応用論文

隠消現実感技術を用いた 映画制作支援システムの開発と運用

李 金霞[*1, 3] 斉藤 純哉[*1, 4] 森 尚平[*1, 5]
池田 聖[*1] 柴田 史久[*1] 木村 朝子[*1] 田村 秀行[*2]

Re-Design and Implementation of MR-based Filmmaking System by Adding Diminished Reality Functions

Jinxia Li[*1, 3], Junya Saito[*1, 4], Shohei Mori[*1, 5],
Sei Ikeda[*1], Fumihisa Shibata[*1], Asako Kimura[*1], and Hideyuki Tamura[*2]

Abstract --- In this paper, we propose DR-PreVis system as an expansion of the previous work, MR-PreViz. MR-PreViz is a mixed reality-based PreVis system that can superimpose CG animated characters to real backgrounds such as open sets or outdoor locations. The proposed system not only uses the real backgrounds but also diminishes undesirable objects in the real backgrounds by using diminished reality (DR) technologies. We re-designed the concept and the workflow of MR to accommodate DR technologies. We rationally selected and implemented several DR methods and camera tracking methods to apply our DR-PreVis system to various scenarios in the film industry. We also implemented color correction schemes that could handle dynamic illumination changes, especially in outdoor scenarios. Finally, we tested the proposed system in an indoor set and also in the outdoor open sets to verify the usefulness of our system.

Keywords: Diminished Reality, Mixed Reality, Pre-visualization, Filmmaking

1 はじめに

我々は映画制作過程の本番撮影前に行う事前可視化（Pre-Visualization; PreVis）に，現実世界と仮想世界を融合する技術である複合現実感（Mixed Reality; MR）技術を応用した MR-PreViz システムを提案し，研究開発を進めてきた[1][2]．従来からのフル CG 映像によるプレビズとは異なり，MR-PreViz では，本番撮影と同じ屋内外の光景を，実際のキャメラで捉え，背景に俳優や架空のキャラクタなどの CG を実時間合成できる．こうして得られたプレビズ映像を制作スタッフ間で共有することで，映画制作の効率化が図れることを実証した．

MR-PreViz では現実世界のリアリティをそのまま活用できるが，そこには手を加えず，CG 映像を描き加えるだけであった．本研究は，既開発の MR-PreViz システムに，現実世界に存在する物体を視覚的に隠蔽・消去する隠消現実感（Diminished Reality; DR）[3] の機能を追加するという技術的拡張を目的としている．現実の映画制作過程では，不要な物体が写ってしまった場合には，撮影済みの映像をプロダクション段階で手作業により除去するという面倒な作業が強いられている．DR 技術は，MR 技術と同様，眼前の光景に対して実時間処理できるため，撮影現場で不要物体を取り除いたプレビズ映像の生成を試行錯誤できる．即ち，DR 技術の導入によって MR-PreViz 映像内の望ましくない物体をその場で除去でき，プレビズとしての価値が増す．

この拡張は，MR-PreViz システム実利用時に，映画撮影スタッフから強く要望されていた機能である．それを直ちに実行しなかったのは，DR は MR よりも実用上遥かに困難な問題を内包しており，まだ DR 基幹技術が未熟であったためである．その後，筆者らの研究グループを始め，DR 研究が進行し，要素技術も整ってきたので，本研究開発に着手した次第である．DR 技術はまだまだ万能ではないが，映画制作支援という具体的な応用での制約条件を課すことで，DR 研究側にとっても貴重な知見が得られるものと考えられる．

以上の観点から，我々は DR 技術を MR-PreViz に導入した DR-PreVis システムを提案する．既開発の MR-PreViz を単純に拡張するのではなく，

*1 立命館大学大学院 情報理工学研究科
*2 立命館大学 総合科学技術研究機構
*3 現在，KDDI 株式会社, *4 現在，オークラ輸送機株式会社
*5 現在，慶應義塾大学 理工学部
*1 Graduate School of Science & Engineering, Ritsumeikan University
*2 Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University
*3 KDDI CORPORATION, *4 Okura Yusoki Co., Ltd.
*5 Faculty of Science and Engineering, Keio University

DR-PreVis 特有の運用を想定して，ワークフローを再設計し，最新の PC 環境に合わせてシステムを再構築した．また同時に，映画制作現場で実利用できる DR 手法を検討・選定し，DR 手法を利用する際の位置合わせ問題や光学的不整合の問題などの解決法を検討し，現時点で最善の方法を実装した．

以下では，まず既存の MR-PreViz システムの概要を説明し，DR 機能を追加する意義を述べる．3 章では，DR-PreVis を定義し，そのワークフローの設計について説明する．4 章では DR-PreVis における DR 手法を検討し，システムで用いる位置合わせ手法や光学的不整合の軽減処理について説明する．5 章ではシステムの運用と考察について述べる．

2 MR-PreViz から DR-PreVis へ

2.1 MR-PreViz システムの意義

映画制作は大別してプリプロダクション，プロダクション，ポストプロダクションの 3 つの段階に分けられる．それぞれ，脚本執筆や絵コンテ作成といった事前準備，本番撮影，編集や視覚効果（VFX）を付与する後処理に対応する．プレビズ映像は，プリプロダクション段階で作られる動く絵コンテに相当し，従来フル CG で描画され，仮想空間に撮影対象を丸ごと取り込んでいる．事前にカメラアングルやカメラワークを試行錯誤できるので，本番撮影コストの削減にも役立ち，最近ではハリウッド映画の大作では日常的に利用されている．ただし，この CG にはあまりコストをかけないため，映像的にはリアリティに欠け，本番での撮影現場とのイメージの差が生じることもある．

MR-PreViz では，本番撮影での背景をそのまま借景し，事前準備した CG データ（含，アクションデータ）を実時間合成することで，本番撮影前に写実性の高いプレビズ映像を作成可能となる．また，撮影現場で実際にキャメラを操作する最中に CG が合成されるため，本番さながらのキャメラワークを試せる機能も併せ持っている[4][5].

MR-PreViz を行うことで，本番撮影時に，監督の想像しているシーンの完成イメージを大人数の映画撮影スタッフに共有することができ，本番撮影をより効率的に行うことが可能である．その効果は，映画撮影や CM 撮影の現場で実証された[6].

