

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K12536

研究課題名（和文）どこから見てもフォトリアルな次世代プロジェクションマッピングシステムの開発

研究課題名（英文）Development of a next-generation projection mapping system that is photo-realistic from every angle

研究代表者

杉森 順子（SUGIMORI, JUNKO）

日本工業大学・先進工学部・教授

研究者番号：00559891

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、投影が困難な自由曲面を持つ立体物に簡単な操作で、どの角度から見てもフォトリアルに見えるプロジェクションマッピングシステムを開発することである。FPGAボードと画像処理技術を組み合わせることで、制作者に工学的な専門知識が無くても、自由曲面のある立体物に、正確に形状を合わせて自動的に補正する投影システムの開発を行なった。数台のプロジェクタで投影すると映像が重なった箇所に照度の変化が生じる。それを自動で補正することでどの角度から見ても、本物のようにリアルな質感に見える投影システムの構築を行った。また、専門知識のない人でも直感的に簡単に使えるようにGUIを改良した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでプロジェクタは、大画面の映像を離れた場所から多くの人が鑑賞することを前提に開発され、活用されてきた。しかし本研究では、複数のプロジェクタ映像をシームレスに繋ぎ、自由曲面のある立体物に細密な投影をすることで「すぐ近くから詳細に鑑賞する」という、新たなプロジェクションマッピング手法を開発した。近年プロジェクションマッピングは、エンターテインメントや広告、観光の用途だけに留まらず、医療や工業分野にも応用され始めている。誰でも簡単にリアルなプロジェクションマッピングの制作が出来ることで、新たな産業や技術開発、コンテンツの制作など各分野での複合的な活用や発展が期待できる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to develop a projection mapping system that can be easily operated on three-dimensional objects with free-form surfaces and that can be viewed from any angle and become photorealistic. The projection system was developed to automatically correct the shape of free-form objects by precisely matching the shape of the object without the creator's expertise in engineering. When several projectors are used to project images, changes in illuminance occur where the images overlap. By automatically correcting for this, the projection system was constructed to make the images look as realistic as the real thing, no matter what angle they are viewed from. The GUI has also been improved so that it can be used intuitively and easily by people without specialized knowledge.

研究分野：映像メディアデザイン

キーワード：プロジェクションマッピング フォトリアル FPGA 幾何補正 ブレンディング メディアデザイン
映像デザイン アプリ開発

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1)「プロジェクションマッピング」とは、建物などの立体物をスクリーンとして、その凹凸の形状に合わせて変形させた映像を、プロジェクタで投影する技法である。立体物のもつ質量としての存在感に加え、映像が融合することで空間にダイナミックな変化が生まれる。これまで見たことのない幻想的な空間や異質な質感を裸眼で体感することができるため、映像制作者や鑑賞者にとっても魅力的な映像表現のひとつである。

また近年プロジェクションマッピングは、エンターテインメントや広告、観光の用途だけに留まらず、医療や工業分野にも応用され、工場の品質管理や人の誘導などに活用され始めている。投影には、対象物の立体形状や面に合わせて映像を正確に変形する技術が必要であるが、この投影映像を簡単に変換できれば、幅広い分野での利用が可能となる。さらに、リアリティのあるプロジェクションマッピングも容易に制作することが出来るため、新たな産業や技術開発、コンテンツの制作など各分野での複合的な活用や発展が期待できる。

(2)これまで研究代表者は、技術開発と共に作品事例調査も行ってきた。その調査結果では、プロジェクションマッピングが国内で認知されたのは、2012年9月の「TOKYO STATION VISION」が転機であり、2013年がブームのピークであることを明らかにした(Sugimori, IDW, 2018)。また実施場所の調査を行い、ピーク時期は屋外での大型イベント上映が主流であったが、2016年以降は屋内での実施が7割にまで増加し、投影対象も小型化していることを明らかにした。従来のプロジェクタの利用方法は、大きく投影した映像を離れた場所から多くの人が鑑賞するスタイルであった。しかし室内での投影の場合は、鑑賞者が投影された立体物に近づきすぎ近くから詳細に見る機会が増え、従来とは異なる用途へのニーズが高まっていることがわかった。

