

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H04691

研究課題名（和文）ヒューマン顔ライブ拡張現実のための動的プロジェクションマッピングの研究

研究課題名（英文）Dynamic projection mapping for live human face augmentation

研究代表者

岩井 大輔 (Iwai, Daisuke)

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号：90504837

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 18,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、大きく分けて3つの研究成果を達成した。1つ目は、高速プロジェクタを用い、人の顔への低遅延（10 ms程度）なプロジェクションマッピング技術を開発したことである。2つ目は、電気式焦点可変レンズを眼鏡として利用して高速プロジェクタと組み合わせることで、実空間の所望の領域のみをボケさせたり、ズーム倍率を変えたりすることを可能にし、新たな拡張現実インタラクションを実現したことである。3つ目は、立体面に映像を投影するとき生じる焦点ボケを、高速性と精度を両立しつつ補償する手法を深層学習を用いて開発したことである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、バーチャルな化粧、対人コミュニケーション支援、演劇などでの活用、といった拡張現実アプリケーションを支える基盤技術として、人の顔へのプロジェクションマッピングに関する技術開発を実施した。研究期間では、当初目標を早期に達成したあと、その技術の根幹となる高速プロジェクタ（1秒間に1,000枚の映像を切り替えられる）の新たな活用法を考案することができた。具体的には、身の回りのシーンの特定の領域だけをボケさせる技術を実現した。これによって、自然に視線を誘導したり、みたくないものを隠す事ができるようになり、我々の生活を下支えする新たな拡張現実アプリケーションの実現可能性を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：There are three major achievements of this project. First, this project realized a projection mapping onto moving face at an imperceptibly short delay (~10 ms) using a high-speed projector. Second, it realized spatial focus control and zooming of real world for human vision by combining electrically focus tunable lenses and a synchronized high-speed projector. Third, it developed a fast and accurate blur compensation of projected imagery onto non-planar surface by applying deep learning technology.

研究分野：拡張現実感

キーワード：プロジェクションマッピング プロジェクタ・カメラ系 拡張現実感 人間拡張

1. 研究開始当初の背景

拡張現実感(AR)技術による顔の見かけ変調(以降、顔 AR)がヒューマンインタフェース(HI)分野における重要課題として認識され、自己・他者の感情制御、遠隔他者のサロゲート、口唇口蓋裂患者の表情トレーニング支援等様々な試みが行われてきていた。これらでは 2D ディスプレイを変調結果の出力インタフェースとして採用していた。一方、プロジェクションマッピング(PM)を採用するアート作品も発表されていた。PM は 2D ディスプレイと比較して、顔表面で変調結果を直接閲覧できるため立体感及び実在感は質的に優位だが、投影像の追従が失敗し少しでもずれると、変調の効果は急速に失われてしまう、という問題があった。このため、顔移動・表情変化が低速に限られていた。高速プロジェクタ・カメラ(ProCam)系を用いて高速動物体にピッタリ追従する PM が提案されていたが、いずれも対象へのマーカー貼付が必要であり、投影コンテンツは予め用意された映像の再生でありインタラクティブではなかった。さらに、投影対象表面の反射特性による投影映像の画質劣化は補償されていなかった。

2. 研究の目的

投影重畳により人の顔をリアルタイムに視覚的拡張して、表出感情や年齢の制御、化粧、他者への顔スワップ等を実現する動的プロジェクションマッピングを確立し、その有効性と限界条件を解析する。

3. 研究の方法

説得力のある顔アピランス変調には、遅延を知覚させない(<6 ms)追従性能で目標色パターンを正確に再現する投影重畳が必要だが、これらの要請を共に満たすシステムの報告はない。本課題では、高速同軸プロジェクタ・カメラ(ProCam)系で計測・表示座標系を一致させ 3D 処理の時間を削減し、並列処理に基づく高速顔特徴追跡、想定状況を網羅する投影画像群の圧縮によるオンメモリ化とコンテキストに応じた投影画像の補間生成、および、リアルタイム投影色補償等の根本的開発を行い、ヒューマンインタフェース分野での有効性を明らかにする。

