

動的隠背景可視化のための ライトフィールドレンダリングに基づく DR 表示

前澤 桃子^{1,a)} 森 尚平^{2,b)} 齋藤 英雄^{2,c)}

概要: 本稿では、非整列多視点カメラを用いて、隠された作業領域を隠消現実感 (Diminished Reality; DR) によって可視化する手法について述べる。作業者とは別の視点からの映像を提示する方法も考えられるが、作業者の一人称視点映像を用いることで、脳内で視点変換を行う必要がないため、より直感的な情報提示が可能であると考えられる。提案手法は、多視点カメラを用いたライトフィールドの概念に基づいており、特定の3次元位置付近を通過する光線を用いずに作業者視点の画像を再構成する。非整列のカメラで撮影された動画映像を用い、提案手法によって隠背景を透視できることを確認する。また、処理速度を計測し、提案手法が実時間性を保っていることを示す。

キーワード: 隠消現実感, ライトフィールド, イメージペーストレンダリング

1. はじめに

作業中に用具、機材、自身の手や把持するツールによって視界が遮られることで、作業対象へのアプローチが難しい場合がある。例えば、電子工具に作業対象が遮られる、プラグを把持した自身の手で差込口が隠れる、といった状況である。こうした問題は、別視点映像の提示等によって解決できる可能性があるが、古典的な鏡を用いる場合と同様に、脳内での視点変換が必要となる。これを助けるために、別視点映像を変換する方法もある。

平面射影変換によって別視点映像をユーザ視点に変換する方法では、出力画像に歪みが発生し、空間認識が困難になるという限界があるため [1]、多視点カメラを用いる方法が有効である。多視点画像を用いた合成開口法に基づく任意視点画像生成法 [2] では、整列させた数十台のカメラを用いて撮影することで、撮影後の合焦点画像生成や背景の可視化を可能にする。ただし、同期システムや画像の転送の装置が大掛かりになり、撮影システム自体の構築・移動・設置が難しい、といった実用上の欠点が存在する。

そこで、本稿では、数台のカメラのみで構成できる、隠された作業領域を隠消現実感によって実時間で可視化する

手法を提案する。提案手法では、多視点カメラは概ね作業対象の方を向いていけばよく、そのカメラが必要な背景情報を捉えているかどうかはシステム実行時に自動計算されるため、ユーザには事前のカメラの設置と校正以外の負荷を与えない。

2. 関連研究

現実空間から物体を視覚的に隠蔽・消去・透過する技術は隠消現実感 (Diminished Reality; DR) として知られ、現実世界に仮想物体を重畳することで視覚の拡張・融合を行う拡張/複合現実感 (Augmented/Mixed Reality; AR/MR) とは真逆の概念である。これまでに、DR 技術を用いた死角の可視化 [3] や実在する家具を消し去って仮想の家具を重畳するといったシミュレーション [4] 等への応用が提案され、こうした DR による可視化が特定の作業効率化にも効果的であることを示す文献も発表されている [5]。

DR を実現する方法には、別視点から撮影された背景画像を除去対象物体に重畳表示する手法 [6,7]、過去に撮影された画像を利用する手法 [8,9]、除去対象領域外の画素から除去対象領域内の画素を推定する手法 [10,11] が存在する。一例として、複数平面を対象とした画像修復 [12] では、周辺画素から推定して隠背景を埋めてあり、実際の観測に基づいていないため、作業領域の提示には適していない。背景の実時間観測を行う既存の DR 手法として、多視点画像から背景を再構成する手法 [6] や RGB-D カメラを用いて再構成する手法 [7] が効果的であることが知られている。

¹ 慶應義塾大学大学院 理工学研究科
Keio University, Japan

² 慶應義塾大学 理工学部
Keio University, Japan

a) momoko.maezawa@hvrl.ics.keio.ac.jp

b) mori@hvrl.ics.keio.ac.jp

c) saito@hvrl.ics.keio.ac.jp

しかし、任意の背景を事前知識なしで抜け（クラック）なく実時間再構成するには課題が残っており、より効果的な手法が求められている。

Synthetic Aperture Photography (SAP) は規則的に並べたカメラ群を用いて、合成開口法により浅い被写界深度を設定する [13]、もしくは、除去対象物体からの光線をマスキングすることで、物体を不可視にすることができる [14]。前者のアプローチでは多視点画像の重み付き平均を利用するため数十台から百台近いカメラを必要とし、後者のアプローチでは多視点画像全てにおいて除去対象物体をマスキングする必要がある。つまり、実時間処理に関して課題があると言える。

提案手法では、SAP と同様にライトフィールドレンダリングに基づきつつ、カメラ配置やマスキングの制約を緩和するため、任意に設定した3次元点（以降、ペナルティ点）を通過する光線を避けて画像を再構成する。

