体積走査型ディスプレイによる立体像と再帰透過光学系を用いたプロジェクションマッピングの提案

Projection Mapping with 3D Images Using Swept-volume Display and Retro-transmissive Optics

清川 真純[†], 正会員 橋本 直己[†]

Masumi Kiyokawa[†] and Naoki Hashimoto[†]

あらまし 近年、プロジェクションマッピングは様々な展示やエンターテインメントに用いられるほどに普及し、自由に把持操作できる物体を対象とした動的プロジェクションマッピングも盛んに研究されている。しかし、従来の動的プロジェクションマッピングでは、高度な映像投影を実現するために、プロジェクタやカメラなどの機材が対象を取り囲むように配置されてきた。そのため、操作するユーザや投映対象自身による遮蔽によって影が生じたり、装置自体が心理的な圧迫感を与えることで、現実感の付与や演出効果の向上を妨げたりすることが新たな制約となってきた。そこで本論文では、体積走査型ディスプレイによって生成した立体像を光源として、再帰透過光学系を用いて投影することで、見えない投影装置によるプロジェクションマッピングを実現する方式を提案する。この方式を実現する試作機を構築し、プロジェクションマッピングへの利用可能性を検討する。

キーワード：空間拡張現実感、プロジェクションマッピング、立体像、体積走査型ディスプレイ、再帰透過光学系

1. ま え が き

近年、プロジェクタによる映像投影によって実空間にCG映像を重畳させることで、実物体があたかも変化したかのように知覚させる空間型拡張現実感技術が、プロジェクションマッピングと呼ばれて一般に普及している。Head Mounted Display等の映像提示装置の装着を必要としないため、映像と現実とのより高い一体感を複数人で同時に体験でき、大きな映像演出効果を引き出して人々を魅了している。このような実物体に対するプロジェクションマッピングは、動かない、即ち静的な対象に対しての投影が一般的であるが、次世代のプロジェクションマッピングとして、投映対象が動いたり、人が自由に把持操作できる物体に対して投影する研究も行われ、動的プロジェクションマッピング (Dynamic Projection Mapping, DPM) と呼ばれている。これは一部の展示イベント等¹⁾でも既に活用されている。

しかしDPMでは、動く複雑な物体に対して遅れなく映像を投影することを目指して、投影装置や計測装置の複雑かつ大規模化が避けられない状況となっている。機材の大規模化は、その技術の普及の妨げになるだけでなく、体験者に心理的な圧迫感を与えることにも繋がり、映像演出効果の最大化を狙うDPMにとっては無視できない損失である

るといえる。

そこで本論文では、投影装置を体験者の視野から隠蔽しつつ、動きを伴った物体へのプロジェクションマッピングにも対応可能な投影方式を提案する。投影装置の隠蔽には、再帰透過光学系を利用したステルス投影方式²⁾を採用し、動く物体の3次元形状に対応した光源生成には、体積走査型ディスプレイを採用する。提案方式に基づいた試作システムを実装し、プロジェクションマッピングへの利用可能性について検討する。

2. 関 連 研 究

DPMを実現した研究として、Naritaら³⁾は変形する物体にマークを取り付けることで位置姿勢を計測し、その動きに合わせてリアルタイムな映像投影を実現している。マークを用いない手法としては、Amitら⁴⁾は人の顔を、森久保ら⁵⁾は体験者が把持操作する物体を対象として、その動きに合わせてリアルタイムな映像投影を実現している。また、動的な投影面に焦点を合わせた投影手法として、Wangら⁶⁾は、高速プロジェクタと液体レンズを用いた光学系を用いて動的な投影面に焦点を合わせる手法を提案している。しかし、物体の位置姿勢、形状の変化を計測するためのカメラ等の機材、そして投影のためのプロジェクタが対象を取り囲み、体験者の視覚に入ることによってDPMの効果を阻害することが危惧される。加えて、対象物体を把持操作した際には、投影映像が遮蔽される問題が発生する。

2021年4月12日受付, 2021年8月13日再受付, 2021年9月13日採録

[†]電気通信大学 大学院情報理工学研究所

(〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, TEL 042-443-5345)

