

## 科学研究費補助金研究成果報告書

平成24年 5月25日現在

機関番号：14401  
 研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2009～2011  
 課題番号：21700135  
 研究課題名(和文) 投影型複合現実感技術による高品位文化財再現  
 研究課題名(英文) High Definition Reproduction of Cultural Properties by Projection Based Mixed Reality

## 研究代表者

岩井 大輔 (DAISUKE IWAI)  
 大阪大学・大学院基礎工学研究科・講師  
 研究者番号：90504837

研究成果の概要(和文)：本課題では、形状・反射率がデジタル化された貴重な文化財を、遠隔地で忠実に再現することを目指し、カラー3次元プリンタから文化財の色付き再現モデルを出力し、複数台のプロジェクタから適切な映像を投影することで、3次元プリンタ出力のみの再現に比べて、高いコントラストでの再現を可能とした。具体的には、最もコントラスト高く再現するための最適なプロジェクタ配置を算出する技法、プロジェクタをその最適配置に設置するためのユーザインタフェース技法等について提案し、それぞれの有効性を実験により確認した。

研究成果の概要(英文)：This research project aims at the high definition reproduction of cultural properties, whose shape and reflectance information are digitally archived, at distant site. The basic idea to achieve this aim is to superimpose texture information from multiple projectors onto the textured 3D hardcopy of a cultural property printed from a color-3D-printer. Various techniques have been proposed and evaluated through the project, which include a computational model for optimal projector placement to maximize the displayed contrast, and a user interface that supports a user to place projectors at the optimal positions.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・メディア情報学・データベース

キーワード：バーチャルリアリティ

## 1. 研究開始当初の背景

直射日光や湿気をはじめとする環境的要因によって、絵画や彫刻・工芸品といった有形の文化財の多くは、時とともに劣化してい

く。そこで、重要な文化財をはじめとして、その特徴がデジタルアーカイブの技術によって電子的に保存されてきていた。彫刻や彫像といった立体文化財のデジタルアーカイブは、その反射特性(色情報)のキャプチャ

だけでなく、形状情報もレンジファインダ等を利用することにより取得される。一度、デジタルデータとしてアーカイブされた文化財は、ディスプレイのような出力装置を用いることで、実物を用意する必要無しに、遠隔地でも観察することが可能となる。絵画のような平面文化財のアーカイブデータであれば、高画質のディスプレイやプリンタを用いることで、遠隔地においても高品位な表示が可能であるが、立体文化財を高品位に臨場感高く表示し再現することは未だ困難な問題であった。これを解決するデバイスとして、立体視ディスプレイやボリュームディスプレイが挙げられるが、通常の平面表示用途のディスプレイに比べてダイナミックレンジ・解像度・色空間は低く、写実性が乏しいことから、再現される文化財の実在感は失われてしまうという問題があった。

一方、研究代表者は、投影光と印刷紙のような反射型媒体を組み合わせることで広ダイナミックレンジ (HDR: High Dynamic Range) 表示を実現するディスプレイ技術に関する研究を、世界に先駆けて進めてきていた。この技術では、それぞれ単体では高々 2,000:1 と 100:1 のコントラスト比しか持たないプロジェクタと印刷物の双方に同様な画像コンテンツを表示させ、正確に位置合わせを行って重畳させることで、実測で 60,000:1 以上のコントラスト比を高解像度を実現していた。そこで、印刷物の代わりに、フルカラー3次元プリンタの出力モデルをこの HDR 表示技術に用いることで、アーカイブされた立体文化財の高品位な再現が可能となると考えられた。しかしながら、この先行技術は対象として平面を仮定していたため、立体文化財への適用には、プロジェクタの配置といった種々の問題を解決する必要があった。

## 2. 研究の目的

フルカラー3次元プリンタの出力モデルに同様なテクスチャ画像をプロジェクタから投影することで、立体文化財のデジタルアーカイブデータの high 解像度な HDR 表示を可能とすることを目的とした。また、この目的を達成するために、下記の 2 種の基盤技術の研究開発を目指した。

### (1) 高コントラスト表示を実現するためのプロジェクタの最適配置

複数のプロジェクタを用いることで、カラー3次元プリンタより出力される 3D モデルの全面に像を投影できる。しかしながら、台数に限りのあるプロジェクタを影や焦点ボケをなくすよう適切に配置するのは簡単で

