

テクスチャマッピングを用いた擬似大域照明による 失われた建造物の可視化手法

Visualization of Lost Structures with Global Illumination using Texture Mapping

赤嶺 有平[†]

Yuhei Akamine

根路銘もえ子[‡]

Moeko Nerome

1. はじめに

多くの史跡において拡張現実感(以後, AR)を用いた展示が行われている。AR を用いることで様々な理由により消失した建造物等の文化財が、仮に現存していた場合にどのように見えるのかを現実感をもって来場者に体験してもらうことが可能である。本稿では、コンピュータグラフィクス(以後, CG)によって再現される物体があたかもそこに存在するようにみえる度合いを「現実感」と表現する。

AR において現実感を高めるためには、物体を現実空間の適切な位置に重ね合わせる、幾何学的整合性の確保だけでなく、陰影のつき方を周辺風景と一致させる「光学的整合性」の確保が重要とされる[1]。CG においては、陰影を再現するために光源モデルが用いられる。AR やゲームのようにユーザの指示や動きにリアルタイムに対応した映像を生成する必要があるリアルタイムレンダリングにおいては、計算量の問題から直接光源のみを考慮した光源モデルが一般に利用される。直接光源モデルにおいて生成される画像は、いかにも CG らしい視覚表現となり現実感に乏しい画像となる。

一方、映画等の映像作品においては、リアルタイムレンダリングが不要であるため十分に時間をかけて、いわゆる「リアルな」画像表現を行っている。ここでは、光源から直接届く光のエネルギーだけでなく、物体表面の乱反射により他の物体が照らされる 2 次的、3 次的なエネルギーも考慮することで現実感のある映像表現を実現している。このような光源モデルを大域照明モデルと呼び、映像作品等において広く用いられている。

大域照明モデルによる CG を用いることで光学的整合性が大きく向上するため、現実感の高い AR 体験をユーザに提供できることが期待できる。近年は、パソコン等に搭載される高性能な GPU (映像処理装置) を用いて一部、大域照明モデルを用いたリアルタイムレンダリングが可能となっているものの、AR を提供する際に広く利用される携帯端末においては処理能力の問題から実現が困難と考えられる。さらに、AR において光学的整合性を確保するには、現実空間における光源環境の推定を行う必要がある。前述の映像作品においては、CG モデルを配置する位置における光源環境をあらかじめ計測しておき、CG シーンに反映させる作業を行う。屋外で AR を利用する場合、時間帯や天候により光源環境が変化するため、事前に計測したデータのみを利用してレンダリングすることができない。

本研究では、AR において大域照明モデルに近い映像表現を実現することを目的として、計算量の削減および光源推定を含めた光学的整合性の確保を実現する手法の開発を行う。

2. コンピュータグラフィクスの照明モデル

本節では、CG において広く利用されている照明モデルについて述べる。

直接照明モデルは、リアルタイムレンダリングが必要なアプリケーションで広く用いられている手法である。計算コストが比較的低いため様々な携帯端末や比較的古いコンピュータにおいても容易に実行が可能である。基本的には Phong の反射モデル[2]をベースに改良を重ねたものが用いられる。Phong のモデルでは、物体表面の各点の光の強度 I_p は以下の式で算出される。

$$I_p = k_a i_a + \sum_{\text{lights}} (k_d (L \cdot N) i_d + k_s (R \cdot V)^\alpha i_s).$$

L は光源ベクトルへの方向、 N は表面の法線、 R は光線の反射方向、 V は視点方向、他の変数はパラメータである。このようにいくつかの内積および積から成り立っており計算コストが低い。

大域照明モデルでは、パストレーシングをはじめとするモンテカルロ法をベースとした手法を用いて、光源から発射される様々な方向への光線の反射が考慮される。ピクセル当たり 10~数万程度の光線計算が必要である。光線数が少ないとノイズが大きいが、増やすことで品質が向上する。一部のハイエンド GPU を除き、リアルタイム処理は困難である。そのため、事前に計算した陰影情報をテクスチャマッピングとして 2 次元画像に保存する「ベイク」と呼ばれる手法が広く用いられている。