こうした問題を解決するために、我々は空中像提示技術を用いたステルス投影²⁾を提案している。ステルス投影とは、空中像提示技術を応用して遮蔽の影響を除去する投影法⁷⁾とDPMを組み合わせたものであり、再帰透過光学系⁸⁾を介した空中像を投影に用いることで、対象を把持したりするユーザの影を抑えつつ、投影装置を視覚的に隠すことができる。ステルス投影では、対象物体と、それに対して面对称な3次元形状をもつ光源を、再帰透過光学系を挟み込むように配置する。そして、光源からの光線が再帰透過光学系を介して対称に配置された対象物体表面に再結像することで、プロジェクションマッピングが実現される。この手法に必要な3次元光源として、従来はプロジェクタで投影されたダミー物体と呼ばれる実物体を使用していた。しかし、対象物体とダミー物体は再帰透過光学系に対して面对称な位置姿勢を常に保ち続ける必要があり、複雑な同期機構をダミー物体側に組み込む必要があった⁹⁾。

本研究では、複雑な同期機構を排除するために、空間中に立体的な実像を結像することのできる立体ディスプレイに着目する。立体像提示手法は広く用いられているが、視点位置に応じた視差画像を提示する手法¹⁰⁾では、発光するダミー物体の置き換えはできない。一方、空間中に光点が三次元的に配置された状態を作り出すことで、実物体と同じ形状の立体像を生成する手法¹¹⁾であれば、ダミー物体との置き換えが可能である。レーザー光によって空気をプラズマ化させる手法¹²⁾は理想的な立体像を生成できるが、プラズマ発光を実現する装置が必要になる等、再現が極めて困難である。また、散乱体へ光を照射することで光点を作り出す手法では、レーザー損傷で加工されたガラス¹³⁾、液体に発生させた微細な泡¹⁴⁾、空間を満たした霧¹⁵⁾を利用したものが提案されているが、特殊な散乱体を用意する必要がある。ライトフィールドを利用する手法¹⁶⁾では、レンズアレイ等の特殊な光学素子の入手や、複数の光線空間を含んだ映像の実時間生成が課題となる。

これらに対して、空間中を高速に走査するスクリーンを散乱体として利用する手法もあり、一般に、体積走査型ディスプレイと呼ばれている。スクリーンの位置に応じて3次元形状の切断画像を投影することで、各切断画像が視覚的に統合され、立体像として視認される。Geng¹⁷⁾は、螺旋型スクリーンと高速プロジェクタを利用した体積走査型ディスプレイを提案しており、近年の研究¹⁸⁾でも類似した構成が提案されている。3Dプリンタを用いることで、複雑な螺旋型スクリーンも容易に作成することができ、また、プロジェクタ開発キット等を用いることで高速プロジェクタも容易に利用可能である。

3. 体積走査型ディスプレイを光源に用いたプロジェクションマッピング

本研究では、2節での検討を踏まえ、体積走査型ディスプレイによる3次元形状を立体光源として利用した、DPM

図1 体積走査型ディスプレイを用いた提案手法の構成

図2 立体像の生成

にも対応する新たな投影方式を提案する(図1)。前述のように、ステルス投影には対象物体と同じ形状の光源を必要とする。本提案では、体積走査型ディスプレイを用いて対象物体と同じ形状を備え、動きや変形にも対応できる立体像を作成する。これにより、従来必要であった光源生成用のダミー物体とその同期機構を取り除くことができ、装置の簡易化に大きく貢献する。

体積走査型ディスプレイは、3次元空間内の特定の座標に光点を形成するため、実物と同じ形状を再現できることが最大の特徴である。ステルス投影において、再帰透過光学系を介した投影を行うためには、実物体の形状を正確に再現することが非常に重要である。本研究では、図1に示すように、回転によって空間を走査することで任意の奥行きを再現できる螺旋型スクリーン(図2)と、回転するスクリーンに同期して映像を投影するプロジェクタを主な構成要素としている。一般に、回転しながら回転面に垂直方向へ移動する曲線を螺旋と呼ぶが、本研究において使用する螺旋型スクリーンは、ある中心角における螺旋を抽出した形状となる。図2のように、円周内における螺旋の中心角 γ が $\frac{\pi}{2}$ であるとき、スクリーンの表面上の点は式1のように表される。ただし、スクリーンの回転軸をZ軸とする。

$$y = x \tan \gamma, z = \frac{2H\gamma}{\pi}, \gamma \in [0, \frac{\pi}{2}], x \in [0, R] \quad (1)$$