3. 提案手法

3.1 カメラレンディングフィールド

提案手法では、任意視点画像生成法の一つである、BuehlerらのUnstructured Lumigraph Rendering (ULR) [15] を基に、除去対象物体の3次元位置及びユーザが定義する影響度 σ を加味するよう拡張することで、任意視点における除去対象物体の映らない画像を多視点画像から生成する。 M 台のデータカメラ $D_m (m = 1, 2, \dots, M)$ が作業領域を取り囲んでいる状況を想定する。これらのカメラで取得できるライトフィールドの内、ペナルティ点周辺の光線を用いずにユーザ視点 C における画像を再構成したい。

ULR は、ライトフィールドを構成するデータの他に、各データカメラ D_m の画像を投影する基準面の集合、Geometric Proxy を用いる任意視点画像生成法である。一般に、Geometric Proxy は対象シーンや焦点面に合わせて配置する三角形ポリゴンの集合である。本稿では、これを再構成基準面と呼称する。ULRの任意視点画像生成過程において、各データカメラをどの程度の重みで再構成基準面に投影するかを計算した結果をカメラレンディングフィールドと呼ぶ。再構成基準面を構成する i 番目の頂点位置 $\mathbf{p}_i^G (i = 1, 2, \dots, N)$ における m 番目のデータカメラ D_m の合成割合 $w_{i,m}$ は以下の式より計算できる。

$$w_{ang} = \exp(-(1 - \mathbf{d}_i^C \cdot \mathbf{d}_i^{D_m})^2) \quad (1)$$

$$w_{fov} = \pi(\mathbf{P}^{D_m} \mathbf{T}^{D_m} \tilde{\mathbf{p}}_i^G) \quad (2)$$

$$w_{i,m} = w_{fov} w_{ang} \quad (3)$$

ただし、 \mathbf{d}_i^C 、 $\mathbf{d}_i^{D_m}$ はそれぞれ C の位置、 D_m の位置から \mathbf{p}_i^G へと伸びる単位ベクトル、 \mathbf{T}^{D_m} は世界座標系からデータカメラ D_m のカメラ座標系への変換行列、 \mathbf{P}^{D_m} はデータカメラ D_m の内部パラメータ行列である。また、 $\pi(\tilde{\mathbf{u}})$ は画像平面中に2次元点 \mathbf{u} が存在する場合に1、それ以外に

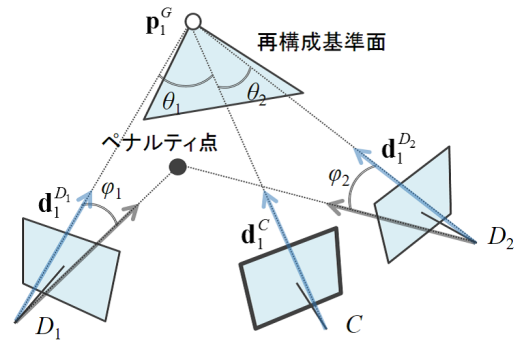


図 1: ペナルティ点の働き (1)
Fig. 1 Effects of the penalty point (1)

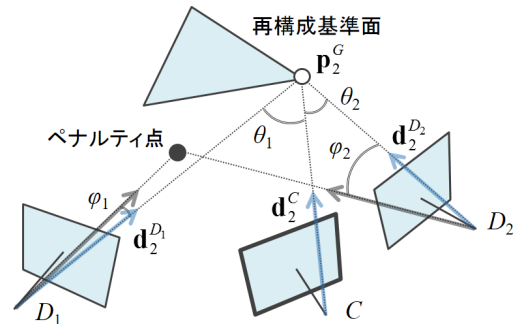


図 2: ペナルティ点の働き (2)
Fig. 2 Effects of the penalty point (2)

0 を返す関数である。なお、提案手法が想定する状況では効果が期待されない、解像度に関する重み [15] は無視するものとした。

これに加えて、提案手法では、除去対象物体の3次元点 $\mathbf{p}_k^O (k = 1, 2, \dots, K)$ を通過する光線にペナルティを与えることで、その光線が任意視点画像生成に利用されないようにする。つまり、先述の式 (3) に以下の式 (4), (5) を加味した式 (6) を最終的な重み $w'_{i,m}$ とする。

$$\theta_i^{D_m, O_k} = \exp(-(1 - \mathbf{d}_i^{D_m} \cdot \mathbf{d}_k^{D_m})^2 / \sigma) \quad (4)$$

