

適応的なハイダイナミックレンジ画像合成による 拡張現実感のための光源環境推定

仁科 勇作, 奥村 文洋, 神原 誠之, 横矢 直和

奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

あらまし: 光学的整合性を実現した拡張現実感 (AR) において, 仮想物体の影や陰影のみならず写り込みを再現するためには, ハイダイナミックレンジ (HDR) で撮影した画像から光源環境推定を行うことが望ましい. 従来から用いられている HDR 画像合成のうち, 動的な露光時間変更方式では, 推定可能なダイナミックレンジと HDR 画像の更新レートはトレードオフの関係にある. 本報告では AR を行う環境に応じて, 推定対象とするダイナミックレンジを動的に変更することで, ダイナミックレンジ不足と更新レート低下の問題を軽減した光源環境推定を行う. そして HDR 画像を環境マップとして仮想物体の HDR レンダリングを行い, ユーザ視点カメラの露光時間に応じたトーンマッピングにより, 実画像と仮想物体のダイナミックレンジを一致させ, 違和感の少ない合成を行うことで光学的整合性問題を解決する.

Lighting environment estimation by adaptive high dynamic range image generation for augmented reality

Yusaku NISHINA, Bunyo OKUMURA, Masayuki KANBARA and Naokazu YOKOYA

Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

Abstract: This report describes a method for photometric registration in augmented reality (AR) using a high dynamic range (HDR) image. In photorealistic AR, it is important to accurately estimate the lighting environment from an HDR image. However, there is a trade-off between the updating rate and the dynamic range of an estimated HDR image. Our method improves the updating rate of an HDR image by limiting the dynamic range according to the exposure time of a camera for augmentation and reflectance properties of overlaid virtual objects. Photometric registration is achieved by rendering virtual objects with the HDR image as an environment map, and adjusting dynamic range of the rendered HDR image by tone mapping depending on the exposure time of a camera for AR.

1 はじめに

拡張現実感 (AR) において合成映像がユーザに違和感を与えないためには, 実環境と仮想環境間の位置合わせに関する幾何学的整合性問題と, 照明条件の一致に関する光学的整合性問題を解決する必要がある. 特に光学的整合性問題の解決は写実的な AR を実現する上で重要であり, 従来盛んに研究が行われている.

AR において光学的整合性を実現するためには, 光源環境の推定が不可欠である. 光学的整合性を実現した AR の従来研究は, ユーザ視点カメラの撮影画像から光源環境を推定する手法と, ユーザ視点カメラ以外の機器を用いて光源環境を推定する手法に大別出来る. 前者の例として, 実環境に設置された鏡球面に生じた写り込みから光源環境を推定する手法 [1] や, 実画像中の影から光源方向を推定し仮想物体に陰影と影を再

現した手法 [2] がある. また後者の例には他に, 魚眼レンズを用いて撮影した全方位画像から光源環境を推定し, 仮想環境に陰影と影を再現する手法 [3] や, 環境中に鏡球面を配置し, ユーザ視点カメラとは別に鏡球面撮影用のカメラを用いて光源環境を推定する手法 [4] などがある.

従来の光学的整合性を実現した AR では光源環境推定の実時間処理を目的としているため, 機器のダイナミックレンジ不足によって生じる光源環境推定用画像の黒つぶれや白とびが, 仮想物体に再現される陰影や影, 写り込みの写実性を損なう問題についてあまり議論されていない. 一方コンピュータビジョン (CV) の分野では従来, 機器のダイナミックレンジ不足を解決するハイダイナミックレンジ (HDR) 画像生成手法 [5, 6, 7, 8, 9, 10] が研究されている. また, 複合現実感

(MR)において実時間性が必須でない分野では、これらのダイナミックレンジ不足を解決する手法によって生成された HDR 画像から光源環境を推定し、仮想物体を HDR レンダリングすることで写実的な陰影や影、写り込みが再現されている [11]. また、我々は HDR 画像からの光源推定と仮想物体の HDR レンダリングを AR に適用するため、環境の明るさに適応的に露光時間と撮影枚数を変更して生成した HDR 画像から、仮想物体の写り込みを再現する手法 [12] を提案した.

