投影型 AR と 3D フォトグラメトリの統合による文化財保存のための撮影地点指示

夏 雪[*1]　宍戸 英彦[*2]　松井 敏也[*3]　北原 格[*2]

A Method to Indicate Shooting Points for Heritage Preservation by Integrating Spatial AR and 3D Photogrammetry

Xue Xia [*1]　Hidehiko Shishido[*2]　Toshiya Matsui[*3]　Itaru Kitahara[*2]

Abstract --- 文化財の知識を有する専門家によって撮影された損壊箇所や要補修箇所などの画像データは保存計画・活動にとって重要な情報源であるが、文化財は国内外に数多く存在し、また、その状況は刻々と変化するため、有識者が全ての文化財をくまなく撮影することは困難である。本研究では、文化財を訪れる見学者を観測作業の労働資源とすることで上述した問題を解決する方法を提案する。見学者によって撮影された文化財の画像群に 3D フォトグラメトリ技術を適用し文化財のジオラマ模型を生成する。有識者は、投影型 AR を用いてジオラマ模型上に追加撮影を希望する地点を示し、見学者はその指示された地点を撮影する。撮影された画像群は、3次元情報に基づいて時空間データベース化され、有識者による補修・損壊による注目箇所の時系列変化の把握を支援に用いられる。

Keywords: 投影型 AR , 3D フォトグラメトリ, 文化財保護

1 はじめに

３次元の推定や提示などの３次元映像メディアが様々な場面で活用されつつある。文化財保存の分野でも、調査・保護を目的として画像[1][2][3]やレーザレンジファインダなどのセンサ[4][5][6]を用いた3次元形状計測や、拡張現実を用いた文化遺産の復元シミュレーションなどの研究事例が報告されている[7]。

文化財の3次元情報収集には、高精度な3Dスキャナを用いることが多いが、機器を作動する電源の施設、三脚などの設置が可能な広い作業スペース、機器の校正や操作のためのトレーニングが必要であること、撮影時間が長時間化しやすいことから、観測対象が限定され、観測頻度も低くなるという課題が存在する。また、保存活動が必要な文化財は世界各地に数多く点在するため、それら全てにおいて3Dスキャナのような機材を用いた観測を頻繁に実施することは現実的ではない。そのため、Structure from Motion（SfM）に代表される多視点画像情報から3次元形状を復元する 3D フォトグラメトリを用いた計測により、文化財の保存活動に資する映像メディア技術の研究開発に注目が集まっている [3]。

クラウドソーシングやカメラ付き携帯型端末の普及を背景に、文化財保存に必要なデータ収集作業のコストを、その見学者を巻き込んで解消する試みが報告されている [8]。 見学者は、文化財見学の参考となる情報受取りをインセンティブとして、指定された箇所の画像情報を撮影し、見学後インターネットを介してデータサーバに収集した情報を提供する、といったインタラクティブ性の高いシステムの開発を目指している。文化財には多くの見学者が訪れるため、このシステムの活用により、文化財の専門家が現地に赴くことなく、保存に必要な情報の入手が可能となり、その結果、データの量的な問題を解決する可能性を秘めている。

一方で、データの質的には、依然以下二つの問題が存在する。一つ目は、撮影者が保存活動に有益な箇所に関する情報を有していないと保存に有益な画像データを集め難いことである。二つ目は、撮影者が3次元画像処理の知識に精通してないと、画像からの3次元情報復元が難しいことである。一度の画像撮影で観測可能な範囲はカメラの画角によって規定されるため、文化財のような大規模物体の3次元計測には、多数回の撮影が必要になる。さらに、画像撮影地点が特定箇所に集中すると十分な運動視差が得られないため、3次元復元精度が低下する。一般的な文化財の見学者が上記二つの知識を有するケースはそれほど多くないと考えられるため、見学者によって収集される画像データの質を向上させる工夫が必要であろう。

