

焦点外れによるぼけとモーションブラーの推定に基づく 拡張現実感における光学的整合性の実現

奥村 文洋^{†a)} 神原 誠之^{†b)} 横矢 直和^{†c)}

Photometric Registration Based on Defocus and Motion Blur Estimation
for Augmented Reality

Bunyo OKUMURA^{†a)}, Masayuki KANBARA^{†b)}, and Naokazu YOKOYA^{†c)}

あらまし 拡張現実感のための画像合成において、実画像と仮想物体の光学的整合性問題の解決は重要な課題であり、特に実画像と仮想物体の画質の差はユーザに違和感を与える要因の一つである。本論文ではカメラで実環境を撮影した際に生じるぼけを仮想物体に再現可能な画像合成手法を提案する。本手法はシーン中に配置された複数の画像マーカから実画像で生じる焦点外れによるぼけとモーションブラーを推定し、推定したぼけを仮想物体に再現することで実画像と仮想物体の画質の一致を図る。実験では提案手法によって合成された仮想物体と実画像を比較し提案手法の有効性を示す。

キーワード 拡張現実感, 光学的整合性, ぼけ, モーションブラー, 画像合成

1. ま え が き

拡張現実感とは、実環境に対して仮想物体を重畳表示することでユーザに対して位置依存情報を提供する技術であり、新たな情報提示方式として幅広い応用が期待されている [1]。拡張現実感において実環境と仮想環境の継ぎ目のない融合を実現するために、実環境と仮想物体の幾何学的整合性問題と光学的整合性問題を解決することが重要な課題である。幾何学的整合性とは、合成する仮想物体の位置・姿勢がユーザの視点変更に伴って実環境と矛盾が生じないことを意味する。また、光学的整合性とは、合成する仮想物体の影・陰影・画質などが実環境と一致していることを意味する。

拡張現実感を実現するために広く用いられる手法として、環境をカメラで撮影した画像に仮想物体を合成するビデオスルー型拡張現実感がある。従来、拡張現実感を用いた仮想的なインテリアデザインシミュ

レーション [2] など仮想物体の写実性が重要な用途において、実画像と仮想物体の光学的整合性を向上させるための手法がビデオスルー型の拡張現実感システムを用いて多数提案されている [3], [4]。ビデオスルー型拡張現実感において、カメラで実環境を撮影した実画像にはカメラの光学特性に応じたぼけなどの画像の劣化が生じる。一方、実画像に合成される仮想物体は理想的なカメラモデルを用いて描画されるため画質の劣化は生じない。これら両者を合成するビデオスルー型拡張現実感システムでは、実画像と仮想物体の間に画質の不一致が生じ、ユーザに違和感を与えてしまう。このため、画質の整合性問題の解決はビデオスルー型拡張現実感システムにおける合成画像の写実性を向上させるために重要な課題である。近年では、光学的整合性の一つである画質の整合性問題を解決するための手法が提案されている [5] ~ [9]。例えば、文献 [5], [6] などでは実画像と仮想物体の両方に対して、セル画調やスケッチ調と呼ばれる表現効果を付加することで両者の画質の一致を図っている。しかし、これらの手法では実環境の写実性が損なわれるという問題がある。

本論文では、シーンに固定された複数の画像マーカを用いて実画像のぼけを推定し、推定されたぼけを仮

[†] 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科, 生駒市
Graduate School of Information Science, Nara Institute of
Science and Technology, 8916-5 Takayama, Ikoma-shi, 630-
0192 Japan

a) E-mail: bunyo-o@is.naist.jp

b) E-mail: kanbara@is.naist.jp

c) E-mail: yokoya@is.naist.jp

想物体に再現することで、実画像と仮想物体間の画質の差を軽減する手法を提案する。特に、画質に対して大きな影響を与えるカメラの焦点外れによって生じるぼけと動きによって生じるモーションブラーを取り扱う。なお、本研究ではカメラがユーザ頭部に装着された状態で、モーションブラーはユーザの上下・左右の首振りによって主に生じると仮定し、カメラの光軸回りの回転やカメラの並進運動によって生じるモーションブラーは扱わない。提案手法はシーン中に配置された形状既知の画像マーカを用いて実時間のぼけ推定を行う。そして、カメラの合焦位置とモーションブラーを推定し、仮想物体に対して奥行に応じたぼけを再現する。最後に、実画像と仮想物体を合成することで画質に差が少ない拡張現実感を実現する。

以降、2. で従来の関連研究と本研究の位置付けに関して述べ、3. で提案手法で用いる画像のぼけモデル、実環境と仮想物体のぼけを考慮した位置合せ手法、実画像からのぼけ推定手法、画像のぼけを考慮した仮想物体の描画手法について詳述する。4. では提案手法を用いた実験を示し、最後に5. でまとめと今後の課題を述べる。

2. 従来研究と本研究の位置付け

画像のぼけの解析に関する研究は主に画像処理・コンピュータビジョンの分野で行われ、画像のぼけの再現に関する研究は主にコンピュータグラフィックスの分野で行われている。本章では画像のぼけに関する従来研究を概観した後、本研究の位置付けについて述べる。

2.1 画像からのぼけ推定

画像処理・コンピュータビジョンの分野において、ぼけが生じた劣化画像を復元するための研究が多くなされている。これらの研究では画像のぼけによる劣化過程を点広がり関数 (Point Spread Function: 以下、PSF) によってモデル化し、PSF を推定することで画像の復元を試みている [10] ~ [12]。一般的に、画像復元は前提条件の違いによって二つに分けることができる。一つは撮影対象に関する既知の情報を利用した手法であり、他方は撮影対象に関する知識を用いないものである。前者の代表的な研究の一つに、スキャナの PSF を推定する手法 [13] がある。これは形状既知のパターンを撮影することで、スキャナの特徴を示す PSF を推定する。後者はブラインドデコンボリューションと呼ばれ、ぼけが生じた画像列からぼけのない

画像を推定するための手法である。また、焦点外れから奥行を推定する Depth from defocus [14], [15] や、超解像 [16], [17] など同様の問題を扱っており、PSF を推定することでこれらの目的を達成している。

