

## 2次元コード・マーカを用いたAR展示支援システムの構築

中井 雄也                  村上 広樹                  岡田 至弘  
龍谷大学大学院          理工学研究科

近年、博物館における展示支援の技術開発が活発に進められている。一般的な展示支援において、展示物の説明は補足的であり、利用者が展示物を理解するには展示物の各部位に対応した更に詳細な説明が必要となる。また、拡張現実感(AR)とは、カメラから撮影された画像に対してリアルタイムに3次元位置姿勢検出を行う技術であり、展示物及び各部位の位置特定の精度の向上を計ることが考えられる。よって本研究では、博物館におけるAR展示支援システムの構築を行う。博物館においてARの技術を利用するために、マーカ自身に情報を埋め込むことができる2次元コードをマーカとし、展示物の外観を損なわないために近赤外線でマーカを投影し、カメラからマーカを検出する手法を提案する。

### Construction of AR Exhibition Support System Using 2D Code Marker

Nakai Yuya                  Hiroki Murakami                  Yoshihiro Okada  
Graduation School of Science and Technology  
Ryukoku University

Recently, technological development of exhibition support system has been actively advanced for the museum. General exhibition support system is supplementary description of the exhibits. To understand the exhibit the user will require a more detailed description corresponding to each part of the exhibit. In addition, Augmented Reality (AR) is a technology for the detection of 3D position and orientation of the camera images in real time. We may be considered to improve the accuracy in the detection of 3D position and orientation of each part of the exhibit using AR. Therefore, this study is to build the AR exhibition Support System in the museum. In order to use AR technology in the museums, the marker is 2D code that information can be embedded in the marker itself. We propose a method to detect 2D code marker from the camera images, projecting a near-infrared marker in order to protect the appearance of the exhibits.

#### 1. はじめに

博物館や美術館などのミュージアム施設において、画像や音声を用いたガイド情報による展示支援の技術開発が活発に進められている。その背景には、博物館への来客数が減少しているからであり、原因の1つとして展示物の説明不足がある[1]。一般的な展示支援は、展示物に知識のある人を対象としているため、展示物の説明は全般的な補足であり、一般の利用者が前提知識なしに展示物の説明の省かれている部分を理解するのは困難であった。そこで、展示物の各部位に対応した更に詳細な説明を行うことで展示物をよく見て考える能動的な鑑賞行為の誘発となると考えられる。そのため、展示物及び各部位の正確な位置特定を行う必要がある。

近年、計算機の小型化により実世界で計算機が利用することが容易となった。実世界の幅広い状況に入出力手法を用いて計算機と柔軟に対話する技術として拡張現実感 (Augmented Reality: 以下をAR) がある。ARとは、カメラから撮影された画像に対してリアルタイムに3

次元位置姿勢検出を行うことで、電子情報(CG)を重畳表示させる技術である。ARの技術は、カメラを用いることで簡易的に位置特定を行えるので、展示支援における展示物及び各部位の位置特定の精度の向上を計ることが考えられる。

本研究は、龍谷ミュージアムに展示している舍利容器[2]の模型を対象とし、展示物の説明不足を補うためにARの技術を活用して正確な位置特定を行い、環境にロバストな展示支援を目標とする。よって、博物館においてARの技術を利用するために、マーカ自身に情報を埋め込むことができる2次元コードをマーカとし、展示物の外観を損なわないために近赤外線でマーカを投影し、カメラからマーカを検出する手法を提案する。

#### 2. 大型の舍利容器

本研究で展示物の対象とした大型の舍利容器[2]について紹介する。舍利容器とは、大谷探検隊がクチャのスパン遺跡のストゥーパから発掘したものである。胴体側面には21人の楽人・舞人が描かれ、蓋には円形を連ねた連珠円分の中に翼天使が90°毎に4か所描かれている。

