

パストレーシングを応用した 透明物体内部映像の屈折歪み補正

木内 舜司^{1,a)} 小泉 直也^{1,b)}

概要：本研究では透明物体内に歪みのない映像を表示するシステムを提案する。このシステムでは光源からの光を再帰透過光学素子を用いて、透明物体内部に結像させる。パストレーシングを用いた再帰透過光学素子の CG によるシミュレーションを応用して、屈折歪みを補償するような光源画像を生成する。本システムで生成された光源画像を用いて、実際の光学系で屈折歪みの補償の効果を確認した。

キーワード：空中像, パストレーシング, 透明物体

1. はじめに

拡張現実感において、映像表示とは単に情報を観察者に伝えるだけでなく、観察者の注意を引いたり、実物体との自然なインタラクションのための重要な役割を担う。実物体への映像投影は、静的な建築物や自然の景観などに動的でインタラクティブな表現を付与できる。また、平面でないディスプレイ形状は、キャラクターとの自然なインタラクションを可能にする [1]。しかし、これらの映像表示手法では、映像表示面が物体の表面上に限られており、内部に映像を埋め込む表現が困難である。

透明物体内に映像を表示する手法として InFloasion[2]がある。この光学系では、再帰透過光学素子 (MMAPs, Micro-Mirror Array-Plates) を用いて、光源の光を透明物体内部に実像として結像している。さらに透明物体の屈折によって生じる映像歪みを補償するため、映像表示対象となる透明物体の鏡像体を光源側に配置している。しかし、この鏡像体もしくは透明物体を映像提示位置で切断したものを、透明物体の配置方法に応じて用意する必要があり、その都度透明物体の加工や製造が必要である。また、この光学系では、映像の实在感のため、光源側の屈折歪みのみを補償の対象としており、視点側の屈折歪みは補償されていない。しかし、観察者に適切な情報を提示するためには視点側の屈折歪みも補償する必要があると考えられる。

本研究では、透明物体内の映像歪みが補償されるような



図 1 提案手法により表示される透明物体内部映像

光源画像を生成し、透明物体内に歪みのない映像を表示する手法を提案する。この光学系では InFloasion のように MMAPs を用いて透明物体内部に実像を結像するが、屈折歪みを補償するための追加の透明物体を必要としない。この光学系により表示される映像は図 1 のようになる。

光源画像の生成では、パストレーシングを用いた CG による MMAPs のシミュレーション [3] を応用する。まず今回の提案手法では、透明物体と MMAPs を含むシーンに対する光線追跡において、事前にレンダリングした歪みのない映像（以下、理想画像とする）から光線追跡を行う。光線が映像の画素値を保持した状態で透明物体と MMAPs を通過し、光源とする位置に到達した際に光線により伝搬された画素値を保存する。これにより、透明物体と MMAPs が存在するときに、視点からは歪みのない映像が見えるような光線経路を再現する光源画像を生成できる。したがって、本手法により生成された光源画像は透明物体内に歪み

¹ 電気通信大学
The University of Electro-Communications
a) kiuchi@media.lab.uec.ac.jp
b) koizumi.naoya@uec.ac.jp

のない映像を表示する。

本稿では、まず光源画像生成の原理を説明する。また、光源画像生成の効率を向上させるために実装した、MMAPsの機能のうち空中像を結像する機能のみを有するBSDF(Bidirectional Scattering Distribution Function, 双方向散乱分布関数)について説明する。最後に生成された光源画像による映像歪み補償の効果を実験により検証する。

2. 関連研究

2.1 実物体内部における映像表示

これまで実物体内部に映像が存在するような光学系が複数提案されている。pCube[4]は箱状の多面ディスプレイを用いたFTVR(Fish Tank Virtual Reality)で、箱の各面に物体が内部に存在するように見える映像を表示している。さらに物理演算を用いてCG物体が実際に実物体に衝突しているような表現が行われている。Sphere[5]では透明球の内部から複数のピコプロジェクトで映像を投影し、高解像度かつ広い観察範囲のFTVRが実現されている。

