

3D e-Heritageとクラウドミュージアム

大石 岳史（東京大学生産技術研究所）

1. はじめに

レーザスキャンによる3次元形状計測技術の発達により、実世界の3次元データが様々な分野で利用されるようになってきている。計測によって得られた3次元データは製品検査やリバーエンジニアリング、CGコンテンツ製作やテレビやゲームの素材としても広く活用されている。近年文化財の分野においても、写真や映像だけでなく、3次元デジタルデータによる記録も一般に行われるようになってきている。特にレーザスキャナーの発達により都市や遺跡といった非常に大規模な構造物を高い精度で3次元デジタル化することが可能となり、貴重な文化遺産が3次元的にアーカイブされる例も多くみられる。またアーカイブだけでなく、3次元データの解析により新たな知見を得る試みも行われるようになってきている。我々はこの3次元デジタルデータを3D e-Heritageと名付け、アーカイブから解析まで幅広い研究を進めている。

3次元データをモニタ上で見るだけでなく、実世界に直接重ねてタブレットやゴーグルなどで表示して見せるAR（Augmented Reality：拡張現実感）/MR（Mixed Reality：複合現実感）技術が広く認知されるようになってきている。MRは実世界と仮想世界の間全体を複合して表示する広義の意味であるのに対して、ARは実世界を部分的に拡張して仮想物体を表示する意味で用いられる。CGアニメーションやVRを用いた屋内での鑑賞は臨場感に乏しいという問題があるが、AR/MRでは実際の場所に立っ

て現実の風景と併せて仮想世界を鑑賞できる。そのため、より高い臨場感を得ることが可能となっている。このAR/MR技術を用いることによって、建設予定の建物を見せたり、失われた風景を仮想的に復元して見せるなど、高い臨場感が求められる現場での需要が高まっている。

本稿では、3D e-Heritageとしてカンボジアアンコール遺跡群のバイヨン寺院、アンコールワットを例として、3次元デジタル技術とその応用についてプロジェクト概要とともに紹介していく¹⁾。また得られた3次元データを美術史や建築といった異なる分野との連携によって解析することで様々な知見が得られることを示す。さらにAR/MR技術を中心として、遺跡地域全体をミュージアム化するクラウドミュージアムの概念について説明し、文化財の仮想復元展示技術、移動型MRシステムとそれを利用した奈良県明日香村での取り組みについて紹介する。

2. 3D e-Heritage

高精度レーザレンジセンサを用いて、アンコール遺跡のような大規模かつ複雑な構造物を3次元デジタル化の技術についてここでは紹介する。図1に示すのは、カンボジア・バイヨン寺院であり、150m四方の敷地に建てられた石造りの巨大な建造物である。二重の回廊や51本の塔など、建築学的にも非常に複雑な構造物とされている。そのため、センサの制限により計測困難な箇所が多く、また得られた多数の部分データをどのように処理して完全な3次元モデルを生成するかというデータ処理技術も必要と



図1 カンボジアアンコール遺跡群バイヨン寺院

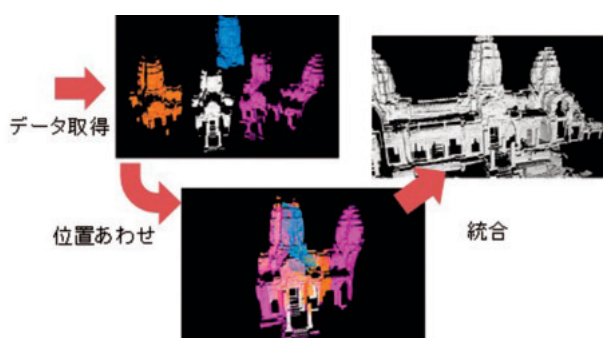


図2 レーザレンジセンサを用いた
3次元形状モデル化パイプライン

なる。

ここでは、このバイヨン寺院やアンコールワットを例として、大規模構造物のデジタル化について解説していく。レーザレンジセンサを用いた物体の形状取得は、おおまかに（１）データ取得、（２）位置あわせ、（３）統合の３つの処理からなっている（図２）。以下、各処理について説明していく。

（１）データ取得

実物体の形状を得るためには、まずレーザレンジセンサを用いて対象全体を複数回にわたって異なる方向、位置から計測する。レーザレンジセンサは可視領域つまりセンサから見える範囲しか計測できないため、対象全体の形状を得るためには、異なる位置から計測を行う必要がある。多くの従来型レンジセンサは、三脚などで地面に固定して計測を行う必要があるため、計測距離や画角の制限により見えない高所や狭い場所での計測は困難である。そこで、このような場所の形状を計測するために新たなセン

