

LK-012

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

Image Composition Based on Blur Estimation of Real Image for Augmented Reality

奥村 文洋*
Bunyo OKUMURA

神原 誠之*
Masayuki KANBARA

横矢 直和*
Naokazu YOKOYA

1. はじめに

現実環境に対して仮想物体などを重畳表示し、ユーザに対してより多くの情報を効率的に提示する技術は拡張現実感と呼ばれる [1]。違和感のない拡張現実感を構成するためには、いくつかの整合性問題を解決する必要がある。例えば、仮想物体の実世界における位置・姿勢の正しさ（幾何学的整合性）や、仮想環境と実環境の照明条件や仮想物体の画質など、写実性に関する整合性（光学的整合性）などが挙げられる。近年、写実性の高い拡張現実環境を構築することが可能となってきたため、幾何学的整合性のみならず、光学的整合性を実現する手法が多く提案されるようになってきた [2, 3, 4, 5, 6]。しかし、これらの手法は光学的整合性の中でも、実環境と仮想環境の照明条件の整合性に注目したものが多く、実環境と仮想環境の画質に関する整合性を解決するものはほとんど存在しない。

特に、実世界と仮想世界を重畳するための方式の一つであるビデオスルー方式では、実世界をカメラで撮影するため、画質の整合性問題の解決は拡張現実環境の写実性を向上させるために重要な課題である。画質の不一致が生じる主な原因としては、仮想物体のレンダリングに用いるカメラが理想的なカメラモデルで記述されているのに対し、実環境を撮影するカメラでは、焦点ずれによるぼけなどの画質の劣化が生じるためである。

撮影した画像と提示する仮想物体の画質の整合性問題を解決するために、仮想物体の描画に用いるカメラモデルを現実に近い研究がなされている。たとえば、馬場ら [7] はフォーカスなどのパラメータを考慮したカメラモデルを提案している。また、Kolb ら [8] はレンズ設計データに基づいた仮想物体のレンダリング手法を提案している。しかし、これらの手法はピント調節などによって変化するカメラの内部パラメータが常に既知である必要があるため、拡張現実感に適用することは困難である。

本稿ではカメラで撮影した実画像に対して、実画像と画質を合わせた仮想物体を提示することが可能な拡張現実環境を提案する。特に、画質に大きな影響を与えるカメラの焦点ずれによって生じるぼけを考慮して、実画像と仮想物体の画質を合わせる。本手法では従来から用いられている正方マーカ [9] を用いて現実環境と仮想物体の位置合わせを行う。その際、マーカのパターンが既知であることを利用し、撮影されたマーカのパターンのぼけ具合から画像のぼけを推定する。最後に、推定された画像のぼけを考慮して仮想物体を合成し、現実環境と仮想物体の画質のずれを軽減させることで違和感をなくすことを試みる。

以降、2 節で提案手法で用いた画像のぼけモデル、現

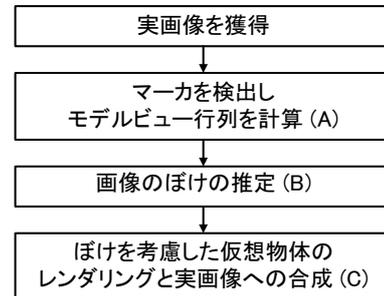


図 1: 提案手法の処理の流れ

実環境と仮想物体の位置合わせの手法、実画像から画像のぼけを推定する方法、画像のぼけを考慮した仮想物体のレンダリング方法について述べる。3 節では提案手法を用いた実験について述べ、最後に 4 節でまとめと今後の課題を述べる。

2. 実画像のぼけ推定に基づく画像合成

レンズの焦点ずれによる画像のぼけは、レンズから物体までの距離に依存することが知られている。本稿では拡張現実感として実環境に配置されたマーカ付近に仮想物体を提示する用途 [9] を想定し、マーカのぼけをマーカ付近の仮想物体のぼけと見なす。