図 3 投影画像の生成方法

螺旋型スクリーンが回転することで円柱状の空間が走査され、円柱内の任意の位置が投影面として利用可能になる。その動きに同期して映像を投影することで、空間上に立体像の一部が提示される(図 2)。螺旋を十分な速さで回転させることで、各部分像の残像が視覚的に統合され、対象物体を再現した立体像が生成される。

投影画像の生成には、図 3 のように、対象物体と螺旋形状の 3D モデルを使用する。螺旋が体積中を走査している間、螺旋が対象物体と交差する瞬間の差分を抽出して、画像化する。この画像を回転する螺旋型スクリーンの回転角度に同期して投影する。再帰透過光学系によって面对称に再結像されることを考慮し、対象物体の 3D モデルは上下反転したものをを用いる。

なお、図 1 で示した構成では、対象物体の左側からの観察にのみ対応する。右側からの観察にも対応するためには、螺旋型スクリーンを対称になるように追加したり、半透明素材で作成したりする対応が必要となる。

4. 試作システムの実装

4.1 システム構成

図 4 に、実装した試作システムの構成を示す。体積走査型ディスプレイは、高速プロジェクタ (TI: LightCrafter 4500, 1280x800pixel, 150lumen)、螺旋型スクリーン (PLA 素材で造形)、DC モータ (maxon: RE40-148867)、エンコーダ (maxon: HEDL5540-110514)、そしてプロジェクタとスクリーンのタイミングを同期させるためのマイコン (Arduino Uno) から構成されている。また、面对称位置に光を再結像させる機能を実現するための再帰透過光学系としては、2 相式ミラー構造の素子 (アスカネット製 ASKA3D プレート) を使用した。

使用する螺旋型スクリーン (図 5 (a)) は、回転バランスを保ちつつ、リフレッシュレートを向上させるために、半径 62.5mm、高さ 33mm、中心角 $\gamma = \frac{\pi}{2}$ の螺旋 4 つが谷同士と山同士が隣接するように配置されている。このため、立体像のリフレッシュレートは 1 秒間の回転数の 4 倍となる。また、体積走査型ディスプレイは再帰透過光学系の下部に配置されるため、螺旋型スクリーンの走査体積のうち下半分は螺旋表面の法線方向が再帰透過光学系側を向かな

図 4 投影システムの構成 (スクリーンとして図 5 (b) を使用)

図 5 作成した螺旋型スクリーン: (a) 4 螺旋版 (b) 1 螺旋版

くなる。このため、本研究では下半分に提示した立体像をステルス投影の光源として使用することは困難である。本実装では、螺旋型スクリーンの上半分の半円柱状の領域のみに任意の立体像を生成し、立体光源として利用する。

本実装ではスクリーンを 15 回転/秒で回転させ、スクリーン上の螺旋 4 つを使用するため、立体像のリフレッシュレートは 60Hz となる。これは、映像更新時にちらつきを感じない速度を実現している¹⁹⁾。本実装では、螺旋型スクリーンの回転角が 7.2° 毎に画像を切り替えるため、スクリーン 1 回転に対して 50 枚の映像が必要となる。そのため、高速プロジェクタを用いて 750fps の投影を行った。また、映像を 7.2° 毎に分割生成することによる不連続感を低減するために、回転角 1.44° 毎に 5 枚の投影画像生成し、これらを合成して 7.2° 分の投影画像を生成した。

