

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330222

研究課題名(和文) 陰影アニメーションによる立体提示の実用化に向けた動的なプロジェクタカメラ系の較正

研究課題名(英文) Adaptive calibration of the projector camera system aimed to commercialize of the 3D representation technique on the printed media by the shading animation projection

研究代表者

天野 敏之 (Amano, Toshiyuki)

和歌山大学・システム工学部・准教授

研究者番号：60324472

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：プロジェクタカメラ系を実用化するためには、コストの低減、扱いやすさと制御の頑強性の改善が重要である。本研究課題では、Shading Illusion技術の実用化を目標として、プロジェクタカメラ系の幾何学較正と光学較正を動的に実現する方法を明らかにした。また、デモ機を作製してSiggraph AsiaのE-techにてShading Illusionを応用した表情が変化する顔写真(Coded Facial Expression)の展示を行った。さらに、動的な較正の研究で得られた知見から演出技術を確立し、展示会での工芸品の演出を行った。また彫像へのプロジェクションマッピングのイベントを実施した。

研究成果の概要(英文)：Reduction of the cost, easiness, and robustness of the system are important for practical use of the projector camera system. This research explored the adaptive calibration methods of geometry and photometry for the projector camera system to commercialize of the Shading Illusion technique. In addition, a new demonstration system was designed and an application of the Shading Illusion technique, Coded Facial Expression which is a facial expression manipulation technique on the printed photograph, was exhibited in the Siggraph Asia 2016 Emerging Technologies. Furthermore, a novel lighting technique was established as a by-product of adaptive calibration technique and it was applied for the installations of an exhibition of artwork and projection mapping of the Magokoro statue in Mitsukoshi department store.

研究分野：情報学

キーワード：バーチャルリアリティ 拡張現実感 プロジェクタカメラ系 光学較正 幾何学較正

## 1. 研究開始当初の背景

空間型拡張現実感 (Spatial Augmented Reality 以降 SAR) は、光投影によりヘッドマウンテッドディスプレイなどのデバイスを介さずに直接的に現実空間へ働きかけることのできる拡張現実感技術である。研究代表者は SAR の分野において、プロジェクタとカメラを用いた光学フィードバック系(プロジェクタカメラ系)によって現実世界の見かけを操る「見かけの制御」を提案している。また、平成 23 年度～平成 25 年度にかけて実施した若手研究(B)では、符号化印刷とプロジェクタカメラ系によって、図 1 に示す印刷媒体上で陰影アニメーションによる立体提示手法 Shading Illusion を提案し、国際ワークショップ Procams2012 では Honorable Mention Award を受賞した。

符号化印刷は 3D コンテンツの立体形状を法線マップとして印刷媒体にカラー印刷で埋め込む方法である。Shading Illusion では、この符号化印刷で埋め込まれた法線マップを計測画像より復元し、3D コンテンツに応じた陰影アニメーションを見かけの制御によって印刷媒体上に提示することで利用者に立体知覚を促す。

関連研究としては表示媒体に特殊な細工を施すことによって平面物体上に描かれたコンテンツの陰影を変化させる方法が提案されている。Alexa らは、高さが最適化された 1mm 角程度の微細な四角錐をレリーフ上に彫刻加工することで、照明方向によりレリーフの陰影を変化させる立体提示技術を提案している。また、Malzbender らは、微細な凹球面ミラーをアレイ状に配列した反射板にコンテンツに合わせて生成したマスクフィルムを重ねることで、照明方向に応じて陰影を変化させる立体提示手法を提案した。

しかし、いずれの方法も表示媒体の製造コストが高い。また、薄くフレキシブルなシートとして実現することは困難である。従って、雑誌や書籍などへの応用を想定すると、研究代表者が提案した Shading Illusion の方が有利である。ただし、Shading Illusion では陰影提示を行うために照明装置としてプロジェクタカメラ系が必要であり、実用化するためにはプロジェクタカメラ系の扱いやすさとコスト、制御の頑強性が必要とされていた。

