

研究論文

空中への立体視三次元CG映像の表示と 正しいオクルージョンを考慮した直接インタラクション

高崎 真由美^{1,a)} 水野 慎士^{1,b)}

受付日 2021年1月15日, 採録日 2021年5月28日

概要: 本研究では, 空中に立体視三次元 CG 映像を投影しながら, その映像に対して手による直接的なインタラクションを実現するシステムの提案と開発を行う. 空中ディスプレイで表示した CG 映像とインタラクションを実現するシステムは従来より提案されているが, その多くで表示される映像は平面的であった. 本研究ではマイクロミラーアレイプレート (MMAP) による空中映像に運動視差を組み合わせることで, 空中立体視三次元 CG を実現する. そして, ユーザの指先位置に応じて三次元 CG 物体の移動, 変形, 生成を行うことで, 空中立体映像とのインタラクションを実現する. さらに, プロジェクションマッピングを組み合わせることで, 操作中の手と空中立体映像との正しいオクルージョンも実現する. システムを実装した実験では, 空中に立体的に表示された三次元 CG 物体を指で直接触れながら様々な操作が行えることを確認した.

キーワード: 空中映像, 立体視 CG, インタラクション, オクルージョン, マイクロミラーアレイプレート (MMAP)

Displaying a Stereoscopic 3DCG Image in Mid-air and Dynamic Interaction with Appropriate Occlusion

MAYUMI TAKAZAKI^{1,a)} SHINJI MIZUNO^{1,b)}

Received: January 15, 2021, Accepted: May 28, 2021

Abstract: In this research, we propose and develop a system that realizes direct hand interaction with the stereoscopic 3DCG image in mid-air. Systems that realize interaction with CG images displayed in mid-air have been proposed, but most of them use flat images. In this research, we realize mid-air stereoscopic 3DCG by applying motion parallax to the mid-air images produced by a micro mirror array plate (MMAP). Then, interaction with the mid-air stereoscopic image is realized by moving, transforming, and generating the 3DCG object according to the position of the user's fingers. Furthermore, by combining projection mapping, appropriate occlusion between the hand and the mid-air stereoscopic image is also realized. In our experiment, it was confirmed that various operations with fingers can be performed while directly touching a 3DCG object displayed three-dimensionally in mid-air.

Keywords: mid-air image, stereoscopic CG, interaction, occlusion, micro mirror array plate (MMAP)

1. はじめに

映像生成に関する技術や機器の進歩にともない, 三次元 CG を様々な方法で観察したり対話操作したりすること

ができるようになった. たとえば, VR や AR に対応した HMD を使用することで, 仮想空間に入り込んで三次元 CG を直接操作したり実空間に三次元 CG が実在するように重畳表示することが可能となってきた.

その中でも, 本研究ではマイクロミラーアレイプレート (MMAP) を用いた空中への映像表示に着目する [1]. MMAP を用いることで, HMD を装着することなく実空間に映像が存在するように観察することが可能である. そして, その映像とのインタラクションを行う手法もいくつか

¹ 愛知工業大学大学院経営情報科学研究科
Graduate School of Business Administration and Computer
Science, Aichi Institute of Technology, Toyota, Aichi 470-
0392, Japan

a) b20722bb@aitech.ac.jp

b) s_mizuno@aitech.ac.jp

提案されている。しかし、空中に三次元 CG 物体の映像を表示した場合でも、映像は空間中の平面に投影されているように観察されて、三次元 CG 物体がその場に立体的に存在するような感覚を得るのは困難であった。

そこで、本研究では MMAP を用いながら、三次元 CG 物体の映像に対して運動視差を適用することで、空中に立体的に表示する手法を開発する [2]。これにより、三次元 CG 物体が実際に実空間に存在するように立体的に観察することが可能となる。そして、空中に表示された三次元 CG 物体に対して指で直接操作する手法も開発する。本研究の実現により、ユーザは空中に表示された三次元 CG 物体を立体感を感じて様々な位置から観察しながら、指で触れて変形させたり、空間中で三次元的に移動させたりといった直接的なインタラクションが可能となる。また、空間中に三次元的なお絵描きをすることも可能となる。

MMAP を用いた空中映像はプレートを経由して目に届く。そのため、視覚的には映像がプレート上に浮かんでいて、手を映像の奥に持っていけるように感じて、実際には手は必ず空中映像を遮蔽してしまう。つまり、空中映像と手による直接的なインタラクションの際にオクルージョンに矛盾が生じる場合がある。そこで本研究では、操作者から見て手が空中映像の奥にある場合には、プロジェクタで手に適切な映像を投影することで空中映像による手の遮蔽を再現する手法を開発する [3]。この手法により、空中立体映像との手による直接的なインタラクションの際に生じる可能性のあるオクルージョン矛盾を解消して、手と空中物体との正しい位置関係の把握を実現する。図 1 にシステムを使用している様子を示す。詳細は 3 章以降に記述する。

2. 関連研究

2.1 空中立体映像の表示に関する研究

空中に立体映像を表示する手法は、これまでもいくつか提案、開発されている。

室伏らは、MMAP にミラーやレンチキュラーレンズを用いた立体ディスプレイを組み合わせることで、空中に両眼視差による立体映像を表示する手法を開発している [4], [5]。視点の左右移動に応じて視差映像を生成することで運動視差にも対応可能である。ただし、これらの手法では多数の異なる視点からの三次元 CG 映像を事前または同時に生成する必要があり、複雑な形状のモデルの表示や映像とのインタラクションには不向きであると思われる。そして、上下方向の視点移動による視差には対応していない。

Jones らは、異方性ホログラフィック拡散フィルタを貼った鏡を高速に回転させながらプロジェクタで映像を投影することで、360 度のあらゆる方向から三次元 CG 物体を立体的に観察しながらインタラクションを行うことができるシステムを開発した [6]。ただし、手などで映像を直接触れ

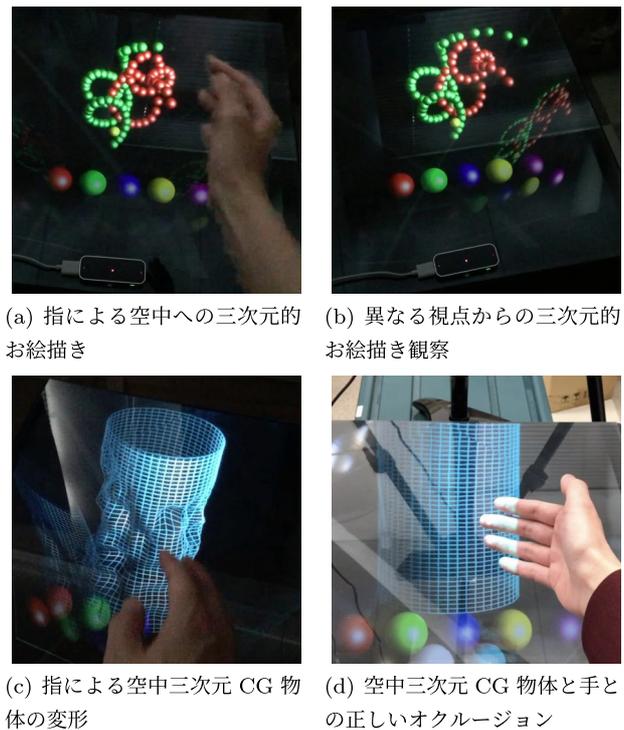


図 1 提案システムによる操作の例

Fig. 1 Examples of operation in the proposed system.