図 1 に提案手法の処理の流れを示す。まず、カメラを用いて実環境を撮影し画像を獲得する。獲得した実画像から形状と色が既知のマーカを検出し、マーカ位置からカメラの位置、姿勢を推定する (図 1 (A))。次に、実画像中のマーカから画像のぼけを推定する (図 1 (B))。そして、推定されたぼけを考慮して仮想物体をレンダリングし、実画像と合成する (図 1 (C))。以下、本手法で想定するカメラのぼけモデルについて述べ、その後、処理 (A),(B),(C) を詳述する。

2.1 焦点ずれによる画像のぼけモデル

一般に、焦点ずれによる画像のぼけはレンズから物体への距離とレンズのパラメータに依存する。このぼけ画像の生成過程は、ぼけのない画像とぼけの点広がり関数 (Point Spread Function, PSF) の畳み込み積分としてモデル化されている。一般に、ぼけの広がり大きさ σ には式 (1) が成り立ち、 σ は画像上の位置に依存することが知られている [10]。

$$\sigma = \rho \gamma v \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{v} - \frac{1}{l} \right) \quad (1)$$

式 (1) において、 f は焦点距離、 l はレンズから物体までの距離、 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 はカメラに依存する定数である。図 2 に焦点ずれによってぼけが生じている場合の光学系を示す。

*奈良先端科学技術大学院大学, 情報科学研究科

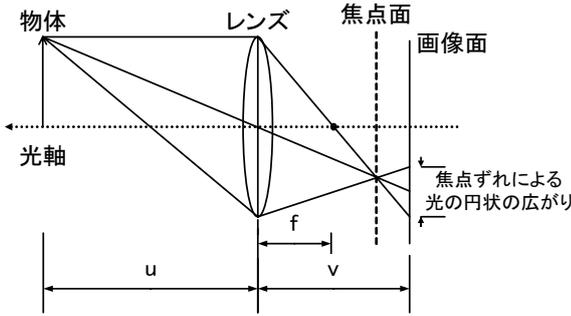


図 2: 焦点ずれが生じている場合の光学系

本手法では画像のぼけモデルとして、単位体積を持つ 2次元のガウス関数を用いる。このとき、現実環境に配置されたマーカ付近に仮想物体を提示することを想定すれば、PSF は画像上の位置に依存しない関数としてモデル化できる [11]。式 (2) に本手法で用いた PSF の式を示す。

$$G(s,t) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(s^2+t^2)}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

ここで s, t は注目画素からの相対位置、 σ はガウス関数の標準偏差を示す。本研究ではガウス関数の標準偏差 σ を焦点ずれによるぼけの大きさと見なす。

2.2 処理 (A) : マーカに対するカメラ位置の推定

手法 [9] を用いて、色と形状が既知のマーカを撮影した画像からマーカとカメラの位置姿勢の関係を推定する。具体的にはマーカ領域の抽出、マーカ頂点の検出、モデルビュー行列の計算からなる。