## 2. 研究の目的

Shading Illusion を実用化するためには、プロジェクタカメラ系の扱いやすさの向上、低コスト化と環境照明変化に対して頑強な見かけ制御の実現が必要である。そこで、本研究では、

**S1. 制御対象の移動に対して動的にプロジェクタカメラ系の幾何学較正を行う手法。**

**S2. 環境照明や制御対象の位置変化に対して動的に光学較正を行う方法。**

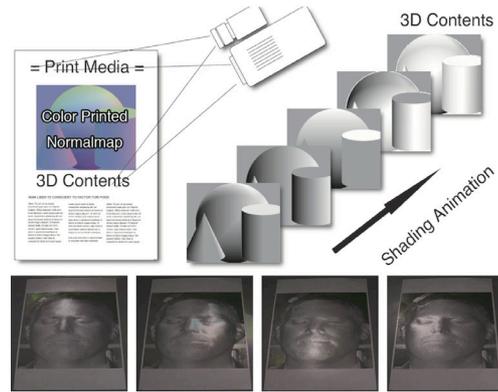


図 1 Shading Illusion

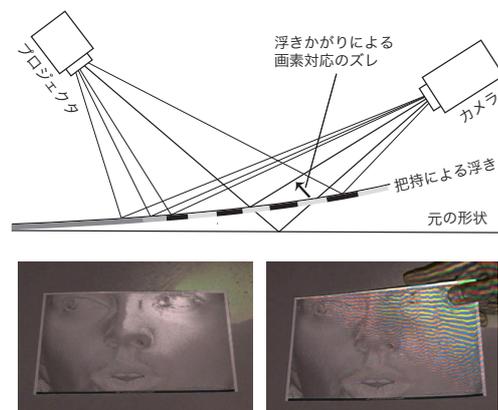


図 2 アーチファクトの発生

を明らかにすることを研究の目的とした。

## 3. 研究の方法

### (1) 制御対象の移動に対する動的なプロジェクタカメラ系の幾何学較正

較正で算出された投影画像と撮影画像の画素対応と実際の画素対応が異なっている状態でプロジェクタカメラフィードバックを行うと、制御が破綻して図 2 に示すようにアーチファクトが発生する。

較正パターンを逐次投影し、プロジェクタとカメラの幾何学的な較正を行えばアーチファクトを解消することはできるが、キャリブレーションパターンの投影によりフィードバックが中断される。そのため、連続的なアニメーション提示ができない。

そこで、本研究では動的なプロジェクタカメラ系の幾何学較正を行う手法を確立するために、以下の二つのアプローチについて試みる。

**A1. 高速撮影を用いた動的な幾何学較正手法の確立**

**A2. アーチファクトを利用した動的な幾何学較正の実現**

## (2) 環境照明や制御対象の位置変化に対する動的な光学較正

プロカム系と制御対象の位置関係や環境照明の明度や色彩の変化に対応するために、見かけの制御を運用しながら動的に光学較正を行う方法について検討する。

動的な光学較正は幾何学較正と同様に逐次較正のためのパターンをプロジェクタから投影することで実現することができる。しかし、光学較正では環境照明の強度計測が必要であり、そのためには投影光を消灯しなければならない。したがって、そのままでは較正のために見かけの制御を時々停止しなければならないという問題が発生する。

そこで、この問題を解決するために、

### B1. DLP プロジェクタの投影シーケンスを用いた光学応答計測

を検討する。また、S1 で実現される動的な幾何学較正で取得されるピクセルマップによって制御対象までの距離を算出することで、

### B2. C2P マップを用いた動的な光学較正

を実現する。

以上のような適応的な光学較正を実現した後に、一般家庭での利用シーンを想定した、

### B3. デモ機の試作と評価

を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 平成 26 年度の研究成果

平成 26 年度には、「A1. 高速撮影を用いた動的な幾何学較正手法の確立」と「A2. アーチファクトを利用した動的な幾何学較正の実現」に取り組んだ。A1 では、DLP プロジェクタのミラーフリップシーケンスと同期した、高フレームレートカメラから構築されるシステムを構築して検討した。しかし、ミラーフリップパターンを安定して検出することは困難であることから A2 のアプローチに注力した。