2.2 仮想物体に対するぼけの再現

コンピュータグラフィックスの分野において、カメラで生じる光学的現象を再現するための手法が提案されている。例えば、Kolb ら [18] はカメラの光学系の特性を再現可能な仮想物体の描画手法を提案している。この手法はレンズの設計データとフォーカスなどのパラメータをもとに、画像のぼけやゆがみを再現することが可能である。また、Asada ら [19] はカメラのズーム、フォーカス、アイリスを考慮したカメラモデルと、それを用いた仮想物体の描画手法について述べている。この手法はカメラのパラメータに応じたぼけを再現することが可能である。

2.3 本研究の位置付け

本研究ではコンピュータビジョンにおけるぼけ推定とコンピュータグラフィックスにおけるぼけ再現を利用して、画質に関して整合性のある拡張現実感の実現を図る。従来のぼけ推定に関する研究では任意の PSF を対象としており、PSF の推定に複数の画像が必要であるという制約や、計算量が膨大であるという問題があるため、実時間処理が要求される拡張現実感にそのまま適用することは困難である。一方、コンピュータグラフィックスの分野におけるぼけ再現手法は、カメラのレンズ操作によって変化する内部パラメータとぼけの関係が必要であるため、事前に内部パラメータとぼけの関係の精密なキャリブレーションが必要である。従来、我々はマーカを用いて実画像のぼけを推定し、仮想物体に対してぼけを再現することで画質の一致を図る手法を提案している [7], [8]。しかし、この手法ではマーカ付近で均一なぼけを仮定しているため、仮想物体の奥行に応じたぼけを再現できないという制限があった。

本研究では、シーン中に複数配置された形状の既知なマーカとパラメータ表現された PSF を用い、1 枚の入力画像からカメラの合焦位置とモーションブラーの実時間推定を達成する。まず、画像マーカによる幾何学的整合性の解決と同時にぼけと奥行の関係を獲得し、レンズ操作によって変化する内部パラメータであるカメラの合焦位置とカメラと被写体の相対的運動によって生じるモーションブラーを推定する。そして、任意の位置に置かれる仮想物体に対して奥行に応じたぼけ

を再現することで、拡張現実感における画質に関する光学的整合性の向上を図る。

また、本研究の応用範囲は既存の固定焦点型のカメラを内蔵したヘッドマウントディスプレイ (HMD) を利用したビデオスルー型の拡張現実感システムのみならず、将来登場すると考えられる屋内・屋外で利用可能な可変焦点型のカメラを内蔵した HMD を用いた拡張現実感システムに応用できると考えられる。

3. ぼけ推定に基づく画像合成

本研究では画像のぼけモデルとして、レンズの焦点外れによるぼけとカメラの動きによって生じるモーションブラーを再現可能な PSF を用い、形状を既知なマーカのエッジ部分のぼけ幅を用いて PSF パラメータを実時間推定する。PSF パラメータは画像中の様々な方向のエッジについてぼけ幅を調べ、それらを統合することで推定する。更に、カメラから奥行が異なる位置に存在する複数のマーカごとに推定された PSF パラメータからカメラの合焦位置を推定し、奥行に応じたぼけを再現可能とする。最後に、仮想物体を描画した画像に対して推定された PSF に基づく平滑化フィルタを適用してぼけの再現を行う。

図 1 に処理手順を示す。まず、カメラを用いて実環境を撮影し、実画像から形状と色の既知なマーカを検出する (図 1 (A))。次に、実画像中のマーカのエッジ部分の輝度に対して、PSF から求めたぼけが生じた場合のエッジの輝度変化を表す関数を当てはめ、PSF のパラメータを推定する (図 1 (B))。そして、推定された画像のぼけとマーカの実画像中の位置からぼけがない場合のマーカの形状を復元し、カメラの位置・姿勢を推定する (図 1 (C))。次に、複数のマーカからカメラの合焦位置とシーン全体のモーションブラーの推定

を行い (図 1 (D))、最後に、推定されたぼけを考慮して仮想物体を描画し、実画像と合成する (図 1 (E))。以下、本手法で想定するカメラのぼけモデルと画像マーカについて述べ、その後、処理 (A) ~ (E) について詳述する。

3.1 画像のぼけモデル

画像のぼけを引き起こす主な要因に、レンズの焦点外れによるぼけとカメラと撮影対象の相対的な動きによるモーションブラーがある。ぼけ画像の生成過程は、ぼけのない画像と PSF の畳込み積分としてモデル化される。焦点外れによるぼけはレンズ中心から対象までの奥行、レンズの開口径などに依存し、散乱円と呼ばれる画像上での光の円状の広がりとして表現することができる。ここで、散乱円の半径 r に関して式 (1) が成り立つ [20]。

$$r = \rho \gamma v \left| \frac{1}{f} - \frac{1}{v} - \frac{1}{z} \right|. \quad (1)$$

ただし、 f は焦点距離、 z はレンズから物体までの奥行、 v はレンズから画像面までの距離、 γ はレンズの開口径、 ρ はカメラの CCD 分解能などに依存する定数である。一方、モーションブラーはカメラの動き、対象の動き、カメラの露出時間に依存する。一般にモーションブラーを記述する PSF は複雑な形状になるため、式による厳密な表現は困難であるが、画像平面に投影された撮影対象の等速直線運動として近似することが可能である [21]。

本研究では焦点外れによるぼけと画像平面上での平行移動によって生じるモーションブラーを表現できる PSF を用いる。提案手法ではエッジのぼけ幅から PSF のパラメータを推定し、PSF パラメータに基づいて画像のぼけを再現する方針をとる。ぼけの推定・再現の際に、焦点ずれとモーションブラーを表現する 2 種のぼけを表す PSF の畳込み積分によってこれらの処理を実現する必要がある。しかし、畳込み積分は計算量が多いため拡張現実感で必要な実時間処理に影響を与えてしまう。そこで、提案手法では焦点外れによって生じる散乱円をモーションブラーの平行移動方向に引き伸ばした楕円形の PSF を用いることで、二つの PSF の畳込み積分を近似し計算量の軽減を図る。ここで、直線エッジの方向が PSF を表す楕円の短軸若しくは長軸と同じ方向の場合では、エッジ付近の輝度変化が円形 PSF によって生じる輝度変化と同じになる。このため、文献 [14] のような円形 PSF モデルを用い

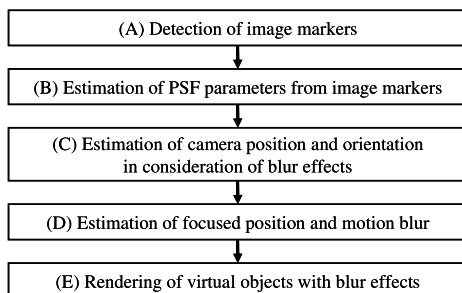


図 1 提案手法の処理の流れ

Fig. 1 Flow diagram of the proposed method.

