

複数の画像バッファを組み合わせることによる 拡張現実感上での錯覚表現

吉 川 祐 輔[†] 宮 下 芳 明^{†,††}

本稿では、画像バッファの各画素の色情報を用いて複数のバッファを組み合わせることによって一つの出力画像を作り出す拡張現実感の表現手法を提案し、そのアルゴリズムと作例について述べる。本手法によって、拡張現実感上で、現実には存在し得ない不可能立体の錯覚表現や、時空間を歪ませる立方体を提示する錯覚表現が可能になる。本手法では、画素情報を組み合わせるといった平面的な処理しか行っていないにもかかわらず、あたかも立体的な変化を起こしているかのような表現が得られる。

Illusion Expression on Augmented Reality by Combining Image Buffers

YUUSUKE KIKKAWA[†] and HOMEI MIYASHITA^{†,††}

In this paper, we propose augmented reality representation techniques that make a single output image by combining several image buffers to use color information for each pixels, and describe those algorithm and examples. Using those techniques we can draw impossible objects and temporal-spatial distortion on augmented reality. Though our method is a simple planar image processing, it has the helpful effect of making the image seem to sterically-processed.

1. はじめに

本稿では、拡張現実感 (Augmented Reality; AR) 上において、複数の画像バッファを組み合わせることにより、拡張現実感上で錯覚表現を行う手法を提案し、そのアルゴリズムとそれを用いた作例について述べる。手法の基幹部分は通常のマーカベース AR システムを用いており、それによって描画されたバッファの各画素の色情報を用いて複数の画像バッファを組み合わせることによって、一つの出力画像を提示する。本稿ではこの手法を用いることで、現実には存在し得ない不可能立体や過去の映像を重畳することで時空間を歪ませる立体の錯覚表現を、AR 上で提示することを可能とした。

2. 不可能立体の AR 表現

エッシャーの「滝」「上昇と下降」「ベルヴェデーレ」などの絵画や、ペンローズの三角形やペンローズの階

段などに見られる不可能立体は、見る者を惹きつける。杉原は「立体実現問題の答えがノーであるにもかかわらず、人の心に引き起こす立体構造に関する印象」と定義している¹⁾。谷部らの研究では、ディスプレイ上に描かれた図形そのものが人間とインタラクションを引き起こす可能性がある²⁾と指摘されているほか²⁾、立体の不可能性が知覚に及ぼす影響の調査も行われている³⁾。脳内でイメージ可能であるのに、実世界上では存在し得ないからこそ、その矛盾が独特な面白さを導き出しているのだといえる。

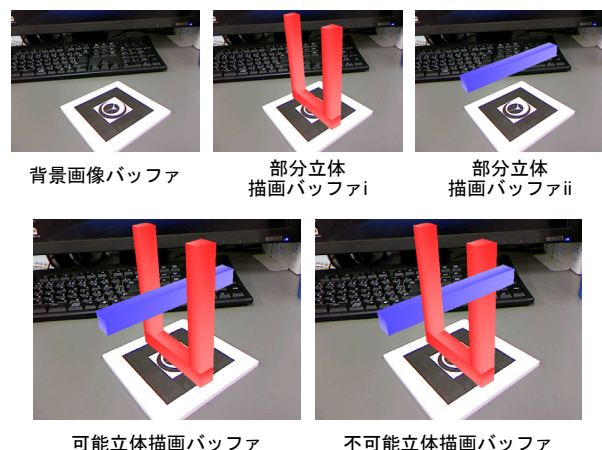


図 1 不可能立体 AR の画像バッファ

[†] 明治大学大学院 理工学研究科 新領域創造専攻 デジタルコンテンツ系

Program in Digital Contents Studies, Program in Frontier Science and Innovation, Graduate School of Science and Technology, Meiji University

