空間整合性を考慮した Outside-in 方式拡張現実感の実現

Realization of Augmented Reality by Outside-in Method Considering Space Consistency

正会員 向井信彦[†], 中村建太[†], 張英夏[†]

Nobuhiko Mukai[†], Kenta Nakamura[†] and Youngha Chang[†]

あらまし 現実空間に仮想物体を表示することで、提示できる情報量を増強する拡張現実感技術が様々な分野で活用されている。拡張現実感の実現には、現実空間において仮想物体の表示位置を推定するために特定のマーカを用いるマーカ方式とマーカを用いず映像上の特徴点を利用するマーカレス方式に大別されるが、これらの方式はいずれもカメラに写る映像からカメラの位置や姿勢を推定する Inside-out 方式である。一方、カメラに写る映像を用いることなくカメラの位置や姿勢を推定する Outside-in 方式には GPS(Global Positioning System) や磁場、あるいは赤外線などのセンサーを用いることが多く、画像を用いる方式もあるが、単一画像のみではカメラの位置や姿勢の推定が困難な状況も存在する。そこで本稿では、位置と姿勢を推定すべきカメラを立方体の箱に入れ、立方体の各面にマーカを張り付けることで、頑健性の高い Outside-in 方式拡張現実感の実現手法を提案する。また本方式では、現実空間上を移動して現実空間を撮影するカメラ(移動カメラ)に貼り付けられたマーカ画像を基に移動カメラの位置と姿勢を推定し、現実空間と空間整合性のある仮想空間上のカメラ(仮想カメラ)を制御して、仮想カメラが捉える仮想物体を移動カメラが写す映像上に重畳表示することで拡張現実感を実現する。さらに、本方式を用いて推定された仮想カメラの位置補正方式についても検討し、現実空間上における仮想物体表示位置精度の検証を行う。

キーワード: 拡張現実感, 空間整合性, Outside-in 方式, マーカ画像

1. ま え が き

現実環境と仮想環境の融合は複合現実感(MR: Mixed Reality)と呼ばれ、複合される現実環境と仮想環境の割合に応じて拡張現実感と仮想化現実性に区別されるが、その境界は曖昧であり、現実環境が主となる複合現実感が一般に拡張現実感と呼ばれる¹⁾。拡張現実感とはプラントや建設現場への適用²⁾だけでなく、流体の可視化³⁾や医療現場にも活用⁴⁾されている。拡張現実感を実現する上で重要な課題は、1) 幾何学的整合性、2) 光学的整合性、および 3) 時間的整合性の3つである。これらの整合性を保つために様々な工夫がなされているが、特に、幾何学的整合性を満足するための技術発展が大きく、マーカと呼ばれる特定の画像を用いるマーカ手法とマーカという特定の画像を用いないマーカレス手法に大別される⁵⁾。

マーカ手法では、マーカを用いて現実空間を撮影しているカメラの位置と姿勢を推定する必要性からマーカには一般に2次元の正方形画像が使用され、正方形の周囲は太い黒枠で覆われて中央に白地で黒の図形や文字が記載される⁶⁾。

マーカに記載される図形に応じて異なる仮想物体を表示することはできるが、表示すべき仮想物体の数が多いと数多くの図形が描かれたマーカを用意する必要がある。そこで、2次元画像で大量の情報量を表示するためにQRコードを用いる手法もある⁷⁾。さらに、マーカを折り曲げたり、右半分と左半分のマーカ画像の位置をずらして設置したりすることで、正方形として認識できる限定された位置からのみ仮想物体を表示することができる試みの研究もある⁸⁾。

一方、マーカレス手法はマーカ画像を用いずにカメラの位置と姿勢を推定する手法である⁹⁾。例えば、パンフレットや本などの画像から特徴点を抽出してカメラの姿勢推定を行う。ただし、これはパンフレットなどの画像を用いるという点では広義のマーカ手法に含まれるが、カメラに写る建造物の角を抽出して抽出された点群を追跡することにより、カメラの姿勢推定を行う方法はマーカレス手法に含まれる。マーカレス手法では太い黒枠のある画像を用いるわけではないため、静止画像のみでは位置推定を行えず、基本的には特徴点を追跡することでカメラの位置と姿勢を推定することになる。このため、磁気センサなどを併用する工夫も必要である¹⁰⁾。また、頂点ではなく、平面とみなせる微小領域をアフィン変換することで頑健性を高める手法¹¹⁾や、線、円、円柱、あるいは球のような基本図形を自然画像から抽出して追跡する手法¹²⁾、さらには、特徴点の追

