 表示可能な物体は単純な反射特性をもつ実物体か、材質設定を手作業で付与した仮想物体に限定される。

3. 提案システム

筆者の提案システム [3] の概念図を図 1 に示す。ユーザは携帯端末を目の前にかざして固定されたマーカをカメラで撮影し、画面に表示される映像を閲覧する。マーカは拡張現実の既存技術で周知のもの [10][11] 等を利用し、マーカを基準とした世界座標に対する相対的なカメラの位

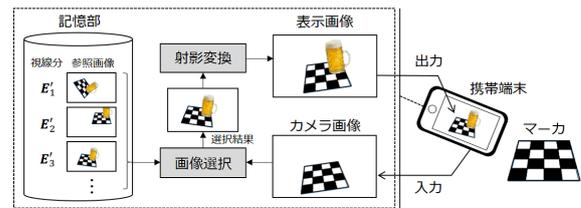


図 1 提案システム概念図

Fig. 1 Conceptual diagram of proposal system.

置姿勢 (並進ベクトル t 及び回転行列 R) を推定する。また、図 1 の記憶部には、ユーザに提示する対象物体と上記のマーカを画角内に収めるように様々な方向から撮影した複数の参照画像と、カメラの位置姿勢情報 (後述する視線分 E) を紐づけて保存しておく。図 1 の画像選択処理においては、カメラ画像から得られる位置姿勢と、各々の参照画像に紐づく位置姿勢との類似度を評価して最も類似する参照画像を選択する。そして、選択された参照画像に対してカメラの位置姿勢から見たように幾何変換を行った上で、端末の画面上に表示する。

異なる二つの位置姿勢の類似度を算出するために、提案システム [3] ではカメラの位置姿勢を視点座標 $P_{cam}(X_c, Y_c, Z_c)$ と注視点座標 $P_{gaz}(X_g, Y_g, Z_g)$ を合わせて式 1 のように要素表示した視線分 E を定義した。

$$E \equiv (X_c, Y_c, Z_c, X_g, Y_g, Z_g) \quad (1)$$

そして式 2 のように、時刻 t におけるカメラの視線分 $E(t)$ とのユークリッド距離が最小となる参照画像の視線分 E'_i ($i \in I \mid I$ は保存された参照画像の添字集合) を検索することで、カメラ画像に撮像範囲が類似した参照画像を選択することが可能となる。

$$i_{\min}(t) = \arg \min_{i \in I} \|E(t) - E'_i\|_2 \quad (2)$$

4. 表示画像生成の提案改良手法

式 2 によって選択された参照画像は、実際のカメラ位置姿勢 (t, R) とは異なる位置姿勢で撮影された画像であることが殆どである。また、視線分 E の距離は視線を軸とした回転の影響を受けないため、選択された画像の向きは実際のカメラの向きと異なる場合がある。提案システム [3] ではこれらの影響を補正するために、参照画像内のマーカ平面をカメラ画像内のマーカ平面に合致させる射影変換を行うことで、参照画像を実際のカメラの位置姿勢から見たように変換して表示画像を生成した。しかしながら、平面間の射影変換を行った場合、平面拘束に従わない立体物の形状が歪んでしまうという問題がある。特に、時系列的にカメラの位置姿勢を変化させて表示を行う場合、射影変換による立体物の歪み方も時系列的に変化するため、ユーザに対して不自然な印象を与えてしまう。そこで、本稿では幾何変換による立体物形状の歪みを抑えつつ、カメラ画像

の見え方に近くなるように参照画像を変換する近逐次的相似変換手法を提案する。

4.1 相似変換

立体物形状の歪みを抑えつつ表示画像を生成するためには、画像内の幾何形状を保存する相似変換を用いることができる。相似変換は、以下の式3によって表される。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s \cos \theta & -s \sin \theta & t_x \\ s \sin \theta & s \cos \theta & t_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ただし、 θ は画像平面内での回転角、 $[t_x \ t_y]^T$ は画像平面内での並進ベクトル、 s は画像平面内でのスケール変換を表す。このとき、参照画像内とカメラ画像内のマーカーから得られる複数の対応点座標を用いて、最小二乗法により相似変換行列のパラメータを推定することができる。そして、推定した相似変換行列を用いて参照画像を変換することで、画像内の幾何形状を保ったまま、カメラ画像の見え方に近くなるように参照画像を変換することができる。