^{††} 独立行政法人科学技術振興機構, CREST
JST, CREST

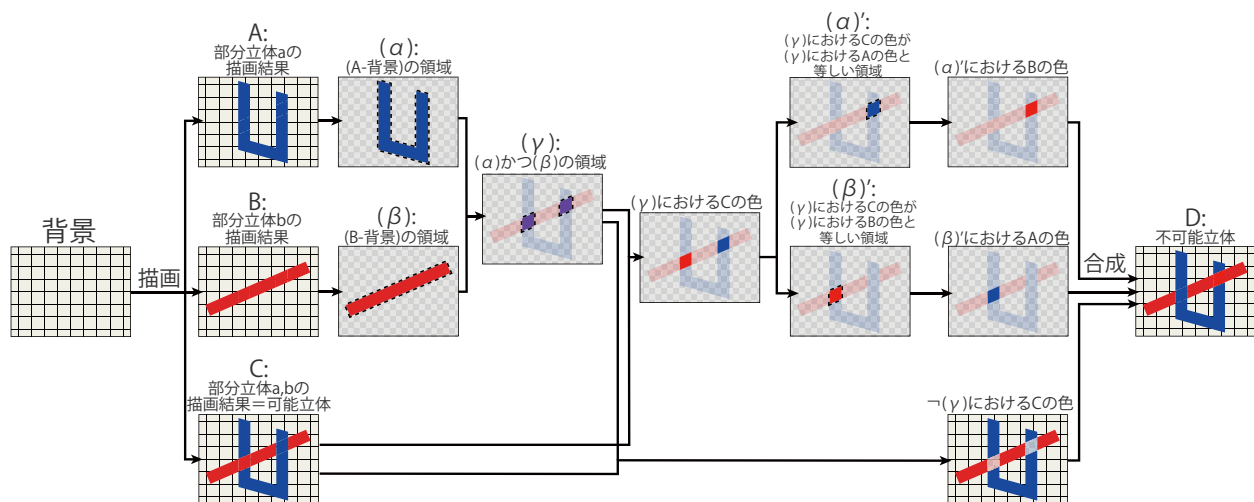


図 2 アルゴリズム概念図

不可能立体表現は，平面に描かれたものであってもその奥行を自動的に補完する知覚を利用した錯覚であるため，その表現は平面的描画に留まらざるを得ない．実物体の不可能立体（に見える物体）は杉原が多数製作しており⁴⁾，それらは実世界で観察可能であることからその実感度は高い一方，特定の角度から観察しなければ不可能立体に見えない．

本手法を用いることで，遮蔽関係に矛盾が生じる不可能立体を AR 上でリアルタイムに描画することが可能である．これにより，あたかもそこに不可能立体があるかのように，（ある程度の制限はあるものの）様々な角度から観察することが可能である．

著者らはこれまで，拡張現実感上で不可能立体を提示する手法について提案し実装した⁵⁾．本稿ではこの手法に改良を加え，更に多数の不可能立体の描画や表現を可能にした．

2.1 アルゴリズム

本手法は，一枚のカメラ入力画像から複数の画像バッファを生成し，それらを組み合わせることで不可能立体を描画している．ここでは，U の字型と I の字型のオブジェクトを組み合わせた不可能立体を実際に描画している画像バッファ群（図 1）を例に，アルゴリズムの概念図（図 2）を用いて説明する．

まず始めに，カメラで撮影した画像を「背景画像バッファ」に格納し，その画像を ARToolKit の入力画像として部分立体と可能立体を描画し，それぞれをバッファに格納する．「部分立体描画バッファ i, ii」は図 2 の A, B，「可能立体描画バッファ」は図 2 の C となる．以降，A に描画される部分立体を A，B に描画される部分立体を B と呼ぶ．

次に，「部分立体描画バッファ」と「背景画像バッ

ファ」の各画素を比較し，部分立体が描画された領域（図 2 の () , ()）を取得する．これは，背景差分法によって各部分立体が描画された領域を毎フレーム取得しているのに等しい．

() と () の集合積を取ることで，部分立体がスクリーン上で重なっている領域（図 2 の ()）が取得できる．この領域 () に含まれる画素に対して，その画素の色を「部分立体描画バッファ i, ii」と「可能立体描画バッファ」からそれぞれ取得し，それらの色を比較することで『スクリーン上でどの部分立体が前にあるのか』が分かる．例えば「可能立体描画バッファ」から取った色が「部分立体描画バッファ i」から取った色と等しかったならば『スクリーン上では部分立体 A が前にある』ことが分かる（この領域を ()' と置く）．また「部分立体描画バッファ ii」から取った色と等しかったならば，その領域を ()' と置く．この時，領域 () は領域 ()' と領域 ()' の直和である．