2019年12月、映像情報メディア学会冬季大会で発表

2020年7月24日受付、2020年9月18日再受付、2020年12月2日採録

[†] 東京都市大学大学院 総合理工学研究所

(〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1, TEL 03-5707-0104)

跡にオプティカルフローを用いる方法¹³⁾もある。これらの手法はカメラが捉える画像上の特徴を基にカメラの姿勢を推定する方法であるが、逆に対象物体を正しい姿勢で観察できるようにカメラを制御する手法¹⁴⁾¹⁵⁾もある。このように自然画像のみからカメラの姿勢を推定するのは困難であることから、マーカと自然画像の特徴点を併用する手法¹⁶⁾や、赤外線を利用することで対象物までの距離を計測¹⁷⁾したり、可視光では見えないマーカとして利用¹⁸⁾したりする手法も開発されている。

上記のマーカ手法やマーカレス手法は基本的にユーザが操作するカメラに写る映像を基にカメラの姿勢制御を行って拡張現実感を実現する方式であり、Inside-out 方式と呼ばれる。一方、カメラに写る映像を利用するのではなく、外界の情報を用いてカメラの位置や姿勢の制御を行う方式はOutside-in 方式と呼ばれ、GPS(Global Positioning System)を用いる方式¹⁹⁾、磁場を用いる方式²⁰⁾、赤外線を用いる方式²¹⁾などが提案されているが、例えば、GPSは建物内で、磁場は金属がある状況下で使用することができない。一方、画像を用いるとこのような欠点はないが、1枚の平面画像のみでは画像の向きや角度によっては画像を認識できず、カメラの位置や姿勢の推定が行えないことがある。

そこで我々は、位置と姿勢の推定が必要なカメラを立方体の箱に入れ、立方体の表面上に異なる画像を張り付けることにより、単一の画像では認識が困難な状況でもカメラの認識が可能な Outside-in 方式を提案してきた²²⁾²³⁾。本方式を用いることで、例えば、立方体の上面にある画像の認識率が低下しても側面にある画像を用いてカメラの位置と姿勢の推定が可能となる。また、本手法では現実空間上に仮想物体を重畳表示するために、現実空間と空間整合性のある仮想空間を設定し、現実空間を移動するカメラに同期した仮想空間上のカメラを制御することで、仮想空間上のカメラが捉える仮想物体を現実空間の映像上に重畳表示することができる。しかしながら、従来手法²³⁾ではカメラの位置と姿勢の推定精度や誤差の解析が充分でなかったため、本稿ではカメラの位置推定誤差を用いた補正手法を述べると共に、現実空間上に表示される仮想物体の表示位置誤差についても調査を行ったので、その結果について報告する。なお、本稿では立方体に張り付ける画像としてマーカを用いるが、張り付ける画像は方向性を特定できる画像であればマーカに限らず本手法の適用は可能である。

また、本手法と同様な Outside-in 方式としてバーチャルスタジオがある。バーチャルスタジオはブルーあるいはグリーンスクリーンを背景とし、撮影映像とCG映像をクロマキーで合成する手法であるが、カメラの位置情報を得るためには特殊なセンサの設置が必要であり、装置が大型化する。これに対して本手法はブルーやグリーンのスクリーン、さらには特殊なセンサも必要とせず、移動カメラにマーカを取り付けるだけで実現することができ、装置も小型化することができる。