2.2 DR 機能を追加する意義

MR-PreViz システムの運用中に撮影スタッフより求められた DR 機能は，以下のような目的によるものであった．

(i) 時代考証や撮影地に基づく不要物排除

時代劇を撮影中に画面内に写ってしまう現代風の人工物（電柱，郵便ポスト，自動販売機など），特定の会社名や電話番号が書かれた看板などを除去したいという要望が最も強い．地方でのロケをある特定の都会での撮影に見せたり，その逆を行なう場合も，その土地を特定できる事物を DR で消去し，逆に MR で付加したいという要望もあった．

(ii) 自然景観の意図的改変の確認

上記のような全く人工物が存在しない場合でも，選んだロケ地の景観が監督のイメージに合わない場合が多々ある．景観の一部を隠すか，最終的に CG で改変する場合でも，事前にロケ地で試行錯誤して，監督のイメージに合う景観を作れるかプレビズしたいという要望があった．

(iii) 美術セット制作の事前視認

必要とするシーンを得るべく，本番撮影当日に美術セットを組むか否かを判断するため，視覚的に試行錯誤できるセット・シミュレーション機能が望まれている．新規セット制作が決定された場合でも，オープンセット等では日替わりで建物が建て替えられるので，現在のセットを隠蔽・消去して，当日の光景を事前視認できることが要望された．

2.3 DR-PreVis による制作効率化と経費削減

上記の要望の DR 機能を付加した MR-PreViz システムを DR-PreVis システムと呼ぶことにした（**図 1**）．その導入で，次のような制作工程の効率化と経費削減を図ることが期待できる．

(1) 香盤表作成の効率化：プレビズ映像の存在により，本番撮影の手順表（業界では香盤表と呼ぶ）作成が容易になり，スタッフ間の意志疎通も改善される．それが，事前準備時間の短縮に繋がる．

(2) 撮影時間の短縮，必要人数の削減

撮影当日は，美術セット配置，照明調整，俳優の演技位置の設定になりの時間を要するが，プレビズ映像の導入により，これが大幅に短縮できる．高額ギャラの俳優の拘束時間も短縮できる．また，本番撮影でのスタッフは 20～50 人を要するところ，



図 1　DR-PreVis のコンセプト図
Fig.1 The concept of DR-PreVis System.

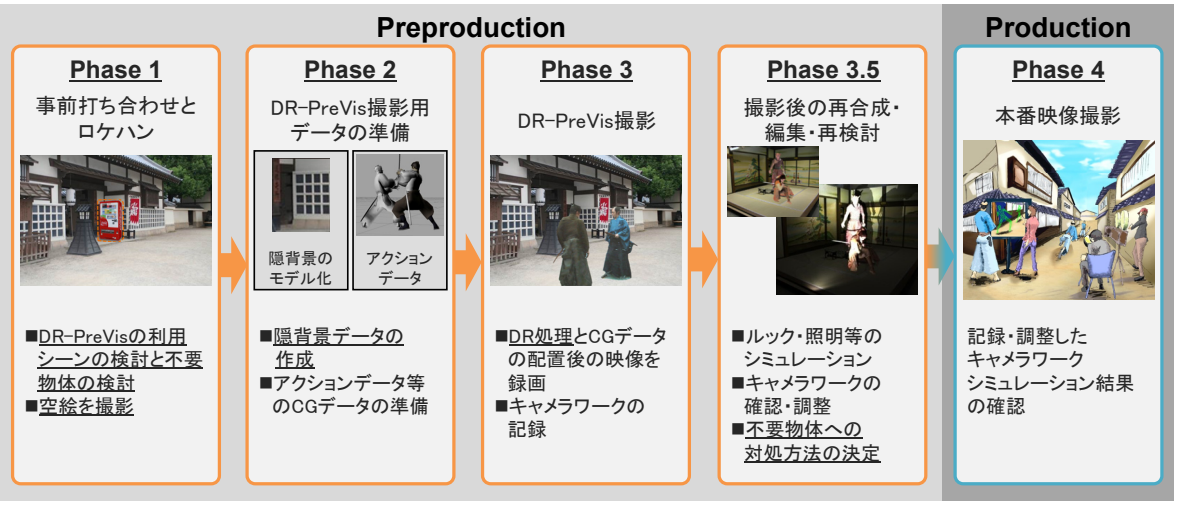


図 2　DR-PreVis のワークフロー（MR-PreViz からの主な変更点に下線）
Fig.2 Workflow of DR-PreVis (underlined the major changes from MR-PreViz).

MR-PreViz や DR-PreVis は数名で実行可能なので，この点でも製作費を削減できる．

(3) 美術セット建造の効率化と経費削減

上記は MR-PreViz 時にも実証できたことであるが，前項で述べたように，美術セットの事前シミュレーションは DR-PreViz の最も得意とするところである．建造費を削減できるだけでなく，従来ポストプロダクションの VFX 処理で不要物を消すのに要した経費も削減できる．

3 DR-PreVis システムの設計

3.1 設計方針

DR-PreVis システムの基本設計方針を述べる．

(a) 複数手法の切り替え機構: オンサイト DR 処理は，キャメラワークに追随した実時間処理が求められるため，映画撮影キャメラの標準である 24fps 以上での動作が必須となる．その一方，DR-PreVis 映像の品質は，製作費，監督の要求水準で大きく異なり，現場の状況や天候等によっても左右される．

そこで，DR-PreVis では，単一の DR 手法が機能しないことによる撮影の失敗や撮影時間の増大を避けるため，利用可能な DR 手法を複数用意する方針を採る．即ち，それらを切り替えることでフェイルセーフを設けるとともに，撮影現場での即時的な要望に可能な限り応えられるようにする．

具体的な切り替え基準・実現方法・組み換えパターンに関しては 4 章に譲るが，隠背景の観測・推定法，幾何学的整合法，光学的整合法の 3 つを基準にしてモジュール化された複数の手法を用意し，組み合わせられるようにする．

(b) 隠背景観測・推定法の切り替え：DR では，除去対象物体によって隠されている背景である「隠背景」を観測もしくは推定し，除去対象物体に重畳描画することで実現する．隠背景を事前観測して再構築する方法は Pre-Observation Based-DR (POB-DR)，除去対象領域の周辺画素から隠背景を推定する方法は Image-inpainting Based-DR (IB-DR) と呼ばれ，研究されている．隠背景観測の可否で POB-DR と IB-DR の利用可否が決まり，次節で述べる通り，隠背景観測に関しては MR-PreViz からの追加作業であるため，撮影のワークフローに新たに組み込む．

(c) 幾何学的製合法・光学的整合法の切り替え：DR 手法は隠背景観測・推定法の他にも，幾何学的製合法と光学的整合法に分けて考えることもできる[3]．

映画撮影中のキャメラワークは，手持ちカメラによる自由な動きもあり得るが，プレビズ目的では，パン・チルトを使う運動に限定して差し支えない場合が多い[6]．本論文で述べる第 1 次試作システムでは，かつての MR-PreViz と同様，パン・チルトの 2 自由度に制限し，まずは DR 機能を用いた本システムがプレビズ制作において有効に機能することを確認する．カメラの運動を 2 自由度に削減し，DR を用いる際の位置合わせ問題を簡単化し，プレビズとしての要求を満足しつつ，より完成シーンに近いプレビズ映像を実時間で作成できるシステムを目指す．

光学的整合性に関しては，照明の異なる過去の画像を用いる POB-DR の場合に顕著に表れる問題である．特に，屋外利用を想定する本システムにおいては対策が必要である．

