

# 全方位カメラを用いた屋外複合現実感におけるオクルージョンを考慮した移動物体の検出と影の除去

Lu Boun Vinh 角田 哲也 川上 玲 大石 岳史 池内 克史  
東京大学 生産技術研究所

あらまし 複合現実感 (MR) における実物体と仮想物体のオクルージョン問題を解決するため、実画像から前景領域の抽出と影領域の除去を行い、さらに画像中の位置座標から前景物体の奥行き推定を行う手法を提案する。前景領域の抽出については確率モデルに基づく手法を用い、色、コントラスト、時間的事前確率を用いて精度を高める。確率モデルにおけるエネルギー最小化にはグラフカットを用いる。また抽出した前景領域に対し、各画素の色度とカメラの分光感度特性から求められる  $\log F$  値を用いることにより、影領域を除去する。最後に画素ごとの描画判定に利用されるステンシルバッファを用いて、前景物体によるオクルージョンを考慮しながら仮想物体の重ね込みを行う。屋外環境で全方位カメラを用いてパノラマ単画像を撮影し、画像シーケンスに対して仮想物体の合成を行うことによって提案手法の有効性を確認した。

## Detection of Moving Objects and Cast Shadows Using Omnidirectional Camera for Outdoor Mixed Reality

Lu Boun Vinh and Tetsuya Kakuta and Rei Kawakami and Takeshi Oishi and Katsushi Ikeuchi  
Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo

**Abstract** This paper presents a method solving the occlusion problem in Mixed Reality (MR). We cut out foreground from a real image using probability-based segmentation method. Using the color, spatial and temporal priors, we can improve the accuracy of the segmentation. The energy minimization is executed by graph cuts. Then we remove shadow region from the foreground with  $\log F$  value calculated from the pixel value and the spectral sensitivity characteristic of the camera. Finally we superimpose virtual objects using the stencil buffer which is used to limit the area of rendering for each pixel. Synthesized images of an outdoor scene show the efficiency of the proposed method.

### 1 はじめに

近年、現実世界とコンピュータグラフィックス (CG) によって表現された仮想世界を融合する複合現実感 (MR: Mixed Reality) に関する研究が盛んに行なわれている [1]。MR において実世界と仮想世界の違和感のない合成を行うためには、両者の遮蔽 (オクルージョン) を正確に表現する必要がある。特にビデオシーンスルー方式の MR システムではカメラで撮影した実画像に対して仮想物体の重ね込みを行うが、前景の実物体による仮想物体のオクルージョンを表現することが重要な課題である。

従来より MR におけるオクルージョン問題に関する研究が盛んに行われている。神原ら [12]、林ら [13] は、ステレオカメラで撮影した画像から実世界の奥行き情報を取得する手法を提案している。

その他にもユーザが指定した前景領域の境界線を追跡する手法 [7] や背景差分によって遮蔽計算用の前景マスクを抽出する手法 [4]、大規模なボリュームデータのビジュアルハルを用いて遮蔽処理を高速化する手法 [3] などが提案されている。しかし、光源分布が刻々

と変化する屋外環境においてオクルージョンを表現する事例はあまり報告されていない。また [4] を除いては、前景物体の影を効率的に除去する手法も提案されていない。

一方コンピュータビジョンの分野では動画像から前景領域と背景領域を分割する研究が広く行われている。特に近年、ノイズや複雑な運動にロバストなグラフカット [2] を用いた前景抽出手法が提案されている。Kolmogorov らは色、コントラスト、時間的事前確率、動き情報を組み合わせることで、単眼で背景画像を既知としない前景抽出手法を提案している [6]。Sun らは背景画像を既知として、色とコントラスト情報を用いることで自動前景抽出を可能としている [10]。塩田らはこれらの手法を改良し、多視点のビデオ動画像から高い精度で前景抽出を行う手法を提案している [11]。しかしこれらの事例では、前景領域に含まれる影領域については考慮されていない。

