

AR マーカーを利用した 3D 環境モデル構築手法の提案

秋本 高明・早川 玲央*

A method for 3D environment model construction using the AR marker

Takaaki AKIMOTO and Reo HAYAKAWA

Abstract

This paper proposes a method for constructing a 3D environment model using the AR marker. In this method, we assume that the 3D models of the structures such as rooms or buildings and the objects such as desks or chairs are prepared in advance. A mark called AR maker is put on the each object. The position and orientation of the AR maker are measured from the captured image by the camera using ARToolKit. Then, the position and orientation of the objects are obtained and the 3D models of the objects are placed in the 3D models of the structures. Experimental results are shown and future issues are discussed.

Key words: 3D model, Augmented Reality (AR), ARToolKit, Computer Graphics (CG)

1. はじめに

我々は車いす利用者や歩行に杖が必要な人など移動が容易でない人の移動シミュレーション・システムの開発を行っている。これは、道路や建物などの現実世界の 3 次元モデルをパソコン中に構築しておき、その 3 次元モデルの中で車いすなどを仮想的に移動させることにより、事前に通行困難な場所や危険な場所を把握しようとするシステムである。このようなシステムを実現するためには、現実世界と同じ 3 次元環境をパソコン中に容易に構築することが必要となる。

例えば、建物内の 3 次元モデルを構築する場合、床、壁、ドアといった建物自体の 3 次元モデルは、その建物の建築時の設計図などから容易に構築できるかもしれない。さらに、改築などを行わないかぎりその建物自体の 3 次元モデルを修正する必要はない。しかし、建物の中には机や椅子などの家具やその他の様々な物が置かれている。それらは容易に動かせるため、それらの配置を含む建物内の 3 次元モデルを構築することは容易ではない。例えば、椅子などの配置が変わる毎に 3 次元環境モデルを修正する必要がある。本研究では、建物などの構造物の 3 次元モデルはすでに構築されているものとして、その中に配置されている家具などの移動可能な物体の配置を含む 3 次元環境モデルを容易に構築することを目的とする。

人は視覚情報に基づき机や椅子などの物体を識別し、それらの大まかな配置を理解することができる。これと同様にカメラで撮影した画像から、画像の認識・理解技術により物体の形と位置・姿勢情報を取得しようとする研究が行われている[1]。しかし、現状の技術では、様々な色や形を持つ家具などの物体を精度良く識別することは容易ではない。また、赤外線やレーザーを使ったレンジファインダー（距離計）によって距離画像を取得し、距離画像から環境の 3 次元モデルを構築しようとする研究も行われている[2][3]。しかし、この方法には距離画像を取得できる装置が必要となる。

本文では、一般的なカメラを使って家具などの移動可能な物体の配置を含む 3 次元環境モデルを簡易に構築する一手法を提案する。ここで提案する手法は、物体の検出に AR マーカー[4][5]を用いる。つまり、検出対象とする物体に所定の

AR マーカーを貼り付けておき、カメラで撮影した画像よりその AR マーカーの位置・姿勢を計測することにより物体の位置・姿勢を得る。物体の 3 次元モデルは予め作成しておき、計測した位置・姿勢情報に基づいてその物体の三次元モデルを 3 次元環境モデル中に配置することにより、動かせる物体を含む 3 次元環境モデルを構築する。

2. 提案手法の概要

本文で提案する手法の基本的な考え方を以下に述べる。なお、前述したように、提案手法は家具などの移動可能な物体の 3 次元モデルの構築が目的であり、建物の床や壁といった構造物の 3 次元モデルは、別の方法で事前に構築されているものとする。