本研究のように透明物体内に実像を結像する光学系としてi-ball 2[6]とInFloasion[2]がある。i-ball 2は、平面鏡とレンズを用いて中空の透明球内に実像を結像させている。また、透明球下部にハーフミラーを配置し、投影映像視点からの映像撮影を実現している。InFloasionでは光源の光をMMAPsによって透明物体内に実像として結像し、物体内に映像が存在するような表現が実現されている。この光学系では、映像表示時の歪みを補償するために、光源側に映像表示対象となる透明物体の鏡像体もしくは透明物体を映像提示位置で切断したものを配置している。そのため、対象となる透明物体に応じて、鏡像体や加工した複製を用意する必要がある。また、i-ball 2では映像の立体感のため、InFloasionでは映像が実物体内に存在している様子を表現するため、透明物体の屈折による観察者側の映像歪みが補償されていない。しかし、観察者に対する適切な情報提示という面では、観察者の視点方向の屈折歪みも補償される必要があると考えられる。そこで本研究では、視点方向の映像歪みも補償する透明物体内部への映像表示光学系の実現を目的とする。

2.2 空中像光学系

空中像光学系とは、光源の光を特殊な光学素子により中空に実像として結像する光学系である。特殊な光学素子には、MMAPsやradially arranged DCRA (Dihedral Corner Reflector Array) [7], AIRR (Aerial Imaging by Retro-Reflection) [8]があり、映像が中空に浮かび上がったような映像表現を可能にする。本研究では、空中像の輝度が高いかつ光学素子が市販されていることから、MMAPs

の1つであるASKA 3D^{*1}を空中像結像に用いた。

EnchanTable[9]ではこの技術を応用し、反射面で空中像を結像する光を反射させ、平面上に直立空中像を表示している。Koizumiら[10]はEnchanTableにおいてディスプレイが映像表示面よりも下に位置する制約を、鏡をディスプレイの下に配置することで解決し、さらに偏光板と波長板の組み合わせによって空中像表示時に生じる不要光を制御している。Scoopit[11]では水面上で空中像を反射させることで、映像を水と一緒に手で扱うインタラクションを実現している。これらの反射面を利用して直立空中像を結像する光学系は、空中像の背景が装置ではなく反射面となるため、映像表示の意外性と景観との親和が期待される。

2.3 空中像シミュレーション

これまで空中像光学系のシミュレーションとして複数の手法が用いられてきた。Otaoら[12]はMMAPsを用いた光学シースルー型HMD(Head Mounted Display)の開発において、光線経路を描画することでレンズ位置と像の結像位置を決定している。Maekawaら[13]は、MMAPsと似た性質を持つDCRA内での光の反射回数に応じた、射出する光の強度表示を行っている。これらのシミュレーションは像の結像位置や光の強度をシミュレーションできるが、空中像光学系で結像する像の見た目は再現できない。Kiuchiら[3]は、パストレーシング[14]を用いて、MMAPsを用いた光学系のレンダリングを行い、CGによる空中像のシミュレーション手法を提案している。本研究ではKiuchi[3]らによるCGによる空中像の見た目をシミュレーションする手法を応用する。

3. 提案手法

本研究では、光源側に補償用の透明物体を必要とせずに、透明物体内に歪みのない映像を表示する光源画像の設計手法を提案する。CG空間における光線追跡において、視点から映像が歪んでいない状態の理想画像の画素値を、透明物体とMMAPsを含む光学系に対して伝搬する。光線が光源とする範囲に到達した際に画素値を保存し、光源画像情報を生成する。これにより、透明物体内に歪みのない映像を結像するような光源画像が生成できる。さらに、光源画像の生成の効率を高めるため、MMAPsの持つ機能のうち光源と面対称な位置に実像を結像するという面対称性のみを有するBSDFを実装しその効果を示す。