4.2 動的な立体像の生成を行うシステム構成

本提案手法によって、動いている物体に映像投影を行う DPM を実現するためには、対象の位置姿勢を高速にセンシングし、それに合わせた立体像の投影を行う必要がある。位置姿勢のセンシングに関しては、我々が開発した輪郭ベースの追跡手法⁵⁾ を利用することが可能であるが、4.1 節で用いた高速プロジェクタは、入手性の高い DLP 開発キットを用いたため、プリセットした画像以外を高速に入力することが困難であり、また速度を優先させるモードでは単色での投影に制限される。

そこで本研究では、動的な対象への投影を行う DPM を実現するために、一般的な更新速度のプロジェクタを使った試作システムも用意する。この実装では、一般的なプロジェクタの中でも比較的反リフレッシュレートの高い、最高 120fps で動作する機種 (BenQ: TH685, 1980x1080pixel,

図 6 輝度分布評価における計測箇所

3500lumen) を使用する。一般的なプロジェクタを使用する場合、リアルタイムな入出力が可能となる一方で、投影レートが低下し、肉眼で観察することが困難となる。そのため、動く物体への DPM は、投影結果を事前に撮影し、オフライン環境で観察するものとする。

螺旋型スクリーンの形状は、オフラインで評価を実施することを踏まえ、リフレッシュレートではなく、奥行き方向の解像度を優先させた設計とした。物体の動きに対応できるように、図 5 (b) に示すように、半径 (R)128mm、高さ (H)132mm、円周内の螺旋は 1 つとし、螺旋の谷部分が山の遮蔽の影響を受けにくい形状としている。円周内における螺旋の中心角 γ は 2π となり、スクリーンの表面形状は、回転軸を Z 軸とした場合に式 2 のように表される。

$$y = x \tan \gamma, z = \frac{H\gamma}{2\pi}, \gamma \in [0, 2\pi], x \in [0, R] \quad (2)$$

この螺旋型スクリーンが安定して回転する最低速度は 60rpm であり、これにプロジェクタから 100fps で投影を行うことで、回転角 3.6° 毎に画像を提示し、リフレッシュレート 1Hz で立体像を提示した。

本実装では、対象物体の並進位置は、リンク機構で対象物体に接続されたエンコーダを、また、回転角度は対象物体に埋め込まれたエンコーダを用いて計測した。計測した対象物体の位置姿勢に応じた投影画像の生成を、Unity を用いてリアルタイムに実行することで、動的な立体像を生成した。さらに、スクリーンの回転速度が一定であると仮定して、映像生成時のスクリーン回転角を調整して、プロジェクタの投影遅延を補償した。

5. 評価実験

本節では、提案手法の映像提示特性やプロジェクションマッピングの実現性について検討を行う。基礎的な評価は、4.1 節で示した高速プロジェクタを用いた実装を、一方、動

図 7 ダミー物体と対象物体における輝度分布

表 1 ダミー物体と対象物体における輝度計測結果 [cd/m^2] (括弧内は分散。ただし 1_p 及び 2_p の場合は [$\times 10^{-3} \text{ cd}/\text{m}^2$])

	A	B	C	D	E	F	G	O
1	153.6 (5.4)	154.5 (4.7)	151.8 (1.7)	154.9 (2.2)	154.7 (3.0)	157.0 (9.1)	155.8 (4.2)	171.9 (6.4)
1_p	1.2 (2.0)	1.3 (3.6)	1.3 (5.3)	1.5 (0.7)	1.3 (0.3)	1.2 (1.2)	1.2 (3.7)	1.3 (1.8)
2	149.9 (2.2)	154.3 (6.6)	144.1 (3.1)	124.3 (2.5)	142.9 (1.8)	151.3 (8.1)	150.7 (7.3)	
2_p	1.1 (1.7)	1.3 (5.4)	1.3 (0.7)	1.3 (4.7)	1.3 (5.7)	1.3 (8.0)	1.1 (10.5)	

