

[招待講演] プロジェクションマッピング研究の最新動向

岩井 大輔[†]

[†] 大阪大学基礎工学研究科 〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3-D552

E-mail: [†] daisuke.iwai@sys.es.osaka-u.ac.jp

あらまし 身の回りの様々な実空間面にプロジェクタから映像を投影重畳し、仮想空間とシームレスに融合するプロジェクションマッピングは、広範な応用が期待されている。一方、プロジェクションマッピングでは、通常の映像投影では想定されていないような状況での投影が求められており、それによる投影画質の顕著な悪化を解決するため、基盤技術の研究が進められている。また、基盤技術の進展は、プロジェクションマッピングの新規応用分野の開拓を促進している。本講演では、プロジェクションマッピング研究において進められている基盤技術の研究開発と、応用展開の最新動向について述べる。

キーワード プロジェクションマッピング, 投影型複合現実感

Recent Advances in Projection Mapping Research

Daisuke IWAI[†]

[†] Graduate School of Engineering Science, Osaka University

Machikaneyama 1-3-D552, Toyonaka, Osaka, 560-8531 Japan

E-mail: [†] daisuke.iwai@sys.es.osaka-u.ac.jp

Abstract Projection mapping dynamically augments the appearance of a real surface by digital image projection. It has been applied in many application fields such as medicine, entertainment, and product design. However, the projected results are always suffered from the reflectance properties of the surface such as spatially varying textures, subsurface scattering, and inter-reflection, and also from projector's technical limitations such as low dynamic range, narrow depth-of-field, and latency. Fundamental technologies have been widely researched to overcome these limitations. The advances in the fundamental technologies also expand the application fields of projection mapping. This talk will introduce state-of-the-art technologies and applications in projection mapping research field.

Keywords Projection mapping, spatial augmented reality, projection-based mixed reality

1. はじめに

身の回りの様々な実空間面にプロジェクタから映像を投影重畳し、仮想空間とシームレスに融合する投影型拡張現実感 (Augmented Reality, AR)は、医療、福祉、教育、デザインなど、広範な応用が期待されている。最近では、プロジェクションマッピングという名前で数多くのイベントが開催されていることもあり、この技術は一般にも広く知れ渡るようになってきている。一方、プロジェクションマッピングでは、非平面で、模様があり、動いている投影対象に環境光下で投影する、という、通常の映像投影 (平面・模様なし・静止・暗室下) では想定されていないような状況での投影が求められている。このような環境では、投影画質が顕著に悪化してしまうため、それを解決するための基盤技術の研究が進められている。プロジェクションマッピングの応用としては、巨大構造物や歌手・ダンサーを対象とするものが一般によく知られているが、

研究レベルでは、更に幅広い応用分野が開拓されつつある。これには、上記のような基盤技術の進展が大きく寄与している。

以上を踏まえ、本講演では、プロジェクションマッピング研究において進められている基盤技術の研究開発と、応用展開の最新動向について、特に講演者の取り組みを中心に述べる。

2. 基盤技術

本講演では、色補償、幾何補正、焦点ボケ補償、相互反射補償の各技術について紹介する。なお、紙幅の制約上割愛するが、影除去、鏡面反射除去、超解像といった他技術の研究も進められていることを付記しておく。

2.1. 色補償

模様のついた投影面にそのまま映像を投影すると、その模様が投影結果に現れてしまうという問題が生じ

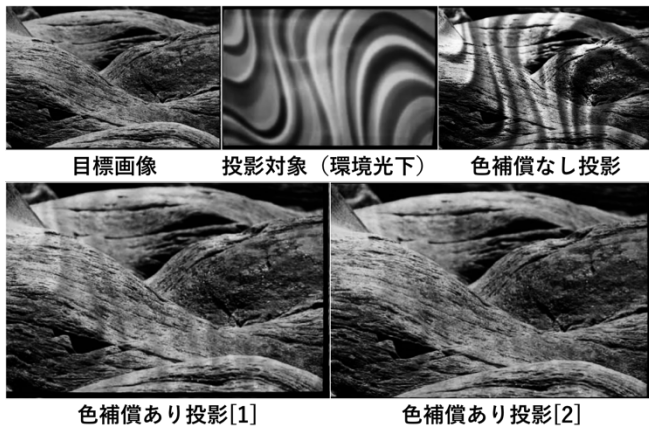


図 1 色補償

Fig. 1 Radiometric compensation.

