



視覚特性に基づく光学透過型 HMD での透明物体表現法

Representing Virtual Transparent Objects on OST-HMDs Corresponding to Human Visual Perception

木村勇斗¹⁾, 木村朝子²⁾, 柴田史久²⁾

Yuto KIMURA, Asako KIMURA, and Fumihisa SHIBATA

1) 立命館大学大学院 情報理工学研究科 (〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

2) 立命館大学 情報理工学部 (〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

概要: 人間が実物の透明物体を観察する際、表面像や屈折像、反射像などの複数の像が混じり合い特有の視覚効果が発生する。しかし単純にコンピュータグラフィクスで透明物体を計算し、AR/MR 用 HMD で提示した場合、計算コストとディスプレイ機構上の問題からこれらの効果が十分に再現されない。本研究では、特に透明物体の表現が難しい光学透過型 HMD を用いて、観察者の視線情報を基にレンダリングを動的に変更することで疑似的に視覚効果を再現し、実物と仮想の透明物体の不整合の緩和を目指す。

キーワード: 透明物体, 光学透過型ヘッドマウントディスプレイ, 複合現実感, 視覚効果

1. はじめに

拡張/複合現実感 (Augmented/Mixed Reality; AR/MR) は、実世界に計算機で生成したデジタル情報を違和感なく融合する技術である。これまでのコンシューマ向け AR/MR は、スマートフォンやタブレットを用いたものが一般的であったが、近年ではヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display; HMD) の普及により、HMD を用いた AR/MR も多く見られ、医療や建築、ゲームなど様々な場面で応用されている。それに伴って、HMD を用いた AR/MR コンテンツには、文字や注釈、単純な物体だけではなく、様々な表現が求められてきている。

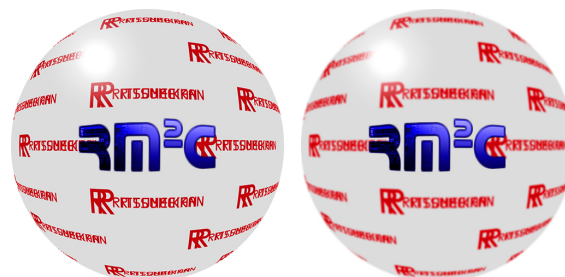
その中でも、ガラスや液体といった透明物体は、HMD を用いた AR/MR では特に表現が難しい。コンピュータグラフィクスにおいて、透明物体を表現する手法は多く存在する。しかしながら、HMD のような立体視可能なディスプレイを用いた場合、これらの手法を単純に適用しただけでは、HMD の機構上、透明物体が持つ視覚効果が十分に再現されない。人間は実物の透明物体を観察する際、物体表面のパターン (汚れや文字、キズなど) を見ることができ、また透明物体を通して歪んだ背景を見ることが出来る。各状態では、両眼の輻輳位置と水晶体の調節位置が異なり、それに伴い、網膜に映し出される透明物体の像が変化する。しかし、既存の手法では、HMD の機構上の問題と、計算コストの問題から、これらの視覚効果が十分に再現されない。

そこで本研究では、観察者の視線情報を用いて、実物の透明物体が持つ視覚効果を疑似的に再現し、実物と仮想の透明物体の視覚的な不整合を緩和する。低コストな屈折計算アルゴリズムでリアルタイムに輻輳による各像の視差を再現し、注視対象に応じてぼかし処理を施すことで水晶体の調節による各像の焦点ボケ再現する。これらの手法を組み

合わせ、視覚効果が疑似的に再現された透明物体を表現する。また、本研究では機構上特に透明物体の表現が難しい光学透過型 HMD (Optical See-through HMD; OST-HMD) を用いて実装を行い、手法の有無で提示像を比較することにより、視覚的不整合性が緩和されることを示す。