【提案手法の処理の流れ】

- (1) 対象とする物体の 3 次元モデルを作成する。
- (2) AR マーカーと呼ばれる 2 値画像を作成し、その AR マーカーを対象物体の所定の位置に貼り付ける。
- (3) AR マーカーを貼付された物体をカメラで撮影することにより、AR マーカーを検出すると共にその位置・姿勢を計測する。
- (4) AR マーカーの位置・姿勢情報に基づいて、そのマーカーが貼り付けられている物体の位置・姿勢を求める。
- (5) 物体の位置・姿勢情報に基づいて、構築物の 3 次元モデル中にその物体の 3 次元モデルを配置する。

上記の説明で、AR マーカーとは、ARToolKit[4][5]と呼ばれる拡張現実感アプリケーションソフトを作成するためのライブラリで使用されるマーカーである。

3. AR マーカーを利用した 3 次元環境モデルの構築

以下に、本文で提案する AR マーカーを利用した 3 次元環境モデルの構築処理について詳しく述べる。

3. 1 物体 3 次元モデルの作成

最終的に移動物体の 3 次元モデルを 3 次元環境モデル中に配置し、移動物体を含む 3 次元環境モデルを構築したいので、移動物体の 3 次元モデルが必要である。これは 3 次元モデルを入

*和歌山大学システム工学部

力するツールなどを利用して作成する。例えば、図 1 は、直方体の段ボール箱の 3 次元モデルの例である。

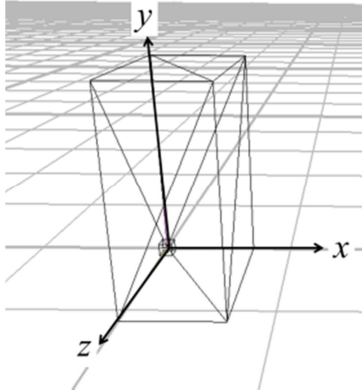


図 1 物体の 3 次元モデルの例

3. 2 AR マーカーの作成と物体への貼付

次に、移動物体に貼り付ける AR マーカーを作成し、それを物体の所定の位置に貼り付ける。AR マーカーは文献[5]などを参考にして、所定の規則に基づいて作成する。本手法では、AR マーカーの位置に加えてその向きを計測する必要があるため、その AR マーカーは点対象の図形ではなく向きが判別できるような図形にする必要がある。図 2 に AR マーカーの例を、図 3 にその AR マーカーを段ボール箱に貼り付けた例を示す。なお、AR マーカーを物体に貼り付けたとき、物体の座標系における AR マーカーの位置・姿勢を計測しておき、それを変換行列などの形で記録しておく。



図 2 AR マーカーの例



図 3 AR マーカーを貼り付けた物体

3. 3 ARToolKit による AR マーカーの位置・姿勢の計測

(1) カメラキャリブレーション

カメラで撮影するという事は、カメラのレンズを通して現実世界である 3 次元の空間を 2 次元に透視投影することである。カメラのレンズは多種多様であり、特に焦点距離(または画角)が異なれば、同じ 3 次元空間を同じ場所から撮影しても、異なった撮影画像が得られる。そこで、実際に使用するカメラやレンズの特性を予め計測しておく必要がある。これは、カメラキャリブレーションと呼ばれる。

ここでは、ARToolKit が用意している方法によってカメラキャリブレーションを行う[5]。具体的には、等間隔に数十個の点が印刷された平坦な板を実際に使うカメラで撮影し、点と点間の実測距離や撮影画像上での点の位置などを入力することによりカメラキャリブレーションを行う。

(2) AR マーカーの位置・姿勢の取得

図 3 に示すような AR マーカーを貼り付けた物体をその AR マーカー全体が見えるようにカメラで撮影することによって、AR マーカーの位置と姿勢を計測する。これには ARToolKit とよばれる拡張現実感アプリケーションを作成するためのソフトウェアライブラリーを利用する[4][5]。