3. 提案手法

本稿では、現実環境における大域照明を考慮した陰影情報をテクスチャマッピングとして保存(ベイク)しておき、描画時は影(シャドウ)のみをリアルタイムレンダリングすることで計算量を大幅に削減する手法を提案する。天候や時間帯による変化に対しては、晴天時の午前、正午、午後、曇天時の四種類の陰影をベイクしておき、実行時の時間帯および天気によって適応するテクスチャを変化させる。現地の天候については、現時点では、クラウドサービスにより取得しているが深層学習モデルを用いて画像から推定することも可能と考えられる。以下、提案手法の詳細を述べる。

3.1 光源情報の取得

前節で述べた通り、大域照明モデルは、物体表面の乱反射による光のエネルギーを考慮する。したがって、大域照明を正しく適用するためには、CG モデルが配置される現実空間において受け取ると考えられる全ての光源(直接光だけでなく近くの物体全て)の推定が必要である。本研究では、光源推定のために、Structure from Motion[3](以後, SfM) を利用する。SfM は複数枚の写真等から対象物の 3 次元構造を推定する技術である。

[†] 琉球大学工学部 University of Ryukyus

[‡] 沖縄国際大学経済学部 Okinawa International University

本研究では、モデルを配置する周辺を 360 度カメラにより撮影し、SfM の入力として用いた。360 度カメラを用いることで、録画状態のまま周辺を適当に移動することで高確率に SfM による再構成に適した画像群が得られる。

得られた画像群をオープンソースソフトウェアとして公開されている OpenMVG および OpenMVS[4][5]からなるパイプラインにより処理する。OpenMVS の出力として、テクスチャマッピング付きのポリゴンメッシュ（物体表面を細かい 3 角形の集合で表現したモデル）が得られる。このモデルに対して、適切な位置に AR により重畳表示したい 3D モデルを配置することで、大域照明に必要な環境光の情報が得られる。ただし、SfM により 3 次元モデルが得られるのは、画像中の明確なエッジ（隣接ピクセル間の輝度差が大きい箇所、光学的特徴の大きな点）がある箇所に限られる。また、カメラからの距離に比例して推定誤差が増大するため、遠方の光学情報（特に空の情報）は得られない。そこで、360 度カメラの画像を環境マップとして利用することで遠方の光源情報を補完する。これらの情報に加えて太陽光源をモデル化した平行光源を設定することで、大域照明を反映させた非常に現実感の高い映像をレンダリングすることが可能である。ただし、先に述べた通り計算負荷の問題からこれを携帯端末上でリアルタイムレンダリングすることは現状では難しい。

3.2 陰影情報の事前計算

得られたポリゴンメッシュを Blender[6]（オープンソース 3D モデリング&レンダリングツール）に読み込み、AR により重畳表示する 3D モデルを OpenMVS から得られた環境モデル上に配置する。Blender は、大域照明モデルを用いて算出した陰影情報をテクスチャマッピングとして画像ファイルに保存する機能（ベイク）を持っており、これを用いて陰影情報を保持したテクスチャ画像を生成する。仮想オブジェクトに対しては、大域照明モデルにより得られるディフューズ（物体表面の乱反射）をベイクする。

大域照明の影響は、重畳表示する仮想オブジェクトだけでなく接地する地面に対しても及ぶため、実行時に現実画像の地面等の箇所に対して陰影を変化させる必要がある。そのため、仮想オブジェクトのモデルに地面に相当するポリゴンメッシュを付加しておき、陰影情報をベイクする。地面に対する大域照明は、主にオブジェクトの影となる部分に影響する。屋外における影は、太陽光が何らかの物体によって遮蔽されることによって起こるが、完全に暗くなるわけではなく、ある程度の明るさを保っている。特に、晴天時は空全体が非常に明るいため、その影響を大きく受けている。そこで、空から受ける光のエネルギーをあらかじめ計算しておき、テクスチャとして保存しておく（一般にライトマップと呼ばれる）。実行時には、影のピクセルをリアルタイムに算出し、影のピクセルにのみライトマップを適用する。これにより、窓から差し込む柔らかい光の影響も表現できる。

これを、午前 9 時、正午、午前 3 時における太陽の位置に合わせて平行光源をそれぞれ設定して実行する。さらに、曇天時を想定し、平行光源の削除し、環境マップのみ光源としてベイクを行う。

