

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

三原 翔一郎^{1,a)} 加藤 晴久¹ 菅野 勝¹

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。本稿では、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する。また、表示画像の基となる実画像を画像群から選択するために、カメラ位置姿勢の類似度を定量化する手法を導入する。本システムを携帯端末上に実装し、主観評価実験により従来のコンピュータグラフィックスによる拡張現実では難しい複雑な光学特性をもつ実物体の写実的な再現が可能となることを示す。

Augmented reality system based on pre-captured images to realistically reproduce real object with complex optical properties

MIHARA SHOICHIRO^{1,a)} KATO HARUHISA¹ SUGANO MASARU¹

Abstract: Reproducing real objects realistically with complex optical properties has been a long-standing challenge in augmented reality owing to difficulty of acquiring materials faithfully and estimating illumination. We propose a novel augmented reality system capable of reproducing real objects without acquiring materials and estimating illumination by generating display image based on pre-captured images. To select a real image for display image from pre-captured image set, we introduce a method to quantify the similarity between two camera poses. We conduct a subjective experiment with the mobile device implemented our system on, and show our system can realistically reproduce real objects with complex optical properties that is difficult for naïve augmented reality based on computer graphics.

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、織物等が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化散乱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

¹ 株式会社 KDDI 総合研究所
KDDI Research, Inc.

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

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、本研究は AR で実物体を写実的に表示するため、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する。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。また、類似した位置姿勢から撮影された実画像を選択するため、カメラの視点と視線方向に基づき、位置姿勢を 6 次元量として表現することで、カメラの位置姿勢の類似度を定量化する手法を導入する。そして、提案システムを PC と携帯端末上に実装し、実験により提案手法の有効性を示す。

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 [3] 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となってしまう。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 [4]。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 [5]。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 [6]。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 [7]。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

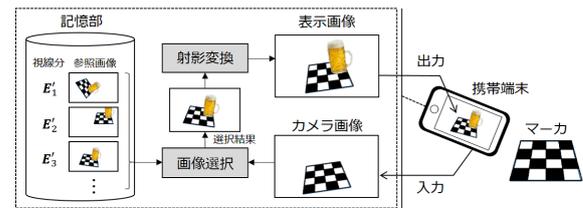


図 1 提案システム概念図

Fig. 1 Conceptual diagram of proposal system.

提案した [8]。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、上述したような空間的に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反射特性を持つ 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

提案システムの概念図を図 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 [9][10] 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 (次節にて説明する視線分 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、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、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射影変換を行い、端末の画面上に表示する。上記の画像選択処理において、異なる二つの位置姿勢の類似度を算出する手法について次節にて述べる。

3.1 カメラ位置姿勢の類似度評価手法

世界座標系とカメラ座標系の座標変換は式 1 のように並進ベクトル t と回転行列 R を用いて表される [11]。

$$[x \ y \ z]^T = R[X \ Y \ Z]^T + t \quad (1)$$

ただし (X, Y, Z) は世界座標系での座標値、 (x, y, z) はカメラ座標系での座標値を表す。一般にカメラの位置姿勢は並進と回転 (t, R) の組み合わせで表現されるが、異なる二つの位置姿勢の類似度を評価したい場合、並進と回転の要素は単位と値域が異なるためそのまま総合して評価することはできない。仮にそれぞれの差分値に何等かの重み付けを行って和を求めたとしても、例えば卓上の小さな置物を表示したり実寸大のクルマを表示したりする場合、並進の値域が変化するため、使用環境ごとに重みの値を変える必要

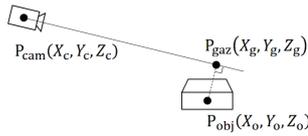


図 2 対象点および注視点の定義

Fig. 2 Definition of object point and gaze point.