ることはできない。

橋本らは、格子状に並べられた多数の管から細い霧を下方に流しながら管の開閉を制御することで霧に凹凸形状を生成して、その霧に映像を投影することで空中に立体感のある映像の表示する手法を提案している [7]。ただし、霧の形状の制御は二次元的であるため、立体感の表現も限定的である。

藤原らは、観察者の位置に応じて MMAP を用いた空中ディスプレイを回転させる手法を提案している [8]。この手法は MMAP による空中映像の観察可能領域を MMAP の周囲 360 度に拡張させるためのものであるが、提案手法を応用すれば観察者の視点位置に応じた運動視差も再現できる可能性はある。

なお、この節であげた研究の手法は本研究の手法と異なり、空中立体映像とのインタラクションは行っていない。

2.2 空中映像とのインタラクションに関する研究

空中に映像を表示しながら映像とインタラクションを行う手法も、これまでにいくつか提案、開発されている。

Kim らは、MMAP と上下移動するディスプレイを用いて、空間中の CG 映像とインタラクションを行う手法を開発した [9]。このシステムでは、テーブル上に置いたブロックを用いて空間中の様々な三次元位置に CG 映像を表示させることが可能であるが、表示される CG 映像は平面として存在する。

Matsuura らは、垂直に立てた MMAP の前に水を張り、

水面の高さに合わせて MMAP 後方のディスプレイに映像を表示させることで、水面上の空中や水中に存在する CG 映像および水を介した映像とのインタラクションを行うシステムを開発した [10]. このシステムでは、水をすくうことで水と一緒に空中映像を様々な位置に移動させることが可能である。ただし、このシステムでも CG 映像は平面的に表示される。

Kimura らは、LED を三次元的に配置した円盤を回転させることで生成した立体映像を MMAP で空中に表示しながら、指の動きに応じて LED の点灯を制御して立体映像を変化させることで、空中映像とのインタラクションを実現するシステムを開発した [11]. ただし、表示される映像は LED の残像による単純なものに限られており、インタラクションの内容も映像を少し変化させるなど限定的である。

Matsubayashi らは、裸眼立体ディスプレイを用いて空中に表示した三次元 CG 物体を本研究と同じように指で直接操作するとともに、超音波による触覚フィードバックが得られるシステムを開発した [12]. なお、この研究は触覚フィードバックの再現に主眼を置いており、視点移動は考慮していないため映像は運動視差には対応していない。

Yoshida らは、プロジェクタアレイとハーフミラーを組み合わせることで運動視差にも対応した空中への三次元 CG 物体の表示を実現している [14]. CG 物体に触れると反応するなどの簡単なインタラクションも実現している。ただし、三次元 CG 映像はプロジェクタアレイの数だけ同時に生成する必要があり、各視点での CG 映像の解像度は低く、複雑な CG 物体の表示とインタラクションは困難な可能性がある。

Ueda らは、複数台の裸眼立体ディスプレイと視点追跡による運動視差を組み合わせることで空中への三次元 CG 物体の表示を実現している [15]. 物体の回転やペンによる描画などの簡単なインタラクションも実現している。

Ochiai らは、レーザでプラズマ化した空気電子による光点を用いて空中に CG 映像を表示するとともにインタラクションを実現するシステムを開発した [13]. 映像は空中に立体的に表示されて、手で直接触れることによるインタラクションも可能である。しかし、表示される映像はきわめて小さく、インタラクションの内容も表示物体が変化したり少し動いたりするなど限定的である。

なお、Ochiai らの手法を除き、この節であげた手法ではインタラクション中に空中映像と指などの実物体とのオクルージョン矛盾の発生はほとんど考慮していない。Yoshida らの手法はつねに空中映像が実物体を遮蔽して、その他の手法はつねに実物体が空中映像を遮蔽する。ただし、松浦らの手法では水中に存在する実物体は空中映像で遮蔽される。

2.3 映像のオクルージョンに関する研究

立体映像や空中映像の正しいオクルージョンを考慮した研究も、これまでいくつか行われている。

空中映像との正しいオクルージョンを実現するため、Kurz らはテーブル上に表示した立体映像が遮蔽すべき実物体に対して、本研究と同様にプロジェクションマッピングを行う手法を提案している [16]. ただし、この手法では使用できる実物体は事前に形状を計測する必要があり、手など変形するものには対応していない。また視点の追跡のため、ユーザはマーカ付きメガネを装着する必要がある。それに対して、本研究の手法では実物体の事前計測は不要で、変形する実物体にも対応するため、手による空中映像との直接インタラクション時にも正しいオクルージョンを実現する。そして、ユーザは特殊な装置を装着する必要はない。

村瀬らは、ハーフミラーと両眼立体視対応プロジェクタを用いた空中立体映像において、実物体と空中立体映像との正しいオクルージョンを実現する手法を開発している [17]. この手法の空中映像は観察者から見てハーフミラーの反対側にある実物体を遮蔽するように表示するが、空中映像は半透明のため実物体を十分に遮蔽できない。そこで、実物体を設置する空間を暗くして、空中映像で遮蔽されていない部分だけをプロジェクタで局所的に照明することで、空中映像による実物体の十分な遮蔽を実現している。また、実物体の奥にあると想定される空中映像は表示させないことで、実物体による空中映像の遮蔽を実現している。ただし、この手法では実物体の位置や形状をあらかじめ測定する必要があり、移動や変形を行う実物体と空中映像とのインタラクションには対応できない。

梶田らは、2枚の MMAP と 2枚のディスプレイ、マスク用透明液晶ディスプレイ、ハーフミラーを用いて、2層の空中映像を実現するとともに、前面と後面の空中映像どうしの正しいオクルージョンを実現する手法を開発している [18]. ただし、表示される各空中映像は立体視を行っておらず、実物体とのオクルージョンやインタラクションにも対応していない。

2.4 関連研究に対する本研究の位置付け

これまで述べたように、空中立体映像の表示、空中立体映像とのインタラクション、空中映像と実物体との正しいオクルージョンに関する研究はこれまでそれぞれ行われている。ただし、すべての要素を満たした研究は見当たらない。

それに対して、本研究では上記の要素をすべて満たした手法を提案している。MMAP と運動視差を組み合わせることで、空中に様々な三次元 CG 物体を立体的に表示することを実現している。このとき、運動視差は視点の左右方向の移動だけでなく、三次元的な移動にも対応する。ま

た、空中に立体的に表示されたCG物体に対して指などで直接触れながら、変形、移動、生成など様々なインタラクションを三次元的に行うことができる。そして、インタラクション時には、視点の移動にも対応しながら、空中立体映像と指などの変形する実物体との正しいオクルージョンを実現する。なお、システム使用時にユーザはメガネなどの特別な装置を装着する必要はない。

3. 空中立体映像の表示とインタラクションのための提案手法

3.1 システム構成と概要

本研究で開発するシステムの外観と構成を図2に示す。システムはMMAP、液晶ディスプレイ、Kinect、Leap Motion、制御用PCで構成されている。MMAPはボックス上に設置されており、ボックス内に液晶ディスプレイが設置されている。ユーザはシステムのボックス前に立って1人で使用する。

三次元CG物体はMMAP上の空中に表示される。このとき、ユーザの視点位置に応じて三次元CGの見え方を適切に変化させることで運動視差を再現する。これにより、ユーザは空中に表示された三次元CG物体を立体感を感じながら観察することができる。

そして、空中に表示された三次元CG物体を指で触れるように直接操作することができる。物体に対する操作としては、変形、移動、生成などである。たとえば、円筒状のCG物体の表面を指で触ると、表面形状に凹凸を与えることができる。また、空中に浮かぶ三次元CG物体を様々な方向から指で押すと、空間中で物体を三次元的に移動させることができる。さらに、空間中で指を動かすと、指先を使って三次元的な線を描くこともできる。

3.2 空中への映像表示

本研究のシステムで用いるMMAPは、垂直に並べたマイクロミラーで構成されたプレートをミラーが直交するように2層に重ねた構造となっている。

MMAPは、実物体の映像をプレートに対して面対称の位置に結像する性質を持つ。たとえば、MMAPを水平に置いて、その下に実物体を置けば、実物体と面対称の空間中に実物体が存在するように観察される。そして、実物体として液晶ディスプレイを置いて、その液晶ディスプレイに映像を表示させれば、MMAPに対して液晶ディスプレイと面対称の空間中の位置に映像が表示されているように観察される。

本研究では、図2(b)に示すようにMMAPの下部に液晶ディスプレイを傾けて設置する。それにより、仮想的なディスプレイがMMAP上の空間中に浮かんで存在することになり、液晶ディスプレイに表示された映像も空間中に浮かんで観察される。

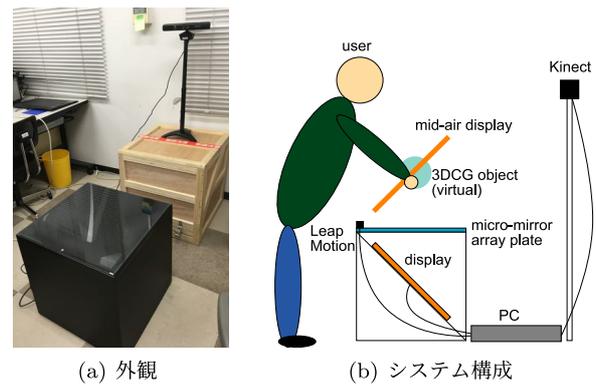


図2 提案システム

Fig. 2 Proposed system.