*1 筑波大学 大学院エンパワーメント情報学プログラム
*2 筑波大学 計算科学研究センター
*3 筑波大学 芸術系
*1 PhD Program in Empowerment Informatics/ University of Tsukuba
*2 Center of Computational Sciences/ University of Tsukuba
*3 Faculty of Art & Design/ University of Tsukuba

本稿では、投影型 AR（Spatial Augmented Reality: SAR）と3Dフォトグラメトリを統合する撮影指示方式を提案することで、文化財や画像処理に関する専門知識を有さないユーザーによる適切な画像撮影を実現し、文化財保存に資する画像データを収集する取り組みについて述べる。

2 関連研究

これまでにも文化財保存修復の専門家による文化財のデジタルアーカイブ化が継続的に行われている [1] [4] [6] [9] 。その中では高精度 3D スキャナを用いた計測作業の煩雑さが問題とされていたが、コンピュータビジョン技術の発展に伴い、多視点画像情報から3次元形状を復元する 3D フォトグラメトリの導入が進んでいる。3D フォトグラメトリの代表的なアプローチとしては、撮影した画像群に対してオフライン処理する SfM[10]と、撮影しながら３次元情報をオンライン推定する SLAM（Simultaneous Localization And Mapping） [11] [12] が知られている。 処理タイミング以外の差異としては、多くの SLAM は事前キャリブレーションによってカメラパラメータが既知であることを前提としているのに対し、SfM はカメラパラメータが未知のカメラで撮影された画像群に対して適用可能であることがあげられる。本研究では、様々な見学者が様々なカメラで撮影した画像群を対象としており、カメラのパラメータが既知という前提条件は現実的はないため、SfM を採用する。

従来のデジタルアーカイブの取り組みでは、その展示法にも検討の余地があった。具体的には、アーカイブデータの表現能力が現実物体を十分に表現しきれていないこと、閲覧は専用アプリケーションで行うのが一般的で、提示形態のインタラクティブ性やエンターテインメント性が低いため幅広いユーザへの普及が進んでいないなどが問題であった。3次元画像処理の進歩により、観察物体の形状に加え、表面反射特性の計測も可能になりつつある[13][14][15][16]。今後は、形状だけでなく色彩や質感なども再現も可能な高度な文化財アーカイブ展示が実現されるであろう。本研究では、直感的で表現力の高い展示法として投影型 AR に着目している[17][18][19]。

大規模かつ複雑な形状の物体を対象としたSARシステムの研究が盛んに行われている[17][20][21]。Xie [22]は、図 1 に示すように、任意形状の3次元スクリーンを対象とした PRO-CAMS（Projector Camera System）のキャリブレーション法を提案した。モバイルカメラを用いた投影スクリーン物体の３次元モデル生成と、Lin [23]の構造化パターン投影法による投影スクリーン物体を介したプロジェクタとカメラ間の高精度な対応点探索の実現により、3次元投影物体とプロジェクタの位置姿勢を自動的に推定する。本研究では、Xie のキャリブレーション法を導入することにより、複雑な3次元形状を有する文化財を対象とした投影型 AR を実現する。

AR を用いた遠隔作業指示システムの研究が行われている[24][25]。作業物体の上、もしくは、近傍に作業指示を重畳することにより、作業内容を直感的にユーザに伝えることができるため、作業効率が向上することが報告されている。作業指示インタフェースについても活発な研究が行われている。Ssin [26]は、リング状のタンジブル・ユーザー・インターフェースを用いて時空間情報を操作することで、複数の位置情報データセットを効率的に探索する AR デスクトップシステムを考案している。