ARToolKit を用いて AR マーカーをカメラで撮影することにより、カメラを原点とした座標系での AR マーカーの位置・姿勢を変換行列の形式で得ることができる。この変換行列は、マーカー座標系をカメラ座標系に座標変換する変換行列である。なお、AR マーカーの寸法は mm(ミリメートル)を単位として指定するため、AR マーカーの位置も mm を単位とした値で得られる。また、ARToolKit から得られる変換行列 M_{cm3} は、(1)式のように一般的な 4×4 の変換行列の 4 行目を省略した 3×4 の行列である。このため、 M_{cm3} に 4 行目を加えて(2)式に示すような一般的な変換行列 M_{cm4} を作り、以降はその変換行列を使う。これらの変換行列で $r_1 \sim r_9$ は回転を表し、 t_x, t_y, t_z は平行移動を表す。

$$M_{cm3} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$M_{cm4} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ARToolKit では、カメラの座標系 (x_c, y_c, z_c) と AR マーカーの座標系 (x_m, y_m, z_m) は図 4 に示す座標系となっている[5]。ここで、カメラの座標系は右手座標系であるが、カメラの底面が $+y$ 、カメラの撮影方向の中心が $+z$ の向きとなるような座標系となっている。3 次元の座標系は、 $+y$ を上向きにすることが多い。これに対し ARToolKit のカメラ座標系は、カメラの上面が下向きといった普通の感覚では上下逆さまの座標系となっている。

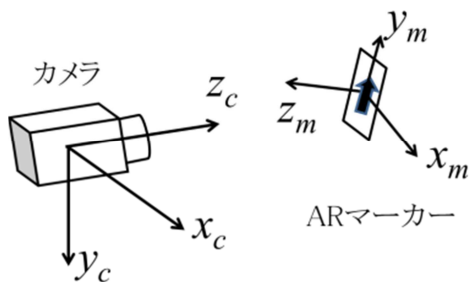


図 4 ARToolkit におけるカメラ座標系とマーカー座標系

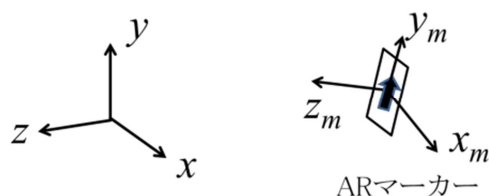


図 5 補正後の座標系

一般的に人はカメラの上面が+y となるような座標系を想像し、そのような座標系の方が直感的に理解しやすい。そこで、図 4 で示す ARToolkit のカメラ座標系で得られる座標を図 5 のような一般的な右手座標系に読み替える補正を行う。この補正は、図 4 と図 5 を比べれば分かるように、カメラ座標系の (x, y, z) を $(x, -y, -z)$ に変換すればよい。つまり(3)式の変換行列 M_{x180} で変換すればよい。なお、この変換は、 x 軸を中心として 180° 回転することと等価である。また、この補正前は AR マーカーはカメラより $+z$ の方向にあるが、補正後はカメラより $-z$ の方向に位置することになる。

$$M_{x180} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

結局、(4)式に示すように、ARToolkit より得られた変換行列 M_{cm4} と(3)式の変換行列 M_{x180} を合成した変換行列 M_{cm} をマーカー座標系からカメラ座標系への変換行列とする。例えば、マーカー座標系における座標 (x_{m1}, y_{m1}, z_{m1}) は、(5)式により図 5 に示す座標系における座標 (x_{c1}, y_{c1}, z_{c1}) に変換できる。なお、変換行列が(2)式の形の場合の変換行列の合成では、1 番目の座標変換の変換行列の左側に 2 番目の座標変換の変換行列を置いて行列の乗算を行うこととなる。そのため、(4)式では最初の変換行列 M_{cm4} に対し、その次の変換行列 M_{x180} を左側に置いている。もし、変換行列が式(2)の行列の転置行列の形であれば、変換行列の乗算の順番は上記の順番の逆となる。

$$M_{cm} = M_{x180} M_{cm4} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} x_{c1} \\ y_{c1} \\ z_{c1} \\ 1 \end{bmatrix} = M_{cm} \begin{bmatrix} x_{m1} \\ y_{m1} \\ z_{m1} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