2. システム構成

2.1 システム概要

本稿で提案する手法のシステム概念図を図1に示す。本手法は画像を利用した Outside-in 方式拡張現実感の実現であるから、現実空間を写すカメラと現実空間を写すカメラの位置と姿勢を画像を用いて推定するためのカメラの2台のカメラが必要となる。そこで、現実空間を移動して現実空間を撮影するカメラを移動カメラ、画像を用いて移動カメラの位置と姿勢を推定するためのカメラを固定カメラ、さらに、現実空間を移動する移動カメラに同期して仮想空間を移動するカメラを仮想カメラと呼ぶことにする。

図1(a)に示すように、現実空間には現実空間を移動しながら撮影する移動カメラがあり、移動カメラを固定カメラで撮影することにより、移動カメラの位置と姿勢を推定する。一方、図1(b)に示すように、現実空間と空間整合性の取れた仮想空間が存在し、仮想空間上には仮想カメラが設置されている。仮想カメラは固定カメラによって推定された移動カメラの位置と姿勢を基に仮想空間上を移動し、仮想空間上にある仮想物体を撮影する。つまり、移動カメラの動きに追従して仮想カメラは移動し、また、現実空間と仮想空間は空間整合性が取れているため、移動カメラが写す現実空間に対応した仮想空間上の仮想物体が仮想カメラによって捉えられる。したがって、図1(c)に示すように、移動カメラが写す現実空間上に仮想カメラが捉える仮想物体を重畳表示することで、拡張現実を実現することができる。

2.2 構成機材

本研究では移動カメラと固定カメラの2台が必要であり、また、画像を用いて Outside-in 方式の拡張現実感を実現するためには、固定カメラを用いて位置と姿勢を推定すべき移動カメラに画像を張り付ける必要がある。ただし、移動カメラは現実空間上を移動するため、その位置と姿勢によっては固定カメラから捉えることができないこともある。

図1 システム概念図

そこで本研究では、移動カメラを格納する立方体を用意し、立方体の各側面に画像を張り付けることで移動カメラの位置と姿勢を推定する。立方体に張り付ける画像は認識が容易であるほど精度も向上するため、黒枠に囲まれたマーカを用いる。ただし、移動カメラの位置だけでなく姿勢も推定する必要性から、各側面には別々の文字を描くことで姿勢推定を容易にする。

本研究で用いる移動カメラと固定カメラの画像を図2に、仕様を表1に示す。本手法では固定カメラに写る移動カメラの情報を基に移動カメラの位置と姿勢を推定するため、固定カメラの解像度を移動カメラの解像度よりも高くしている。また、移動カメラを格納する立方体マーカを図3に示す。立方体は6面を持つが、カメラのレンズがある前面と底面にはマーカを張り付けていない。なお、マーカには判別を容易にするため、上面にはT、背面にはB、右側面にはR、左側面にはLという文字を記載している。

立方体マーカには前面と底面を除く4面に文字が記載されているため、固定カメラからは複数の文字が判別されるが、立方体の位置と姿勢の推定精度を向上するため、認識されたマーカのうちの最大面積を持つマーカを基に移動カメラの位置と姿勢を推定する。なお、立方体の各面に張られたマーカの向きが異なるため、基本的には各面の座標系を上面マーカの座標系に変換した後、マーカを認識して移動カメラの位置と姿勢を推定する。また、マーカ座標からカメラ座標への変換は、オープンソースライブラリであるARToolKit²⁴⁾を用いて行うことができる。この変換における誤差の要因はマーカの認識率であり、マーカの認識率は周囲環境における照度や固定カメラからの距離および方向に影響される。

2.3 カメラの制御

本手法では、固定カメラに写る移動カメラのマーカ情報を基に移動カメラの位置および姿勢推定を行うため、固定カメラを正しく設置する必要がある。特に固定カメラの俯角を正しく設定しなければ、移動カメラの位置と姿勢を正

図2 システム構成カメラ

表1 システム構成用カメラの仕様

	移動カメラ	固定カメラ
製造元	ロジクール	オムロンセンテック
型番	Webcam C200	STC-M202USB
解像度 (水平 × 垂直)	640 × 480	1,600 × 1,200