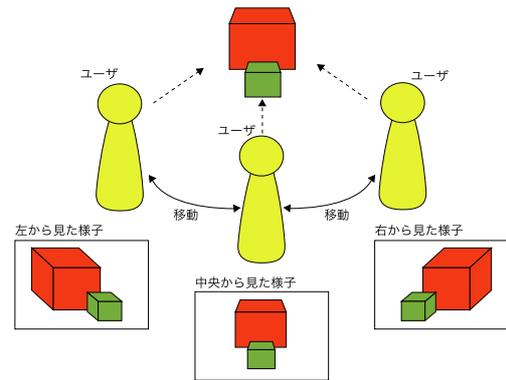


図3 運動視差

Fig. 3 Motion parallax.

3.3 運動視差立体視CG

運動視差は、立体物を観察するとき観察者または立体物が移動することで生じる見え方の変化である。図3に示すように、運動視差では観察者の移動にもなると今まで見えなかった部分が見えるようになったり、近くの物体が遠くの物体に比べて見え方が大きく変化する。運動視差は人の立体知覚にとって非常に大きな手がかりであり、運動視差のみで三次元形状と奥行きに関する十分な情報が得られて、観察者は両眼視差に匹敵する立体感が得られることが知られている [19]。

そして運動視差立体視CGは、ユーザの視点に合わせてCG映像を変化させて運動視差を再現することで立体視を実現したものである。運動視差立体視CGは専用のディスプレイやメガネなどは不要で、三次元CG物体が実際にその場に存在するように観察したり操作することができる [20], [21], [22], [23], [24]。

本研究では、筆者らが文献 [21], [22], [23], [24] で開発した手法に基づいて運動視差立体視CGを実現する。まず、Kinectで取得したユーザの15カ所の関節点座標のうち頭部座標に基づいてユーザ視点の三次元位置を取得する。そして、実空間を再現したCG空間を構築して、CG映像をリアルタイムで生成する。具体的には、Kinectの設置位置に基づいて実空間の座標系を構築して、ユーザ視点、空

中の仮想的ディスプレイ, 表示物体のそれぞれの三次元座標を得る. この座標に基づいて, CG 生成用視点, CG 投影面, 三次元 CG 物体を配置した CG 空間を構築して CG 映像を生成する. このように生成した三次元 CG 映像を仮想ディスプレイに表示してユーザ視点から観察すると, トロンプ・ルイユの原理で立体感が感じられるのに加えて, ユーザの移動に応じて三次元 CG 物体の見え方が適切に変化して運動視差が再現される. 以上のことにより, ユーザは三次元 CG 物体が空中に実在するように立体感を持って観察することができる.

3.4 インタラクション

空中に表示された三次元 CG 物体とのインタラクションは, ユーザが CG 物体を指で直接触れることによって行う.

ユーザの指先の三次元位置は Leap Motion によって取得する. 取得した座標は CG 空間の三次元座標に変換する. そして, 指先の三次元座標に基づいて三次元 CG 物体の変形, 移動, 生成などのインタラクションを実現する.

変形対象となる三次元 CG 物体の形状は頂点格子で構成されている. そして, 指先の三次元座標と三次元 CG 物体の各頂点との距離に基づいて接触判定を行い, 接触と判定された頂点を指先座標から離れる方向に移動させる. また, 三次元 CG 物体の移動も指先座標と物体頂点との接触判定に基づいており, 接触と判定された場合に物体頂点全体を移動させる. なお, 各指先座標には仮想的な球を配置して接触判定に用いる.

物体の生成は, 指先座標に基づいて三次元 CG 物体を配置することで実現する. たとえば, 三次元 CG 物体として小さな球を用いて, 指先座標に球を連続的に配置することで, 指の移動によって空間中に三次元的な線状物体を生成することが可能である.

3.3 節で述べたように, CG 空間は実空間を再現したものになっている. そのため, ユーザの指先座標に基づいて三次元 CG 物体の変形, 移動, 生成を行った場合, ユーザからは自身の指で三次元 CG 物体に直接触れながらインタラクションを行っているように観察される.

ただし, 空中に存在する CG 物体はその下に設置された MMAP を経由して表示しているため, 手を空中 CG 物体の内部や奥に移動したとしても, ユーザからはつねに手が CG 物体を遮蔽した状態で観察される (図 4(b)). このように, 本手法では空中 CG 物体に対する手による直接的なインタラクションの際に, 空中 CG 物体と手の間においてオクルージョンの矛盾が生じる場合がある.

4. オクルージョン矛盾を解消するための拡張

4.1 方針

3.4 節の最後に述べたように, MMAP を用いて空中に表示した CG 物体は空中の実物体と重なった場合でも手前に



(a) 適切なオクルージョン (加工で再現) (b) 実際に生じたオクルージョン矛盾

図 4 空中 CG 物体への手での直接的インタラクション時に生じるオクルージョン矛盾の例

Fig. 4 An example of a conflict of occlusion in direct interaction with a mid-air CG object.

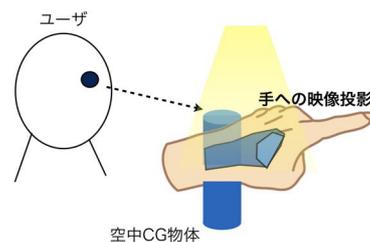


図 5 オクルージョン矛盾を解消するための拡張手法の方針

Fig. 5 The concept of the extended method for resolving conflict of occlusion.

表示することはできない. そのため, 空中 CG 物体と手と視点の位置関係によってはオクルージョンの矛盾が生じる場合があった.

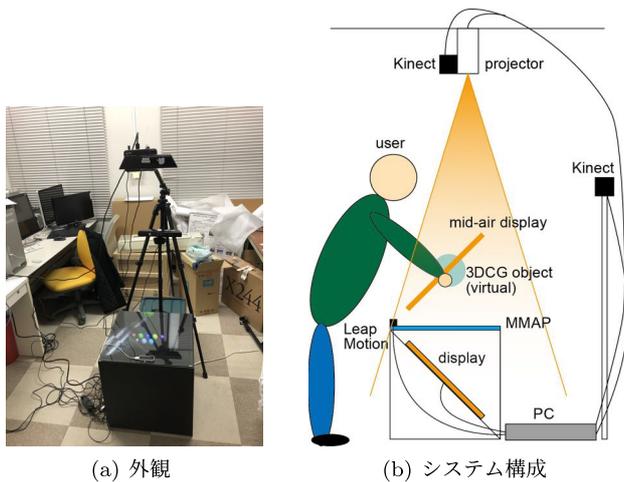
そこで, プロジェクタで実物体上に映像を投影することで, 空中 CG 物体による実物体の遮蔽を再現する手法を提案する. 図 5 に拡張手法の方針を示す. 空中 CG 物体との手による直接的なインタラクションを行うときに, ユーザから見て手が空中 CG 物体の内部や奥にあると判定された場合, CG 物体の映像をプロジェクタを用いて手に投影する. このとき, 適切な映像を手へに投影することで, ユーザからは手の手前に見えるはずの空中 CG 物体がそのまま観察できるため, オクルージョンの矛盾が解消, 低減されることが期待される.