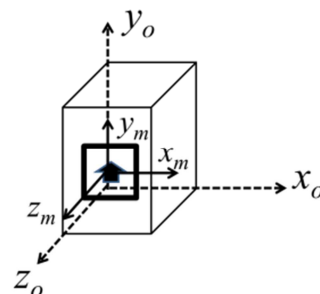


図 6 マーカー座標系とモデル座標系

3. 4 物体の位置・姿勢の計算

3. 3 で求めた変換行列 M_{cm} により、マーカー座標系の座標をカメラ座標系に変換できる。しかし、物体の 3 次元モデルは、一般にはマーカー座標系とは別の座標系で作成されているため、これだけでは 3 次元モデルをカメラ座標系に変換することはできない。3 次元モデルの座標系 (モデル座標系と呼ぶ) からマーカー座標系への座標変換を行う変換行列 M_{mo} が必要である。この変換行列 M_{mo} とマーカー座標系からカメラ座標系への変換行列 M_{cm} により、3 次元モデルの各座標をカメラ座標系の座標に変換することが可能となる。

モデル座標系からマーカー座標系への変換行列 M_{mo} は、その 3 次元モデルの元となった物体上での AR マーカーの貼り付け位置に基づいて求める必要がある。例えば、図 3 に示すように AR マーカーを貼り付け、この物体の 3 次元モデルが図 1 に示すような座標系で作成されているとすると、マーカー座標系とモデル座標系は図 6 に示すような関係となる。図 6 の場合、モデル座標系からマーカー座標系への変換は、平行移動のみで実現できる。例えば、図 6 でモデル座標系での 3 次元モデルの原点 $(0, 0, 0)$ が、貼り付けられている AR マーカーの中心を原点とするマーカー座標系において (x_0, y_0, z_0) に位置するならば、モデル座標系からマーカー座標系への変換行列 M_{mo} は(6)式となる。なお、図 3 において、もし AR マーカーを箱の上面に貼り付けた場合、モデル座標系からマーカー座標系への変換行列は平行移動に加えて回転も含む変換行列となる。

このようにしてモデル座標系からマーカー座標系への変換行列 M_{mo} が分かれば、(7)式により 3 次元モデルをカメラ座標系に変換できる。(7)式は、まずモデル座標系をマーカー座標系に変換し、次にそれをカメラ座標系に変換すれば、モデル座標系からカメラ座標系に座標変換されることを示す。すなわち、AR マーカーを貼り付けた物体をカメラで撮影することにより、カメラを原点とする座標系におけるその物体の位置・姿勢を得ることができる。ここで、 (x_{o1}, y_{o1}, z_{o1}) はモデル座標系における 3 次元モデルの座標であり、 (x_{c1}, y_{c1}, z_{c1}) はカメラ座標系での座標である。

$$M_{mo} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_o \\ 0 & 1 & 0 & y_o \\ 0 & 0 & 1 & z_o \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$M_{mo} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -70 \\ 0 & 1 & 0 & -155 \\ 0 & 0 & 1 & -230 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} x_{c1} \\ y_{c1} \\ z_{c1} \\ 1 \end{bmatrix} = M_{cm} M_{mo} \begin{bmatrix} x_{o1} \\ y_{o1} \\ z_{o1} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

3. 5 3次元環境中での物体の配置

これまで説明した処理により、カメラを原点とするカメラ座標系における3次元物体の位置・姿勢が求められる。しかし、最終的に必要な情報は、例えば、室内でのその物体の配置のような、部屋や建物といった構造物の座標系における位置・姿勢である。構造物の座標系をワールド座標系と呼ぶことにすると、このためには、カメラ座標系での座標をワールド座標系での座標に変換する変換行列 M_{wc} があればよい。変換行列 M_{wc} により、(8)式で物体の3次元モデルをワールド座標系の空間に配置することができる。(8)式で、 (x_{w1}, y_{w1}, z_{w1}) は、ワールド座標系における3次元モデルの座標である。

$$\begin{bmatrix} x_{w1} \\ y_{w1} \\ z_{w1} \\ 1 \end{bmatrix} = M_{wc} M_{cm} M_{mo} \begin{bmatrix} x_{o1} \\ y_{o1} \\ z_{o1} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