が生じてしまう。また、そもそも重みを適切に決める方法が不明なため試行錯誤によって決める必要があり、ユーザに掛かる負担が大きい。そこで、本研究ではカメラ視点と視線方向に基づいてカメラの位置姿勢を6次元量として表現することで、異なる二つのカメラの位置姿勢の類似度を定量化する手法を導入する。

まず、基準となる対象物体の世界座標上での位置を対象点 $P_{obj}(X_o, Y_o, Z_o)$ としてユーザにより設定する。次に図 2 のように、カメラ視点 $P_{cam}(X_c, Y_c, Z_c)$ から伸びる視線に対して対象点 P_{obj} から下ろした垂線の足を注視点 $P_{gaz}(X_g, Y_g, Z_g)$ と定義する。このとき、カメラの並進ベクトル t と回転行列 R が推定されていれば、視点 P_{cam} の座標は式 2 により求められる。

$$[X_c \ Y_c \ Z_c]^T = -R^T t \quad (2)$$

そして、注視点 P_{gaz} の座標は幾何学的に式 3 によって求めることができる。

$$[X_g \ Y_g \ Z_g]^T = [X_c \ Y_c \ Z_c]^T + k [p \ q \ r]^T \quad (3)$$

ただし、

$$[p \ q \ r]^T = R^T [0 \ 0 \ 1]^T, \\ k = [p \ q \ r] [X_c - X_o \ Y_c - Y_o \ Z_c - Z_o]^T$$

このとき、カメラの位置姿勢はカメラの視点 P_{cam} の座標 (X_c, Y_c, Z_c) と注視点 P_{gaz} の座標 (X_g, Y_g, Z_g) の6次元量によって表現することができ、合わせて要素表示したものを視線分 E として式 4 のように定義する。

$$E \equiv (X_c, Y_c, Z_c, X_g, Y_g, Z_g) \quad (4)$$

視線分 E の各要素は世界座標系の座標値なので、6次元ベクトルとして見た時のユークリッド距離によって異なる二つの視線分の類似度を評価することができる。つまり、あるカメラの位置姿勢 (t, R) から求まる視線分 E と、別の位置姿勢 (t', R') から求まる視線分 E' の類似度 $D(E, E')$ は、次の式 5 によって定量化することができる。

$$D(E, E') = \|E - E'\|_2 \quad (5)$$

以下に、式 5 の類似度とカメラの位置姿勢の関係について説明する。視線分 E を固定して考えると、類似度 $D(E, E') \leq K$ (ただし $0 \leq K$) を満たす視線分 E' の視点と注視点が存在する領域は、それぞれ図 3 の半径 K の

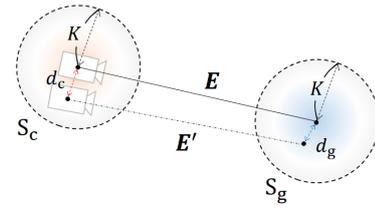


図 3 類似度 $D \leq K$ と視線分間の距離の関係

Fig. 3 Relation between similarity $D \leq K$ and distance of sightline-segments.

球 S_c, S_g の内部となる。半径 K つまり類似度 D を小さくしていくと、視点と視線方向が近づきカメラの撮像範囲の重なりがおよそ大きくなるため、大域的にみると類似度 D が小さいほどカメラの撮像範囲が類似した位置姿勢の組であることがわかる。

3.2 類似画像選択

提案システムは記憶部に複数の参照画像と視線分を紐づけて保存し、所定のフレームレートで各時刻 t ごとにカメラの入力画像から得られる視線分 $E(t)$ を基に類似する参照画像を選択する。つまり、記憶部に保存された視線分を E'_i ($i \in I \mid I$ は保存された参照画像の添字集合) としたとき、視線分 $E(t)$ をクエリとして最もカメラ画像に類似した参照画像のインデックス $i_{min}(t) \in I$ は次の式 6 のように表される。

$$i_{min}(t) = \arg \min_{i \in I} D(E(t), E'_i) \quad (6)$$

3.3 射影変換による表示画像の生成

式 6 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、式 5 の類似度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。そこで、これらの影響を補正するために、選択された参照画像に対して実際のカメラ位置姿勢から見たように射影変換を行う。射影変換行列はカメラ画像と参照画像内にある対応するマーカの特徴点を基に計算する。また、射影変換後の画像の端には射影されなかった領域が生じるため、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。