4. 研究成果

4. 1 人の顔への低遅延プロジェクションマッピング

1,300 fps (frames per second)でシーン撮影できる高速カメラと、480 fps で映像投影できるプロジェクタを組み合わせ、人の顔への低遅延プロジェクションマッピングを実現した。人の顔の画像認識は、コンピュータビジョン分野での技術蓄積が多く、姿勢変化のみならず、表情変化も高速に認識し、顔の各パーツの位置を検出することのできる顔認識エンジンを採用した。また、3次元空間での顔の移動に対応するため、カメラとプロジェクタとを同軸に設置する実験セットアップを構築した。また、投影映像の追従性を向上すべく、カルマンフィルタを用いた顔の各パーツの動き予測を導入した。認識された表情に応じて投影映像を切り替えるインタラクティブなアプリケーションを想定し、投影映像の生成についても高速化の仕組みを導入した。具体的には、陰影などのない模様情報と、各表情での陰影の情報とを分離してメモリ上に保存しておき、投影する直前に、模様と陰影とを組み合わせるブレンドシェイプ法を適用した。

上記の処理をすべて組み込んだシステムを構築し、人の顔に様々な映像を投影可能であることを実証した(図 1)。表情変化に応じて、投影コンテンツを即座に切り替えることが可能であることも確認した。顔の移動や表情変化から、映像投影までの遅延を計測したところ、10 ミリ秒程度であることが確認できた。過去の研究より、6 ミリ秒よりも長い遅延の場合に、人が映像投影に遅延を知覚することが分かっている。このため、今回構築システムの遅延量は、許容される遅延量よりも少し長めとなっているが、その差は小さく、今後の計算機性能の進化によりすぐに解決できるものであると考えている。また、上記のプロジェクタはフルカラー投影のため映像更新レートが 480 fps であったため、1,000 fps で投影可能なグレースケールプロジェクタに RGB それぞれのカラーフィルタを取り付けたものを組み合わせ、1,000 fps のフルカラープロジェクタを構築し、実験を行う予定であった。しかしながら、製造部品の予期せぬ供給停止により断念せざるを得なかった。

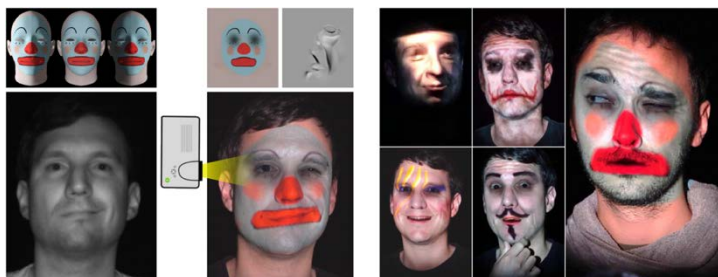


図 1：人の顔へのプロジェクションマッピング結果

4. 2 深層学習を用いた投影ボケ補償

人の顔へのプロジェクションマッピングを実施する中で、投影映像の焦点ボケの影響が無視できないことが明らかになった。通常、プロジェクタは高い輝度を確保するため、レンズ口径が広く設計されている。これは、被写界深度(合焦する奥行き幅)を狭めることにつながるため、立体面や、プロジェクタの奥行き方向に移動する対象に映像を投影すると、焦点ボケが発生する。そこでこれまで、焦点ボケの程度に応じてハイパスフィルタを設計し、投影する原画像に適用することで、この画質劣化を補償する技術が提案されてきた。しかしながらこの技術には以下2点の問題があった。まず、画像の各領域についてどの程度ボケるか、の情報が補償には必要であり、それを計測するためにドットアレイのような特殊パターンの投影が必要であった。次に、プロジェクタの輝度レンジを考慮して補償画像を計算しなければならないため、精度良く補償するためには計算コストの高い最適化計算が必要であり、インタラクティブに投影画像を生成することは困難であった。

そこで本研究課題では、深層学習を用いた機械学習ベースの補償手法を開発した。具体的には、CNN(Convolutional Neural Network)を用いて、前フレームの投影結果と、現フレームの投影目標画像を入力すると、補償画像を生成するネットワークを考案した。プロジェクタの光学現象をモデル化して、学習画像を自動生成する仕組みを構築し、大量の学習データを物理的な機材無しで生成することに成功した。それによって作成したデータセットを用いてネットワークの学習を行った。実験の結果、計算コストの高い最適化計算により算出したものと同程度の補償性能を持つ投影画像を、15ミリ秒程度の計算時間で生成できることを確認した(図2)。この計算時間は、人の顔への投影で用いるには遅すぎるものの、一般的なプロジェクタの更新時間(16.7ミリ秒)と同程度の計算時間である。