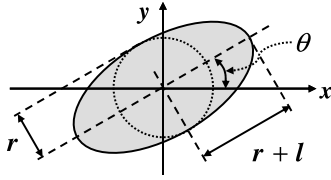


図 2 本手法で用いる PSF の形状
Fig. 2 Shape of PSF.

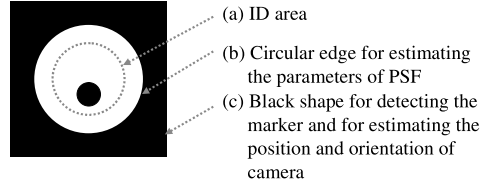


図 3 本手法で用いるマーカの構造
Fig. 3 An example of marker.

た PSF パラメータの高速な推定が期待できる。
式 (2) に提案手法で用いた PSF の近似式を示す。

$$P(x, y; r, l, \theta) = \begin{cases} \frac{1}{\pi((r+l)^2+r^2)} ; \left(\frac{x'}{r+l}\right)^2 + \left(\frac{y'}{r}\right)^2 \leq 1, \\ 0 ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

ただし、

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}. \quad (3)$$

ここで、 x と y は注目画素からの位置、 r は焦点外れによる散乱円の半径、 l と θ はモーションブラーの平行移動の大きさと方向を示す。提案手法では r, l, θ を PSF のパラメータとする。図 2 に提案手法で用いる PSF の形状と各パラメータの関係を示す。それぞれ、PSF を表す楕円の短径が焦点外れによるぼけの大きさ r 、楕円の長径が焦点外れによるぼけとモーションブラーの大きさの和 $r+l$ 、楕円の傾きがモーションブラーの方向 θ を表す。

3.2 画像マーカ

本研究ではカメラの位置・姿勢の推定に形状の既知な正方マーカを用い、マーカ内部の円状のエッジ部分から PSF のパラメータを推定する。図 3 にマーカの構造を示す。各部分の役割は以下のとおりである。

(a) ID 部

黒丸の数と位置から複数のマーカを識別する。

(b) 円状のエッジ

マーカ中に黒色部と白色部で作られる円状のエッジをもつことで実画像中に様々な方向のエッジが存在することを保証し、エッジのぼけ幅から PSF パラメータを推定する。

(c) 正方形の黒色部

実画像からのマーカ検出に用い、かつマーカの外周エッジからぼけが生じた状況下でのマーカ座標系におけるカメラの位置・姿勢を推定し、幾何学的位置合せ

を行う。

3.3 実画像からのマーカ検出：処理 (A)

Kato らの手法 [22] を用いて、以下の手順により色と形状の既知なマーカを実画像中から抽出し、マーカ座標系におけるカメラの位置・姿勢を推定する。

(1) 実画像に対して、あらかじめ手動で定めた固定しきい値による 2 値化、ラベリング処理を行い、面積が一定値以上のものをマーカの候補とする。

(2) 抽出された領域より正方マーカの 4 頂点を検出し、マーカ座標系におけるカメラの位置・姿勢を推定する。

推定されたカメラの位置・姿勢は処理 (B) 以降で、マーカの円状のエッジの画像上の位置を特定するために用いる。しかし、本処理において検出されたマーカの頂点位置には、ぼけの大きさに依存する誤差が含まれるため、カメラの合焦位置の推定に影響を与えることが考えられる。そこで、3.5 の処理 (C) においてぼけによる画像劣化の影響を考慮したカメラの位置・姿勢の再推定を行う。

3.4 画像マーカのエッジを用いた PSF パラメータの推定：処理 (B)

本手法では実時間処理を達成するため、以下のステップから PSF のパラメータを推定する。まず、モーションブラーによるぼけの影響を考慮しない回転対称の円形 PSF を想定してマーカ中のエッジ部分のぼけ幅を様々な方向のエッジに関して調べる。そして、様々な方向のエッジに対して推定されたぼけ幅を統合し、モーションブラーによるぼけを考慮した楕円 PSF のパラメータ推定を行う。なお、カメラの被写界深度に対してマーカの大きさが十分に小さい場合には、奥行の変化によるマーカ内部での PSF パラメータの変化は小さいと考え、本処理ではマーカ内部で PSF パラメータが均一であると仮定する。

3.4.1 エッジ部分のぼけ幅の推定

本手法では、エッジと直交する方向に沿った画素の輝度変化に対して、ぼけが生じたエッジの輝度変化を

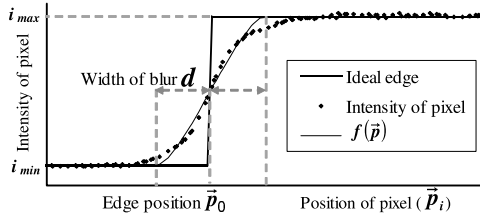


図 4 ぼけエッジに対する関数当てはめ

Fig. 4 Function fitting to a blurred edge and sampled pixels used in blur estimation.

表す関数の当てはめによって、エッジ部分でのぼけ幅を推定する。理想的な直線エッジにおいて、エッジと直交する方向に沿った輝度変化が位置 \vec{p}_0 を原点とするステップ関数として表現できる場合、円形 PSF によるぼけの影響を受けたエッジ部分での輝度変化は式 (4) となることが知られている [14]。

$$f(\vec{p}; d, \vec{p}_0, i_{min}, i_{max}) = \begin{cases} i_{min} & ; t < -1 \\ g(t)(i_{max} - i_{min}) + i_{min} & ; -1 \leq t \leq 1, (4) \\ i_{max} & ; t > 1 \end{cases}$$

ただし、 $t = (\vec{p} - \vec{p}_0) \cdot \vec{o} / d$ であり、

$$g(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \left(t \sqrt{1 - t^2} + \arcsin t \right) \quad (5)$$

である。なお、 \vec{o} はエッジと直交する方向を表す単位ベクトル、 \vec{p} は画素の位置、 \vec{p}_0 はぼけの影響を受けていない場合のエッジの位置であり、 d はぼけ幅を表し、エッジと直交する方向に輝度値が変化している部分の幅である。