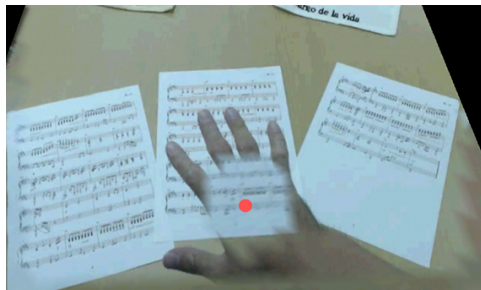
$$p_{obj} = \prod_{k=1}^K (1 - \theta_i^{D_m, O_k}) \quad (5)$$

$$w'_{i,m} = p_{obj} w_{i,m} \quad (6)$$

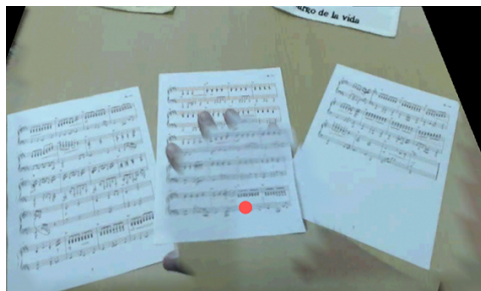
ただし、 $\mathbf{d}_k^{D_m}$ はデータカメラ D_m から \mathbf{p}_k^O へと伸びる単位ベクトル、 σ はユーザが任意に設定可能なパラメータであり、ペナルティ点の影響度に相当する。

ペナルティ点の効果について図 1, 2 の模式図を用いて説明すると、 θ 及び φ の大きさが、それぞれデータカメラに対する重みを増加あるいは減少させる働きを持つ。図 1 では、 $\theta_1, \theta_2, \varphi_1, \varphi_2$ とともに大きな差がないため、どちらのデータカメラも利用される可能性がある。一方、図 2 では、 φ_1 が他と比べて小さく、つまり、ペナルティ点に近いとみなして重みが減少する。

ユーザが任意に設定可能なパラメータ σ が 1.0×10^{-5} の



(a) $\sigma = 1.0 \times 10^{-5}$



(b) $\sigma = 1.0 \times 10^{-4}$

図 3: σ の値による DR 処理結果の変化
Fig. 3 DR processing results by σ

場合と 1.0×10^{-4} の場合の DR 処理結果を図 3 に示す。図 3 中の赤色の点はペナルティ点のユーザ視点への投影点である。 σ の値を大きくすることで可視化する背景領域を広くできることがわかる。

3.2 背景再構成

ユーザ視点 C におけるカメラレンディングフィールドの計算結果に基づいて各データカメラ D_m の画像を α 合成することで、除去対象物体の写らない任意視点画像を生成する。なお、 \mathbf{p}_i^G は三角形ポリゴンとして互いに連結され、作業領域の幾何形状に合わせて再構成基準面を成していることに注意されたい。

再構成基準面の各三角形ポリゴンの描画は独立に扱えるため、並列処理により高速に処理できる。提案手法ではジオメトリシェーダを活用してドローコール 1 回のみで描画することで描画速度の向上を図る。

図 4 に提案手法におけるレンダリング処理の流れを示す。まず、先述のカメラレンディングフィールドの計算に基づき、各頂点 \mathbf{p}_i^G に対するデータカメラ D_m の合成割合 $w'_{i,m}$ を計算する。これを降順にソートし、上位 H 視点の画像をレンダリングに利用する。各頂点で独立の上位 H 視点を利用するために、対象とする頂点以外の重みを 0 に設定して描画する方法が知られている [16]。そこで、3 頂点を有する三角形の描画には、通常 3 回のドローコールが必要になるが、提案手法ではこれをジオメトリシェーダを用いて三角形を複製することで 1 回のドローコールで実現する (図 4)。最後に、黒色に設定したフレームバッファに

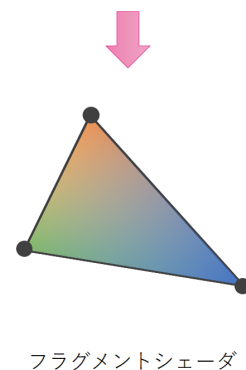
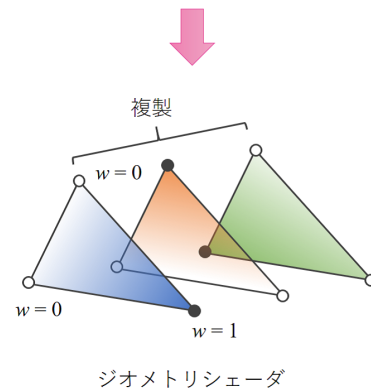
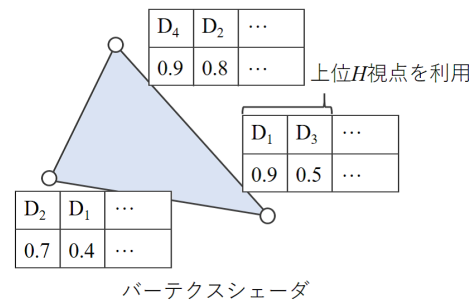