3.2 DR 機能を追加するためのワークフロー

既存の MR-PreViz の開発経験から，DR-PreVis 用に変更・追加する箇所を技術検討し，MR-PreViz のワークフローを再設計した（**図 2**）．具体的な DR 手法の説明は 4.1 節にて述べることとし，以下では，

ワークフローにおける Phase 1 から Phase 3.5 までの主な変更点を述べる．

Phase 1 事前打ち合わせとロケハン：DR-PreVis を用いて可視化するシーンを決定するため，ロケーションハンティング（ロケハン）を行う．ここでは，POB-DR 用に，除去対象の存在しない光景（所謂，空絵）を複数の位置から撮影しておく．これにより，Phase 3 までの期間に設置されてしまう不要物体に対処する．図 1 の自動販売機や電柱の様に，この段階で除去対象物体が存在する場合，Phase 2 もしくは Phase 3 で対処する．

Phase 2 DR-PreVis 撮影用データの準備：Phase 1 で撮影した空絵を基に隠背景データを作成する．隠背景データの形式は複数考えられ，空絵，CAD データ，空絵を基にしたテクスチャ付き 3 次元モデル (Textured 3D Model; T-3DM) データ，Light Field Rendering [7]や Lumigraph Rendering [8]用のデータなど，後続の DR 処理に応じて様々である．

屋内セットや屋外オープンセットで行われている映画撮影では，事前に分かっているセットの情報を隠背景データ化して利用できる．セットの内装や仕組は撮影の要求に応じて変更できるので，装飾物の少ない状態のセットを基本隠背景データとして残すことも理にかなっている．

Phase 3 DR-PreVis 撮影：上記の準備を終え，DR-PreVis 映像を撮影する．ロケ地の光景が Phase 1 のロケハン時とは異なっている場合は，この段階で適した DR 処理を選択し，不要物体を隠蔽・消去した後に CG キャラクタを合成する．場合によっては，除去対象の背後に回り込み，追加で空絵を撮影し，隠背景データを作成する．

Phase 3.5 DR-PreVis 撮影後の再合成／編集：DR-PreVis 映像を見ながら，光学的外観やキャメラワークを確認した上で，必要に応じて変更・調整し，監督の完成イメージに近づける[9]．更に，現実世界に存在する望ましくない物体を，本番撮影時にどう対処するかの方針を決定する．例えば，「本番撮影時に小道具で不要物体を覆い隠す」「ポストプロダクション段階で VFX 加工する」といった判断である．

4 DR-PreVis システムの開発

4.1 DR-PreVis システムにおける DR 手法

DR 処理技術の研究は日進月歩で進行しているが，万能の手法は存在しない．眼前の光景に所望の CG 物体を重畳合成する MR 処理に比べて，実存する物体を視覚的に隠蔽・消去する DR 処理は難しく，わずかな処理の不具合で違和感が生じる．対象にシーンの複雑さ，キャメラやレンズの性能，撮影時の日照条件によっても，DR 処理結果は影響を受ける．

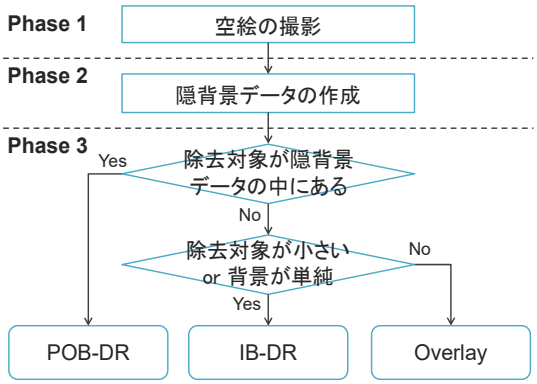


図 3　DR 手法選択のフロー図
Fig.3 Flow of DR method selection.

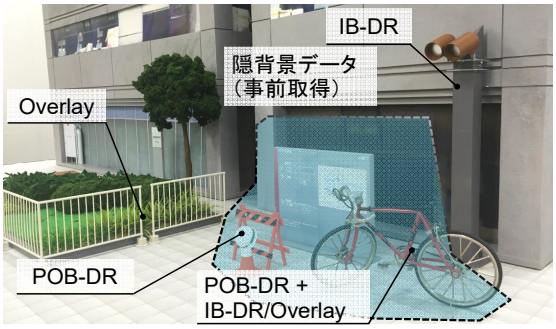


図 4　DR 手法選択の事例
Fig.4 Typical scene of DR method selection.

DR-PreVis にとって，最も大きな違いは，予め隠背景撮影が可能かどうかである．

このため，我々の DR-PreVis システムでは，以下の複数の DR 手法を実装し，その中から利用者（映画撮影スタッフ）に選択させる方法を採った．もともと映画撮影では，製作費や撮影日数の制約から，撮影機材，ロケ地の選択，セット構築が左右されるのは日常茶飯事であり，日々現場での妥協，速やかに最善手段での対処がなされている．それゆえ，DR 手法の限界を説明した上で，DR 手法の選択を撮影スタッフに委ねるのは，無理のない方法と言える．

図 3 は DR 手法選択のフローであり，**図 4** はこの基準に則って DR 手法を選択した例である．以下，その 3 手法について述べる．

- POB-DR：隠背景観測が可能な場合
- IB-DR：隠背景観測が不可能な場合
- Overlay：上記のいずれも利用できない場合

尚，POB-DR と IB-DR は隠背景データを用いて除去対象領域に隠背景を再構成することで DR 処理を行う．よって，除去対象を覆うマスク画像 I_{MK} を利用して除去対象領域を設定する．I_{MK} では，隠背景データが投影された画素値を 1，それ以外を 0 とし，式 (1) (2) に則って隠背景投影画像 I_{SV} を現画像 I_{CAM} に合成する．

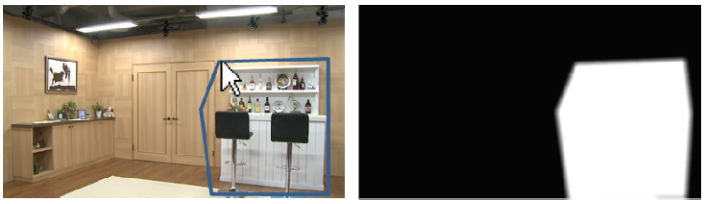


図 5　マウスで除去対象領域を指定
Fig.5 Set a target region by mouse dragging.

表 1　各位置合わせ手法の適用要件
Table 1 Elements of each camera estimation method.