理想的なエッジにぼけが生じた場合のエッジの輝度変化と提案手法による関数の当てはめ例を図 4 に示す。パラメータ $d, \vec{p}_0, i_{min}, i_{max}$ は式 (6) で示す誤差関数 E_{edge} を準ニュートン法で最小化することで推定する。

$$E_{edge}(d, \vec{p}_0, i_{min}, i_{max}) = \sum_{i=1}^N \{I(\vec{p}_i) - f(\vec{p}_i; d, \vec{p}_0, i_{min}, i_{max})\}^2. \quad (6)$$

式 (6) において、 \vec{p}_i と $I(\vec{p}_i)$ は、それぞれ i 番目の画素の位置、輝度値を表し、 N はサンプリングした画素数である。

3.4.2 方向ごとのぼけ幅の統合による PSF パラメータの推定

本手法ではマーカ中の複数の点で推定されたぼけ幅

d とエッジの方向から PSF のパラメータを推定する。

3.4.1 で求めたぼけ幅は円形の PSF を仮定しているが、式 (2) の PSF を表す楕円の長軸と直線エッジの方向が一致している場合に、エッジ部分の輝度変化は式 (4) で表現され、ぼけ幅 d は PSF のパラメータ r と等しくなる。同様に、PSF を表す楕円の短軸と直線エッジの方向が一致している場合に、ぼけ幅 d は PSF のパラメータ $r + l$ と等しくなる。また、楕円の長軸と短軸が直交するという制約が存在する。そこで、本手法ではぼけ幅を統合した PSF 形状を楕円で近似し、ぼけ幅に対して楕円を当てはめることで以上の制約を満たす PSF のパラメータ r, l, θ を推定する。なお、近似がパラメータ推定精度に与える影響は後述する実験で検証する。ここで、マーカ中の複数の点で推定されたぼけ幅 d の最小値、最大値をそれぞれ d_{min}, d_{max} とした場合に、PSF パラメータ r の初期値を d_{min} 、PSF パラメータ l の初期値を $d_{max} - d_{min}$ 、PSF パラメータ θ の初期値を最大のぼけ幅をもつエッジと直交する方向とする。

3.1 で示した PSF のパラメータ r, l, θ は式 (7) を準ニュートン法で最小化することで推定する。

$$E_{PSF}(r, l, \theta) = \sum_{j=1}^M \frac{\{h(\theta_j; r, l, \theta) - d_j\}^2}{E_{edge,j}}, \quad (7)$$

ただし、

$$h(\theta_j; r, l, \theta) = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos(\theta_j - \theta)}{r+l}\right)^2 + \left(\frac{\sin(\theta_j - \theta)}{r}\right)^2}}. \quad (8)$$

関数 $h(\theta_j; r, l, \theta)$ は楕円状の PSF の中心から θ 方向の楕円上の点までの距離を表す。 d_j と $E_{edge,j}$ は、それぞれ 3.4 で推定した j 番目のエッジのぼけ幅と推定時の誤差を表し、 M はマーカ一つ当りのぼけ幅の推定個数である。

3.5 マーカ形状の復元とカメラ位置・姿勢の推定：処理 (C)

本研究ではシーン中に複数存在するマーカ間の位置・姿勢の関係は未知とし、各マーカで推定されたマーカ座標系におけるカメラの位置・姿勢から基準マーカに対するマーカ間の位置・姿勢を推定する。カメラの位置・姿勢を正確に推定するためには、入力画像におけるマーカの形状からぼけの影響を除去する必要がある。マーカ形状の復元には画像のフィルタ処理に基づく手法と、マーカの幾何学的特徴を利用した復元方法が考

えられる．本研究では拡張現実感で要求される実時間処理を達成するため，計算量が少ない後者の手法を採用する．具体的には，文献 [7] で提案した手法によりマーカのエッジの真の位置からマーカの形状を復元する．次に，マーカの頂点から文献 [22] と同様に PnP 問題 ($n = 4$) を解くことでカメラの位置・姿勢を推定する．この処理によりぼけの影響によるカメラの位置・姿勢精度の低下を改善する．

3.6 カメラの合焦位置とモーションブラーの推定：処理 (D)

本節では複数のマーカで得られた PSF パラメータ r, l, θ から奥行に応じたぼけを再現するため，カメラの合焦位置とモーションブラーの推定を行う．

3.6.1 カメラの合焦位置の推定

シーン中の奥行が異なる位置に複数のマーカが配置されている場合には，マーカ位置での PSF パラメータと，カメラからマーカまでの奥行からカメラの合焦位置を推定することが可能である．式 (1) はレンズを用いた撮像系における奥行とぼけの関係を示している．しかし，実際の撮像系では焦点ずれやモーションブラーによるぼけのみならず，CCD の分解能などの要因によるぼけが生じているため，カメラが合焦している場合でもぼけが生じている．本研究では様々なぼけ要因によって生じる影響は PSF パラメータ r に対する定数の加算で近似し，奥行とぼけの関係として式 (1) に定数 κ を付加した式 (9) を用いる．

$$\hat{r} = b_{focus}(z; z_0, \rho\gamma, f, \kappa) = \rho\gamma v \left| \frac{1}{f} - \frac{1}{v} - \frac{1}{z} \right| + \kappa, \quad (9)$$

ただし， \hat{r} は実際の撮像系での焦点外れによるぼけの大きさ， z はレンズから対象までの奥行， z_0 はカメラの合焦位置である．なお， v はレンズから画像面までの距離を表すが，レンズの焦点距離とカメラの合焦位置から計算可能であり， $v = (f \cdot z_0) / (z_0 - f)$ である．カメラの合焦位置 z_0 は式 (10) に示す誤差関数を最小化することで推定する．

$$E_{focus}(z_0) = \sum_{k=1}^L \{b_{focus}(z_k; z_0, \rho\gamma, f, \kappa) - r_k\}^2, \quad (10)$$

ただし， z_k と r_k はそれぞれ k 番目のマーカの奥行と，マーカで推定された PSF の焦点外れによるぼけの大きさであり， L はシーン中のマーカの数である．

なお， κ は様々な合焦位置や物体までの距離のもとの最小のぼけの大きさをを用い， $\rho\gamma$ は合焦位置を既知な状態で，様々な奥行でのぼけの大きさを計測し，式 (9) によって計算されるぼけの大きさと計測されたぼけの大きさの差の二乗和が最小となる $\rho\gamma$ を用いればよい．

