

令和元年5月23日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00267

研究課題名（和文）アクティブな実空間演出を可能にする動的プロジェクションマッピングに関する研究

研究課題名（英文）Dynamic Projection Mapping for Active Real Scenes

研究代表者

橋本 直己（Hashimoto, Naoki）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：70345354

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）：本研究では、動的プロジェクションマッピング（DPM）と呼ばれる、動いているものを対象とした映像投影技術を、より現実的な装置で、身近な空間を対象において実現するための手法を実現した。一般的なカメラだけを用いてDPMを実現するシステムや、衣服などの非剛体への隠れの少ない映像投影方式、さらには普段生活している室内空間を瞬時に没入空間に変える映像投影技術を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、これまでプロジェクションマッピングの制約を取り除き、多様な対象に対して身近なデバイスを使ったDPMを実現することを可能にする。これは、プロジェクションマッピング技術の普及のみにとどまらず、これまで受動的に体験されてプロジェクションマッピングを、ユーザの表現手段の一つとすることであり、新たなメディアの創出にもつながると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we have realized a method to realize an image projection technology called dynamic projection mapping (DPM) for moving objects with a more accessible device in a familiar space. In this research, we have developed a DPM system using only a general camera, an image projection method with little occlusion for non-rigid objects such as clothes, and an image correction technology that changes the room in which we usually live into an immersive space.

研究分野：バーチャルリアリティ

キーワード：動的プロジェクションマッピング 物体追跡 光学的補正 広域投影 マルチプロジェクション IRカメラ

# 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

当時、大型スクリーンへの映像投影に用いられてきたプロジェクタを使って、実物体に映像を投影する技術が注目されており、プロジェクションマッピングと呼ばれて、イベントやショーにおいて印象的な映像演出を実現していた。また、実物体に映像投影を行い、その外観（アピランス）を変化させることで、バーチャルな映像に実物体の実在感を融合して提示する、新たな映像提示手法としての期待も高まっていた。映像投影によって新たなアピランスを与えられた実物体は、複数のユーザが直接触って操作することが可能となり、また、それを使ったインタフェースやデザインシステム、娯楽サービスへの展開にも大きな期待が寄せられていた。

## 2. 研究の目的

本研究では、実時間応答が可能な Projector-Camera (ProCam) システムを実現することで、プロジェクタによって制御された光を用いて、動的な実物体の外観（アピランス）を変化させることを目的とする。これにより、コンピュータ内で生成されたバーチャル世界の一端を現実世界に具現化し、複数のユーザが直接手で触って体験することを可能にすると共に、それを応用した対話型ユーザインタフェースや設計システム、エンターテインメントの創出等を可能にする。具体的には、動的に位置姿勢変化する剛体物体に対して正確なプロジェクションマッピングを実現するシステムの構築と、多様な対象に対して見た目の変更を可能にする高精度なモデル化と映像投影手法の確立を目指す。

## 3. 研究の方法

(1) 動的なプロジェクションマッピングの実現のためには、まず初期位置姿勢を推定するために、入力映像と3次元位置姿勢の関係を機械学習によってモデル化する。学習から推定された初期姿勢を元に、近赤外カメラから入力される対象物体の輪郭情報を用いて3次元位置姿勢追跡を高速に実現する。近赤外カメラのみをセンサとして用いることで装置全体を簡略化し、また、入力画像のみから3次元を推定することで高速な追跡を実現する。

(2) 多様な対象の見た目を変更する手法の確立のためには、衣服のように変形する非剛体物体を対象としたプロジェクションマッピングにおいて、自身の体による自己遮蔽のない映像提示手法の検討や、室内で揺れ動くカーテンを映像投影面として利用可能にする映像補正手法の検討を行う。また、室内全体を映像提示空間に変えるための、ユーザビリティの高いシステム構築手法の提案や、その際に、対象となる壁面等の特徴を利用して提示映像の品質改善を行う。

## 4. 研究成果

(1) 動的プロジェクションマッピング (図1) のための初期位置推定を実現するために、機械学習を用いた推定手法を実現した。すでに機械学習は様々な領域で成果を挙げていたが、2次元画像から多様な3次元姿勢を推定することは依然として困難であった。そこで、本研究では3次元位置姿勢の学習及び識別を2層で行う Random Ferns を用いた高精度な位置姿勢検出手法を提案した (図2)。2層の Random Ferns では、1層目において大まかな姿勢方向を推定し、2層目で姿勢方向を絞って詳細の姿勢の識別を行なった。