3.1 光学系の設計

本研究で扱う光学系を図2(a)に示す。この光学系では図2(b)に示すようなInFloasion[2]の光学系と異なり、歪みのない映像表示のための補償用の物体を必要としない。

*1 <https://aska3d.com/ja/index.html>

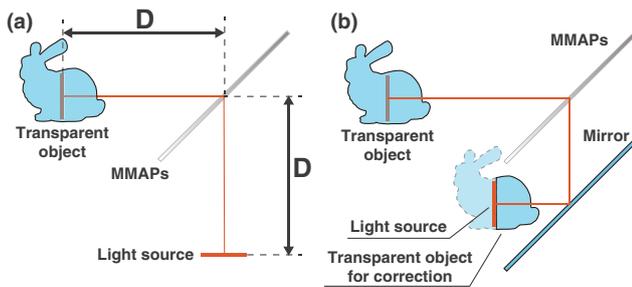


図 2 (a) 提案手法の光学系, (b) InFloasion[2] の光学系

光学系を構成するのは透明物体, MMAPs, 光源の 3 点のみである. 透明物体と光源は MMAPs に対して面対称位置に配置されている. 透明物体の内部に映像を表示するため, 映像の大きさは結像位置における透明物体の断面よりも小さい必要がある. この時, 屈折によって結像する光の光路には変化があるが, 本研究では面対称位置に映像が結像していると仮定している. MMAPs は光源面に対して 45° 傾けて配置している. これは光源と空中像のなす角が 90° となることで映像の観察と撮影を簡便化すること, MMAPs による空中像の輝度が, MMAPs の傾きが 45° 付近の時に最も高いことによる.

3.2 歪みを補償する光源画像の生成

3.2.1 原理

図 3 に透明物体の歪みを補償する光源画像の生成方法の概念図を示す. パストレーシングにおける光線追跡では, 図 3 に示すように CG 空間内のシーンにおいて原点 p_i , 出射方向 v_i を有する光線を定義する. この光線がシーン内の物体に交差した際に, 交点 p_{i+1} と次の出射方向 v_{i+1} を交差した物体の形状と材質から算出し, 光線が光源に届くまでの光線経路を生成する. 通常のパストレーシングでは, 光線が光源に交差した際に光源からの寄与を算出し, CG 映像を生成する.

本研究の目的は, 視点から歪みのない映像が観察できていた際の光線経路を再現するような光源画像の生成である. そのため, 理想画像を視点から観察しているという前提で, 図 2(a) で決めたような透明物体と MMAPs を含む光学系に対する光線追跡を行う. その際に, 理想画像の画素値 c を光線に付与し, 光線が光源とする物体に交差した際に, 光線によって伝搬された理想画像の画素値を保存する. この時に生成される光線経路は, 光源から MMAPs と透明物体を通過し視点に対して歪みのない映像を観察させるような光線経路であるため, 生成された光源画像は透明物体に歪みのない映像を表示する.

光線追跡においては, 透明物体に入射した光線は交点における透明物体の法線と屈折率から, 出射方向が一意的に定まると仮定している. これは, 透明物体において Walter ら [15] が示すような粗い表面に対する光線追跡を行うと,

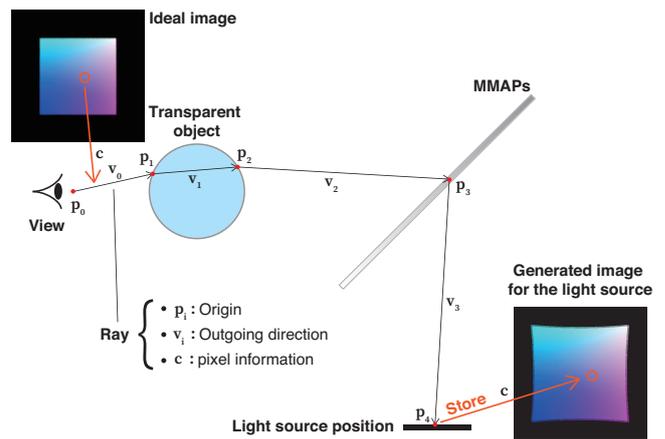


図 3 屈折歪みを補償する光源映像の生成. 理想画像の画素値を透明物体と MMAPs を通過して, 光源とする物体に対して伝搬させ, 光源とする物体においてその画素値を保存する.