カメラ座標系をワールド座標系に変換する変換行列は、ワールド座標系におけるカメラの位置と姿勢より求めることができる。しかし、ワールド座標系でのカメラの位置・姿勢を計測することは容易ではないため、ここでは変換行列 M_{wc} によるワールド座標系への変換は行わない。

4. 実験

4. 1 実験 1

図3に示す段ボール箱を対象物体として、本提案手法によって物体の位置・姿勢を計測する実験を行った。ARマーカーは、図2に示すマーカーを使用し、図3に示すように物体に貼り付けた。物体の3次元モデルとして図1に示すモデルを作成した。この物体の大きさは、図3のARマーカーが張られている面を正面として、幅140mm、高さ310mm、奥行き230mmである。物体に貼り付けたARマーカーは縦横100mmの正方形である。使用機材は、一般的なMS-Windowsのパソコンと、USBで接続した横720画素、縦480画素の解像度のカメラである。

図3に示すようにARマーカーを貼り付けたため、モデル座標系からマーカー座標系に座標変換するための変換行列 M_{mo} は、(8)式となった。



図7 ARマーカーの検出の様子

この物体をそれが図7のように見える位置からカメラで撮影し、ARToolkitによりARマーカーを検出した。図7は、ARマーカーを検出した様子も示しており、検出されたことが分かるようにARマーカー上に線を描画している。ARToolkitにより計測されたARマーカーの位置・姿勢を表す変換行列 M_{cm4} は、(9)式となった。これを(4)式によってカメラの上面が+yの向きとなるような座標系に変換した後の変換行列 M_{cm} は、(10)式となった。

結局、(8)式と(10)式に示す変換行列を使って(7)式に示す座標変換を行うことにより、図1に示す物体の3次元モデルをカメラの位置を原点とするカメラ座標系の中に配置することができる。その結果を図8に示す。図8の右下に表示している座標系の原点がカメラの位置である。なお、このカメラ座標系とは、ARToolkitの座標系であるカメラ下面が+y向きとなる座標系ではなく、図5に示すようなカメラ上面が+y向きとなる座標系である。

図8に示すカメラ座標系の物体の3次元モデルを変換行列 M_{wc} によってカメラ座標系からワールド座標系に座標変換すれば、物体を3次元環境モデル中に配置することができる。しかし、ここでは変換行列 M_{wc} を求めることが容易でないため、実験はカメラ座標系への変換までとした。

$$M_{cm4} = \begin{bmatrix} 0.832 & -0.081 & -0.549 & -1.250 \\ 0.213 & -0.868 & 0.450 & 110.8 \\ -0.513 & -0.491 & -0.704 & 608.6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$M_{cm} = \begin{bmatrix} 0.832 & -0.081 & -0.549 & -1.250 \\ -0.213 & 0.868 & -0.450 & -110.8 \\ 0.513 & 0.491 & 0.704 & -608.6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