はない。そこで、最適なプロジェクタ配置を自動的に求めることを目的とした。

### (2) 多重投影環境構築支援インタフェース

各プロジェクタの最適配置が求められたとしても、その位置に実際にプロジェクタを設置するのは容易ではないと考えられた。そこでこれを支援するインタフェースを開発し、そのユーザビリティと精度を評価することを目指した。

## 3. 研究の方法

### (1) 高コントラスト表示を実現するためのプロジェクタの最適配置

複数台のプロジェクタの最適配置の算出は、画素密度、表示輝度、配置ずれに対する安定性の 3 点を考慮し、これらの評価値の重み付けによって行う。

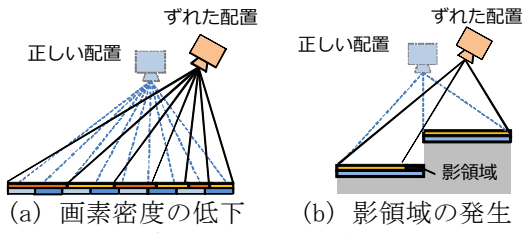
画素密度とは対象に投影される画素の単位当たりの密度を表しており、この画素密度が高いほど高周波なテクスチャを表示することができる。また、表示輝度は投影対象表面上でのプロジェクタからの投影光の反射光の輝度を指す。本研究課題では、それぞれに目標値を設定し、その目標値を達成するように、プロジェクタ配置を算出する。また、プロジェクタ設置の際の配置ずれが避けられない問題であることから、実際のプロジェクタ位置が求めた配置からずれた場合でも大きな影領域が生じるなどの大きな表示クオリティの低下が起こらないという配置のロバスト性を、配置ずれに対する安定性として評価を行う。

プロジェクタからの投影画素密度は、プロジェクタと対象との距離と、対象表面への入射角から算出できる。あるプロジェクタ配置  $k$  におけるプロジェクタ  $p$  から各点  $i$  に投影される画素の密度  $m_{i,p,k}$  の目標画素密度  $M_i$  に対する差の投影対象全面についての和を画素密度の評価  $e_m(k)$  とする。

$$e_m(k) = \sum_i (m_{i,p,k} - M_i)^2$$

全ての  $i$  について  $m_{i,p,k}$  が目標画素密度  $M_i$  よりも高いもしくは近ければ、評価関数  $e_m(k)$  の値は小さくなり、全体的にムラなく目標画素密度を満たしていることとなる。

投影画素密度と同様に、プロジェクタからの投影光の輝度は、プロジェクタと対象との距離および入射角から計算できる。表面上での各点の表示輝度は、対象表面上での投影光の輝度と、その点での投影光に対する投影対象表面の反射率の掛け合わせで計算できる。



(a) 画素密度の低下 (b) 影領域の発生  
 図1：プロジェクタの配置ずれによる表示画質の低下の例（ブルー：正しい配置での投影画素または投影領域、オレンジ：ずれた配置での投影画素または投影領域）

点  $i$  での目標輝度が  $T_i$  であるとき、単純な方法では対象表面の全ての点について  $T_i$  とあるプロジェクタ配置表示  $k$  のときの表示輝度  $R_{i,k}$  との差の総和を最小化するという方法が考えられる。しかし、人間の輝度に対する丁度可知差異（JND：Just Noticeable Difference、気付く事が出来る最小の刺激差）は基準となる輝度によって異なる。提案するディスプレイ装置は、最終的には人が目で見て評価するものであるから、この丁度可知差異を基準にして表示輝度の評価を行うのが妥当であると考えられる。そこで本提案手法では、目標輝度と表示輝度の間の JND 指標の差が最小になるように輝度の評価関数を設定する。今、 $f(x)$  を輝度  $x$  の光に対する JND とする。目標輝度  $T_i$  と表示輝度  $R_{i,k}$  の JND 差を投影対象全面について和をとり、表示輝度の評価  $e_r(k)$  とする。

$$e_r(k) = \sum_i (f(R_{i,k}) - f(T_i))^2$$

人が手作業でプロジェクタを配置するとき、目標位置に対する実際の配置のずれは避けられない問題である。最適配置からずれてしまったプロジェクタからの投影結果では、図1のように本来の最適配置での投影結果と比べて画質の低下が生じる。特に、図1(b)のように配置ずれによって影領域が生じてしまう場合にはこの配置ずれが非常に深刻な問題となる。