(3)新たな立体物への投影の需要が生まれるなか、とりわけ本研究対象の胸像のように自由曲面を持つ立体物へのプロジェクションマッピングは、面の法線角度が一定ではないために映像の変形作業は容易ではない。映像投影には、投影面の全画素での幾何補正が必要となるため、3次元情報や光源の位置が正確にわからなければ計算で出すことはできない。

先行研究として、顔マーカによる赤外線位置計測技術の導入や、高速映像表示できる高額で特殊なプロジェクタと超高速センシングによる事例がある。しかし、事前にレーザースキャナー等での3次元計測によるデータ収集や、そのデータを修正する専門的な技術や知識が必要である。そのために制作者がイメージを表現したいと思っていても、エンジニアの技術的なサポートが無ければ活用は困難である。そのため、誰でも簡単にリアリティな投影ができる手法が早急に望まれており本研究を行った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、誰でも簡単に使える「360度どの角度から見ても、フォトリアルなプロジェクションマッピングシステム」を開発することである。FPGAボード(Field Programmable Gate Array)と画像処理技術を組み合わせることで、制作者に工学的な専門知識が無くても、投影が困難な自由曲面のある立体物に、正確に形状を合わせたプロジェクションマッピングを高画質で簡便に行うことができる。また、複数台のプロジェクタから投影して映像を重ねると、映像の重なり方が変わる境界に階段状の照度変化が生じる。それを自動的に計算して、滑らかに映像の照度をつなげるレンディング補正機能を実現し、立体物をどの角度から見ても、実物のようにリアルな質感に見える投影システムの構築を目指した。

3. 研究の方法

本研究では、次に示す研究(1)~(5)の実施を行った。

研究(1): FPGAボードを用いた高画質映像のリアルタイム画像変形技術の確立

研究(2): 立体物の特徴点と画像との半自動マッチング技術の確立

研究(3): 自由曲面への複数プロジェクタ映像の重なりによる照度補正手法の確立

研究(4): 360度投影手法の確立

研究(5): GUIの作成、プログラムの評価と解析

映像制作者にとって、プロジェクションマッピングの制作で最も困難な工程のひとつが、立体物に合わせ投影映像を正確に変形する作業である。投影したときに立体物と映像がぴったり合うようにするため、形状に合わせてあらかじめ投影映像を正確に変形する技術が不可欠である。本研究では、自動的に立体物の形状に合わせて高画質な映像が補正され、誰でも簡単に投影できるシステムを開発して、映像表現の幅を広げる支援を行なった。また手作業では困難な自由曲面へ投影ができて、複数台プロジェクタでの映像の重なりを自動的にレンディング補正する仕

組みを開発した。

17 世紀のマジック・ランタンに始まる投影の歴史は、投影像を拡大して映し出すことに主眼が置かれ発展してきた。投影機器としてのプロジェクタもまた、大画面の映像を離れた場所から多くの人が鑑賞することを前提に開発されてきた。しかし本研究では、複数のプロジェクタで自由曲面のある立体物に細密な投影をすることで、どの角度から近づいて見ても、リアルな質感を簡便に表現できる投影の仕組みを開発した。それにより、「すぐ近くから詳細に鑑賞する」という、新たなプロジェクタの活用方法を提案する。

なお当初の計画では 4K 画像での研究を計画していたが covid-19 の感染拡大の影響により、プロジェクタは 4K 画質で 4 台の準備ができたものの、世界的に半導体が不足して 4K 対応の FPGA ボードの価格が高騰したため予算内では入手ができず、本研究は HD 画質で進めた。