図3 移動カメラ格納用立方体マーカ

しく推定することはできない。従来手法²²⁾では分度器を用いて固定カメラの俯角を設定していたが、この手法では誤差を伴うため、本手法では固定カメラに設置された慣性センサの情報をマイコンで処理することにより、俯角を正しく推定する²³⁾。固定カメラに設置する慣性センサおよびマイコンの基板と、固定カメラに設置された慣性センサおよびマイコンの状況を図4に、また、製造元と型番を表2に示す。

固定カメラの座標系を図5のように設定すれば、カメラの俯角あるいは仰角である y 軸回りの回転角 (θ_y) は式 (1) で求められる。また、 x 軸回りの回転角 (θ_x) も式 (2) で求められるが、 z 軸回りの回転角 (θ_z) は簡単には求められないため、カメラの方向と撮影対象となる机などの方向を正しく設定する必要がある。なお、式において、 a_x 、 a_y 、および a_z は x 、 y 、および z 各軸正方向の加速度であり、これらの値は慣性センサによって得られる。

$$\theta_y = \tan^{-1} \left(\frac{-a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \right) \quad (1)$$

$$\theta_x = \tan^{-1} \left(\frac{a_y}{a_z} \right) \quad (2)$$

図4 固定カメラ制御用慣性センサとマイコンの取付状況

表2 固定カメラ制御用慣性センサとマイコンの型番

	慣性センサ	マイコン
製造元	InvenSense	Arduino
型番	MPU-9250	Arduino Uno

図 5 固定カメラの座標系

3. 実験結果

3.1 拡張現実感の実現

本手法による拡張現実感映像を図 6 に示す。図 6(a) は固定カメラに写る映像であり、立方体マークに囲まれた移動カメラと現実空間に存在するマグカップおよびペン立てが写っている。図 6(b) は移動カメラに写る映像であり、現実空間に存在するマグカップとペン立てのうち、マグカップのみを写している。一方、図 6(c) は固定カメラによって推定された移動カメラの位置と姿勢を基に仮想空間上で制御される仮想カメラの映像であり、仮想カメラにはティーポットとバニーが写っている。図 6(b) の移動カメラ映像と図 6(c) の仮想カメラ映像を合成することで、図 6(d) に示す拡張現実感映像を生成することができる。

一方、図 7(a) は移動カメラを動かした状態を示し、図 7(b) には、移動カメラを動かすことで現実空間にある物体として、マグカップではなくペン立てが写っている。仮想カメラも移動カメラに同期して動くため、図 7(c) にもバニーは写っているが、ティーポットの代わりにアルマジロが写っている。図 7(b) と (c) の映像を合成することで、別の角度から見た拡張現実 (図 7(d)) を実現することができる。

なお、バーチャルスタジオなどではブルーあるいはグリーン背景上に映し出された CG 映像と実写を違和感なくクロマキー合成するために、境界付近では輝度の傾斜を持たせて合成する。このため、境界付近では若干のボケが発生するが、本手法では現実空間の映像上に仮想空間にある仮想物体を重畳表示するため、境界付近でもボケが発生することはない。一方、仮想物体の陰や影の付き方が現実空間の物体にある陰や影の付き方とは異なるが、これは現実空間にある光源の推定を行って、仮想物体をレンダリングすることで解決できる。

3.2 仮想カメラ位置誤差の測定

本手法で実現する拡張現実感の幾何学的整合性 (現実空間と仮想空間の空間整合性) を検証するために、現実空間における移動カメラと仮想空間における仮想カメラの位置誤差を測定する。ただし、従来研究²³⁾ では周囲環境におけ

図 6 本手法による拡張現実感

図 7 移動カメラに追従した拡張現実感映像

る照明の影響を考慮せず、周囲の照明状態によりマーカ画像が白飛びしたり、陰が濃くなったりすることでマーカの認識精度が低下していた。そこで本稿では、周囲環境における照明の影響を考慮した仮想カメラの位置誤差を測定する。図 8(a) は実験環境の様子を示す図であり、机に向かって俯角 30 度で固定カメラを設置する。また、周囲環境における照明の影響を考慮するために固定カメラの背後にハロゲンランプを仰角 50 度で設置し、ハロゲンランプを点灯した場合と消灯した場合の 2 通りについて実験を行う。なお、ハロゲンランプは非常に明るい光源であるため、ハロゲンランプの点灯と消灯を行うことで極端な照明環境を作ることができる。これらの 2 パターンを調べることで一般的な照明環境における誤差を推定することができる。