る。そこで、反射率の低い箇所に投影している画素は明るく、反射率の高い箇所に投影している画素は暗くすることで、模様を視覚的にキャンセルする色補償技術が研究されている。例えば、最も初期の単純な手法では、投影画素値と表示される輝度との関係を線形モデルで表すことが提案された[1]。投影画素値の計算は画素毎に異なるパラメータを用いて計算を行う必要があるが、GPUのフラグメントシェーダーを用いることにより効率的に並列計算することができ、動画の毎フレームを遅れなく補償処理することが可能であった。

一方、プロジェクタには各メーカーによる独自の色作りが施されており、その結果、上記の単純な線形モデルが適切にプロジェクタの入出力特性を近似できず、所望の色を対象面上で再現することができない、というケースが多数存在する。そこで最近では、プロジェクタの色空間を 4^3 から 6^3 程度の粗さでサンプリングし、その間をスプライン関数で非線形補間する手法が提案されており、単純な線形モデルと比べて良好な色補償が実現できている[2] (図 1)。

2.2. 焦点ボケ補償

プロジェクタは元来、照度向上のため口径が大きく設計されており、焦点ボケが生じやすい。このため、非平面や動いている対象にプロジェクションマッピングする際、投影画像の高周波成分(空間解像度)が失われてしまう場合が頻繁に生じてしまう。この問題を解決する手法としては、合焦位置の異なる複数台のプロジェクタを用意して、対象面とその合焦位置との距離が最も近いプロジェクタから映像を投影するよう選択するアプローチが提案されている[3]。

プロジェクタ 1 台の場合は、プロジェクタからの距離に応じて変化する画素の点拡がり関数(Point Spread Function, PSF)を投影対象上で求め、投影画像に各 PSF の逆畳み込み演算を行うことで、いわばエッジ強調画

像を生成して焦点ボケによる画質劣化を補償する試みが行われている[4]。一方、この手法ではプロジェクタもしくは投影対象が移動する度に PSF を求めなければならず、動的な対象に対して適用することは難しかった。そこで、プロジェクタの焦点距離を高速に変調させることのできる焦点可変レンズを用い、人の知覚できない速度で合焦位置を投影シーンの前後にスイープさせる焦点スイープ投影法が提案されている[5](図 2)。この研究は、焦点スイープの結果 PSF が距離に依らず一定になることを示し、それによって投影対象が移動しても PSF を再計測する必要なく焦点ボケ補償を実現している。

2.3. 相互反射補償

凹面への投影では、投影光が面間を相互に反射し、望ましくない輝度の上昇(相互反射)が発生する。この現象はコンピュータグラフィクスにおけるラジオシェイ法でモデル化できるため、その逆問題を解いて投影画像を生成することで、相互反射を補償する手法が提案されている[6]。

一方、負の光を投影できないという物理的制約から、このアプローチには輝度上昇の補償量に限界がある。そこで、投影面の反射率を空間的に変調して相互反射光の輝度を抑えることで、相互反射補償の効果を向上させる試みが行われている[7] (図 3)。反射率変調には紫外線照射により透過率を制御できるフォトクロミック化合物を用いている。