図 4: レンダリング処理の流れ

Fig. 4 Flow of the proposed rendering process

この 3 つの三角形の画素値を加算することで、レンダリング処理を終える。

3.3 再構成基準面推定

SAP [13] では、可視化したい空間にライトフィールドで再現した仮想焦点面を合わせることで除去対象物体の透視を可能にするため、焦点の合わない点に関しては背景の別々の点からの光線の合算となり、ボケが生じてしまう (図 5 (a))。そこで、ユーザ視点における隠背景の幾何形状を推定し、その表面に合わせて再構成基準面 (焦点面) を設定する。このために、提案手法では実時間性を考慮して、RGB-D カメラを用いて背景の幾何形状を計測する (図 6)。RGB-D カメラはユーザ視点とは別の視点位置に置くことで、作業領域を観測することを想定すると、ユーザ視点への変換と RGB-D カメラの性能の限界から生じるクラックが生じる [7]。しかし、提案手法では、再構成する各点の間は画像ベースのレンダリングによって埋め合わせるため、

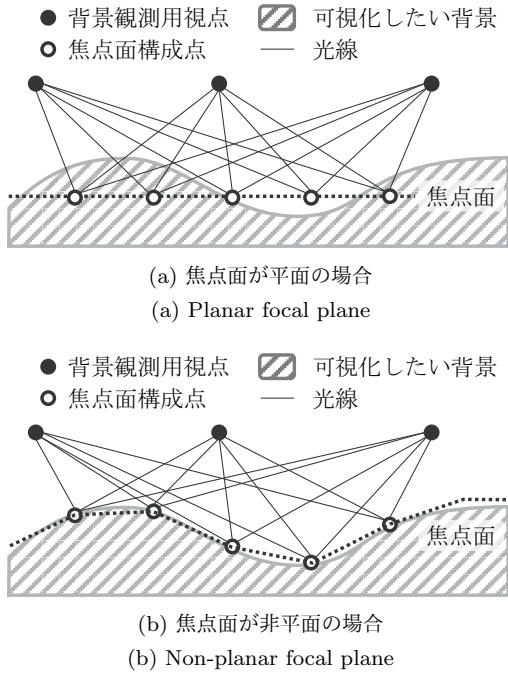


図 5: 焦点面の設定位置とボケの発生
Fig. 5 Focal plane and bokeh

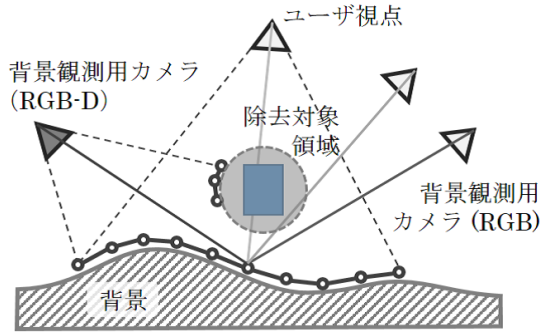


図 6: 非平面隠背景における DR
Fig. 6 Non-planar DR

こうしたクラックが生じにくい。以降、奥行画像を用いた再構成基準面の構築方法について述べる。なお、各カメラの内部パラメータ及び位置姿勢は 3.4 節で述べる処理にて推定済みであるとする。

RGB-D カメラから得られる奥行画像を 3 次元空間に逆投影することで点群を生成し、これをユーザ視点に投影することでユーザ視点における奥行画像を生成する。まず、得られた奥行画像における奥行値 Z を持つ注目画素 $\mathbf{x} = (u, v)^T$ に対応する 3 次元位置 $\mathbf{X} = (X, Y, Z)^T$ を計算する。

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} Z(u - c_x)/f_x \\ Z(v - c_y)/f_y \\ Z \end{pmatrix} \quad (7)$$

ただし、 f_x, f_y, c_x, c_y はそれぞれ焦点距離と投影中心に関する内部パラメータである。

次いで、注目画素 \mathbf{x} に関して、対応する 3 次元位置 \mathbf{X} 、その隣接する右と下の画素、 $\mathbf{x}_r = (u+1, v)^T$ と $\mathbf{x}_b = (u, v+1)^T$ に対応するそれぞれの 3 次元位置 $\mathbf{X}_r, \mathbf{X}_b$ を用いて、注目画素から伸びる右と下向きベクトルの外積を取ることによって法線を計算する。

RGB-D カメラ座標系からユーザ視点カメラ座標系への変換行列が与えられたとき、この法線と 3 次元点を入力として、法線方向に向く面を Surface Splatting 法 [17] によりユーザ視点に合わせて描画する (図 7)。この際、3 次元点群を作業領域とそれ以外に属するものに分ける。つまり、本節で述べる再構成基準面推定処理に使用する奥行画像と 3.5 節にて述べる除去対象領域推定処理に使用する奥行画像を生成する。例えば後に述べる実装では、作業台の上の面から一定距離に閾値を設けて、その閾値を下回る点を作業領域内、上回る点を作業領域外に分けた。

