光学透過型ヘッドマウントディスプレイにおける仮想影を利用した透明物体の写実的表現

Representing Virtual Transparent Objects Realistically on OST-HMD Using Virtual Shadow

立命館大学　木村勇斗，真鍋慎之介，池田聖，木村朝子，柴田史久

Yuto Kimura, Shinnosuke Manabe, Sei Ikeda, Asako Kimura, Fumihisa Shibata

Ritsumeikan University

Abstract

In computer graphics, various optical effects can be simulated for representing a transparent object. However, consumer-available OST-HMDs cannot reproduce some of their effects correctly because of its mechanism. There has been little discussion concerning to what extent such transparent objects can be represented realistically. In this paper we improve the realism of transparent objects by representing optical phenomenon of transparent objects as far as possible using existing methods and our proposed method that gives a perceptual illusion of shadow of transparent objects.

1　はじめに

光学透過型ヘッドマウントディスプレイ (Optical See-Through Head Mounted Display; OST-HMD) は拡張/複合現実感（Augmented/Mixed Reality; AR/MR）を実現させる装置であり，ビデオ透過型 HMD と比較して実世界の解像度の劣化，遅延が生じないという利点がある．しかし，OST-HMD に液晶や Liquid Crystal on Silicon (LCOS) などの Spacial Light Mulator (SLM) が搭載されていなければ実世界からの光を遮断もしくは減衰することができず，そのような処理が要求される仮想物体を提示することはできない．

仮想物体の描画のために，複数の光学的性質をシミュレートしなければならない物体として，ガラスや水，ダイヤモンドなどの透明物体が挙げられる．こうした透明物体で生じる主な光学現象は，表面での反射（拡散反射と鏡面反射），透過像を含む影，物体を通して見える背景像の歪みである． AR/MR においても,実時間性を担保するために適度に近似しながら，こうした光学現象をできるだけ多く正確にシミュレートすれば，写実性の高い透明物体を提示できると考えられる．

しかし， SLM を備えていない OST-HMD は機構上，これらの光学現象をすべて再現することが困難である．再現が難しい光学現象の例はまず，透明物体が落とす透過像をむ影である．OST-HMD 上で影を表現するには光が遮蔽された領域の輝度を減衰させる必要があるためである．もう1つの例が，物体を通して見える背景像の歪みである．光線 (Ray tracing) をシミュレートすることによって写実的な像を計算できるが，それを提示する際に，直接見える部分から来る光線を遮断する必要があるためである．こうした描画が幾何光学的に正確にできないため， SLM を持たない OST-HMD において，透明物体を写実性高く提示することについてはあまり議論されてこなかった．

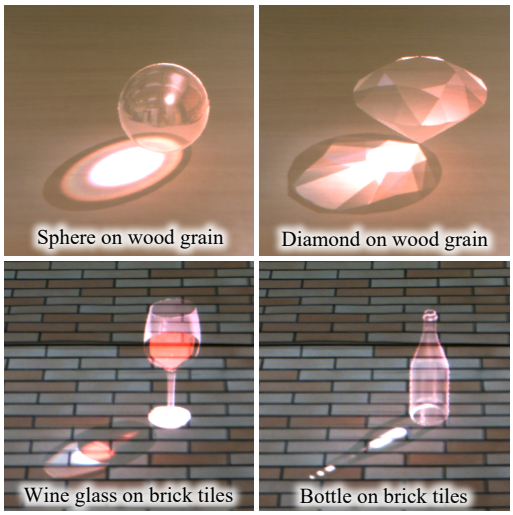


図 1: 提案手法を用いて表現した透明物体

本稿では， SLM を持たない OST-HMD において，錯視を利用して疑似的に透明物体の影を表現し，付加することでより複数の光学現象を再現し，写実性の高い透明物体を表現する手法（図 1）を提案する．影については，錯視を利用し実際の輝度を減衰することなく表現する．具体的には，影の領域をShadow Inducerと呼ばれる輝度の高い仮想物体で囲み実際の輝度より暗く感じさせる手法 [1] を用いる．