動画像から影の領域を検出する手法としては、混合正規分布を用いて移動物体のキャストシャドウを抽出する手法 [9] や、単画像中の色度の比を用いる手法 [5]

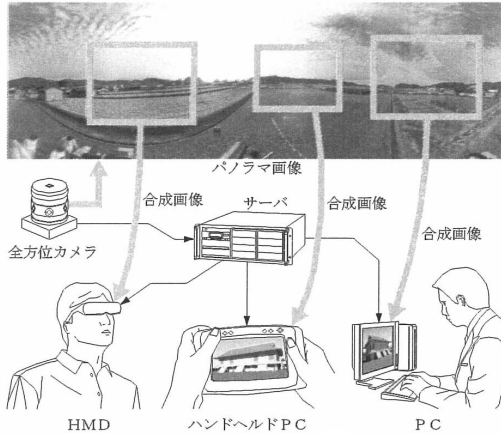


Fig. 1: 全方位カメラを用いたマルチユーザ MR

などが提案されている。しかしこれらの手法は監視カメラによる移動物体検出や画像からの光源色の除去を目的とされており、MRシステムへの適用は想定されていない。MRに適用するためには、カメラの位置姿勢や前景物体の奥行きを実時間で推定し、仮想物体との遮蔽関係を計算しなければならないという制約がある。

そこで本論文では屋外MRにおけるオクルージョン問題を解決するため、実画像中の前景移動物体を抽出し、さらにそのキャストシャドウを除去する手法を提案する。提案手法では、全方位カメラで撮影した全方位パノラマ画像を用いることによって、画像中の位置から前景物体の奥行き推定を行うことが可能である。また、屋外環境で撮影した画像シーケンスに対して提案手法を適用し、前景物体と仮想物体のオクルージョンを正確に表現できることを示す。

本研究は図1に示すようなマルチユーザ型MRシステムへの適用を想定している。従来のHMDやハンドヘルドPCを用いたMRシステムでは、基本的に1ユーザに対してカメラと計算機が1台ずつ必要である。そのため観光地などで多数のユーザが同時に合成映像を体験するようなことは困難である。そこで本研究では、1台の全方位カメラで撮影した全方位画像から任意の画像領域を切り出すことによって、複数のユーザや遠隔地のユーザに対して同時に合成画像を配信することができるようなMRシステムを提案する。

以降、第2章では前景抽出と影除去処理の流れについて説明する。第3章では仮想物体の合成処理について述べる。第4章では屋外環境における合成実験の結果を示す。最後に第5章で、まとめと今後の課題について述べる。

## 2 前景の抽出

本研究で用いた確率モデルに基づく前景抽出のアルゴリズムについて説明する。本手法はKolmogorov

の手法[6]とSun[10]らの手法を組み合わせた塩田らの手法[11]を基本アルゴリズムとしている。この手法では背景画像を既知として、色やコントラスト情報に加えて、時間的事前確率を用いて精度を高めている。

本論文では以下の表記を用いる。既知の背景画像を $I^B$ 、連続ビデオ動画像の時刻 $t$ における画像を $I^t = (I_1^t, I_2^t, \dots, I_N^t)$ と表す。 $I_n$ は画像 $I$ 中の画素 $n$ における色値を表している。 $N$ は総画素数である。画像 $I$ における全画素の集合を $\mathcal{V}$ とし、全ての隣接画素対(4隣接間)の集合を $\mathcal{N}$ とする。前景/背景の領域分割問題は、各画素 $n \in \mathcal{V}$ に、特徴ラベル $x_n \in \{F (= \text{foreground}), B (= \text{background})\}$ を割り当てる、二値のラベリング問題として見なすことができる。画像全域での特徴ラベルの集合は $X = \{x_1, \dots, x_N\}$ とする。