3.3 リアルタイムレンダリング

AR による重畳表示を行う際は、前節の手順により準備したテクスチャマップを用いてリアルタイムレンダリングを行う。ベイク済みテクスチャと直接光源モデルおよび影付（シャドウイング）のみレンダリングするため、2 節で述べた通り計算負荷を低く抑えることができる。

直接光源として太陽光を想定した平行光源を設定する。現在時刻と GPS 等の現在位置から太陽光の方向を算出し光源パラメータに反映する。これにより影（シャドウ）が正確にレンダリングされる。ベイク時に想定する時刻とは最大 1 時間半（夕方は除く）の時間差があるため、ベイクされた大域照明効果は厳密には正しくないが、直接照明効果に対し、大域照明の変化には気づきにくいいため、現実感に与える影響は少ないと考えている。直接照明と影はリアルタイムに算出されるため概ね正しく表示される。

クラウドサービスにより天候情報を取得し、曇天時は直接光源を設定せず、曇天を想定したベイク済みテクスチャによりレンダリングを行う。

3.4 カラーマッチング

3.2 節で取得した大域照明の陰影情報は、360 度カメラで撮影した画像の光学情報（特に空の色）に基づいている。屋外においては、時間帯や天候の変化によりコントラストやカラーバランスが変化するため、そのまま適用すると違和感が生じる。そこで、動画編集等で用いられるカラーマッチと呼ばれる手法を用いて、ベイクされたテクスチャの色合いとコントラストを調整する。

本研究では、Lab 色空間における各チャンネルの以下の式で得られる統計量（平均と標準偏差）が、実行時の携帯端末の撮影画像の統計量にマッチするように修正する。

$$\mu_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{i,j}$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (x_{i,j} - \mu_i)^2}$$

ここで、 i はチャンネルのインデックス（R, G, B に対応して 0, 1, 2）、 j はピクセルのインデックス、 N はチャンネル内のピクセル数、 $x_{i,j}$ はチャンネル i の j 番目のピクセル値。

ソースとターゲット両画像から上記統計量を取得し、以下の式によりテクスチャ画像を修正する。

$$y_{i,j} = \left(\frac{x_{i,j} - \mu_{source,i}}{\sigma_{source,i}} \right) \cdot \sigma_{target,i} + \mu_{target,i}$$

ここで、 $y_{i,j}$ は変換後のピクセル値、 $x_{i,j}$ は変換前のピクセル値、 $\mu_{source,i}$ はソース画像のチャンネル i の平均、 $\sigma_{source,i}$ はソース画像のチャンネル i の標準偏差、 $\mu_{target,i}$ はターゲット画像のチャンネル i の平均、 $\sigma_{target,i}$ はターゲット画像のチャンネル i の標準偏差である。

4. 実行結果

提案手法を用いて、重畳表示を行った場合の結果を予測するため、沖縄県中城村に存在する中城城跡の画像を用いて、Blenderによるシミュレーションを行った。図1上から、直接光源のみを用いた一般的なレンダリング結果、BlenderのCyclesレンダラーを用いた大域照明モデルによるレンダリング結果、提案手法によるレンダリング結果である。



図1 中城城の画像を用いた実行例：上から直接照明，大域照明，提案手法によるレンダリング結果

仮想オブジェクトとして古く時代に一般的であったと考えられる茅葺屋根の建物を配置している。直接光源によるレンダリング（図1上段）は、一般的なARアプリケーションで広く利用されている手法である。現在、史跡等で活用されているARアプリケーションの結果に近いと考えられる。地面からの反射光や空全体の光が考慮されないため、壁や屋内の地面が平坦な印象となっている。中段は大域照明モデルによるレンダリング結果である。大域照明の効果を知りやすくするため、同画像の建物部分を拡大し

輝度とコントラストを調整した（図2）。屋内の床面に光の濃淡が表現されている。特に入り口付近に空からの柔らかい光が差し込んでいる様子が確認できる。また、地面からの反射光により壁面の色合いが変わっている。このように、大域照明は、微妙な色合いや輝度の変化を作り出し、それが現実感の向上につながっている。



