応用論文

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

森 尚平[*1] 一刈 良介[*2] 柴田 史久[*1] 木村 朝子[*1] 田村 秀行[*1]

Development of MR-PreViz System for On-site S3D Pre-Visualization of Real World Scenes

Shohei Mori[*1], Ryosuke Ichikari[*2],
Fumihisa Shibata[*1], Asako Kimura[*1], and Hideyuki Tamura[*1]

Abstract --- This paper proposes a pre-visualization (PreViz) system for stereoscopic 3D (S3D) filmmaking using mixed reality (MR) technologies. This system superimposes CG characters on real background shot in S3D with cinematographic stereo-camera. In preproduction stages, this enables stereographers to examine stereo-camera settings on-site by trial and error. Proposed system is based on our previous work, MR-PreViz, which provides MR composited PreViz and was designed as S3D extended of it. The S3D extension includes not only system design and development but also camera tracking method using a stereo-camera. Contribution of this method is to use epipolar constraints of the stereo-camera for structure-from-motion based approach and, as a result, is to increase variations of camera-paths examined in our PreViz system. We confirmed that the variations increased by visualizing camera-paths and by MR-PreViz movies, and we also evaluated the method in quantitative manners.

Keywords: Mixed Reality, Stereoscopicy, Stereo-Camera , Camera Tracking, 3D Reconstruction

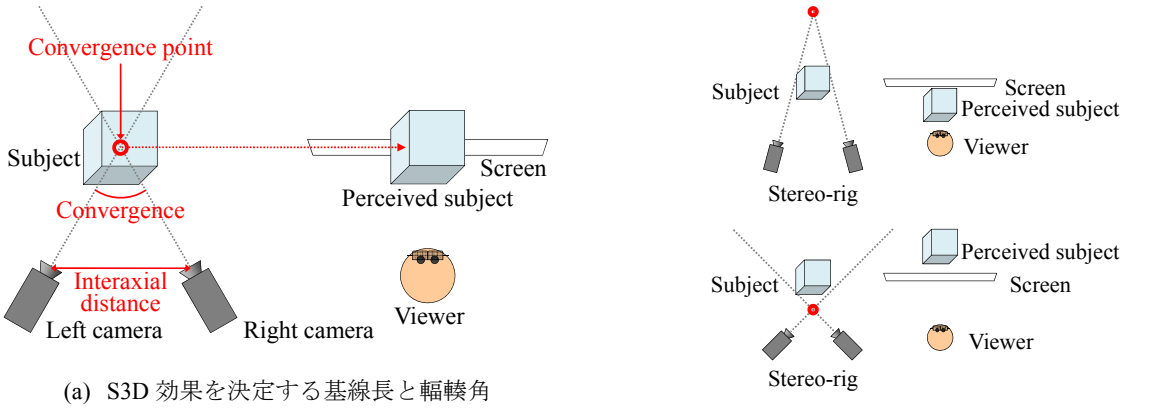
1. はじめに

現実世界と仮想世界を継ぎ目なく融合する複合現実感（Mixed Reality; MR）は，従来の人工現実感（Virtual Reality; VR）の発展形であり，本学会の主要研究分野の１つとして進化している．我々は，この MR 技術を映画制作のプリプロダクションで用いる PreViz（Pre-Visualization，事前可視化）に活用し，映画人の創造性発揮を支援する MR-PreViz を提唱し，その研究開発を推進してきた[1].

視覚効果を多用するハリウッドの大作映画では，PreViz 映像の利用は日常化しているが，そのほぼすべてが，背景も人物もフル CG 化した映像に留まっている．これに対して，我々の MR-PreViz は，本番撮影を行う現場（スタジオ内セット，オープンセット，ロケ地等々）の実背景に CG キャラクタや CG オブジェクトを実時間合成し，実際の映画キャメラを操作しながら PreViz 映像を制作するものである．PreViz 技術の中では，PitchViz から本番撮影直前までの段階で（必要に応じて）利用する先進的利用法であり，撮影監督のキャメラ・リハーサル，美術監督のセット・シミュレーションとしての利用価値も高い．MR 技術側から見れば，屋内外を問わない実世界を対象としたキャメラ視点での高精度実時間合成システムであり，信頼性の高いマーカレス・トラッキング技術が必須となっている．我々は，2005 年 10 月から 2011 年 3 月までの CREST 研究プロジェクト[2]で研究開発を実施し，随時，映像制作業界との連携を図りながら，MR-PreViz 技術を実用域に到達させた．この研究成果は，我が国独自の先端技術として映像制作業界に技術供与され，既に劇場用映画や CM 制作に活用された実績をもつ.