4. 研究成果

研究では、以下の研究成果が得られた。

研究(1) : FPGA ボードを用いた高画質映像のリアルタイム画像変形技術の確立

機器の基本構成はプロジェクタ、FPGA ボード、PC、カメラとし、白色立体像(胸像、兎像)に画像を投影して評価を行った。これまでの研究から白色胸像をカメラで記録し、その HD 画像から FPGA ボードで自動的にマスク処理を行い、幾何補正画像に変換するという、基礎的なプロジェクションマッピングの映像補正技術は、得られている。本研究ではその画像認識のプログラムを修正することで、より精度を高めた。

また、リアリティの高い投影をするためにはさらに精度の高い補正技術が求められる。それには幾何補正計測や FPGA へのデータ転送速度などに課題があった。FPGA ボードの性能をより効率的に活用するためフレームレートの回路設計を修正し、フレームレートを約 1.5 倍に向上することができた。

研究(2) : 立体物の特徴点と画像との半自動マッチング技術の確立

自由曲面を持つ立体物と投影映像を一致させるためには、ピクセルごとの対応付けが必要となる。本システムでは、カメラとプロジェクタの全画素の対応表を作成し、画素個別にジオメトリ補正を行った。対応表の作成方法はレーザスキャンと同じ要領で、プロジェクタから走査線出力する。走査線の検出は鑑賞者の視点に置かれたカメラで行う。プロジェクタから垂直線と水平線を 1 画素幅で走査し、カメラに映る線の位置から、画素対応表を作成した。この方法の最大の特長は、投影対象物の三次元情報が不要なことであり、補正に使用する機器はカメラのみでよいため、設置が容易である。また立体物あり、なしの状態の画像比較を行い各画素の対応表から、影のカメラ座標でプロジェクタ座標のマスク作成を行った。

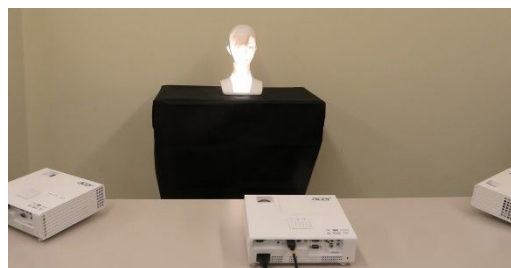


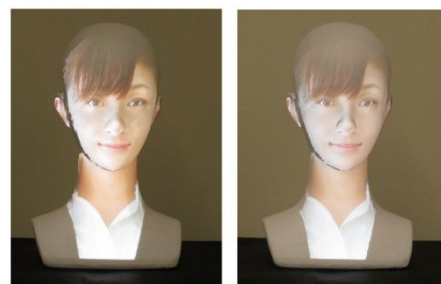
図 1: 3 台での重層投影システム

研究(3) : 自由曲面への複数プロジェクタ映像の重なりによる照度校正手法の確立

プロジェクションマッピングの映像品質のさらなる向上には「照度補正」が必要である。研究(1)で実装した幾何補正装置に、自由曲面の立体物に複数プロジェクタで投影すると映像が重なるため、生じる照度の変化を補正する機能を追加した。

まず「照度補正」では、設置位置が異なるため光軸がずれる 3 台のプロジェクタからの映像を、重層投影する技術を開発した。各プロジェクタは、正面と斜め左右から投影している(図 1)。PC から出力された映像信号を分配器で 3 台の FPGA に入力する。各 FPGA はそれぞれの幾何補正データを使用して映像の幾何変換を行い、映像をプロジェクタへ送る。3 台から投影した映像が精度よく重畳され、明るさを増加することができた(図 2)。

通常の投影では、プロジェクタと胸像の間



(a) 3 台 (b) 1 台
図 2: プロジェクタ重層台数による照度の比較



(a) 白色兎の立体像 (b) 撮影画像 (c) マッピング結果
図 3: 白色兎に茶色兎の画像をプロジェクションマッピング

い、影ができる。しかし、この技術を使うと映像は多少暗くはなるものの影が生じない状態にすることができた。

次にピクセル単位の画像補正を行う。図3に示すように白色兎の立体像 (a) と同じ形状で着色された茶色兎の立体像 (b) の2つを用意し、(b) をカメラで撮影した画像を (a) にプロジェクションマッピングを行った。その結果 (c) から、適切な補正が出来ていることが確認できた。