机の大きさは図 8(b) に示すとおりであり、この机の上に図 8(c) に示す目盛りを貼り付け、目盛りをガイドラインとして現実空間上で移動カメラを中心位置 (座標の原点) から

図 8 仮想物体表示位置の誤差測定

図 9 実験環境における照度 [lx]

5[cm] ずつ外側に立方体マークが認識できなくなるまで移動し、各位置における仮想カメラの3次元座標を記録する。なお、3次元の座標系は図8(a)のように設定する。また、図8(d)は移動カメラの移動軸と番号を示した図であり、机の中心と各軸の端における照度は図9に示すとおりである。

ARToolKitを用いてマーク座標から変換した仮想カメラの位置誤差を図10に示す。なお、図の値は各方向に対して5回の測定を行い、平均値をグラフ化したものである。図にはハロゲンランプ点灯時の結果のみを示すが、消灯時の値は点灯時の値とは異なるものの、同様の傾向を示すため消灯時の図は割愛する。

図10より、マーク座標より変換した仮想カメラの位置誤差は中心から遠ざかるほど大きくなっているものの、誤差はあまり広がっていないことが判る。なお、図において折れ線のように曲がっているのは上面マークよりも側面マークの方が面積が大きくなり、認識対象となるマークが変更されたことによるものである。誤差は大きくなっているものの、上面よりも面積の大きな側面マークにより認識が行

図 10 仮想カメラ座標の誤差 (ハロゲンランプ点灯の場合)

えていることが判る。また、図より仮想カメラの位置誤差がある程度は把握できるため、これらの誤差平均を推定された仮想カメラの位置から減ずることで、全体的な仮想カメラ座標の位置誤差補正を試みることができる。

計算の結果、仮想カメラの位置誤差平均は、表3のとおりとなった。表からx座標とy座標に関して、ハロゲンランプの点灯や消灯による影響はないように思われるが、z座標に関してはハロゲンランプ点灯時の方が誤差が大きくなっている。これは、ハロゲンランプが明るいために白飛びや陰の影響が現れてマークの認識精度が低下し、固定カメラから移動カメラまでの距離の精度が低下したものである。

表 3 仮想カメラの位置誤差平均 [cm]

	x	y	z
ハロゲンランプ点灯時	1.04	-4.68	1.58
ハロゲンランプ消灯時	1.04	-4.40	0.62

3.3 仮想物体表示位置の測定

表 3 に示す仮想カメラの位置誤差平均を、立方体マークを用いて推定された移動カメラの位置座標から減ずることにより、仮想カメラを移動カメラに応じた位置に設置することができる。しかしながら、表 3 に示す値はあくまでも平均値であるから、平均値を一律に減じても仮想カメラを正しい位置に設置することはできない。

一方、3.2 の実験では 8 軸に沿って 5[cm] 間隔に仮想カメラの 3 次元位置誤差を測定しているため、これらの値を使用することで仮想カメラをより正しい位置に設置することができ、その結果として仮想物体を現実空間上で正しい位置に表示することができる。ただし、移動カメラは各軸に沿って移動するとは限らないため、移動カメラが軸上にない場合は、最も近い測定点を基にして xz 平面上でバイリニア補間を行い、補正すべき座標値を計算する。

次に、補正された仮想カメラの位置から見て、現実空間上に仮想物体を正確に表示できているのかどうかを調べる。図 8(d) に示す各軸に沿って 5[cm] 毎に机の中心 (現実空間の原点) から移動カメラを遠ざけ、各位置において補正された仮想カメラから見て仮想空間の原点に先の尖った待ち針を表示する。現実空間にある机の上に、仮想空間の原点に表示された待ち針を重畳表示すると、待ち針の先端は現実空間の原点上に表示されるはずである。しかしながら、待ち針の先が図 11 のように表示されるとすれば、未だ表示上の誤差が残っていることになる。そこで、図 11 に示す x と y 座標の誤差を調べる。ただし、先ほどの実験では推定された仮想カメラの 3 次元空間における位置誤差を調べたため、誤差として 3 次元座標を得ることができたが、今回の実験は本手法による拡張現実感にて実現された 2 次元空間における誤差であるため、誤差は x と y 座標のみであり、 y 座標の誤差には奥行き方向である z 座標の誤差も含まれる。