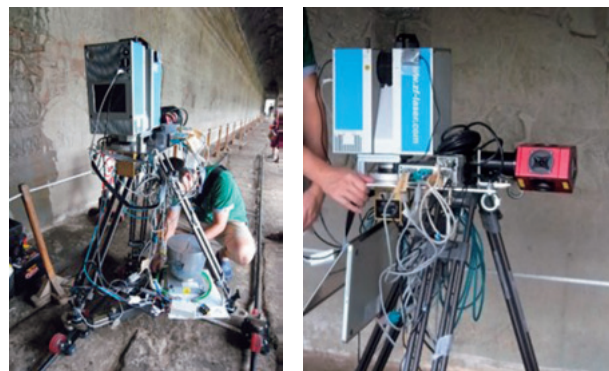


図3 レールセンサ

サシステムを開発した。

レールセンサ（Rail Sensor）

カンボジアの寺院の多くは回廊に囲まれており、この回廊に精密に刻まれたレリーフを高精度・高密度で計測する必要がある。一般に寺院は回廊とその内側の中央祠堂などの建物によって構成されている。この回廊に神話や当時の人々の様子などがレリーフとして刻まれており、これらのレリーフは神話や歴史を伝える貴重な文化遺産となっている。一方で、石で造られた寺院は風化、劣化が著しく、デジタル化して保存することは急務であると考えられている。

長い回廊のレリーフを計測する場合、既存センサでは様々な問題がある。長距離型センサを用いた場合、センサから遠くなるほどデータ解像度は低くなり、均一に計測することは難しい。一方、光切断法などによる近距離・高精度センサを用いた場合は、計測範囲が狭いことから、多量のデータを取得する必要があるため、計測時間・データ処理時間が膨大になるという問題もある。

そこで我々は図３に示すように、回廊上に敷いたレールの上を移動しながら計測するシステムを開発した²⁾。このレールセンサはプロファイラ（ラインスキャン）と全方位カメラによって構成されており、前者が表面形状を計測し、後者を併用することでスキャンラインごとのセンサシステムの位置姿勢推定を行っている。



図4 気球センサ

気球センサ (Balloon Sensor)

通常の地上固定型のセンサによる計測では、バイヨンやアンコールワットなどの大規模建造物の上部まで計測することは不可能である。大型のクレーンや足場は、設置場所に制限があり、安定性や景観の問題もあるため現実的ではない。そこで我々は空中から計測を行うため気球搭載型レーザレンジセンサを開発した^{3, 4, 5)}。このセンサは気球の下に高精度なレーザレンジセンサを吊り下げて、上空から計測を行うものである(図4)。レーザレンジセンサは1スキャンに数分を必要とする。気球は風などの外力により揺れるため、計測中のセンサーの移動にともなって得られる距離データには歪みが生じてしまう。この歪みを補正するために、センサにカメラを搭載して、映像と距離画像からセンサを動きを推定して距離画像の歪みを補正するアルゴリズムや^{3, 4)}、地上データとラインのデータを合わせることによって、高精度に位置姿勢を推定する手法を開発した⁵⁾。気球センサによって空中から得られたデータと、地上から得られたデータを統合することによって、巨大な建造物の完全な3次元モデルを生成することが可能となった。

(2) 位置合わせ

レンジセンサによって様々な方向から得られた部分形状データはそれぞれ異なる座標系で記述されているため、相対位置姿勢を求めて一つの座標系で記述する必要がある。この処理は位置合わせと呼ばれ

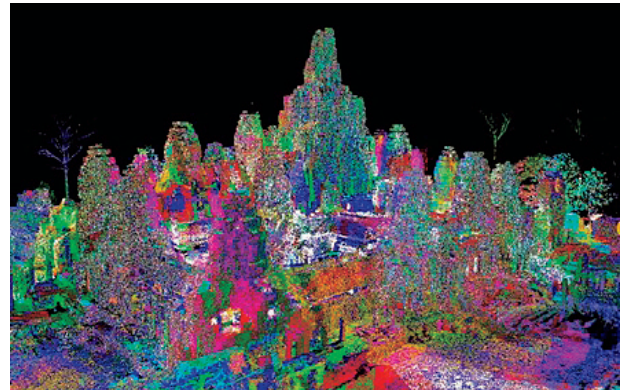


図5 バイヨン寺院データの位置合わせ結果

る。位置合わせ手法としては、各部分形状モデルに含まれる頂点間で対応点を探索し、得られた対応点間の距離の総和が最小となるような相対位置姿勢を繰り返し求めるIterative Closest Point (ICP) が最も広く知られている。しかし、大規模な建造物の場合、非常に多くの部分形状データを位置合わせするため、逐次位置合わせでは誤差の蓄積によって大きな誤差が生じてしまう。