そこで我々は、実際のプロジェクタ配置が目標位置からずれてしまった場合を複数通り想定し、そのときの評価値の変化から配置ずれに対する表示画質の安定性を評価する。

あるプロジェクタ配置  $k$  において、 $n$  点の3次元位置がプロジェクタ設置位置として選ばれているとする。この時の画素密度と表示輝度に関する評価値  $e_{m,r}(k)$  を求める。 $n$  点それぞれについて、その点を中心とした半径  $a$  の球の表面上の  $h$  個の点を等間隔に抽出する。 $n$  点それぞれで抽出された  $h$  点から1点を選択する。 $hn$  通りの組み合わせについて、その配置を  $j$  とし、画素密度と表示輝度に関する

評価値  $e_{m,r}(j)$  を求める。 $hn$  個の組み合わせについて、それぞれ  $e_{m,r}(k)$  に対する  $e_{m,r}(j)$  の差を求め、その平均を安定性の評価値  $e_s(k)$  とする。

ここで、ある配置  $k$  での画素密度と表示輝度に関する評価値  $e_{m,r}(k)$  は、重み係数  $w_m$  と  $w_r$  を用いて

$$e_{m,r}(k) = w_m e_m(k) + w_r e_r(k)$$

とする。このとき、安定性の評価値  $e_s(k)$  は、下記の式で表される。

$$e_s(k) = \frac{1}{h^n} \sum_j (e_{m,r}(k) - e_{m,r}(j))^2$$

前述した画素密度・輝度・配置ずれへの安定性の評価値  $e_m(k)$ 、 $e_r(k)$ 、 $e_s(k)$  を用いて評価関数を設定する。評価関数  $E(k)$  は、重みづけ係数  $w_m$  と  $w_r$  と、安定性に対する重みづけ係数  $w_s$  によるそれぞれの評価値の重みづけ和で与える。

$$E(k) = w_m e_m(k) + w_r e_r(k) + w_s e_s(k)$$

ユーザは、用途に応じて適切な重みづけ係数を与えることで、最適配置を得ることになる。

$n$  台のプロジェクタの最適配置を決める際に、評価関数  $E(k)$  を最小化する手法について述べる。ただし、目標画素密度  $M_i$  と目標輝度  $T_i$ 、重みづけ係数  $w_m$ 、 $w_r$  と  $w_s$ 、安定性の評価値の導出で用いるパラメータ  $a$  と  $h$  はあらかじめ与えておく。また、投影対象は一つもしくは一つとみなせる程度に複数の対象が密集している状況を想定する。プロジェクタ配置を最適化する手法の概略は以下の通りである。まず、空間的に疎に配置した候補点群からそれぞれの投影方向を決定し、評価関数を最小化する最適な組み合わせを見つけてそれを初期解する。その後、遺伝的アルゴリズムにより評価関数を大域的に最小化する配置を探索する。

## (2) 多重投影環境構築支援インタフェース

プロジェクタの最適配置が決定後、その位置にプロジェクタの設置を行う。ユーザは、算出された最適配置の情報を確認しながら、メジャー等の計測器を用いながらプロジェクタを設置することになる。このとき、設置位置の最適配置からのズレは避けられない問題となるため、よりズレを小さくするような仕組みを提案する。

本研究では、設置する各プロジェクタより視覚ガイドを投影することを提案する。提案する視覚ガイドは、それぞれのプロジェクタが最適配置に設置された場合に投影すべき画像とする。図2に視覚ガイドの概要を示す。

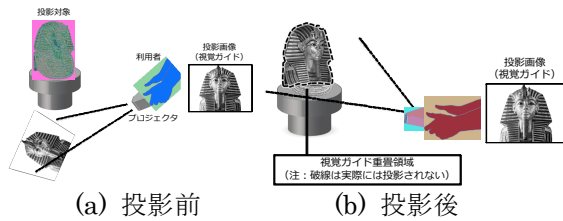


図 2：視覚ガイド

この視覚ガイドをプロジェクタから投影しながら配置を行うことで、ユーザは画像と実物体の対応を確認しながら設置を行うことができるため、より正確な位置に配置できるようになると考えられる。

