

# 拡張現実感システムにおける質感表現

眞 鍋 佳 嗣

## Material Representation on Mixed Reality System

Yoshitsugu MANABE

Augmented reality (AR) is a technique to integrate the real world and virtual objects comfortably. In the case of application of furniture layout simulation using AR, it is very important to represent material perception—*Shitsukan*. The representation of *Shitsukan* should be considered the lighting condition of the real world and optical properties such as reflection, refraction and transmission. This manuscript describes about the estimation method of lighting condition of the real world and reflectance of objects in order to represent *Shitsukan* for AR.

**Key words:** augmented reality, *Shitsukan*, lighting condition, re-lighting

現実世界とコンピューターで作った仮想世界を継ぎ目なく融合して人間に提示する“拡張現実感”(augmented reality: AR)という研究が行われている。拡張現実感、現実世界に仮想の情報を提示することで、さまざまなシーンにおいてわれわれ人間の活動の支援を行うことを目的としている。

拡張現実感、仮想現実感(virtual reality: VR)の研究と同じく人間の五感を対象としているが、特に視覚(映像)を対象とした拡張現実感の研究が盛んに行われている。

本解説では、拡張現実感において現実世界と仮想世界の視覚情報を違和感なく融合させることを目的として、質感を考える。まず、拡張現実感で重要である整合性について説明する。そして、質感表現に必要な現実世界の照明環境の計測方法、および現実環境に合わせた仮想物体の提示手法について述べる。

### 1. 拡張現実感とは

拡張現実感とは、電子的なデータを現実世界に重畳表示することで強化、拡張する技術であり、1990年代中頃にコロンビア大学のS. Feinerが提唱した<sup>1)</sup>。同じような言葉として複合現実感(mixed reality: MR)<sup>2)</sup>があるが、MRは現実世界と仮想世界を連続的に捉え、VRやARを包含した

広い概念である<sup>3-8)</sup>。しかしながら、ARとMRは同じ意味で使われることも多い。

ARの応用分野としては、医療における手術計画支援や屋内外でのナビゲーション、作業支援、エンターテインメント、インテリアシミュレーションなどがある。例えばインテリアシミュレーションでは、IKEAが「IKEAカタログ」アプリ([http://www.ikea.com/ms/ja\\_JP/customer\\_service/download-ikea-apps/index.html](http://www.ikea.com/ms/ja_JP/customer_service/download-ikea-apps/index.html)) [2014年6月30日現在]をスマートフォンやタブレット端末用に提供している。このアプリでは単なる電子カタログの機能だけではなく、製品のCGをカメラ画像に重畳して配置等を確認することができるようになっている。また、東芝は「AR家電 未来のカタログ」(<http://arkaden.jp>) [2014年6月30日現在]を提供しており、自宅で家電を置いた様子をシミュレーションできるようになっている。

このようなインテリアシミュレーションを行う場合、設置する場所によって照明条件が変化するが、提供されているCGはレンダリングする際の光源位置が固定されており、実際の照明条件と異なってしまふ。シミュレーションにおいては、単に配置や大きさの確認だけではなく、他の家具や壁紙等との調和の確認も必要であり、重畳されるCGの質感再現が重要となる。



図1 立体マーカー.

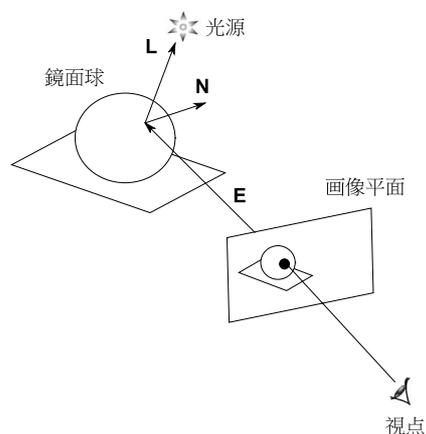


図2 視点と光源の位置関係.