生成される光源画像にぼけが生じ, 表示される映像の解像度が低下するためである.

3.2.2 光源画像生成方法

ここで, 光源画像生成方法の一例を示す. まず, 図 2(a) のように, 透明物体, MMAPs, 光源からなる光学系を決定する. この際, 透明物体と MMAPs 間の距離と MMAPs と光源の間の距離は D とする. 次に理想画像のレンダリングを行う. 映像結像位置に直接光源を配置し, それ以外の物体がない状態でパストレーシングを用いて映像をレンダリングする. すなわち, 理想画像とは透明物体位置に歪んでいない映像が見えているときの画像となる. 3.2.1 章で説明したような光源画像の生成では, 透明物体, MMAPs, 光源位置に理想画像の画素値を保存するための物体を図 2(a) のように配置し, 理想画像をレンダリングしたときと同じカメラ位置, 画像サイズで光源画像生成を行う. 以上の仕組みにより図 3 に示すような光源用画像が生成される. 図 3 では透明物体を球体としたときの理想画像と光源画像を表示している.

3.3 MMAPs BSDF によるノイズの低減

光源画像の生成の効率を向上させ, 生成される画像のノイズを低減するため, MMAPs の機能のうち空中像を結像するために必要な機能のみを有する BSDF (以下, MMAPs BSDF とする) を実装した. MMAPs は図 4(a) に示すように 2 層のミラーアレイとガラスによって構成される. 本研究で扱う ASKA3D ではガラスの両面にミラーを蒸着したミラーアレイを利用しているが, 図 4(a) では簡便化のために, MMAPs はミラーアレイとそれを丁度覆うようなガラスによって構成されているとしている. MMAPs は入射した光を各層の鏡で 1 回ずつ反射し, 光源からの光を自身に対して面対称な位置に空中像として結像する. しかし, 光の入射する角度によっては一方の層でしか反射されず, 観察者にとって邪魔な像を生成する迷光を生じたり, 1 度も

反射されず透過する。また、ガラスによる反射も生じるため、光源の光が空中像として結像するときには輝度が半分以下に減衰してしまう。そのため、MMAPsをそのまま光源画像の生成に利用すると、光路追跡において半分以上の確率で迷光や透過光、反射光を生成する光線経路を追跡してしまい、画像生成の効率が悪い。

画像生成の効率を向上させるため、図 4(b) に示すような、入射した光を面対称な方向に出射する機能のみを有する MMAPs BSDF を実装した。以下では MMAPs BSDF の原理とその効果について説明する。

MMAPs は図 4(b) に示すように方向 i で入射した光を、MMAPs に対して面対称な方向 o に出射することで空中像を結像する。したがって、MMAPs BSDF の実装には入射ベクトル i と表面の法線 n から出射ベクトル o を求めればよい。ここで、 h を i の原点から表面に対して垂線を下したときのベクトルと定義すると、 o は以下の式で表される。

$$o = -i + 2h \quad (1)$$

ここで h は i と n の内積に n をかけたものとなる。ここで、法線 n が光線が入射してくる側を向いていると仮定すると、 i と n の内積の符号は負となるため、 h は n と逆向きであることがわかる。