	センサベース	モデル-フレーム	フレーム-フレーム
電源	要	不要	不要
特徴点	不要	要	不要
隠背景データ	不要	要	要

$$I_{MK}(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & \textit{if model is projected} \\ 0 & \textit{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

$$I_{DR}(\mathbf{x}) = I_{MK}(\mathbf{x}) I_{SV}(\mathbf{x}) + \left(1 - I_{MK}(\mathbf{x})\right) I_{CAM} \quad (2)$$

ただし，$\mathbf{x}$ は画像座標，I_{DR} は DR 処理結果を表す．

本システムでは，**図 5** に示す通り，マウスを使って現画像上でドラッグすることで除去対象領域を指定し，このマスク画像 I_{MK} を生成する．

◆POB-DR：POB-DR は隠背景の事前観測が可能で，その観測結果に基づいて隠背景データを事前に作成できる場合に使用する．隠背景の事前観測は 3.2 節で述べた通り，Phase 1 もしくは Phase 3 で行う．Phase 2 では，Phase 1 で撮影した複数の空絵から隠背景データの再構築を行う．例として，複数の空絵から Structure from Motion [10]の概念に基づいて T-3DM として隠背景データを作成する方法が利用できる．

キャメラワークは Phase 1 にてロケハン前に大まかに決まっているものの，隠背景のデータ化が困難な場合が考えられる．例えば，屋外ロケ地で広範囲に渡って隠背景データを作成する必要があり，高い精度の隠背景再構築が難しい場合などがある．こういった場合，Phase 2 において手作業で微修正しても構わない．作成した隠背景データの利用の可否は Phase 3 で決定すればよい．

本システムでは，実際に観測した背景画像を利用するこの手法が最も高精度に隠背景を再現できるといった理由から，他の 2 手法よりも優先度を高く設定している．

本システムでのキャメラワークはパン・チルトの 2 自由度に制限している．よって，隠背景は DR-PreVis 撮影直前に 1 枚の隠背景面として再構成される．一度再構成された隠背景面は，カメラ姿勢に合わせて回転するため，DR-PreVis 撮影中も DR 処理を継続できる．

◆IB-DR：屋外での映画撮影では，除去したいが移動不可能な物体が写り込み，かつその隠背景を観測できない場合も多々ある．また，隠背景の観測ができ，Phase 2 で隠背景データの作成を行うが，空絵の不足などが原因で，隠背景データが作れない場合がある．更には，隠背景データの作成に成功したとしても，シーンの一部分のみで，完全に除去物体を覆うことができない可能性がある．これらの場合，隠背景を除去対象領域の周辺画素から推定する IB-DR を用いて隠背景データを作成し，除去対象領域に重畳することで除去対象物体を隠蔽する手法を用いる．

本システムでは，精度・処理速度共に定評のあるパッチ画像の探索・合成方法である PatchMatch [11]を採用することにした．

POB-DR と同様, IB-DR によって作成した隠背景面はカメラの動きに追従して回転し，合成される．

◆Overlay：IB-DR により，隠背景が観測できない場合にも対処可能になったが，やはり除去対象領域が大きい時や除去対象領域外に類似したパターンを持たない画像に対しては，不連続なテクスチャが生じやすい問題がある．その時は，POB-DR と IB-DR のいずれの手法も利用できない．この場合，シーンに合うような CG や画像を Phase 2 でいくつか用意しておき，除去対象物体を覆い隠す方法が考えられる．処理方法は既存の MR 処理と同様だが，不要物体を隠す意味では DR 処理の範疇である．

先述の通り，より大きい実物体で不要物体を隠す方法は，映画業界での慣用手法である．本システムの Overlay は，これを MR 技術で代替することで，より手軽に試行錯誤できるようにした方法と言える．

4.2 DR-PreVis システムにおける幾何学的整合法

Phase 3 では，隠背景データを基に作成した隠背景面を除去対象物体の上に重畳描画することで DR 処理を行う．カメラ姿勢が正しく取得・推定できていなかった場合，除去対象が露出するといった問題が生じる．屋内外で動作する万能な手法は存在しない．そのため，DR-PreVis システムでは以下の 3 つの手法を導入し，撮影するシーンによって，適切な位置合わせ手法を選択できるようにした（**表 1**）．

・センサベース位置合わせ
・モデル - フレーム位置合わせ
・フレーム - フレーム位置合わせ

◆センサベース位置合わせ：安定性を重視するなら，機械式センサを用いる方法が望ましい．本システム



(a) プレビズ撮影日の光景　(b) DR 処理結果(補正前)　(c) DR 処理結果(補正後)

(d) 隠背景データ(7 日前に撮影)　(e) 問題箇所(工事用柵)の (a), (b), (c) の拡大画像

図 6　POB-DR における光学的不整合の発生とその対処例

Fig.6 Example of photometric inconsistency reduction. (a) Original image, (b) DR result w/o color correction, (c) DR result w/ color correction, (d) Hidden area data (taken 7 days before), (e) Close up views of (a), (b), and (c).

では，昭特製作所のパン・チルト用ロータリエンコーダ TU-03VR を採用した．センサを動作させるには電源が必要であるため，屋外で用いる場合は，移動式電源を用意するなど対処が必要である．

◆モデル - フレーム位置合わせ：POB-DR を選択した場合，事前に作成した隠背景データの T-3DM を利用したビジョンベースの位置合わせが利用できる[12]．Tracking by Synthesis [13]に倣ったこの手法は，背景の T-3DM と現画像 I_{CAM} とで位置合わせを行うモデルベースの手法であるため，破綻復帰も可能である．一方で，自然特徴点を利用するため，その数やマッチング精度に依存する．また，隠背景の T-3DM を用いる前提であるため，Overlay では別途用意したシーンの T-3DM を利用することでカメラ姿勢を計算できる．

◆フレーム - フレーム位置合わせ：本システムでは，もう 1 つのビジョンベース位置合わせ手法として“密な動き推定 (Dense Motion Estimation; DME) [14]”を利用する．隠背景を用いる際には，まず，隠背景面と現画像 I_{CAM} との初期位置合わせとして特徴点マッチングによるホモグラフィ推定を行い，その後，前後フレームの移動量を DME により計算する．本手法は，隠背景データを用いない Overlay でも利用することができる．その場合は CG モデルの初期位置をユーザが決定し，計算した前後フレームの移動量をモデルの位置に反映する．

4.3 DR-PreVis システムにおける光学的整合法

POB-DR を用いる場合，隠背景を観測する Phase 1 と DR 処理を行う Phase 3 の間で照明が変化し，隠背景面を重畳描画する際に光学的不整合が発生してしまう．**図 6** は 5 章にて後述の実データを用いた光学的不整合の発生例である．この場合，Phase 1 のロケハンは，DR-PreVis 撮影の 7 日前に行ったため，日照が変化し，光学的不整合が目立ってしまった．本システムではプレビズ映像の作成が主目的であるため，最終完成映像ほどの完成度は求められないが，大きく目立つ光学的不整合には対処できるようにした．また，プレビズ撮影は一つのシーンに対して何度も撮影を繰り返すため，屋外では特に，撮影中に日照が変化する．本システムでは，利用する DR 手法によって以下の 2 つの手法を導入した．