#### 4. 研究成果

##### (1) 高コントラスト表示を実現するためのプロジェクタの最適配置

提案したプロジェクタの最適配置を求める手法の動作検証実験を行った。プロジェクタ台数を3台として、以下に示す条件で画素密度と表示輝度の重み ( $w_m, w_r$ ) を (0, 1), (0.5, 0.5), (1, 0) としたときの最適配置と投影画像、3次元プリンタ出力の反射率を提案手法で求めた。それぞれ、( $w_m, w_r$ ) = (0, 1) の配置は表示輝度を目標輝度に近づける事のみを重視した配置、( $w_m, w_r$ ) = (1, 0) は画素密度のみを重視した配置、(0.5, 0.5) はその中間となることから、それぞれの配置を輝度重視型、解像度重視型、バランス型と以降では呼ぶものとする。目標画素密度  $M_i$  が投影対象の形状データの頂点  $i$  全てにおいて  $M_i=4.0$ 、安定性の重み  $w_s$  は 0 とした。対象モデルとして、図 3 に示す頂点数 74278、ポリゴン数 148552 のモデルを用いた。このモデルにはあらかじめ各頂点に対して同図のようにテクスチャで輝度情報が与えられており、最大輝度  $496 \text{ cd/m}^2$ 、最小輝度  $0 \text{ cd/m}^2$  である。

図 4 に、各重み付け条件での最適配置、およびそこにプロジェクタを設置したときの投影シミュレーション結果、図 5 に投影シミュレーション結果の目標輝度と表示輝度の差、および画素密度の擬似カラーマップを示す。なお、各図での (a) は輝度重視型、(b) はバランス型、(c) は解像度重視型の配置での結果を示している。

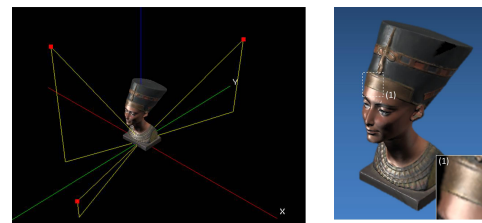
まず、図 4 より、重み付け係数を変えることにより、最適配置が変化していることがわかる。具体的には、対象テクスチャの高輝度の部分は対象の正面側に集中していることから、輝度重視型の配置では対象の正面側に配置が偏っており、全体的に輝度の低い背面に対しては少ない数のプロジェクタから広い部分をカバーするように投影を行ってい

る。一方、解像度重視型のプロジェクタでは、対象の輝度分布に関わらずバランス良く全体に投影を行えるようプロジェクタが分散して配置されていることがわかる。

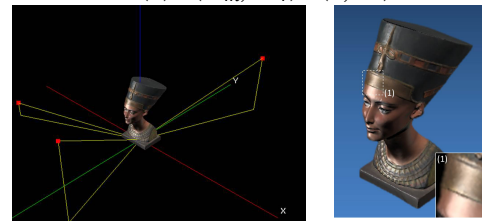
次に、輝度エラー(目標輝度と表示輝度の差)を示す図 5 では、輝度重視型 (a) では全体的にエラーが少なくムラなく目標輝度を達成できているといえるが、バランス型 (b) ではエッジ部分などに極端に再現度の低い部分が生じており、解像度重視型 (c) では特に目標輝度の輝度値が高い同図 (1) の部分を中心にエラー値が高くなっていることがわかる。一方、同図の画素密度を示す図からは、解像度重視型 (c) でほぼ全体的に目標画素密度  $M_i=4$  を達成しており、ムラが少ない投影を行っている事が確認できる。ところがバランス型 (b) では画素密度が低い部分が所々で生じており、輝度重視型 (a) では解像度が極端に低い部分が同図 (2) に広く生じている。この部分は、対象モデル (図 3) から確認できるように、目標輝度値が対象モデルのテクスチャのうちで最も低い部分である。そのた



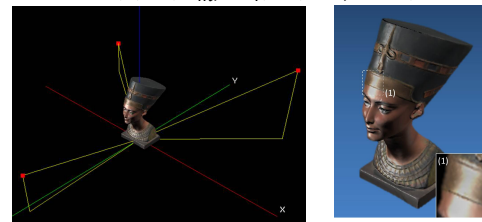
図 3：対象モデル



(a) ( $w_m, w_r$ ) = (0, 1)