2. 透明物体における実物と仮想の視覚的不整合

実物の透明物体は、汚れや文字などの表面像、背景が歪んだ屈折像、周囲の環境が写り込む反射像といった、光学距離の異なる複数の像から成る。そして、人間は透明物体を観察する際、各対象を自由に注視することができ、その際、対象に視点が合うように両眼を輻輳 (以下単に「輻輳」) した後、対象が鮮明に見えるように水晶体を調節 (以下単に「調節」) する [1]。図 1 は、透明物体表面を注視した際に生じる視覚効果のイメージである。表面像を注視しているため、屈折像に視点が合致しないことから視差によるズレ (以下単に「ズレ」) が生じ (図 1 (a))、また、調節位置が合致しないことから被写界深度によるボケ (以下単に「ボケ」) が生じる (図 1 (b))。



(a) 輻輳による像のズレ (b) 調節による像のボケ

図 1: 透明物体表面に注視した際の視覚効果のイメージ

それに従い、コンピュータグラフィクスにおいても、各像のズレとボケを考慮しレンダリングすることで実物のような視覚効果を持った透明物体の表現が可能になる。2次元ディスプレイにおいては、機構上立体視ができないため、調節によるボケのみを再現する手法が提案されている [2]。

対して、HMDのような立体視可能なディスプレイでは、ボケだけでなく、輻輳による像のズレも考慮する必要がある。しかし、透明物体の像のズレを計算するには、各眼用にレイトレーシングなどの光線追跡法で画像をレンダリングする必要があり、これは計算コストが膨大でAR/MRに必要なリアルタイム性を担保できない。他方で、一般的なHMDでは、人間は実際の仮想物体の3次元位置に輻輳を合わせられるが、調節位置は常にディスプレイ上に固定される [3]。そのため、奥行き異なる仮想物体間で自然にボケは発生しない。最近では、ライトフィールド方式 [4] や可変焦点方式 [5] の自然な焦点ボケを提示できるHMDが登場しているが、低画質や膨大な計算コスト、装置の肥大化といった問題が残っており、実用化にはまだ達していない。

3. 表現手法

本研究で提案する仮想の透明物体の表現手法は、観察者の視線情報を用いて、輻輳により発生する各像のズレと、調節による各像のボケを計算することで、実物の透明物体が持つ視覚効果を疑似的に再現するものである。本章ではそれぞれの計算方法について述べる。

3.1 輻輳による像のズレの計算

ズレの計算は、レイトレーシングのようにカメラに投影される光線をシミュレートするのではなく、観察者の3次元視点位置を用いて透明物体の各ポリゴンの色を計算する。

ズレの計算イメージを図2に示す。ポリゴンの法線ベクトルを \mathbf{N} 、視点方向ベクトルを \mathbf{V} 、物体の相対屈折率を n とすると、屈折方向ベクトル \mathbf{T} は以下のように求められる。

$$\mathbf{T} = k_f(\mathbf{N} + \mathbf{V}) - \mathbf{N} \quad (1)$$

ここで、 k_f は屈折の程度を表す係数であり、スネルの法則より以下のように導かれる。

$$k_f = \frac{1}{\sqrt{n^2 \|\mathbf{V}\|^2 - \|\mathbf{N} - \mathbf{V}\|^2}} \quad (2)$$

式(1)(2)から、両眼用のカメラそれぞれで屈折方向ベクトルを求め、実世界の背景テクスチャとの交点 (u_c, v_c) をサ

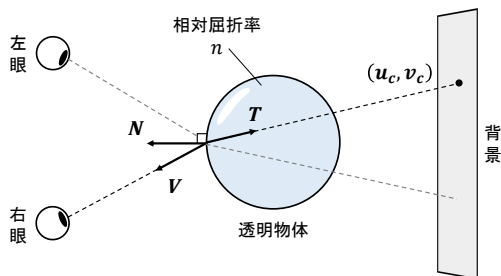


図2: 輻輳によるズレの計算 (透明物体表面を注視時)