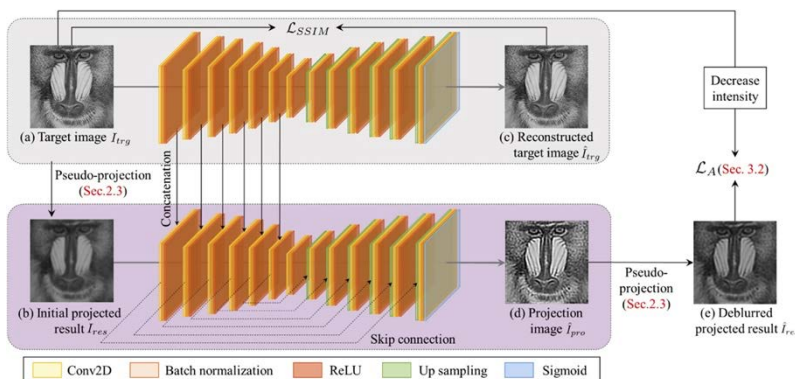


図2: 投影ボケ補償するCNN

4. 3 実空間を空間非一様にボケさせることのできる眼鏡システム

1,000 fps のプロジェクタの新たな活用法として、身の回りのシーンの特定の領域だけをボケて見せることのできる技術を実現した。これにより、例えば注目させたい領域のみボケがなく、他の領域をボケさせることで視線を誘導したり、みたくないものを隠す拡張現実応用が可能となる。従来の拡張現実システムでは、注目領域に矢印を表示したり、隠す対象を完全に消し去る、というような技法が用いられてきたが、ボケを利用することで、より自然な視線誘導・隠蔽が可能になる。

そこで本研究課題では、電気式可変焦点レンズを観察者が装着する眼鏡として用い、その合焦距離を、人が知覚できないほど高速に前後に振動させた。高速プロジェクタをこれに同期させ、観察者の視界においてボカしたいものは、それがボケたときにプロジェクタで照明し、くっきりとみたいものは、それが合焦したときに照明した。これにより、視界のうち、一部はボケて、他くっきりする、という状況を光学的に実現することに成功した(図3)。被験者実験を通じて、同システムを用いた視線誘導が、従来用いら

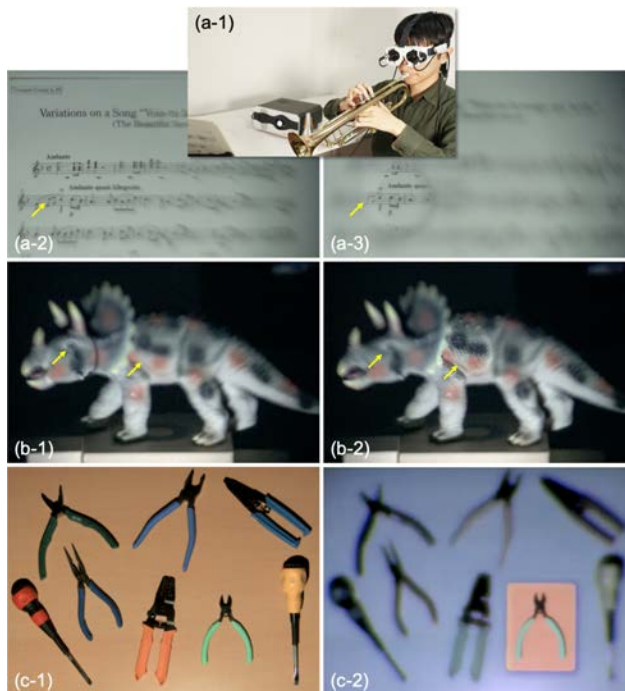


図3: 空間非一様な焦点ボケによる視線誘導(上は提案システム、左は通常の見え、右は視線誘導中の見え)

れてきた矢印などを投影するアプローチに比べて、指示が分かりやすい、との知見が得られた。

4. 4 まとめ

上述の通り、主要実験設備の調達において予期せぬ供給停止はあったものの、当初目標であった人の顔への低遅延なプロジェクションマッピングが実現でき、高速な画質劣化補償のアルゴリズムも構築できた。さらに、当初予定にはなかったが、高速プロジェクタを活用した新たな拡張現実インタラクションの概念を提唱し実証できた。これらより、本研究課題は当初予定以上に進展したものと考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Amit H. Bermanto, Markus Billeter, Daisuke Iwai, Anselm Grundhoefer	4. 巻 32
2. 論文標題 Makeup Lamps: Live Augmentation of Human Faces via Projection	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Computer Graphics Forum	6. 最初と最後の頁 311-323
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/cgf.13128	査読の有無 有
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 該当する
1. 著者名 Tatsuyuki Ueda, Daisuke Iwai, Takefumi Hiraki, Kosuke Sato	4. 巻 26
2. 論文標題 Illuminated Focus: Vision Augmentation using Spatial Defocusing via Focal Sweep Eyeglasses and High-Speed Projector	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics	6. 最初と最後の頁 2051 ~ 2061
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TVCG.2020.2973496	査読の有無 有
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 該当する
1. 著者名 Yuta Kageyama, Mariko Isogawa, Daisuke Iwai, Kosuuke Sato	4. 巻 28
2. 論文標題 ProDebNet: projector deblurring using a convolutional neural network	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 20391 ~ 20391
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.396159	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 該当する
1. 著者名 山本 健太、岩井 大輔、佐藤 宏介	4. 巻 26
2. 論文標題 画素一致プロジェクタ-カメラシステムによる動的プロジェクションマッピング	5. 発行年 2021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 107 ~ 116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18974/tvrsj.26.1_107	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 -