### 2.1 確率モデル

この節では、前景と背景に領域分割するための確率モデルについて説明する。入力画像列 $(I^1, \dots, I^t)$ が与えられたとき、あるラベル $(X^1, \dots, X^t)$ になる条件付確率 $P$ は式(1)のように表される。

$$P = p(X^1, \dots, X^t | I^1, \dots, I^t) \propto \exp\left(-\sum_{k=1}^t E^k\right) \quad (1)$$

$$\text{where } E^t = E(X^t, X^{t-1}, X^{t-2}, I^t) \quad (2)$$

ここで確率モデルは時系列に関する2次のマルコフ連鎖過程に従うものとしている。式(1)より前景/背景の領域分割問題はGibbsエネルギーを最小にするラベル $(\hat{X}^1, \dots, \hat{X}^t)$ を求める問題となる。

$$(\hat{X}^1, \dots, \hat{X}^t) = \arg \min \sum_{k=1}^t E^k \quad (3)$$

時刻 $t$ におけるエネルギー $E^t$ は以下のような3つのエネルギー項の和として表される。

$$E^t = \alpha V^T(X^t, X^{t-1}, X^{t-2}) + \beta V^S(X^t, I^t) + U^C(X^t, I^t) \quad (4)$$

このうち、 $V^T$ 、 $V^S$ は事前確率に類似して定義されるエネルギー項であり、 $U^C$ は画像より観察される尤度により定義されるエネルギー項である。 $\alpha, \beta$ は各エネルギー項間の重みであり経験的に与えるものとする。以下それぞれの項について概略を説明する。

時間的事前確率に関する項： $V^T$

$V^T(X^t, X^{t-1}, X^{t-2})$ は、ラベリングの事前確率が時系列に関する2次のマルコフ連鎖過程に従うとして求められる。前景となる対象物体が画像中を移動するとき、ある画素に関するラベリング結果は時系列方向に遷移していく。この項は各画素のラベリング結果が時系列方向に保存される方向に働く。

この事前確率はこれまでのフレームのラベリング結果から学習によって求められる。遷移状態は

Table 1: 時間遷移に関する事前確率.

$x_n^{t-2}$	$x_n^{t-1}$	$p(x_n^t = B   x_n^{t-2}, x_n^{t-1})$	$p(x_n^t = F   x_n^{t-2}, x_n^{t-1})$
B	B	$p_{BB}$	$1 - p_{BB}$
B	F	$p_{BF}$	$1 - p_{BF}$
F	B	$p_{FB}$	$1 - p_{FB}$
F	F	$p_{FF}$	$1 - p_{FF}$

$x_n^{t-2}, x_n^{t-1}, x_n^t \in \{F, B\}$  の組み合わせとなるため  $2^3 = 8$  種類となる. しかし,  $p(x_n^t = F | x_n^{t-2}, x_n^{t-1}) = 1 - p(x_n^t = B | x_n^{t-2}, x_n^{t-1})$  であることから, 時間的事前確率は表 1 に示すように  $p_{BB}, p_{BF}, p_{FB}, p_{FF}$  の 4 つで表現することができる.

この項に関するエネルギーは以下の式で定義される.

$$V^T = \sum_{n \in \mathcal{V}} \left[ -\log p(x_n^t | x_n^{t-2}, x_n^{t-1}) \right] \quad (5)$$

空間的事前確率に関する項:  $V^S$

画像中において隣接した画素対  $\{n, m\} \in \mathcal{N}$  は同じラベリング結果となる確率が高い. 通常, 前景領域はある連続した領域に存在する. そのためラベリング結果も空間的に連続な値となる. 一方, 前景領域と背景領域を分ける輪郭線上では異なるラベリングがなされる傾向にある.