「不可能立体描画バッファ」（図 2 の D）は「部分立体描画バッファ i, ii」，「可能立体描画バッファ」C を組み合わせて生成する．「不可能立体描画バッファ」D における各画素において，その画素が含まれている領域が領域 ()' であればその画素の色は「部分立体描画バッファ ii」から取得し，その画素が含まれている領域が領域 ()' であればその画素の色は「部分立体描画バッファ i」から取得する．これにより，「不可能立体描画バッファ」D の領域 () において，部分立体 A, B のスクリーン上の前後関係を入れ替えることができる．領域 () 以外の領域（領域 $\neg ()$ ）の画素においては「可能立体描画バッファ」C から色を取得する．

この操作を行うことによって，「可能立体描画バッ

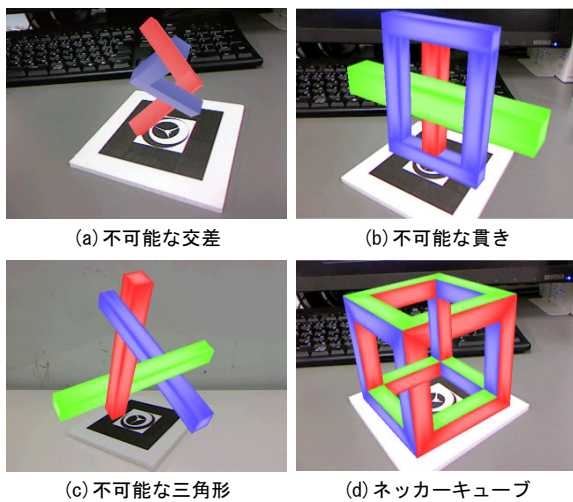


図 3 不可能立体 AR の作例

ファ」上でオブジェクトが重なっている領域に対して、本来後ろにあるオブジェクトの色がスクリーン上に現れることになり、その結果オブジェクトの遮蔽関係が入れ替わったかのような画像が得られる。

本手法を用いる上では、オブジェクトの描画にアンチエイリアス処理を掛けてはいけないという注意点がある。本手法では画像バッファの画素の色を利用しているため、オブジェクトの描画にアンチエイリアス処理を掛けると、オブジェクトのエッジ部の色が変化してしまい、部分立体の描画領域がうまく抽出できなくなってしまう可能性がある。

本手法を用いることで、その画素においてどのオブジェクトが最もスクリーンに近いのかを、デプスバッファの値などにアクセスすることなく取得できる。もちろん、3D オブジェクトの遮蔽関係に従って描画する為の計算処理は内部で行われているが、このアルゴリズムはそれにタッチすることなく、描画された結果だけを用いることで利用可能である。そのため、3D のレンダリングができる環境であれば、同様のアルゴリズムを用いることで、それが内部でどのような処理が行なっているのか理解せずとも不可能立体を描画することが可能である。例えば筆者は同アルゴリズムを用いて、ウェブ上で不可能立体を閲覧可能な Java Applet を作成した(不可能な交差、ネッカーキューブ)。

2.2 作 例

このアルゴリズムを用いて作成した不可能立体を幾つか例に示す。図 3(a) は、図 1 と同様に遮蔽関係の逆転を用いた不可能立体である。図 3(b), (c), (d) は、

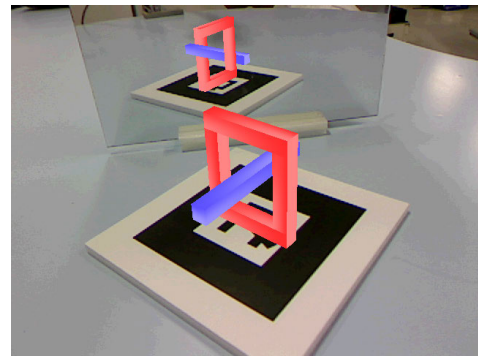


図 4 鏡の中に映った不可能立体

2.1 節のアルゴリズムを応用し、二つのオブジェクトが重なった領域の遮蔽関係を固定することで描画した不可能立体である。

遮蔽関係の固定は、二つのオブジェクトが重なった領域に対して背面にあるオブジェクトの色を描画するのではなく、常にどちらかのオブジェクトの色を描画することで可能である。図 3(b) では、緑色のオブジェクトは、常に青色のオブジェクトの背面かつ赤色のオブジェクトの前面に描画される。図 3(c) では、赤色のオブジェクトは常に緑色のオブジェクトの前面に、緑色のオブジェクトは常に青色のオブジェクトの前面に、青色のオブジェクトは常に赤色のオブジェクトの前面にそれぞれ描画される。図 3(d) では、立方体を構成する辺を三つの部分立体に分け、それらの遮蔽関係を固定することで描画している。