3.6.2 モーションブラーの推定

ユーザの頭部にカメラを装着する拡張現実感において，頭部の回転運動によるモーションブラーが発生しやすい．本研究では，モーションブラーはユーザの上下・左右の首振りによって生じると仮定する．このとき，カメラの投影中心と回転中心の不一致により，カメラの並進運動によるモーションブラーとカメラの回転運動によるモーションブラーが同時に発生する．前者は奥行に依存し後者は奥行に依存しないが，拡張現実感においては回転運動によるモーションブラーが画質に対して支配的であると考え，本研究ではモーションブラーは画像上で均一な方向と大きさをもつとする．具体的には，各マーカで推定されたパラメータ l, θ の平均値 $\hat{l}, \hat{\theta}$ をカメラの動きによって生じるモーションブラーとする．

3.7 ぼけを考慮した仮想物体のレンダリング：処理 (E)

仮想物体に対するぼけの再現は，前述の手法によって推定された情報をもとにグラフィックスハードウェアを用いたフィルタ処理として実現し高速化を図る．処理は仮想物体の描画と仮想物体へのぼけ再現の 2 段階に分けて行う．

まず，3.5 で求めたマーカ座標系におけるカメラの位置・姿勢情報を用いて仮想物体をテクスチャバッファに描画する．同時に，画素ごとに焦点ずれによるぼけの大きさを表す PSF パラメータ \hat{r} を式 (9) から画素ごとの仮想物体の奥行を用いて計算する．次に，テクスチャバッファに対して PSF パラメータ \hat{r} と 3.6.2 で求めた PSF パラメータ $\hat{l}, \hat{\theta}$ に基づいた平滑化フィルタ処理を式 (11) によって適用する．

$$I_{blurred}(s, t) = \sum_{y=w}^{-w} \sum_{x=w}^{-w} P(x, y; \hat{r}, \hat{l}, \hat{\theta}) \cdot I_{CG}(s+x, t+y). \quad (11)$$

なお， $I_{CG}(s, t)$ は仮想物体を描画した画像の位置 (s, t) における画素の輝度値を表し，仮想物体が描画されない画素では $I_{CG}(s, t) = 0$ とする．また， $I_{blurred}(s, t)$ はフィルタ適用後の画像の位置 (s, t) における画素の

輝度値, w はフィルタ処理を行う際のウィンドウサイズを表し, $w = \hat{r} + \hat{l}$ である. 式 (11) の処理はグラフィックスハードウェアに搭載されているピクセルシェーダ機能によって実現する. ただし, 実画像と仮想物体の境界部分では画像のぼけによって生じる輪郭のにじみ効果を再現するため, 式 (12) に示す輝度値の混合を行う.

$$I_{result}(s, t) = \alpha(s, t) \cdot I_{blurred}(s, t) + (1 - \alpha(s, t)) \cdot I_{real}(s, t). \quad (12)$$

ここで, $I_{real}(s, t)$ は実画像の位置 (s, t) における画素の輝度値, $\alpha(s, t)$ は画像の位置 (s, t) における輝度値の合成比率であり, PSF を表す楕円内部で仮想物体を表す画素が占める割合を表す.

4. 実験

提案手法の有効性を確認するための実験を行った. まず, 3.6.1 で示したカメラの合焦位置の推定結果について評価する. 次に, 実画像中と合成画像のエッジの輝度変化を比較することで, 提案手法が画質の差を軽減できているか確認する. 更に, 提案手法による合焦位置・モーションブラーパラメータの推定結果について評価する. 最後に, 拡張現実感を用いた応用例としてテーブルトップ型の仮想インテリアデザインを想定した画像合成結果を示す.

4.1 実験環境

デスクトップ PC (CPU: Pentium D 3.0 GHz, メモリ: 3.25 GByte, グラフィックスカード: Radeon X1900XTX) と USB 接続の小型カメラ (ARGO 社製 Lu-135c, 解像度: 1024 × 768 画素, フレームレート: 15 fps) を用いた実験システムを構築した. 図 5 に実験環境を示す. カメラから 0.4~0.6 m の位置に 0.1 m ごとに 2 個ずつ, マーカを合計 6 個配置した. また, 図中 (a) 部分は画質の評価に用いたテストパターンであり, カメラ位置・姿勢の推定には利用していない.

4.2 カメラの合焦位置の推定結果

本節では 3.6.1 で示したカメラの合焦位置の推定処理の有効性を確認するために, 本実験では手動で設定した合焦位置と複数のマーカを用いて推定した合焦位置の関係を調べる. カメラをシーンに対して固定し, 合焦位置は距離を既知な物体に対して焦点を合わせることで設定し, 0.2 m から 1.2 m まで 0.1 m 刻みで変更し, それぞれ 3 回試行した. 合焦位置の推

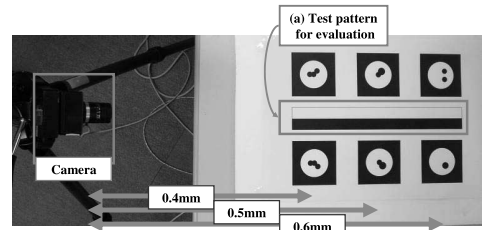


図 5 実験環境

Fig. 5 Experimental environment.

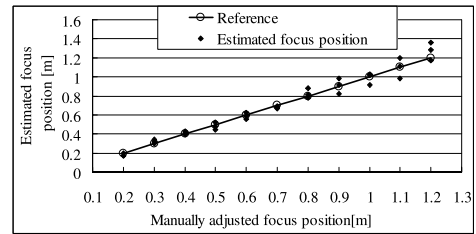


図 6 手動で設定した合焦位置と推定された合焦位置の関係

Fig. 6 Estimated focus position and manually adjusted focus position.

定に必要なパラメータはそれぞれ $\rho\gamma = 240$ 画素/m, $f = 0.006$ m, $\kappa = 1.8$ 画素とし, f はレンズの設計データを用い, ρ, κ は, 事前のキャリブレーション処理によって定めた. 図 6 に設定した合焦位置と推定された合焦位置の関係を示す. 図より設定した合焦位置が 0.2~0.8 m の場合では印で示した提案手法で推定した結果が真値(印)に近い値で推定されている. しかし, 合焦位置が 0.9 m 以上の場合では若干ばらつきが生じている. 原因として, 式 (10) の最小化に基づく合焦位置の推定において, カメラが遠景に合焦している場合には推定されたカメラからマーカまでの奥行 z_k と PSF パラメータ r_k に対する誤差が合焦位置の推定結果に対して大きな影響を与えていることが考えられる.