2.4. 幾何補正

対象が非平面であったり動いたりする場合に、歪みなく映像を表示するために、幾何補正が必要となる。特に近年は、コンピュータビジョン技術を用いて、動いている対象にピタッと位置合わせする、動的プロジェクションマッピングにおける幾何補正の研究開発が盛んに行われてきている。AR に関する多くの研究で採用されているように、動的プロジェクションマッピングの幾何補正でも画像マーカーを用いるアプローチは主流であるが、投影映像とマーカーが重畳すると、投影映像の画質劣化、および、マーカー認識精度の低下という双方の問題を引き起こしてしまう。すなわち、いかに、カメラで計測可能なマーカーを、人の目から隠すか、ということが主要な技術課題となっている。

その解法として、近赤外領域で急激に反射率の低下する「IR インク」を使用する、というアプローチが複数の研究で採用されている。このインクで投影対象に描かれたマーカーは、人の目にはほぼ知覚されず、近赤外カメラで撮影された画像中では高コントラストに計測できる。このインクで粘土のような柔軟変形物体にマーカーを描画し、それを撮影する近赤外カメラ画像を処理してその変形を計測して、変形に追従したテ

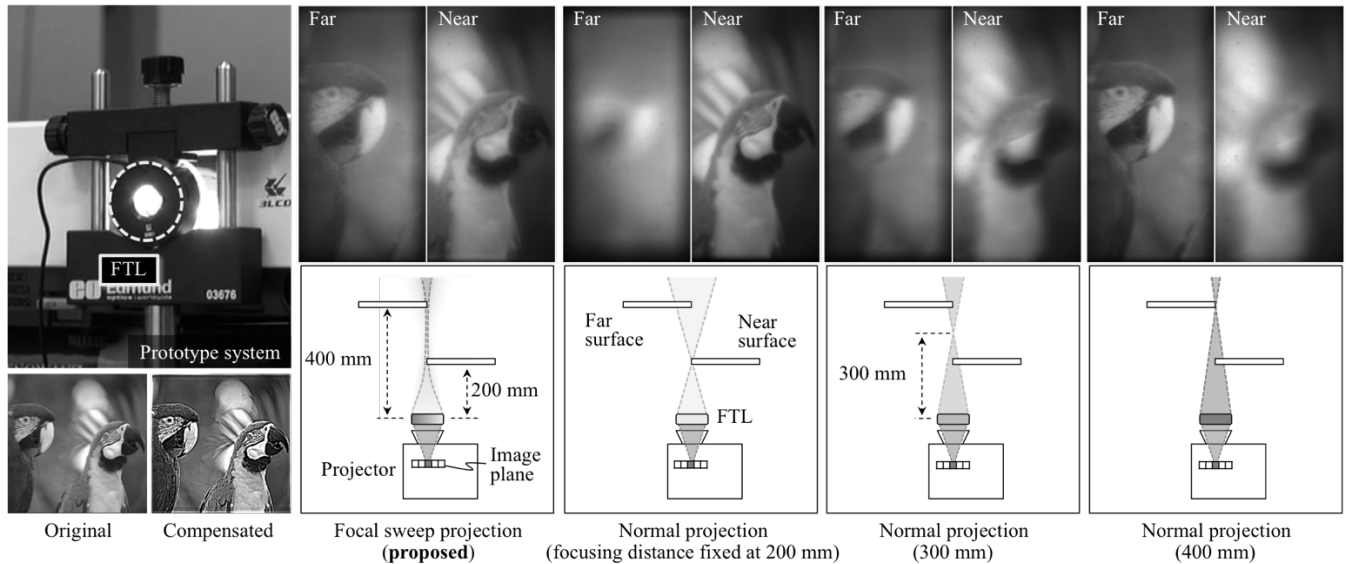


図 2 焦点スイープ投影による焦点ボケ補償[5]

Fig. 2 Extended depth-of-field projection by focal sweep [5]