・周辺参照領域を利用した色調補正処理
・Poisson Blending

◆周辺参照領域を利用した色調補正処理：この処理は POB-DR を用いる場合に利用できる．[8]では，周辺参照領域内の隠背景投影画像 I_{SV} と現画像 I_{CAM} が幾何学的・光学的に一致するという条件を利用し，2 つの画像間の色調の比較および補正に利用する．除去対象領域内にあるポリゴンと隣接する周辺参照領域内の T-3DM の頂点と除去対象領域内の頂点との接続関係を利用して，周辺参照領域の色調を除去対象領域内に伝播する．

また，隠背景投影画像 I_{SV} と現画像 I_{CAM} の合成時，マスク画像 I_{MK} を通して合成した隠背景投影画像の境界が目立たないように，Region Blending Across the Border (RBAB) 処理[15]を加え，除去対象領域周辺のずれの低減を図る．

◆Poisson Blending：別の光学的不整合軽減法として，Poisson Blending [16]を利用する．これは，ある画像から切り抜いた画像を別画像の色調に合わせてシームレスに貼付けて合成画像を生成する手法である．

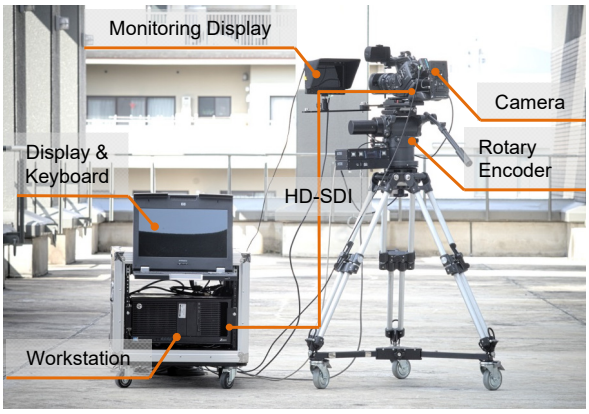


図 7　DR-PreVis 撮影合成システム
Fig.7 Configuration of DR-PreVis.

表 2　DR-PreVis 用ワークステーションの構成
Table 2 Configuration of workstation.

CPU	Intel Xeon E5-2637v3 3.5GHz
メモリ	32GB
GPU	NVIDIA Quadro K4200 4GB
ビデオキャプチャ	BlackMagic DeckLink 4K Extreme

DR-PreVis では，隠背景投影画像 I_{SV} を現画像 I_{CAM} に合成することになる．この手法は POB-DR と IB-DR の両方に利用する．

4.4 DR-PreVis 撮影合成システム

DR-PreVis 映像撮影と本番撮影は別ものであるが，より本番に近いプレビズ撮影であるに越したことはない．少なくとも，キャメラの操作性や画質はプロ仕様であるべきである．ここでは，HD 画質の映像を撮影できる業務用キャメラの SONY 社製 PMW-EX3 を採用した．実装したプログラムの実行には，HP 社製 Z840 ワークステーション（**表 2**）を用いている．システムの実装には，プログラミング言語として C++を，描画用 API に OpenGL を，統合開発環境に Visual Studio 2013 を用いた．

DR-PreVis システムは，MR-PreViz システムに DR 機能を付加するだけで実現できるはずだが，従前の MR-PreViz システムの動作環境は，導入後 5 年が経過していた．DR 処理に必要なライブラリには稼働しないものがあったので，設計方針は踏襲しつつ，DR-PreVis 撮影合成システムは，最新の PC 環境で再構築することにした．

ワークステーションはキャメラと HD-SDI で接続し，HD 画質の画像を実時間で送受信可能である．DR-PreVis 撮影は屋外での利用も想定されるため，可搬性を配慮し，ディスプレイとキーボード付きラックにワークステーションを搭載する．キャメラマンがプレビズ映像を確認しながら撮影できるように，撮影用キャメラにモニタリング用のモニタを備え付ける．**図 7** に DR-PreVis 撮影合成システムを示す．



図 8　屋外セットでの DR-PreVis 撮影風景
Fig.8 Pracice DR-PreVis in outdoor.

5 DR-PreVis システムの運用

提案システムの有用性を確認するため，基幹システムの完成後，約 9 ヶ月間かけて，スタジオ（屋内），オープンセット（屋外），ロケ地（屋外）で DR-PreVis を運用した．実際に遭遇した問題を順次解決し，システムの改良を行った（**図 9**, **10**, **11**）．運用したシーン及び用いた手法を**表 3** にまとめる．

5.1 屋内セットでの運用

京都リサーチパーク MR 創像ラボラトリ内には，DR 研究のための DREAM (Diminished Reality as Extension of AR/MR) スタジオを設けている．屋内で映画撮影を行う際には，大道具や小道具を自由に配置できるが，その配置位置を迷うことがある．物体が大きい場合や配置位置を記録するなどの理由で，移動が困難な場合もある．そこで，DR-PreVis システムを用い，実際には物体を動かさずに物体のないシーンをシミュレートすることを目的とした．

●スタジオ：図 9 にシーンと DR-PreVis の結果を示す．このシーンでの除去対象物体はバーカウンターとする．この場合，バーカウンターを置く前の光景を事前に観測できたため，POB-DR が適切だと判断し，DR 処理を行った．バーカウンターを置く前に，Autodesk 123D Catch [17]を用いて T-3DM を作成した．除去対象領域は，画面を見ながらマウスでドラッグすることで指定した．

電源供給が確保されたスタジオ内での撮影のため，センサベース位置合わせを利用した．また，隠背景データ取得時と DR-PreVis 撮影時の照明は同じであり，光学的不整合は発生しないため，光学的整合法は利用しなかった．こうして得られた DR 処理結果に，アニメーションを付与した CG キャラクタを合成した（図 9）．

この運用結果から，本システムが屋内セットで利用でき，物体を実際には動かさずに物体の無いシーンをシミュレートできることを確認した．

表 3　DR-PreVis 運用シーン（*：変更を要した手法）
Table 3 Operated scene.