$$h = (i \cdot n)n \quad (2)$$

したがって求める o は以下ようになる。

$$o = -i + 2(i \cdot n)n \quad (3)$$

図 5 に MMAPs を用いて生成した光源画像と、MMAPs BSDF を平面物体に適用して生成した光源画像を示す。光源画像生成には、C++によるレンダリングプログラムを作成し CPU 演算で行った。光源生成に用いた光学系は、 $D = 15 \text{ cm}$ で、透明物体として半径 2.5 cm の球を用いた。画像より、MMAPs BSDF によって生成された光源画像は明らかに MMAPs によって生成された光源画像よりもノイズが少ないことが分かる。また、計算時間は各ピクセルにおけるサンプリング数を 100、理想画像の解像度を 512×512 ピクセルとし、CPU に AMD Ryzen Threadripper 3970x (32 core) を用い、OpenMP*2による並列化を適用して行ったところ、MMAPs を用いた場合で 2552.8 s、MMAPs BSDF を用いた場合で 5.1 s となった。これは、MMAPs が各層に 1380 枚の鏡を有するミラーアレイを 2 層持つ構造であるため、シーンの物体数が大量なものに対し、MMAPs BSDF は板ポリゴン 1 枚で空中像を結像する効果を再現できることによると考えられる。

*2 <https://www.openmp.org/>

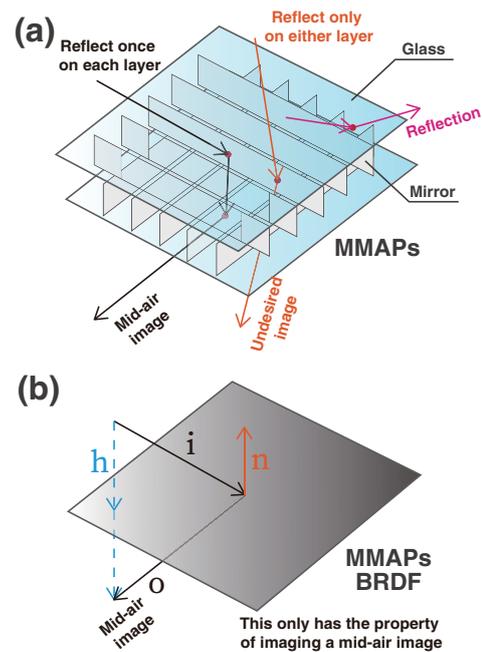


図 4 (a) MMAPs の機能と性質の概要. (b) MMAPs の機能のうち空中像を結像する性質のみを有する MMAPs BSDF の概要

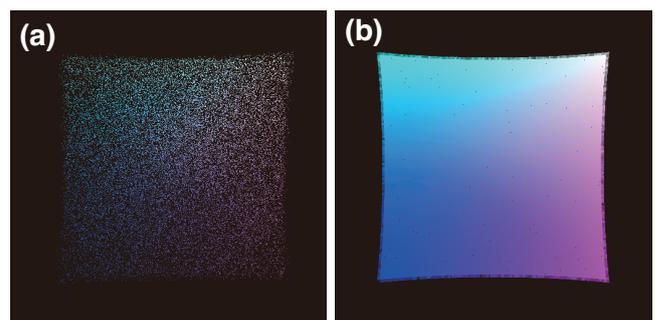


図 5 (a) MMAPs を用いて生成した光源画像, (b) MMAPs BSDF を用いて生成した光源画像.

4. 実験

提案手法の効果を検証するため、生成された光源画像を実空間の光学系における光源に用いて、映像歪みの補償の効果を検証した。以下の 4 条件で映像を撮影し、所望の映像と各条件で表示された映像との位置のズレを計測した。

- **所望の映像**：映像表示位置に直接空中像を表示し、透明物体を配置しない場合
- **補償なしの映像**：光源の映像を所望の映像に設定し、透明物体内に映像を表示した場合
- **補償ありの映像 (InFloasion[2])**：InFloasion の光学系を用いて透明物体内に映像を表示した場合
- **補償ありの映像 (提案手法)**：光源の映像を 3.2 章で示したシステムによって生成された映像に設定し、透明物体内に映像を表示した場合