本稿では、手法 [12] を拡張し、環境の放射照度分布のみならず、仮想物体の反射係数分布とユーザ視点用カメラの露光時間に応じて推定するダイナミックレンジを限定することで、HDR 画像生成の更新レートを向上させる手法を提案する. そして、生成された HDR 画像からの光源環境推定により仮想物体に陰影や影、写り込みを再現することで光学的整合性を実現する.

以降、2章で本研究の関連研究に関して述べ、3章で提案手法のアルゴリズムを詳述する. 4章では提案手法の有用性を確認するための実験を行い、5章でまとめと今後の課題を述べる.

2 関連研究

CV の分野では、実環境のダイナミックレンジに対してカメラのダイナミックレンジが小さい問題を解決するための HDR 画像生成に関して研究されている. また、コンピュータグラフィックス (CG) の分野では、仮想物体の写実性を高めるための HDR レンダリングや、ダイナミックレンジが小さいディスプレイで HDR 画像を表示するためのトーンマッピングに関する研究が行われている.

HDR 画像生成に関する研究は、通常のカメラのみを用いる手法と、通常のカメラとカメラ以外の機器を組み合わせた手法が存在する. 前者の手法として、異なる露光時間で撮影された複数枚の画像から HDR 画像を生成する手法 [5] が提案されている. これは単純な機器構成で撮影可能なダイナミックレンジを向上させることが可能であるが、複数枚の画像を撮影する必要があるため、推定可能なダイナミックレンジと更新レートがトレードオフの関係にある. また更新レートの向上に着目した手法として、HDR 動画生成の手法である異なる固定露光時間で撮影された 2 枚の画像から HDR 動画を生成する手法 [7] や、予め環境の明るさ変化を推定し、環境の明るさに応じて露光時間と撮影枚数を変更して HDR 動画を生成する手法 [8] が研究されている. また後者の手法として、レンズの前に取り付けた透過型液晶や反射型液晶により、機器のダイナミックレンジ不足を解決し、HDR 動画を生成する手法 [9, 10] が研究されている. これらの手法には複雑な機器構成となる反面、ダイナミックレンジ

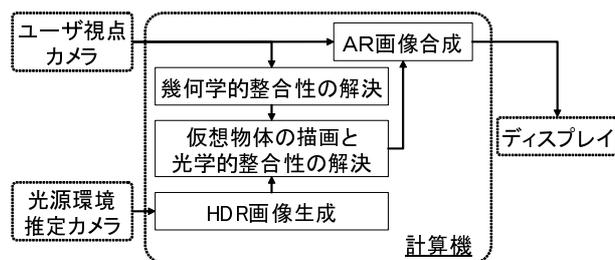


図 1: ビデオシースルー型 AR システム構成図

と更新レートのトレードオフ関係は存在しない.

一方 CG の分野では、HDR 画像を用いた HDR レンダリングの研究 [11] があり、写実的な仮想物体の描画が実現されている. また、HDR 画像や HDR レンダリングされた仮想物体を表示する際、表示機器の特性に合わせてダイナミックレンジの圧縮が必要である. これを実現するトーンマッピングの従来研究では、画像の見え方を人間の視覚特性に一致させるための手法 [13], コントラストが高い画像を生成可能な手法 [14], 対数圧縮による手法 [15] などが提案されている.

本研究では、AR における光源環境推定に HDR 画像生成技術を適用することで、機器のダイナミックレンジ不足の問題を解決する. ここで、AR に HDR 画像生成技術を適用する際、AR では実時間性が要求されることから HDR 動画生成技術を用いる必要がある. しかし、ダイナミックレンジと更新レートのトレードオフや、機器の複雑さなどの問題により、そのまま AR に適用することが困難である. 従来、我々は機器構成の単純さから撮影環境に適応的に撮影した画像群から HDR 動画を生成し、光源環境推定に用いて光学的整合性問題を解決する手法 [12] を提案した. しかし、手法 [12] では推定するダイナミックレンジの限定が不十分である場合が生じるため、更新レートが低いという問題があった. 本稿では手法 [12] を拡張し、ユーザ視点カメラの露光時間と仮想環境中の最大反射係数に応じて推定するダイナミックレンジを限定することで、陰影や影、写り込みの写実性を損なわず、HDR 画像の更新レートを向上することを目的とする.