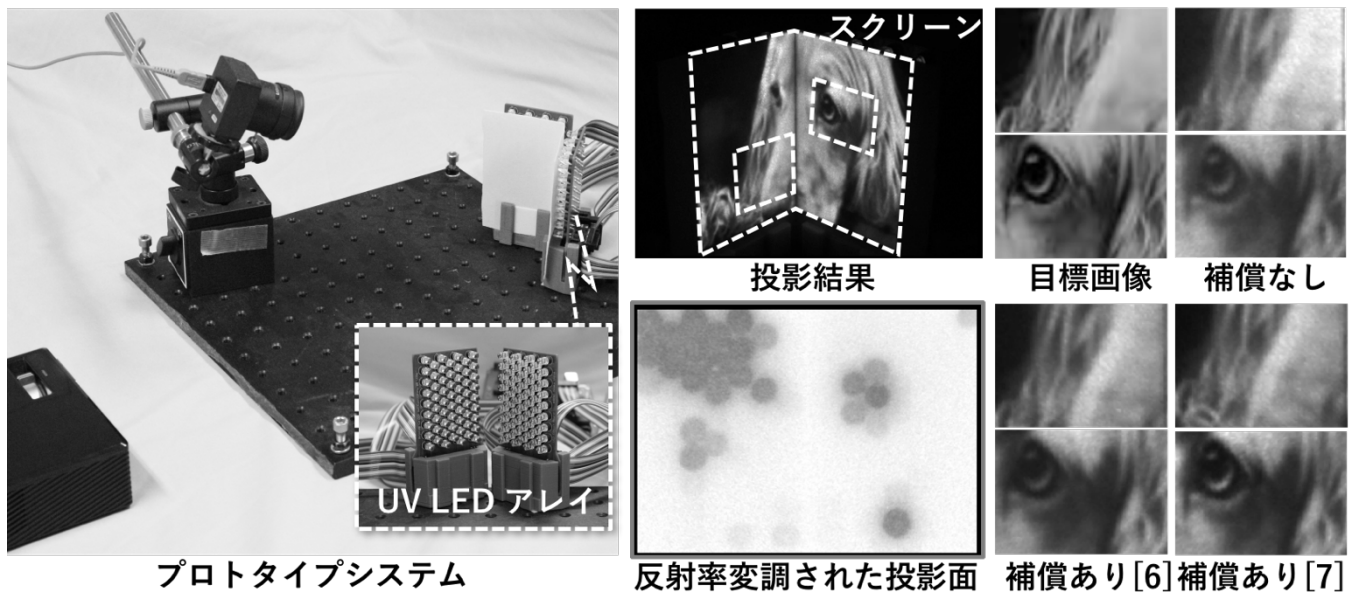


図 3 相互反射補償[7]

Fig. 3 Inter-reflection compensation [7].

クスチャをプロジェクションマッピングする研究[8]や、衣服や紙面にマーカーを描画して、1,000 Hz の高速カメラとプロジェクタの組み合わせで、それらが素早く移動しても、ピタッと投影映像を位置合わせする技術の研究[9]が行われている。一方、人の目でも視認できる通常のインクで描かれたマーカーを用いる場合に、近赤外カメラでそのマーカーを計測するとともに、色補償の技術を用いて、人の目に対してはマーカーを隠す試みも行われている[10] (図 4)。

画像マーカーを用いないアプローチとして、ラスタスキャン型のレーザープロジェクタに特化した走査時

刻計測に基づく投影画素位置の計測手法が提案されている[11] (図 4)。この手法は、いわば CRT モニタにおけるライトペンの技術をプロジェクションマッピングに応用したものであり、投影シーン中に配置したフォトダイオードが投影光を計測した時刻と、プロジェクタの V-Sync の時刻との間の時間情報から、そのセンサに入射する投影画素の位置を推定する。小さなフォトダイオードを投影面中に埋め込むことで、投影映像中にそれが目につかないプロジェクションマッピングが実現できる。