4.2 拡張手法の実現法

前節で述べた手法で従来手法の拡張を実現するには, ユーザから見たときの空中 CG 物体と手などの実物体との正しいオクルージョンを把握することと, 空中 CG 物体によって手の遮蔽が生じたときに手に投影するための映像を適切に生成することが必要になる. 以下に従来手法の拡張を実現するための方法を述べる.

4.2.1 システム構成

従来手法を拡張するためのシステム構成を図 6 に示す. 従来システムの構成に加えて, MMAP 上方に深度カメラ (Kinect) とプロジェクタを設置する. 深度カメラは, 手など空中に存在する実物体を三次元的にスキャンするために



(a) 外観 (b) システム構成

図 6 拡張システム

Fig. 6 The extended system.

用いる。そしてプロジェクタは、ユーザから見て実物体が空中のCG物体によって遮蔽されてオクルージョン矛盾が発生したと判定された場合に、オクルージョン矛盾を解消する映像を実物体に投影する。

そして、システムでは空中映像物体と実物体スキャンデータを実空間と同じ位置関係でCG空間に配置して、ユーザ視点から見たCG映像生成に基づいて正しいオクルージョンの把握を行い、プロジェクタ光源から見たCG映像生成に基づいて投影用映像を生成する(図7)。

4.2.2 空中CG物体と実物体との正しいオクルージョンの把握

空中CG物体と実物体との正しいオクルージョンの把握は、3DCGの隠面消去処理に基づいて行う。図8に処理手順を示す。

まず、MMAP上方に設置した深度カメラによって得られた手などの実物体をスキャンして得られた点群データをCGモデルとして再構築して(図8(a))、空中に表示するCG物体と同じCG空間に配置する(図8(b))。そして視点追跡用のKinectで取得したユーザ視点に基づいて、空中CG物体と実物体CGモデルの3DCGの映像のレンダリングを行う。このとき、通常の3DCG生成の隠面消去法に基づいてレンダリングすれば、ユーザ視点から見たCG物体と実物体とのオクルージョンが正しく再現される(図8(c))。そして、背景色と実物体CGモデルを黒色でレンダリングすれば、ユーザから直接観察されるべき空中CG物体の見かけ映像が生成される(図8(d))。

図7においては、ユーザ視点 e に基づいて空中CG物体と実物体CGモデルの三次元CG映像生成を行うことになる。空中CG物体および実物体CGモデル上の点 $p_0 \sim p_3$ のうち、 e からの可視点は p_0, p_1, p_3 である。そして、 p_0 と p_1 は空中CG物体の色でレンダリングを行い、 p_3 は背景色の黒でレンダリングを行うことになる。これらの処理はOpenGLで用意されたモデリング変換、視野変換、投影

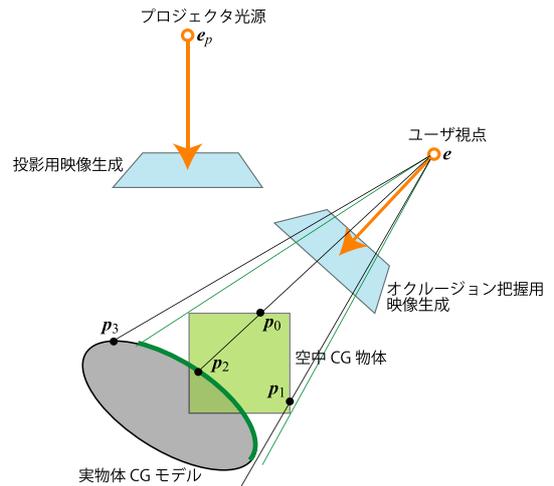
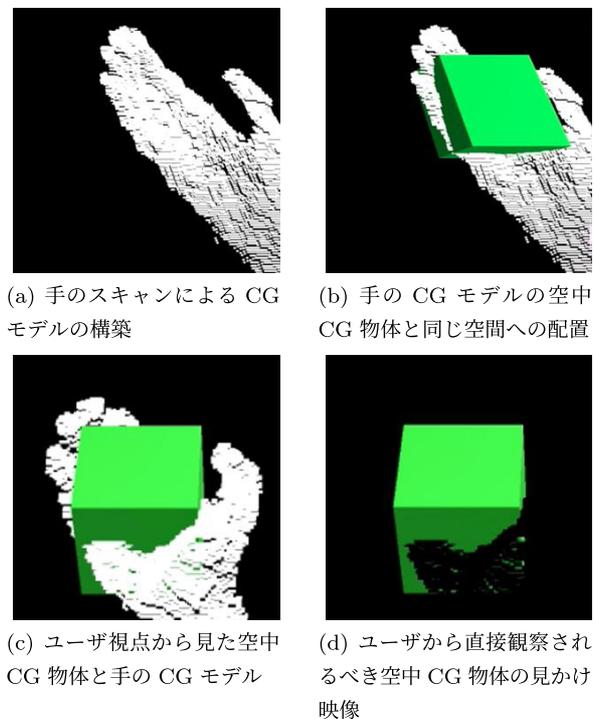


図 7 オクルージョン把握と投影用映像生成の模式図

Fig. 7 The schematic for grasping occlusion and generating a projection image.



(a) 手のスキャンによるCGモデルの構築 (b) 手のCGモデルの空中CG物体と同じ空間への配置 (c) ユーザ視点から見た空中CG物体と手のCGモデル (d) ユーザから直接観察されるべき空中CG物体の見かけ映像

図 8 空中CG物体と実物体とのオクルージョンの把握

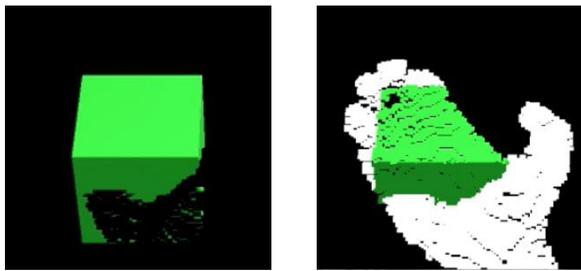
Fig. 8 Grasping occlusion between a mid-air CG object and a physical object.

変換の関数やレンダリング関数で実装可能である[25]。

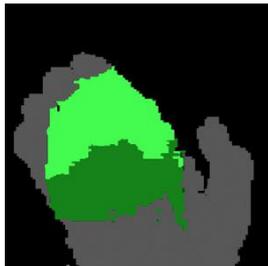
4.2.3 投影用映像の生成と投影

前節でユーザ視点から観察されるべき空中CG物体の見かけの映像を生成したが、映像中で空中CG物体が実物体CGモデルを遮蔽している部分は、空中映像システムで観察したときには実物体が空中CG物体を遮蔽するため、オクルージョンの矛盾が生じることになる。そこで、実物体の該当部分に対してプロジェクタで映像を投影することで、オクルージョン矛盾の解消を図る。

投影用映像の生成手順を図9に示す。まず、ユーザ視点



(a) ユーザから直接観察されるべき空中 CG 物体の見かけ映像 (図 8(d) と同じ)
 (b) 手の CG モデルに対する映像 (a) の投影マッピング



(c) 投影マッピングが施された手の CG モデルをプロジェクト視点から見た様子

図 9 オクルージョン矛盾を解消する投影映像の生成

Fig. 9 Generating an image for resolving a conflict of occlusion.