撮影場所	シーン名	除去物体	DR 手法	幾何学的整合法	光学的整合法
屋内セット	スタジオ	バーカウンタ	POB-DR	ロータリエンコーダ	なし
オープンセット	大通り	工事の柵	POB-DR	フレーム-モデル	周辺参照領域の利用
	茶屋前	消火設備	IB-DR	フレーム-フレーム*	Poisson Blending
ロケ地	エントランス	駐車禁止標識	IB-DR	フレーム-フレーム	なし
	中庭	コンテナ	Overlay*	フレーム-フレーム	なし

5.2 屋外セットでの運用

東映京都撮影所内のオープンセット（「東映太秦映画村」の一部を兼ねる）にて，DR-PreVis 撮影を行った（**図 8**）．撮影シーンは時代劇を想定し，その設定にそぐわない現代風の人工物の除去を目的とした．この撮影は，映画制作関係者 2 名，DR 研究に従事する学生 6 名が参加し，当該システムの運用の様子を評価してもらうことも兼ねて実施した．

Phase 1 を想定し，DR-PreVis 撮影を行う 1 週間前に 3 名の学生でロケハンを行い，撮影場所と撮影シーンを決定した．その際，隠背景データ用の空絵を複数視点で撮影した．実際に DR-PreVis 撮影を行う Phase 3 では合計 8 シーン 18 シーケンスを撮影した．内 POB-DR と IB-DR をそれぞれ 4 シーン 9 シーケンスに対して実行した．本論文では，これら DR-PreVis 撮影結果の内，図 10 に示す代表的な 2 シーンでの結果について説明する．

●宿場町大通り：オープンセットは，撮影要求に応じてその都度，組み換えや工事が行われるものである．このシーンの場合，ロケハン時にはなかった工事用の柵が，DR-PreVis 撮影時に設置されていたため，この柵を除去対象とした．ロケハン時に隠背景データとして撮影した空絵の範囲内に柵があったため，POB-DR の利用が適切だと判断した．

空絵に特徴点検出を行った際に検出された特徴点が 250 点以上と数が多いかったため，モデル - フレーム位置合わせを利用した．隠背景データは午後 2 時頃に晴天時で撮った空絵であり，DR-PreVis 撮影は午前 11 時頃に曇りの状態で撮影したため，光学的不整合が目立っていた（図 6）．そこで，周辺参照領域を利用した色調補正処理を実行した．図 10 に DR- PreVis 撮影の結果を示す. 時代劇にそぐわない現代風の柵が視覚的に除去されていることが分かる．

●茶屋前：このシーンでは，消火設備とマンホールを除去対象とした．この常設設備に対しては，実際に隠された領域の撮影は不可能であり，かつ隣接領域が単純であるため IB-DR を利用した. このシーンでは 80 点程度の特徴点しか検出されなかったため，モデル - フレームでは安定した映像が作成できなかった（**図 12 (a)**）．このため，フレーム - フレーム位置合わせに切り替えた. IB 方式での隠背景データの作成は DR-PreVis 撮影を行うその場で行った. 撮影中の微妙な天候変化による光学的不整合に対処するため，Poisson Blending を用いた．図 10 に DR-PreVis 撮影の結果を示す．時代劇にそぐわない現代風の消火器とマンホールが視覚的に除去されていることが分かる．

5.3 ロケ地での運用

屋外シーンの対象として，日頃から京都リサーチパーク敷地内外で DR-PreVis 撮影を行っている．ビルや屋外駐車場，中庭には植え込みや休憩用のイス等もあり，市街地ロケの一般性を失わない対象地域である．ここでは撮影に邪魔になる物体を除去することを目的とした. 事例として, 中庭での DR-PreVis 実施例を紹介する．

●中庭：ここでは，美観を損ねるコンテナを除去対象とした．このシーンは一見単純なシーンに見えるが, 除去対象領域が大きいため IB-DR は上手く機能せず，幾何学的不整合が発生した（図 12 (b)）．隠背景の観測もできないため，一回り大きな CG で除去対象物体を上書きする Overlay へ切り替えた．カメラ姿勢推定はフレーム - フレーム位置合わせを利用した．図 11 に DR-PreVis 撮影の結果を示す．コンテナが仮想の車で覆い隠されていることが分かる．

5.4 DR-PreVis 撮影の設営及び実施時間

DR-PreVis が本番の撮影時間を短縮できることは既に述べたが，DR-PreVis 映像生成に要する時間もなるべく短いことが望ましい．機材への習熟度や対象シーンにも依存するが，我々はシステムの GUI を工夫する等の改善を行って，運用に要する時間の短縮を図った．

その手順の概要と平均的な所要時間を記す．撮影スタッフの希望で撮影場所の移動を行い，機材を降ろして以降，熟練者が操作することを想定した時間である．数値は，ある程度システムが完成した時点以降の撮影経験（屋内 15 例，屋外 32 例，計 47 例）に基づいた目安である（毎回，正確に時間を計った訳ではない）．

下記の所要時間の合計は，試行錯誤を行わない場合で，20～22 分である．映画関係者から許容限界とされていた 30 分に対し，目標数値をクリアできたと言えるレベルに達している．



(a) リビングルームの光景　(b) MR-PreViz（人物像を合成）　(c) DR-PreVis（ホームバーを消去）

図 9　屋内スタジオでの実施例

Fig.9 Practical example in a studio. (a) Original image, (b) MR-PreViz, and (c) DR-PreVis.



(a) プレビズ撮影日の光景　(b) MR-PreViz（演技者 CG を合成）　(c) DR-PreVis（柵や消火栓の消去）

図 10　屋外セットでの実施例（上段：宿場町大通り，下段：茶屋前）

Fig.10 Practical examples in an outdoor openset (Top row: Street, down row: Teahouse).
(a) Original image, (b) MR-PreViz, and (c) DR-PreVis.



(a) 中庭の光景　(b) MR-PreViz（演技者を合成）　(c) DR-PreVis（コンテナ等を隠蔽）

図 11　ロケ地（中庭）での実施例

Fig.11 Practical examples in outdoor locations (Teahouse).
(a) Original image, (b) MR-PreViz, and (c) DR-PreVis.

・Step 1 撮影機材接続・設置・起動（約 10 分）：接続解除せず, 近隣地に移動する場合には短縮できる．

・Step 2 キャメラの調節・較正（約 2 分）：ホワイトバランスやフォーカスといった設定を行った後，チェッカーパターンを撮影し，内部パラメータを求める．内部パラメータは，CG キャラクタを合成する際の画角の計算や幾何位置合わせに用いられる．

・Step 3 幾何位置合わせの試行・パラメータ調整（約 3 分）：ロータリエンコーダ利用の場合はセンサの初期化，フレーム - モデル位置合わせでは特徴点の検出数の調整，フレーム - フレーム位置合わせでも初期姿勢推定のために同様の調整を行う．

・Step 4 DR 手法の選択（約 1 分）：図 3 に従って判断する．ロケハン時に終わっていることもある．

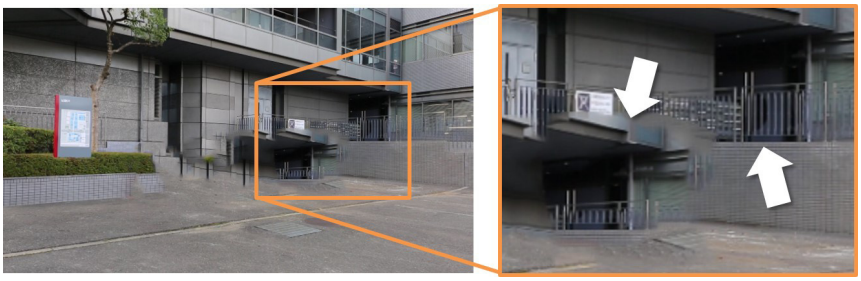
・Step 5 隠背景データの選択（約 1 分）：POB-DR 利用の場合，事前準備した複数の隠背景データから選択し，ロードする．

・Step 6 除去対象物体の指定（約 0〜2 分）：現画像上で除去対象領域を指定する．IB-DR の場合，処理結果が領域の大きさに依存するため，試行錯誤を要する．Overlay の場合，このステップは不要．

・Step 7 DR 処理結果の確認（約 1 分）：処理結果が満足出来ない場合，「除去対象物体の指定」や「DR 手法の選択」まで戻り，上記の処理を繰り返す．



(a) トラッキングの失敗（重畳ずれとジッタ）



(b) インペインティングの失敗（扉の複製）

図 12　DR 処理の失敗例

Fig.12 Failure cases of DR processes. (a) Tracking failure, (b) Inapainting failure.