図 4 は、鏡に写った AR マーカは元の AR マーカと線対称な別のマーカとして認識できることを利用して、鏡に写ったマーカ上には不可能立体を、元のマーカ上には可能立体を描画するようにしたものである。鏡に映ったものはそこにあるように見えて実際には触れることができず、鏡に映った空間はそこに入り込めるようで実際には何も無い。AR によって見えるオブジェクトも、実際にそこにあるように見えるがそこにはなく、さらに不可能立体は現実には存在しない立体である。鏡と AR と不可能立体表現を組み合わせることで、それらの不可思議さをより一層増幅させることができる。

2.3 問題点と考察

不可能立体を様々な角度から観察する上で発生する問題として、観察する角度によって不可能立体が「破綻してしまう」ことが挙げられる。不可能立体は「全体で見ると不自然だが、その一部だけを取り出して見ると自然に見える」という特徴がある。しかし例えば図 5 の (a) のように、三つ以上のオブジェクトが重なる角度から観察すると、その自然に見えるはずの一部

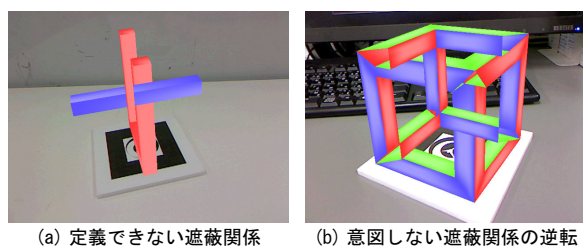


図 5 不可能立体の破綻

すらも破綻してしまう。これは、遮蔽関係が入れ替わる不可能立体においては「三つ以上のオブジェクトが重なる領域がどのように見えるのか」が定義できないことによる。Savransky らの不可能立体の描画手法においても、三つのオブジェクトの遮蔽関係が一意に定義できない領域について、そこはレンダリングすることが不可能であると述べている⁶⁾。Wu らは、自らのシステムにおいて、不可能図形の視点範囲を変えたときにどの程度誤差が発生するかを調べ、それを用いることであまりにも大きな破綻が起きないようにすることができると述べている⁷⁾。しかしながら本システムでは、不可能立体を観察する際、マーカとカメラの位置関係を制限する手段が無いため、「破綻が起きない角度からだけ観察させる」ことはできない(角度を制限した観察しかできないソフトウェアにすることは可能だが、それでは「自由な角度から観察できる」という AR での表現の利点が無くなってしまう)。

また、本手法を用いて描画した不可能立体を裏側から見たとき、意図していない部分の遮蔽関係が逆転してしまうことがある(例えば図 5 の (b))。これは、マーカとカメラの位置関係から、遮蔽関係の逆転をしないかを分岐させることで解決可能であると思われる。しかしながら、裏側から見て破綻するような不可能立体の場合、それを裏側から見ようとすると、その破綻が起きる前に前述の三つ以上のオブジェクトが重なることによる破綻が起きるため、全ての問題を解決することができない。

これらの問題は、不可能立体が不可能立体であるがゆえに発生する問題であり、根本的な解決手段はない。

2.4 関連研究

Savransky らは不可能立体を構成する部分ごとに各画素の深度情報を持った画像のレンダリングを行い、その深度情報を元にユーザが指定した遮蔽関係グラフを用いて不可能立体を描画する手法を取った⁶⁾。Chih らは不可能立体を実現可能な部分立体の接続によって表現し、不可能立体の回転アニメーションの生成手法を提案している⁸⁾⁹⁾。また、大和田らは不可能立体をインタラクティブにモデリングできるツールを開発し