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 14件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 上田龍幸, 岩井大輔, 佐藤宏介
2. 発表標題 高速プロジェクタと可変焦点レンズを用いた空間非一様な焦点ボケ操作による拡張現実感
3. 学会等名 第23回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上田龍幸, 井澤英俊, 岩井大輔, 佐藤宏介
2. 発表標題 高速プロジェクタと可変焦点レンズを用いた空間的に非一様な合焦距離変調
3. 学会等名 第62回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩井大輔
2. 発表標題 プロジェクションマッピング研究の最前線 (State-of-the-Art on Projection Mapping Research)
3. 学会等名 IEEE Sapporo Section/電子情報通信学会北海道支部共同主催講演会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岩井大輔
2. 発表標題 表面質感を変えるプロジェクションマッピング
3. 学会等名 日本表面科学会関西支部主催 第19回市民講座 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Daisuke Iwai
2. 発表標題 Computational Projection Display for AR/VR
3. 学会等名 International Meeting on Information Display (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岩井大輔
2. 発表標題 プロジェクションマッピングの3D表現
3. 学会等名 日本光学会 情報フォトンクス研究グループ 3D Displays and Devices WG研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岩井大輔
2. 発表標題 プロジェクションマッピング研究の基礎と最新動向
3. 学会等名 可視光半導体レーザー応用コンソーシアム 新規アプリ専門委員会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岩井大輔
2. 発表標題 プロジェクションマッピング研究の基盤技術と応用展開
3. 学会等名 日本色彩学会 視覚情報基礎研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岩井大輔
2. 発表標題 プロジェクションマッピング研究の最新動向
3. 学会等名 電子情報通信学会 パターン認識・メディア理解研究会 (PRMU) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩井大輔
2. 発表標題 プロジェクションマッピングを支える画像処理技術
3. 学会等名 JPC関西定例講演会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tatsuyuki Ueda, Daisuke Iwai, Kosuke Sato
2. 発表標題 IlluminatedFocus: Vision Augmentation using Spatial Defocusing
3. 学会等名 ACM SIGGRAPH ASIA 2019 Emerging Technologies (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩井大輔
2. 発表標題 高自由度照明技術としてのプロジェクションマッピング
3. 学会等名 2019年度第2回JLEDSセミナー (特定非営利活動法人LED照明推進協議会) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩井大輔
2. 発表標題 融合における映像技術の課題
3. 学会等名 照明学会 公開シンポジウム「映像との融合で広がる照明の可能性」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩井大輔
2. 発表標題 プロジェクションマッピング研究の最新動向
3. 学会等名 電気硝子工業会第52回技術セミナー(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩井大輔
2. 発表標題 プロジェクションマッピングによる身体拡張
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenta Yamamoto, Daisuke Iwai, Kosuke Sato
2. 発表標題 A Projector-Camera System Using Hybrid Pixels with Projection and Capturing Capabilities
3. 学会等名 International Display Workshops(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 影山雄太, 五十川麻理子, 岩井大輔, 佐藤宏介
2. 発表標題 ProDebNet: 畳み込みニューラルネットワークによる投影ボケ補償
3. 学会等名 第23回画像の認識・理解シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本健太, 岩井大輔, 佐藤宏介
2. 発表標題 撮像一体型有機ELデバイスを用いた画素一致プロジェクタ-カメラシステムの構築
3. 学会等名 第64回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI'20)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩井大輔
2. 発表標題 プロジェクションマッピングによる映像と照明の融合
3. 学会等名 2019年度第7回JLEDSセミナー (特定非営利活動法人LED照明推進協議会) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩井大輔
2. 発表標題 プロジェクションマッピングにおける3D技術活用
3. 学会等名 令和2年度第1回3D技術活用セミナー (京都府中小企業技術センター) (招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------