3 提案手法

本手法で想定する、ユーザ視点画像と光源環境画像を撮影するため 2 台のカメラを使用するビデオシースルー型 AR システム構成を図 1 に示す. 光源環境推定カメラにより、異なる露光時間で撮影した複数枚の画像群から HDR 画像を生成し、これを光源環境推定に用いることで光学的整合性問題を解決する.

図 2 に提案手法の流れを示す. 処理は手法 [12] と同様に AR 画像合成を行う処理 A と HDR 画像生成を行う処理 B に分けられ、それぞれは非同期に実行される. 幾何学的整合性は、カメラ位置・姿勢の推定 (処理 A-1)

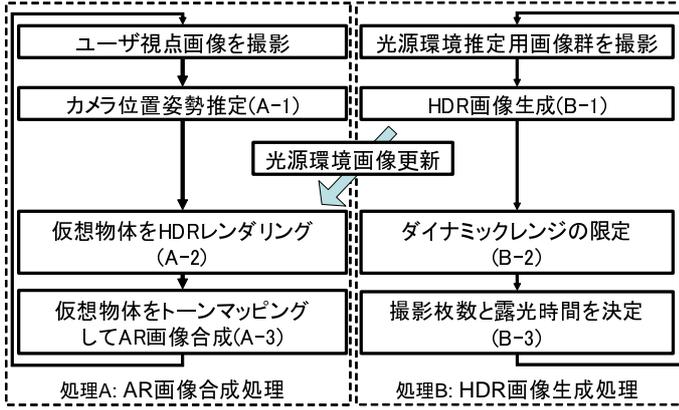


図 2: 提案手法による AR の処理手順

において、画像マーカを用いる手法 [16] を用いて実現する。また、HDR 画像生成 (処理 B-1) は、異なる露光時間で撮影された複数枚の画像群からの HDR 画像生成手法 [4] を用いる。

以下、提案手法の重要な処理である HDR 画像生成処理に関して 3.1 節でダイナミックレンジの限定手法 (処理 B-2)、3.2 節で撮影枚数、露光時間を決定するアルゴリズム (処理 B-3) を詳述する。AR 画像合成処理に関して 3.3 節で仮想物体の HDR レンダリング (処理 A-2)、3.4 節で仮想物体をトーンマッピングして AR 画像合成を行う処理 (処理 A-3) について詳述する。

3.1 ダイナミックレンジの限定手法

本手法は AR を行うシーンに応じて、推定する光源環境の放射照度の範囲を限定することで、光源環境推定の高速化を図る。本節では、推定対象とする放射照度値の最大値 E_{max} と最小値 E_{min} を、環境中の放射照度の最大値と最小値、ユーザ視点カメラの露光時間と仮想物体の最大反射係数に応じて定める。

ユーザ視点カメラが露光時間 ΔT_{ar} で撮影する際、仮想環境中の仮想物体の最大反射係数が S_{max} 、最小反射係数が S_{min} ($0 < S_{min}, S_{max} \leq 1$) であるシーンにおいて、仮想物体に黒つぶれ、白とびなく写り込みを再現するための最小放射照度 E_{armin} 、最大放射照度 E_{armax} は式 1、式 2 で表される。

$$E_{armin} = \frac{\exp(G_{ar}(Z_{min}) - \ln \Delta T_{ar})}{S_{max}} \quad (1)$$

$$E_{armax} = \frac{\exp(G_{ar}(Z_{max}) - \ln \Delta T_{ar})}{S_{min}} \quad (2)$$

ここで、 G_{ar} はユーザ視点カメラの撮影画像の画素値と放射照度値の応答関数を表し、 Z_{min} は黒つぶれと見なす画素値、 Z_{max} は白とびと見なす画素値である。