そこで、我々は多数の部分モデルを高速に同時位置合わせする手法を開発した⁶⁾。この手法では、すべての部分データ間の誤差を同時に最小化している。さらに大規模なデータを扱うために、計算時間やメモリ使用量を考慮し、PCクラスタなどの分散メモリシステム上で並列に同時位置合わせする手法を開発した⁷⁾。これらの手法によって、多量のデータを高精度に位置合わせすることが可能になった。図5に示すのは約2000箇所からバイヨン寺院を計測したデータを位置合わせした結果である。

(3) 統合

最後に、位置合わせされた複数の部分データを統合して、一つのメッシュモデルを生成する。複数の部分モデル間には重なりや解像度のばらつきがあるため、重なりを取り除いて、正則化された一つのメッシュデータに変換する。正則なメッシュモデルを得るためには、空間を均等なボクセルに区切って表現するボリューメトリックな手法が適している⁸⁾。この手法では、複数の部分メッシュデータを互いの整

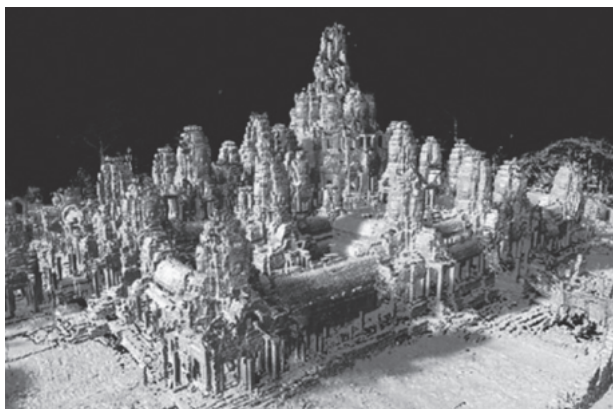


図6 バイヨン寺院の3次元モデル



図7 アンコールワットの3次元モデル

合性を取りながら一つのボクセル空間に投影し、ボクセルからの符号付距離による陰関数表現によって統合を行う。複数の異なるセンサから得られたデータを統合するためには、各センサの信頼度を用いて重みづけすることで、選択的により高精度なデータを生成することができる。得られたボリュームデータはボクセルの格子間をつなぐマーチングキューブ法を用いて再びメッシュデータに変換される。大規模データを扱う際には位置合わせと同様に計算時間、メモリ使用量が大きくなるため、並列化したボリュームメトリックな統合手法を開発した⁹⁾。

(4) デジタル化結果

図6に示すのはバイヨン寺院全体を3次元モデル化した結果である。一般的なレーザレンジセンサCyrax2500、HDS3000、Imager5003に加えて、気球センサなどによるデータが統合されている。再構成データの解像度は統合時のボリュームデータの解

像度によって変化する。この画像で示される3次元データの物体表面での解像度は約2cmである。センサの計測精度が1cm程度であるため、十分な解像度のデータが得られていると考えられる。取得した3次元データは、展示だけでなく、考古学的な解析や、寺院の保存修復のための様々な基礎資料として実際に利用されている。

図7に示すのはアンコールワットをデジタル化した結果である。アンコールワットでは、カンボジア政府組織であるAPSARA機構との連携により技術移転を行い、現在もカンボジア人スタッフによって計測が行われている。地上からの全体計測にはLeica C10を用いている。しかし、前述のように地上からの計測のみでは上部の計測は難しいため、中央塔などの屋根の上部は気球センサによって計測されたデータが用いられている。

3. サイバー考古学

3次元データはビデオコンテンツの製作に用いられることが多いが、それ以上に利用価値を秘めている。本章では、3次元データを用いて、美術史や建築といった分野との融合によって新たな知見が得られた事例について紹介する。

(1) 類似度推定と分類

バイヨン寺院には52の塔があり、全部で173の尊顔が刻まれている。これらの尊顔は、仏様の顔と言われることもあるが、ヒンドゥー教に由来するとも言われている¹⁰⁾。朴によるとこれらの尊顔はアシュラ（悪魔）、デーヴァ（男神）、デーヴァタ（女神）の三種類に分類できるとされている。しかしこれらの分類は主観評価であるため、我々は3次元データ（図8）を用いて分類を行った¹¹⁾。