アーチファクトとは、プロジェクタカメラ系でフィードバックを行う際に、あらかじめ較正で求めた投影画像 P と撮影画像 C の幾何学的な画像の対応関係 (P2C マップ) と実際の対応関係にずれがある場合に発生する模様である。A2 ではこの模様から動的に幾何学較正を行う方法の確立を試みた。A2 の検討の結果、P2C マップとのズレによって発生する縞模様状のアーチファクトの周期はズレの大きさに関係する、また、縞模様はずれの方向に伝搬することがわかった。この性質に着目し、投影画像と撮影画像で縞模様の画像特徴のマッチングにより較正を行う方法について検討した。

様々な検討の結果、P の複数の画素と一つの C の画素間での対応関係を逐次最小二乗法を利用することで連続的に求めることがで



図 3 タペストリ「月光」の質感操作



図 4 Coded Facial Expression



図 5 日本橋三越本店 まごころ像プロジェクションマッピング

きることを発見した。また、シミュレーションによって連続的に P2C マップのズレ検出ができることがわかった。

### (2) 平成 27 年度の研究成果

平成 27 年度には、「B1. DLP プロジェクタの投影シーケンスを用いた光学応答計測」と「B2. C2P マップを用いた動的な光学較正」について取り組んだ。

B1 の検討の結果、提案手法により撮影画像から投影光の成分を除去した画像が得られることを実験で確認したが、高品質な結果を得るためには 5~10 フレーム程度の蓄積が必要であり、この手法の採用には応答性の改善

が必要であることが分かった。そこで、3D プロジェクタの時分割多重投影機能を応用することで、環境照明計測と環境照明に影響されない投影制御を実現した。

B2 に関しては、投影のずれによって発生する反射率推定の誤りを評価することでずれ量を求め、ずれ検出のためのパターンを投影画像に埋め込むこと無く C2P マップを補正する方法を考案した。

投影ずれが生じている状況では反射率推定に誤差が発生する。その結果、投影が時間的に明滅する。平成 27 年度には、この状況を積極的に活用した演出への応用技術も確立し、12 月には国立情報学研究所の佐藤いまり教授の協力のもと、伝統工芸士とのコラボレーションにより工芸品への応用を日本橋三越本店にて展示した(図 3)。この様子は、NHK ニュース(「西陣織+光」で美を表現、関東 NHK 総合、おはよう日本、ひるまえほっと)や Web サイトなどで報道された。

また、平成 27 年度には、Johannes Kepler Universitäts-Linz を訪れ、研究協力者である Prof. Oliver Bimber に諸課題についてアドバイスを頂いた。

### (3) 平成 28 年度の研究成果

平成 28 年度には、主に「B2. C2P マップを用いた動的な光学較正」と「B3. デモ機の試作と評価」に取り組んだ。

B2 については、投影のずれによって発生する反射率推定の誤りを評価することでずれ量を推定し、閉ループ処理においてこのずれ量に基づきピクセルマップを修正することで、動的に幾何学較正を行なう手法を実現した。また、B2 については、無印刷状態の印刷媒体の白色と撮影画像の色彩との齟齬をオンライン処理により較正する方法と、印刷媒体の蛍光成分を考慮したより高度な反射率推定手法についても提案した。