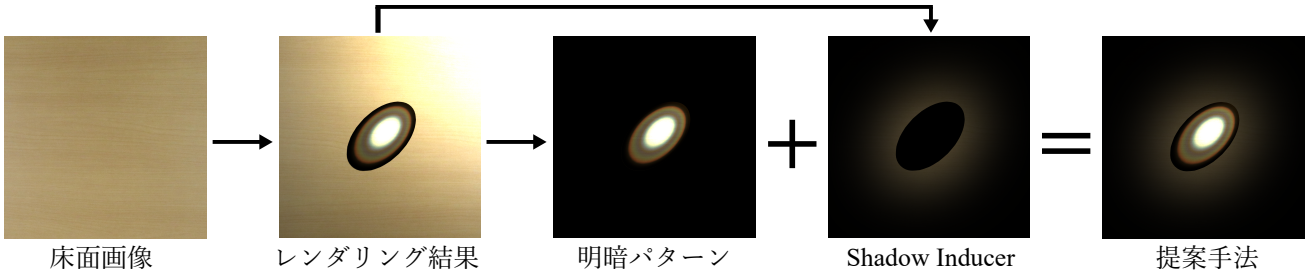


図 2: 影の生成手順

2　透明物体の表現手法

透明物体を表現する上で主要な光学現象として，反射，透過光を含む床面の影，屈折像があげられる．コンピュータグラフィクスにおいて透明物体の反射を再現するために，一般的に用いられる手法は，フレネル効果による反射率を用いた環境マッピングである．提案手法でも，この手法を適用する．具体的には，まず全天球カメラなどを用いて事前に実世界を撮影し，環境マッピングに必要なテクスチャを取得する．その後，仮想物体に対して，フレネルの反射率を用いた環境マッピングをする．これにより透明物体らしい反射を再現する．

透明物体の透過光を含む影は図 2 に示すように，影に含まれる透過光（明暗パターン）に Shadow Inducer を付加することで再現する．明暗パターンは，事前にパストレーシング法を用いてシミュレートする．仮想の透明物体と，それを照らす光源を設定し，透明物体が作り出す影の明暗パターンの画像をレンダリングする．明暗パターンを OST-HMD で影として提示しただけでは，明暗パターンの暗い部分を知覚させることができない．それを解決するために，明暗パターンに Shadow Inducer を付加する．Shadow Inducer の効果によって明度対比が誘発され，明暗パターンの暗い部分が表現できる．

透明物体を通して見える屈折した背景像は，実世界のテクスチャとレイトレーシング法を用いることで理論上表現可能である．しかし，SLM を備えていない OST-HMD では本来の像を遮蔽することができないため，現状では再現した像を重ねて提示するか，何も提示しないかの選択になる．本手法ではユーザ視点が移動する時のリアルタイム性を保証するために屈折像は描かない．

3　実験と考察

3.1　提示刺激

本実験で提示する仮想物体は，ガラス球とダイヤモンドとし，影が落とされる実物体（床面）は，木製の机とチェッカーボードとした． OST-HMD で表示する画像は Unity 上でCG/HLSL を用いて計算した．本実験では，仮想物体の中心を原点として，Unity で設定可能な光の明るさを 15 に設定した点光源を物体から 1.73 m の距離，高さ 1 m の前方右斜め上に配置した．環境マッピングのテクスチャは，Kodak PIXPRO SP360 を用い，仮想物体の中心位置で取得した．

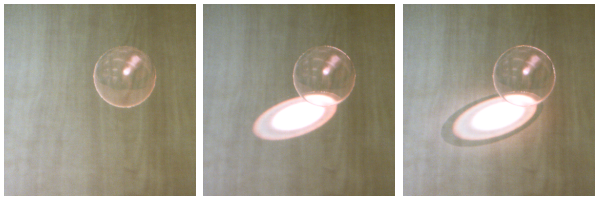
各透明物体の影の明暗パターンは，Blender の Cycles Render により，パストレーシングしてシミュレートした． Blenderでの仮想物体の大きさや位置は Unity で作成した環境と同等に設定した．光源の強さは十分な明暗パターンが発生する 100,000 W/m^2 に設定した．各物体の屈折率は，ガラス球はソーダ石灰ガラスの屈折率 1.51 ，ダイヤモンドの屈折率は 2.42 に設定した[2]．床面のテクスチャは，カメラ Canon EOS Kiss X8i を使用し，床面を真上から撮影し取得した． Shadow Inducer の輝度は Blender のレンダリング結果に透明度を乗算し決定した．透明度は影の輪郭で最小となり，その輪郭から離れるにつれて線形に減少するように設定し，勾配の幅は 100 mm とした．

3.2　実験環境

本実験では，OST-HMD として Microsoft HoloLens (視野角 30° × 17°，1268 × 720 画素)を使用した．投影面の木製の机とチェッカーボードは，それぞれ実世界の光がなるべく鏡面反射しないものを採用した．投影面と影の位置は手動で調整した．仮想物体で表示する透明物体には，比較を行うために，物体ごとに図 3 に示す 3 種類の光学現象（反射のみ，明暗パターン，提案手法）を用意した．また，影と仮想物体がディスプレイから見切れることがないよう参加者は投影面から 1500 mm 離れて立った．