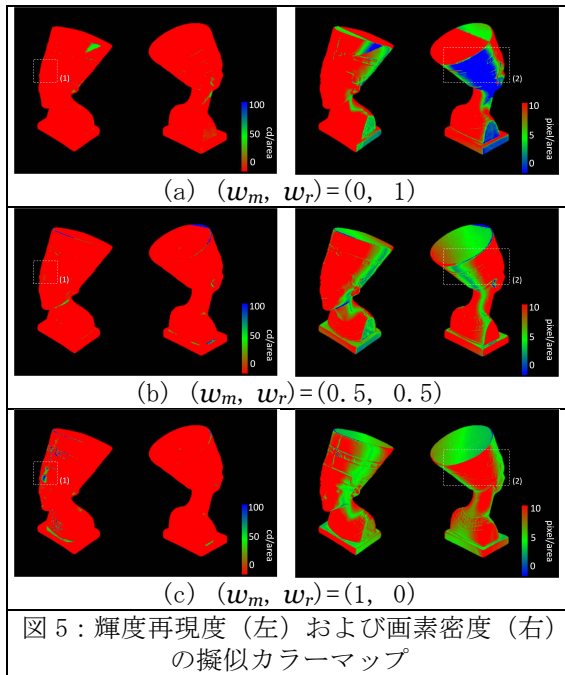


(b) ( $w_m, w_r$ ) = (0.5, 0.5)



(c) ( $w_m, w_r$ ) = (1, 0)

図 4：最適配置 (左) と投影シミュレーション結果 (右)

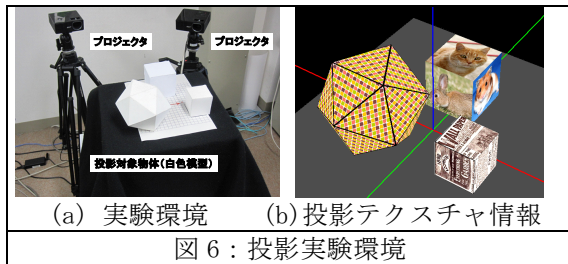


め、前述したとおり輝度重視型配置(a)ではこの周辺に対しては少ないプロジェクタ台数で広く投影を行うような配置が選択されており、その結果として解像度が低下する。以上から、全体的に目標輝度を達成し輝度エラーを減少させることと、全体的にムラのない画素密度で投影を行うことはトレードオフの関係にあり、提案手法を用いることでユーザが適切にこれらの重み付けを行う事でそのバランスを調節可能であることが分かった。

## (2) 多重投影環境構築支援インタフェース

提案した視覚ガイド投影について、プロジェクタ設置位置のズレがどの程度改善されるのかを、被験者実験によって確認する。実験環境を図6(a)に示す。被験者は、2台のプロジェクタを投影対象物体の周囲の指定された位置に設置する。投影対象は、同図に示す白色の物体である。これは、一辺8.0cmの立方体と6.0cmの立方体、一辺8.0cmの正二十面体を組み合わせたもので、これらの相対位置は固定してあり、まとめて1つの物体とみなす。この形状は予め計測し、頂点数33730、ポリゴン数45480のデータとして保持しておく。この対象に投影するテキスト情報を、同図(b)に示す。

プロジェクタはAcer社のMobile LED Projector K10(解像度800×600画素、輝度100ANSIルーメン、コントラスト2,000:1)を2台、それぞれ三脚に設置して用いた。これらは、三脚の移動と雲台の操作によって、位置と高さ、投影方向を操作することができる。設置位置を被験者に提示するために、下記の



ようなGUIを用意した。予め決めておいた投影対象の中心に対するプロジェクタの設置位置(プロジェクタのレンズ中心)を文字情報として示す。さらに、三次元グラフィクスとして投影対象とプロジェクタの位置関係を表示し、コントローラを使って仮想視点を移動させてグラフィクスを様々な視点から観察することができる。

被験者は、GUI上で指定された位置に2台のプロジェクタを設置するタスクを行う。このとき、GUIに加えて2mの巻き取り式メジャーを用いる。各プロジェクタの光軸が投影対象の中心を向くようにプロジェクタを設置するよう被験者に指示した。