しかし、式3は回転と並進とスケールの誤差を等価に扱うため、時系列的にカメラの位置姿勢を変化させた場合、すべてのパラメータが誤差の影響を受けて変動することになる。特に、回転角 θ と並進ベクトル $[t_x \ t_y]^T$ の変動は表示画像とカメラ位置姿勢の間のズレとして知覚され、ユーザに不自然な印象を与えてしまう。

4.2 提案改良手法：逐次的相似変換

提案システムの表示画像は端末のカメラを通して見る映像として閲覧されるため、スケール変換値 s はカメラのズーム操作と区別できず、誤差が知覚されにくいという特徴がある。そこで、本稿では相似変換の回転角 θ と並進ベクトル $[t_x \ t_y]^T$ から誤差変動を除去し、スケール変換値 s にのみ誤差変動を転嫁して時系列的に平滑化を行うことで、式3の含む誤差による表示画像の揺らぎを抑える逐次的相似変換手法を提案する。

まず、図2のように回転と並進の基準となる世界基準ベクトル \mathbf{h}_{wld} を定義する。 (\mathbf{h}_{wld}) の定義方法については後述する。)そして、カメラ画像平面と参照画像平面に世界基準ベクトル \mathbf{h}_{wld} を透視投影変換によって写像し、それぞれ写像されたベクトルを \mathbf{h}_{cam} , \mathbf{h}_{ref} とする。このとき、以下の式4のように、 \mathbf{h}_{ref} の始点座標 (x_h^r, y_h^r) から \mathbf{h}_{cam} の始点座標 (x_h^c, y_h^c) へのベクトルを並進ベクトル $\mathbf{t}_h = [t_x \ t_y]^T$ として算出する。

$$\mathbf{t}_h = [x_h^c \ y_h^c]^T - [x_h^r \ y_h^r]^T \quad (4)$$

式4により得られる並進ベクトル \mathbf{t}_h を用いて参照画像 I_r を並進させることで、カメラ画像と並進後の参照画像 $I_r(\mathbf{t}_h)$ 内の \mathbf{h}_{wld} の始点位置を揃えることができる。

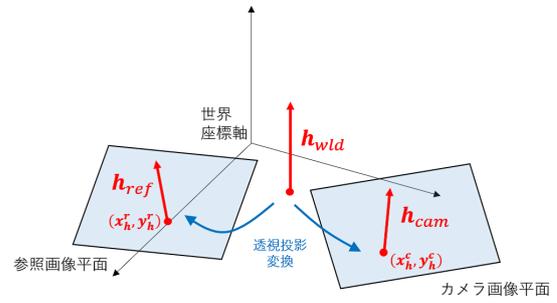


図2 世界基準ベクトル \mathbf{h}_{wld} の画像平面への写像

Fig. 2 Projection of world standard vector to image planes.

次に、 \mathbf{h}_{cam} と \mathbf{h}_{ref} の成す角 θ_h を次の式5より算出する。ただし、反時計回りの回転方向を正とする。

$$\theta_h = \text{sgn}(\mathbf{h}_{ref} \times \mathbf{h}_{cam}) \arccos\left(\frac{\mathbf{h}_{ref} \cdot \mathbf{h}_{cam}}{|\mathbf{h}_{ref}| |\mathbf{h}_{cam}|}\right) \quad (5)$$