胴体の直径は、約 40 [cm]であり、轆轤で形成した木質の蓋と胴体に麻布を貼り、下地を整えて彩色している。蓋に天使が描かれ、胴体側面の楽人・舞人は仮面劇である伎楽が描かれているため、東西の文化が接触した西域らしい表現方法と言える。よって、西域文化資料を代表する名品の一つである。図1に舍利容器の全体像を示す。



図1：舍利容器

また、博物館の照明[3]は、放射熱や乾燥により展示物の劣化の原因になるものは避ける必要がある。そこで、博物館では、照明として赤外線を放射が少ないLEDを使用する照明を行う。しかし、LED照明も少ないながら紫外線を放射しているため、展示物への影響がより少ない前面に紫外線カットガラスを使用する。LED照明を使用した展示照明条件を表1に示す。

表1：照明環境

	照度 (lx)	全光束 (lm)	色温度 (K)	紫外線出力	赤外線出力
照明環境	180	2500	4000	1%以下	1%以下

利用者が展示支援を提供される条件は以下の通りである。

- ・固定され動かさない
- ・周囲の 360° 見ることができる
- ・透明なケースの中にあり触れられない

よって、展示支援の技術開発を行う際、舍利容器の周囲の模様にはそれぞれ意味があり、舍利容器を理解してもらうためには、詳細な説明が必要となる。そのため、利用者の展示物からの位置、姿勢、角度といった正確な情報が必要となってくる。

### 3. 関連研究

現在のARの技術では、位置特定の手法として物理センサを用いる手法[4]とカメラによる撮影画像を用いる手法の2種類に分けられる。物理センサを用いる手法では、地磁気やジャイロやGPS(全地球測位システム)や加速度センサなどのセンサを用いたシステムが数多く開発されている。しかし、物理センサを用いた位置推定を行う際に、広範囲で計測できるGPSを利用することが一般的であり、博物館などの屋内での高精度な位置特定が期待できないと言える。そこで、カメラによる撮影画像を用いる手法を使用する。

#### 3.1. マーカを用いたARの研究

カメラ画像を用いる手法としてARの技術に代表されるのは加藤の手法[5]がある。加藤の手法では、単純なマーカの頂点座標を検出することで安定かつ高速に3次元位置姿勢検出することができる。加藤の手法の処理の流れを図2に示す。

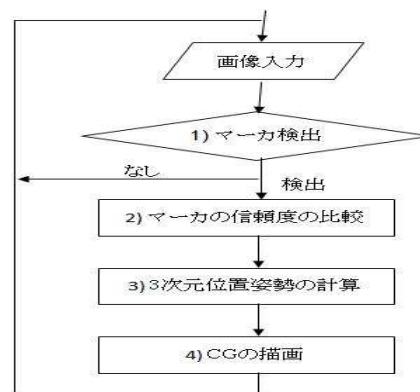


図2：加藤の手法の流れ

- 1) マーカの検出では、カメラからの入力画像に、固定閾値による2値化とラベリングを行い、領域ごとにラベルを割り当てる。各領域に対して重心、面積、外接長方形が計算される。全ての領域から面積の巨大領域や微小領域や画像境界に接する連結領域も除外する。残ったものに輪郭抽出を行い、輪郭線データに折れ線近似を行う。4本の線部によって十分な精度が得られたものを何個かマーカ候補とする。
- 2) 頂点座標から射影変換を行い、マーカ候補とテンプレート画像の比較をし、もっとも一致する画像マーカを最良候補とする。
- 3) 3次元位置姿勢の計算では、事前に取得してあったカメラの内部パラメータと頂点座標よりカメラ座標系を求める。カメラ座標

系からマーカ座標系へ透視変換行列によって、カメラの外部パラメータを求める。また、カメラ座標系を  $[X_c \ Y_c \ Z_c \ 1]$ 、マーカ座標系を  $[X_m \ Y_m \ Z_m \ 1]$ 、 $r$  を回転成分、 $t$  を並進成分とおき、式(1)にマーカ座標系からカメラ座標系へ透視変換行列を示す。