4.3 奥行に応じたぼけの再現結果

本節では提案手法によって再現されるぼけと実画像で生じているぼけを比較するため, シーン中のテストパターンと同じ位置に仮想物体のテストパターンを合成する. ぼけの再現を行わない画像合成と提案手法による画像合成を行い, 実画像と合成画像の輝度値の差を比較する. なお, カメラは固定し, カメラの焦点はテストパターンの遠景 (カメラから 0.6 m) に合わせた. また, 実環境と仮想環境の照明条件の一致は手動

で行った。

図 7 に評価に用いた画像を示す。(a)~(c) はそれぞれ実画像, 仮想物体に対してぼけの再現を行わずに生成した合成画像, 提案手法によって生成した合成画像を示し, 図の左側が近景である。また, (d), (e) は図中 A, B で示した部分の輝度変化を表し, グラフの横軸が画像の位置, 縦軸が画素の輝度値である。図 7(b) はぼけが再現されていないのに対して, 図 7(c) では

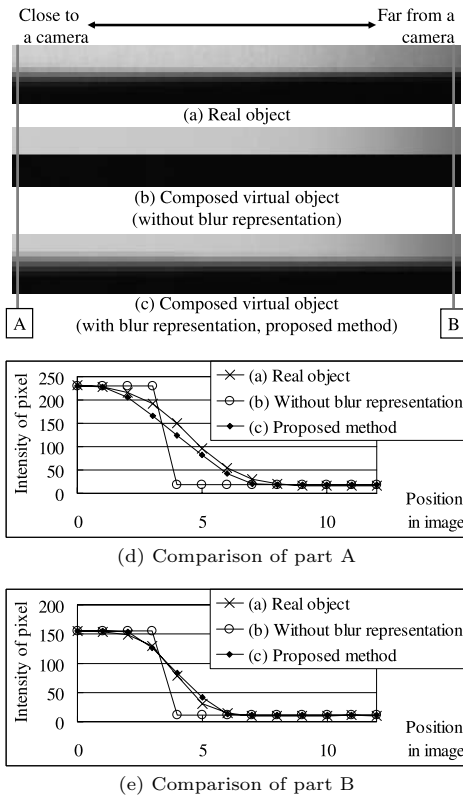


図 7 評価に用いた画像とエッジ部分での輝度変化の比較
Fig. 7 Images for evaluation and comparison of edge part of each image.

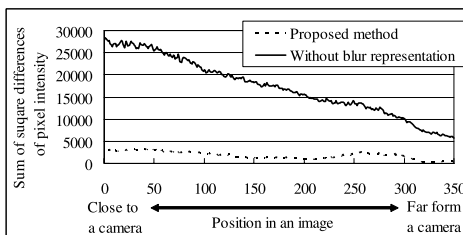


図 8 エッジ上の位置と輝度値の差の二乗和の関係
Fig. 8 Square differences of intensity between real and composed images.

合焦位置に近づくにつれてぼけが徐々に弱くなっており, 提案手法を用いることで奥行に応じたぼけの再現が行えていることが分かる。図 7(d), (e) から, 提案手法によるぼけの再現によって実画像のエッジのこう配と提案手法によって合成された仮想物体のエッジのこう配がほぼ一致しており画質の差を軽減できていると考える。

図 8 にエッジ上の位置と実画像と合成画像の輝度値の差の二乗和の関係を示す。横軸はエッジに沿った画素の位置を示し, 図において左側が近景である。縦軸はエッジと直交する方向に沿って実画像と合成画像の輝度値の差の二乗和を計算した値である。ぼけ再現がない画像合成手法では, 全体的に誤差が大きく画質の差が大きいため分かる。更に, 遠景から近景になるにつれて誤差が大きくなっており, これは奥行に応じたぼけの大きさの変化を再現できていないためである。これに対して, 提案手法による画像合成を行った場合は全体的に輝度値の差が小さく, ぼけ再現の効果が現れている。特に, 近景と遠景で誤差の大きさが同程度になっており, 奥行に応じたぼけを再現した効果が現れている。

4.4 合焦位置・モーションブラーパラメータの推定結果

提案手法はマーカを撮影した画像から 3.4 で示した楕円 PSF に基づくぼけの推定処理を行い, カメラの合焦位置とモーションブラーのパラメータを推定している。本節では様々な大きさのモーションブラーが発生した場合における, カメラの合焦位置とモーションブラーパラメータの推定精度を評価する。同時に, モーションブラーが合焦位置の推定結果に与える影響について検証する。

実験環境を図 9 に示す。マーカは水平面に 12 個配

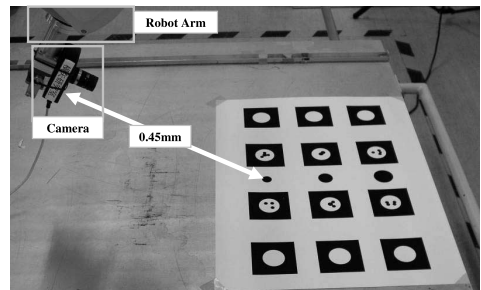


図 9 ロボットアームを用いた実験環境
Fig. 9 Experimental environment with robot arm.

表 1 合焦位置の真値と推定結果

Table 1 Results and errors of estimated focus position.

Shutter speed	Reference value	Average of estimated values	Standard deviation of estimated values	Average error of estimated values
20 ms	0.45 m	0.42 m	0.012 m	0.03 m
40 ms	0.45 m	0.41 m	0.022 m	0.04 m
60 ms	0.45 m	0.40 m	0.023 m	0.05 m

表 2 モーションブラーの真値と推定結果

Table 2 Results and errors of estimated magnitude of motion blur.

Shutter speed	Reference value	Average of estimated values	Standard deviation of estimated values	Average error of estimated values
20 ms	3.46 pixel	3.15 pixel	0.31 pixel	0.31 pixel
40 ms	6.92 pixel	6.9 pixel	0.53 pixel	0.02 pixel
60 ms	10.4 pixel	9.5 pixel	0.71 pixel	0.9 pixel

表 3 モーションブラーの方向の真値と推定結果

Table 3 Results and errors of estimated orientation of motion blur.

Shutter speed	Reference value	Average of estimated values	Standard deviation of estimated values	Average error of estimated values
20 ms	0 deg.	0.84 deg.	3.63 deg.	0.84 deg.
40 ms	0 deg.	-0.79 deg.	4.34 deg.	-0.79 deg.
60 ms	0 deg.	2.2 deg.	4.08 deg.	2.2 deg.