## 2. 拡張現実感における整合性

拡張現実感において現実空間と仮想空間を違和感なく融合させるには、幾何学的整合性、時間的整合性、および光学的整合性の3つの整合性に関する課題を解決することが重要となる。

幾何学的整合性は、現実空間と仮想物体の空間的な位置合わせであり、仮想物体が実空間の重力や慣性、反力に矛盾せずに表示されることである。例えば、コンピューターグラフィックス (CG) で表現されたコップが机にめり込んだり、空中に浮いて見えたりしないように、幾何学的に位置を合わせることである。

時間的整合性は、ユーザー (カメラ) の視点移動や、現実物体の移動などと仮想物体の描画に遅延が生じないようにすることである。計算機の処理能力を高くすることや、効率的な計算アルゴリズムの開発などが重要となる。

光学的整合性は、現実空間の光源環境を考慮し、陰影や影の付き方を現実空間と仮想空間で違和感なく提示することである。本稿の目的である質感再現では、3つの整合性の中で、この光学的整合性が最も重要となる。

これら3つの整合性のうち幾何学的整合性を保つために、現実空間に対するカメラの位置姿勢の推定するさまざまな手法が提案されている。その中でも、マーカーを用いた代表的な手法が ARTToolKit である<sup>9)</sup>。この手法では、マーカーの四角い枠を認識することによってマーカーとカメラの位置関係を求め、仮想物体をマーカー上に正しく表示することを実現している。

さらに、位置姿勢と照明条件を同時に計測し、光学的整合性と幾何学的整合性とを保持して仮想物体を表示する方法として、鏡面球とマーカーを組み合わせた方法が提案されている<sup>10,11)</sup>。これらの手法では、鏡面球に映った像から鏡面球を中心にした周囲の照明環境を推定し、それをもとに仮想物体をレンダリングすることで、マーカーによる幾

何学的整合性と合わせて光学的整合性を保っている。図1に、安室らが提案した、二次元マーカーと鏡面球の組み合わせで構成する立体マーカーを示す<sup>11)</sup>。

## 3. 現実空間の照明環境の反映

立体マーカーを用いて照明環境を推定する方法を説明する。まず、カメラで撮影された画像から二次元マーカーの位置情報を取得し、鏡面球が二次元マーカーの上部にあることを利用して、得られた位置情報に基づき撮影画像から鏡面球画像を取得する。鏡面球上の各画素は、画素位置に応じてカメラからの視線ベクトルと鏡面球の直径を用いることで、その点での法線ベクトルを求めることができる。これらを用いることで、その画素位置での正反射方向が求められ、正反射方向にある光源の強さと色を得ることができる (図2)。

また、仮想物体表面での反射が、拡散反射と鏡面反射の二色性反射モデルで表せると仮定する。なお、金属表面で生じる金属反射は鏡面反射の拡張と考える。この反射モデルと観測された鏡面球から推定された光源の位置および色により、仮想物体をレンダリングすることで、現実世界と仮想物体の光学的整合性を保持する。

### 3.1 拡散反射への照明環境の反映

まず、物体の色および陰影を表現する拡散反射から考える。鏡面球の画素すべてを光源としてレンダリングすると、表現は正確になるが、計算コストがかかる。また、拡散反射の場合は全方向に一樣な強度で反射し、物体表面の色と陰影を表現するため、それほど厳密な光源位置は必要としない。そこで、得られた鏡面球画像を分割し、分割された領域内の RGB 値の平均をその領域の光源の色とし、またその領域の重心から光源位置を求める。つまり、領域数を光源のサンプリング数とする。図3に、得られた鏡面

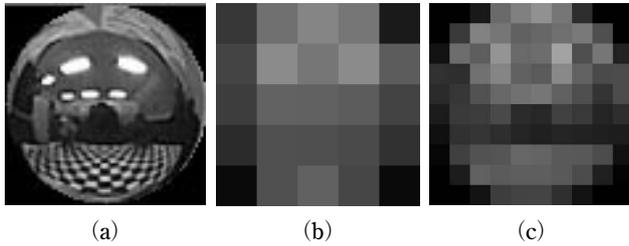


図3 鏡面球画像とサンプリング画像. (a) 鏡面球画像, (b) 25分割, (c) 100分割.