4. シミュレーションによる類似画像選択処理の性能評価

式 5, 6 を用いて選択された参照画像によって、どの程度真値に近い表示画像が生成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。ただし、真値とは参照画像を撮影した環境 (ユーザに提示したい対象物体が存在する環境) において特定のカメラ位置姿勢で撮影して得られる画像のことを意味する。

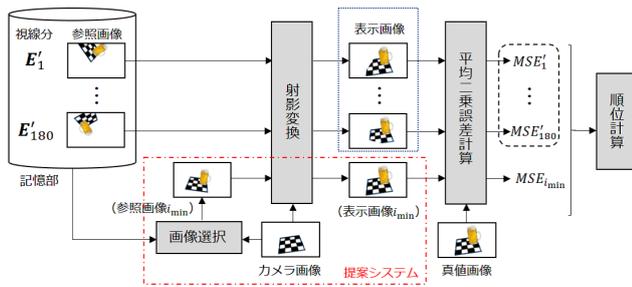


図 4 シミュレーション実験の流れ
Fig. 4 Flow of simulation test.

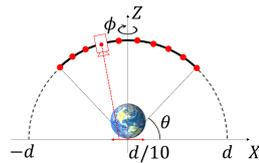


図 5 シミュレーション実験用参照画像群生成時のカメラ設定
Fig. 5 Camera settings for generating reference image set for simulation test.

シミュレーション実験の流れを図 4 に示す。まず、ある特定のカメラ画像入力に基づき、記憶部に保存されたすべての参照画像に 3.3 節で述べた射影変換を行うことで表示画像を生成し、真値画像との平均二乗誤差 MSE'_i ($i \in I$) を算出する。この MSE'_i の値を各表示画像の評価値としたとき、提案手法によって生成された表示画像の評価値 $MSE_{i_{\min}}$ が全表示画像の評価値のうちどの程度小さい値であるかを調べることで、提案したカメラ位置姿勢の類似度 $D(\mathbf{E}, \mathbf{E}')$ の性能評価を行う。

カメラの位置姿勢推定には OpenCV3.2 contrib module の ArUco[10] を用い、記憶部に保存する参照画像群には、地球の模型と ArUco のマークを POV-Ray[12] (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、鉛直軸上に頂点を持つ半径 d の球冠と、原点を通り仰角 θ (45~135 度) と方位角 ϕ (0~180 度) を 10 度間隔で引いた直線との交点に設定し、視線方向は原点を中心とする水平面上の半径 $d/10$ の円の内側にランダムに設定して、180 枚の画像群を生成した。(実験環境では $d = 6.0$ とした。)

上記の球冠上でランダムに生成した 1000 点の視点から、上記と同様に設定した視線方向でマークのみ描画した画像 (図 6(a)) をカメラ画像として用いて、全参照画像に対してカメラ画像の位置姿勢から見たように射影変換を行い、縦横 0.8 倍のサイズで中心領域をクリッピングした画像を表示画像 (図 4 青点線枠内に相当) とした。さらに、カメラ画像と同じカメラ設定で地球模型を含めて描画を行うことで真値画像 (図 6(d)) を生成し、表示画像と真値画像で MSE'_i を算出した。最後に、提案システムによって生成される表示画像 (図 6(b)) の評価値 $MSE_{i_{\min}}$ が、全表示画像の評価値 MSE'_i ($i \in I$) のうち昇順で上位 1%, 2%, 5%,