こうして得られるユーザ視点での奥行画像には RGB-D カメラの視点位置からは観測できない領域が存在し、これがクラックとなって表れる場合があるが、この領域は過去に観測された奥行画像を用いて埋める。システムの実行を開始してから数十フレームには背景のみが写っているとして、その重み付き平均画像を、初期の背景画像とする。

$$I^D(x, y) = \frac{\alpha I_{curr}^D(x, y) + I_{prev}^D(x, y)}{\alpha + 1} \quad (8)$$

ただし、 α はユーザが与える任意の重み、 I_{curr}^D は取得した現フレームにおける奥行画像、 I_{prev}^D は 1 フレーム前に得られた奥行画像の重み付き平均の結果である。よって、初期フレームは $I^D = I_{curr}^D$ とし、次フレームでは、 $I_{prev}^D = I^D$ として、同様の処理を行う。

その後のフレームでは、以下に示す I_{sub}^D によって、画素ごとに背景と前景とを分離する。

$$I_{sub}^D = |I_{curr}^D - I^D| - tolerance \quad (9)$$

$$I^M(x, y) = \begin{cases} 1 & (I_{sub}^D(x, y) > 0) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (10)$$

ただし、 $tolerance$ は、ユーザが設けるフレーム間に許容する変化量、 I^M は前背景をそれぞれ 0, 1 で表すマスク画像である。

なお、背景領域と判別された奥行画像の画素 $I_{curr}^D(x, y)$ は、式 (8) によって逐次更新され、それ以外の画素は I^D から得る。

こうして、ユーザ視点における焦点面に関する奥行画像を取得した後、式 (1) と同様の方法でユーザ視点における焦点面上設定用の 3 次元点を任意の数だけ取得する。この頂点を三角形分割することで焦点面上に Geometric Proxy [15] (再構成基準面) を構築し、ユーザ視点における隠背景を再構成する。

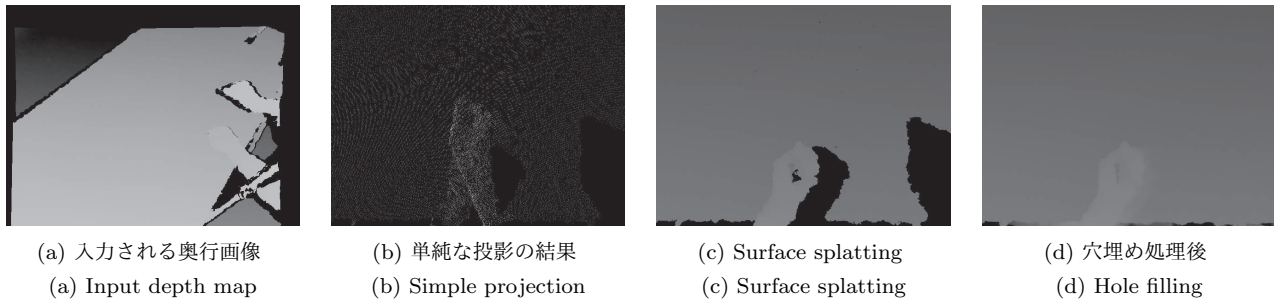


図 7: 再構成基準面推定処理 ((c), (d) は手 (前景) と背景の分離後)

Fig. 7 Focal plane estimation (Fore- and background is separated in (c), (d))

3.4 カメラ位置姿勢推定

ライトフィールドを構築するために, RGB-D カメラ 1 台と RGB カメラ複数台の相対位置姿勢をバンドル調整を用いて推定する. ユーザ視点の各画素の画素値は, ユーザ視点の投影中心と各画素を結ぶベクトルが 3.3 節にて述べた再構成基準面と交わる点を計算した後, その点を他の RGB カメラに投影した位置に相当する画素の画素値の重み付き和で計算する. したがって, 再構成基準面を基準にして各カメラの画素値を参照するため, その基準に合わせた位置合わせが必要となる.

提案手法では, RGB-D 画像から生成した 3 次元点群を用いて焦点面を構築するため, この 3 次元点群を利用して他の RGB カメラの相対位置姿勢を求める. まず, 手動ないし特徴点マッチングによって RGB 画像間で対応点を取得する. RGB-D 画像内で検出された特徴点に関しては, その画素に対応する 3 次元位置 (式 (7)) が得られるため, その 3 次元位置と他の RGB 画像での対応点とを用いて Perspective-n-Point 問題を解くことで各 RGB カメラの位置姿勢を求める. 最後に, カメラ間での最適化を行うために, 求めた位置姿勢と 3 次元点群を初期値としてバンドル調整を行う.