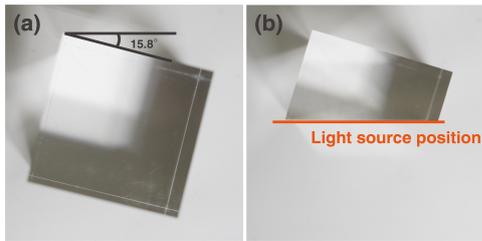


図 6 (a) 観察者側の透明物体. (b) InFloasion[2] の光学系で用いる補償用の透明物体

4.1 実験装置

実験における光学系は図 2 に示すような光学系とした。この時、 $D = 15 \text{ cm}$ とし、光源と MMAPs のなす角は 45° とした。透明物体には図 6 に示すように、一片 50 mm のアクリルキューブを用いた。この時、鉛直方向に対して 15.8° 回転させて映像表示位置に配置した。InFloasion の光学系では、図 6(b) のように 15.8° 回転させた立方体を中心に切断したものを光源側に配置した。提案手法における光源画像の生成では、アクリルの製造業者による屈折率 1.49 を立方体に適用し計算を行った。また、映像の撮影ではカメラとして Sony $\alpha \text{ III}$ 、レンズに SEL70300G を用いて像の正面から撮影した。この時カメラは透明物体から 1 m 程の位置に置き、レンズの焦点距離を 300 mm 、カメラの ISO を 2000 とした。

4.2 実験方法

所望の映像と透明物体内に表示された映像を撮影し、映像の結像位置を計測した。表示する映像には所望の映像、補償なしの映像、補償ありの映像 (InFloasion) では図 7(a) に示す画像を用い、補償ありの映像 (提案手法) では図 7(b) で示す画像を用いた。この時、補償ありの映像 (提案手法) 用の光源生成では、伝搬されてくる画素値を確実に保存できるように、光源を表示対象の格子点の一辺 30 mm よりも大きい、一辺 50 mm の正方形とした。そのため、図 7(c~e) では、光源における画像提示部分が 30 mm 四方であるのに対し、図 7(f) では 50 mm 四方となっている。

各条件で表示された映像はそれぞれ図 7(c~f) のようになる。ここで、透明物体内に表示された映像が傾いているが、実験は水平な光学定盤上で行っており、光源、MMAPs、透明物体は傾いていないため、MMAPs の厚みやたわみによって生じた傾きだと考えられる。

4 条件で撮影された画像において表示された映像の位置を比較した。比較では図 7 で示すような格子画像の線の交点位置 (格子点) を用いた。画像において右向きを正の向きとする水平方向を x 方向、下向きを正とする鉛直方向を y 方向として、各格子点 49 点の位置を記録した。この時、撮影された画像は縦 4000 px 、横 6000 px のデジタル画像で、図 7(c) に示すように所望の映像における格子点の x 方向の幅は 1165 px であった。記録後、所望の映像

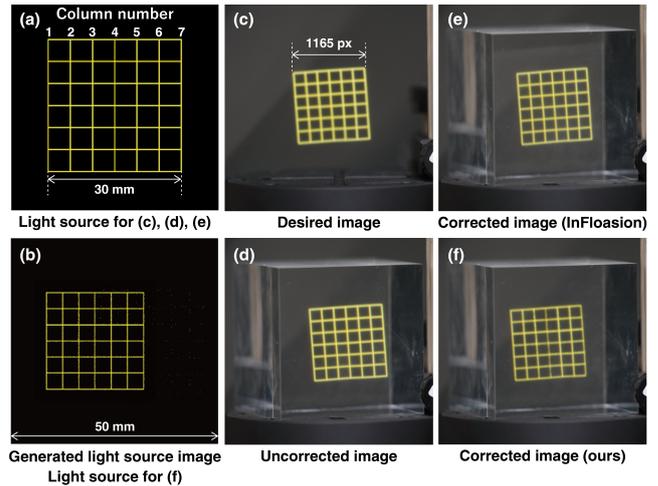


図 7 実験に使用した光源画像と撮影された映像

(図 7(c)) と、補償なしの映像 (図 7(d))、補償ありの映像 (InFloasion, 図 7(e))、補償ありの映像 (提案手法, 図 7(f)) の各画像の対応する格子点の座標の差分を求め、本システムの有無による映像表示位置の変化について調査した。