各方向における待ち針先端の表示誤差を図 12 に示す。ただし、図 12 は図 10 との比較を行うために 3.2 で計算した

図 11 仮想空間と現実空間の原点の差

仮想カメラの位置誤差平均の補正は未だ施していない。また、仮想カメラの位置が原点に近いと表示物体が画角外になるため、表示物体の位置誤差測定は原点から 15[cm] 離れた位置より外側で計測している。なお、図にはハロゲンランプ点灯時の結果のみを示すが、消灯時の値は点灯時の値とは異なるものの、同様な傾向を示すため消灯時の図は割愛する。

図 10 と図 12 を比較すると、仮想カメラの位置誤差は原点から離れるにつれて大きくなっているが、表示物体の位置誤差は原点からの距離とはあまり関係なく、 x 座標の誤差は図 8(d) に示す 8 方向に依存し、 y 座標の誤差は方向にも依存せず、ほぼ一定の値を示していることが判る。なお、 x 座標の誤差が 8 方向に依存するのは図 9 に示すように、方向により照度が異なるため、異なる照度がマークの認識精度に影響を与えたものと思われる。一方、 y 座標の誤差がほぼ一定で高いのは、奥行きである z 方向の誤差も含んでおり、照度の影響よりも y 座標と z 座標の誤差の蓄積の方が影響が大きいためであると思われる。

3.4 誤差の補正と評価

ハロゲンランプを点灯した状態で、各軸に沿って測定された x 軸方向の誤差を図 13 に示す。図 13(a) は仮想カメ

(a) x 軸方向の誤差

(b) y 軸方向の誤差

図 12 仮想物体表示位置誤差 (ハロゲンランプ点灯の場合)

ラの位置補正を行わない場合、図 13(b) は表 3 を用いて仮想カメラの位置補正を行う場合、図 13(c) は各軸の各位置における誤差を基にバイリニア補間によって求められた値で仮想カメラの位置補正を行う場合である。

図 13 において原点近くで測定線が切れているのは、補正によって仮想カメラが原点に近づき過ぎたため、表示物体が画角外になり、測定不能となった場合である。一方、原点から遠くなると測定線が切れているのは、移動カメラが固定カメラに近づき過ぎてマーカの一部分が切れたか、あるいは移動カメラが固定カメラから離れすぎてマーカ画像が小さくなったかの理由でマーカが認識できず、測定不能となった場合である。

図 13 の (a), (b), および (c) を比較すると判るが、細かな補正を施すほど各軸における誤差の広がりや小さくなる

図 13 x 軸方向における誤差 (ハロゲンランプ点灯の場合)

り、仮想物体がより正確に表示されていることが判る。この傾向はハロゲンランプを消灯した場合も同様であり、また、図 13 では省略しているが、 y 軸方向における誤差の広がりも同様に、補正により小さくなっている。ただし、表 3 にもあるように、元々仮想カメラの y 軸方向における誤差が大きいため、 y 軸方向の誤差は表 3 を用いた補正を施すだけで、補正を施さない場合に比べて誤差はかなり改善される。なお、立方体マーカに格納されている移動カメラには図 2(a) に示すような台座があるため、 y 軸方向においてカメラの光軸を正確に立方体の中心に設定することが困難であったために、表 3 の y 軸方向の誤差が大きくなったものと思われる。