1. マーカ領域の抽出

カメラで撮影した画像に対して 2 値化、ラベリング処理を行う。これらの領域の中で面積が最大のものをマーカの候補として抽出する。

2. マーカ頂点の検出

抽出された領域に直線の当てはめを行い、直線の交点より正方形マーカの 4 頂点を検出する。

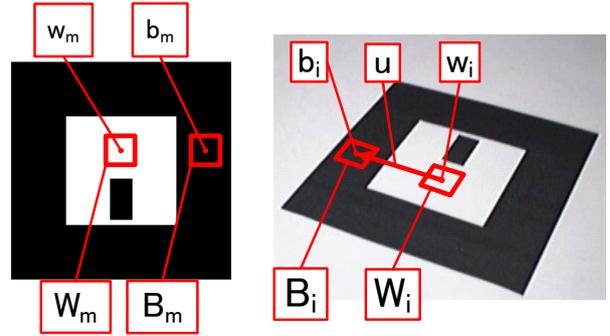
3. モデルビュー行列の計算

検出された 4 頂点と既知であるマーカのサイズとパターンからマーカとカメラの位置関係を示すモデルビュー変換行列を算出する。

2.3 処理 (B) : ぼけの大きさ σ の推定

本研究ではぼけの大きさ σ をマーカ中のエッジ部分での輝度値の変化幅より推定する。まず、エッジ部分を特定するため、マーカの一部に矩形領域をあらかじめ設定する。矩形領域はマーカを基準とした座標系で定め、マーカ中の白色部分の領域を W_m 、黒色部分の領域を B_m 、 W_m, B_m の中心座標をそれぞれ w_m, b_m とする。図 3(a) にマーカ基準座標系における W_m, B_m, w_m, b_m の例を示す。

ぼけ推定は実画像上で行うため、上記で設定した各領域を実画像上に投影する必要がある。実画像上での領域を W_i, B_i 、各領域の実画像上での中心座標を w_i, b_i, u



(a) ぼけ推定のためのマーカ上の領域

(b) 実画像上に投影された領域

図 3: ぼけ推定で利用するマーカ上の領域

から b_i への方向 u は、モデルビュー行列 M とカメラの投影行列 P を用いて以下の式で計算できる。なお、 P は Tsai の手法 [12] によってあらかじめ求めた。

$$w_i = PMw_m \quad (3)$$

$$b_i = PMb_m \quad (4)$$

$$u = w_i - b_i \quad (5)$$

なお、領域 W_i, B_i は、それぞれ W_m, B_m の 4 頂点を投影して求める。図 3(b) に投影後の実画像上での W_i, B_i, w_i, b_i, u の位置の例を示す。以下、エッジの輝度値の変化幅とぼけの大きさ σ の推定方法について述べる。

1. 領域 W_i, B_i 内で画素値の平均をとり、それぞれの平均輝度値 I_w, I_b を算出する。また、閾値 th_w, th_b 、画素を走査するためのステップ幅を du とし、それぞれを以下の式で計算する。

$$th_w = I_w - (I_w - I_b) \times th \quad (6)$$

$$th_b = (I_w - I_b) \times th + I_b \quad (7)$$

$$du = \frac{u}{|u|} \quad (8)$$

2. 白色領域の位置 w_i から du 方向に画素を走査し、画素の輝度値が th_w を下回った点を白色領域から黒色領域への輝度値の変化の開始点 w' として記録する。
3. さらに画素の走査を続け、画素の輝度値が th_b を下回った点を白色領域から黒色領域への輝度値の変化の終了点 b' として記録する。
4. ぼけの大きさ σ を輝度値の変化幅より推定する。これまでのステップで求められた値を用いて $\sigma = |w' - b'| \times \alpha$ とする。ここで α はぼけの大きさを補正するための係数である。

以上の処理によりぼけの大きさを推定する。本手法では推定結果の安定化を図るため、白色領域と黒色領域の組を複数用意し、それぞれの推定値の平均をぼけの大きさとして採用した。

2.4 処理 (C) : ぼけを考慮した仮想物体のレンダリング

本研究では仮想物体のレンダリングと仮想物体にぼけを適用する処理をグラフィクスハードウェアで行い高速化を図る [13]。まず、2.2 節で求めたモデルビュー行列を用いてテクスチャバッファに対して仮想物体をレンダリングする。そして、レンダリング結果に対して 2.3 節で推定したぼけの大きさに基づいた 2 次元ガウシアンフィルタを適用する。