4.3 結果

図 8 に結果を示す。縦軸は所望の映像と比較対象の映像における、各格子点の x 方向の差分を表している。所望の映像との差分は補償なしの場合の平均で 276.1 px 、補償ありの場合 (InFloasion) の平均で 155.4 px 、補償ありの場合 (提案手法) の平均で 62.8 px となった。これより本システムによって視点方向も考慮した透明物体内の映像歪みの補償が確認できた。しかし、所望の映像の格子点の x 軸幅が 1165 px であることを考えると、1 格子の幅は 194 px 程度であると考えられるので、提案手法では 1 格子の $1/3$ 程度分、所望の映像よりもずれていることがわかる。これは、光源画像の生成を CG 空間内で MMAPs のたわみや歪み、厚みによる光路長の変化を無視した理想状態で行っていることや、実空間の光学系における位置や角度のわずかなズレによって生じたと考えられる。

5. 限界と展望

本稿では、球体や立方体など比較的単純な形状の透明物体を対象として、屈折歪みを補償する光源画像を生成した。しかし、視点方向と物体表面が平行に近いような面をもつ物体に対しては、透明物体に入射した光が MMAPs や光源とする物体に届かない場合があり、その結果、透明物体内に表示される映像が欠けてしまう可能性が考えられる。そのため、光源とする物体の適切な大きさや形状を検討する必要がある。また、映像が欠けずに表示されるような物体形状や条件の検討を行う予定である。

また、現状では正面からの光線追跡しか行っていないため、視点角度が正面から変化すると映像歪みが発生したり、

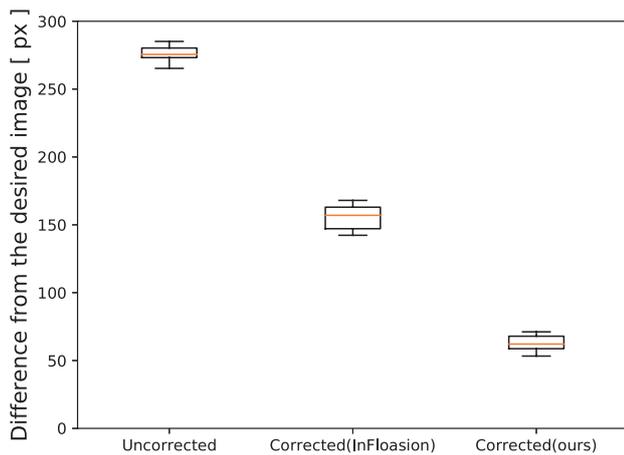


図 8 映像表示位置の変化

所望の映像表示位置に映像が表示されない可能性がある。この課題に対しては、本稿では理想画像の画素値のみを光源位置で保存したが、入射してくる光の方向も保存し、画素値だけでなく光の方向情報も加味した映像表示を行うことで、多視点に対応可能であると考えられる。

6. 結論

本研究では、透明物体内に歪みのない映像を表示するシステムを目的として、パストレーシングを用いた MMAPs シミュレーションを応用し、屈折歪みを補償するような光源画像の生成手法を提案した。光線追跡において視点から理想画像の画素値を光学系を通して光源物体まで伝搬し、光源物体で伝搬された画素値を保存することで、歪みのない映像を結像させるための光源画像を生成した。さらに、光源画像生成の効率を高めるため、MMAPs の機能のうち空中像を結像する機能のみを有する BSDF を実装し、その効果を確認した。提案手法による屈折歪みの補償の効果を実際の光学系を用いて検証し、補償の効果が確かめられた。