から見た実物体 CG モデルに対して、前節で生成したユーザから観察されるべき空中 CG 物体の見かけ映像 (図 9(a)) を投影マッピングする (図 9(b)). 空中 CG 物体のうち、この処理で実物体 CG モデル投影される部分は、システムで空中 CG 物体を観察したときには実物体によって遮蔽されており、オクルージョン矛盾が発生している。そして、投影マッピングによって実物体 CG モデルに施された空中 CG 物体テクスチャが、オクルージョン矛盾を解消する手へのプロジェクションマッピング結果そのものである。

そこで、今度はプロジェクトに相当する位置を視点として、投影マッピングによって空中 CG 物体テクスチャが施された実物体 CG モデルのレンダリングを行う。このとき、テクスチャが施されない部分は黒色でレンダリングする (図 9(c)). これがオクルージョン矛盾を解消するためにプロジェクトで投影する映像である。

図 7 においては、はじめにユーザ視点 e から実物体 CG モデルの三次元 CG 映像生成を行う。このとき、4.2.2 項で生成したオクルージョン把握用映像を実物体 CG モデルにマッピングする。つまり、 p_0 のレンダリング結果が p_2 にマッピングされることになる。 p_1 はマッピングされないことになる。次にプロジェクト光源 e_p からオクルージョン把握用映像がマッピングされた実物体 CG モデルの三次元 CG 映像生成を行う。このとき、マッピングされていない部分は背景色の黒色でレンダリングする。そのため、 e_p からの実物体 CG モデル上の可視点である p_2 と p_3 のうち

p_2 だけが視認される。これらの処理は OpenGL で用意されたモデリング変換、視野変換、投影変換の関数やレンダリング関数、そしてテクスチャ行列生成関数で実装可能である [25].

生成された映像をシステム上部に設置したプロジェクトで投影すると、空中 CG 物体とのオクルージョン矛盾が発生している実物体の部分に映像がマッピングされて、ユーザからは空中 CG 物体が実物体を適切に遮蔽しているように観察される。MMAP 上や実物体上でオクルージョン矛盾が発生していない部分には映像は投影されない。

5. 実装と実験

5.1 実装

提案手法の妥当性、有用性を検証する実験を行うため、4 章で述べた拡張システムの実装を行った。システムを構成する各装置のサイズや設置条件を図 10 に示す。使用した MMAP は一辺が 49 cm の正方形で、高さ 50 cm の箱の上部に設置した。ディスプレイは 15 インチのフル HD 液晶で、表示面上端が MMAP の下方 10 cm になるように 45 度の傾斜角で箱内に設置した。なお、箱の内部には黒い布を貼り、ディスプレイには覗き見防止フィルムを貼り、余分な映像が空中に表示されないようにしている。

空中立体映像の生成およびオクルージョン矛盾解消用の投影映像生成には iMac (Core i7 3.4 GHz, GeForce GTX 780M) を使用している。また、Kinect によるユーザ視点位置の追跡用に MacBookPro (Core i5 2.0 GHz) を使用しており、映像生成用 iMac にユーザ視点の三次元座標を有線 LAN を経由した UDP 通信で送信している。実装は C++ で行い、映像生成には OpenGL を用いている。

使用したプロジェクトは、Vivitek QUMI Q6 (1,280×720 画素, 800lm) である。そして、投影映像の輝度は、手に当てた投影映像と空中映像を比較しながら、同じような明るさになるように手動で調整している。使用した Kinect は V1 で、深度画像の解像度は 320×240 画素 (640×480 画素にアップスケール) である。Leap Motion では両手の 10 本の指先の三次元座標を取得する。

MMAP の視認範囲は 4 辺のうちの 1 辺で、上下方向が MMAP 面に対して 25~65 度、左右方向は ±20 度である。身長 165 cm のユーザの場合、今回の設置条件では前後方向が MMAP の端から 30~70 cm 程度、左右方向が MMAP の中心から ±25 cm 程度が実質的な視認範囲であった。そして、Kinect V1 の画角は上下方向が 43 度、左右方向は 57 度、関節点取得範囲 0.8~4.0m であるため、今回の設置状況では MMAP の視認範囲におけるユーザの頭部座標の取得は問題なかった。また、Kinect で取得する頭部骨格点三次元座標は頭部全体の中心であり、ユーザの顔の方向による影響は少ないため、運動視差やオクルージョン用映像投影のための視点座標は Kinect で取得した頭部骨格点座標を

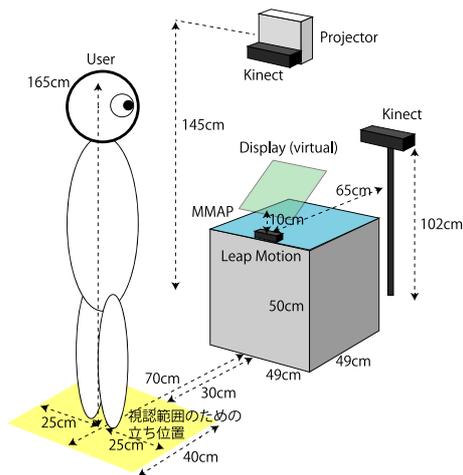


図 10 実装したシステムの各装置のサイズと設置条件
 Fig. 10 The size and the condition of devices for the implemented system.

そのまま使用している。これは筆者らの従来研究 [21], [24] で用いた方法と同じである。

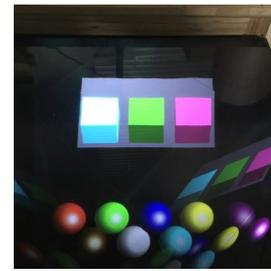
運動視差による立体視の実現とオクルージョン矛盾のための正しい映像投影のためには、システムを構成する MMAP, プロジェクタ, ディスプレイ, 2 台の Kinect, Leap Motion の位置関係を測定して, Kinect と Leap Motion がそれぞれで取得した三次元データ, 三次元 CG 生成用の視点や投影面をすべて統一の空間に配置することが必要となる。以下に位置関係を確定させる手順を示す。

MMAP とディスプレイの位置関係は前述したとおりで確定している。Leap Motion はディスプレイ表示面上端中央の直上となるように MMAP 上に置くことで, MMAP との位置関係を確定している。視点追跡用の Kinect は Leap Motion の正面に水平に設置するとともに, Leap Motion との距離をメジャーで測定することで, Leap Motion との位置関係を確定している。オクルージョン矛盾解消用の Kinect は, 投影用プロジェクタの光軸と同じ向きで光源直上に設置することで, 投影用プロジェクタとの位置関係を確定させる。そして, これらを MMAP 上部に垂直下向きに設置して, オクルージョン矛盾解消用 Kinect を用いて Leap Motion の三次元位置を取得することで, Leap Motion に対するオクルージョン矛盾解消用 Kinect およびプロジェクタの位置関係を確定させる。

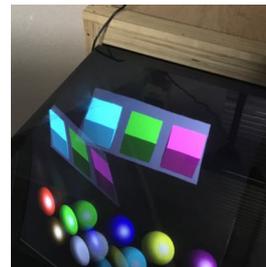
以上により, MMAP, プロジェクタ, ディスプレイ, 2 台の Kinect, Leap Motion の位置関係が確定できる。

5.2 基本動作に関する実験

提案手法によって空中映像が立体的に視認できるかどうか, およびオクルージョン矛盾解消に有効かどうかを確認するため, 前節で実装したシステムを用いて基本的な動作を確認する実験を行った。



(a) オリジナル視点からの観察



(b) 運動視差を考慮しない場合の移動視点からの観察



(c) 運動視差を考慮した場合の移動視点からの観察

図 11 システムで再現した運動視差による CG 物体の見え方の変化

Fig. 11 The change of the appearance according to the reproduced motion parallax.

5.2.1 運動視差による立体視に関する実験と検証

図 11 にシステムによって空中に表示された CG 物体を異なる視線から観察している様子を示す。運動視差の考慮の有無にかかわらず三次元 CG 物体は空中に存在するように観察されるが, 運動視差を考慮しない場合には視点移動によって三次元 CG 物体が平面に投影されていることが明確に感じられた (図 11 (b))。一方, 運動視差を考慮した場合には, 空中に浮かんで表示された三次元 CG 物体の見え方が視点移動に応じて適切に変化して, 主観的には実際に存在するように立体感を持って観察された (図 11 (c))。

そして, 運動視差が正しく再現されているかどうかを客観的に確認するため, 実物体と空中映像 CG 物体を観察して比較する精度検証実験を行った。まず, 実物体として $100 \times 50 \times 50$ mm のサイズの直方体を用意して, MMAP の 150 mm 上方に設置した。また, 空中映像 CG 物体として実物体より一回り大きい $104 \times 54 \times 54$ mm のサイズの直方体を用意して, 実物体と空中映像 CG 物体の中心座標が同じになるように CG 空間に配置した。そのため, 実物体と空中映像 CG 物体の対応する辺どうしの間隔は 2.8 mm となる。そして, 身長 165 cm の筆者が図 10 で示した視認範囲内をゆっくり動き, 様々な点から実物体と空中映像 CG 物体を観察しながらビデオ撮影することで, 空中映像 CG 物体の運動視差の精度を検証した。

図 12 に実験結果の一部を示す。視点を変えながら実物体と空中映像 CG 物体を観察したときに, 実験中のほぼすべての視点で実物体の周囲全体に空中映像 CG 物体が観察



(a) MMAP より 60cm, 正面 (b) MMAP より 60cm, 右 25cm



(c) MMAP より 60cm, 左 25cm (d) MMAP より 40cm, 正面

図 12 空中 CG 物体と実物体との見え方の比較

Fig. 12 The comparison between a mid-air 3DCG object and a physical object.