このとき、回転中心を \mathbf{h}_{cam} の始点座標 (x_h^c, y_h^c) として、回転角 θ_h で並進後の参照画像 $I_r(\mathbf{t}_h)$ を回転させることで、カメラ画像と並進回転後の参照画像 $I_r(\mathbf{R}_h \mathbf{t}_h)$ 内の \mathbf{h}_{wld} の向きを合わせることができる。回転行列 \mathbf{R}_h は次の式6によって求めることができる。

$$\mathbf{R}_h = \begin{bmatrix} \cos \theta_h & -\sin \theta_h & x_h^c(1 - \cos \theta_h) - y_h^c \sin \theta_h \\ \sin \theta_h & \cos \theta_h & x_h^c \sin \theta_h - y_h^c(1 - \cos \theta_h) \end{bmatrix} \quad (6)$$

そして、参照画像のスケールをカメラ画像に合わせるスケール変換値 s_h を最小二乗法により推定する。カメラ画像と参照画像に含まれるマーカーの対応点群の座標をそれぞれ (x_i^c, y_i^c) , (x_i^r, y_i^r) としたとき、式4,5,6より算出した並進ベクトル \mathbf{t}_h と回転行列 \mathbf{R}_h を用いて参照画像の対応点群 (x_i^r, y_i^r) を並進・回転させた点群の座標 $(x_i^r(\mathbf{R}_h \mathbf{t}_h), y_i^r(\mathbf{R}_h \mathbf{t}_h))$ は、次の式7により算出できる。

$$\begin{bmatrix} x_i^r(\mathbf{R}_h \mathbf{t}_h) \\ y_i^r(\mathbf{R}_h \mathbf{t}_h) \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_h \begin{bmatrix} x_i^r \\ y_i^r \\ 1 \end{bmatrix} + \mathbf{t}_h \quad (7)$$

このとき、 $(x_i^r(\mathbf{R}_h \mathbf{t}_h), y_i^r(\mathbf{R}_h \mathbf{t}_h))$ と (x_i^c, y_i^c) の間のスケール変換は次の式8によって表される。

$$\begin{bmatrix} x_i^c - x_i^r \\ y_i^c - y_i^r \end{bmatrix} = s_h \begin{bmatrix} x_i^r(\mathbf{R}_h \mathbf{t}_h) - x_i^r \\ y_i^r(\mathbf{R}_h \mathbf{t}_h) - y_i^r \end{bmatrix} \quad (8)$$

式8の左辺の縦ベクトルを添え字順に横に拡張した行列を \mathbf{b}_c 、右辺の縦ベクトルを添え字順に横に拡張した行列を \mathbf{A}_r とおくと、スケール変換値 s_h は最小二乗法を用いて次の式9によって求めることができる。

$$s_h = (\mathbf{A}_r^T \mathbf{A}_r)^{-1} \mathbf{A}_r^T \mathbf{b}_c \quad (9)$$

時系列的にカメラの位置姿勢を変化させる場合、時刻 t において式9により求まるスケール推定値 $s_h(t)$ は最小二乗法の誤差に起因して値が変動する。ただし、先に述べたように、スケール変換値 $s_h(t)$ はカメラのズーム操作と区

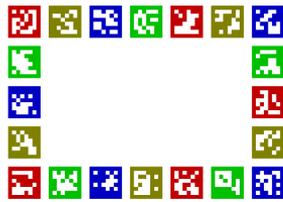


図 3 着色マーカーボード
Fig. 3 Colored marker board.

別できず、誤差の大きさ自体は重大な問題とならないため、次の式 10 のように $s_h(t)$ の変動を抑える $M + 1$ ステップ時間の平滑化処理を行うことで、表示画像のスケールの不自然な変動を抑えることができる。

$$\bar{s}_h(t) = \frac{1}{M+1} \sum_{k=t-M}^t s_h(k) \quad (10)$$

上記より求めたスケール変換値 \bar{s}_h を用いて並進回転後の参照画像 $I_r(\mathbf{R}_h t_h)$ を変換し、表示画像 $I_r(\bar{s}_h \mathbf{R}_h t_h)$ を得る。このとき、表示画像 $I_r(\bar{s}_h \mathbf{R}_h t_h)$ の端には写像されない領域が生じるため、適当なサイズで中心領域からクリッピング処理を行ってもよい。