く対象への DPM に関する評価は、4.2 節で示した一般プロジェクタを用いた実装を用いる。

5.1 輝度分布特性の評価

4.1 節で示した実装において、高速プロジェクタ及び再帰透過光学系による投影の輝度特性を調査した。ここでは、アクリルに拡散性を高めるための模型用サーフェイサ (ライトグレー色) を塗ったプレートでダミー物体、及び対象物体として用いた。ダミー物体に対し、立体像の提示範囲を想定した直径 125mm の半円の領域のうち、30° ずつ放射状に配置した 15 箇所 (図 6: A[1,2] - G[1,2], O) に、直径 5mm の円を投影した。なお、投影箇所 [A-G]1 は、対応する [A-G]2 と原点 O の中点とした。この際、プロジェクタはダミー物体から 420mm 離れた位置に、光軸がダミー物体に対して垂直となるように設置し、ダミー物体上で投影像の焦点が合うように調整した。そして、ダミー物体への投影像と、再帰透過光学系を介してステルス投影された対象物体への投影像 (図 6: A[1,2]_p - G[1,2]_p, O_p) の輝度を、輝度計 (KONICA MINOLTA: LS-110, 測定輝度範囲 0.01cd/m² 以上、測定精度 $\pm 2\%$) を用いて 5 回ずつ計測した。輝度計は計測対象から 500mm 離れた位置に、対象箇所計測軸が垂直になるように設置した。その平均値と分散を表 1 に示す。なお、計測時の値のばらつきは、用いた輝度計の計測期間とプロジェクタの輝度制御方式によるものと考えられ、観察時にちらつきなどは特に感じられなかった。

表 1 より、対象物体に投影される輝度が、光源となるダ

ミー物体上の輝度と比べて約 1/100 から 1/130 程度に減衰することが確認された。これは、より明るいプロジェクタを使用すると同時に、再帰透過光学系の面積を広げてより多くの光を対象物体上に結像させることで、減衰を低減させられると考えられる。また、ダミー物体上の各計測箇所における輝度値の分布 (図 7 下側) では、プロジェクタの光軸中心に近い O が際立って輝度が高く、同心円状に輝度が低下していく傾向が顕著であるのに対し、再帰透過光学系を介して投影された対象物体 (図 7 上側) では、比較的均一な輝度値となっていることが確認された。

これは、ダミー物体側の輝度のばらつきが、ステルス投影による減衰によって打ち消されたことに加えて、再帰透過光学系の特性による影響も考えられる。一般的に、再帰透過光学系では、光源からの距離が増加するにつれて、光の減衰や光学系に入射する光の減少によって結像輝度が低下することが知られている。表 1 において、計測点 [A-G]1 に対して [A-G]2 は、O から離れているため光源としての輝度は低下しているが、対応する [A-G]1_p と [A-G]2_p を比較すると、大きな輝度差は確認できない。これは、[A-G]2 と [A-G]2_p の距離が [A-G]1 と [A-G]1_p の距離に比べて近いこと、光源の光がより効率的に投影されたと考えられる。

5.2 体積型走査ディスプレイによる投影評価

5.1 節では、ダミー物体を光源として用いたのに対して、ここでは体積型走査ディスプレイを用いて立体像を生成し、投影を行った状況での評価を行った。

まず、図 5 (a) で示した螺旋型スクリーンが、立体像を提示可能な直径 125mm、高さ 33mm の半円柱状の領域内において、映像投影の可否を検証する。走査領域の上半分のうち、5.1 節で用いたダミー物体と同じ平面上の 15 箇所 (図 8: A[1,2] - G[1,2], O) に直径 5mm の円の立体像を提示した。この層を L1 とし (図 8)、10mm 間隔で奥行きをずらした L2, L3 についても、それぞれ 15 箇所へ円形の像を提示した。また、プロジェクタから L1 までの距離を 420mm とした。各層に立体像を提示した際の上側対称位置を基準位置とし、その基準位置、及びそこから前後に 10mm ずらした位置にアクリル製プレートを配置した際の、投影像の中心輝度を計測した結果を図 9 に示す。計測は、対称性を考慮して、中央を含んだ左半分の 9 箇所 (A[1,2]_p - D[1,2]_p, O_p) で行い、1 箇所につき 5 回ずつ計測した平均値を示している。