球画像と、それを25分割した画像および100分割した画像を示す。この画像を用いることで、現実空間の照明環境を近似して仮想物体の陰影を表現することが可能となる。

### 3.2 仮想物体への現実環境の映り込み

仮想物体をよりリアルに見せるには、拡散反射だけでなく、鏡面反射の表現も重要である。光沢だけではなく、周りの物体の映り込みも鏡面反射によるためである。

仮想物体の鏡面反射の表現のために、鏡面球画像を用いて環境マッピングを行う。このとき、仮想物体表面の色と鏡面球画像による映り込み色の比率を変化させて混合することで、仮想物体の局所的な映り込みを表現する。また、表面が粗い物体に対しては、鏡面球画像に反射モデルに応じた平滑化フィルターを適用することで面の粗さの表現が可能となる<sup>12)</sup>。

### 3.3 仮想物体の重畳表示

3.1節、3.2節で説明した拡散反射成分による色と陰影の表現、および鏡面反射成分による映り込みの表現について、結果を図4に示す。

図4(a)は入力画像である。この画像から二次元マーカーを検出し、マーカーの位置・姿勢をもとに鏡面球の領域を切り出し、照明環境を推定する。推定した照明環境に基づき拡散反射のみで仮想物体を表現した結果が図4(b)である。陶器のようなマットな質感が再現できているのがわかる。また、環境マッピングを用いて映り込みを表現した結果が図4(c)である。滑らかな金属の質感が表現されている。

さらに、この2つのレンダリング結果を、比率を変えて混合した結果が図4(d)と図4(e)である。図4(d)は拡散反射成分の重みを強くした結果で、プラスチックのような質感が再現されている。また図4(e)は鏡面反射である映り込み成分を強くした結果であり、金属らしい質感が表現されている。これらの結果より、現実空間の照明環境に合わせつつ、拡散反射成分と鏡面反射成分の比率を変えて表現することで、仮想物体の質感を変えた重畳表示が可能となっている。

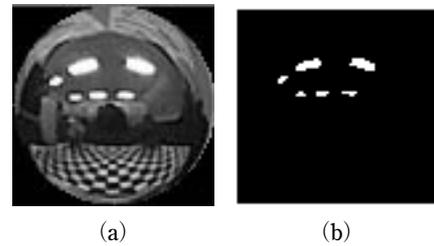


図5 ハイライトマスク画像. (a) 鏡面球画像, (b) マスク画像.

なお、図4(b)と図4(c)の比率を変えて混合した場合、そのままでは、強いハイライトの部分が弱くなってしまう。そのため、図5に示すように鏡面球画像において輝度が高い領域に関してマスク画像を作成しておき、強いハイライトを保持できるようにしている。

## 4. 現実環境への仮想情報の反映

ここまで、現実環境の情報、特に照明環境を仮想物体に反映させ、仮想物体の質感表現を行う方法について説明した。しかしながら、現実世界を考えるとさまざまな物体が相互に影響を与えており、当然ながら拡張現実感においても、現実環境から仮想物体への影響だけでなく、仮想物体から現実環境への影響も考慮することが重要である。ここでは、仮想物体の現実環境への映り込み、および仮想照明による現実環境への照明効果について紹介する。

### 4.1 現実環境への仮想物体の映り込み

机や床などが光沢をもつ場合、その上におかれた物体が映り込んで観測される。そのため、仮想物体を机や床などの上に重畳表示させる場合も、現実環境に仮想物体を映り込みませることが重要となる。

前章で述べたように、ある物体に他の物体が映り込んでいるのは、その物体の鏡面反射によるものである。つまり、仮想物体を現実物体に映り込ませるには、現実物体表面の反射率を求めることが必要となる。そのために、マーカーの床面への映り込みを利用する方法を提案している<sup>13)</sup>。この方法では、映り込みによる床面の輝度の変化を解析することで床面の反射率を推定し、推定した反射率を考慮することで仮想物体の映り込みを表現している。また、映り込みの生じている領域のエッジ部分の輝度値の変化幅を解析することで、床面の粗さを推定し、床面の粗さを考慮した仮想物体の映り込みのぼけの表現を行っている。