3.5 除去対象領域の決定

3.3 節にて述べた作業領域外の奥行画像から除去対象領域を決定する. 前景画像 $I^M(x, y)$ を, そのまま除去対象領域のマスク画像として用いる場合, 奥行画像中の欠けによって, 除去対象物体を完全には切り出せない場合が多い. そこで, 前景画像 $I^M(x, y)$ の内, 画素値 1 の 2 次元点の集合に対して楕円フィッティングを行い, 検出された楕円を 0, それ以外を 1 とし, 除去対象領域を決定する.

再構成基準面の 3 次元点をユーザ視点に投影し, 除去対象領域内であれば, カメラブレンディングフィールドの計算時に 0 の重みを与えることで, 隠背景再構成に利用されないようにする. また, 検出された楕円の中心位置に相当する 3 次元点を奥行画像から取得し, これをペナルティ点 (除去対象物体の代表点) とする.

4. 評価実験

提案手法の描画性能と実時間処理性能を評価するため, 2 つの実験を行った.

実験 1 では, Buehler らの手法 [15] を拡張 (3.5 節) することによって不要な光線を排除できることを確認する, 描画性能評価を行う. 具体的には, SAP [13] と提案手法による背景可視化の結果から, 提案手法の方がより効果的に前景にある物体を除去できることを目視により確認する. なお, SAP の実行条件と合わせるため, ここでは整列したカメラアレイを利用する. また, 焦点面を合わせるため, 平面の背景を想定する.

実験 2 では, 少数の非整列カメラを用いて, 動的な非平面の背景を実時間で可視化できることを確認する, 実時間処理性能に関する評価を行う.

実験 1,2 における実行環境は表 1 の通りである.

表 1: 実行環境
 Table 1 System specification

OS	Windows 10 Home 64bit
CPU	Intel Core i7-6567U 3.30GHz
Memory	16GB
GPU	Intel Iris Graphics 550

4.1 実験 1

実験 1 では, 10 台の GoPro HERO 4 Silver (480 × 640 画素) を直線状に配置したデータカメラアレイとして, それを作業台の上部に図 8 に示すように配置したシステムを構築した. ユーザ視点 C は左から 5 台目のカメラである. 各データカメラの内部・外部パラメータは, バンドル調整を行う Agisoft 社製 PhotoScan を用いて推定した. 同様に, 得られた歪み補正值を用いて, データカメラの画像 10 枚をあらかじめ歪み補正した. なお, この際に得られる特徴点の 3 次元点群から, ユーザ視点 C から背景までと作業者の手までの距離が得られる.

カメラブレンディングフィールドの計算は CPU を用い

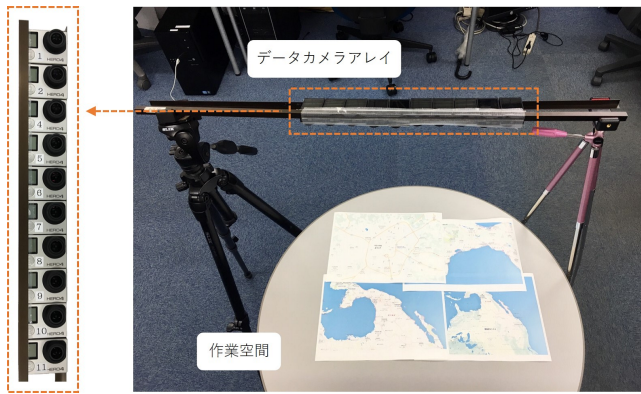


図 8: 実験 1 のセットアップ例
Fig. 8 System setup on experiment 1

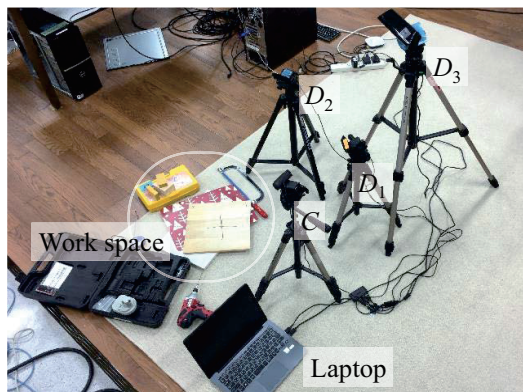


図 9: 実験 2 のセットアップ例
Fig. 9 System setup on experiment 2

て行い、描画処理は GPU を用いて行う。ユーザ視点に正対するように配置する再構成基準面の 40×30 頂点の位置とカメラブレンドフィールドに基づく 4 台のデータカメラの重みを GPU メモリへと送る。これを描画用 API の OpenGL (GLSL3.3) を用いて描画する。