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)の外部パラメータが、マーカの3次元位置姿勢とする。

- 4) マーカの3次元位置姿勢の計算した結果を元にカメラ画像にCGの描画を行う。

加藤の手法では、簡易的なマーカを使用するため、複数のマーカを用いると誤検出があった。また、シミや汚れなど実世界の環境に弱いということが言える。

### 3.2. 赤外線カメラを用いたARの研究

赤外線を利用したARの技術として中里らは不可視マーカを用いた3次元位置姿勢検出手法[6]を提案している。この手法では、半透明な再帰性反射材で構成されたマーカを天井に多数設置し、上方に向け赤外線を不可視マーカにあて、頭部に装着した赤外線カメラを用いて不可視マーカの認識し3次元位置姿勢検出を行っている。しかし、実際に博物館で利用するためには、事前に不可視マーカを貼る必要があり、マーカ検出用の赤外線カメラに加えてAR映像提供用のカメラを装着するので利用者の負担が大きいと言える。

そこで、不可視マーカのようなマーカを事前に設置するのではなく赤外線でマーカの形を常に投影させておき、赤外線カメラを使用することでマーカの形をした赤外線だけ認識し、外観を損なわないマーカとする。図3には、舍利容器に赤外線のマーカをあてた様子を示す。



①可視光撮影 ②赤外線カメラによる撮影  
図3：舍利容器と赤外線マーカ





また、赤外線は、電磁波の中で波長が約0.75~1000 $\mu\text{m}$ の範囲にあり、人間の目で見える可視光線が、約0.4~0.75の範囲の波長にあたるので外側に位置するため可視することはできない。赤外線の中でも波長が大きくなるにつれて、近赤外線、中赤外線、遠赤外線に分けられる。赤外線は、波長が大きくなるにつれ熱を持つ性質があるため展示物に悪影響となる。よって、本研究では近赤外線を用いる。

### 4. 2次元コード・マーカの3次元位置姿勢検出のパターン化

従来のARの技術を用いるためには、マーカが必要となる。提案手法では、マーカ自身に情報を埋め込むことができ、一部が欠けても情報の復元ができることから2次元コード[7]をマーカとして使用する。

2次元コードとは、黒や白の2色で表現され、横方向にしか情報を持たない1次元コードに対し、水平・垂直方向に情報を持つことで情報量を飛躍的に増加させたコードのことである。また、2次元コードの作成時に誤り訂正機能をもたせているので、2次元コードの一部に汚れや破損があってもある程度のデータの復元が可能である。表2に本実験で使用する2次元コードの種類を示す。

表2：2次元コードの種類

	QR Code	Veri Code	DataMatrix	Aztec Code
2次元コード				

近赤外線で投影された2次元コード・マーカをカメラの撮影画像から画像処理技術を用いて2次元コード・マーカの頂点座標の検出の流れを図4に示す。

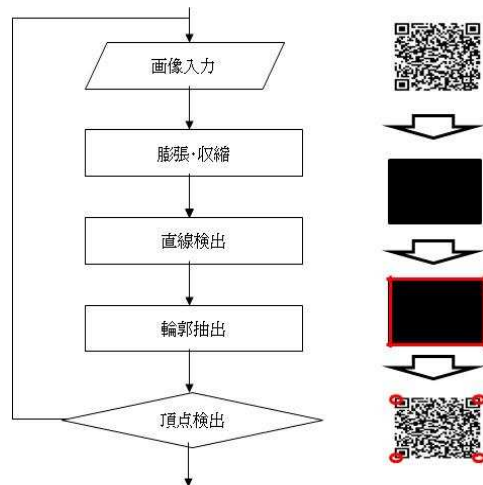


図4：提案手法の流れ

従来の AR 技術では、カメラ画像からマーカの検出の頂点推定することで、事前に取得してあったマーカの大きさといった情報から 3 次元位置姿勢の計算を行うことができる。また、2 次元コード・マーカには様々な種類があり、中の情報を読み取るためのデコードの処理に頂点座標の検出を行うが、2 次元コード・マーカの形や特徴による様々な手法がある。そこで提案手法では、どのような 2 次元コード・マーカに対しても 3 次元位置姿勢検出ができる手法を提案する。