図2 大域照明を用いた画像の一部を切り抜き輝度とコントラストを調整

図1下段の画像は、提案手法を用いてレンダリングした結果である。見た目の印象は大域照明を用いたものとほとんど相違ないが、レンダリング時には直接照明モデルを用いているため計算コストは最上段とほぼ同じである。屋内床面の陰影は、背景画像から減算することで表現している。

図3は、図1最下段レンダリング時に利用したバイクテクスチャをそのまま用いて、2時間前、2時間後に相当する角度に太陽光源を動かしてレンダリングしたものである。影はリアルタイムレンダリングされるため、適切な位置に移動している。また、SfMにより仮想オブジェクト周辺の3次元形状が取得されているため石階段上に投影された影が正しく表現されている。



図3 提案手法による画像の太陽光を2時間前（左）2時間後（右）の角度に調整した結果

比較のため、大域照明モデルを用いて同条件でレンダリングした結果を図4に示す。



図4 大域照明モデルを用いたレンダリング結果
(図3と同じ条件による)



図5 提案手法を曇天時に適用した結果
(カラーマッチングは適用していない)



図6 上：提案手法を曇天時に適用した結果
(カラーマッチング適用済み)
下：大域照明によるレンダリング結果

図3, 図4を比較すると僅かな色合いの変化は確認できるものの, 提案手法を用いた結果(図3)だけを観察した場合, それほど違和感はないと思われる. ただし, 現状では著者らの主観であり, 今後, 官能検査等による確認が必要である.

次に, 同じバイクテクスチャを用いて曇天時に画像に適用した結果を図5に示す. 図3中段と比較すると, 建物と城壁の色合いが変化していることがわかる. 建物の屋根は石階段とほぼ同じ色として設定しているが, 背景画像のカラーバランスが大きく変化しているため, 色ずれが発生している.

図6上に3.4節で述べたカラーマッチングを適用した結果, 図6下に大域照明モデルによるレンダリング結果を示す. 石階段と建物の色が近くなっている. 一方, 大域照明モデルによる画像と比較すると, 彩度が失われていることが確認できる.

5. おわりに

本稿では, ARにより重畳表示される仮想オブジェクトの現実感を向上させることを目的として, 計算コストをほとんど増加させることなく大域照明による陰影を付加したレンダリング結果をリアルタイムに得る提案手法について述べた. 360度写真とSfMにより現実空間の3次元構造と照明情報を取得し, 複数の時間帯を想定して, 大域照明による陰影情報をテクスチャマッピングとして保存, 実行時に実行時間を反映した直接照明および影付と組み合わせることで実行時の計算コストを抑える手法である. さらに, カラーマッチングを組み合わせることで曇天時の照明変化にもある程度対応可能できていると考えている.

今後は, これらの手順をある程度自動化するツールの作成, カラーマッチングアルゴリズムの改良, 天候を画像からの推定, アンケート等による評価などを実施していく予定である.

謝辞

本研究はJSPS 科研費 JP23K11667の助成を受けたものです.

参考文献

- [1] 神原誠之. "1 基礎 1: 拡張現実感 (Augmented Reality: AR) 概論 (<特集> 拡張現実感 (AR))." 情報処理, Vol. 51, No. 4 (2010)
- [2] Phong, Bui Tuong. "Illumination for computer generated pictures." *Communications of ACM* 18 (1975).
- [3] Westoby, Matthew J., et al. "'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications." *Geomorphology*, 179 (2012)
- [4] Moulon, Pierre, et al. "Openmvg: Open multiple view geometry." *Reproducible Research in Pattern Recognition: First International Workshop, RRPR 2016, Cancún, Mexico, December 4, 2016, Revised Selected Papers 1*. Springer International Publishing, (2017)
- [5] Cernea, Dan, "OpenMVS: Multi-View Stereo Reconstruction Library", [https://cdcseacave.github.io/openMVS\(2020\)](https://cdcseacave.github.io/openMVS(2020))
- [6] Community, B. O., "Blender - a 3D modelling and rendering package," Stichting Blender Foundation, Amsterdam. Retrieved from [http://www.blender.org\(2018\)](http://www.blender.org(2018))