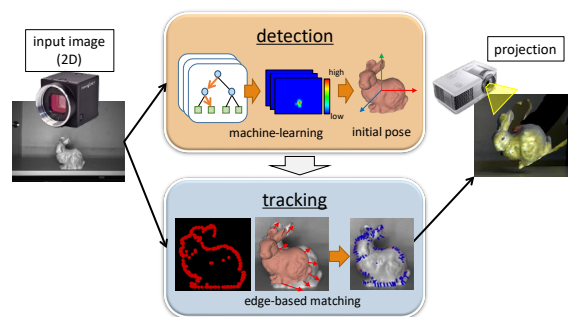


図1 システム概要

(2) 動的プロジェクションマッピングにおいて初期位置を推定した後、動く対象に合わせて映像を投影し続ける必要がある。初期位置推定の方式では十分な速度が得られないため、高速に対象を追跡することに主眼を置いた物体追跡アルゴリズムを構築した。対象のセンシングを行うデバイスにはいくつかの候補が存在するが、非接触かつマーカレスでの計測が望ましいため、通常の撮像素子を搭載したカメラに近赤外光透過フィルタを装着したIRカメラを用いた。これによって得られる輪郭画像と、事前に取得した対象物体の3次元モデルの輪郭をマッチングさせることで、尤もらしい位置姿勢を推定する戦略を選択した。

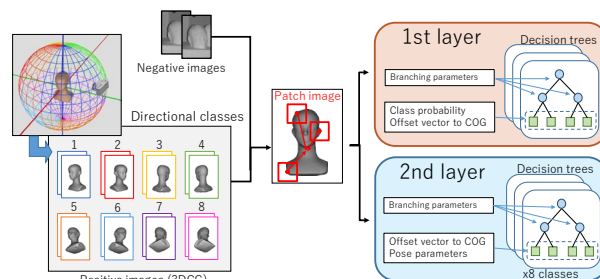


図2 2層の Random Ferns による学習

3次元モデルの輪郭点を、カメラから得られた輪郭画像上に射影し、法線方向に探索すること

対応点を探索する(図3)。この際、対象物体以外の輪郭による誤対応が多数発生するため、これを低減するための制約条件を適宜導入し、十分な数の良質な対応点を得ることに成功した。この対応点間の距離が最小になるように求めた位置姿勢を図3下に示す。以上の手法により追跡を行った結果に基づき、対象物体に対して適切なテクスチャ投影を行った様子を図4に示す。投映時には、追跡処理時間に加え、計測および投影装置の処理遅延が発生する。これらを補償するために動き予測を行い、可能な限り投影ずれの低減を行った。図4では白色マネキンに対して投影を行っているが、その他、自動車や建物の模型に対しても同様の投影が実現できることを確認した。