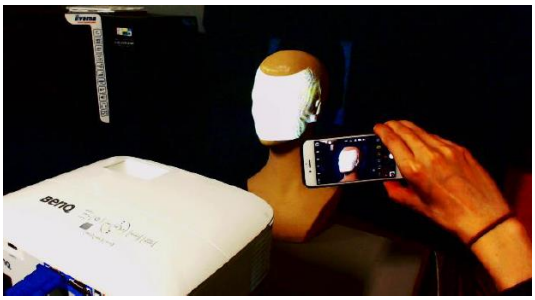

図1 PRO-CAMS の構成
Fig.1 Configuration of PROCAMS

3 投影型 AR を用いた撮影地点指示システム

本節では、図 2 に示す投影型 AR と 3D フォトグラメトリを統合することによって観測画像データの質を向上させる方式について述べる。

文化財の多視点画像群に3Dフォトグラメトリ技術を適用し文化財の３次元形状を復元する。３次元モデルを 3D プリンタなどで出力し、ジオラマ模型を造形する。

Xie の PRO-CAMS キャリブレーションによってジオラマ模型を投影スクリーンとした投影型 AR システムを構築する。多視点画像から生成したテクスチャをマッピングした3次元モデルのレンダリング結果をジオラマ模型に投影する。

文化財の専門家が3次元CGモデル上で観察に必要な撮影箇所を指定すると、その領域がハイライトされ、レンダリング結果が投影型 AR によって見学者に提示（可視化）される。見学者はその指示に従い文化財の指定地点に移動し、撮影を実施する。AR 提示を用いることにより、撮影作業指示の直感的かつ正確な理解が可能となり、収集画像データの品質向上が実現される。

追加撮影された画像群に 3D フォトグラメトリ技術を適用し各カメラのカメラパラメータを推定する。収集した全画像群は、撮影時刻・カメラパラメータなどの情報と共に時空間データベース化され、有識者による文化財の時系列変化観察などに活用される。

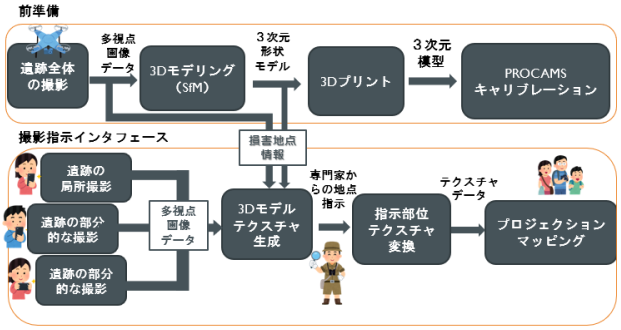

図2 投影型 AR と 3D フォトグラメトリの統合による文化財保護のための撮影地点指示

Fig.2 Projection Mapping and 3D Photogrammetry to Indicate Shooting Locations for Cultural Heritage Protection

4 文化財の3次元モデル生成とジオラマ造形

本節では、ドローンを用いた文化財の俯瞰多視点画像撮影と、画像群から3次元メッシュモデルを生成し、ジオラマ模型を造形する処理について説明する。

被写体（文化財）の局所的な特徴を損なわず、全体を網羅的に撮影するためにドローンを用いて多視点画像を撮影する。本研究では、静岡県静岡市の駿府城において撮影実験を実施した。小型ドローン（DJI 社製 Mavic Mini）を用いて 1920 画素×1080 画素の多視点画像を撮影した。撮影対象は大規模施設であるため、図 3 に示すように撮影エリアを6回に分けて撮影した。