ンプリングすることで両眼での像のズレを再現する。

また、本手法は、リアルタイム性を担保するため2次屈折は考慮しない。この理由は、人間は正確な屈折像を理解していないという仮定に基づく。

3.2 調節による各像のボケの計算

ボケの計算は、実際の水晶体による焦点ボケを考慮しながら、観察者の視点から像までの距離に応じてボケ量を決定する。画像のぼかし処理は、2次元ガウス関数で近似した点広がり関数を用いて計算する。

ボケの計算イメージを図3に示す。透明物体表面の色情報 (R, G, B) を C_s 、ボケた屈折像の色情報を C_b とすると、HMDに出力する色情報 C_o は透過度 α を用いた単純なアルファブレンディングで求められる。

$$C_o = \alpha C_s + (1 - \alpha) C_b \quad (3)$$

その際、図3のように観察者が透明物体表面を注視している場合、 C_b は2次元ガウス関数の畳み込み演算で計算される。

$$C_b = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \sum_i^{K_g} \sum_j^{K_g} \exp\left(-\frac{(u_i^2 + v_j^2)}{2\sigma^2}\right) C(u_i, v_j) \quad (4)$$

ここで、 σ^2 はガウス関数の分散であり、カーネルサイズ K_g の半数と定義する。ゆえに、 (u_i, v_j) はサンプリング点 (u_c, v_c) を中心とした K_g 分だけの範囲である。

$$\begin{cases} -\frac{K_g}{2} + u_c \leq u_i \leq \frac{K_g}{2} + u_c \\ -\frac{K_g}{2} + v_c \leq v_j \leq \frac{K_g}{2} + v_c \end{cases} \quad (5)$$

背景像全体のピクセル数を W_p 、背景像全体の現実の長さを W_l 、透明物体の一点に足し合わされる背景テクスチャの円形領域の現実の直径を D_b とすると、カーネルのサイズ K_g は以下の式から得られる。

$$K_g = \frac{W_p}{W_l} D_b \quad (6)$$

瞳孔直径を A_p 、眼の位置から背景までの距離を d_b 、眼から焦点までの距離を d_f とすると、 D_b は以下の式で求まる。

$$D_b = A_p \frac{|d_b - d_f|}{d_f} \quad (7)$$

以上の処理を、両眼用のカメラそれぞれで行うことで調節による像のボケを再現する。

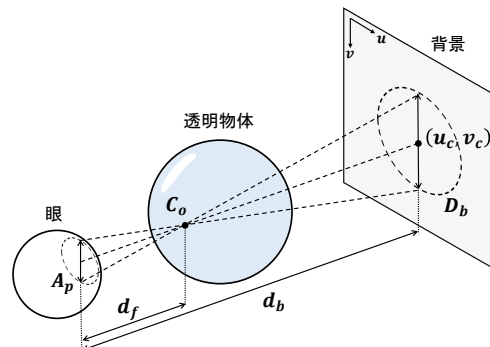


図3: 調節によるボケ量の計算 (透明物体表面を注視時)

4. 実装

4.1 透明物体のレンダリング

映像表示のための OST-HMD は Magic Leap 社の Magic Leap One を利用した。Magic Leap One に搭載されている環境カメラでデバイスの位置と傾きを取得し、その情報を観察者の視点位置とした。レンダリングには Unity を使用し、透明物体のシェーディングには Cg/HLSL を用いた。

実装した仮想環境を図 4 に示す。透明物体は、直径 150 mm、一般的なガラスの相対屈折率 1.51 の稠密なガラス球の作成し、表面を注視するための手がかりとして透過率 80% のテクスチャをマッピングした。背景テクスチャは、物体のローカル座標 (0 m, 0 m, 0.2 m) の位置に配置した。また、効果を知覚し易くするために高周波成分の多いパターンを採用し、Canon 社のカメラ EOS 5D Mark III を用いて事前に撮影し取得した。その際、正面から撮影した画像となるよう射影変換で画像を成形した。透明物体を照らす光源は、物体のローカル座標 (1.0 m, 1.0 m, -1.0 m) の位置に強さ 575 W の点光源を配置した。また、今回は表面像と屈折像を対象とし、反射像の計算にはフォンのモデルを用いた。