### 4.2 仮想照明 (re-lighting) の実現

ここまで、立体マーカーを用いて現実世界の照明環境の推定および現実環境の床面の反射率の推定方法を示した。しかしながら、仮想物体として照明器具を考えた場合、現

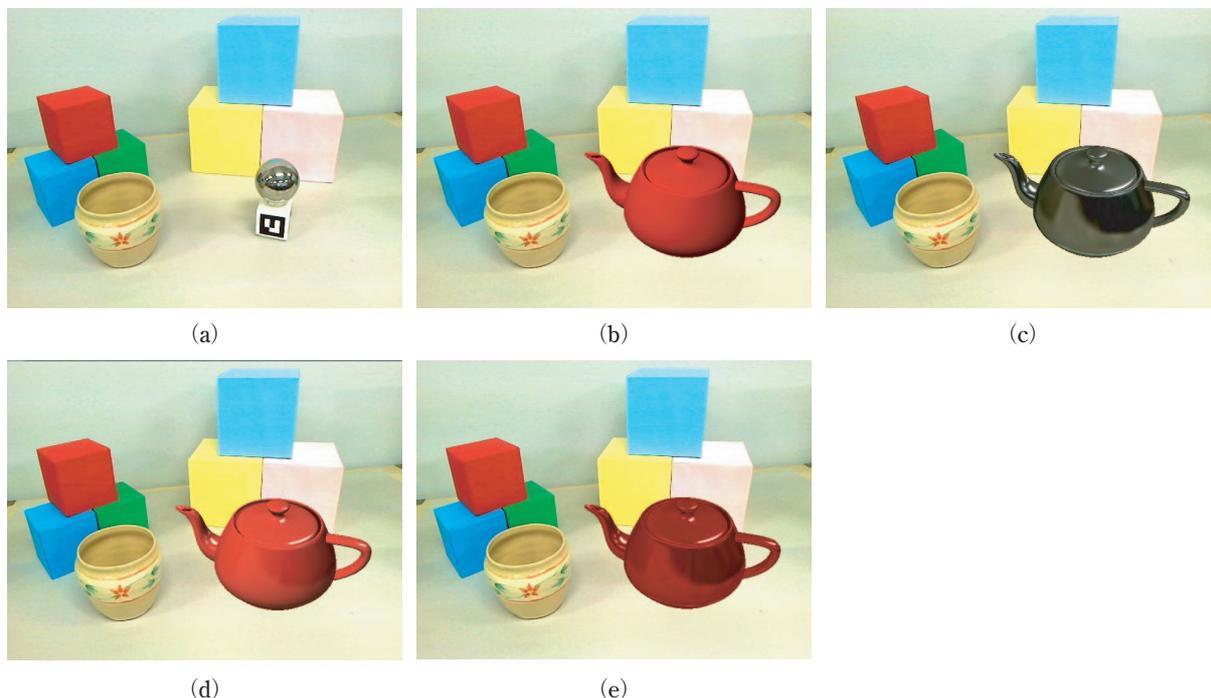


図4 質感を変えた重畳表示結果。(a) 入力画像, (b) 拡散反射成分による色と陰影の表現, (c) 環境マッピングによる映り込みの表現, (d) 拡散反射成分を強くした表現, (e) 鏡面反射成分を強くした表現。