研究(4) : 360度投影手法の確立

360度投影手法を開発するため、まずPCとFPGA、プロジェクタを各2台での投影技術を確立した。また研究(3)で開発したプレンドリング映像での照度補正を加えて投影を行った。

次に白色兎の立体像の周囲の四方に配置したプロジェクタを4台に増やして、投影画像を4つに分配して、プロジェクタごとにFPGAボードで正確な画像の幾何補正を行なった(図4、図5)。

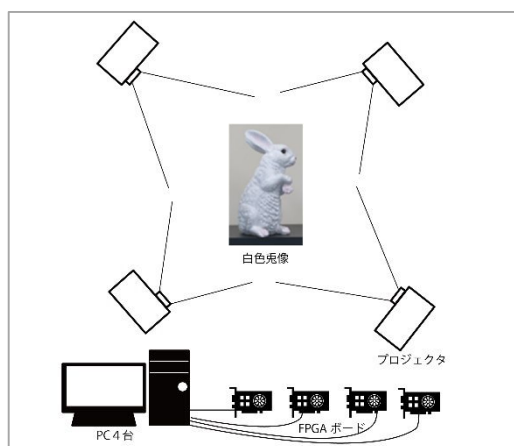


図4: FPGA ボードとプロジェクタ4台の投影イメージ

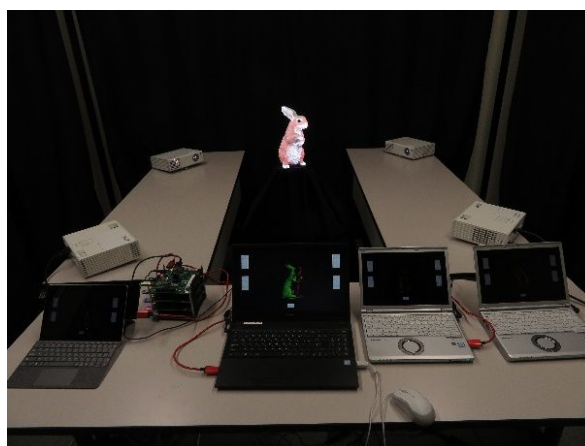


図5: 白色兎像へのプロジェクタ4台での投影状況

その結果は、図6に示すように白色兎の立体像がプロジェクションマッピングによって、周囲の様々な角度から見ても茶色兎のように見え、鑑賞には十分な精度で4台からの映像を一致させて投影することができた。



図6: 様々な角度から見た白色兎へのプロジェクションマッピング結果

研究(5) : GUI の作成、プログラムの評価と解析

映像制作者が簡単に使えるようにするため、アプリケーションの開発や改善を重点的に進めた。これまでに基盤となる、幾何補正計測やFPGAへのデータ転送などのアプリケーションを開発しているが、別々のソフトウェアとして開発してきたことで、操作性や関連性が良くないという課題が生じていた。そのため、ユーザーがより使い易いシステムになるようにこれらのソフトを統合して、GUIを改善することで操作性を高めた。さらに実用性の高いシステムにするために、被験者による操作性の評価を行い、映像制作者が画面上のメニューから視覚的に選択できて使い易いシステムへと改善を行った。それにより、制作者は機器の操作をボタン選択で容易にできるようになった(図7)。

また、汎用性が高く映像制作者が普段使い慣れている Adobe Photoshop や Premiere など市販の動画作成用ソフトとも、スムーズに連携して使用できる機能も追加することで、ユーザーの操作性を高めた。