各被験者は、2通りの条件でプロジェクタを設置する(Without Guide条件:プロジェクタから視覚ガイドを投影しない、With Guide条件:プロジェクタから対応した視覚ガイドを投影する)。被験者の自己申告(これ以上調整できない・する必要がないと判断)によって、プロジェクタ設置の完了とする。プロジェクタを設置した後、プロジェクタと投影対象との位置姿勢関係を求める。これには、予め設定しておいた対象上の点の三次元座標値とそれに対応するプロジェクタ投影画像上での座標値を6点以上選択し、最小自乗法を用いて、位置姿勢関係を規定する座標変換行列を求め、プロジェクタの実際の設置位置を推定した。推定された設置位置とGUIにより指示した目標位置との間のユークリッド距離を用いて評価を行った。

被験者は20名の男女10名で、Without GuideとWith Guideそれぞれ1度ずつの条件下で、2台のプロジェクタを投影対象の周囲に設置してもらった。被験者毎に、どちらの条件を先に行うかはランダムとした。プロジェクタの目標位置として、投影対象を中心とする半径700mmの半球上に等間隔にとった50個の点から、互いの距離が800mm以上離れている2点が試行毎にランダムに選択された。

10名がそれぞれ2台のプロジェクタを設置したときの、目標位置と推定設置位置との間のユークリッド距離を図7に示す。結果より、Without Guide条件では平均で134mm目標位置から設置位置がズレていたのに対して、With Guide条件ではそのズレが103mmに減少していたことがわかった。 $t$ 検定の結果、2条件下の結果の有意差が確認された( $t_9=3.43$ ,

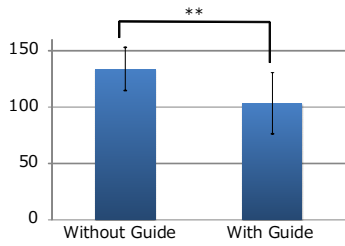


図7：目標位置と推定設置位置との間の距離の平均と標準偏差(\*\*:  $p < 0.01$ )

$p < 0.01$ ). 以上の結果より、今回の実験では、提案する視覚ガイドを用いた方が目標位置のより近くにプロジェクタを設置することができることが確認できた。

### (3) HDR 表示実験

バランス型 ( $w_m, w_r$ ) = (0.5, 0.5) での最適配置と 3D プリンタ出力、投影画像を用いて実際に投影実験を行った。3D プリンタには 3D Systems 社の Zprinter650 を用いた (コントラスト 10:1, 実測値)。また、プロジェクタは先の被験者実験と同様のものを用いて、視覚ガイドによりプロジェクタ設置を行った。

図8に示すのは、対象物体と同形状の白色模型にテクスチャ投影したもの、カラー3Dプリンタ出力を環境光下に置いたもの、そして提案手法による結果である。これらの3通りの表示方法を比較すると、全て多視点に対応した立体的な表示を行っているが、白色模型にプロジェクションを行った場合は撮影の



図8：HDR表示結果（左から、白色模型にテクスチャ投影、同様環境光下に置いた3Dプリンタ出力、提案手法）

露光時間が長い時の白飛びが目立ち、3Dプリンタ出力のみの場合は露光時間が短いときの最大輝度が低い。一方、それらと比較して提案システムでは撮影の露光時間が短いときも長いときもそれぞれ輝度の諧調を良好に保存しており、提案システムが最も高コントラストに表示できていることがわかる。実験で用いたプロジェクタはコントラスト 1,000:1, RP出力はコントラスト 10:1 であることから、理論的には提案システムの表示コントラストは 10,000:1 となる。

### 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4件)

① 長瀬百代, 岩井大輔, 佐藤宏介, "複数投影環境における投影像の空間周波数解析に基づくモデルベースボケ補償および除去," 日本バーチャリアリティ学会論文誌, Vol.15, No.3, pp.503-512, 2010. 査読有。

② Daisuke Iwai and Kosuke Sato, "Optical Superimposition of Infrared Thermography through Video Projection," Infrared Physics & Technology, Elsevier, Vol.53, No.3, pp.162-172, 2010. 査読有。

[学会発表] (計25件)

① Daisuke Iwai, "Procams for Interactive Surfaces," 2011.10.13, ETH, スイス・チューリッヒ. 招待講演

② Saeko Shimazu, Daisuke Iwai and Kosuke Sato, "3D High Dynamic Range Display System," IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2011.10.27, スイス・バーゼル。

[その他]

ホームページ等

<http://www.sens.sys.es.osaka-u.ac.jp/users/iwai/>

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

岩井 大輔 (DAISUKE IWAI)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・講師

研究者番号：90504837

#### (2) 研究分担者

該当者なし

#### (3) 連携研究者

該当者なし