・Step 8 CG キャラクタの配置・調整（約 2 分）：DR 処理結果を得た後，（必要に応じて）MR 合成する CG キャラクタの配置や調整を行う．

5.5 運用からの考察と自己評価

従来の MR-PreViz システム自体が独自のシステムであり，現在も同等の機能を有するシステムは他に存在しない．それに DR 機能を加えた DR-PreVis システムは，唯一無二の存在であり，性能比較する対象は存在しない．従って，本システムの有用性の評価は，自ら設定した目的・目標をクリアできたかの判断と映画関係者の感想を求めることとした．

●種々の DR 手法の準備

筆者らは，広く DR 研究を推進し，独自の学術研究としては，主として POB-DR 法の種々の方式を開発している．しかしながら，DR-PreVis 目的には，自らの手法に拘らず，IB-DR 法も広く調査し，他機関の有力手法を選択して実装し，DR-PreVis 目的での利用に供した．POB-DR の場合の幾何位置合わせ手法に関しても同様に，自らの手法以外の有力手法も採用し，選択肢の 1 つとしている．DR のレパートリーに関する限り，DR-PreVis 目的では最善の手法群をカバーできていると自負している．

手法の選択，パラメータの調整は，手法の意義を説明し，試行実験を行うだけで使い分けできる水準に達している．（背景知識のない）研究室の新人学生が，これを証明している．特に，図 12 のような好ましくない事例を経験することで，理解が進む．

●DR 研究にとっての貴重な経験

IB-DR 法は，実行すれば，ともかくそこそこの処理結果が得られるという意味で便利な方法であり，プレビズ映像に多くを求めないならば，大いに有用であることを実体験で感じた．その反面，きちんとした DR 処理を求める場合には，POB-DR の意義が増してくることも経験した．一般には，隠背景を事前準備できる対象は限られるが，映画撮影はそれが可能な場合が多く，DR-PreVis への関心が高まると共に POB-DR 法の研究が注目されると思われる．

一方，現状の DR-PreVis の限界も感じられた．あるシーンにおいて，POB-DR で必要とする隠背景データが用意できるかどうかは Phase 2 の段階で概ね判明している．しかし，準備した隠背景データで除去対象物体を実際に覆いきれるかどうか，覆いきれたとしても求める精度に達しているかは，Phase 3 の DR-PreVis 撮影時に現画像に投影するまでは分からない．よって，現場において POB-DR を利用できなかった場合，他の手法へと切り替えるため，事前作業が無駄になる場合がある．

また，今回の運用では，静止画像を隠背景データとして利用したが，今後は動画像を隠背景データとして利用し，隠背景の時間的な変化に対処する機能拡充も期待される．特に屋外において発生する光学的不整合により，隠背景データと現画像との画像特徴による対応付けが困難になるため，位置合わせが開始されないといった問題が発生した．この場合，ロータリエンコーダ方式に切り替えるか，電源が確保できない場合は，手作業による色調の調整で対処する必要がある．

●システム実装上の定量評価

前述したように，各 DR 処理の必須条件は 24fps であった．屋内外を含む全 5 つの運用シーン（表 3）

で実行した際の平均フレームレートは 30fps を上周った．このことから，このシステムが実時間動作することを確認した．一旦，達成後は，なるべく軽量，低価格，最近の PC 環境で稼働できるようにシステムを調整している．

設営時間に関しては，5.4 節に述べた通りで，当初目標とした操作性を達成している．

●映画関係者による定性評価

屋外のセットとロケ地での運用では，DR-PreVis を行うその場で現実世界にある望ましくない物体を視覚的に除去し，DR-PreVis 撮影を行うその場で邪魔な物体のないプレビズ映像の作成が可能になり，事前可視化機能が増すことを確認した．

東映京都撮影所での運用実験には，同所の関係者に同行を求め，DR-PreVis の意義を説明した上で，実運用に操作状況も確認してもらった．その際，総関係者からは,「MR だけでなく, DR があることは，美術関係者にとって有り難い」「後処理ではなく，実時間で除去できることはとても便利」「東映のように，TV 番組用の撮影も多く，オープンセットを頻繁に組み替える場合には，特に威力を発揮すると思う」という肯定的なコメントを頂戴した．

6 むすび

本論文では，隠消現実感技術を映画制作のプレビズに活用する DR-PreVis システムの研究開発にあたり，その意義，有用性を検討し，システムの概念設計を行った．システムの開発にあたって，映画制作現場の特性から DR-PreVis 用のワークフローを設計した. また, システムが用いる 3 つの DR 手法，DR 処理を行うための位置合わせ手法や光学的不整合の軽減処理の検討・実装を行い，撮影時の要求や状況に応じて一番適切な手法を選択できるよう開発した．そして，開発したシステムを屋内セット・屋外セットとロケ地で運用することで，映画撮影中の色々な状況で望ましくない物体を除去し，監督のイメージにより近いプレビズ映像を作成できることを確認し，システムの有用性を確認した．

従前の MR-PreViz システムへの，映画制作関係者から要望のあった DR 機能の導入については，ひとまずプレビズ目的に合致し，実運用な可能な第 1 次システムが開発できたと言える．

この過程を通して，DR 研究側にとっても貴重な経験が得られた．POB-DR や IB-DR の使い分けやそれぞれの改良にとっての指針である．DR 研究が進めば，DR-PreVis の今後の展開としては，6 自由度 DR 手法と実時間観測ベースの DR 手法の導入も可能になると考えられる．

謝辞

東映京都撮影所での撮影にご協力を頂いた東映（株）京都撮影所 中塚氏，福島氏に感謝する．研究の一部は，科研費・基盤研究 (S)「複合現実型情報空間の表現力基盤強化と体系化」と学振・特別研究員奨励費（課題番号 25･9193）「複合現実空間の表現力向上のための 2 つのアプローチ」による．

参考文献

[1] 田村秀行，柴田史久：“可視化技術で創造力を高める映画制作支援”，情報処理，Vol. 48, No. 12, pp. 1365 – 1372, 2007.