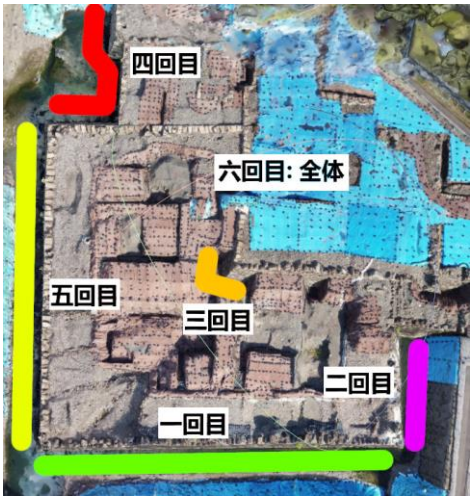

図3 駿府城における撮影実験

Fig.3 Photography experiment at Sunpu Castle

4回目撮影エリアで撮影した画像の一例を図 4 に示す。撮影した多視点画像に SfM を適用することで疎な3次元点群が復元される。カメラのパラメータは SfM から得られ、PMVS アルゴリズムを用いて高密度な点群を復元する。密な3次元点群データに対してメッシュを貼ることでサーフェスを生成する。以上の処理によって、図 5 に示す文化財の3次元モデルが生成される。なお、3次元形状推定処理には SfM ソフトウェア Pix4D を使用した。3D プリンタ（FLASHFORGE 社 Guider2 PLA1）を用いて、図 6 に示す3次元モデルのジオラマ模型を造形する。プロジェクションマッピングの視認性を高めるために、ジオラマ模型にモデルオーバーコート処理（3D プリンタ用コート剤の塗布）を施す。

図4 多視点画像データの一例

Fig.4 Example of multi-view image data

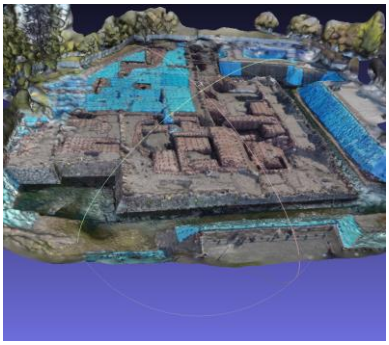

図5 SfM で生成した3次元モデル

Fig.5 3D model generated by SfM.

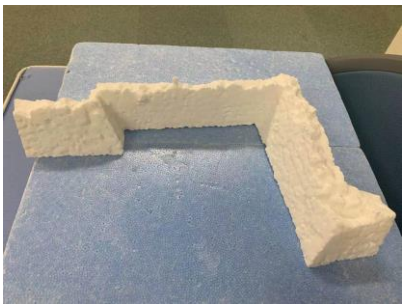

図6 3D プリンタで造形したジオラマ模型

Fig.6 Diorama model formed by 3D printer

5 投影型 AR システムの構築

本節では、図 6 に示すジオラマ模型に PRO-CAMS を用いて撮影画像を投影する処理について述べる。

任意3次元形状を対象とした PRO-CAMS を用いて、前節で造形した模型へのプロジェクションマッピングを行う。プロジェクタは EPSON 社製 EB-2142W（解像度：1280 画素×800 画素）を使用した。図 7 に示す構造パターン[23]を投影対象（模型）に投影しながら、モバイルカ

メラで模型を撮影することで、プロジェクタとジオラマ模型との3次元的な位置関係を推定する。

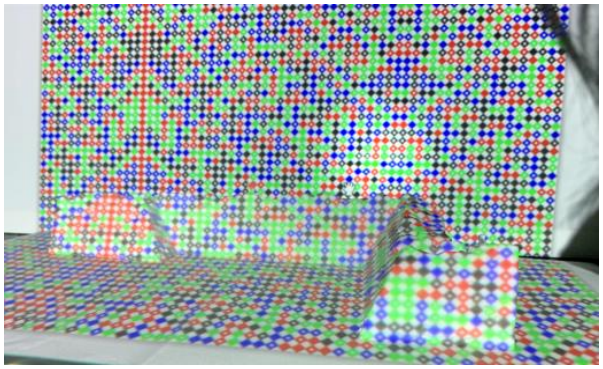

図7　模型に構造パターンを投影している様子

Fig.7　Projection of the structural pattern on the model

図 8 示すように、推定されたプロジェクタとジオラマ模型の3次元的な位置関係に従った現実空間のデジタルツインをバーチャル空間に構築する。つまりここでは、ジオラマ模型と投影プロジェクタの幾何学的関係と、バーチャル空間中の3次元モデルと仮想カメラの幾何学的関係が一致している。この状態で3次元モデルを仮想カメラで撮影（レンダリング）して得られるテクスチャをプロジェクタで投影することにより、現実空間とバーチャル空間で同じ視覚情報を共有することが可能となる。本研究では、VR 空間構築用プラットフォームとして Unity を用いる。