図 9 より、L1, L2, L3 それぞれの 9 箇所の像いずれにおいても、基準点の時に輝度がピーク値となることが確認できた。これは、基準点において光が最も強く集まるという再帰透過光学系の特性が正しく機能していることの表れであり、立体像を生成した対称位置に、像を投影することができることを示唆している。

次に、立体的な対象物体に対して、プロジェクションマッピングを試みた。ここでは、3D プリンタで作成したサイズ 85mm × 60mm × 80mm の Stanford Bunny に、緑色

図 8 体積型ディスプレイを用いた投影評価の計測箇所

図 9 投影対象の位置における輝度計測結果

の単色縞模様のテクスチャを表示することを目標とした。まず、通常のプロジェクタによる直接投影を想定して、体積走査型ディスプレイを用いて平面状の光源を生成した場合 (図 10 (a)) と、提案手法の特徴である、対象物体の 3 次元形状を再現したの光源を用いた場合 (図 10 (b) 及び (c)) を比較した。(b) では、投影された映像の見やすさを優先して、対象物体の側面が観察方向に向くように配置した。一方、(c) では、(b) の対象物体を中心縦軸に対して 33° 回転させることで、奥行き方向により幅広く対象物体を配置し、異なる奥行きに対する映像投影の様子を確認できるようにした。その結果、対象形状を再現した光源を用いた場合には、対象物の全範囲において縦縞模様を確認することができた。平面状に結像する投影像では、投影対象と形状が一致しないため、十分に焦点のあった投影が実現できなかったと考えられる。また、図 10 (c) と同姿勢の対象物体に対して、ダミー物体を使ってステルス投影を行った場合 (図 10 (d)) と比較しても、提案手法では同程度の縦縞模様が再現されていることが確認できた。

以上の結果より、ステルス投影方式に体積走査型ディスプレイを光源として組み合わせることで、3 次元形状を有する投影対象にダミー物体を用いたときと同程度の投影を実現できることが示された。

5.3 動的な対象への投影における印象評価

これまでの評価で用いてきた試作システムでは、すでに述べたとおり、DPM への対応が困難である。そこで、本提

図 10 異なる光源再現による投影の比較：(a) 平面状，(b) 対象形状，(c) 対象形状 (33° 回転)，(d) 対象形状 (ダミー物体)

図 11 複数の対象物体への投影の様子

案手法を用いて動く物体に対する DPM を行った際の印象やステルス投影の効果を評価するために、本実験では 4.2 節で示した一般プロジェクタを用いた実装を用いた。螺旋型スクリーンは、図 5 (b) に示した 1 螺旋構成のものを用いた。動く物体に対応した広い立体像提示領域を実現可能であり、図 11 に示すように、複数の Stanford Bunny を配置した状態でも、全てに映像投影が可能であった。

一般的なプロジェクタを使用したステルス投影では、前述の通り、リフレッシュレートが低いため、目視での投影の確認が困難である。そこで、対象物体をわずかに動かしながら撮影したコマ撮りの写真を使用して 30fps のストップモーション動画を作成し、オンラインフォームを利用したアンケート形式による印象評価を行った。動画では投影対象として Stanford Bunny を用い、15cm の距離を 1 秒で左右に往復し続ける並進動画と、物体の中心縦軸に対して $\pm 120^\circ/\text{s}$ の回転を 1 秒毎交互に繰り返す回転動画を作成した。回転動画の一部を図 12 に示す。

オンラインフォームは、各ページに 2 つの動画とそれに対して一対比較を行う質問を掲載し、結果を回答した後に、次のページへ遷移する形式とした。まず、10 代から 20 代の男女 8 人の被験者に対し、物体の動き（並進と回転）毎に、投影を行わずに物体を動かした様子と、投影して動かした様子の動画を提示し、どちらが映像を投影したものだと感じたかと質問した。その結果、並進では 8 人中 7 人、