されていることが確認できた。ユーザから観察した空中映像 CG 物体の見かけ上の位置のずれも最大で 3mm 程度であった。これは筆者らの運動視差立体視に関する先行研究と同等以上の精度であり、立体感を感じるために必要な運動視差が再現できていると考える。

以上のことから、MMAP で表示した空中 CG 映像に適切に運動視差が再現されていることが客観的に示された。これは、本システムで表示した空中 CG 映像が立体感を持って観察された根拠といえる。

5.2.2 映像投影によるオクルージョン矛盾解消に関する実験と検証

図 13, 図 14 にプロジェクタ投影によるオクルージョン矛盾解消の様子を示す。提案手法によって、空中三次元 CG 物体に対する手による直接操作の際のオクルージョン矛盾の検出、およびそれを解消するための遮蔽用映像生成と手に対するプロジェクタ投影が主観的には適切に行われていることが確認された。なお、プロジェクタ投影によって手が見えなくなることはないため、空中立体 CG 物体は半透明素材のように観察された。

提案手法によるオクルージョン矛盾解消のための投影映像も運動視差に対応しており、ユーザの視点移動に合わせて適切に投影映像が変化することは確認できた (図 14)。ただし、空中映像と手に投影された映像が多少ずれる場合があった。

そして、オクルージョン矛盾を解消する映像の投影精度を客観的に確認するための実験を行った。空中映像 CG 物体として、 $100 \times 50 \times 50$ mm の直方体を表示して、物体内部に平板および手を差し出したときのオクルージョン矛盾解消映像の投影の様子を観察した。

図 15 に実験結果を示す。平板、手の場合とも、空中映像とオクルージョン矛盾解消用の投影映像は見かけ上で最

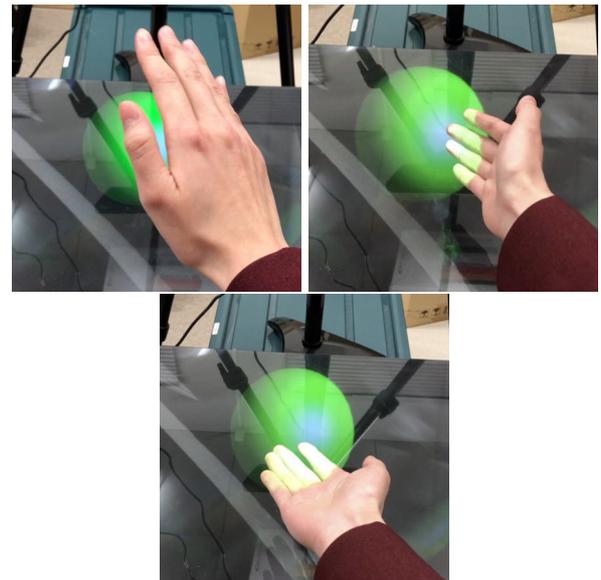


図 13 プロジェクタ投影によるオクルージョン矛盾解消例 (1)
Fig. 13 An example of resolving a conflict of occlusion by projecting an image (1).

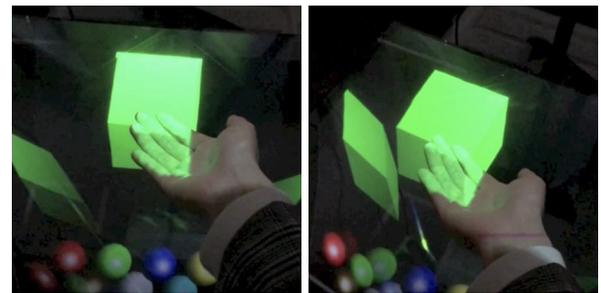


図 14 プロジェクタ投影によるオクルージョン矛盾解消例 (2)
Fig. 14 An example of resolving a conflict of occlusion by projecting an image (2).

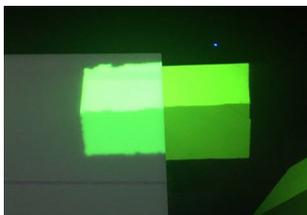
大 5mm 程度のずれが生じた。指の凹凸の影響もある程度受けていることが分かる。これらのずれが生じた原因の 1 つとしては、Kinect による平板や手のスキャン結果の誤差があげられる。投影用映像は Kinect によるスキャンで得られた点群に基づいて生成している。今回の設置状況では平板や手の位置は Kinect から約 1m の距離となるが、そこでの Kinect の深度画像の画素間隔は約 3mm となる。また、距離値自体の量子化間隔も約 4mm であることを確認している。これらによって生じたスキャン結果の誤差が投影映像のずれとして現れた可能性がある。また、視点位置取得の誤差、プロジェクタ、Kinect、ディスプレイの設置の誤差などもずれの原因になっていると考えている。主観的にはオクルージョン矛盾解消が感じられたが、投影映像にどの程度の精度が必要なのかは今後検証する必要がある。

5.2.3 遅延に関する検証

実装したシステムで生成する映像のフレームレートは 30fps を保った。空中 CG 物体の形状はそれほど複雑ではなく、オクルージョン矛盾解消用の映像生成も Kinect で



(a) 正面から見た空中立体映像



(b) 平板で遮蔽した場合（正面）



(c) 手で遮蔽した場合（正面）



(d) 斜めから見た空中立体映像



(e) 平板で遮蔽した場合（斜め）



(f) 手で遮蔽した場合（斜め）

図 15 オクルージョン矛盾を解消する映像の投影位置精度の検証
Fig. 15 Verification of positional accuracy of projected images for resolving conflict of occlusion.

得られた約 30 万個 (640 × 480 画素) の点群データを用いているため、三次元 CG 映像のためのデータとしては軽量である。また、投影マッピングなど映像生成に関する主要な処理は OpenGL の関数を用いており、リアルタイム三次元 CG 生成手法の応用で実装できていることを確認した。

運動視差やオクルージョン矛盾解消映像生成に関する処理の遅延時間は約 70 ms であった。Kinect V1 の遅延時間は約 40 ms であり、遅延時間の半分以上の要因は Kinect 自体によるものである。そして、システム全体の遅延時間は、筆者らが開発した従来の運動視差立体視 CG インタクションシステム [23] の遅延時間 100 ms の同等以下であった。そのため、本システムにおいても空中 CG 物体の立体的な視認やインタクションは問題ないといえる。

5.3 インタクションに関する実験

提案手法のインタクションに関する操作性や有用性を検証するために、空中に立体的に表示された三次元 CG 物

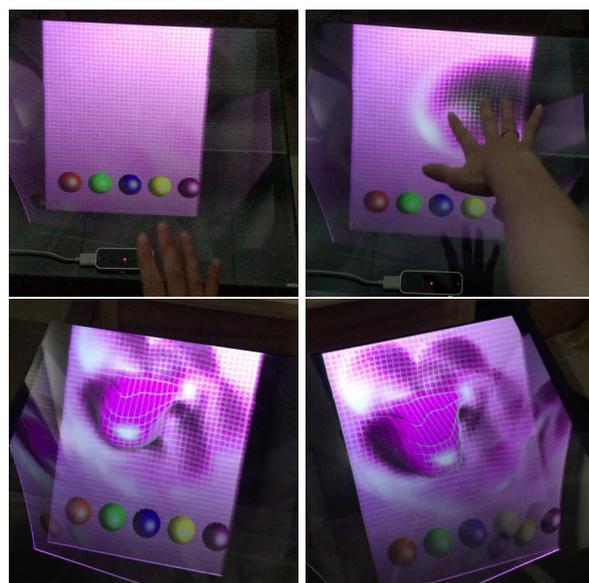


図 16 空中三次元 CG 物体の指による直接的な変形と異なる視点からの観察

Fig. 16 Deforming a mid-air 3DCG object by fingers directly and observing it from various viewpoints.