このとき処理の高速化のために近傍 N 画素のみをフィルタの計算対象とする。さらにガウシアンフィルタ処理が X 軸方向の処理と Y 軸方向の処理の 2 つに分けられる点を利用し高速化を図る。具体的には、レンダリング結果に対して式 (9) と式 (10) のフィルタ処理を逐次的に行うことで 2 次元ガウシアンフィルタと同等の効果を得る。

$$G_x(s, t; N) = \begin{cases} \frac{1}{N_x} \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma^2}\right) & \text{if } t = 0 \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (9)$$

$$G_y(s, t; N) = \begin{cases} \frac{1}{N_y} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) & \text{if } s = 0 \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (10)$$

ただし、

$$N_x = N_y = \sum_{i=-N}^{2N+1} \exp\left(-\frac{i^2}{2\sigma^2}\right) \quad (11)$$

3. 実験

提案手法の有用性を確認するために画像合成実験を行った。本実験では小型カメラとデスクトップ PC を用いた拡張現実環境を構築し、現実環境に正方マーカを置きマーカ上に仮想物体を重畳表示した。実験ではフォーカスを固定してカメラからのマーカに対する距離を変化させた場合の仮想物体の見え方について、従来手法と提案手法を比較する。また、カメラとマーカの距離を固定して、カメラのフォーカスを動的に変更した場合の提案手法の有効性を検証する。計算機として一般的なデスクトップ PC を用い、CG レンダリング時のフィルタ処理はグラフィクスカードのハードウェアを利用して行った。実験機器を表 (1) に示す。

表 1: 実験に使用した機器

項目	機器名
計算機	Pentium 4 3.2GHz メモリ 1GByte , GeForce 6800 GT, VRAM 256MByte
カメラ	ARGO Lu-135c (解像度 1024 × 768)

3.1 カメラからマーカまでの距離を変化させた場合

まず、カメラのフォーカスを固定して、カメラからマーカまでの距離を 30cm, 60cm, 90cm の 3 通りに変化させ、仮想物体として立方体を重畳表示した。カメラのフォーカスは 30cm の距離に焦点が合うように調整した。

図 4 は上段に従来手法による重畳合成結果、下段に提案手法による重畳合成結果を示す。それぞれ、(a), (d) は約 30cm 離れた位置、(b), (e) は約 60cm 離れた位置、(c), (f) は約 90cm 離れた位置の結果である。結果よりマーカの部分はマーカがカメラから離れるにつれて焦点ずれによる

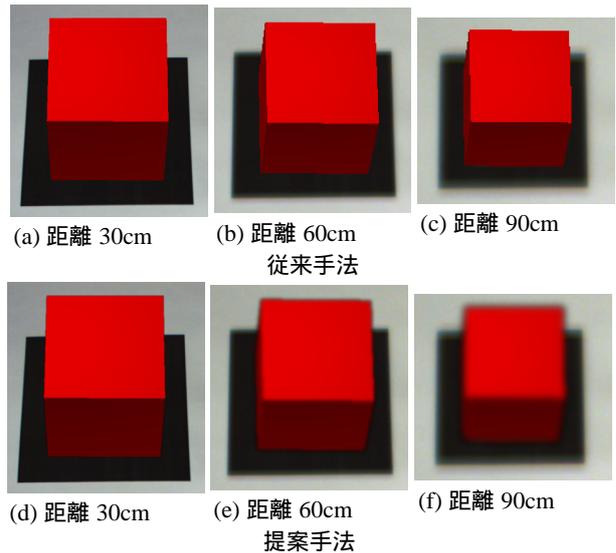


図 4: カメラとマーカの距離を変更した場合の仮想物体の合成結果の比較

ぼけが生じている。従来手法ではマーカがぼけている状態でも仮想物体は鮮明に表示されている。対して、提案手法ではマーカのぼけに合わせて仮想物体もぼけており、従来手法に比べて違和感が少なくなっていることがわかる。また、距離と推定されたぼけの大きさ (σ) の関係を表 2 に示す。マーカまでの距離に応じてぼけの大きさが変化していることがわかる。なお、動作は約 30 フレーム毎秒で実行できることを確認した。