提案手法では、2 次元コード・マーカが複雑な形により、従来の AR の技術を利用するのに頂点を検出する必要がある。そのため、画像処理である技術であるモルフォロジー演算[8][9]を用いて画像の膨張 (Dilation) と収縮 (Erosion) 処理を行う。X を対象画像、Y を構造要素、 $\oplus$  をミンコフスキー和、 $\ominus$  をミンコフスキー差として、Dilation, Erosion はミンコフスキー和とミンコフスキー差を用いて定義する。式(2)に膨張処理を式(3)に収縮処理の計算を示す。

$$Dilation : X \oplus Y \quad (2)$$

$$Erosion : X \ominus Y \quad (3)$$

ミンコフスキー和とミンコフスキー差は、画像中の領域をある画素分だけ大きくする、または小さくする処理である。具体的には、膨張処理ではノイズなどにより 2 本に分けられた直線を、元の 1 本の直線に繋げることができる。収縮処理では、線幅を細かくし、細かいノイズを除去することができる。膨張・収縮を組み合わせることで 2 次元コード・マーカの白い部分を取り除き検出しやすい真っ黒なマーカとする。

次に膨張・収縮で得られた画像に対して頂点検出を行いたい、安定した四角形のマーカをとるために直線検出を行う。直線検出のハフ変換について述べる。ハフ変換は、直線が連続していなくても直線を抽出でき、画像上にノイズが存在しても同一直線上で特徴点が存在すれば直線を抽出できる。直線を表す代数方程式は、 $\rho$  は座標原点から直線へ下ろした垂線の長さ、 $\alpha$  は垂線と x 軸との間の角度を表すパラメータとすると、式(4)のようになる。

$$\rho = x \cos \alpha + y \sin \alpha \quad (4)$$

次に、4 辺から輪郭抽出により頂点座標を推定する。直線検出によって得られたマーカの輪郭の抽出を行い、4 辺が隣接しているマーカを検索する。輪郭とは、物体の外形を表す線であり、背景と物体との見かけの境界線と定義する。輪郭の情報からマーカを検索するために、輪郭

線から折れ線近似を行う。折れ線近似により得られた情報からマーカの頂点座標を求める。

カメラ画像の頂点推定で得られた座標より 2 次元コード・マーカのデコードと 3 次元位置姿勢の計算を行う。3 次元位置姿勢の計算は式 (1) を用いて算出する。

また、式(1)では、カメラの 3 次元位置姿勢を求めることができるが、カメラとマーカとの水平方向の角度  $\beta$  と垂直方向の角度  $\gamma$  は、カメラの位置から三角関数を用いて計算する。カメラの位置は、3 次元位置姿勢の計算によって求めた座標値  $[X_c \ Y_c \ Z_c]$  を用いる。式 (5) に水平方向の角度、式 (6) に垂直方向の角度を求める式を示す。

$$\tan \beta = \frac{X_c}{Z_c} \quad (5)$$

$$\tan \gamma = \frac{Y_c}{Z_c} \quad (6)$$

最後に、計算によって得られた結果より、展示支援のガイド情報の画像や音声の提供を行う。

## システムの概要

本システムは、舍利容器の外観を損なわないために利用者が観賞して展示物の邪魔にならないことを考慮する必要がある。そのため、頭上からプロジェクタで赤外線を投影する。カメラを用いるために、カメラ画像にマーカと舍利容器が入る範囲を含めて舍利容器の蓋の部分に 2 次元コード・マーカを設置する。舍利容器の蓋の部分には、提案手法の認識率を踏まえて 2 次元コード・マーカを 4 つ設置する。利用者は赤外線カメラ付きのガイド端末から舍利容器のガイド情報を各部位に対応した画像と音声の説明を受ける。本システムの全体像について図 5 に示す。