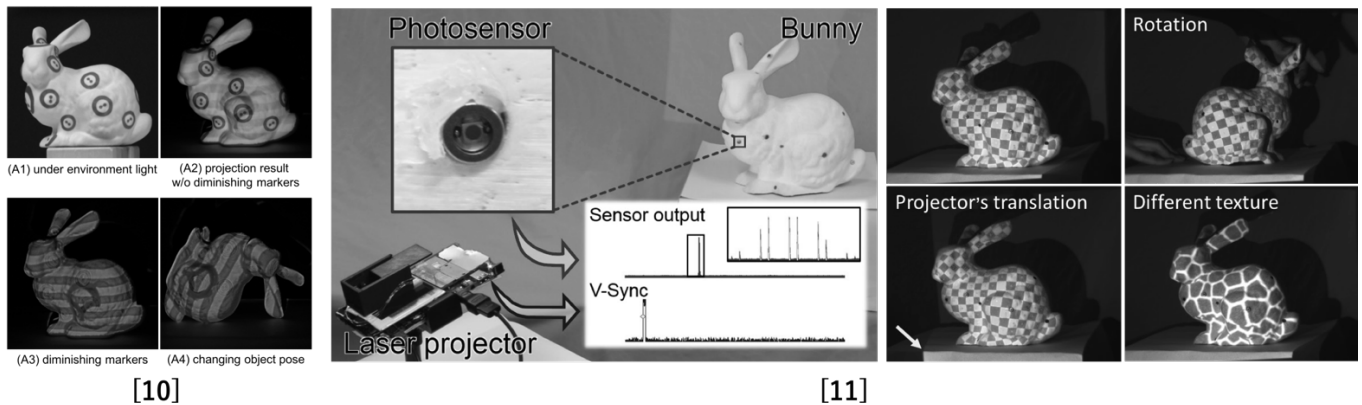


図 4 動的プロジェクションマッピング幾何補正
Fig. 4 Geometric correction in dynamic projection mapping.

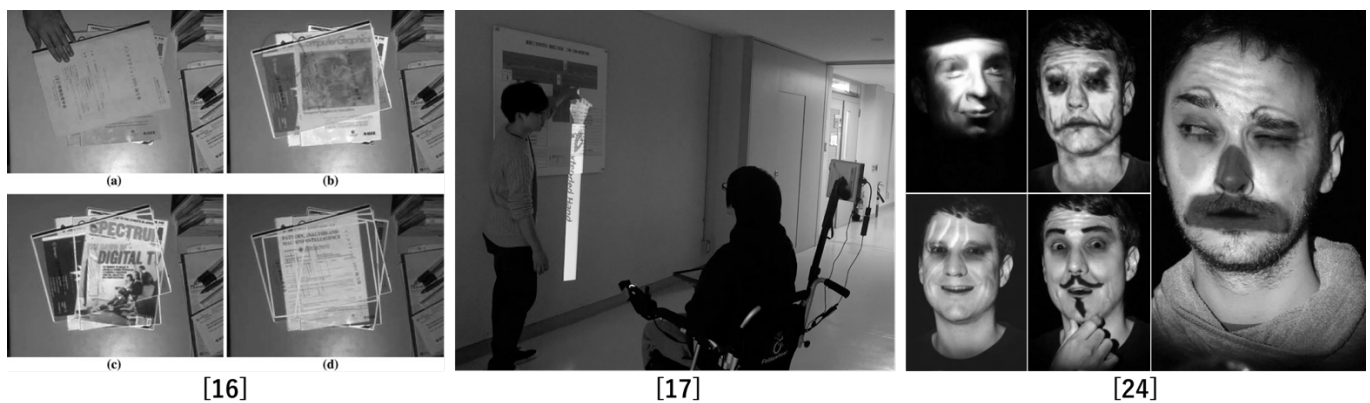


図 5 プロジェクションマッピング研究の応用展開
Fig. 5 Applications.