一方、陰影や影の向きと形状は環境中の最も大きい放射照度値を持つ場所に影響を受けるため、影の再現には撮影環境中の最大放射照度値 E_{envmax} を推定する必要がある。ここで、黒つぶれ、白とびなく HDR

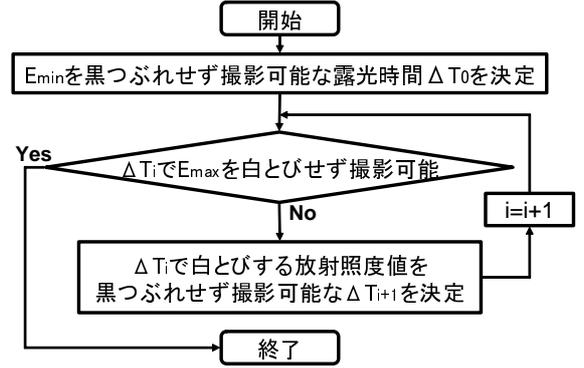


図 3: 撮影枚数と露光時間決定アルゴリズム

画像を生成できていると仮定すると、 E_{envmax} は前フレームで生成した HDR 画像の最大放射照度値である。陰影や影を再現するには、推定すべき最大放射照度値 E_{max} は E_{armax} の値に関わらず E_{envmax} である。一方推定すべき最小放射照度値 E_{min} は、 E_{armin} より小さい放射照度値は写り込みの再現に影響しないため推定の必要はない。ただし、環境中の最小放射照度値 E_{envmin} が E_{armin} より大きい場合、 E_{envmin} より小さい値を推定する必要はない。以上より、写実的な仮想物体を描画するために推定が必要な最大放射照度値 E_{max} 、最小放射照度値 E_{min} は、

$$E_{min} = \max(E_{envmin}, E_{armin}) \quad (3)$$

$$E_{max} = E_{envmax} \quad (4)$$

となり、推定すべき放射照度値 E は

$$E_{min} \leq E \leq E_{max} \quad (5)$$

の範囲に限定できる。

3.2 撮影枚数と露光時間の決定

本節では、3.1 節で求めた推定すべき放射照度の範囲に応じて撮影枚数と露光時間を決定する手法を述べる。撮影枚数と露光時間は、撮影時間が最短となる組み合わせであることが望まれるため、最小放射照度値を推定可能な露光時間から順に、最大放射照度値まで推定可能な露光時間と撮影枚数の組み合わせを求める。撮影環境の明るさに応じた撮影枚数と露光時間の決定アルゴリズムを図 3 に示す。なお、黒つぶれ、白とびに近い画素値ほど、放射照度の推定精度が低下することが経験的に分かっている。そこで、黒つぶれ、白とびが発生していると見なす輝度値 Z_{min} 、 Z_{max} を用いて、露光時間 ΔT_i で撮影した画像は輝度値 $I_{min}^{(i)}$ から $I_{max}^{(i)}$ まで計測可能とする。