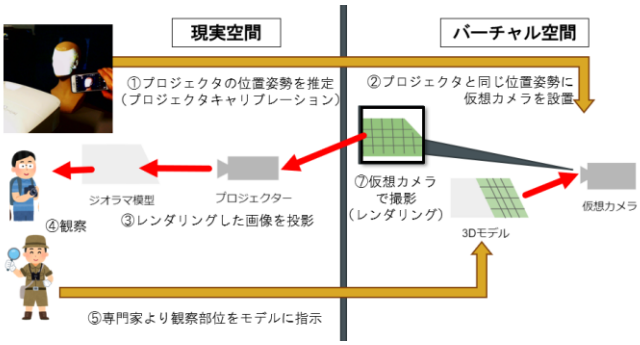

図8　撮影指示システムの構成

Fig.8　Illustration of system configuration

図 9 に SfM で被写体の3次元モデルから生成した投影用テクスチャをジオラマ上にプロジェクションマッピングした結果を示す。

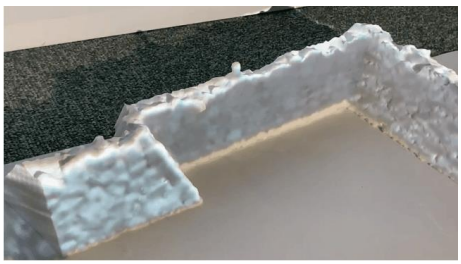

図9　模型への投影結果

Fig.9　Projection results on the model

6　撮影指示

本節では、ジオラマ模型へのプロジェクションマッピングを用いて文化財の専門家が見学者に撮影位置を指示する手順について述べる。

文化財の専門家は、テクスチャが投影されたジオラマ模型を観察し、追加撮影が必要な領域を図 10 に示すようにレーザーポインタを用いて指定する。PRO-CAMS のカメラで投影領域（ジオラマ模型）を撮影し、その画像に対してハイライト検出処理を施すことにより、指定領域を検出する。カメラの射影変換行列と3次元モデルの形状情報に基づいて、指定領域の3次元情報を算出する。本システムでは、3次元情報を用いて図 11 に示すような3次元モデルのマスクテクスチャを Blender で生成する。

図10　レーザーポインタで指示している様子

Fig.10　Directing with a laser pointer

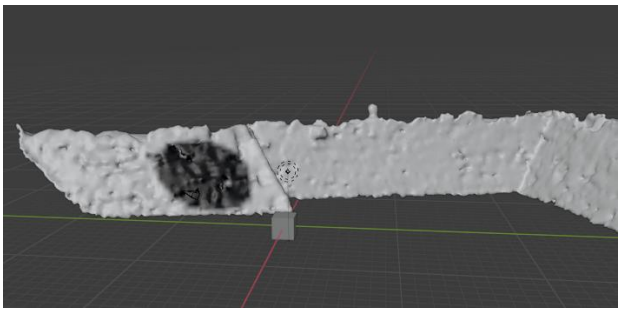

図11　撮影指示領域から生成したテクスチャ

Fig.11　Generated masked texture

5 節で述べた処理によりプロジェクションマッピング用の投影画像を生成し、図 12 に示すように、ジオラマ模型上に投影型 AR 提示（ハイライト提示）する。見学者は、その指示に従い文化財の指定地点に移動し、指定領域を撮影する。

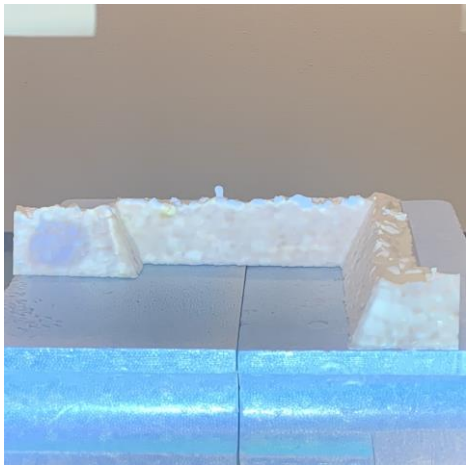

図12 撮影指定領域の提示例

Fig.12 Results of projection mapping

見学者によって撮影された画像は、多視点画像データサーバに転送される。データサーバで、他の撮影画像と共に再度 SfM 処理を行うことにより、文化財の3次元形状がアップデートされる。また、同一箇所を複数回撮影した場合には、それらの画像群を時系列データとして統合（動画像化）することにより経年変化の閲覧を支援する。