B3 については、DLP 方式の小型プロジェクタと小型カメラを組み合わせたモバイルのプロジェクタカメラ系を試作し、Shading Illusion 技術の応用として符号化印刷を用いた表情の変化する顔写真 Coded Facial Expression を SIGGRAPH ASIA 2016 の E-Tech にて展示した(図 4)。その他には、富士通ソーシャルサイエンスラボラトリ他の協力により、日本橋三越本店に鎮座するまごころ像(1960 年、佐藤玄々作)への演出を行い、本研究に関連する研究成果の評価を行った(図 5)。この様子は、日刊工業新聞、日本経済新聞、朝日新聞などの紙面や NIKKEI NET、産経ニュース、朝日新聞デジタル、日本橋経済新聞などの 50 以上のニュースサイト、MX テレビなどで紹介された。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

- ① 天野敏之、裕人礫翔、プロジェクションマッピングによる質感知覚の操作と箔工芸品の美の表現、映像情報メディア学会誌、査読無、71(1)、pp.30-35、2017.1.
- ② 島名功、天野敏之、牛田俊、プロジェクタカメラ系による全周囲の見かけの操作、日本バーチャルリアリティ学会論文誌、査読有、Vol.21、No.2、pp.363-371、2016.6.
- ③ 河野邦起、牛田俊、天野敏之、プロジェクタとカメラを用いた見かけの制御に対するむだ時間補償アルゴリズムの提案、システム制御情報学会論文誌、査読有、Vol.29、No.2、pp.43-50、2016.2.
- ④ 天野敏之、プロジェクタカメラ系を用いた光沢感と透明感の実時間操作、映像メディア学会誌、査読有、Vol.68、No.12、pp.J528-J533、2014.12.
- ⑤ 天野敏之、質感プロジェクションマッピング、バーチャルリアリティ学会誌、査読無、Vol.19、No.2、pp.14-17、2014.6.

[学会発表](計 22 件)

- ① I. Shimana, T. Amano, Separation of Reflective and Fluorescent Components using the Color Mixing Matrix, Virtual Reality (VR), 2017 IEEE, 2017.3, LA, USA.
- ② T. Amano, Coded Facial Expression, SIGGRAPH ASIA 2016 Emergency Technology, 2016.12, Macao.
- ③ 天野敏之、プロジェクタカメラ系の非安定平衡状態を活用した工芸品演出試み、第 2 回 質感のつどい公開フォーラム、2016.11、千葉。
- ④ 天野敏之、プロジェクタカメラ系による見かけの操作とその応用、公開セミナー「質感とプロジェクション」、2016.9、東京。
- ⑤ 島名功、天野敏之、プロジェクタとカメラによる蛍光を考慮した分光画像解析、画像の認識・理解シンポジウム 2016 論文集、pp.1-2、2016.8、浜松。
- ⑥ 南研介、天野敏之、ライトフィールド投影による見かけの BRDF 制御、画像の認識・理解シンポジウム 2016 論文集、pp.1-2、2016.8、浜松。
- ⑦ 塚本昌紀、天野敏之、プロジェクタとカメラを用いた見かけの制御におけるずれ補正、画像の認識・理解シンポジウム 2016 論文集、pp.1-2、2016.8、浜松。
- ⑧ 天野敏之、光学フィードバックを用いた見かけの質感操作および構造色提示、日本光学会光設計研究グループ 第 59 回研究会、2016.7、京都。
- ⑨ 松本慎太郎、澤本志織、天野敏之、空間拡張現実感を用いた近視や遠視に対する視覚補助の検討、日本色彩学会視覚情報基礎研究会 第 27 回研究発表会、2016.6、東京。