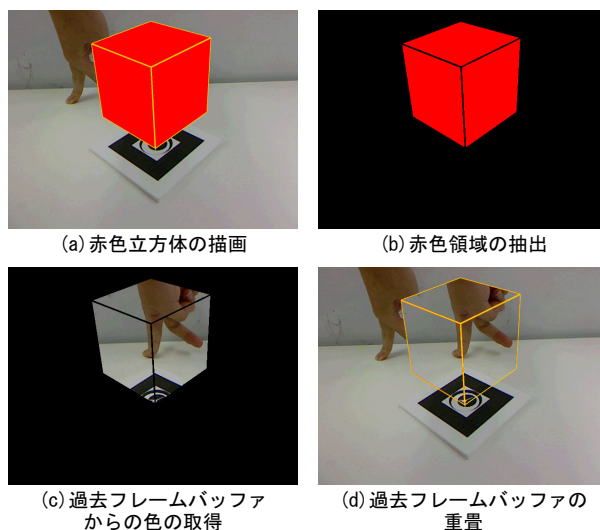


図 6 時空間を歪める AR の描画過程

た¹⁰⁾。さらに藤木らは、インタラクティブなだまし絵やそのエンタテインメント性を発展させたゲームを提案している¹¹⁾¹²⁾。篠原らは、不可能立体のレイトレーシングを行う手法を提案した¹³⁾¹⁴⁾。その手法のひとつは、面と面が重なり合っている部分に処理を施し、その奥行きを逆転させることというものであり、これによってフォトリアルな不可能立体の CG を得ることに成功している。Wu らの不可能立体のレンダリング手法⁷⁾では、不可能な面の接合をカメラ位置から見たときに自然に見えるようにするアルゴリズムを用いている。Jim らのシステム¹⁵⁾は、通常のペイントソフトにおけるレイヤ機能を拡張し、レイヤ同士が重なっている部分に対してそれらのレイヤを分割しその部分のスタックの順番を任意に入れ替えることのできるシステムである。これを用いて、遮蔽関係が入れ替わった不可能立体のレンダリングを行うこともできる。

3. 時空間を歪める錯覚の AR 表現

AR マーカの上に描画した立方体の領域に対して、現在カメラが撮影している映像より数秒前の映像を重畳することで、領域内の時間を歪ませているような立体が表示されているような錯覚を与えることが出来る。私たちは時間軸の一点上にしか存在できないが、この手法によって“同時”に“異なる時間軸座標”から物事を観察することが可能となる。

3.1 アルゴリズム

本アルゴリズムでは、まず過去フレームを格納する画像バッファにカメラから取得された現在の入力画像を格納する。次に、通常の ARToolKit を用いてオブジェクトを描画するのと同様に、入力画像からマーカ

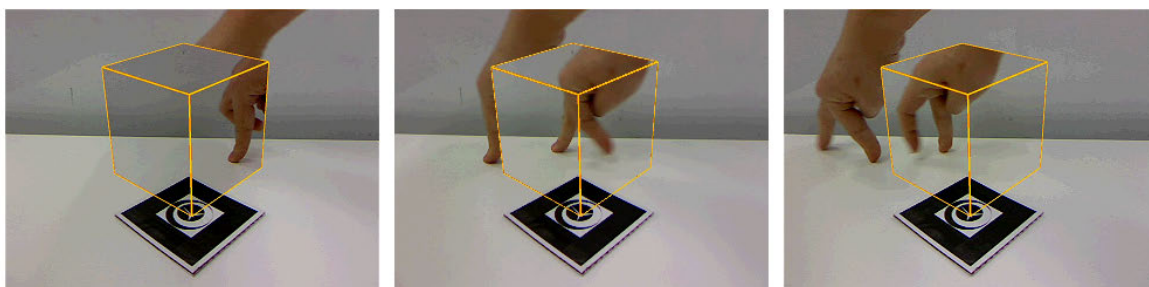
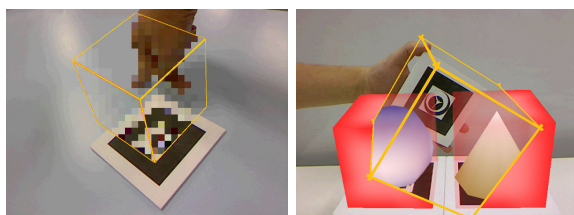