7 まとめ

文化財の保存を目的として、3D フォトグラメトリと投影型 AR によって画像情報収集の指示作業を支援するシステムを紹介した。文化財の多視点画像に 3D フォトグラメトリを適用することで3次元形状を復元し、それを 3D プリンタで造形したジオラマ模型上で投影型 AR 提示システムを構築する。文化財の専門家がモデル上で観察したい（撮影を希望する）部分を指定すると、CG モデルの同一箇所のテクスチャが変更され、投影型 AR によって文化財の見学者への直感的な提示が行われる。見学者によって収集された画像群は、撮影時刻・カメラパラメータなどの情報と共に時空間データベース化され、有識者による文化財の観察などに活用する予定である。本研究の一部は JST CREST（JPMJCR16E3）の助成によるものである。

参考文献

[1] I. Aicardi, F. Chiabrando, A. M. Lingua, F. Noardo, Recent trends in cultural heritage 3D survey: The photogrammetric computer vision approach,Journal of Cultural Heritage,Volume 32,2018,Pages 257-266,ISSN 1296-2074,

[2] D. Ali, S. Verstockt, and N. Van De Weghe. 2021. Single Image Façade Segmentation and Computational Rephotography of House Images Using Deep Learning. J. Comput. Cult. Herit. 14, 4, Article 44 (December 2021), 17 pages.

[3] H. Shishido, E. Kawasaki, Y. Kawamura, T. Matsui, and I. Kitahara. 2020. Accurate Overlapping Method of Ultra-Long Interval Time-Lapse Images for World Heritage Site Investigation. J. Comput. Cult. Herit. 13, 2, Article 10 (June 2020), 18 pages.

[4] R. Ishikawa, M. Roxas, Y. Sato, T. Oishi, T. Masuda and K. Ikeuchi, "A 3D Reconstruction with High Density and Accuracy Using Laser Profiler and Camera Fusion System on a Rover," 2016 Fourth International Conference on 3D Vision (3DV), 2016, pages 620-628.

[5] L. Bernardi, M. S. Busana, V. Centola, C. Marson, L. Sbrogiò,The Sarno Baths, Pompeii: Architecture development and 3D reconstruction,Journal of Cultural Heritage,Volume 40, ISSN 1296-2074,2019,Pages 247-254.

[6] Z. Bo , O. Takeshi, I. Katsushi. Rail Sensor: A Mobile Lidar System for 3D Archiving the Bas-reliefs in Angkor Wat. IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, 2015, 7. Pages 59-63..

[7] D. Cisternino, L. Corchia, V. D. Luca, C. Gatto, S. Liaci, L. Scrivano, A. Trono, and L. Tommaso De Paolis. Augmented Reality Applications to Support the Promotion of Cultural Heritage: The Case of the Basilica of Saint Catherine of Alexandria in Galatina. J. Comput. Cult. Herit. 14, 4, Article 47 ,December 2021, 30 pages.

[8] F. Kimura, Y. Ito, T. Matsui, H. Shishido, I. Kitahara, Y Kawamura, A. Morishima , Tourist Participation in the Preservation of World Heritage – A Study at Bayon Temple in Cambodia –,Journal of Cultural Heritage ,ISSN ,Volume 50,2021,Pages 163-170.

[9] Remondino, F. (2011). Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. Remote Sensing, 3(6), pages 1104–1138.

[10] J. L. Schönberger and J. Frahm, Structure-from-Motion Revisited, 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), CVPR.2016.445,2016, pages 4104-4113.