置し、カメラはロボットアームを用いて鉛直方向を回転軸として角速度一定で回転させた。カメラの合焦位置、モーションブラーの大きさ、モーションブラーの方向のそれぞれについて提案手法によって推定される値と真値を比較した。なお、カメラの合焦位置は 0.45 m とし、カメラは毎秒 30 度の角速度で回転させた。カメラのシャッタースピードは 20 ms, 40 ms, 60 ms の 3 通りに変更した。

表 1 にシャッタースピードを変更した際の合焦位置の真値、推定値の平均、推定値の標準偏差を示す。表より、シャッタースピードが遅くなりモーションブラーが大きくなるにつれて、合焦位置の推定誤差が大きくなり、推定精度が下がっていることが分かる。表 2 にシャッタースピードを変更した際のモーションブラーの大きさの真値、推定値の平均、推定値の標準偏差を示す。なお、モーションブラーの大きさの真値はカメラの画角、解像度、回転速度、シャッタースピードから計算した。表 3 にシャッタースピードを変更した際のモーションブラーの方向の真値、推定値の平均、推定値の標準偏差を示す。提案手法によるばけ推定によってモーションブラーの大きさ・方向がおおむね良好に

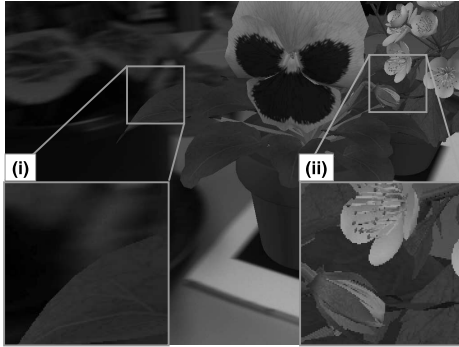
推定できている。

以上の結果について考察を行う。提案手法によるばけ推定は最も誤差が大きいシャッタースピード 60 ms の場合で、合焦位置の推定誤差が 0.05 m、モーションブラーの大きさの推定誤差が 0.9 画素、モーションブラーの方向の誤差が 2.2 度であった。ここで、本実験で用いたカメラでは合焦位置に 0.05 m の誤差があった場合、奥行 0.2 m ~ 無限遠の範囲で式 (9) で計算されるばけの大きさは真値に対して差が 0.5 画素以下となる。つまり、シャッタースピード 60 ms の場合に提案手法によって再現されるばけの大きさは、実画像で生じているばけの大きさに対して最大で 1.4 画素の誤差が含まれる。ユーザが画質の不一致を感じる画像のばけの大きさと方向の誤差は、画像に生じているばけの強さや重畳表示する画像の内容、アプリケーションに依存すると考えられ、一概に定めることはできないと考えるが、1.4 画素の誤差はビデオスルー型の拡張現実感に用いるディスプレイの分解能とほぼ等しく、提案手法によるばけの大きさの推定誤差がユーザに対して与える違和感は小さいと考える。

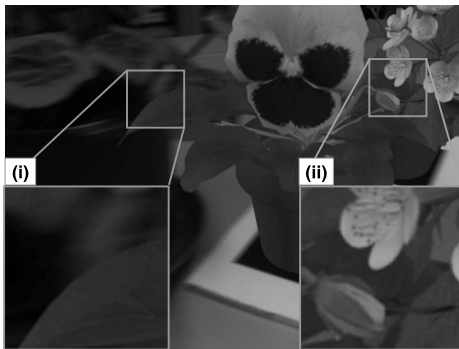
4.5 提案手法による画像合成結果

提案手法は画質の一致を図る手法であり、応用例としてインテリアデザインのシミュレーション [2] など、仮想物体と実物体の光学的整合性が重要なアプリケーションが考えられる。本実験では提案手法による画質の一致の有効性を確認するため、仮想インテリアデザインを想定し、仮想物体として植木鉢を用いた画像合成実験を行った。幾何学的整合性の解決には実環境中に配置された 2 個のマーカを用い、カメラ座標系におけるそれぞれのマーカの位置・姿勢を用いて仮想物体の位置合せを行った。

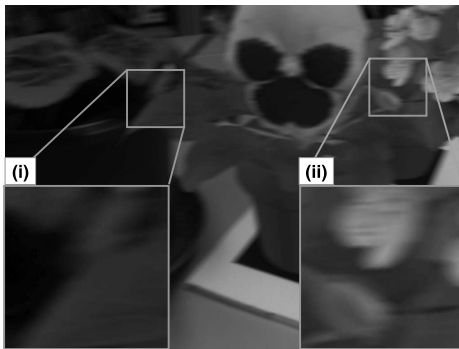
図 10 において、(a) はばけ再現を行わない画像合成結果、(b) は焦点ずれによるばけのみを再現した画像合成結果、(c) は提案手法によって焦点ずれによるばけとモーションブラーを再現した画像合成結果であり、実画像に焦点外れによるばけと、カメラの水平方向の回転によるモーションブラーが生じている。(a) において、仮想物体は常に鮮明に描画されているため実物体との画質の差が発生してしまい違和感が大きい。これに対して (b) では、焦点ずれに応じたばけが再現されており、画質の差が軽減できている。しかし、実画像にモーションブラーによる強いばけが発生しているにもかかわらず仮想物体にはばけが生じていないため、依然として違和感が残っている。(c) ではモーション



(a) Image composition without blur representation



(b) Image composition with defocus blur representation



(c) Image composition with motion blur and defocus blur representation (proposed method)

図 10 ぼけ再現を行わない場合の画像合成と提案手法による画像合成結果の比較

Fig. 10 Comparison of the proposed method and an image composition method without blur representation.