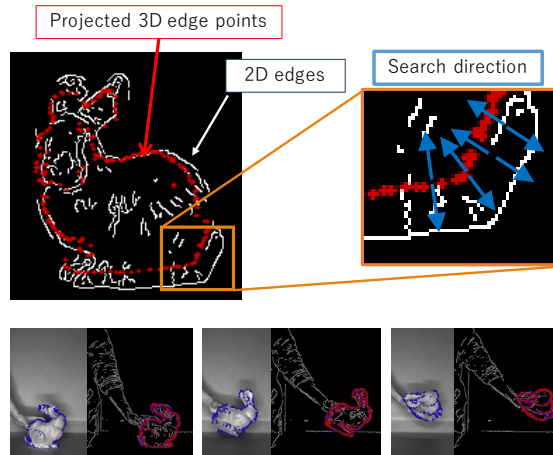


図3 輪郭を用いた物体追跡

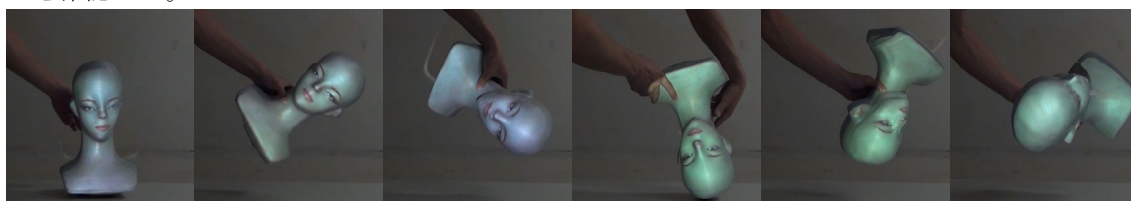


図4 把持されて動く物体に対して表情をプロジェクションマッピングした結果

(3) 動的プロジェクションマッピングの対象物体として一般的に用いられている剛体物体に加えて、衣服などに代表される非剛体物体への投影も、大きな期待を集めている。非剛体への投影には変形検出が必要であり、強い変形にも対応できるマーカベースの手法が有効であると考えられている(図5)。しかし、衣服を装着した者が動作を行った際に、自身の体の動きで衣服上のマーカを遮蔽してしまったり、姿勢変化によってマーカが付与されている部分がカメラ観察領域から外れてしまったりする状況が数多く発生し、衣服の変形状況を検出するのに必要な観測情報が十分に得られず、投影できない領域が生じてしまう問題がある。そこで本研究では、得られている投影対象の部分形状から全体の形状を推定し、逐次構築される形状モデルを手掛かりとしたマーカ検出を実現する手法を提案した。未検出状態のマーカ位置を、逐次推定した形状モデルを手掛かりに見当つけて探索することで、マーカ配列の変形や遮蔽を伴う中でのプロジェクションマッピングを実現した(図6)。

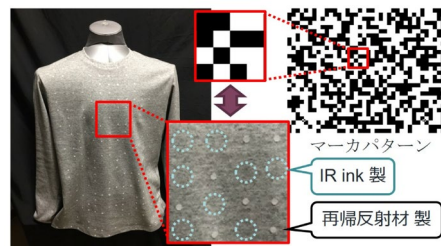


図5 2種類のマーカを付与した衣服

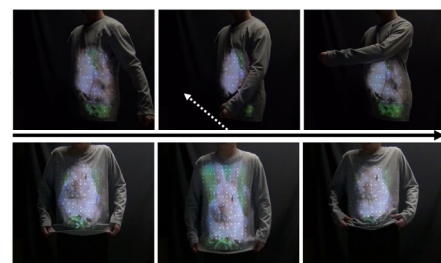


図6 遮蔽や変形する衣服への投影

(4) 動的プロジェクションマッピングの適用シーンを多様化する一環として、我々が普段生活する室内に着目した。中でも特に、映像を投影して大画面映像を楽しんだり、映像世界に没入したりするのに適している場として、比較的平面に近いカーテンを投影対象として選んだ。一般的なカーテンには、映像投影に影響を与える模様が扶養されていることに加えて、室内空調の影響などで絶えず緩やかに揺れ続けている。これは、模様を打ち消すための光学的補正における、カメラとプロジェクタ間における画素対応関係が変化を与え、通常の状態では補正が実施できない状況となる。

そこで本研究では、カーテンの揺れによる画素対応ずれが、エピソード幾何を利用することで直線上のずれに拘束される特徴を利用し、ずれ量候補に基づいて予測生成したカーテン面の反射率の尤もらしさに基づいて、画素間対応のずれ量推定をリアルタイムで実現した。これにより、揺れ続けているカーテンの模様を、カメラ観測によって打ち消しながら