そこで隣接画素対の距離によるエネルギー  $V^S$  を考える. 通常, 現在の画像  $I^t$  に対して隣接画素対の色値の距離 (コントラスト) は計算される. しかし, この場合背景領域のエッジも強調されてしまうという問題がある. そこで背景エッジの重みが小さくなるよう, 背景画像  $I^B$  における隣接画素対のコントラストに応じて, 現在の画像  $I^t$  におけるコントラストに重み付けをする [10].

$$d_{n,m} = \|I_n^t - I_m^t\|^2 \cdot \frac{1}{1 + \left( \frac{\|I_n^B - I_m^B\|}{K} \right)^2 \cdot \exp\left(-\frac{\rho_{n,m}}{\sigma_\rho}\right)} \quad (6)$$

$$\rho_{n,m} = \max\{\|I_n^t - I_n^B\|, \|I_m^t - I_m^B\|\} \quad (7)$$

$$\sigma_\rho = 2\langle \rho_{n,m} \rangle \quad (8)$$

ここで  $K$  は減衰の強さを制御するパラメータである.

この項全体のエネルギーは式 (6) を用いて以下のように定義される [2].

$$V^S = \sum_{\{n,m\} \in \mathcal{N}} \delta(x_n, x_m) \cdot \exp(-\mu \cdot d_{n,m}) \quad (9)$$

$$\delta(x_n, x_m) = \begin{cases} 0 & x_n = x_m \text{ のとき} \\ 1 & x_n \neq x_m \text{ のとき} \end{cases} \quad (10)$$

$$\mu = (2\langle d \rangle)^{-1} \quad (11)$$

$\mu$  はコントラストに対する重み付けパラメータである.  $\langle d \rangle$  は全ての隣接画素対の  $d$  の平均を表している.

色尤度に関する項:  $U^C$

$U^C(X^t, I^t)$  は画素  $n \in \mathcal{V}$  のラベルが  $x_n$  となるとき, 色値が  $I_n$  となる尤度により算出される. 尤度は背景の色分布と前景の色分布に基づき計算される. 背景または前景に属する各画素の色分布を算出するために, 前景領域の色分布  $p(I_n | x_n = F)$ , 背景領域の色分布  $p(I_n | x_n = B)$  を学習する. これらの色分布はともに混合正規分布によって表され [6], EM アルゴリズムを用いて求められる.

背景領域の色分布は背景画像  $I^B$  から学習される. このときノイズにロバストかつ局所的な正確さを向上させるために, 画像全域の色分布と各画素における色分布を混合したモデルを用いる.

$$p(I_n | x_n = B) = \rho \cdot \sum_{k=1}^{K_b} \lambda_k^b \cdot N(I_n | \mu_k^b, \Sigma_k^b) + (1 - \rho) \cdot \sum_{k=1}^{K_B} \lambda_k^B \cdot N(I_n | \mu_{n,k}^B, (\sigma_{n,k}^B)^2) \quad (12)$$

$N(\cdot)$  は正規分布を表している. 右辺第 1 項は背景画像全域の色分布, 右辺第 2 項は各画素における色分布を示している.  $K^b, K^B$  は背景領域の混合正規分布の構成要素数,  $\lambda_k^b, \lambda_k^B$  は  $k$  番目の構成要素の重み付けを表している. ここで,  $\rho$  は画像全域の色分布と画素毎の色分布の混合度を決定するパラメータである.

前景領域の色分布は現在の画像と前フレームから求める. まず現在の画像を式 (12) の右辺第 2 項により定義された確率を用いて仮に領域分割する. 実際には, ある画素が背景である確率が閾値  $t_f$  より小さい場合は前景とみなす. そして求めた仮の前景の画素と, 1 フレーム前で前景とラベリングされた画素を用いて, 現時刻の前景領域の色分布を求める.

$$p(I_n^t | x_n = F) = \sum_{k=1}^{K_f} \lambda_k^f \cdot N(I_n | \mu_k^f, \Sigma_k^f) \quad (13)$$

このようにして算出された背景と前景の色分布を用いて, 色尤度を求める. 色尤度に関するエネルギー  $U^C(X^t, I^t)$  は以下のように定義される.

$$U^C(X^t, I^t) = \sum_{n \in \mathcal{V}} \begin{cases} \text{when } -\log p(I_n^t | x_n^t = B) & x_n^t = B \\ \text{when } -\log p(I_n^t | x_n^t = F) & x_n^t = F \end{cases} \quad (14)$$