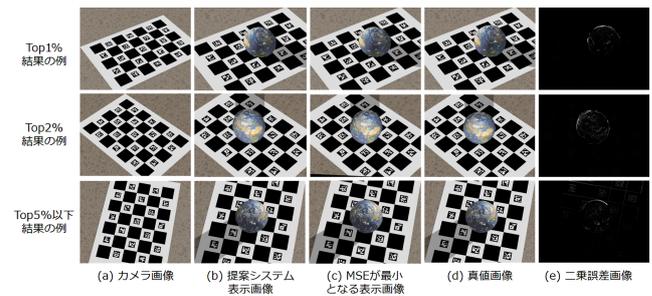


図 6 シミュレーション実験の結果の例
Fig. 6 Example of result of simulation test.



図 7 実験に用いた表示対象 (左から (A) ガラスボトル, (B) ガラス球, (C) ホログラムシート)
Fig. 7 Objects used in the experiment. (In order from left, (A)glass bottle, (B)glass ball, (c)hologram)

10%以内となる割合を調べた。なお、図 6(c) は MSE が最小の表示画像、図 6(e) は提案システム表示画像と真値画像の二乗誤差を [0,255] に正規化して画像化したものである。

上記の試行を 20 回繰り返して割合の平均を取った結果を表 1 に示す。その結果、上位 5%以内の表示画像を生成する割合が 99.17%となり、提案システムの表示画像は、真値画像との MSE において全参照画像から得られる表示画像のうちほぼ上位 5%以上となることわかれる。

表 1 真値との MSE における上位の表示画像の生成確率

	上位 1%	上位 2%	上位 5%	上位 10%
生成確率 [%]	73.19	95.83	99.17	99.74

提案システムの表示画像の MSE が最小になるとは限らない理由としては、図 6(b) と図 6(c) を比べてわかるように、提案手法の表示画像と MSE が最小となる表示画像との視覚的差異は小さく、表示画像間の MSE の差が僅差であるためと考えられる。また、二つの視線分の類似度 $D(\mathbf{E}, \mathbf{E}'_i)$ の大きさと撮像領域の重なり大きさは局所的にみると反比例的な関係ではないため、類似度 $D(\mathbf{E}, \mathbf{E}'_i)$ と MSE の大小関係に逆転が生じることがあり得る。しかしながら、図 6(b)(c) の視覚的差異が小さいことから、100 フレームのうち 1 フレーム程度の割合で MSE が上位 5%以内とならない表示画像が生成されても、提案システムを利用する上で致命的な問題にはならないことがわかる。