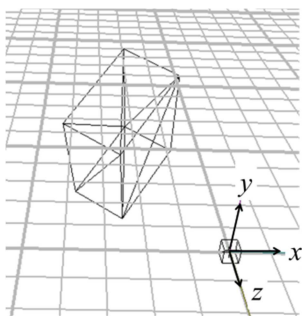


図 8 カメラ座標系における物体の 3 次元モデル

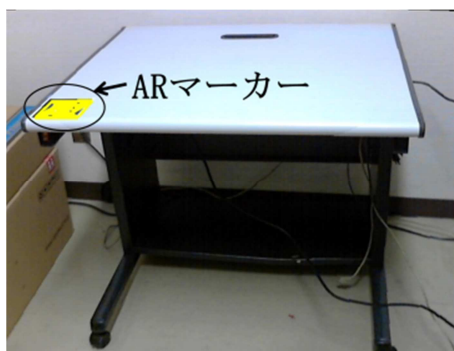


図 9 パソコン機と AR マーカー検出の様子

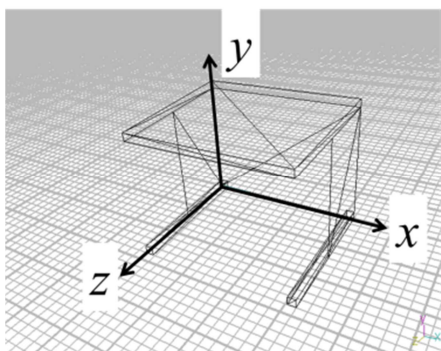


図 10 パソコン機の 3 次元モデル

4. 2 実験 2

図 9 に示すように、パソコン機の上面手前左側に AR マーカーを貼り付け、本提案手法で位置・姿勢を計測した。図 9 は、このパソコン機を 1m 程度離れた地点で机上面より上の位置からカメラで撮影し、貼り付けた AR マーカーを検出した様子である。

図 10 にこのパソコン機の 3 次元モデルを示す。パソコン機のサイズは、幅 800mm、高さ 650mm、奥行き 700mm である。物体に貼り付けた AR マーカーは縦横 100mm の正方形である。図 10 に示すように、この 3 次元モデルはパソコン機背面の左下隅を原点とする座標系となっている。また、AR マーカーの座標系は図 4 または図 5 に示す座標系と同じである。AR マーカーの中心は、図 10 のモデル座標系において(65, 650, 635)に位置し、AR マーカーの座標系の z 軸と y 軸は、モデル座標系の z 軸と y

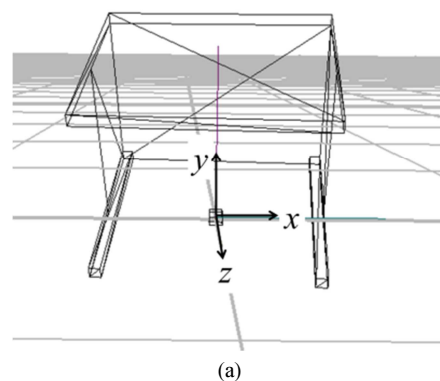
軸を x 軸を中心として -90° 回転させた向きとなっている。従って、AR マーカーの座標系をこのモデル座標系に一致させるような座標変換は、まず(-65, -650, -635)平行移動し、次に x 軸を中心として 90° 回転させるような座標変換となる。この座標変換がモデル座標系からマーカー座標系への座標変換となりその変換行列 M_{mo} は、(11)式となる。

$$M_{mo} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -65 \\ 0 & 1 & 0 & -650 \\ 0 & 0 & 1 & -635 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -65 \\ 0 & 0 & -1 & 635 \\ 0 & 1 & 0 & -650 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

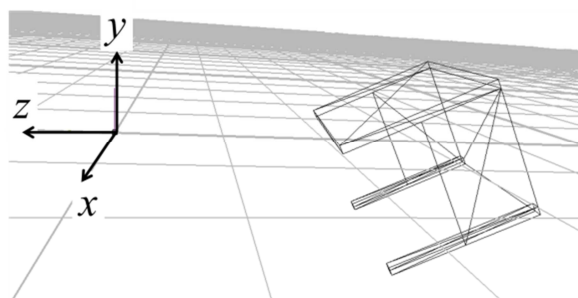
図 9 に示すような撮影画像から ARToolKit を使って AR マーカーの位置・姿勢を表す変換行列を求め、それを図 5 に示すような座標系に補正した後の変換行列 M_{cm} は、式(12)となった。式(12)の変換行列によって、マーカー座標系からカメラ座標系への座標変換が行える。

$$M_{cm} = \begin{bmatrix} 0.994 & 0.101 & -0.046 & -319.8 \\ -0.005 & 0.454 & 0.891 & 99.0 \\ 0.111 & -0.885 & 0.452 & -1090.8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式(11)と式(12)の変換行列を図 10 の 3 次元モデルに順に適用することによって、この 3 次元モデルを図 9 を撮影したときのカメラ位置を原点とするカメラ座標系に座標変換することができる。カメラ座標系に座標変換した結果を図 11 (a)(b)に示す。