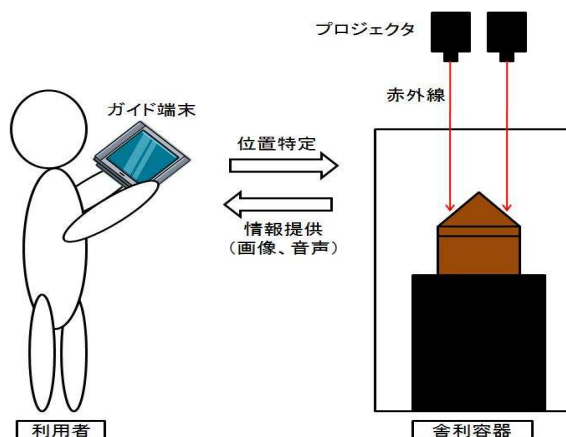


図 5 : 本システムの全体像



## 事前準備

舍利容器の頭上からプロジェクタで近赤外線  
の 2 次元コード・マーカを常時投影する。2 次元  
コード・マーカは舍利容器の蓋の部分に 90°  
ずつ 4 か所投影し、其々の 2 次元コード・マー  
カに舍利容器の位置情報を埋め込む。ガイド端  
末として赤外線カメラが付いているものを用意  
する。

## ガイド端末

赤外線カメラ付きのガイド端末が舍利容器から  
2 次元コード・マーカを検出する。2 次元コ  
ード・マーカの 3 次元位置姿勢推定とデコード  
により中の情報の読み取り、ガイドに必要な情  
報を利用者に提供する。また、利用者が詳細な  
情報が必要した時に、ガイド端末を向けた方向  
に対して、舍利容器の各部位に対応した詳細な  
情報を提供する。

## 利用者

利用者がガイド端末を舍利容器に向け、全体  
の説明を受ける。ガイド端末を近づけて 21 人  
の楽人や天使といった各部位に対応した画像と  
音声のガイド情報を受ける。

## 5. シミュレーション実験 と性能評価

本実験では、舍利容器を対象としているが、  
非常に価値があるため実際には使用して実験が  
できない。そのため、シミュレーションとして  
以下の実験を行うことで、実際に博物館で使用  
する際の優位性について検証する。また 3 次元  
位置姿勢の計算には、ARToolKit [5]を利用した。

### 5.1. マーカの認識率実験

実験環境の背景は、マーカのみ検出するた  
めの理想的な環境として白色の平坦な机の上に  
2 次元コード・マーカを設置する。提案手法を  
用いて Web カメラから 100 フレームごとの認  
識率を測定する。また、カメラはマーカに対  
して真上から撮影して、カメラとマーカとの  
距離は 10 [cm]ずつ変化させていき、マーカ  
の頂点座標が認識できるかを測定する。2 次  
元コード・マーカは、1 辺の大きさが 6 [cm]  
の表 2 のマーカをそれぞれ用意した。実験を  
行ったマーカに対する認識率の結果を図 6 に  
示す。

2 次元コード・マーカの形により認識率の  
違いが出る結果となったが、それぞれの特徴  
にあった認識率が出ていると言える。また、  
カメラとマーカから距離が遠くなるにつれて  
精度が落ちたのは、膨張・収縮処理による環  
境面での照度の違いやマーカ検出時に直線  
検出を行っているためマーカから離れすぎ  
ると直線を認識しなかったため精度が落ち  
たと考えられる。