最後に、世界基準ベクトル \mathbf{h}_{wld} の定義方法について述べる。 \mathbf{h}_{wld} は任意のベクトルを定義可能だが、上記の通り \mathbf{h}_{wld} のカメラ画像と参照画像内での位置姿勢を合致させるような幾何変換を求めるため、両画像の画角内に収まるようなベクトルが適当である。また、提案システムは表示対象物が静止していることを前提としているため、対象物は静止つまり安定的に正立しているように見えることが望ましい。ヒトは心理学的に傾きが重力方向と一致しているものを正立していると知覚するため [12]、表示画像内の重力方向とカメラ画像内の重力方向（即ち実際の重力方向）が一致しているときに、表示画像内の物体が正立しているように見えると考えられる。ゆえに、本稿では \mathbf{h}_{wld} をカメラの注視点 P_{gaz} を始点とし、重力方向と並行な長さ 10cm のベクトルとして定義した。

5. 表示画像の色合い補正

提案システム [3] は事前に撮影した実画像から表示画像を生成するため、実画像群を撮影した際の照明環境がそのまま表示画像の照明環境となる。それゆえ、実画像群を撮影した時とシステム利用時の照明環境が異なっていると、実際の照明環境にそぐわない色合いの画像が表示されてしまうという問題があった。

そこで、本稿では表示画像の色合いが実際の照明環境と違和感の無いものにするため、画像間の色合いを整合させる Reinhard らの色変換 [13] を導入する。Reinhard らは、画像の RGB 色空間を各チャネルの相関が低い $l\alpha\beta$ 色空間 [14] に変換し、 $l\alpha\beta$ 色空間において各チャネルの統計値（平均値と標準偏差）を合致させる変換処理を行ってから、

RGB 色空間に再変換することで画像間の色合いを整合する手法を提案した。環境光や対象物の反射特性を推定するわけではないため、必ずしも厳密に別の照明環境下での色が再現されるわけではないが、簡便な処理で画像全体の色合いを整合させる手法として十分な結果が示されていることから、Reinhard らの色変換を採用する。

色変換を提案システムに導入するため、本稿では図 3 のような着色マーカーボードを用いる。マーカーは OpenCV3.4.1 contrib module の ArUco[11] を用いて生成し、ペイントソフトで各マーカーの色を RGB 値で赤 (192,0,0)、緑 (0,192,0)、青 (0,0,192)、黄 (128,128,0) の何れかに恣意的に着色した。これらの色は $l\alpha\beta$ 色空間の α が黄-青、 β が赤-緑の補色軸に対応していることから、各チャネルの標準偏差が極端に小さくならないように、かつ ArUco で検出可能な色に調整したものである。

本稿では、実画像群を撮影する際に、再現したい物体と図 3 のマーカーの少なくとも一部が画角内に収まるように撮影を行い、利用時にも図 3 のマーカーボードをカメラで撮影しながら表示画像を閲覧することを想定する。このとき、カメラ画像と式 2 により選択された参照画像において、ArUco を用いて着色マーカーボードに含まれるマーカーを検出し、検出したマーカーの ID 情報を特定することができる。カメラ画像と参照画像の両方で検出された ID 情報をもつマーカーの内部領域を色参照領域として、色参照領域内の画素値から求める $l\alpha\beta$ 色空間の統計値を基に、Reinhard らの色変換を用いて参照画像とカメラ画像の色合いを整合させることで、表示画像の色合いを実際の照明環境に即したものとすることができる。

6. 評価実験

4 章で提案した逐次的相似変換手法と、5 章で提案した Reinhard らの色変換の導入手法の有効性を実証するため、実験を行った結果をそれぞれ以下に示す。

6.1 逐次的相似変換評価実験

4 章で提案した逐次的相似変換手法によって、立体物の形状がどのように表示されるかを調べるため CG を用いたシミュレーション実験を行った。カメラの位置姿勢推定には ArUco を用い、参照画像群に図 4(i)(ii)(iii) のようなプリミティブな形状の立体物とマーカーボードを POV-Ray[15] (3DCG レンダリングソフト) で描画した CG 画像を用いた。なお、描画の際にカメラ視点は図 5 のように、距離を d に固定、仰角 ϕ を 30° に固定し、方位角 ψ を 10° ずつ変えて設定し、注視点は立体物の接地面の中心に固定した。さらに、距離を d 、仰角 ϕ を 30° に固定し、方位角 ψ を 1° ずつ回転させてマーカーボードのみを CG 描画した画像 360 枚をカメラ画像として用いた。また、各カメラ画像において立体物も含めて再描画することで各カメラ視点で



図 4 参照画像の例

Fig. 4 Example of reference images.