図 7 時空間を歪める AR の使用例



(a) モザイクエフェクト (b) オブジェクトの書き換え

図 8 キューブ領域の応用例

座標系を求め、マーカ上に赤色不透明 (R:255, G:0, B:0) の立方体を描画する (図 6(a))。以降、本稿ではこの赤い立方体が描画された領域を「キューブ領域」と呼ぶ。そしてその後、全ての画素を走査し、各画素の色を取得する。その画素の色が (R:255, G:0, B:0) ならば (図 6(b))、過去フレームが格納されたバッファから同座標の画素の色を取得し (図 6(c))、キューブ領域に重畳描画する (図 6(d))。カメラで撮影した映像上からは (R:255, G:0, B:0) という極端な赤色は現実的にほとんど取得されないため、この手法でもキューブ領域を簡易に取得することができる。

これにより、カメラを固定して移動する物体を映しだすと、キューブ領域だけ時間が遅延したような錯覚表現を得ることができる (図 7)。また、カメラを移動しながら使用すると、キューブ領域の空間が歪んだような表現を得ることもできる。

3.2 応用例

上記アルゴリズムを応用することで、拡張現実感上の任意の領域を指定しその情報を書き換えることができる。例えば図 8(a) では、キューブ領域に対してモザイク状に書き換えることで、あたかもモザイク効果を生じさせる立方体があるかのような描画が出来る。

また、同じ位置に別のオブジェクトを描画し、そこにキューブ領域を重ねることで、その領域内だけ AR オブジェクトを切り替えるような表現もできる。例えば図 8(b) では、全く同じように見える赤い箱の AR オブジェクトに対してキューブ領域を重ねることで、中身の違う箱の中身を見ることができる。この例は、一つ目のバッファでは二つの AR マーカに対して赤い

箱を、二つ目のバッファでは二つの AR マーカに対して別々の中身を持つ半透明の赤い箱を、三つ目のバッファでは赤い箱を描画したのとは別のマーカにキューブ領域を描画し、それらを合成することであたかもキューブ領域だけ箱が透過しているかのような出力を得ている。これにより、マーカの回転や大きさ、種類を変化させるといった従来のマーカ式 AR のインタラクションに加え、オブジェクトの任意領域に対して干渉し鑑賞するというインタラクションが可能になる。この手法は例えば、家の模型オブジェクトを描画する AR に対してキューブをかざすことで任意の領域だけ屋根が無いかのように見せて間取りを観察したり、植木鉢が描画された AR に対してキューブを重ねるとそこに花が現れる、などといった利用法が考えられる。

3.3 関連研究

EffecTV¹⁶⁾ は、リアルタイムに入力される画像の動きを反映した映像効果を与えるビデオイフェクトソフトウェアである。本手法での過去バッファの利用は、EffecTV の著者らが「タイムバッファ」と呼んでいる手法を参考にしている。

Khronos projector¹⁷⁾¹⁸⁾ は、映像が投影されたスクリーンに触れることで、スクリーンを触ってたわませるように映像の時間軸をたわませることができるアートインスタレーションである。また、Snail Light Projector¹⁹⁾ は、プロジェクタから超低速の光がスクリーンに投影されているかのように、スクリーンとプロジェクタの距離によって投影される映像の時間軸座標を定めるシステムである。

高嶋らは、過去に撮った映像の時間の流れ方と見せ方をユーザが自由にコントロールできる可視化表現として TbVP (Time-based Visual Presentaion) という概念を提唱し、またそれに基づき TbVP Browser を構築した²⁰⁾。TbVP Browser は、映像の一部領域に対して映像の速度をユーザが任意に変化させることで、周りとは異なる時間が流れるような表現をユーザに提示することができる。

ドアコム²¹⁾ は、二つのカメラ入力画像を用い、片

方ではドア型のデバイスを掲げその中に顔を映し、そのドア型デバイスの領域をもう片方のカメラ画像に合成することで、遠隔二地点でビデオチャットを行うシステムである。

4. おわりに

本稿では、複数の画像バッファを組み合わせることで拡張現実感上での錯覚表現を可能にした。本稿に用いた手法は「バッファの色情報を用いてその情報を書き換える」という極めて平面的な処理しか行っていない。にもかかわらず、不可能立体のAR表現ではオブジェクトの奥行きが入れ替わったかのように見え、時空間を歪める錯覚のAR表現におけるキューブ領域は、画面上の平面的な領域でありながらあたかも立体的な領域であるかのように観察される。

本手法は単純な処理で、オブジェクトの構造や任意の領域を変化させたように見せることができるため、著者らが本稿で挙げた例以外にも多くの応用の余地があると思われる。今後は、それらのような新しい表現の可能性について探ると共に、アルゴリズムの高速化などの技術的な課題の解決を目指す。