展示支援として活用するために展示物とガ  
イド端末の距離が 20~40 [cm]の間で認識率  
を考えると QR コードと VeriCode が 85%  
以上の認識率がある。展示支援では、画像  
や音声によるガイド情報を流すので 85%  
以上の認識率で充分であると言える。また、  
VeriCode の方が認識率は高いが、日本  
で多く普及して情報量をより多く埋め込  
めるのが QR コードであるため、本実験  
では QR コードを使用する。

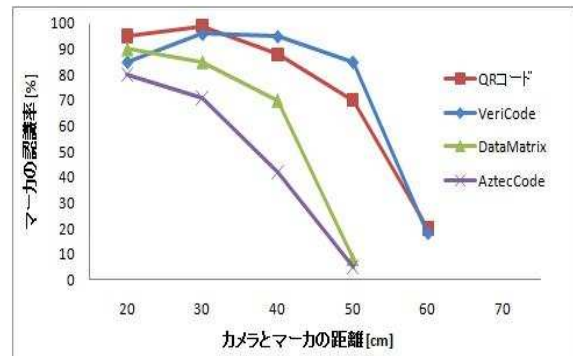


図 6: マーカの認識率

### 5.2. 垂直方向の角度推定実験

次に 2 次元コード・マーカの垂直方向の角度  
推定実験を行う。条件は、同じく背景は白色  
の平坦な机の上に 2 次元コード・マーカを  
設置し、マーカの大きさや距離を変えて、頂  
点座標が認識できる最大の角度について実  
験を行う。用意した 2 次元コード・マーカ  
は、QRコードの 1 辺の大きさが、4 [cm]、  
6 [cm]、8 [cm]、10 [cm]の 4 種類  
である。マーカに対して真上からカメラで  
撮影した状態を角度 0° とし、認識でき  
る最大の距離や角度の実測する。図 7 に垂  
直方向で角度の精度評価を行った結果を示  
す。

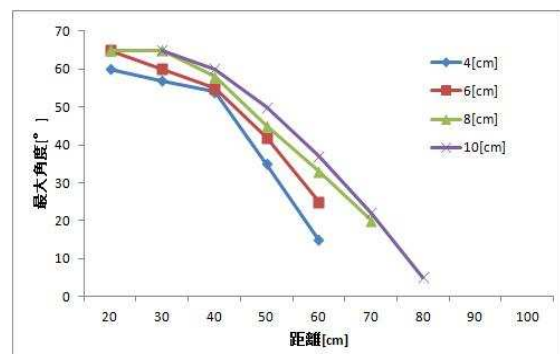


図 7: 垂直方向の角度推定実験

垂直方向の角度の精度は、同じく 20~40  
[cm] の間で 50° 以上の角度推定の精度が  
ある。垂直方向の角度推定では、真上から  
の角度になるため(最大角度×2)の範囲で  
認識が可能である。舍利容器が透明なケ  
ースに入っているため、精

度は充分であると考えられる。また、2次元コード・マーカの大きさが大きくなるにつれて角度精度が向上する結果となった。2次元コード・マーカ自身に大きさの情報を埋め込めるので、認識率によってマーカの大きさをリアルタイムに変えることが可能である。

### 5.3. 舍利容器の角度推定実験

次に2次元コード・マーカの水平方向の角度推定実験を行う。水平方向の角度推定には、実際の環境を想定し、舍利容器の蓋の部分の模型を用意する。事前に舍利容器の蓋の部分には、舍利容器から利用者がどの方向にいても検出できることを踏まえて、90°ごとにマーカを設置する。提案手法を用いて舍利容器の中心からの角度 $\theta$ を左回りで周囲全体を15°ごとに測定し、実測との誤差から精度評価する。2次元コード・マーカはQR Codeを用意し、マーカとカメラの距離は30 [cm] 離してマーカとカメラが垂直になるように舍利容器の周囲を計測する。また、マーカを複数検出した場合は、カメラからマーカが最も近い方をマーカとして検出するようにする。実験環境の様子を図8に示す。水平方向の角度 $\theta$ とマーカを認識した時間について提案手法と実測の関係を図9に示す。