$$I_{min}^{(i)} = \exp(G_{env}(Z_{min}) - \ln \Delta T_i) \quad (6)$$

$$I_{max}^{(i)} = \exp(G_{env}(Z_{max}) - \ln \Delta T_i) \quad (7)$$

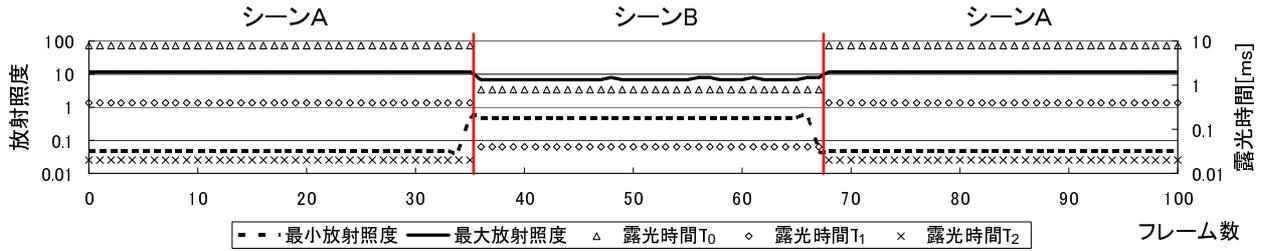


図 4: 重畳表示するシーンの変更に伴うダイナミックレンジの限定結果と撮影時に用いられる露光時間の変化

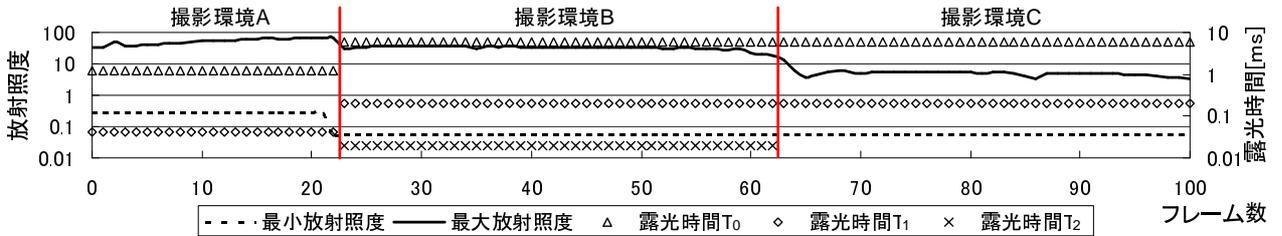


図 5: ユーザ視点カメラの露光時間変化に伴うダイナミックレンジの限定結果と撮影時に用いられる露光時間の変化

アルゴリズムは以下の通りである. まず $i = 0$ として, 輝度値 $I_{min}^{(i)} = E_{min}$ となる ΔT_i を定める. そして, $I_{max}^{(i)} > E_{max}$ となるまで, 新たな画像を式 8 で求まる撮影時間 ΔT_{i+1} で撮影する.

$$\Delta T_{i+1} = \exp(G_{env}(Z_{min}) - \ln(\exp(I_{max}^{(i)}))) \quad (8)$$

これにより, 式 5 を最短時間で撮影可能な撮影枚数と露光時間を定める.

3.3 仮想物体の HDR レンダリング

仮想物体への写り込みは, 3.2 節までの処理で生成された HDR 画像を環境マッピングすることでレンダリングする. HDR レンダリングされた仮想物体を, 表示機器のダイナミックレンジに合わせるため, トーンマッピングによってダイナミックレンジを圧縮する. また, 影は手法 [1] と同様に HDR 画像から輝度値が高い点を抽出し, 光源とみなして再現する.

3.4 仮想物体のトーンマッピング

ユーザ視点画像と仮想物体の間の光学的整合性を実現するため, 仮想物体の反射係数, ユーザ視点カメラの露光時間と特性に応じてトーンマッピングを行い, ユーザ視点カメラが露光時間 ΔT_{ar} で仮想物体を撮影した時の写り込みを再現する. 仮想物体を描画した画像上の位置 k におけるトーンマッピング後の画素値 Z_k は,

$$Z_k = G_{AR}^{-1} \left(\ln \frac{E_k}{S} + \ln \Delta T_{ar} \right) \quad (9)$$

ただし, G_{AR}^{-1} は G_{AR} の逆関数を表す. E_k は, 画像上の位置 k におけるトーンマッピング前の画素値, S は仮想物体の反射係数, ΔT_{ar} はユーザ視点カメラの露光時間を表す. ユーザ視点カメラが反射係数 S の仮想

物体上に写り込む放射照度 E_k を, 露光時間 ΔT_{ar} で撮影した場合の画素値を求めることでユーザ視点画像と仮想物体の間の光学的整合性を実現する.

4 実験

提案手法の有効性を確認するための実験を行った. まず, 3.2, 3.3 節で述べたダイナミックレンジの限定と露光時間の決定によって, 撮影時間が短くなることを確認する. 次に, 多くの画像群から放射照度値を推定する場合に対し, 本手法によるダイナミックレンジの限定が写り込みの再現に与える影響を評価する. 最後に, 提案手法による光学的整合性を実現した AR 画像生成結果を示す.