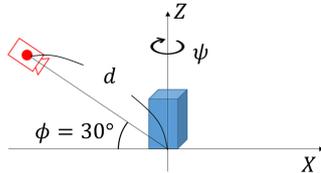


図 5 シミュレーション実験用 CG 描画時のカメラ設定

Fig. 5 Camera settings for generating CG images for simulation test.

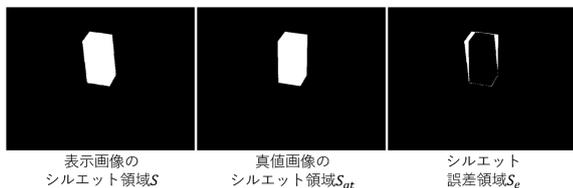


図 6 シルエット領域の例

Fig. 6 Example of silhouette region.

の真値画像を生成した。(実験では $d = 6.0$ とした.)

提案手法を評価するため、各カメラ画像を入力として、(a) 射影変換 [3] により生成される表示画像、(b) 4.1 節で述べた相似変換により生成される表示画像、及び (c) 提案手法 (逐次的相似変換手法) により生成される表示画像を比較評価する。評価方法としては、生成された表示画像内の立体物の形状に着目するため、表示画像から立体物のシルエット領域 S を抽出し、同様に真値画像から抽出したシルエット領域 S_{gt} との差分領域をシルエット誤差領域 $S_e = S \cup S_{gt} - S \cap S_{gt}$ と定義し、 S_e の画素数 $n(S_e)$ を評価値として算出した。図 6 にシルエット領域 S と S_{gt} 、及びシルエット誤差領域 S_e の例を図示する。

360 枚のカメラ画像に対して (a) 射影変換、(b) 相似変換、(c) 提案手法を用いて生成した表示画像の評価値 $n(S_e)$ の平均値を表 1 に示す。表 1 から、提案手法の評価値 $n(S_e)$ が最も小さく、次いで相似変換、射影変換の順に小さいことがわかる。

表 1 各手法で生成された表示画像の評価値 $n(S_e)$ の平均値

	直方体	円錐	球
(a) 射影変換	2245.29	1471.35	1208.39
(b) 相似変換	839.61	672.49	473.44
(c) 提案手法	521.71	317.58	290.59

また、シルエット誤差領域 S_e を画素値 1 のマスク画像

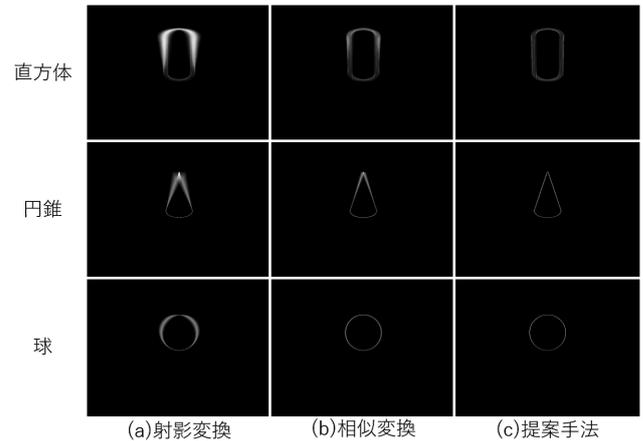


図 7 (a) 射影変換 (b) 相似変換 (c) 提案手法のシルエット誤差マップの比較

Fig. 7 Comparison of silhouette error map among (a)projective transformation, (b)similarity transformation, and(c)proposal method.