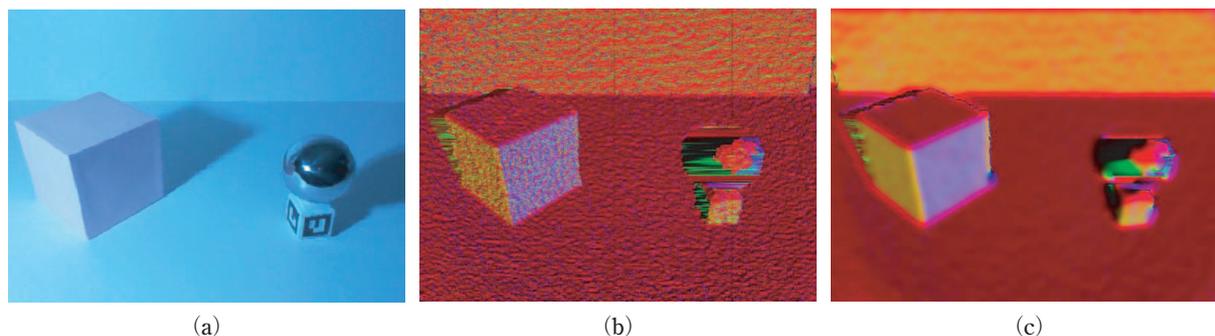


図6 法線ベクトルの推定。(a) 入力画像1, (b) 法線ベクトル推定結果 (平滑化なし), (c) 法線ベクトル推定結果 (平滑化あり)。

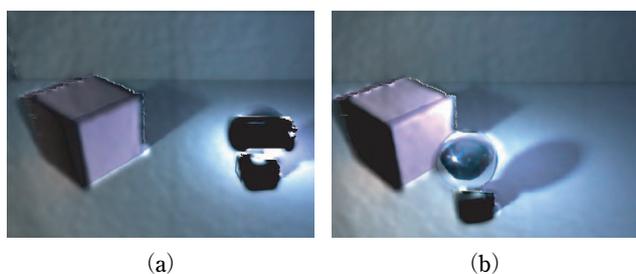


図8 仮想照明の効果の再現。(a) 図6 (a) に対する結果, (b) 図7 に対する結果。

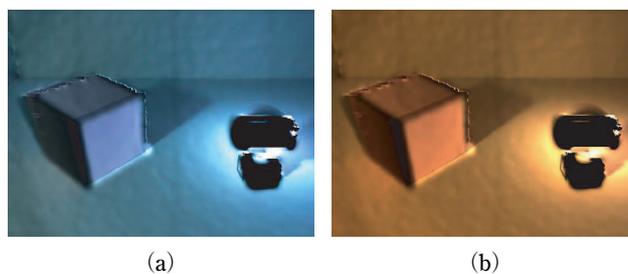


図9 光源の種類による照明効果の再現。(a) 白色光源の仮想照明, (b) 白熱電球の仮想照明。

実世界の床面だけでなくシーン中の物体などさまざまな物の反射率を推定する必要がある。そこで、立体マーカと通常のRGBの情報と同時に距離情報を取得できるRGB-Dカメラを用いた照明位置推定と、現実環境の反射率の推定を行う。

#### 4.2.1 仮想照明の処理の流れ

仮想照明は大きく3つのステップに分けて実現する。1つ目のステップでは、RGB-Dカメラで取得した深度の平滑化、深度から三次元点群への変換、法線ベクトルの計算による前処理を行う。2つ目のステップは、現実環境の反

射率の推定を行う。反射率の推定には、実光源の位置と色と強度が必要となるが、本手法では鏡面球を用いて推定を行う。3つ目のステップでは、仮想照明の効果の計算を行う。本手法ではマーカーを用いて仮想光源の位置を指定し、推定した現実環境の反射率を用いて仮想照明の効果の計算する。

#### 4.2.2 現実環境の法線ベクトルの推定

この手法では、RGB-Dカメラで取得した深度情報を用いて、現実環境の反射率の推定および仮想照明の効果の計算を行う。しかし、RGB-Dカメラで取得した深度情報にはノイズが含まれているため、これをそのまま用いると計算結果に誤差が生じてしまう。そこで、改良したバイラテラルフィルタを用いて深度情報の平滑化を行う。通常のバイラテラルフィルタでは、深度差の分散を大きくするとエッジがぼやけてしまい、小さくするとノイズが除去しきれないという問題がある。そのため、深度差が一定値以上の場合には注目画素に対して隣接画素の影響を与えないようにすることで、エッジを保ちつつ深度情報の平滑化を行う。