4.1 ダイナミックレンジの限定による撮影時間短縮の実験

本実験では, ユーザ視点カメラの露光時間, シーン中の仮想物体の最大反射係数と環境の明るさに応じて, 推定するダイナミックレンジを限定することで撮影時間が短縮されることを確認する.

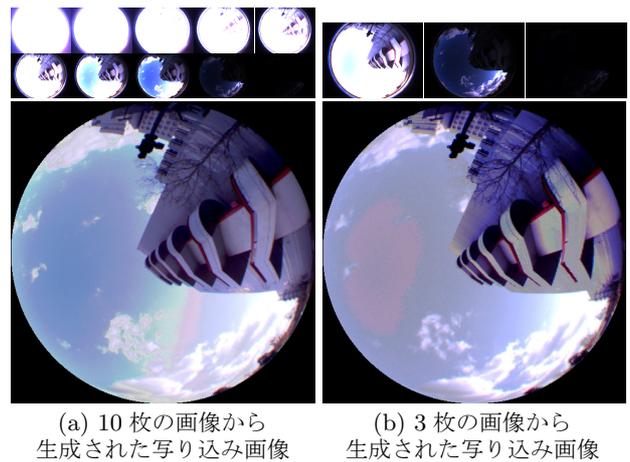
はじめに, 重畳表示するシーンの変更にによって推定すべきダイナミックレンジが変化することを確認する. まず, シーン中の仮想物体の最大反射係数が 1 であるシーン A を重畳表示し, その後, 最大反射係数が 0.1 であるシーン B に変更した後で, 再びシーン A を重畳表示した. なお, ユーザ視点カメラの露光時間は固定した. 図 4 に, シーン変更に伴って変更した, 推定対象となるダイナミックレンジの範囲と光源環境推定画像の撮影時の露光時間の関係を示す. 図 4 においての実線と破線は, 推定対象となる放射照度値の最大値, 最小値を表す. 撮影に用いた露光時間は Δ , \diamond , \times 印によって表した. なお, 本手法では複数枚の画像から

HDR 画像合成を行うため、1 フレームに対して複数の印を表示している。図 4 より、シーン変更に応じて撮影枚数と露光時間が変化していることが確認できる。なお、それぞれのフレームにおいて、カメラのパラメータ変更を含めて撮影に要した時間はシーン A で平均 96ms、シーン B で平均 63ms であり、撮影時間が短縮されたことが確認できる。以上より、ユーザ視点カメラの露光時間と、シーン中の最大反射係数と環境の明るさに応じて推定するダイナミックレンジを限定することで、適応的に撮影時間が変更されることを確認した。一方、事前に設定した露光時間によって HDR 画像を生成する手法では、シーンにも依存するが、例えば露光時間 $\frac{256}{2^n}$ ms ($0 \leq n \leq 9$) で撮影された 10 枚の画像を用いた場合、撮影時間は 670ms であり、提案手法によって撮影時間が短縮される事を確認した。特に、露光時間の変更は時間を要する処理であるため、時間の短縮に効果的であることが分かった。

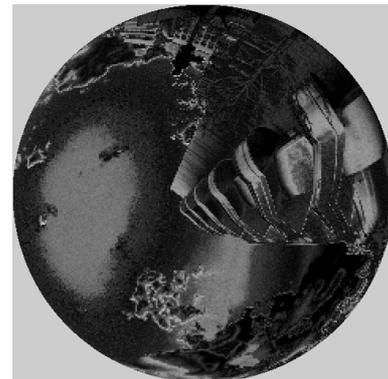
次に、ユーザ視点カメラの露光時間の変更と、環境の明るさによって推定すべきダイナミックレンジが変化することを確認する。なお、シーン中の最大反射係数は 1 に固定した。まず、ユーザ視点カメラの露光時間が 5ms である撮影環境 A で AR を行い、その後ユーザ視点カメラの露光時間を 1ms に変更した撮影環境 B にシーンを変更した。その後、ユーザ視点カメラの露光時間は 1ms のまま、環境の明るさを変化させた撮影環境 C にシーンを変更した。図 5 に、ユーザ視点カメラの露光時間と環境の明るさに応じて変化する、推定対象となるダイナミックレンジの範囲と光源環境推定画像の撮影時の露光時間の関係を示す。図より、ユーザ視点カメラの露光時間変更によって推定すべきダイナミックレンジが変化し、また環境の明るさに応じて、推定された環境の最大放射照度値が変化していることが確認できる。なお、それぞれのフレームにおいて、カメラのパラメータ変更を含めて撮影に要した時間は撮影環境 A で平均 59ms、撮影環境 B で平均 93ms、撮影環境 C で平均 62ms であり、撮影時間が短縮されたことが確認でき、提案手法が有効であることが分かった。