と見做して全カメラ画像に対する表示画像ごとに求まる S_e の総和を取り、 $[0, 255]$ の範囲に正規化したシルエット誤差マップを図 7 に示す。図 7 から、(c) 提案手法のシルエット誤差領域 S_e の分布が最も狭く、(b) 相似変換、(a) 射影変換の順に広い範囲にシルエット誤差領域 S_e が分布していることがわかる。

以上の結果より、提案手法が他の手法と比較して、最も立体物形状の形状が真値に近く、画像内の位置姿勢を安定的に表示することがわかる。

6.2 色変換評価実験

5 章で提案した Reinhard らの色変換の導入によって、表示画像の色合いがどのように変換されるかを調べるため、実画像を用いた色変換実験を行った。

図 3 の着色マーカボードを EPSON 社製インクジェットプリンター (EP-879AR) で普通紙に印刷し、図 8(a) のように、車の模型をマーカボードの中心に置いた状態で、Logicool 社製 Web カメラ (HD Pro Webcam C920) を用いて蛍光灯環境下でホワイトバランス (WB) の色温度を 4000K に調整した状態で撮影した画像を参照画像とした。そして、同じカメラ位置から蛍光灯を一部消した暗い照明環境で撮影した画像 (図 8(e-iii)) と、WB の色温度を 2000K および 6500K に調整した状態で撮影した画像 (図 8(e-i)(e-ii)) を真値画像とした。また、車の模型を取り除き、各条件でマーカボードのみ撮影した画像 (図 8(b-i)(b-ii)(b-iii)) をカメラ画像に用いた。そして、図 8(c) に白塗りで示したようなカメラ画像と参照画像の両方で検出されたマーカ領域を色参照領域として、色参照領域内の画素値を用いて参照画像の色合いをカメラ画像に一致させるように色変換を行い、表示画像 (図 8(d)) を生成した。

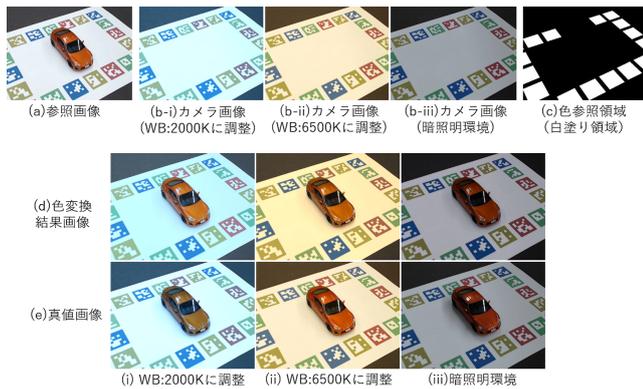


図 8 色変換評価実験の入力条件と出力結果

Fig. 8 Input conditions and output result of evaluation test of color transformation

図 8(b) と (d) を比べると、色変換結果画像の色合いがカメラ画像の色合いに近くなっていることがわかる。また、図 8(d) と (e) を比較すると、車の模型の色合いが若干異なることがわかるが、同様の色合いが再現できていることがわかる。

各実験条件 (i)(ii)(iii) の表示画像と真値画像において、CIELab 色空間での色差平均を求めたところ、それぞれ (i)11.2813,(ii)10.1238,(iii)6.57909 となった。CIELab 色空間における丁度可知差異は 2.3 とされているため [16]、厳密には真値と一致する色を再現できているとは言えないが、提案システムは任意の色再現特性をもつディスプレイを通して映像を閲覧するため、ユーザ知覚としての厳密な色再現は本稿のスコープから外れ、凡そ真値に近い色合いの表示画像が生成されたことから十分な結果が得られていると言える。

7. 結論

本稿では、筆者が提案した、事前に撮影した実画像から表示画像を生成する実物体再現拡張現実システムの改良手法として、画像の幾何変換による立体物形状の歪みを抑えるために逐次的相似変換手法を提案し、さらに事前撮影画像の撮影時とシステム利用時の照明環境の違いを補正するための色変換技術の導入手法を提案した。これらの提案手法を実装し、実験により提案システムの表示画像において立体物形状の歪みが抑えられ、照明環境の違いが自然に補正されることを示した。