5. 透明物体と異方性反射物体の表示実験

従来の CG を用いた AR で表示することが難しい異方性反射特性をもつ物体や複雑に光を透過屈折する物体で

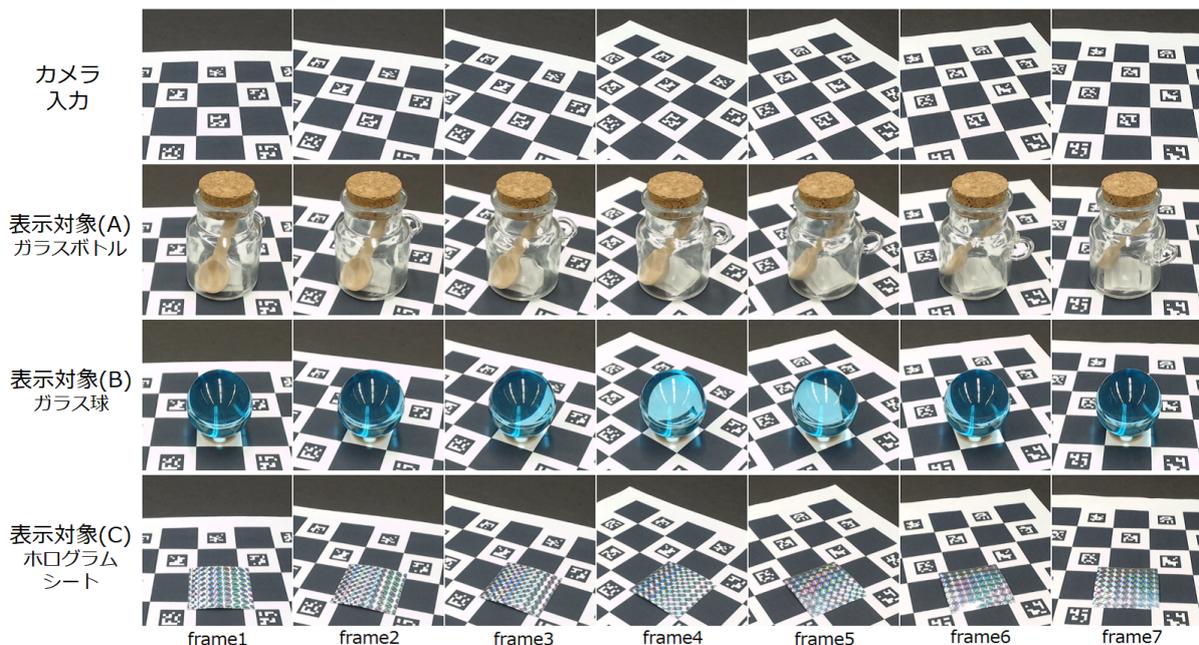


図 8 提案システムによる複雑な光学特性をもつ物体表示のシーケンス
 Fig. 8 Sequence of images displaying objects with complex optical properties by proposal system

も、提案システムによって写実的な表示が可能となることを確認するため、PC上に提案システムを実装しWebカメラを用いて表示実験を行った。表示対象は図7に示す次の三つ、(A) ガラスボトル、(B) ガラス球、(C) ホログラムシート、を用いた。参照画像群の撮影方法は、対象物体をArUcoのマークと共に回転台の上に置き、対象を全方向から撮影するようにカメラの俯角をずらしながら回転台を回転させて手作業で撮影を行った。本実験環境において、参照画像の枚数は(A)(B)(C)それぞれ1854枚、1936枚、2217枚となった。なお、撮影は屋内の蛍光灯環境下で行った。

提案システムを用いて対象物体を表示した様子を図8に示す。それぞれの表示画像を見ると、様々な位置姿勢から見た場合でも対象物体が自然に表示されていることがわかる。(A)の表示画像を見ると、ガラスボトルの内部にある木製のスプーンや背景が透けて見えており、また(B)の表示画像ではガラス球によって屈折した背景が見えている。このように提案システムによって従来のARでは再現が難しい光の透過屈折を自然に表示できることが確認できる。また(C)の表示画像を見ると、ホログラムシートの反射光の色が見る角度によって変化している様子を確認できる。このような異方性反射特性はその計測に大きな時間的・費用的コストが必要なため実物を再現した3Dモデルの製作が難しく、従来のCGによるARでは再現が困難であるが、提案システムによって異方性反射を再現した表示が可能であることが確認できる。

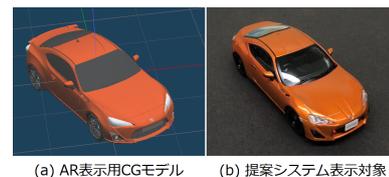


図 9 主観評価実験に用いた3DCGモデル及び表示対象
 Fig. 9 3DCG model and object used in subjective experiment

6. 主観評価実験

CGを用いた従来のARに比べて提案システムが実物体をより写実的に表示できることを示すために、主観評価実験を行った。提案システムをASUS社製Android端末(Zenfone AR: CPU Snapdragon 821, RAM 8GB)に実装し、表示対象は図9(b)に示す車の模型として1976枚の参照画像を5章の実験と同様に事前に撮影した。画像サイズを640x360として、本実験環境で提案システムを動作した際のフレームレートは7-8fpsとなった。ARアプリケーションは著者らが開発した画像認識ソフトウェア開発キット(SATCH SDK[13])とUnityを用いて実装し、表示する3DCGモデルはSQUIR社の提供する同型車の三次元モデルデータ(図9(a))を用いた。