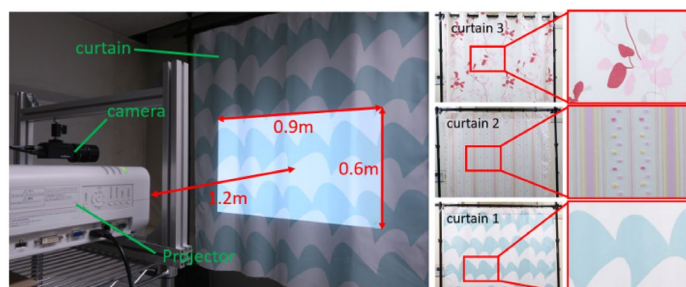


図7 揺れる模様付きカーテンへの投影環境



任意の映像を投影し続けることが可能になった。図7に示す実験環境において空調でカーテンを揺らし、その際に発生したアーチファクトの比較結果を図8に示す。

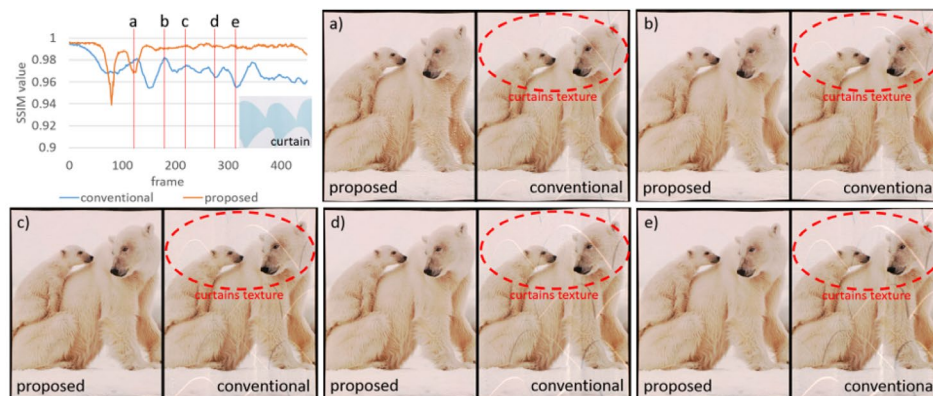


図8 カーテンの模様を打ち消しながら投影した際の提案手法と従来手法の比較

(5) 動的プロジェクションマッピングの適用シーンを多様化するもう一つのアプローチとして、複数台のプロジェクタを用いて室内を覆い尽くす映像空間を、簡単な手続きで実現する幾何補正手法を提案した。一般的なカメラではプロジェクタの投影状況を詳細に捉えられる一方、室内全域を捉えることは困難であった。そこで、魚眼レンズを装着したカメラを組み合わせることで、広域を同時に撮影可能な能力を追加した。これにより、複雑な複数台プロジェクタを用いた幾何補正処理を、数分で実現可能にした。幾何補正処理の概要を図9に示す。

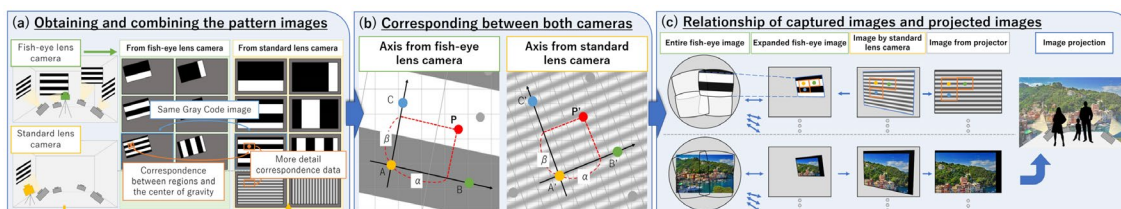


図9 魚眼レンズカメラを組み合わせた複数台プロジェクタを用いた幾何補正手法の流れ

図9の手法を用いて、実際の室内空間(図10)を対象として、6台のプロジェクタを組み合わせた投影空間を構築した(図11)。

図11より、室内に歪みのない大画面を実現することができた。通常レンズのみでは歪みを消しきれなかった部分においても、歪みなく補正できていることを主観的に確認した。グリッドを表示した補正精度確認や、Ground Truthとの比較を通して、十分に歪みを抑えられていることもかくにんできた。



(a) 投影空間の概観 (b) プロジェクタの投影領域  
図10 6台プロジェクタによる室内空間への投影環境

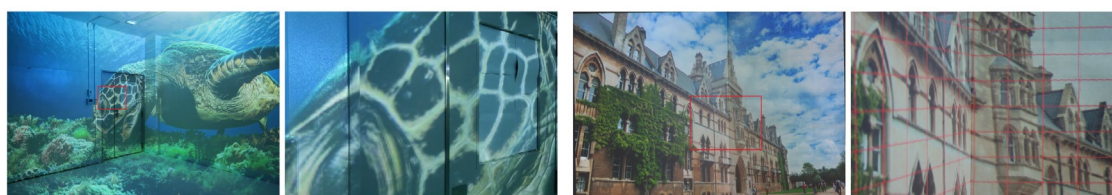


図11 6台プロジェクタによる室内での広域投影結果

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Naoki Hashimoto, Ryo Koizumi, Daisuke Kobayashi, Dynamic Projection Mapping with a Single IR Camera, International Journal of Computer Games Technology, 査読有, vol. 2017, Article ID 4936285, 2017  
doi:10.1155/2017/4936285  
<https://www.hindawi.com/journals/ijcgt/2017/4936285/>

[学会発表] (計 20 件)