雑誌を置いた机を俯瞰するようにデータカメラアレイを設置し、データカメラアレイの一部を遮るように作業者の手を入れ、その手を除去した DR 画像を生成した。提案手法の比較対象として、3.1 節におけるカメラブレンドフィールドの計算の際に $p_{obj} = 1$ と置いて 4 近傍のデータカメラを用いる SAP [13] を実装した。

4.2 実験 2

実験 2 では、三脚に固定した 3 台の USB カメラ D_1 , D_2 (ユーザ視点), D_3 と 1 台の Microsoft 社製 Kinect (RGB-D カメラ) D_4 (それぞれ 640×480 画素) を用いた (図 9)。4 台全てのカメラからの画像を毎フレーム合成し、隠背景の再構成を行った。各カメラの内部・外部パラメータは 3.4 節で述べたバンドル調整によって取得した。図 9 に示す環境下で、ユーザは電動ドリルを把持し、作業空間に置かれた木版に穴を開ける、というシナリオを用意した。穴を開ける箇所にはバツ印を描いた。木板のこの印に対して垂直

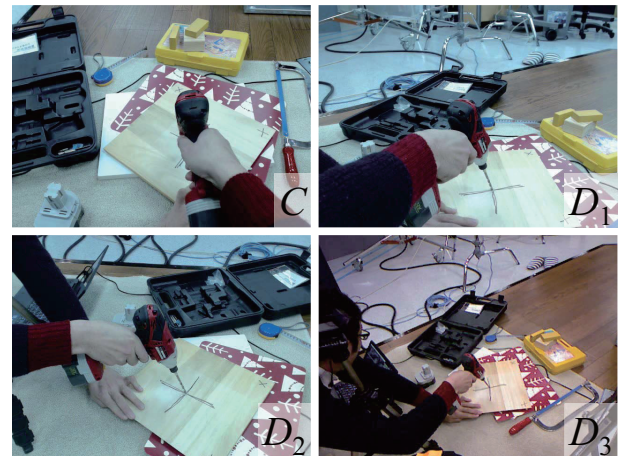


図 10: 実験 2 のセットアップで取得できる画像の例
Fig. 10 Example images fetched with the experimental system in experiment 2



図 11: 実験 1 の入力画像群
Fig. 11 Input images in experiment 1

になるように電動ドリルを当てると、ユーザ視点 C から印が隠れてしまうため、これを可視化する。

実験 1 と同様に、カメラブレンドフィールドの計算は CPU を用いて行い、描画処理は GPU を用いて行う。図 10 に本システム構成で取得できるライトフィールド用画像群の例を示す。各カメラ 470 フレームの映像を撮影した。なお、3.3 節における再構成基準面推定処理において、 40×30 頂点を有する再構成基準面を構築する。

5. 結果と考察

5.1 実験 1

図 11 に入力画像群を、図 12 に SAP [13] 及び提案手法による DR 処理結果を示す。図 11, 12 より、SAP による結果では手が消えていないのに対し、提案手法による結果では手が概ね除去された DR 画像が生成できていることがわかる。これは除去対象物体である手の位置をペナルティ点として指定することにより、そこを通らない光線が適切に選択されているためである。また、目立ったアーティファクトは見受けられないことから、十分な描画性能が確保できていると言える。



図 12: DR 処理結果 (左: SAP [13], 右: 提案手法)

Fig. 12 DR results (From left: SAP [13], the proposed method)

5.2 実験 2

入力フレーム及び提案手法による透視結果を図 13 に示す。再構成した隠背景の画像をユーザ視点 C の画像に α 合成して、手を半透明表示した。背景の板や左手が動く動的な空間において、右手と把持した電動ドリルの領域に、作業対象の木板とそこに描かれたバツ印が半透明に表示されている。この結果から、4 台という既存手法と比較して少ない台数かつ非整列のカメラを用いる提案手法が、機能していることが確認できた。

奥行画像を用いることで、動的かつ非平面な隠背景を再構成できる提案手法であるが、一方で、奥行画像の精度に起因する限界が顕著に現れた。例えば、システム実行中に一度も奥行値が取得できなかった画素が存在する場合、その場所に想定する画素が復元できない。こうした画素は、単に RGB-D カメラの画角外であるものだけでなく、RGB-D カメラの死角や計測物体の材質にも起因しているため、画像全体に渡って DR 表示できない画素が存在した。

各処理における実行速度を表 2 にまとめた。最も処理時間がかかったのは 3.3 節にて述べた再構成基準面の推定に関する処理である。1 フレームあたりにかかる処理時間はおよそ 24.4ms (41.0fps) であったことから、一般的に必要なとされるフレームレートである 30.0fps を上回り、実時間処理を達成できたと言える。