図9に示すように、それぞれの分類から標準的な尊顔を選び、線形判別分析を行ったところ、おおまかに分類する超平面が得られた。多くは⁹⁾の分類と一致するが、異なる種別に分類される尊顔も多いことが分かった。一方、階層クラスタ分析を行ったところ、物理的な距離に近い尊顔が似た形状を持つ

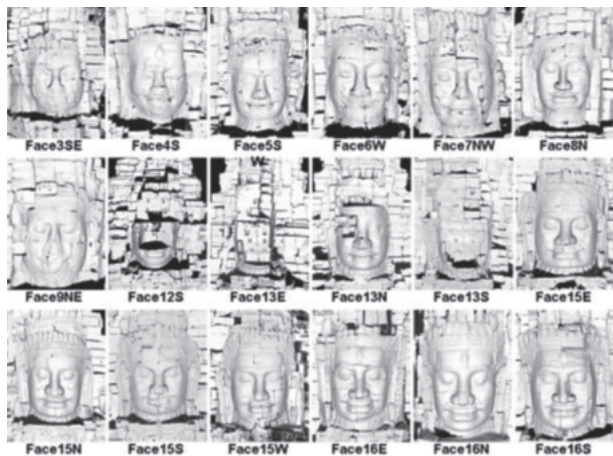


図8 バイヨン尊顔ライブラリ（一部抜粋）

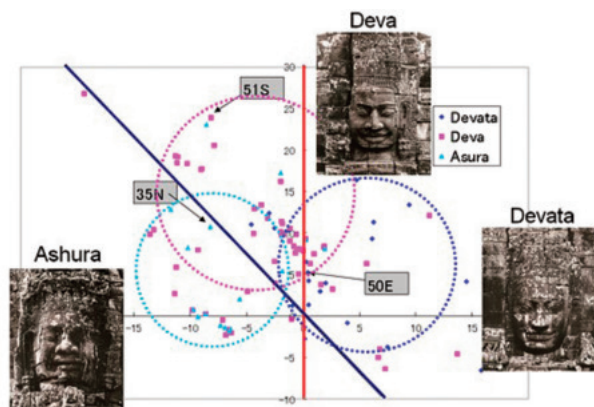


図9 尊顔を分類する超平面とグループ分け

ことが分かった。これは複数の彫り師のグループがそれぞれの範囲を担当して作成したためではないかと予想されている。

(2) 模型による風洞実験

バイヨン寺院は風化によって倒壊の危機にさらされている。そのため構造の安定化が急務の一つとなっている。特に石材の崩落は強風によるものも多く、風荷重の解析が重要である。しかし、バイヨン寺院のように大規模で複雑な形状をもつ構造物の風洞実験を行うことは一般に困難である。そこで計測によって得られた3次元データから3Dプリンタを用いて模型を作製し（図10）、この模型を用いて風洞実験を行った¹²⁾。この風洞実験により、風向きや風速に応じた風荷重や空気の流れが可視化され、風向きによっては凹部で渦が発生し、大きな負圧が生

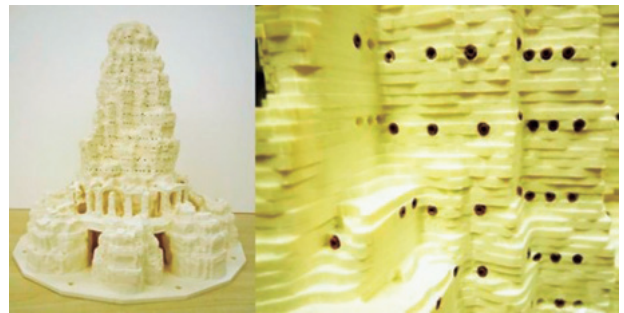


図10 3Dプリンタによって製作した風洞実験のための模型



図11 クラウドミュージアム

じることなども明らかになった。

4. クラウドミュージアム

前述のようにして得られた3次元計測データや、CADを用いて復元された3次元CGデータは様々な形で活用することができる。3章で示したように学際的な研究を進めることも重要であるが、一方で社会的な活用も重要である。図11に示すのは、3次元データを中心として遺跡地域をミュージアム化するクラウドミュージアムの概念である。ウェブサイト上で自由視点から閲覧できるようにすることによって来訪を促し、博物館においてCG・VRコンテンツによって学習を支援、移動の際にガイダンスやナビゲーションを行い、現場で実世界に重ねて表示することによって深い感動を与え、その感動を共有してもらうことによって再訪や新たなユーザの来訪を促す仕組みである。ここでは特に移動、感動において用いる複合現実感（MR: Mixed Reality）技術の中