3.3　実験の流れ

参加者には，事前に実物の透明物体の写真を示し，質問文に含まれる影という言葉に誤解がないように



(a) 反射のみ　(b) 明暗パターン　(c) 提案手法

図 3: 提示する光学現象（ガラス球の例）

説明した．その後，実験参加者に HoloLens を装着させてキーボードを持たせ，準備完了後，投影面の上に3つの光学現象のうち無造作に選択した仮想物体を提示した．そして実験参加者に，1 分間キーボードを用いて光学現象を切り替えながら，自由な視点で観測させた．観測後，以下の質問に回答させた．

質問1 どの CG が最も透明物体に見えたか．
質問2 どの影が最も透明物体の影に見えたか．
質問3 どの影が最も影の明暗を認識できたか．

このように観測開始から質問回答までを 1 セットとして，合計 4 セット行った．全ての試行終了後，自由なコメントを聴取した．

3.4　実験結果

各質問の回答の比を図 4（木製の机）および，図 5（チェッカーボード）に示す．解析法として，適合度 χ^2 検定を用い，Bonferroni の補正 ($\alpha = 0.017$) を行った．結果，木製の机では，ダイヤモンドでの質問1以外で反射のみより提案手法が有意に回答率が高かった．チェッカーボードでは，全ての質問において反射のみより提案手法が有意に回答率が高かった．

3.5　考察

実験結果から，提案手法で表現した透明物体は，反射のみ表現した透明物体より写実的に表現できていることが分かった．しかし，明暗パターンと比較すると，複数の質問で提案手法の回答率が高いが，有効性は確認できなかった．これは，回答データが十分でなかった可能性がある．今後，参加者を増やして再度検定を行うつもりである．

また，提案手法の効果は床面と物体に依存することが分かった．具体的には，床面においては木製の机（木目）では提案手法の効果が大きく，チェッカーボード（チェッカーパターン）では効果が小さかった．これは，チェッカーパターンはコントラストが高い単調なパターンなので，多少の位置ずれでも Shadow Inducer が目立ってしまったことが考えられる．対して，透明物体においては，ダイヤモンドは

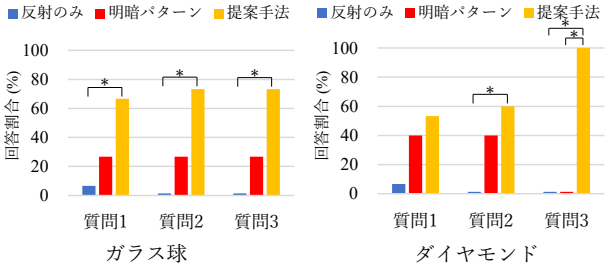


図 4: 木製の机での結果

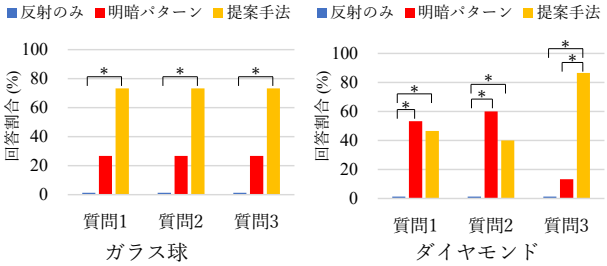


図 5: チェッカーボードでの結果

ガラス球より効果が小さかった．これは，実験参加者の 3 名のコメントにあった「実物体のダイヤモンドが落とす影を想像できなかった」と矛盾しない．これらより，チェッカーボードにダイヤモンドを提示した条件では，提案手法の回答率が低かったと考えられる．

4　まとめ

本論文では，SLMを備えていない OST-HMD 上で，透明物体の影を疑似的に再現し，写実的な透明物体の表現手法を提案した．具体的には，物体表面は環境マップなどの既存の手法を用いて再現し，透明物体の影は，計算した明暗パターンに知覚特性を利用し表現することで，複数の光学現象が再現された写実性の高い透明物体を表現した．実験では，提案手法で表現した透明物体が写実性を高く表現できているかを検証した結果，反射のみ表現した透明物体と比較して，提案手法の有効性を確認できた．

参考文献

[1] S. Manabe *et al.* Casting virtual shadows based on brightness induction for optical see-through displays. In *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pages 627–628, 2018.

[2] Mikhail N. Polyanskiy. Refractive index database. `https://refractiveindex.info`.