## 2.2 エネルギー最小化

式 (3) で示すエネルギー  $E(X^1, \dots, X^t, I^1, \dots, I^t)$  を最小にするような  $(\hat{X}^1, \dots, \hat{X}^t)$  を求める. しかし, 計算量の制限から  $(\hat{X}^1, \dots, \hat{X}^t)$  を全て同時に求めることはできない. そこで, 既に推定された過去のラベル  $\hat{X}^1, \dots, \hat{X}^{t-1}$  を用いて, 現在のラベル  $\hat{X}^t$  を求める. つまり, 式 (15) に示すようになる.

$$\hat{X}^t = \arg \min E(X^t, \hat{X}^{t-1}, \hat{X}^{t-2}, I^1) \quad (15)$$

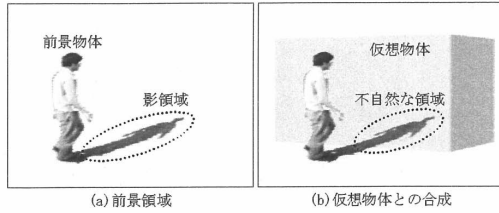


Fig. 2: 影領域の問題

最適ラベリング  $\hat{X}^t$  はグラフカットの手法を用いて求める [2]。まず与えられた画像から、2 個の端点を持つ無向グラフ  $G = (V, E)$  を生成する。ここで各エッジ  $E$  にはエネルギー関数に対応した非負の重み付け ( $w_e$ ) がなされている。エッジ集合  $C \subset E$  により、2 個の端点が分離するようにグラフ  $G$  を 2 分割する。つまりグラフ  $G(C) = (V, E - C)$  は端点が分離された 2 つのグラフより構成される。グラフカットのコスト  $|C|$  は  $C$  に属するエッジの重み付けの総和で表される。

$$|C| = \sum_{e \in C} w_e$$

次に  $|C|$  が最小となるグラフカットを求める。この最小カットにより領域分割結果  $\hat{X}^t$  が得られる。

### 2.3 影領域の除去

抽出された前景と仮想物体を合成表示する際、前景に影が含まれると問題になる場合がある。図 2 に示すように、通常、抽出された前景には物体とその物体が落とす影が含まれる。合成表示する際に、画像中で影と仮想物体の表示位置が重ならない場合は問題無いが、影が仮想物体と同じ領域に描画される場合には不自然な見え方になってしまう (図 2)。

そこで各画素において観測された色から光源色に対して不変な値を求めて影領域を除去する。ここで撮影に用いるカメラはナローバンドの仮定を満たすものとする。また環境は屋外であるとして、光源は黒体放射によるものでありプランクの法則に従うものとする。いま物体表面の反射率の比 ( $s_r, s_g$ ) として、観測光が ( $I_R, I_G, I_B$ ) とすると、これらの関係は以下のように表される [8]。

$$\frac{I_R}{I_B} = \frac{s_r}{(s_g)^A} \left( \frac{I_G}{I_B} \right)^A \quad (16)$$

$$A = \left( \frac{1}{\lambda_R} - \frac{1}{\lambda_B} \right) / \left( \frac{1}{\lambda_G} - \frac{1}{\lambda_B} \right) \quad (17)$$

ここで  $\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B$  は各バンドの波長を表している。式 (16) から分かるように、 $s_r / (s_g)^A = F$  は色度によって表され、光源によらない値となる。