図12 MR技術による失われた文化財の仮想復元展示



図13 光源不変量を用いたロバストな遮蔽処理と陰影付け

心として、基礎技術と移動型MRシステムについて紹介する。

(1) MRによる文化財復元展示

仮想世界を実世界に重畳して見せるMR技術は近年注目されている技術の一つである。日本の文化財の多くは木造建築が多いため、長い年月の間に失われてしまったものも多い。建物を復元するためには多額の費用がかかり、また推定復元のための根拠が乏しい場合も多く、実際の建物を復元するのは容易ではない。これに対して、MR技術では、復元CGを実際の現場で重ねて見せることによって、あたかもかつての建物がそこにあるかのように見せることができるのである(図12)。

MRにおいて違和感のない合成を行うためには、実世界と仮想世界との間の位置合わせや遮蔽処理を行い(幾何学的整合性)、両者の明るさ・陰影等を一致させる必要がある(光学的整合性)。特に遺跡の多くは屋外環境下であり、屋外では光源環境が複雑かつ急激に変化するため、これらの整合性を実現するのが難しいという問題がある。これに対して我々は実世界の環境を3次元モデル化し、現在の光



図14 MR電気バスシステム



図15 奈良県明日香村における一般公開実験の様子

源情報と3次元モデルからシーン画像を再構成して位置合わせする手法を開発した¹³⁾。また遮蔽処理においては、光源不変量を用いた背景差分による前景抽出手法(図13)や¹⁴⁾、人間の奥行き知覚をモデル化して半透明表示によって遮蔽を再現する手法などを開発した¹⁵⁾。

光学的整合性を実現するためには、全方位カメラによって現在の光源環境を取得し、実時間で陰影付けすることによって実世界と仮想世界の整合性を図る。この手法では、基礎影画像の生成をオフラインで行い、実行時には合成のみを行うことによって実時間での陰影付けを可能としている¹⁴⁾。また近年注目されているオプティカルシースルーディスプレイのために、背景に応じて表示する仮想物体の視認性を制御できる手法も提案している¹⁵⁾。

(2) 移動型MRシステム

従来のMRシステムは定点や狭い範囲での利用が想定され、さらに多人数で同時に体験できないとい



図16 古代飛鳥京の仮想復元



図17 飛鳥京復元コンテンツ

う問題もあった。そこで車載された全方位カメラによって撮影された映像を複数のユーザに実時間で配信し、配信された映像に仮想物体を重畳することによってMR展示する移動型MRシステムを開発した(図14)。本システムでは、GPSやジャイロ、地磁気センサなどを用いて幾何学的整合性を実現し、全方位画像から直接取得した光源情報を用いて実時間陰影処理を行うことで光学的整合性を実現している。

例年、11月には奈良県明日香村において、本システムを用いて一般公開イベントを行っている(図

15)。移動型MRシステムは、図16に示すように伝飛鳥板蓋宮・飛鳥浄御原宮の正殿付近からスタートし、飛鳥京苑池などを通過し、飛鳥寺までを移動するルートをMRコンテンツを提示しながら移動する。これまでの文化財復元展示では建物の復元が主であったが、建物だけでなく当時の人々の生活や、歴史的な出来事を展示することも重要である。そこで宮中の様子や、蘇我入鹿が中大兄皇子に暗殺される乙巳の変を再現し、その現場に来ると史実が再現され、体験的に学習することが可能となっている。図17には、実世界の映像に飛鳥京の様子を重畳表示した結果を示す。本システムによって、広い空間を動き回りながら復元された仮想世界を体験することが可能となった。

5. おわりに

本稿では、文化財を3次元デジタル技術によって保存、解析、展示する方法として3D e-Heritageの概要とクラウドミュージアムについて述べた。3D e-Heritageでは、レーザレンジセンサによる大規模構造物の3次元データ取得方法として、回廊を計測するレーザセンサや高所を計測するためのバルーンセンサ、多量の距離画像を処理して最終的な3次元データを得る手法について解説した。またこの技術を用いてバイヨン寺院やアンコールワットを3次元デジタル化した例を示した。さらに3次元データを用いた多数の尊顔の分類や、3Dプリンタを用いて製作した模型を用いた風洞実験について紹介した。