体に対する手によるインタクションをいくつか実装して実験を行った。

図 16 に空中に表示された三次元 CG 物体を指で触れて直接的に変形しながら、異なる視点から観察している様子を示す。各指先の仮想球 (直径 30 mm に設定) と三次元 CG 物体を構成する各格子点で接触判定を行い、接触していると判定された格子点は指先座標に合わせて移動させる。これにより、CG 物体をまるでそこに実在するように観察しながら、指で押したり引っ張ったりして立体的に変形させることを実現した。

図 17 に空中に表示された三次元 CG の直方体を指で触れて直接的に移動する様子を示す。移動の実装は、指先の仮想球と直方体に設定した接触判定用楕円体との接触判定に基づく簡易的な方法である。指を三次元的に移動させながら三次元 CG 直方体に様々な方向から押すと、指の方向に応じて直方体が押されて空中で三次元的に移動することが確認された。直方体の下から指で押す場合には、空中立体映像として表示された直方体が指を遮蔽しており、インタクション中も正しいオクルージョンが行われていることが確認された。タブレットなどの通常ディスプレイに対する操作では指の移動は二次元に限定されるため、提案システムならではの操作といえる。

図 18 に空中に指で三次元的な絵を描画している様子を示す。指の移動にともなって指先から次々と球 (直径 10 mm に設定) が発生して配置されていき、自分の指で空中に絵を描くような感覚が得られた。そして、このときもオクルージョン矛盾が発生したときには、空中の三次元的な絵による遮蔽を再現する映像が手に投影されることを確

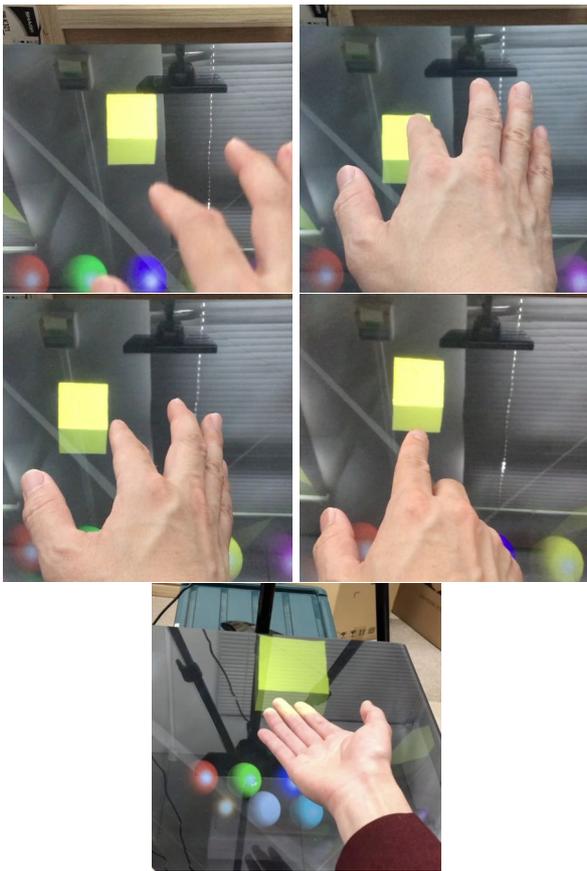


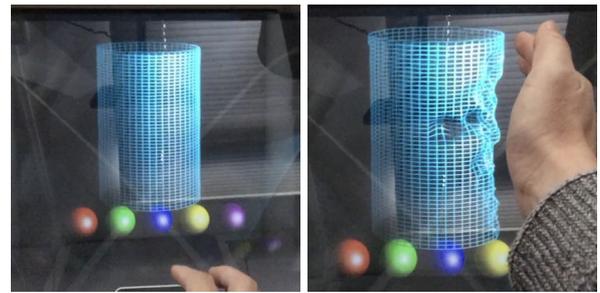
図 17 指での直接操作による空中三次元 CG 物体の三次元的な移動
 Fig. 17 Moving a mid-air 3DCG object by fingers directly.



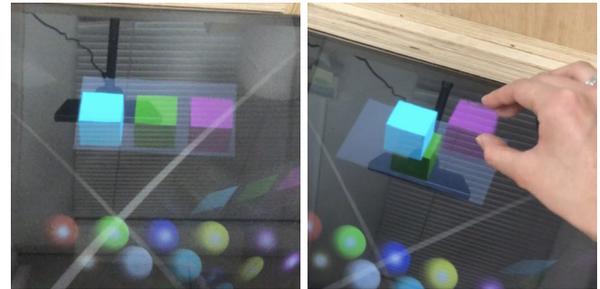
図 18 指による空中への三次元的な絵の描画
 Fig. 18 Drawing a 3D picture by fingers in mid-air.

認した。

図 19 に提案システムで空中に立体的に表示した三次元 CG 物体に対して指で直接的にインタラクションを行った例を示す。図 19(a) では、ワイヤフレームで空中に立体的に表示された円筒の変形を行っている。円筒の各格子点と



(a) 円筒の変形



(b) ブロックを摘んで移動



(c) 曇ったガラスの拭き取り

図 19 空中に立体的に表示した三次元 CG 物体との様々なインタラクション

Fig. 19 Various interaction with mid-air CG objects.

各指の仮想球（直径 20 mm に設定）との接触判定に基づいて格子点を移動させて円筒を変形させる。このとき、円筒を前だけでなく横や後ろから押すことも可能で、空中に立体的に表示した三次元 CG 物体に対してならではのインタラクションとなっている。図 19(b) では、空中に表示した立方体ブロックを指で摘んで、指の移動に合わせて三次元的に移動させることを実現している。なお、摘んでいるという判定は、立方体に設定された接触判定用球と指先に設定された仮想球が 2 つ以上接触している場合とした簡易的なものである。図 19(c) では、空中に仮想的な曇ったガラスを配置しておき、指の仮想球との接触判定に基づいて曇りが消えて、奥に配置されたブロックが見えてくるインタラクションである。ガラスとブロックが空間に三次元的に配置されていることが感じられた。

このように、提案システムの特徴を生かした様々なインタラクションの可能性があるとと思われる。

5.4 考察

本研究の特徴は「空中への立体映像の提示」「空中立体映像とのオクルージョン矛盾の解消」「空中立体映像とのインタラクション」である。

5.2.1 項では空中への立体映像の提示について実験と検証を行った。実験の結果、再現された運動視差は筆者の従来研究と同等以上の精度を持つことを確認した。主観的には本研究の手法で空中映像に立体感が感じられたが、MMAPによる空中映像と運動視差 CG を組み合わせることが有効であったと考えている。なお、人には利き目があり、精度検証は利き目による視点で行っている。同じ頭部位置でも目の位置は左右で異なるため、現状では両目に同時に合わせることはできない。それに対応させるには、MMAPの下に設置するディスプレイを文献 [4] などと同様に両眼視差に対応させる必要がある。

5.2.2 項では空中立体映像とのオクルージョン矛盾の解消に関する実験と検証を行った。実験では投影精度の測定を行ったが、オクルージョン矛盾解消に十分な精度があるかどうかの客観的な検証までは行うことができなかった。また、投影する映像の輝度や色の影響に関する実験は行っていない。輝度を変えたり、実物体との重なり具合に応じて制御することで、空中物体の透明度を擬似的に表現できる可能性があると考えている。また、皮膚など実物体の色を考慮した投影映像の色の制御も必要となる可能性がある。