4.2 仮想物体の写り込み画像の精度評価

本実験では、ダイナミックレンジの限定を伴う HDR 画像の生成が、写り込み画像に与える影響を評価する。具体的には、予め露光時間を設定して撮影した 10 枚の画像群から生成した HDR 画像と、提案手法によりダイナミックレンジを限定して撮影した画像群から生成した HDR 画像のそれぞれにより仮想物体の写り込みを再現し、それらを比較してダイナミックレンジの限定の影響を評価する。なお、本実験では写り込みを再現する仮想物体の形状の影響を取り除くため、推定された光源環境画像と、反射係数 1 の仮想物体に写り



(a) 10 枚の画像から生成された写り込み画像 (b) 3 枚の画像から生成された写り込み画像



(c) (a) と (b) の輝度値差分を 5 倍した画像

図 6: 仮想物体の写り込み画像の精度評価画像

込みを再現した場合と同様の処理によって生成した画像を比較した。

図 6 に、入力となる撮影画像、生成された HDR 画像を式 9 によってトーンマッピングした画像と、それらの差分画像を示す。図 6(a) はダイナミックレンジの限定を行わずに撮影された 10 枚の画像群と、それらから生成された HDR 画像をトーンマッピングした画像である。なお、 ΔT_{ar} は 10ms に設定した。(b) は本手法により撮影された 3 枚の画像群と、それらから生成された HDR 画像をトーンマッピングした画像である。

図 6(c) に、図 6(a), (b) の各画素の輝度値の差の絶対値を 5 倍した画像を示す。建物の影や空など、放射照度値が E_{envmin} , E_{envmax} に近い箇所で輝度値の違いが大きくなっており、これは応答関数 G_{env} のキャリブレーションが正確でないことが原因と考えられる。なお、差分画像の平均輝度値は 17 であった。

4.3 写り込みを再現した AR 合成実験

AR における HDR 画像からの光源環境推定の有効性を確認するため、仮想物体に陰影や影、写り込みを再現した画像合成実験を行った。図 7 に、通常の画像からの光源環境推定による AR の結果を示し、図 8 に

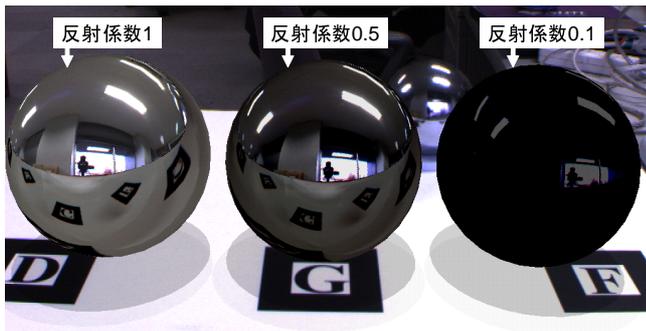


図 7: HDR 画像からの光源推定を行わない手法による仮想物体の重畳表示結果

本手法による AR の結果を示す。仮想物体として、反射係数が 1, 0.5, 0.1 の仮想物体を重畳表示した。図 7 では、反射係数が低い場合に仮想物体の写り込みが正しく再現されておらず、ユーザに違和感を与える。一方、図 8 では仮想物体に写実的な写り込みが再現されており、HDR 画像からの光源環境推定の有効性を確認できる。

5 まとめ

本稿では AR において、動的な露光時間の変更による HDR 画像からの光源環境推定と仮想物体の HDR レンダリングによって光学的整合性を向上させる手法を提案した。さらに、推定するダイナミックレンジを限定することで、光源環境推定画像の撮影時間の短縮を図った。実験により、本手法の有効性を確認した。