4.2 注視対象判定

注視対象の判定には、Magic Leap One に搭載されている視線検出器を利用した。視線検出器は、赤外線カメラと LED を活用したアクティブ方式で、角膜反射と瞳孔位置からユーザの視線情報を検出レート 30 Hz (片眼) で取得できる。事前のキャリブレーションを通して得た観察者の左右の眼の視線情報から、それらの交差位置を求めることで視点位置を決定した。求められる視点位置は、検出器の精度の問題と、瞬きなどの影響などからノイズが多く発生する。これにより、頻繁に意図しない視覚効果の処理が行われて

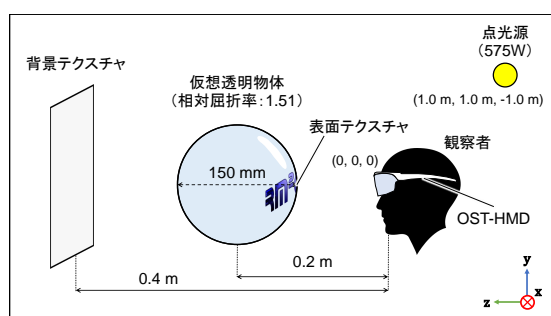


図 4: 仮想環境

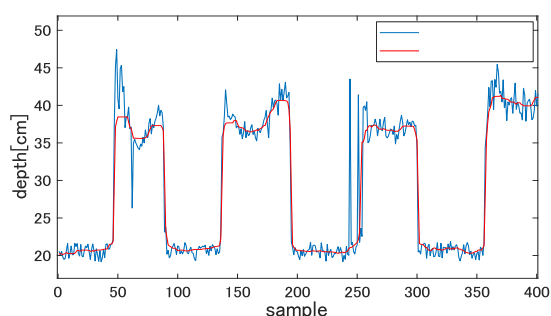


図 5: 視線検出の結果

しまう。そこで、視点位置の奥行きデータをローパスフィルタ（移動平均法）で補正した。現在取得した奥行きデータ $d[n]$ から、過去の 19 点の奥行きデータを用いて移動平均を取り、補正後の奥行きデータ $\hat{d}[n]$ を以下のように計算した。

$$\hat{d}[n] = \frac{1}{20} \sum_{i=0}^{19} d[n-i] \quad (8)$$

図 5 は、仮想の透明物体を観察者から 0.2 m 離して表示し、透明物体の表面像と屈折像を交互に注視させた際の視線検出結果である。生データと比較すると、補正後のデータはノイズを低減できていることが分かる。

観測者の瞳孔直径は、リアルタイムでの計測は困難なため 6.0 mm と仮定した。これは、人間の瞳孔の可動域は直径約 2.0 mm ~ 8.0 mm で [6]、実験環境のような暗い場所では瞳孔直径が長くなるという理由の下設定した。

5. 結果と考察

Magic Leap One の両眼のディスプレイ手前に FLIR Systems 社製カメラ FL3-U3-120S3C-C を設置した撮像装置 (図 6 参照) を作成し、OST-HMD に表示される結果画像を取得した。実物の透明物体と手法の有無それぞれで表現した透明物体の結果を図 7 に示す。なお、仮想の透明物体の画像 (図 7 中段と下段) に関しては、カメラのダイナミックレンジ不足の理由から、露光融合を行い生成した (詳細は付録を参照)。実物の透明物体は、仮想の透明物体と同様の大きさで屈折率を持つガラス球を用意し、表面に仮想物体と同様のパターンのステッカーを貼付した。また、仮想の透明物体の計算で利用した背景パターンを、仮想世界と同じ位置となるように配置し、自然光を十分に排除した部屋で光度 575 W の点光源でガラス球を照らした。