ブラーも再現されているため、画像全体の画質が実画像と似ており違和感が大幅に軽減できていることが分かる。なお、本システムはおよそ 10 fps で動作した。

5. む す び

本論文は拡張現実感において、実画像からのぼけ推定に基づいて実画像と仮想物体の画質の差を減少した画質合成手法を提案した。本手法は実画像中の複数のマーカから焦点外れによるぼけとモーションブラーを推定し、仮想物体にぼけを再現することで合成画像の違和感の軽減を試みた。実験ではモーションブラーの有無にかかわらずカメラの合焦位置を推定できていること、テストパターンを用いて提案手法が画質の差を減少できていることを確認した。しかしながら、本手法を具体的なアプリケーションに適用する際には、カメラの合焦位置やモーションブラーのパラメータの要求精度を検討する必要がある。最後に、仮想インテリアデザインを想定した画像合成実験より提案手法によるぼけの再現が画質の差の軽減に対して有効であることを確認した。

今後の課題として、仮想物体の動きを考慮したモーションブラーの再現などが考えられる。本論文ではモーションブラーの要因として、仮想物体がシーンに対して静止した状態でカメラの回転によって生じるモーションブラーに限定したが、仮想物体を重畳表示するマーカの動き、あるいは仮想物体のシーン中の移動によって生じるモーションブラーなどの再現による、よりいっそう画質の差を軽減することでユーザに対して与える違和感を軽減できると考える。

文 献

- [1] H. Regenbrecht, G. Baratoff, and W. Wilke, "Augmented reality projects in the automotive and aerospace industries," *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol.25, no.6, pp.48–56, 2005.
- [2] 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," *映情学誌*, vol.57, no.10, pp.1307–1313, 2003.
- [3] K. Agusanto, L. Li, Z. Chuangui, and N.W. Sing, "Photorealistic rendering for augmented reality using environment illumination," *Proc. 2nd IEEE and ACM Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 03)*, pp.208–216, 2003.
- [4] M. Kanbara and N. Yokoya, "Real-time estimation of light source environment for photorealistic augmented reality," *Proc. 17th IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition (ICPR2004)*, pp.911–914, 2004.
- [5] J. Fischer, D. Bartz, and W. Strasser, "Stylized augmented reality for improved immersion," *Proc. IEEE Virtual Reality 2005 (VR2005)*, pp.195–202, 2005.
- [6] M. Haller, F. Landerl, and M. Billinghurst, "A loose

- and sketchy approach in a mediated reality environment,” GRAPHITE '05: Proc. 3rd Int. Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and South East Asia, pp.371-379, 2005.
- [7] 奥村文洋, 神原誠之, 横矢直和, “拡張現実感のための実画像のぼけ推定に基づく画像合成手法” 情報科学技術レターズ, vol.4, pp.245-248, 2005.
- [8] B. Okumura, K. Masayuki, and N. Yokoya, “Augmented reality based on estimation of defocusing and motion blurring from captured images,” Proc. 5th IEEE and ACM Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 06), pp.219-225, 2006.
- [9] 奥村文洋, 神原誠之, 横矢直和, “焦点外れによるぼけとモーションブラーの推定に基づく拡張現実感における光学的整合性の実現” 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2006) 講演論文集, pp.255-260, 2006.
- [10] J. Flusser and T. Suk, “Degraded image analysis: An invariant approach,” IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.20, no.6, pp.590-603, 1998.
- [11] 橋本正一, 斎藤英雄, “PSFのパラメータ分布を推定するシフトバリエーションぼけ画像の復元法” 信学論 (D-II), vol.J77-D-II, no.4, pp.719-728, April 1994.
- [12] D. Kundur and D. Hatzinakos, “Blind image deconvolution,” IEEE Signal Process. Mag., vol.13, pp.43-64, 1996.
- [13] E.H.B. Smith, “Scanner parameter estimation using bilevel scans of star charts,” Proc. 6th Int. Conf. on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2001), pp.1164-1168, 2001.
- [14] N. Asada and M. Baba, “A thin lens based camera model for depth estimation from defocus and translation by zooming,” Proc. 15th Int. Conf. on Vision Interface, pp.274-281, 2002.
- [15] P. Favaro and S. Soatto, “A geometric approach to shape from defocus,” IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.27, no.3, pp.406-417, 2005.
- [16] S.C. Park, M.K. Park, and M.G. Kang, “Super-resolution image reconstruction: A technical overview,” IEEE Signal Process. Mag., vol.20, no.3, pp.21-36, 2003.
- [17] I. Begin and F.P. Ferrie, “Blind super-resolution using a learning-based approach,” Proc. 17th IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition (ICPR2004), pp.85-89, 2004.
- [18] C. Kolb, D. Mitchell, and P. Hanrahan, “A realistic camera model for computer graphics,” Proc. SIGGRAPH '95, pp.317-324, 1995.
- [19] N. Asada and M. Baba, “A unified camera model of zoom, focus and Iris parameters for camera-calibrated computer graphics,” Proc. 6th Int. Conf. on Computer Graphics and Imaging, pp.101-106, 2000.
- [20] A.P. Pentland, “A new sense for depth of field,” IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.9, no.4, pp.523-531, 1987.

- [21] M. Potmesil and I. Chakravarty, “Modeling motion blur in computer-generated images,” Proc. SIGGRAPH '83, pp.389-399, 1983.
- [22] H. Kato, M. Billinghurst, I. Poupyrev, K. Imamoto, and K. Tachibana, “Virtual object manipulation on a table-top AR environment,” Proc. IEEE/ACM Int. Symp. on Augmented Reality, pp.111-119, 2000.
(平成 18 年 10 月 6 日受付, 19 年 2 月 8 日再受付)



奥村 文洋 (学生員)

2001 名工大・工学卒。2003 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程了 (株)デンソー勤務を経て、現在、奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程に在学中。コンピュータビジョン、コンピュータグラフィックス、拡張現実感に関する研究に従事。IEEE 会員。FIT2005 論文賞受賞。



神原 誠之 (正員)

2002 奈良先端科学技術大学院大学博士後期課程了。同年同大情報科学研究科助手、現在に至る。コンピュータビジョン、複合現実感の研究に従事。博士 (工学)。1999 本会学術奨励賞受賞。日本バーチャルリアリティ学会、情報処理学会、IEEE 各会員。FIT2005 論文賞受賞。



横矢 直和 (正員:フェロー)

1974 阪大・基礎工・情報工学卒。1979 同大大学院博士後期課程了。同年電子技術総合研究所入所。以来、画像処理ソフトウェア、画像データベース、コンピュータビジョンの研究に従事。1986-1987 マツギル大・知能機械研究センター客員教授。1992 奈良先端科学技術大学院大学・情報科学センター教授。現在、同大情報科学研究科教授。1990 情報処理学会論文賞受賞。2005 情報処理学会フェロー、工博。日本バーチャルリアリティ学会、情報処理学会、人工知能学会、日本認知科学会、映像情報メディア学会、IEEE、ACM SIGGRAPH 各会員。FIT2005 論文賞受賞。