そこでこの  $F$  値と、各画素の明るさを用いて影を除去する。実際には各画素が以下の条件を満たす場合は影領域として除去する。

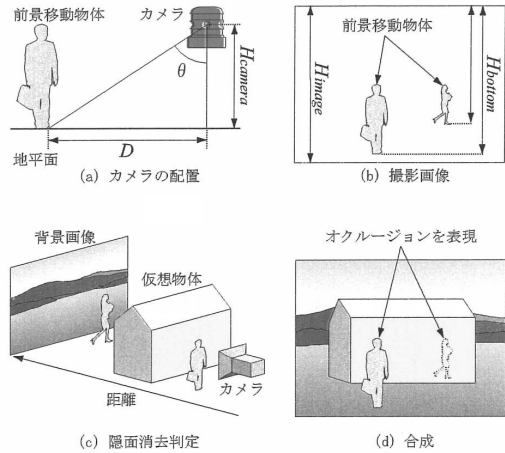


Fig. 3: 移動物体の軌行き推定

1. 前景と背景の  $F$  値の差がある閾値  $t_F$  より小さい
2. 前景の明るさが背景のそれより小さい

前述のように物体色が等しい場合、光源色が異なっても  $F$  値は近い値となる。また通常、影領域は背景に対して明度が小さくなっている。これらの条件を満たす画素を除去することによって、正しい前景を抽出することが可能である。

## 3 合成処理

### 3.1 前景物体の距離推定

前景物体と仮想物体のオクルージョンを表現するために、前景物体のカメラからの距離を推定する。本論文では、実世界の座標系に対して既知の位置にある全方位カメラの撮影画像を用いて前景移動物体の距離を推定する方法を提案する。提案する方法では、撮影画像から抽出した複数の前景領域に対してそれぞれ距離を求めることができる。そのため仮想物体の距離と比較することにより、前景物体と仮想物体相互のオクルージョンを表現することが可能である。

まず図 3 (a) に示すように、三脚等を用いて全方位カメラを地平面から一定の高さ ( $H_{camera}$ ) に固定する。ここでカメラの光軸は地平面と平行になるように設置するものとする。また、地平面は凹凸がなく完全に水平であると仮定する。今この地平面を人などの移動物体が通過し、図 3 (b) に示すような画像が撮影されたとする。ここで移動物体と地平面の接触点及びカメラの光軸中心を結ぶ線分と、カメラの光軸中心から地平面に下ろした垂線のなす角を  $\theta$  とすると、移動物体とカメラとの距離  $D$  は次の式で表される。

$$D = H_{camera} \tan \theta \quad (18)$$

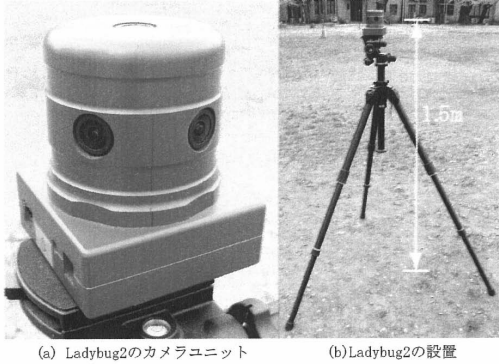


Fig. 4: 全方位カメラ Ladybug2

また全方位カメラのレンズは歪みがなく等距離射影されていると仮定すると、図3 (b) の上端は $\theta = \pi$ 、下端は $\theta = 0$ の方向を表し、垂直方向1/2の線は $\theta = \pi/2$ の地平線を示す。よって画像の高さを $H_{image}$ 、画像の上端と移動物体の下端との長さを $H_{bottom}$ とすると、移動物体のカメラからの距離は以下の式で求めることができる。

$$D = H_{camera} \tan \left\{ \frac{\pi(H_{image} - H_{bottom})}{H_{image}} \right\} \quad (19)$$

### 3.2 仮想物体の合成

図3 (c) に示すように、各々の前景物体の距離と仮想物体の距離を比較することにより、相互のオクルージョンを考慮しながら実画像と仮想物体の合成処理を行う。まず背景画像をカラーバッファに描画する。次に、仮想物体より前方にある前景物体領域からマスク画像を作成し、ステンシルバッファに書き込む。ステンシルバッファとは3次元CGにおいて、画素単位で描画の可否を判定するために用意されたバッファ領域である。Zバッファのように物体間の奥行きではなく任意の値を設定できるため、複雑な形状の領域に対して効率的に描画マスクを作成することができる。ステンシルバッファに対して前景領域部分のマスク画像を描画することにより、その領域に対する仮想物体の描画を無効化することが可能である。ここでは仮想物体より後方にある前景物体に対しては、ステンシルバッファへの描画を行わないものとする。これによって仮想物体に遮蔽される前景物体のオクルージョンも適切に表現することができる。最後にカラーバッファに対して仮想物体を描画する。ステンシルバッファを用いることによって、前景物体による遮蔽を反映しながら仮想物体を実画像に対して合成することができる。