- ① 舟久保 佑樹, 橋本 直己, RGB チャンネルの非独立性に基づくプロジェクタ応答特性のモ

- デル化、映像情報メディア学会技術報告、査読無、Vol.43、No.5、2019、347-350
- ② 三浦 健太郎、橋本 直己、広域映像投影における光学的補正の検討、映像情報メディア学会技術報告、査読無、Vol.43、No.5、2019、341-346
  - ③ 森久保 優輝、サンロレンゾ イウジン、橋本 直己、把持物体への Dynamic Projection Mapping のためのロバストな物体追跡手法、映像情報メディア学会技術報告、査読無、Vol. 43、No. 4、2019、35-38
  - ④ Kazuma Yoshimura、Naoki Hashimoto、Luminance compensation on swinging curtains、Proc. of SPIE 11049、International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT) 、査読有、2019
  - ⑤ Yuka Nakamura、Naoki Hashimoto、Geometrical correction for surrounded projection by simplifying a shape of a measured indoor space、Proc. of SPIE 11049、International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT) 、査読有、2019.
  - ⑥ 宮崎 大希、橋本 直己、空間型拡張現実感のための非剛体形状推定に基づくマーカ検出に関する一検討、映像情報メディア学会技術報告、査読無、Vol.42、No.44、2018、17-20
  - ⑦ Yuki Morikubo、Eugene San Lorenzo、Daiki Miyazaki、Naoki Hashimoto、Tangible Projection Mapping: Dynamic Appearance Augmenting of Objects in Hands、Proc. of ACM SIGGRAPH Asia 2018、Emerging Technologies、2018、査読有、Article No.14
  - ⑧ 森久保 優輝、橋本 直己、動的プロジェクションマッピングのための輪郭に基づいた位置姿勢推定手法の精度評価、第 23 回バーチャルリアリティ学会大会論文集、査読無、2018、11D-6
  - ⑨ Daiki Miyazaki、Naoki Hashimoto、Dynamic Projection Mapping onto Non-rigid Objects with Dot Markers、Proc. of IWAIT 2018、査読有、2018、C4-3
  - ⑩ Yuka Nakamura、Naoki Hashimoto、Easy Multi-Projection System over a Whole Indoor Space、Proc. of IWAIT 2018、査読有、2018、D2-4
  - ⑪ Yuki Morikubo、Naoki Hashimoto、Edge-based Object Tracking for Dynamic Projection Mapping、Proc. of IWAIT 2018、査読有、2018、A4-4
  - ⑫ 森久保 優輝、橋本 直己、動的プロジェクションマッピングのための輪郭に基づいた位置姿勢推定の高精度化、映像情報メディア学会 2017 年冬期大会講演予稿集、査読無、2017、21A-4
  - ⑬ 中村 友香、橋本 直己、複数台プロジェクタを用いた広域投影における幾何補正精度に関する検討、映像情報メディア学会 2017 年冬期大会講演予稿集、査読無、2017、21A-3
  - ⑭ 宮崎 大希、橋本 直己、過不足のない非剛体物体への動的プロジェクションマッピング、映像情報メディア学会 2017 年冬期大会講演予稿集、査読無、2017、21A-2
  - ⑮ Yuki Morikubo、Naoki Hashimoto、Marker-less real-time tracking of texture-less 3D objects from a monocular image、Proc. of SIGGRAPH Asia 2017、査読有、Posters、2017、Article No.50
  - ⑯ Yuka Nakamura、Naoki Hashimoto、Simple and Accurate Geometric Correction with Multiple Projectors、Proc. of SIGGRAPH 2017、査読有、Posters、No.86、2017
  - ⑰ Naoki Hashimoto、Koki Kosaka、Continuous Photometric Compensation for Deformable Objects、Proc. of SIGGRAPH 2017、査読有、Posters、No.72、2017
  - ⑱ Naoki Hashimoto、Ryo Koizumi、Dynamic Projection Mapping with a Machine-Learning and Edge-based Object Tracking、Proc. of IWAIT 2017、査読有、3B、2017
  - ⑲ Naoya Niwata、Naoki Hashimoto、Dynamic Projection Mapping for Deformable Objects with a High-Speed Stereo Camera、Proc. of IWAIT 2017、査読有、3B、2017
  - ⑳ Haruka Fujisawa、Naoki Hashimoto、Dynamic Projection Pose Estimation for Hand-held Projection Mapping、Proc. of IWAIT 2017、査読有、3B、2017

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 2 件)

名称：物体検出装置、および物体検出方法

発明者：橋本 直己、小林 大祐

権利者：国立大学法人電気通信大学

種類：特許

番号：特願 2016-101917

出願年：平成 28 年

国内外の別：国内

名称：画像処理装置、画像処理方法および画像処理プログラム

発明者：橋本 直己、河阪 幸機

権利者：国立大学法人電気通信大学

種類：特許

番号：特願 2017-146103

出願年：平成 29 年

国内外の別： 国内

※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、研究者個人に帰属されます。