3. 応用展開

プロジェクションマッピングの応用としては、巨大構造物や歌手・ダンサーを対象とするものが一般によく知られているが、研究レベルでは、更に幅広い応用分野が開拓されつつある。ここでは、こういった新規の応用展開を列挙する。

- ・テレビ画面の外側に、その画面内のコンテンツを枠外へと延長した映像を投影することで、高い没入感を与えるシステム[12]
- ・自動車の外装および内装の質感やレイアウトを、プロジェクションマッピングにより様々に変更する工業デザイン支援システム[13]
- ・色あせた文化財をプロジェクションマッピングにより仮想的に修復するシステム[14]
- ・油絵を描く際、絵の具の色やストローク等をキャンバス上に直接指示する絵画制作支援システム[15]
- ・机の上に積まれた書類の山から所望の書類を探し出す際に、プロジェクションマッピングにより上の書類から順に透明化し、書類探索支援するシステム[16] (図 5)
- ・手腕をプロジェクションマッピングにより環境中に伸長することで、手が不自由な高齢者や車椅子利用者が、手を用いた指差し等のコミュニケーションを健常者と同様にできるようなシステム[17] (図 5)
- ・手のひらにリモコンメニューをプロジェクションマッピングし、手のひらをリモコンとして扱うことを可能とする技術[18]
- ・プロジェクションマッピングにより触覚変調を行うメカニズムの調査 (温度感覚[19], 柔らかさ[20])
- ・写真などの印刷物のコントラストを増幅して、よりリアリティの高い広ダイナミックレンジな映像呈示システム (写真・電子ペーパー[21], フルカラー 3D プリンタ[22])
- ・プロジェクションマッピングにより、アンドロイドロボットの表情を豊かにするシステム[23]
- ・人の顔の動きに追従し、さらに表情変化に応じてテクスチャを変えることのできる、動的な化粧を実現するプロジェクションマッピングシステム[24] (図 5)

4. おわりに

本講演では、基盤技術として、色補償、幾何補正、焦点ボケ補償、相互反射補償の4つの技術について簡単に解説した後、研究レベルで展開されている応用システムを複数紹介した。プロジェクションマッピングの研究分野は、動いていないものをあたかも動いたかのように見せる変幻灯[25]のように、現在進行形で全く新しい視覚表現の技法が生まれる視覚情報学のフロンティアであると考えられる。今後も、心理学、神経科学等、他分野の研究者との融合研究により、プロジェクションマッピング研究の発展が期待される。

5. 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP17H04691, JP16H02859, JP15H05925 等の助成を受けたものです。