[11] E. B. Olson, Real-time correlative scan matching, 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009, pages 4387-4393.

[12] W. Hess, D. Kohler, H. Rapp and D. Andor, "Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM, 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2016, pages 1271-1278.

[13] 北島 大夢, 北野 和哉, 櫛田 貫弘, 田中 賢一郎, 久保 尋之, 舩冨 卓哉, 向川 康博, 単一光子検出器を用いた光の高時間分解能計測による材質の分類,研究報告デジタルコンテンツクリエーション（DCC）, oct, 2019,

2019-DCC-23, 1 – 6.
[14] 天野敏之，長村一樹，藤澤誠，宮崎純，加藤博一，プロジェクタカメラ系による照明制御を用いた物体認識，画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2011)論文集, 2011, 2011-07-20, 1072 – 1079.
[15] T. Sun , Z. Xu , X. Zhang , S. Fanello , C. Rhemann , P. Debevec , Y-T Tsai and Jonathan T. Barron and R. Ramamoorthi, Light stage super-resolution: continuous high-frequency relighting, sun2020light,2020, 2010.08888.
[16] C. LeGendre , W.C. Ma , R. Pandey , S. Fanello , C. Rhemann , J. Dourgarian and Jay Busch and Paul Debevec , Learning Illumination from Diverse Portraits, egendre2020learning, 2020, 2008.02396
[17] T. Kaminokado, D. Iwai, and K. Sato, Augmented Environment Mapping for Appearance Editing of Glossy Surfaces, Proc. IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR) 2019.
[18] 新居 英明,ラスカル ラメッシュ,藤井 智子,常盤 拓司,稲見 昌彦,STGC(シングルトラックグレイコード)を用いた投影型空間エンコーダ,電子情報通信学会論文誌. D，情報・システム,The IEICE transactions on information and systems (Japanese edition),18804535,一般社団法人電子情報通信学会,2009-10-01,92,10,1784-1792
[19] 田川聖一，向川康博，金宰完，ラメシュラスカル， 松下康之，八木康史，多面体鏡を用いた仮想カメラ・プロジェクタ群による半球状共焦点撮影，情報処理学会研究報告 UC 研究会, 2010, 6 月
[20] 金城 和志,岩井 大輔,佐藤 宏介,Projection Mapping System Combining Front Projection and Retinal Projection with Micro Hole Plate，システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, 65,2021-05, 1083-1085.
[21] 吉岡 浩輝，天野 敏之，複数のプロジェクタカメラシステムを用いた反射特性に基づく光学フィードバックによる視点依存の見た目の色彩操作，日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 2021, 26 巻, 1 号, 96-106, ISSN 1344-011X.
[22] C. Xie, H. Shishido, Y. Kameda and I. Kitahara, A Projector Calibration Method Using a Mobile Camera for Projection Mapping System, 2019 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct), Beijing, China, 2019, pages 261-262,ISMAR-Adjunct.2019.00-33.
[23] H. Lin, L. Nie, and Z. Song, A single-shot structured light means by encoding both color and geometrical features, Pattern Recognition, vol. 54, 2016, pages 178-189.
[24] N. Yusuke , S. Hideo , S. Masayoshi , Y. Nobuyasu. Using On-Site 3D Line-Segment-based Model Generation. Electronic Imaging. (2016). Marker-Less Augmented Reality Framework, 2016. 1-24.
[25] 鳴海 拓志,伴 祐樹,梶波 崇,谷川 智洋 ,廣瀬 通孝. 2013. 拡張現実感を利用した食品ボリュームの操作による満腹感の操作. 情報処理学会論文誌(ジャーナル) 54 (4): 1422-1432.
[26] S. Ssin, J. Walsh, R. Smith, A. Cunningham and B. Thomas, GeoGate: Correlating Geo-Temporal Datasets Using an Augmented Reality Space-Time Cube and Tangible Interactions, 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), Osaka, Japan, 2019 pp. 210-219.

© 2021 by the Virtual Reality Society of Japan (VRSJ)