4. ま と め

本稿では位置と姿勢を推定すべき移動カメラを立方体の箱に入れ、立方体の各面には方向が認識できるマーカを張り付けることで、単一のマーカでは認識が困難であった状況でも認識が可能な Outside-in 方式の拡張現実感実現手法について検討した。また、現実空間と空間整合性のある仮想空間を用意し、仮想空間には現実空間の移動カメラに追従する仮想カメラが設置されており、仮想カメラに写る仮想物体を現実空間上に重畳表示することで拡張現実感を実現することができた。本方式で重要な点は、マーカを取り付けた移動カメラの位置と姿勢を固定カメラ映像から正しく推定することである。このために、単一のマーカではなく、立方体の各面にマーカに張り付けることで単一画像のみでは認識困難な状況での認識を可能とし、頑健性を高めた。また、慣性センサを用いて固定カメラの俯角を自動推定したが、それでも現実空間にある移動カメラと仮想空間にある仮想カメラの間で誤差が生ずるため、照明条件、および固定カメラから移動カメラまでの距離や方向に依存する誤差を測定し、測定誤差を用いて移動カメラの位置に応じた補間を行ったところ、現実空間に表示される仮想物体の位置誤差を低減することができた。

しかしながら、本稿で測定した誤差は現実空間における 2 次元的な誤差であるため、高さ方向の誤差には奥行き方向の誤差が含まれており、今後はこれらを分離して解析する手法を検討する必要がある。なお、移動カメラには台座があるため、移動カメラを格納する立方体の垂直方向の中心に光軸を設定することは困難であるため、移動カメラの光軸を立方体の中心に設定する手法の考案も必要である。さらに、本稿で提案した拡張現実感仮想物体を現実空間の映像上に重畳表示しているだけであり、現実空間上に存在する物体と仮想空間上に存在する仮想物体との奥行き関係を考慮していない。また、本手法では推定光源を基にした仮想物体のレンダリングを行っていないため、現実空間の物体と仮想物体との陰や影が一致していない。したがって、今後は現実空間映像から物体の 3 次元化や光源推定手法を取り入れた開発が必要である。