(a)



(b)

図 11 カメラ座標系に変換後のパソコン機の 3 次元モデル

5. おわりに

一般的なカメラを使って家具などの移動可能な物体の配置を含む3次元環境モデルを簡易に構築する一手法を提案した。提案手法では、検出対象とする物体の3次元モデルを予め作成しておくと共に、所定のARマーカ―を貼り付けておく。また、ARマーカ―の貼り付け位置に基づいて、3次元モデルの座標系からARマーカ―の座標系への変換行列を求めておく。次に、ARマーカ―を貼り付けた物体をカメラで撮影し、撮影した画像よりそのARマーカ―の位置・姿勢を計測する。これにより、撮影したカメラの座標系での物体の位置・姿勢を得る。さらに、カメラの座標系を建物や部屋といった構築物の座標系に座標変換する変換行列により、構築物の座標系での物体の位置・姿勢を得ることができ、物体を構築物の空間中に配置することができる。

実際に箱とパソコン机にARマーカ―を貼り付けて、それらの位置・姿勢を計測する実験を行い、撮影したカメラの座標系におけるそれらの物体の位置・姿勢が正しく得られることを示した。しかし、この実験ではカメラの位置・姿勢の計測は行っていないので、カメラの座標系から構築物の座標系への座標変換は行えなかった。従って、構築物の座標系の空間にそれらの物体を配置することはできていない。撮影するカメラの位置・姿勢を計測する手段を追加し、構築物の座標系の空間内に物体を配置できるようにすることが今後の課題である。また、本手法による物体の位置・姿勢の計測精度はARマーカ―の位置・姿勢の計測精度に依存するので、ARマーカ―の撮影画像上での見え方や大きさにより精度が大きく変わる。様々な条件で物体の位置・姿勢の計測精度を評価することも今後の課題である。

本手法は、物体にその位置や姿勢が容易に分かるようなマークを付けておき、そのマークを手掛かりにその物体の配置を得る方法であり、目新しい技術ではない。また、すべての対象物体にマークを付けておくことは容易ではないという意見もあるかもしれない。しかし、小売店で販売されている商品のほとんどにバーコードが付けられていたり、URLなどを示すための2次元バーコードが普及していたりするように、機械が読み取りやすいマークを対象物に付けるという手段は非現実的なことではないと考える。例えば、赤外線や紫外線をよく反射するような人間には見えにくいカメラでは撮影可能なマークにすれば、物体のデザインなどに影響を与えずにマークを付けることもできる。

【参考文献】

- [1] 柳井啓司, "一般物体認識の現状と今後", 情処論, Vol.48, No.16, pp.1-24, 2007.
- [2] 天野, 坂口, 美濃, 池田, "再帰的分割を用いた適応格子による距離画像からの3次元形状モデルの生成", 信学論D-II, Vol. J78-D-2, No.12, pp.1841-1848, 1995.
- [3] 横矢, 長谷川, 倉爪, "群ロボットによる未知環境三次元地図の自動作成のための動作計画手法", 信学論D, Vol. J93-D, No.6, pp.1024-1035, 2010.
- [4] 加藤博一, "拡張現実感システム構築ツール ARToolKitの開発", 信学会パターン認識・メディア理解研究会技術研究報告(PRMU), Vol.101, No.652, pp.79-86, 2002.

- [5] 橋本直, "ARToolKit 拡張現実感プログラミング入門", アスキーメディアワークス, 2010.

(2014年11月6日 受理)