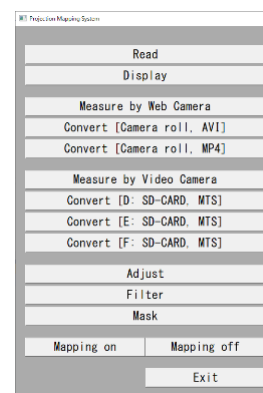


図7: アプリのトップメニュー

本研究では、投影が困難な自由曲面を持つ立体物に4台のFPGAボードと画像処理技術を組み合わせることで、周囲のどの角度から見ても、フォトリアルなプロジェクションマッピングシステムを開発することができた。プロジェクションマッピングを簡単に実施するため、必要なマス

ク作成と幾何変形とをほぼ自動化できるアプリを開発した。これにより制作者に工学的な専門知識が無くても、自由曲面のある立体物に、正確に形状を合わせたプロジェクションマッピングを簡便に行うことができる。また複数台のプロジェクタから投影した映像が重なると生じる照度の変化を自動的に計算して補正する手法を構築した。

さらに、この開発ではアプリの実用性にも重視し、鑑賞を妨げない場所にプロジェクタを設置できることと、アマチュアを含めた映像制作者が使い慣れた動画作成用などのアプリと連携できることを実現した。また、本統合アプリと市販アプリの比較を行い、本統合アプリの有用性を示した。

本研究の過程で得られた成果や調査内容は、日本デザイン学会、日本バーチャルリアリティ学会、計測自動制御学会、THE INTERNATIONAL DISPLAY WORKSHOPS で、計 8 件の学会発表や査読付き論文の投稿を行った。FPGA ボードの高速化やユーザーが使いやすい GUI の開発、プロジェクションマッピング事例調査、複数台でのプロジェクションマッピングシステムについて、研究から得られた成果を社会に示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 永野 佳孝、杉森 順子	4. 巻 28
2. 論文標題 自由曲面立体物への簡単操作プロジェクションマッピングアプリ開発	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本バーチャルリアリティ学会論文誌	6. 最初と最後の頁 111 ~ 120
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18974/tvrsj.28.2_111	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 杉森 順子	4. 巻 77
2. 論文標題 プロジェクションマッピングの新たな展開:リヨン・シドニー2都市の光の祭典から(特集 メディアアートの拡張と普遍化)	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 映像情報メディア学会誌	6. 最初と最後の頁 585-587
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 永野佳孝, 三好朝輝, 杉森順子
2. 発表標題 プロジェクションマッピングシステムの統合制作環境の開発
3. 学会等名 日本デザイン学会第68回春季研究発表大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永野佳孝, 杉森順子
2. 発表標題 プロジェクションマッピングシステムの統合制作環境の開発(第2報)
3. 学会等名 第26回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 谷内口大晴, 永野佳孝, 杉森順子
2. 発表標題 FPGAボードを用いたプロジェクションマッピングシステムのフレームレート向上
3. 学会等名 第22回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshitaka Nagano, Junko Sugimori
2. 発表標題 Implementation of Projection Mapping System Using FPGA
3. 学会等名 THE INTERNATIONAL DISPLAY WORKSHOPS (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 永野佳孝, 杉森順子
2. 発表標題 分散プロジェクタからの同一映像投影を用いたマッピングシステム
3. 学会等名 日本デザイン学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 永野佳孝, 杉森順子
2. 発表標題 FPGAプロジェクションマッピングシステムへの輝度補正機能の追加
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

杉森順子HP https://www.nit.ac.jp/campus/teacher/tm_sugimori 永野佳孝HP http://www1.aut.ac.jp/~nagano-lab/profile.html 荒川俊也 https://www.arakawalab.org/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	永野 佳孝 (Nagano Yoshitaka) (40610142)	愛知工科大学・工学部・教授 (33934)	
研究分担者	荒川 俊也 (Arakawa Toshiya) (50631248)	日本工業大学・先進工学部・教授 (32407)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	谷内口 大晴 (Yachiguchi Taisei)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------