表 2: カメラからマーカまでの距離と、ぼけの大きさの関係

距離 [cm]	ぼけの大きさ (σ) [pixel]
30	0.8
60	2.2
90	3.0

3.2 カメラのフォーカスを変更した場合

カメラとマーカの距離を固定して、カメラのフォーカスを変更した場合に提案手法による仮想物体の提示が有効か検証する。カメラのフォーカスは手動で変更し、近景、マーカ付近、遠景の 3 カ所にフォーカスを合わせる。マーカまでの距離は 30cm とし、近景としてカメラから 15cm の距離にサイコロ、遠景としてチェッカーボードをカメラから 90cm の距離にそれぞれ配置した。

図 5 に結果を示す。(a) ~ (c) は仮想物体として立方体を表示し、(d) ~ (f) は仮想物体としてティーポットを表示した。また、(a), (d) は近景、(b), (e) がマーカ付近、(c), (f) が遠景にそれぞれフォーカスを合わせた。提案手法によって、フォーカスの変化によって生じるぼけが再現できていることが確認できる。しかし、実際のカメラではカメラから物体までの奥行きに応じて画像のぼけが変化しますが、提案手法では再現できていない。例えば、図 5(a) や (c) 中の仮想物体は奥行きにかかわらず均一にぼけている。これは、本手法がマーカの位置でのぼけの大きさを推定し、仮想物体に均一なぼけ効果を与えるため、距離に応じた画像のぼけを再現できていないためである。