図 12 対象物体を回転させた際の投影の様子

図 13 (a) 従来の投影環境，(b) 提案手法の投影環境

回転では 8 人全員が後者を選択したことから、プロジェクションマッピングが実現できていることが確認できた。また、並進で投影を確認できた 7 人のうち、物体の移動に対して物体表面の模様が追従しているように見えたと回答したのは 6 人であり、また、回転で投影を確認できた 8 人においては 7 人であった。さらにその映像が魅力的に感じたと回答したのは並進では 6 人中 5 人、回転では 7 人全員であった。魅力を感じた要因としては、投影機材が見えないことから見栄えが良く、使用用途が広がる等の意見が自由記述欄から確認できた。

次に、先のアンケートにおいて投影機材が見えないことが好印象につながったという意見が寄せられたことにも関連して、DPM において投影装置を視覚的に隠蔽するステルス投影の効果を検証するために、前述と同様に、提案手法によって DPM を実現した動画と、上方に投影装置を備えた通常の DPM 環境⁵⁾を重量表示することで再現した動画から、好みの環境を被験者に選択させた (図 13)。先の評価と同じ 8 人の被験者から回答を得た結果、並進では 8 人中 7 人が、回転では 6 人が、投影装置が隠蔽された提案手法による環境を選択した。自由記述欄において、投影装置の存在を好意的に捉える被験者もいたが、多くはその圧迫感を嫌う傾向がみられ、ステルス投影がプロジェクションマッピングの価値を高める可能性が示唆された。

以上の結果より、今回の評価は限定された環境での実施となったが、提案手法によって観察者が魅力的だと感じられる DPM が実現されることが確認できた。

6. む す び

本論文では、体積走査型ディスプレイによる立体像を光源として、再帰透過光学系を用いて投影機材を視覚的に隠蔽しつつ、動く物体への DPM にも対応したプロジェクションマッピングを実現する新しい投影方式を提案した。

試作システムを用いた評価を通して、投影映像の品質や提示範囲については改善の余地があるものの、従来システムにはないプロジェクションマッピングに適した投影特性を実現することで、より魅力的な映像提示の実現可能性を

示すことができた。より高性能な高速プロジェクトが実現の要になるが、すでに商品化も進んでおり、今後は本提案手法の実現性もより向上していくと考えられる。プロジェクトの制約が改善された状況において、リアルタイム動作するDPMを実現し、投映対象とユーザの対話を含んだ映像投影に関しても評価を行っていききたい。また、投映対象の位置姿勢計測にカメラを使った非接触方式を組み合わせることで、より自然なプロジェクションマッピングを実現したい。さらに、本論文で示した実装では、投影対象の上側に映像を投影することが困難であるため、体積走査型ディスプレイを上方に配置して下向きに投影する構成や、投影対象を中空かつ半透明化して、下方に置かれたディスプレイからの投影を可能にする方法²⁰⁾等についても検討していきたい。