今後の展望として、環境の明るさ変化に対し、推定可能な放射照度値の追従性の向上が挙げられる。

謝辞 本研究は、JST 戦略的創造研究推進事業 (CREST) 「デジタルメディア作品の制作を支援する基盤技術」プログラムの支援による。

参考文献

- [1] 神原 誠之, 横矢 直和: “現実環境の照明条件と奥行きの実時間推定による仮想物体の陰影表現が可能な拡張現実感”, 画像の認識・理解シンポジウム講演論文集, Vol. 2, pp. 247–252, 2004.
- [2] I. Sato, Y. Sato, K. Ikeuchi: “Illumination from shadows,” IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 25, No. 3, pp. 290–300, 2003.
- [3] T. Kakuta, T. Oishi, K. Ikeuchi: “Virtual Kawaradera: Fast Shadow Texture for Augmented Reality,” Proc. Int. Society on Virtual Systems and MultiMedia, pp. 141–150. 2004.
- [4] P. Supan, I. Stuppacher, M. Haller: “Image Based Shadowing in Real-Time Augmented Reality,” Int. Journal of Virtual Reality, Vol. 5, No. 3, pp.1–7, 2006.
- [5] P. E. Debevec, J. Malik: “Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs,” Proc. SIGGRAPH, pp. 369–378, 1997.



図 8: 提案手法による仮想物体の重畳表示結果

- [6] T. Mitsunaga, S. Nayar: “Radiometric Self Calibration,” Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol. 1, pp. 374–380, 1999.
- [7] S. B. Kang, M. Uyttendaele, S. Winder, R. Szeliski: “High Dynamic Range Video,” ACM Trans. on Graphics, Vol. 22, No. 3, pp. 319–325, 2003.
- [8] M. Niskanen: “View Dependent Enhancement of the Dynamic Range of Video,” Proc. Int. Conf. on Pattern Recognition, Vol. 1, pp. 984–987, 2006.
- [9] 万波 秀年, 佐川 立昌, 向川 康博, 越後 富夫, 八木康史: “透過型液晶フィルタリング方式によるカメラの広ダイナミックレンジ化”, 画像の認識・理解シンポジウム予稿集, pp. 1208–1215, 2005.
- [10] 万波 秀年, 佐川 立昌, 向川 康博, 越後 富夫, 八木康史: “反射型液晶を用いた適応的ダイナミックレンジカメラの提案”, 画像の認識・理解シンポジウム予稿集, pp. 412–417, 2006.
- [11] P. E. Debevec: “Rendering Synthetic Objects into Real Scenes: Bridging Traditional and Image-Based Graphics with Global Illumination and High Dynamic Range Photography,” Proc. SIGGRAPH, pp. 189–198, 1998.
- [12] 仁科 勇作, 奥村 文洋, 神原 誠之, 横矢 直和: “ハイダイナミックレンジ動画からの光源推定によるビデオシーンスルー型拡張現実感”, 日本バーチャルリアリティ学会第 12 回大会論文集, pp. 522–525, Sep. 2007.
- [13] G. Ward, H. Rushmeier, C. Piatko: “A Visibility Matching Tone Reproduction Operator for High Dynamic Range Scenes,” IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, Vol. 3, No. 4, pp. 291–306, 1997.
- [14] E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley, J. Ferwerda: “Photographic Tone Reproduction for Digital Images,” ACM Trans. on Graphics, Vol. 21, No. 3, pp. 267–276, 2002.
- [15] F. Drago, K. Myszkowski, T. Annen, N. Chiba: “Adaptive Logarithmic Mapping for Displaying High Contrast Scenes,” Proc. Eurographics, pp. 482–486, 2003.
- [16] H. Kato, M. Billinghurst, I. Poupyrev, K. Imamoto, K. Tachibana: “Virtual Object Manipulation on a Table-top AR Environment,” Proc. IEEE/ACM Int. Sympo. on Augmented Reality, pp. 111–119, 2000.