## 4 実験

提案手法の有効性を確認するため、屋外環境において全方位カメラを用いて全方位画像を撮影し、仮想物

体との合成を行った。

### 4.1 MR システム

全方位カメラとして Point Grey Research 社製の Ladybug2 (図4 (a)) を使用した。Ladybug2 は水平方向に5個、垂直方向に1個の CCD カメラを配置したヘッドユニットを持ち、全周の約75%の視野を撮影することができる。実験では図4 (b) に示すように、屋外環境でカメラを三脚上に固定して撮影を行った。前景物体の奥行き推定のため、水平器を用いてカメラヘッドを地平面に対して水平に設置した。またカメラの地平面からの高さは人間の目の高さに合わせて1.5メートルとした。

### 4.2 実験結果

撮影したパノラマ画像シーケンスに対して、前景領域の抽出、影領域の除去、仮想物体の重ね込みを行った。図5に合成結果を示す。実験では前景抽出の色尤度項における混合正規分布の構成要素数は、 $K^b = 15$ 、 $K^B = 2$ 、 $K^J = 5$ とした。

合成処理の流れを説明する。まず撮影画像 (図5 (a)) に対して前景抽出を行い、抽出した前景領域 (図5 (b)) に対してF値を求め、影領域を抽出して除去する (図5 (c))。次に、抽出した各々の前景物体に対して距離推定を行い、仮想物体の距離と比較する。仮想物体よりカメラ側にあると判定された前景領域をステンシルバッファに書き込む (図5 (d))。そして前景領域以外の部分に仮想物体を描画し (図5 (e))、撮影画像と合成する (図5 (f))。

提案手法を適用することによって、仮想物体の前を横切る人物を抽出し、両者の遮蔽関係を正しく表現できることを確認した。また、抽出した前景領域から地面に落ちる人物の影を除去することにより、仮想物体に前景物体の影が不自然に落ちる問題を解決することができた。

## 5 まとめ

本論文では、全方位カメラを用いたマルチユーザ型MRシステムにおいて、人物などの前景領域を抽出するとともに前景物体の背景へのキャストシャドウを除去し、仮想物体とのオクルージョンを正確に表現する手法を提案した。提案手法では確率モデルに基づく前景抽出を行い、色、コントラスト、時間的事前確率などの情報を用いて精度を高めた。また各画素の色と光源色に対して不変な値を用いて、前景領域から影を除去した。抽出した前景物体の奥行きは、パノラマ画像中の位置座標から推定し、仮想物体とのオクルージョンを表現した。今後の課題として、除去した前景物体の影を仮想物体に投影することや、仮想物体の影を移動物体に投影することが挙げられる。