本研究はJSPS科研費JP19H04152の助成を受けた。

〔文 献〕

- 1) Panasonic 株式会社, “特集 アスリートの動きに追従する巧みな映像演出 スポーツ×テクノロジーがもたらす新時代の体験価値”: “<https://news.panasonic.com/jp/stories/2019/71648.html>”, (参照日 2021/4/9)
- 2) M. Kiyokawa, S. Okuda and N. Hashimoto: “Stealth Projection: Visually Removing Projectors from Dynamic Projection Mapping”, SA '19 ACM SIGGRAPH Asia 2019 Posters, 41 (2019)
- 3) G. Narita, Y. Watanabe, and M. Ishikawa: “Dynamic Projection Mapping onto Deforming Non-rigid Surface using Deformable Dot Cluster Marker”, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, **23**, 3, pp. 1235-1248 (2017)
- 4) Amit H. Bermano, M. Billeter, D. Iwai, and A. Grundhofer: “Makeup Lamps: Live Augmentation of Human Faces via Projection”, Computer Graphics Forum, **36**, 2, pp. 311-323 (2017)
- 5) 森久保優輝, 橋本直己: “Dynamic Projection Mapping のための輪郭に基づく反復計算によるロバストな位置姿勢推定”, 第 24 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 5C-08 (2019)
- 6) L. Wang, H. Xu, and S. Tabata, Y. Hu, Yunpu, Y. Watanabe and M. Ishikawa: “High-Speed Focal Tracking Projection Based on Liquid Lens”, SIGGRAPH '20 ACM SIGGRAPH 2020 Emerging Technologies (2020)
- 7) K. Hiratani, D. Iwai, P. Punpongsanon and K. Sato: “Shadowless Projector: Suppressing Shadows in Projection Mapping with Micro Mirror Array Plate”, 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), pp. 1309-1310 (2019)
- 8) O. Makoto: “Optical imaging apparatus and optical imaging method using the same”, U.S. Patent No. 8,702,252. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office (2014)
- 9) 清川真純, 橋本直己: “ステルスプロジェクションにおける投影物体との同期機構に関する検討”, 映像情報メディア学会 冬季大会 2019, 12C-7 (2019)
- 10) A. Jones, I. McDowall, H. Yamada, M. Bolas, and P. Debevec: “Rendering for an Interactive 360° Light Field Display”, SIGGRAPH '07 ACM SIGGRAPH 2007 Papers (2007)
- 11) 宮崎大介: “特集: 裸眼立体表示技術 5 章 体積表示方式”, 映像情報メディア学会誌, **68**, 11, pp. 844-849 (2014)
- 12) Y. Ochiai, K. Kumagai, T. Hoshi, J. Rekimoto, S. Hasegawa, and Y. Hayasaki: “Fairy Lights in Femtoseconds: Aerial and Volumetric Graphics Rendered by Focused Femtosecond Laser Combined with Computational Holographic Fields”, ACM Transactions on Graphics (TOG), **35**, 2, pp. 17:1-17:14 (2016)
- 13) Shree K. Nayar and Vijay N. Anand: “3D Volumetric Display Using Passive Optical Scatterers”, SIGGRAPH '06 ACM SIGGRAPH 2006 Sketches (2006)
- 14) K. Kumagai, T. Chiba and Y. Hayasaki: “Volumetric bubble display with a gold-nanoparticle-containing glycerin screen”, Opt. Express, **23**, pp. 33911-33920 (2020)
- 15) W. Yamada, H. Manabe, D. Ikeda and J. Rekimoto: “RayGraph: Aerial Volumetric Graphics Rendered Using Lasers in Fog”, Symposium on Spatial User Interaction, 11 (2020)
- 16) N. Okaichi, M. Kawakita, H. Sasaki, H. Watanabe, and T. Mishina: “High - quality direct - view display combining multiple integral 3D images”, Society for Information Display, **27**, 1, pp. 41-52 (2018)
- 17) J. Geng: “A volumetric 3D display based on a DLP projection engine”, Displays, **34**, 1, pp. 39-48 (2013)
- 18) R. Asahina, T. Nomoto, T. Yoshida and Y. Watanabe: “Realistic Volumetric 3D Display Using Physical Materials”, SA '20 ACM SIGGRAPH Asia 2020 Emerging Technologies, 10 (2020)
- 19) S. Hecht and S. Shlaer: “Intermittent stimulation by light: V. the relation between intensity and critical frequency for different parts of the spectrum”, The Journal of General Physiology, **19**, 6, pp. 965-977 (1936)
- 20) 奥田慎一, 橋本直己: “前面投影と背面投影の組み合わせによるステルス投影の広域化”, 映像情報メディア学会技術報告, **44**, 4, pp. 19-22 (2020)

きよかわ ますみ
清川 真純 2019 年, 文教大学情報学部情報システム学科卒業。2021 年, 電気通信大学院博士前期課程(情報学専攻) 修了。映像投影技術に関する研究に従事。修士(工学)。

はしもと なおき
橋本 直己 1997 年, 東京工業大学工学部情報工学科卒業。1999 年, 同大学院博士前期課程(計算工学専攻) 修了。2001 年, 同大学院博士後期課程(計算工学専攻) 修了。同年, 同大精密工学研究所助手。2007 年, 同研究所助教。2008 年, 電気通信大学情報工学科准教授, 2010 年, 同大学総合情報学専攻准教授, 2020 年, 同大学情報学専攻教授, 現在に至る。バーチャルリアリティ, 没入型ディスプレイ, 映像投影技術に関する研究に従事。博士(工学)。正会員。