5.3 節では空中立体映像とのインタラクションについて様々な事例を実装して操作感覚を確かめた。実際に空中に物体が存在するような感覚で、空中 CG 物体をあらゆる方向から押し変形させたりするなど、空中立体映像システムならではの操作が実現できることが示唆された。現状の実装は簡易的なものであるため、より現実に近い物理モデルなどを取り入れた操作での検証が必要である。

6. まとめ

本研究では、MMAP を用いた空中映像と運動視差立体視 CG を組み合わせることで、空中に立体的に映像を表示する手法を開発した。また、空中に立体的に表示された三次元 CG 物体と指で直接的にインタラクションを行う手法を開発した。さらに、空中立体三次元 CG と手との間にはオクルージョン矛盾が発生する場合があるため、遮蔽を再現する映像を投影することで正しいオクルージョンを実現する手法の提案と実装を行った。システムを実装した実験では、三次元 CG 物体が実際に空中に存在するように立体的に観察されて、空中映像との自然なオクルージョンの下で、空中 CG 物体を指で直接触れながら三次元的に変形、移動、生成が行えることを確認した。従来、このような三次元 CG 物体の表示とインタラクションは透過型 AR 用 HMD などの装着が必要であったが、本研究のシステムによって HMD などの装着がなくても同様の表示やインタラ

クションを実現した。

今後の課題としては、より複雑でリアルなインタラクションの実現、オクルージョン矛盾解消用映像の精度の検証および輝度や色の自動調整、両眼視差立体視への対応、提案システムを応用した実用アプリケーションの開発などがあげられる。

参考文献

- [1] ASKA 3D, 入手先 (<https://aska3d.com/ja/>) (参照 2021-01-15).
- [2] 高崎真由美, 水野慎士: 空中への運動視差立体視 CG 映像の投影と手による直接的なインタラクションの提案, 情報処理学会インタラクション 2019 論文集, 2C-61, pp.669-673 (2019).
- [3] 高崎真由美, 水野慎士: 空中立体映像システムでの空中 CG 物体による実物体の遮蔽の再現法の提案, 情報処理学会インタラクション 2020 論文集, 2C-61, pp.707-711 (2020).
- [4] 室伏皓太, 橋本直己: 視差を再現した立体空中像の奥行き知覚への影響, 映像情報メディア学会誌, Vol.74, No.1, pp.222-225 (2020).
- [5] 室伏皓太, 橋本直己: 複数の立体ディスプレイの組み合わせによる立体空中像の視域拡大, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.25, No.4, pp.432-438 (2020).
- [6] Jones, A., McDowall, I., Yamada, H., Bolas, M. and Debevec, P.: Rendering for an Interactive 360° Light Field Display, *ACM Trans. Graphics*, Vol.26, No.3, Article No.40 (2007).
- [7] 橋本直己, 東 佑圭: 霧を用いた空中立体像提示システムの提案, 映像情報メディア学会誌, Vol.65, No.7, pp.1007-1010 (2011).
- [8] 藤原徹平, 井村誠孝: 二面直交フレクタアレイを用いた視点追従空中ディスプレイ, 情報処理学会インタラクション 2017 論文集, 1-503-16, pp.162-165 (2017).
- [9] Kim, H., Takahashi, I., Yamamoto, H., Maekawa, S. and Naemura, T.: MARIO: Mid-air Augmented Reality Interaction with Objects, *J. Entertainment Computing*, Vol.5, No.4, pp.233-241 (2014).
- [10] Matsuura, Y. and Koizumi, N.: FairLift: Interaction with Mid-air Images on Water Surface, *Proc. SIGGRAPH 2018 Emerging Technology* (2018).
- [11] Kimura, Y., Makino, Y. and Shinoda, H.: Computer-Created Interactive 3D Image with Midair Haptic Feedback, *Proc. AsiaHaptics 2016: Haptic Interaction*, pp.491-494 (2017).
- [12] Matsubayashi, A., Makino, Y. and Shinoda, H.: Direct Finger Manipulation of 3D Object Image with Ultrasound Haptic Feedback, *Proc. CHI 2019*, Paper No.87, pp.1-11 (2019).
- [13] Ochiai, Y., Kumagai, K., Hoshi, T., Rekimoto, J., Hasegawa, S. and Hayasaki, Y.: Fairy Lights in Femtoseconds: Aerial and Volumetric Graphics Rendered by Focused Femtosecond Laser Combined with Computational Holographic Fields, *Proc. SIGGRAPH 2015 Emerging Technology* (2015).
- [14] Yoshida, T., Shimizu, K., Kurogi, T., Kamuro, S., Minamizawa, K., Nii, H. and Tachi, S.: RePro3D: Full-parallax 3D Display with Haptic Feedback using Retro-reflective Projection Technology, *Proc. ISVRI 2011*, pp.49-54 (2011).
- [15] Ueda, Y., Iwazaki, K., Shibasaki, M., Mizushima, Y., Furukawa, M., Nii, H., Minamizawa, K. and Tachi, S.:

- HaptoMIRAGE: Mid-air Autostereoscopic Display for Seamless Interaction with Mixed Reality Environments, *Proc. SIGGRAPH 2016 Emerging Technology* (2016).
- [16] Kurz, D., Kiyokawa, K. and Takemura, H.: Mutual Occlusions on Table-top Displays in Mixed Reality Applications, *Proc. ACM VRST 2008*, pp.227-230 (2008).
- [17] 村瀬香緒里, 小木哲朗, 齋藤康太, 小山尚英: 大画面ーフミラーによる没入型拡張現実環境の構築とオクルージョン表現, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.13, No.2, pp.141-150 (2008).
- [18] 梶田 創, 山本紘暉, 小泉直也, 苗村 健: 動的マスクを用いた多層空中像におけるオクルージョン表現, *電子情報通信学会論文誌 D*, Vol.J99-D, No.11, pp.1102-1111 (2016).
- [19] Rogers, B.J. and Graham, M.: Motion Parallax as an Independent Cue for Depth Perception, *J. Perception*, No.8, pp.125-134 (1979).
- [20] 原田一馬, 菅野祐介, 佐藤洋一: 運動視差を用いた直感的なマルチタッチインタラクション, *インタラクション2012 論文集*, pp.795-800 (2012).
- [21] 塚田真未, 水野慎士: 運動視差立体視を用いた三次元 CG 天体ビューアの開発, *芸術科学会論文誌*, Vol.13, No.3, pp.134-143 (2014).
- [22] 上原悠永, 水野慎士: 擬似的三次元コピーの生成とインタラクションの実現方法, *情報処理学会論文誌・デジタルコンテンツ*, Vol.3, No.2, pp.22-31 (2015).
- [23] 水野慎士: 2人用テーブルトップ型運動視差立体視 CG システムによる CG 空間の共有とインタラクション, *情報処理学会論文誌・デジタルコンテンツ*, Vol.5, No.2, pp.1-10 (2017).
- [24] Mizuno, S., Tsukada, M. and Uehara, Y.: Developing a Stereoscopic CG System with Motion Parallax and Interactive Digital Contents on the System for Science Museums, *Springer International Journal of Multimedia Tools and Applications*, Vol.76, pp.2515-2533 (2017).
- [25] OpenGL 策定委員会: OpenGL プログラミングガイド原著第5版, *ピアソン・エデュケーション* (2006).



水野 慎士 (正会員)

1998年名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。1999年豊橋技術科学大学情報処理センター助手, 2009年愛知工業大学情報科学部講師, 2010年同准教授を経て, 2014年同教授, 現在に至る。コンピュータグラフィックス, 画像処理, マルチメディア等に関する技術の開発やそれらに応用した教育用やエンタテインメント用のインタラクティブデジタルコンテンツに関する研究に従事。2017年山下記念研究賞受賞。画像電子学会, 芸術科学会, 日本バーチャルリアリティ学会各会員。



高崎 真由美 (学生会員)

2020年愛知工業大学情報科学部情報科学科卒業。現在, 同大学大学院経営情報科学研究科博士前期課程在学中。コンピュータグラフィックスを用いたインタラクティブシステムに関する研究に従事。