以上より、提案手法によって、動的に変化する非平面で構成された作業領域の可視化を実時間でできたと言える。

表 2: 各処理における実行速度
Table 2 Processing speed

処理内容	実行速度 (ms/frame)
再構成基準面推定 (3.3 節)	17.59
除去対象領域の決定 (3.5 節)	4.47
レンダリング	2.31

6. むすび

本稿では、非整列多視点カメラを用いて、隠された作業

領域を DR によって実時間透視する手法を提案した。提案手法では、SAP と同様にライトフィールドレンダリングに基づきつつ、カメラ配置やマスクングの制約を緩和するため、任意に設定した 3 次元点を通する光線にペナルティを与えることで、その光線が任意視点画像生成に利用されないようにした。

評価実験を通し、提案手法による結果では除去対象物体の位置をペナルティ点として指定することにより、そこを通らない光線が適切に選択されているために、除去対象物体が概ね除去された DR 画像が生成できることがわかった。また、十分な描画性能が確保できていることを確認した。RGB-D カメラを導入し、隠背景の幾何形状に合わせた焦点面によって作業空間を再構成することで、隠背景が非平面の場合にも対応した。さらに、実時間処理を達成できることを確認した。

今後は、ブレンディング処理やカメラ配置の再考、そしてユーザスタディの実施に取り組む。

謝辞 研究の一部は学振・特別研究員奨励費（課題番号 16J05114）及び科学研究費基盤研究 (S) 24220004 の補助により行われた。

参考文献

- [1] M. Goto, Y. Uematsu, H. Saito, S. Senda, and A. Ike-tani: Task support system by displaying instructional video onto AR workspace; Proc. ISMAR, pp. 83 - 90, 2010.
- [2] B. Wilburn, N. Joshi, V. Vaish, E.-V. Talvala, E. Antunez, A. Barth, A. Adams, M. Horowitz, and M. Levoy: High performance imaging using large camera arrays; ACM Trans. on Graphics, Vol. 24, No. 3, 2005.
- [3] P. Barnum, T. Sheikh, A. Datta, and T. Kanade: Dynamic seethroughs: Synthesizing hidden views of moving objects; Proc. ISMAR, pp. 111 - 114, 2009.
- [4] S. Siltanen, H. Sarasp, and J. Karvonen: A complete interior design solution with diminished reality; Proc. ISMAR, pp. 371 - 372, 2014.
- [5] V. Buchmann, T. Nilsen, and M. Billinghurst: Interaction with partially transparent hands and objects; Proc. Australasian User Interface Conf., Vol. 40, pp. 17 - 20, 2005.
- [6] S. Zokai, J. Esteve, Y. Genc, and N. Navab: Multiview paraperspective projection model for diminished reality; Proc. ISMAR, pp. 217 - 228, 2003.
- [7] S. Meerits and H. Saito: Real-time diminished reality for dynamic scenes; Proc. Int. Workshop on Diminished Reality, pp. 53 - 59, 2015.
- [8] Z. Li, Y. Wang, J. Guo, L. F. Cheong, and S. Z. Zhou: Diminished reality using appearance and 3d geometry of internet photo collections; Proc. ISMAR, pp. 11 - 19, 2013.
- [9] S. Mori, F. Shibata, A. Kimura, and H. Tamura: Efficient use of textured 3d model for pre-observation-based diminished reality; Proc. Int. Workshop on Diminished Reality, pp. 28 - 39, 2015.
- [10] N. Kawai, M. Yamasaki, T. Sato, and N. Yokoya: Di-



図 13: 入力フレーム (上段) と DR 表示 (下段)

Fig. 13 Input frames (top row) and DR results (bottom row)

minished reality for AR marker hiding based on image inpainting with reflection of luminance changes; ITE Trans. on MTA, Vol. 1, No. 4, pp. 330 - 353, 2013.

- [11] J. Herling and W. Broll: PixMix: A real-time approach to high-quality diminished reality; Proc. ISMAR, pp. 141 - 150, 2012.
- [12] N. Kawai, T. Sato, and N. Yokoya: Diminished reality based on image inpainting considering background geometry; IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 22, No. 3, pp. 1236 - 1247, 2016.
- [13] V. Vaish, B. Wilburn, N. Joshi, and M. Levoy: Using plane + parallax for calibrating dense camera arrays; Proc. CVPR, pp. 2 - 9, 2004.
- [14] M. Levoy: Light fields and computational imaging; *Computer*, 39(8): 46 - 55, 2006.
- [15] C. Buehler, M. Bosse, L. McMillan, S. J. Gortler, and M. F. Cohen: Unstructured lumigraph rendering; Proc. SIGGRAPH, pp. 425 - 428, 2001.
- [16] A. Davis, M. Levoy, and F. Durand: Unstructured light fields; Proc. Eurographics, pp. 305 - 314, 2012.
- [17] M. Zwicker, H. Pfister, J. van Baar, and M. Gross: Surface Splatting; Proc. SIGGRAPH, pp. 371 - 378, 2001.