[2] 田村秀行，一刈良介：“映画制作を支援する複合現実型可視化技術”，日本バーチャルリアリティ学会誌，Vol. 15, No. 2, pp. 32 - 36, 2010.

[3] 森尚平，一刈良介，柴田史久，木村朝子，田村秀行：“隠消現実感の技術的枠組みと諸問題～現実世界に実在する物体を視覚的に隠蔽・消去・透視する技術について～”，日本 VR 学会論文誌，Vol. 16, No. 2, pp. 239 - 250, 2011.

[4] 一刈良介，川野圭祐，天目隆平，大島登志一，柴田史久，田村秀行：“映画制作を支援する複合現実型プレビジュアリゼーションとキャメラワーク・オーサリング”，同上，Vol. 12, No. 3, pp. 343 - 354, 2007.

[5] 森尚平，一刈良介，柴田史久，木村朝子，田村秀行：“実世界の撮影現場で 3D 映画演出を事前検討できる MR-PreViz システムの開発”，同上，Vol. 17, No. 3, pp. 231 - 240, 2012.

[6] 戦略的創造研究推進事業CREST研究課題「映画制作を支援する複合現実型可視化技術」研究終了報告書，科学技術振興機構, 2011.

[7] M. Levoy and P. Hanrahan: “Light field rendering,” Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, Special Interest Group on Computer GRAPHics (SIGGRAPH), pp. 31 - 42, 1996.

[8] C. Buehler, M. Bosse, L. McMillan, S. J. Gortler, and M. F. Cohen: “Unstructured lumigraph rendering,” Proc. SIGGRAPH 2001, pp. 425 - 432, 2001.

[9] 一刈良介，西沢孝浩，大島登志一，柴田史久，田村秀行：“再照明付与による複合現実空間のルック変更の試み -MR-PreViz 映像への映画的照明演出を例として-”，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol. 15, No. 2, pp. 213 – 220, 2010.

[10] I. Skrypnyk, and D. G. Lowe: “Scene modelling, recognition and tracking with invariant image features, ” Proceeding of the 4th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp. 110 - 119, 2004.

[11] C. Barnes, E.Shechtman, A.Finkelstein, D.Goldman: “PatchMatch: a randomized correspondence algorithm for structural image editing, ” Proceeding of the. ACM Transactions on Graphics, Vol. 28, No.3, 2009.

[12] S. Mori, F. Shibata, A. Kimura, and H. Tamura: “Efficient use of textured 3D model for pre-observation-based diminished reality,” Proceeding of the Int. Workshop on Diminished Reality as Challenging Issue in Mixed and

Augmented Reality (IWDR) 2015, pp. 32 - 39, 2015.
[13] G. Simon: “Tracking-by-synthesis using point features and pyramidal blurring,” Proceeding of the. 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp. 85 - 92, 2011.
[14] R. Szeliski: “*Computer Vision:Algorithms and Applications*,” Springer, 2011.
[15] 松木ひとみ，森尚平，柴田史久，木村朝子，田村秀行：“隠消現実感における両眼視野不整合についての考察”, 2015 年電子情報通信学会総合大会講演論文集, A-16-3, p. 219, 2015.
[16] P. Perez, M. Gangnet and A. Blake: “Poisson image editing,” Proceeding of the SIGGRAPH, Vol. 22, No. 3, pp. 313 - 318, 2003.
[17] Autodesk 123D Catch : http://www.123dapp.com/catch （最終アクセス日：2016 年 3 月 7 日）

（2016 年 3 月 7 日受付）

[著者紹介]

李 金霞（学生会員）



2013 年大連交通大学ソフトウェア学部ソフトウェア学科卒. 2016 年立命館大学大学院博士前期課程修了．同年 4 月，KDDI（株）入社．隠消現実感を用いた映画制作支援システムの開発に関する研究に従事.

斉藤 純哉（非会員）



2014 年立命館大学情報理工学部メディア情報学科卒. 2016 年同大学院博士前期課程修了．同年 4 月，オークラ輸送機（株）入社．屋内外で利用可能な隠消現実感システムの開発に関する研究に従事.

森 尚平（正会員）



2011 年立命館大学情報理工学部メディア情報学科卒. 2013 年同大学院情報理工学研究科博士前期課程修了. 2016 年同大学院博士後期課程修了．複合現実感及び隠消現実感の研究に従事．同年 4 月より，慶應義塾大学理工学部訪問研究員（学振・特別研究員 PD）．日本バーチャルリアリティ学会，情報処理学会，IEEE，ACM 各会員．博士（工学）.

池田 聖（正会員）



2001 年広島大学理学部物理学科卒. 2003 年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修了. 2006 年同研究科博士後期課程修了．同年同研究科特任助手，翌 2007 年助教．2011 年大阪大学大学院基礎工学研究科助教を経て，2015 年より立命館大学情報理工学部講師．複合現実感，コンピュータビジョンに関する研究に従事．日本バーチャルリアリティ学会，情報処理学会，IEEE，ACM 他各会員．博士（工学）.

柴田 史久（正会員）



1996 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了．1999 年同研究科博士後期課程修了．大阪大学産業科学研究所助手を経て，2003 年 4 月より立命館大学理工学部助教授．現在，同情報理工学部情報コミュニケーション学科教授．博士（工学）．モバイルコンピューティング，複合現実感等の研究に従事.本学会複合現実感研究委員会委員．IEEE，電子情報通信学会，日本ロボット学会，情報処理学会等の会員．本学会学術奨励賞・論文賞を受賞.

木村 朝子（正会員）



1996 年大阪大学基礎工学部卒. 1998 年同大学院基礎工学研究科博士前期課程修了．同大学助手，立命館大学理工学部助教授，科学技術振興機構さきがけ研究員等を経て，2009 年 4 月より立命館大学情報理工学部メディア情報学科准教授．現在，同教授．博士（工学）．実世界指向インタフェース，複合現実感，ハプテックインタフェースの研究に従事. 電子情報通信学会, 情報処理学会, ヒューマンインタフェース学会，ACM，IEEE 各会員．本学会学術奨励賞・論文賞，情報処理学会山下記念研究賞等受賞.

田村 秀行（正会員）



1970 年京都大学工学部電気工学科卒．工業技術院電子技術総合研究所，キヤノン（株）等を経て，2003 年 4 月より立命館大学理工学部教授．現在，同大学総合科学技術研究機構（特別招聘）教授．工学博士．1997 年より 2001 年まで，MR システム研究所にて「複合現実感研究プロジェクト」を率いた．本学会フェロー，元理事，現在，評議員，複合現実感研究委員会顧問．編著書「Mixed Reality」(Ohmsha & Springer)「コンピュータ画像処理」(オーム社) など. 電子情報通信学会フェロー, IEEE, ACM，情報処理学会，人工知能学会，映像情報メディア学会等の会員．本学会及び情報処理学会論文賞，人工知能学会功労賞等を受賞.