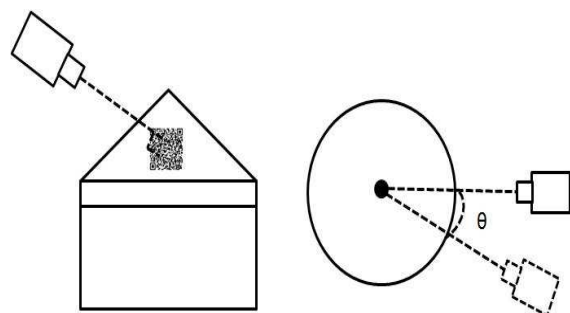


図8：舍利容器の実験環境

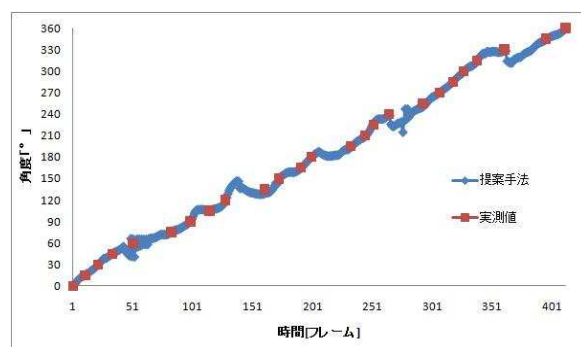


図9：舍利容器の角度推定実験

図9から所々ばらつきが見られるのは、マーカとマーカの境目にカメラがあったため計算による誤差だと考えられる。しかし、誤差はほぼ微小であり十分な成果が得られたと言える。ま

た、誤差に関しても従来の手法では、3次元位置姿勢の計算をする際に平面を想定しているためであり、舍利容器の曲面から推定しているために誤差が出たと考えられるので、今後の課題でもある。

## 6. おわりに

本稿では、博物館の展示支援として、赤外線カメラ付きのガイド端末を用いて外観を損なわない近赤外線マーカとし、提案手法から様々な2次元コード・マーカの3次元位置姿勢検出を行った。シミュレーション実験から2次元コード・マーカの3次元位置姿勢検出における汎用性が高いことと博物館における展示支援にARの技術を用いることで、展示物の正確な位置特定の精度の向上できることを示した。今後はマーカの認識率の向上を検討し、実験では実際の環境と近い環境を用意して、それらの誤差について改善していく必要がある。

## 参考文献

- [1] 奥本 素子, 加藤 浩: "博物館展示を理解・解釈するために必要な学習支援についての考察", 日本教育工学会論文誌 33(4), pp.423-430, 2010
- [2] 西村明高: " 釈尊と親鸞 - インドから日本への軌跡", 法蔵館, pp.71-72, 2011
- [3] C. Cuttel: " Damage to Museum Objects due to Light Exposure", Lighting Res. Technol. 28(1), pp.1-9, 1999
- [4] 暦本純一, 塩野崎敦, 末吉隆彦, 味八木崇: " PlaceEngine:実世界集合知に基づくWiFi 位置情報基盤", インターネットコンファレンス2006, pp.95-104, 2006
- [5] H. Kato and H. Billinghurst: " Marker tracking and hmd calibration for a video-based augmented reality conferencing system", Proc. 2nd IEEE/ACM Int. Workshop on Augmented Reality, pp. 85-94, 1999.
- [6] 中里祐介, 神原誠之, 横矢直和: " 再帰性反射マーカと赤外線カメラを用いたユーザの位置姿勢同定", PRMU, Vol.104, pp.25-28, 2004
- [7] " <http://www.qrcode.com>", QRコードドットコム, 株式会社デンソーウェーブ
- [8] 小畑 秀文: " モルフォロジー", コロナ社, 1996
- [9] G.Matheron, J.Serra: " The birth of mathematical morphology", Proc. 6th International Symposium on Mathematical Morphology, pp.1-16, 2002