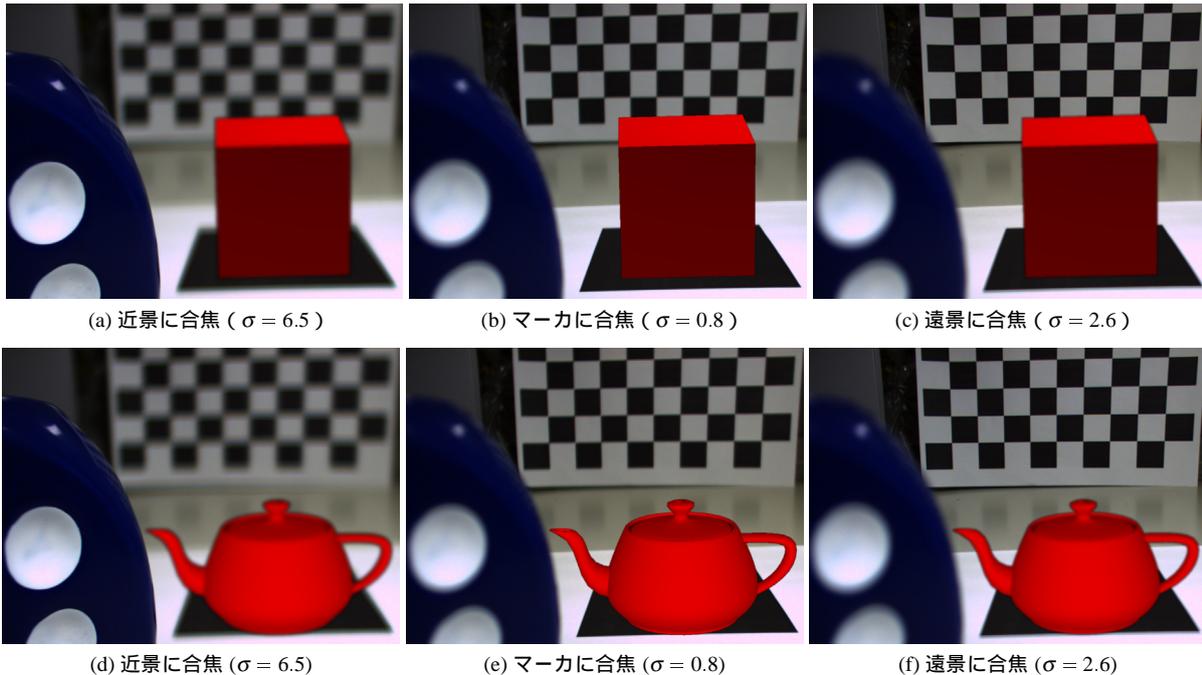


図 5: カメラのフォーカスを変化させた場合の仮想物体 ((a)~(c) 立方体, (d)~(f) ティーポット) の提示結果の比較

4. まとめと今後の課題

本稿ではカメラで撮影した実画像と仮想物体を重畳表示するような拡張現実環境で、実画像からのぼけ推定に基づいた実画像と仮想物体の画質を合わせるための手法を提案した。本手法によってカメラの焦点ずれやフォーカスの変化によってぼけが生じた場合でも、撮影されたマーカパターンからぼけを推定することで仮想物体が違和感なく提示でき、かつ実時間で動作することを確認した。

しかし、今回の手法ではカメラのぼけに関するパラメータを推定しているのではなく、実画像中のマーカのぼけの大きさを推定しているため、マーカ付近に仮想物体が存在する場合に限られる。この問題を解決するためには、カメラの焦点距離や被写界深度を推定し物体の奥行きに基づいた画像のぼけを再現する必要があると考える。

参考文献

- [1] R. T. Azuma: "A Survey of Augmented Reality", Presence, vol. 6 no. 4, pp. 355-385, 1997.
- [2] 神原, 横矢: "現実環境の照明条件と奥行きの実時間推定による仮想物体の陰影表現が可能な拡張現実感", 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2004) 講演論文集, vol. II, pp. 247-252, 2004.
- [3] K. Agusanto, L. Li, Z. Chuangui, N. W. Sing: "Photorealistic Rendering for Augmented Reality Using Environment Illumination", Proc. IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp. 208-216, 2003.
- [4] J. Unger, A. Wenger, T. Hawkins, A. Grandre, P. Debevec: "Capturing and Rendering with Incident Light Fields", Proc. Eurographics Symposium on Rendering 2003, pp. 1-10, 2003.
- [5] S. Gibson, J. Cook, T. L. J. Howard, R. J. Hubbard: "Rapid Shadow Generation in Real-World Lighting Environments", Proc. Eurographics Symposium on Rendering 2003, pp. 219-229, 2003.
- [6] P. Debevec: "Rendering Synthetic Objects into Real Scenes: Bridging Traditional and Image-based Graphics with Global Illumination and High Dynamic Range Photography", Proc. SIGGRAPH '98, pp. 189-198, 1998.
- [7] 馬場, 天野, 青山, 浅田: "Calibrated Computer Graphicsのためのズーム・フォーカス・アイリス統合カメラモデル", 画像の理解・認識シンポジウム (MIRU'98) 論文集, vol. II, pp. 47-51, 1998.
- [8] C. Kolb, D. Mitchell, P. Hanrahan: "A Realistic Camera Model for Computer Graphics", Proc. SIGGRAPH '95, pp. 317-324, 1995.
- [9] H. Kato, M. Billinghurst, I. Poupyrev, K. Imamoto and K. Tachibana: "Virtual Object Manipulation on a Table-top AR Environment", Proc. IEEE/ACM International Symposium on Augmented Reality, pp. 111-119, 2000.
- [10] A. P. Pentland: "A New Sense for Depth of Field", IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 9, no. 4, pp. 523-531, 1987.
- [11] B. K. P. Horn 著, NTT ヒューマンインターフェース研究所 訳: "ロボットビジョン", 朝倉書店, 1993.
- [12] R. Y. Tsai: "A Versatile Camera Calibration Technique for High-accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses", IEEE Jour. of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 4, pp. 323-344, 1987.
- [13] G. Riguer, N. Tatarchuk, J. Isidoro: "Real-Time Depth of Field Simulation", Wordware, Shader X2: Shader Programming Tips & Tricks with DirectX 9, 2003.