RGB-Dカメラの画角と深度情報の解像度を用いると、深度情報を三次元点群に変換することができる。さらに、計算された三次元点群を用いることで、現実環境の法線ベクトルを計算することができる。RGB-Dカメラで図6(a)のようなシーンを撮影する。図6(b)は計測された元の深度情報を用いて計算された法線ベクトルであり、図6(c)は平滑化された深度情報を用いて計算された法線ベクトルである。図6(b)および(c)は法線方向の色で表現しており、平滑化をしない場合、法線ベクトルに誤差が含まれており、床面や立方体表面の法線が一定の方向になっていないことがわかる。一方、図6(c)の平滑化した場合は、エッジを残しつつ適切に法線ベクトルを計算できていることがわかる。

#### 4.2.3 反射率の推定

本手法では、現実環境の反射はランバートモデルに従うと仮定し、鏡面球により実光源の方向と色と強度を計測して現実環境の反射率の推定を行う。

まず、鏡面球を用いて実光源の位置を計測する場合、実光源が分布していると仮定した距離によって、実光源ベクトルの向きが変わってしまう。これを解決するために、実光源は無遠に存在すると仮定し、実光源は平行光源であるとする。これにより、実光源ベクトルの向きを一意に定めることができる。

また、鏡面球に映り込んでいる光源は白飛びしていることが多く、その領域から実光源の色を適切に推定すること

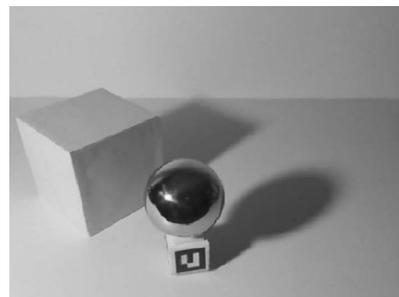


図7 入力画像2.

はできない。そのため、White Patch Retinexの手法を用いて、RGB-Dカメラで取得したRGB画像の画素値から実光源の色を推定する。White Patch Retinexとは、ホワイトバランスなどで使われる光源の色の推定手法のひとつである。これは、シーン中に白色物体が含まれているとしたら、カメラで撮影されたその物体の色は光源の色と同じになるという仮定に基づいている。本手法では、現実環境における鏡面反射成分の白飛びを考慮して、R, G, Bそれぞれのヒストグラムの上位5%を除いた値の中の最大値を実光源の色とした。

これら鏡面球で計測した光源の位置とシーン中の物体の法線ベクトルにより入射角 $\theta$ を求め、光源の色と画像中の色を用いて補正した色を $\cos \theta$ で除算することで現実環境の反射率を推定する。

図6(a)および図7はRGB-Dカメラで取得した入力画像である。これらの画像から光源位置および実光源の色を推定したところ、図6(a)では、光源ベクトルは $(x, y, z) = (-0.58, -0.04, 0.81)$ 、実光源の色は $(r, g, b) = (104, 157, 172)$ となった。また、図7では、光源ベクトルは $(x, y, z) = (-0.65, -0.04, 0.76)$ 、実光源の色は $(r, g, b) = (104, 157, 172)$ となった。推定された色は2つの画像において同じ値を示しており、推定方法がロバストであるということを示唆している。一方、実光源の位置は、2つの画像において推定の結果に誤差が生じた。これは鏡面球画像を正確に抽出できていないことに原因がある。本手法ではマーカー位置から鏡面球画像の抽出を行うため、鏡面球画像を正確に抽出するためには、マーカー位置を正しく推定する必要がある。

#### 4.2.4 仮想照明の効果の計算

仮想照明の効果は、反射率の推定と同様、現実環境の反射はランバートモデルに基づくと仮定して計算する。仮想光源の位置をユーザーがマーカーにより指定することで、仮想光源ベクトルが決定する。これに現実環境の物体の法線ベクトルを用いて入射角を求める。また、推定した現実環境の反射率にユーザーが任意に設定した仮想光源の色と強度を用いて、仮想の照明効果を計算する。