参 考 文 献

- 1) 杉原厚吉：不可能物体の数理，森北出版（1993）。
- 2) 谷部好子，藤波 努：3次元物体の認知過程における主体的操作の特徴について ～ネッカーキューブ操作行動に見られた共通点，ヒューマンインタフェースシンポジウム 2000 発表論文集，pp.483-486（2000）。
- 3) Cowan, T.M. and Pringle, R.: An investigation of the cues responsible for figure impossibility, *Journal of Experimental Psychology*, Vol.4, No.1, pp.112-120（1978）。
- 4) 杉原厚吉：立体イリュージョンの数理，共立出版（2006）。
- 5) 吉川祐輔，宮下芳明：不可能立体の拡張現実感表現，第10回 NICOGRAPH 春季大会 CD-ROM 予稿集，pp.162-163（2011）。
- 6) Savransky, G., Dimerman, D. and Gotsman, C.: Modeling and Rendering Escher-Like Impossible Scenes, *Computer Graphics Forum*, Vol.18, pp.173-179（1999）。
- 7) Tai-Pang, W., Chi-Wing, F., Sai-Kit, Y., Ji-aya, J. and Chi-Keung, T.: Modeling and rendering of impossible figures, *ACM Trans. Graph.*, Vol.29, pp.13:1-13:15（2010）。
- 8) Khoh, C.W. and Kovese, P.: Animating Impossible Objects.
<http://www.csse.uwa.edu.au/pk/Impossible/impossible.html>.
- 9) Khoh, C.W. and Kovese, P.: Rotating the Impossible Rectangle, *Leonardo*, Vol.34, No.3, pp.197-198（2001）。
- 10) Owada, S. and Fujiki, J.: DynaFusion: A Modeling System for Interactive Impossible Objects, *Proceedings of the 6th international symposium on Non-photorealistic animation and rendering*, pp.65-68（2008）。
- 11) 藤木 淳，牛尼剛聡，富松 潔：インタラクティブだまし絵表現の提案と実装，情報処理学会研究報告. グラフィクスと CAD 研究会報告，Vol.2006, No.119, pp.31-36（2006）。
- 12) ソニー・コンピュータエンタテインメント：無限回廊。
<http://www.jp.playstation.com/scej/title/mugen/mugen/>.
- 13) 篠原祐樹，宮下芳明：不可能立体のレイトレーシング，インタラクション 2009 論文集，pp.143-144（2009）。
- 14) 篠原祐樹，宮下芳明：不可能立体の写実的表現手法の提案，情報処理学会研究報告. HCI, ヒューマンコンピュータインタラクション研究会報告，Vol.2009, No.28, pp.95-102（2009）。
- 15) McCann, J. and Pollard, N.: Local layering, *ACM SIGGRAPH 2009 papers*, SIGGRAPH '09, New York, NY, USA, ACM, pp.84:1-84:7（2009）。
- 16) 福地健太郎，Tannenbaum, E.: EffectTV: メガデモ技術のリアルタイムビデオオブジェクトへの応用，エンタテインメントコンピューティング 2003 論文集，Vol.2003, No.1, pp.94-99（2003）。
- 17) Cassinelli, A. and Ishikawa, M.: Khronos projector, *ACM SIGGRAPH 2005 Emerging technologies*, SIGGRAPH '05, New York, NY, USA, ACM（2005）。
- 18) Cassinelli, A.: KHRONOS PROJECTOR.
<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/members/alvaro/Khronos/>.
- 19) Matsuzaki, K., Iwai, D. and Sato, K.: Snail light projector: interaction with virtual projection light in hyper-slow propagation speed, *Proceedings of the 7th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, ACE '10, New York, NY, USA, ACM, pp.114-115（2010）。
- 20) 高嶋章雄，山本恭裕，中小路久美代：探索的データ分析のための時間的な概観と詳細の表現およびインタラクションに関する研究，情報処理学会論文誌，Vol.44, No.11, pp.2767-2777（2003）。
- 21) 藤田真吾，吉野 孝：ドア型の専用インタフェースを利用したビデオチャットシステム“ドアコム”の評価，エンタテインメントコンピューティング 2011 予稿集，pp.295-300（2011）。