実物の透明物体 (図 7 上段) は、表面像と屈折像の奥行きが異なることから、ステレオカメラ間で像のズレが発生し、レンズの被写界深度により像のボケが発生していることが分かる。仮想の透明物体に着目すると、まず、手法を適用せず環境マップとフレネル効果で表現した透明物体 (図 7 中段) は、両眼のレンダリング結果を比較すると、屈折像の奥行きが表面像と同じ位置になっており、像のズレを再現できていないことが分かる。また、注視対象に関わらずレンダリング方法は常に一定であることから、各像のボケも再現されない。対して、本手法を適用して表現した透明

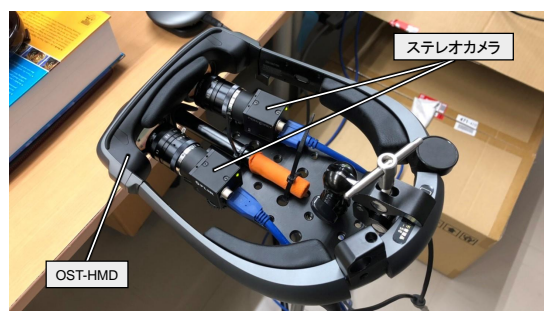


図 6: 撮影に使用したシステム

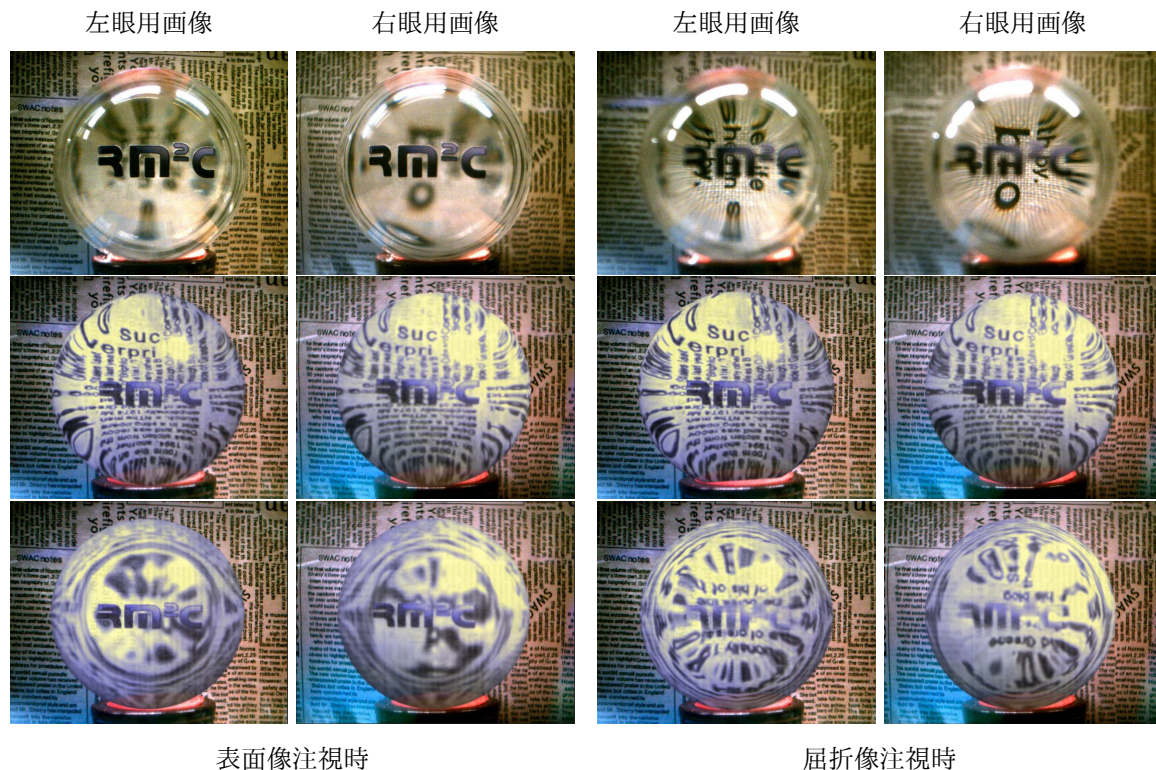


図 7: 各状態での透明物体を画像撮影した結果。上段: 実物。中段: 手法なし。下段: 手法あり。

物体（図 7 下段）は、両眼のレンダリング結果を比較すると、それぞれで屈折像のパターンが異なっており、像のズレを再現できていることが分かる。また、透明物体表面を注視している時、表面の文字が鮮明に表示され、屈折像がボケて表示されていることが分かる。同様に、屈折像を注視した時は逆の効果が与えられている。

また、OST-HMD は機構上、光学遮蔽が行えないため、仮想の透明物体に本来遮蔽されるべき実世界が透過してしまう。これは、実世界の色情報を考慮して AR 映像を合成 [7] することで軽減できると考えられる。

6. 終わりに

本稿では、HMD を用いた AR/MR 環境下で、観察者の視線情報を用いて、実物の透明物体観察時に生じる視覚効果を仮想の透明物体に再現する手法を提案した。実装では、本手法を用いて透明物体を表現し、実際に OST-HMD を用いてレンダリングした。最後に、レンダリング結果の画像撮影を行い、実物の透明物体が持つ視覚効果を疑似的に仮想の透明物体に再現できることを示した。

今後は、実世界の色情報を考慮して AR 映像を表示することで、OST-HMD で生じる実世界の透過を軽減し、より実物に近い透明物体を表現する予定である。また、他の形状の透明物体の表現も行い、実験を通して本手法の透明物体の写実性向上に対する有効性を確認するつもりである。

謝辞

実験機器の一部を提供して頂いた株式会社 NTT ドコモに感謝を述べる。本研究は日本学術振興会科学研究費 挑戦的研究（萌芽）19K22882 の助成を受けたものである。

付録：結果画像の取得方法

カメラのダイナミックレンジ不足の問題から、人間が知覚するような実世界と AR/MR 映像の両方を鮮明に撮像することが難しかった。そのため、図 7 中段と下段の画像は、露出の異なる複数の画像を合成し生成した。HMD とカメラを固定し、透過率の異なる ND フィルタ（100%、50%、25%、12.5%、6.25%）を用いて複数の露出画像を取得し、Mertens らの手法 [8] を用いて 1 枚の画像に変換した。