図8は、図6(a)および図7の画像に対してマーカー位置に照明があったとした場合の仮想照明の効果を再現した結果である。これらの図からわかるように、マーカーの位置によりライティングの状況が変化していることがわかる。

また、図9に示すように、現実環境の反射率を推定したことで、仮想光源によってさまざまな光源色によるライティングが再現可能になった。このように、仮想照明を再現することができる事前計算が不要なインタラクティブなシステムを構築することができた。

本稿では拡張現実感システムにおける質感表現として、仮想物体に現実環境の照明条件を考慮する方法と仮想照明の効果による見えの再現について紹介した。

近年のコンピューターグラフィックス技術の進歩により、実物と見間違ふほどの映像表現が可能になった。しかし、この表現はあくまでも仮想世界の中でのことであり、拡張現実感のように現実世界に重畳表示すると、整合性が取れずに違和感が生じてしまう。違和感なく融合させるには、相互の影響を考慮することが必要不可欠である。本稿で紹介した手法はその端緒である。今後さらに、反射だけでなく、屈折や透過、散乱等の光学現象を実時間で計測しモデル化することができるようになれば、さらにリアルな重畳表現が可能になると考える。

## 文 献

- 1) S. Feiner, B. MacIntyre and D. Seligmann: "Knowledge-based augmented reality," *Communications of The ACM*, **36**, No. 7 (1993) 52-62.
- 2) P. Milgram and F. Kishino: "A taxonomy of mixed reality visual

- display," *IEICE Trans. Inf. Syst.*, **E77-D** (1994) 1311-1329.
- 3) 横矢直和: "現実世界と仮想世界を融合する複合現実感技術 I: 複合現実感とは", *システム制御情報学会誌*, **49** (2005) 489-494.
- 4) 横矢直和: "現実世界と仮想世界を融合する複合現実感技術 II: 仮想化現実の方法論", *システム制御情報学会誌*, **50** (2006) 68-73.
- 5) 横矢直和: "現実世界と仮想世界を融合する複合現実感技術 III: 仮想化現実の具体例", *システム制御情報学会誌*, **50** (2006) 162-167.
- 6) 横矢直和: "現実世界と仮想世界を融合する複合現実感技術 IV: 拡張現実感の方法論", *システム制御情報学会誌*, **50** (2006) 238-243.
- 7) 横矢直和: "現実世界と仮想世界を融合する複合現実感技術 V: 拡張現実感の具体例", *システム制御情報学会誌*, **50** (2006) 321-326.
- 8) 横矢直和: "現実世界と仮想世界を融合する複合現実感技術 VI: 応用事例", *システム制御情報学会誌*, **50** (2006) 430-435.
- 9) H. Kato, M. Billinghurst: "Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system," *IEEE International Workshop on Augmented Reality* (1999) pp. 125-133.
- 10) M. Kanbara and N. Yokoya: Geometric and photometric registration for real-time augmented reality, *Proc. IEEE and ACM International Symposium on Mixed Augmented Reality* (2002) pp. 278-279.
- 11) 安室喜弘, 石川 悠, 井村誠孝, 南 広一, 眞鍋佳嗣, 千原國宏: "立体マーカーを用いた実空間における仮想物体の調和的表現—インタラクティブMR インテリアデザイン—", *映像情報メディア学会誌*, **57** (2003) 1307-1313.
- 12) Y. Manabe, M. Sagano and K. Chihara: "Representation of texture and interreflection using spherical mirror for mixed reality," *Midterm Meeting of the International Colour Association 2011* (2011) pp. 556-559.
- 13) 浦西友樹, 眞鍋佳嗣, 千原國宏: "立体マーカーを用いた拡張現実感環境における仮想物体の床平面に対する映り込みの実時間表現", *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, **17** (2012) 477-486.

(2014年3月24日受理)