### 謝辞

本研究の一部は、文部科学省技術振興調整費リーディングプロジェクト「大型有形・無形文化財の高精度デジタル化ソフトウェアの開発」の援助を受けて行った。

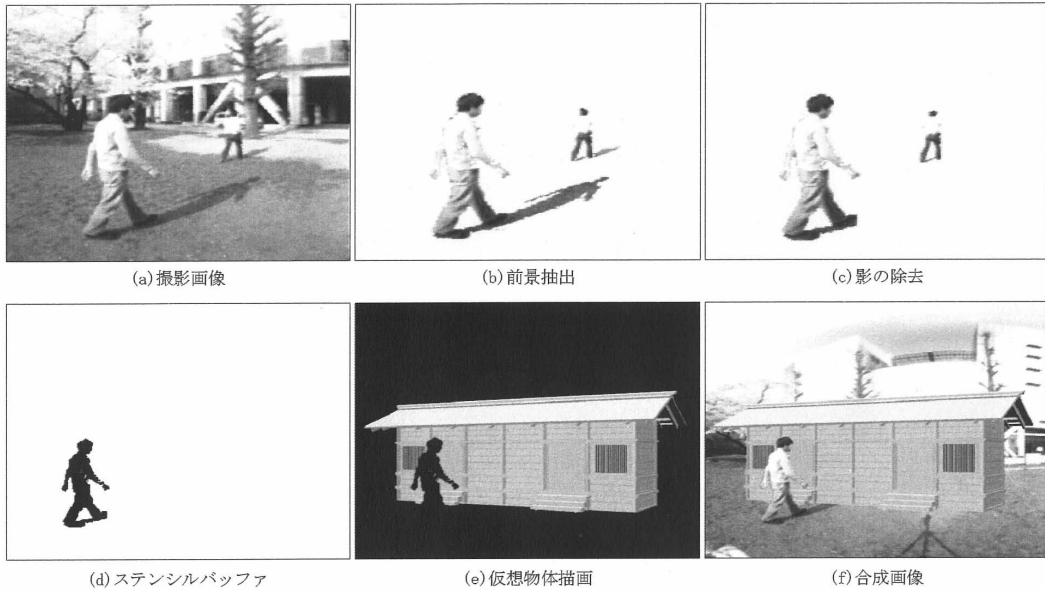


Fig. 5: 屋外環境における合成結果

## References

- [1] R. Azuma, Y. Baillot, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier, and B. MacIntyre. Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(6):34–47, November 2001.
- [2] Y. Boykov, O. Veksler, and R. Zabih. Fast approximate energy minimization via graph cuts. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 23(11):1222 – 1239, November 2001.
- [3] J. Fischer, D. Bartz, and W. Straßer. Occlusion handling for medical augmented reality using a volumetric phantom model. In *Proc. Symp. on Virtual Reality Software and Technology (VRST'04)*, pages 174–177, November 2004.
- [4] G. Gordon, M. Billinghurst, M. Bell, J. Woodfill, B. Kowalik, and A. Erendi. The use of dense stereo data in augmented reality. In *Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR02)*, pages 14–23, September 2002.
- [5] R. Kawakami, R. T. Tan, and K. Ikeuchi. Consistent surface color for texturing large objects in outdoor scene. In *Proc. Int. Conf. on Computer Vision (ICCV'05)*, pages 1200–1207, October 2005.
- [6] V. Kolmogorov, A. Criminisi, A. Blake, G. Cross, and C. Rother. Bi-layer segmentation of binocular stereo video. In *Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, Vol.2:407 – 414, Jun 2005.
- [7] V. Lepetit and M. O. Berger. A semi-automatic method for resolving occlusion in augmented reality. In *Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR00)*, pages 174–177, September 2000.
- [8] J. A. Marchant and C. M. Onyango. Shadow-invariant classification for scenes illuminated by daylight. *Journal of Optics Society of America A.*, Vol. 17(No. 11):pp. 1952–1961, 2000.
- [9] N. Martel-Brisson and A. Zaccarin. Moving cast shadow detection from a gaussian mixture shadow model. In *Proc. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)* pages 643–648, June 2005.
- [10] J. Sun, W. Zhang, X. Tang, and H.-Y. Shum. Background cut. *ECCV*, Vol.2:628 – 641, 2006.
- [11] 塩田一貴. 確率モデルを用いた前景抽出とその三次元形状復元への応用. 東京大学大学院学際情報学府修士学位論文, March 2007.
- [12] 神原誠之, 大隈隆史, 竹村治雄, and 横矢直和. ビデオスルー型拡張現実感のための実時間ステレオ画像合成. *電子情報通信学会論文誌 D-II*, J82-D-II(10):1775–1783, October 1999.
- [13] 林建一, 加藤博一, and 西田正吾. 境界線ベースステレオマッチングを用いた実物体と仮想物体の前後判定. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, 10(3):371–380, 2005.