実験は20-50代の男女20名の実験参加者に対して、提案システムの表示と従来のAR表示をそれぞれ随意に体験するよう指示し、それぞれ体験する毎に表示された映像の品質や印象について問うアンケート評価を行った。アンケート項目は以下の5つで、(1)(3)(5)が表示映像の写実性を問

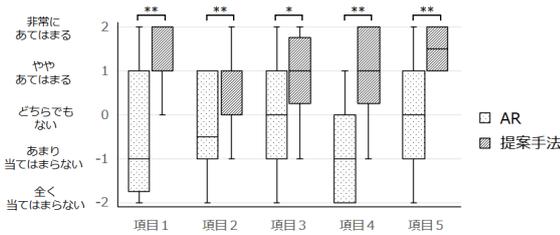


図 10 アンケート結果

Fig. 10 Questionnaire results

う質問，(2)(4) が表示対象の現実感や存在感を問う質問となっており，それぞれの項目に対してリッカート尺度に基づく 5 段階で評価した。

- (1) 表示された車の反射や陰影は自然に見えた。
- (2) 表示された車は実際に目の前に存在しているように見えた。
- (3) 表示された車は精細に見えた。
- (4) 表示された車は現実の物体のように見えた。
- (5) 表示された車の色は自然に見えた。

アンケートの結果を図 10 に示す。それぞれの質問項目ごとに従来の AR と提案システムの間でウィルコクソンの符号順位検定を行ったところ，項目 1,2,4,5 は有意水準 1%において，項目 3 についても有意水準 5%において有意差が確認でき，提案システムによる表示がすべての項目において AR 表示を上回る結果となった。上記の結果より，提案システムによる表示は従来の AR 表示と比較してより写実的な映像表示が可能であり，また現実感や存在感のある物体表示が可能であると言える。

なお，従来の AR は 30fps 程度で CG を描画するため表示が時系列的に滑らかな一方で，提案システムは 7-8fps で不連続な画像群から表示画像を生成するためある程度表示に歪みとカクつきが生じる。実験参加者からその点を不自然に感じるとのコメントは無かったものの，映像品質の観点で動作速度と画像の歪みは改善すべき課題と考えている。

7. 結論

本稿では，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た。類似した位置姿勢から撮影された画像を選択するために，カメラの視点と視線方向に基づき位置姿勢を 6 次元量で表現することで，カメラの位置姿勢の類似度を定量化する手法を導入し，シミュレーション実験によって評価値の妥当性を確認した。また，提案システムを PC と携帯端末上に実装して表示実験を行い，従来の CG による拡張現実では再現が難しい複雑な光学特性をもつ物体の表示が可能となることを示した。さらに主観評価実験を行い，提案システムが従来の CG による AR と比較してより写実的で現

実感や存在感のある物体表示が可能であることを示した。

今後の課題として，フレームレート向上のための処理高速化や，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，射影変換による画像の歪みを避けるために画像間補間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] 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).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] Ward, G., Kurt, M. and Bonneel, N.: Reducing Anisotropic BSDF Measurement to Common Practice., *Material Appearance Modeling*, pp. 5–8 (2014).
- [7] Rohmer, K., Büschel, W., Dachselt, 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).
- [8] 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).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 玉木徹：姿勢推定と回転行列，電子情報通信学会技術研究報告. SIP, 信号処理, Vol. 109, No. 202, pp. 59–64 (2009).
- [12] : POV-Ray, Persistence of Vision Raytracer Pty. Ltd. (online), available from <http://www.povray.org/> (accessed 2018-1-10).
- [13] : SATCH, KDDI CORPORATION (online), available from <http://satch.jp/> (accessed 2018-1-25).