今後の課題として、表示画像のカクつきを抑えるための実画像群の視点密度の高密度化および均等化や、3D モデルへのテクスチャマッピングと本稿の提案手法を組み合わせた相補的な CG 生成、カメラ画像を背景として表示対象領域のみを重畳表示するために領域分割技術を組み合わせること等が挙げられる。

参考文献

- [1] : IKEA Place, Inter IKEA Systems B.V. (online), available from (<http://www.ikea.com/gb/en/customer-service/ikea-apps/>) (accessed 2018-1-10).
- [2] : AR View, Amazon.com, Inc. (online), available from (<https://www.amazon.com/b?node=17403032011>) (accessed 2017-12-15).
- [3] 三原翔一郎, 加藤晴久, 菅野勝: 複雑な光学特性をもつ実物体の写実的な再現のための事前撮影画像による拡張現実システム, 情報処理学会研究報告. AVM, オーディオビジュアル複合情報処理, Vol. 100, No. 13, pp. 1-6 (2018).
- [4] F.E. Nicodemus, J.C. Richmond, J. H. I. G. and T.Limperis: *Geometrical considerations and nomenclature for reflectance*, Vol. 160, US Department of Commerce, National Bureau of Standards (1977).
- [5] Mukaigawa, Y., Sumino, K. and Yagi, Y.: Rapid BRDF measurement using an ellipsoidal mirror and a projector, *IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications*, Vol. 1, pp. 21-32 (2009).
- [6] Tunwattanapong, B., Fyffe, G., Graham, P., Busch, J., Yu, X., Ghosh, A. and Debevec, P.: Acquiring reflectance and shape from continuous spherical harmonic illumination, *ACM Transactions on graphics (TOG)*, Vol. 32, No. 4, p. 109 (2013).
- [7] Ward, G., Kurt, M. and Bonneel, N.: Reducing Anisotropic BSDF Measurement to Common Practice., *Material Appearance Modeling*, pp. 5-8 (2014).
- [8] Rohmer, K., Büschel, W., Dachsel, R. and Grosch, T.: Interactive near-field illumination for photorealistic augmented reality on mobile devices, *Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 2014 IEEE International Symposium on*, IEEE, pp. 29-38 (2014).
- [9] Mandl, D., Yi, K. M., Mohr, P., Roth, P., Fua, P., Lepetit, V., Schmalstieg, D. and Kalkofen, D.: Learning Lightprobes for Mixed Reality Illumination, *International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, No. EPFL-CONF-229470 (2017).
- [10] 加藤博一: 拡張現実感システム構築ツール ARToolKitの開発, 電子情報通信学会技術研究報告. PRMU, パターン認識・メディア理解, Vol. 101, No. 652, pp. 79-86 (2002).
- [11] Garrido-Jurado, S., Muñoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, F. J. and Marín-Jiménez, M. J.: Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion, *Pattern Recognition*, Vol. 47, No. 6, pp. 2280-2292 (2014).
- [12] Rock, I.: The effect of retinal and phenomenal orientation of the perception of form, *Scientific American*, Vol. 230, No. 1, pp. 78-86 (1974).
- [13] Reinhard, E., Adhikhmin, M., Gooch, B. and Shirley, P.: Color transfer between images, *IEEE Computer graphics and applications*, Vol. 21, No. 5, pp. 34-41 (2001).
- [14] Ruderman, D. L., Cronin, T. W. and Chiao, C.-C.: Statistics of cone responses to natural images: implications for visual coding, *JOSA A*, Vol. 15, No. 8, pp. 2036-2045 (1998).
- [15] : POV-Ray, Persistence of Vision Raytracer Pty. Ltd. (online), available from (<http://www.povray.org/>) (accessed 2018-1-10).
- [16] Sharma, G. and Bala, R.: *Digital color imaging handbook*, CRC press (2002).