参考文献

- [1] 奥山文雄, “3 次元映像の視覚特性: 立体映像における調節と輻射,” vol. テレビジョン学会技術報告, 20, no. 60, pp. 41–46, 1996.
- [2] P. Rokita, “Generating depth of-field effects in virtual reality applications,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 16, no. 2, pp. 18–21, 1996.
- [3] G. Kramida, “Resolving the vergence-accommodation conflict in head-mounted displays,” *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, vol. 22, no. 7, pp. 1912–1931, 2016.
- [4] L. Douglas *et al.*, “Near-eye light field displays,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 32, pp. 220:1–220:10, Nov. 2013.
- [5] S. Liu *et al.*, “An optical see-through head mounted display with addressable focal planes,” in *Proc. 2008 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 33–42, 2008.
- [6] T. Yoshitomi *et al.*, “Functional innervation and contractile properties of the human iris sphincter muscle,” *Experimental Eye Research*, vol. 46, no. 6, pp. 979 – 986, 1988.
- [7] L. Tobias *et al.*, “Real-time radiometric compensation for optical see-through head mounted displays,” *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, vol. 22, pp. 1–1, 07 2016.
- [8] T. Mertens *et al.*, “Exposure fusion,” in *Proc. 15th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (PG 2007)*, pp. 382–390, 2007.