謝辞 本研究はキャノン財団の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Brockmeyer, E., Poupyrev, I. and Hudson, S.: PAMILON: Designing Curved Display Surfaces with Printed Optics, *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 457—462 (online), DOI: 10.1145/2501988.2502027 (2013).
- [2] 横瀬哲也, 大川達也, 苗村 健: InFloasion:透明物体内に映像を結像させる光学系, *信学技報*, Vol. 118, No. 95, pp. 89 – 94 (2018).
- [3] Kiuchi, S. and Koizumi, N.: Micro-mirror array-plates simulation using ray tracing for mid-air imaging, *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, pp. 769–770 (2020).
- [4] Stavness, I., Lam, B. and Fels, S.: PCubee: A Perspective-Corrected Handheld Cubic Display, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '10, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1381—1390 (online), DOI: 10.1145/1753326.1753535 (2010).
- [5] Teubl, F., Kurashima, C. S., Cabral, M. C., Lopes, R. D., Anacleto, J. C., Zuffo, M. K. and Fels, S.: Spheree: An interactive perspective-corrected spherical 3D display, *2014 3DTV-Conference: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video (3DTV-CON)*, pp. 1–4 (online), DOI: 10.1109/3DTV.2014.6874768 (2014).
- [6] Ushida, K., Harashima, H. and Ishikawa, J.: i-ball 2: An interaction platform with a crystal-ball-like display for multiple users, *In International Conference on Artificial Reality and Telexistence* (2003).
- [7] Yoshimizu, Y. and Iwase, E.: Radially arranged dihedral corner reflector array for wide viewing angle of floating image without virtual image, *Opt. Express*, Vol. 27, No. 2, pp. 918–927 (online), DOI: 10.1364/OE.27.000918 (2019).
- [8] Yamamoto, H., Yasui, M., Alvisalim, M. S., Takahashi, M., Tomiyama, Y., Suyama, S. and Ishikawa, M.: Floating display screen formed by AIRR (Aerial imaging by retro-reflection) for interaction in 3D space, *2014 International Conference on 3D Imaging (IC3D)*, pp. 1–5 (online), DOI: 10.1109/IC3D.2014.7032590 (2014).
- [9] Yamamoto, H., Kajita, H., Koizumi, N. and Naemura, T.: EnchanTable: Displaying a Vertically Standing Mid-Air Image on a Table Surface Using Reflection, *Proceedings of the 2015 International Conference on Interactive Tabletops Surfaces*, ITS '15, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 397—400 (online), DOI: 10.1145/2817721.2823476 (2015).
- [10] Koizumi, N. and Sano, A.: Optical system to display mid-air images on a glossy plane and remove ground images, *Opt. Express*, Vol. 28, No. 18, pp. 26750–26763 (online), DOI: 10.1364/OE.400104 (2020).
- [11] Matsuura, Y. and Koizumi, N.: Scoopirit: A Method of Scooping Mid-Air Images on Water Surface, *Proceedings of the 2018 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, ISS '18, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 227—235 (online), DOI: 10.1145/3279778.3279796 (2018).
- [12] Otao, K., Itoh, Y., Takazawa, K., Osone, H. and Ochiai, Y.: Air Mounted Eyepiece: Optical See-Through HMD Design with Aerial Optical Functions, *Proceedings of the 9th Augmented Human International Conference*, AH '18, New York, NY, USA, ACM, pp. 1:1–1:7 (online), DOI: 10.1145/3174910.3174911 (2018).
- [13] Maekawa, S., Nitta, K. and Matoba, O.: Transmissive optical imaging device with micromirror array, *Three-Dimensional TV, Video, and Display V* (Javidi, B., Okano, F. and Son, J.-Y., eds.), Vol. 6392, International Society for Optics and Photonics, SPIE, pp. 130 – 137 (online), DOI: 10.1117/12.690574 (2006).
- [14] Kajiya, J. T.: The Rendering Equation, *SIGGRAPH Comput. Graph.*, Vol. 20, No. 4, pp. 143–150 (online), DOI: 10.1145/15886.15902 (1986).
- [15] Walter, B., Marschner, S. R., Li, H. and Torrance, K. E.: Microfacet Models for Refraction through Rough Surfaces, *Proceedings of the 18th Eurographics Conference on Rendering Techniques*, EGSR'07, Goslar, DEU, Eurographics Association, pp. 195—206 (2007).