また失われた文化財を復元展示し、遺跡地域全体をミュージアム化するスキームとして、クラウドミュージアムとその関連技術、および電気バスを利用した移動型MRシステムについて紹介した。この移動型MRシステムは、全方位カメラを用いて映像取得、配信を行うことで、多人数による同時体験MRを実現している。またこのシステムを利用した奈良県明日香村における飛鳥京復元プロジェクトについても紹介した。

本稿で述べたように文化財分野においては3次元

デジタル技術は保存、解析、展示のための技術として非常に有用である。そのためセンサやデータ処理技術の発達に伴い、今後も広く活用されていくことが期待される。また情報分野だけでなく、考古、建築、美術史といった異分野との連携して3次元データを解析することで、これまで明らかにされなかった新たな知見を得ることが可能となってきた。今後も技術開発に加えて、様々な分野との連携を深めることで学際的な研究を推進していきたいと考えている。さらに、得られた知見や技術が、観光や教育の分野に大いに役立てられることを今後も期待したい。

謝辞

本研究の一部はJSPS科研費24254005, 25257303の助成を受けたものである。

【参考文献】

- 1) 池内克史, 大石岳史(編著), 3次元デジタルアーカイブ, 東京大学出版会, 2010.11.
- 2) B. Zheng, T. Oishi, K. Ikeuchi, "Rail Sensor: A Moving Lidar System for 3D Archiving the Bas-reliefs in Angkor Wat," IPSJ Trans. Computer Vision and Applications, Vol. 7, pp. 59-63, July 27, 2015.
- 3) A. Banno, T. Masuda, T. Oishi and K. Ikeuchi, "Flying laser range sensor for large-scale site-modeling and its applications in Bayon digital Archival project," Int. J. Computer Vision, (78) :207-222, 2008.
- 4) R. Ishikawa, B. Zheng, T. Oishi, K. Ikeuchi, "Rectification of Aerial 3D Laser Scans via Line-based Registration to Ground Model," IPSJ Trans. Computer Vision and Applications, Vol. 7, pp. 89-93, July 27, 2015.
- 5) B. Zheng, X. Huang, R. Ishikawa, T. Oishi, K. Ikeuchi, "A New Flying Range Sensor: Aerial Scan in Omini-directions," 3DV, 2015.
- 6) T. Oishi, R. Sagawa, A. Nakazawa, R. Kurazume and K. Ikeuchi, "Parallel alignment of a large number of range images on PC cluster," 3DIM, 2003.
- 7) T. Oishi, A. Nakazawa and R. Kurazume, K. Ikeuchi, "Fast simultaneous alignment of multiple range images using index images," 3DIM, 2005.
- 8) M.D. Wheeler, Y. Sato, K. Ikeuchi, "Consensus surfaces for modeling 3D objects from multiple range images," ICCV, 1998.
- 9) R. Sagawa, et al., "Parallel processing of range data merging," IROS, 2001.
- 10) 朴亨國, 浅井和春: "バイヨンの四面塔に関する二・三の考察-彫刻史的アプローチによる-", アンコール遺跡調査報告書1998, 中川武(監修), pp.275-306, (財) 日本国際協力センター, 1998.
- 11) M. Kamakura, T. Oishi, J. Takamatsu and K. Ikeuchi, "Classification of Bayon faces using 3D models," VSMM, 2005.
- 12) Y. Honda, S. Yamada, M. Araya, T. Oishi, A. Yoshida, "Evaluation of the wind pressure by wind tunnel test using the 3D laser scanning data in Bayon Temple, Cambodia," SAHC, 2014.
- 13) M. Inaba, A. Banno, T. Oishi, K. Ikeuchi, "Achieving Robust Alignment for Outdoor Mixed Reality using 3D Range Data," VRST, 2012.
- 14) B. V. Lu, T. Kakuta, R. Kawakami, T. Oishi, K. Ikeuchi, "Foreground and Shadow Occlusion Handling for Outdoor Augmented Reality," ISMAR, 2010.
- 15) T. Fukiage, T. Oishi, K. Ikeuchi, "Reduction of contradictory occlusion in Mixed Reality by using characteristics of transparency perception," ISMAR, 2012.
- 16) T. Kakuta, T. Oishi and K. Ikeuchi, "Shading and shadowing in mixed reality," ISMAR, 2005.
- 17) T. Fukiage, T. Oishi, K. Ikeuchi, "Visibility-Based Blending for Real-Time Applications," ISMAR, 2014.