文 献

- [1] O. Bimber, A. Emmerling, T. Klemmer, "Embedded entertainment with smart projectors," IEEE Computer, pp. 56-63, Vol. 38, No. 1, 2005.
- [2] A. Grundhöfer and D. Iwai, "Robust, Error-Tolerant Photometric Projector Compensation," IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 24, No. 12, pp. 5086-5099, 2015.
- [3] M. Nagase, D. Iwai, and K. Sato, "Dynamic Defocus and Occlusion Compensation of Projected Imagery by Model-Based Optimal Projector Selection in Multi-projection Environment," Virtual Reality, Vol. 15, No. 2, pp. 119-132, 2011.
- [4] L. Zhang and S. K. Nayar, "Projection defocus analysis for scene capture and image display," In Proceedings of ACM SIGGRAPH, pp. 907-915, 2006.
- [5] D. Iwai, S. Mihara, and K. Sato, "Extended Depth-of-Field Projector by Fast Focal Sweep Projection," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 21, No. 4, pp. 462-470, 2015.
- [6] O. Bimber, A. Grundhöfer, T. Zeidler, D. Danch, P. Kapakos, "Compensating indirect scattering for immersive and semi-immersive projection displays," In Proceedings of IEEE Virtual Reality, pp. 151-158, 2006.
- [7] S. Takeda, D. Iwai, and K. Sato, "Inter-reflection Compensation of Immersive Projection Display by Spatio-Temporal Screen Reflectance Modulation," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 22, No. 4, pp. 1424-1431, 2016.
- [8] P. Punpongsanon, D. Iwai, and K. Sato, "Projection-based Visualization of Tangential Deformation of Nonrigid Surface by Deformation Estimation Using Infrared Texture," Virtual Reality, Vol. 19, No. 1, pp. 45-56, 2015.
- [9] G. Narita, Y. Watanabe, and M. Ishikawa, "Dynamic Projection Mapping onto Deforming Non-rigid Surface using Deformable Dot Cluster Marker," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 23, No. 3, pp. 1235-1248, 2017.
- [10] H. Asayama, D. Iwai, and K. Sato, "Fabricating Diminishable Visual Markers for Geometric Registration in Projection Mapping," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (accepted).
- [11] Y. Kitajima, D. Iwai, and K. Sato, "Simultaneous Projection and Positioning of Laser Projector Pixels," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 23, No. 11, pp. 2419-2429, 2017.
- [12] B. R. Jones, H. Benko, E. Ofek, and A. D. Wilson, "IllumiRoom: Peripheral Projected Illusions for Interactive Experiences," In Proceedings ACM CHI, pp. 869-878, 2013.
- [13] C. Menk and R. Koch, "Truthful Color Reproduction in Spatial Augmented Reality Applications," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 19, No. 2, pp. 236-248, 2013.
- [14] D. Aliaga, A. Law, and Y. Yeung, "A Virtual Restoration Stage for Real-World Objects," ACM Transactions on Graphics, Vol. 27, No. 5, 2008.
- [15] M. Flagg and J. M. Rehg, "Projector-guided painting," In Proceedings of ACM UIST, pp. 235-244, 2006.
- [16] D. Iwai and K. Sato, "Document Search Support by Making Physical Documents Transparent in Projection-Based Mixed Reality," Virtual Reality, Vol. 15, No. 2, pp. 147-160, 2011.
- [17] Y. Ueda, Y. Asai, R. Enomoto, K. Wang, D. Iwai, and K. Sato, "Body Cyberization by Spatial Augmented Reality for Reaching Unreachable World," In Proceedings of Augmented Human, pp. 19:1-19:9, 2017.
- [18] G. Yamamoto and K. Sato, "PALMbit : A PALM Interface with Projector-Camera System," In Adjunct Proceedings of UbiComp, pp. 276-279, 2007.
- [19] H. N. Ho, D. Iwai, Y. Yoshikawa, J. Watanabe, and S. Nishida, "Combining colour and temperature: A blue object is more likely to be judged as warm than a red object," Scientific Reports, Vol. 4, Article No. 5527, 2014.
- [20] P. Punpongsanon, D. Iwai, and K. Sato, "SoftAR: Visually Manipulating Haptic Softness Perception in Spatial Augmented Reality," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 21, No. 11, pp. 1279-1288, 2015.
- [21] O. Bimber and D. Iwai, "Superimposing Dynamic Range," ACM Transactions on Graphics, Vol. 27, No. 5, pp. 150:1-150:8, 2008.
- [22] S. Shimazu, D. Iwai, and K. Sato, "3D High Dynamic Range Display System," In Proceedings of IEEE ISMAR, pp. 235-236, 2011.
- [23] A. Bermanno, P. Brüscheweiler, A. Grundhöfer, D. Iwai, B. Bickel, and M. Gross, "Augmenting Physical Avatars Using Projector Based Illumination," ACM Transactions on Graphics, vol. 32, no. 6, Article 189, 10 pages, 2013.
- [24] A. H. Bermanno, M. Billeter, D. Iwai, and A. Grundhöfer, "Makeup Lamps: Live Augmentation of Human Faces via Projection," Computer Graphics Forum, Vol. 32, No. 2, pp. 311-323, 2017.
- [25] T. Kawabe, T. Fukiage, M. Sawayama, and S. Nishida, "Deformation Lamps: A Projection Technique to Make Static Objects Perceptually Dynamic," ACM Transactions on Applied Perception, 13, 2, Article 10, 2016.