〔文 献〕

- 1) 神原誠之：“特集拡張現実感 (AR) 基礎 1：拡張現実感 (Augmented Reality：AR) 概論”，情報処理，**51**，4，pp.367-372 (2010)
- 2) 羽鳥文雄，矢吹信喜，小森絵未，福田知弘：“複数マーカを用いた拡張現実感技術の施工現場への応用”，土木情報学，**69**，2，pp.L24-L33 (2013)
- 3) 菅田大輔，榎山和男，宮地英生，前田勇司：“環境流れ問題のためのマーカレス AR 可視化システムの構築と適用性の検討”，土木情報学，**71**，2，L196-L203 (2015)
- 4) 望月宏史，田野俊一，橋山智訓，市野順子：“マーカレス三次元位置計測手法を用いた術中超音波診断 AR システムの提案”，The 29th Fuzzy System Symposium，pp.228-233 (2013) 神原誠之：“特集 拡張現実感 (AR) 基礎 1：拡張現実感 (Augmented Reality：AR) 概論”，情報処理，**51**，4，pp.367-372 (2010)
- 5) 暦本純一：“拡張現実感技術の将来展望”，映像情報メディア学会誌，**66**，12，pp.1048-1053 (2012)
- 6) A. Katiyar, K. Kaira, and C. Garg: “Marker Based Augmented Reality”, Advances in Computer Science and Information Technology, **2**, 5, pp.441-445 (2015)
- 7) C. H. Teng and B. S. Wu: “Development QR Code based Augmented Reality Using SIFT Features”, Proceedings of the 9th International Joint Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing, and Autonomic and Trusted Computing, pp.985-990 (2012)
- 8) 五ノ井あずさ，森谷友昭，高橋時一郎：“拡張現実感のための拡張マーカの提案とその応用”，映像情報メディア学会技術報告，**35**，14，pp.61-64 (2011)
- 9) 亀田能成：“マーカレス AR”，映像情報メディア学会誌，**66**，1，pp.45-51 (2012)
- 10) 廣瀬亮，斎藤英雄：“頂点追跡に基づく AR のためのマーカレス位置合わせ手法”，情報処理学会 研究報告，2005-CVIM-149 (15)，pp.103-110 (2005)
- 11) V. Ferrari, T. Tuytelaars, and L. Van Gool: “Markerless Augmented Reality with a Real-time Affine Region Tracker”, Proceedings of the IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality, **1**, pp.87-96 (2001)
- 12) A. I. Comport, E. Marchand, and F. Chaumette: “A Real-time Tracker for Markerless Augmented Reality”, Proceedings of the 2nd IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp.36-45 (2003)
- 13) T. Lee and T. Höllerer: “Multithreaded Hybrid Feature Tracking for Markerless Augmented Reality”, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, **15**, 3, pp.355-368 (2009)
- 14) A. I. Comport, E. Marchand, M. Pressigout, and F. Chaumette: “Rel-Time Markerless Tracking for Augmented Reality: The Virtual Visual Servoing Framework”, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, **12**, 4, pp.615-628 (2006)
- 15) 武藤雅大，綿貫啓一：“マーカフリー型拡張現実感技術を用いたメカトロニクス教育支援システムの開発”，日本機械学会 第 21 回設計工学・システム部門講演会，pp.87-90 (2011)
- 16) 神原誠之，横矢直和，竹村治雄：“マーカと自然特徴点を併用した広範囲見直し可能なステレオビデオスループ拡張現実感”，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，**7**，3，pp.367-374 (2002)
- 17) 前田真稀，小川剛史，清川清，竹村治雄：“ウェアラブル拡張現実感のための赤外マーカのステレオ計測と姿勢センサを用いた位置・姿勢推定”，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，**10**，4，pp.459-466 (2005)
- 18) 中里祐介，神原誠之，横矢直和：“不可視マーカを用いたウェアラブル AR システム”，画像の認識・理解シンポジウム，pp.1614-1615 (2005)
- 19) T. Höllerer, S. Feiner, T. Terauchi, and G. Rashid: “Exploring MARS: Developing Indoor and Outdoor User Interface to a Mobile Augmented Reality System”, Computers and Graphics, **23**, 6, pp.779-785 (1999)
- 20) G. Welch and G. Bishop: “SCAAT: Incremental Tracking with Incomplete Information”, Proceedings of ACM SIGGRAPH, pp.333-344 (1997)
- 21) D. Hallaway, A. T. Höllerer, and S. Feiner: “Coarse, Inexpensive, Infrared Tracking for Wearable Computing”, Proceedings of 7th IEEE International Symposium on Wearable Computers, pp.69-78 (2003)
- 22) 薄井正明，張英夏，向井信彦：“幾何学的整合性を考慮した拡張現実感の実現”，映像情報メディア学会技術報告，**40**，11 (2016)
- 23) 中村建太，張英夏，向井信彦：“空間整合性を基にしたマーカレス拡張現実感の実現”，映像情報メディア学会冬季大会，12C-2 (2019)
- 24) M-SOFT：“画像認識タイプの AR を実現する ARToolKit”，<https://www.msoft.co.jp/service/artoolkit.html> (2020 年 9 月参照)

むか い のぶひこ
向井 信彦 1983 年，大阪大学基礎工学部卒業。1985 年，同大学院博士前期課程修了。同年三菱電機(株)入社。1997 年，コーネル大学コンピュータサイエンス修士課程修了。2001 年，大阪大学大学院博士後期課程修了。博士(工学)。2002 年，武蔵工業大学(現東京都市大学)工学部助教授。2007 年，同大学知識工学部教授。2020 年，同大学情報工学部教授。東京大学生産技術研究所客員教授。主として画像工学に関する研究に従事。正会員。

なかむら けんた
中村 建太 2018 年，東京都市大学知識工学部卒業。2020 年，同大学院総合理工学研究科修了。同年，キヤノン(株)入社。在学時は拡張現実感に関する研究に興味を持つ。

ちゃん ぶんは
張 英夏 1998 年，韓国梨花女子大学卒業。2004 年，東京工業大学大学院情報理工学研究科博士後期課程修了。Ph.D. 同年，同大研究員。2006 年，同大学院情報理工学研究科助手。2007 年，同大学院情報理工学研究科助教。2012 年，東京都市大学知識工学部講師。2017 年同大学准教授。2020 年同大学情報工学部准教授。主として画像処理の研究に従事。