- ⑩ 玉置恭介, 山崎赳史, 天野敏之, 符号化印刷とプロジェクタカメラ系を用いた顔写真の表情操作, 日本色彩学会視覚情報基礎研究会 第 27 回研究発表会, 2016. 6, 東京.
- ⑪ 天野敏之, プロジェクションによる適応的な質感操作から意図の拡張へ, 画像センシングシンポジウム SSII2016, 2016. 6, 横浜.
- ⑫ 石川貴史, 前田擁平, 池田佑輔, 牛田俊, 天野敏之, カメラとプロジェクタからなる光学系を用いた見かけの制御系の性能評価方法の提案, 第 60 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2016. 5, 京都.
- ⑬ R. Akiyama, G. Yamamoto, T. Amano, T. Taketomi, C. Sandor, H. Kato, Appearance Control in Dynamic Light Environments with a Projector-Camera System, 2016 IEEE VR 2016 Workshop on Perceptual and Cognitive Issues in AR (PERCAR), pp. 1-6, 2016. 3, South Carolina, USA.
- ⑭ 山本 豪志朗, 天野 敏之, 書作品への光投影による作者意図の拡張表現の試み, 映像表現・芸術科学フォーラム 2016, 映像学技報, pp. 9-12, 2016. 3, 東京.
- ⑮ T. Amano, K. Minami, Structural Color Display on Retro-reflective Objects, ICAT - EGVE - International Conference on Artificial Reality and Telexistence - Eurographics Symposium on Virtual Environments 2015, pp. 37-44, 2015. 10, 京都.
- ⑯ S. Hiura, H. Nagahara, D. Iwai, T. Amano, Tutorial, T2. Computational Imaging and Projection, 14th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR2015), 2015. 9, 福岡.
- ⑰ 河野邦起, 牛田俊, 天野敏之, 現実の環境に適した見かけの制御アルゴリズムの提案, 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会 若手研究発表会, 2015. 1, 大阪.
- ⑱ T. Amano, I. Shimana, S. Ushida, Kunioki Kono, Successive Wide Viewing Angle Appearance Manipulation with Dual Projector Camera Systems, ICAT-EGVE - International Conference on Artificial Reality and Telexistence - Eurographics Symposium on Virtual Environments 2014, pp. 49-54, 2014. 12, Bremen, Germany.
- ⑲ 天野敏之, プロジェクタカメラ系を用いた連続的な見かけの操作, 大阪府立大学・和歌山大学工学研究シーズ合同発表会, 2014. 11, 大阪.
- ⑳ 天野敏之, 島名功, 牛田俊, 河野邦起, プロジェクタカメラ系の協調制御による全周囲での見かけの操作, 日本バーチャリアリティ学会第 19 回大会論文集, pp. 458-461, 2014. 9, 名古屋.

㉑ 天野敏之, 同軸プロジェクタカメラ系を用いた連続的な質感操作, 視覚情報基礎研究会, 2014. 9, 東京.

㉒ T. Amano, Projection Center Calibration for a Co-located Projector Camera System, Proc. of CCD 2014 Workshop on CVPR2014, pp. 443-448, 2014. 6, Ohio, USA.

[図書] (計 2 件)

① 蔵田武志, 清川清監修, 大隈隆史編集, 天野敏之ほか 27 名著, AR (拡張現実) 技術の基礎・発展・実践, 全 390 ページ, 2.2 節 (20 ページ) を担当, 科学技術出版, 2015. 9.

② 天野敏之, 光沢&透明感! 物体の見え方を変化させる照明, Interface2015 年 5 月号, pp. 101-110, 全 178 ページ, CQ 出版, 2015. 3

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

研究紹介ホームページ

<http://www.wakayama-u.ac.jp/~amano/sar.html>

西陣織に光を当て美しさ表現する展示会 (アーカイブ)

<http://archive.fo/QQPMW>

Toshiyuki Amano, Coded Facial Expression  
<https://sa2016.siggraph.org/en/attendees/emerging-technologies?view=event&eid=25>

天野敏之, 富士通 SSL, 凸版印刷, まごころ像プロジェクションマッピング

<http://mitsukoshi.mistore.jp/store/nihoimbashi/event/projectionmapping/index.html>

展示会およびデモンストレーション

天野敏之, 適応的プロジェクションマッピングによる物体の見た目の操作, イノベーション・ジャパン 2015 ~大学見本市&ビジネスマッチング~, JST, NEDO 主催, Aug. 27-28, 2015, 東京ビッグサイト.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

天野 敏之 (AMANO, Toshiyuki)

和歌山大学・システム工学部・准教授

研究者番号: 60324472