上記の MR-PreViz 試行実験，技術供与の中で，映像制作業界から寄せられたのは，3D 映画の立体感を事前検討するのに，MR-PreViz を 3D 拡張して欲しいという要望であった．過去何度か 3D 映画のブームがあり，両眼立体視を前提とした立体表示の原理は変わっていないが，デジタル・プロジェクタの普及により，2009 年頃から 3D 映画（3D-CG と区別するため，Stereoscopic 3D; S3D と呼ばれている）の新たなブームが始まっている．手軽に S3D 映画を制作するには，2D 撮影した映像に手作業で両眼視差をつけ，「2D→3D 変換」する「フェイク 3D」が容易だが，実際に 2 台のキャメラを配置して実世界を撮影し（「リアル 3D」という），かつそこに CG 映像を合成するとなると，2 台のキャメラの基線長や輻湊角を変化させた効果を予め MR-PreViz 映像

*1 立命館大学 理工学研究科
*2 南カリフォルニア大学クリエイティブ・テクノロジー研究所
*1 Graduate School of Science & Engineering, Ritsumeikan University
*2 University of Southern California, Institute for Creative Technologies



(a) S3D 効果を決定する基線長と輻輳角
（コンバージェンスポイント上の被写体はスクリーン上に現れる）
(a) Interaxial distance and convergence determine S3D effects on a screen: A subject on convergence point appears on a screen

(b) 飛び出し感（上）と奥行き感（下）の演出
(b) Pop-up (bottom) and depth (top) effects in S3D

図1 ステレオリグを用いたスクリーン上での S3D 効果の決定（提案システムはこの検討を MR 空間で可能にする）
Fig. 1 Setting S3D effects on a screen using a stereo rig (Proposed system enables this examination in MR space)

で確認し，各シーンの立体感演出をデザインした上で，S3D 本番撮影に備えたいという需要である．

こうした要望に応えるべく，我々は S3D 撮影用に MR-PreViz システムを拡張し，その第 1 次システムを完成させた．ここで配慮したのは，従来の MR-PreViz システム[3]の使い勝手を踏襲しつつ，現実の S3D 映画撮影の品質に耐え得る導入機材の選定，ソフトウェアの将来の発展・拡張が可能な技術的な枠組の採用である．特に留意したのは，ステレオ画像対が利用できることによるキャメラ位置姿勢トラッキング方法の改良である．

本論文では，MR-PreViz のハードウェア面での拡張とソフトウェア面での拡張の指針と，その両面での具体的な拡張内容について述べる．最後に，今後の発展させるべき方向性について論じる．

2. MR-PreViz の S3D 拡張

S3D 映像制作の要は，専用のステレオキャメラ装置（ステレオリグ）の基線長と輻輳角の 2 つのパラメータの設定にある．また，これら 2 つのパラメータで決定されるコンバージェンスポイントを基準とすることで，**図 1** に示すように，画面上での立体感を操作する．即ち，これら 2 つのパラメータをいかに設定するかが映像作品の見栄え，特に立体感を左右するため，キャメラワークと同様，試行錯誤が必要となる．以下は，その設定支援法に関する関連研究と我々が提案するシステムの概要である．

2.1 関連研究

映画撮影法の大半は，現場で伝承されるノウハウであり，学術論文として公表されている研究開発はほとんどない．強いて挙げれば，ステレオリグに取り付けたタッチパネルを使って指し示した被写体にコンバージェンスポイントを自動的に合わせる Heinzle らの開発例[4]，視聴環境を考慮し，一度撮影した S3D 映像の立体感を簡単な GUI を用いて仮想的に再度設定し直す Koppal のシステム[5]がある．いずれも，MR-PreViz とは無縁である．

MR-PreViz 技術は，映画制作技法では，On-Site Realtime 3D Matchmove 技術と位置づけることができるが，世界的にも他に類がないシステムなので，S3D 化に関しても直接的な関連研究は存在しない．

MR-PreViz の技術的発展を支えてきたのは，AR/MR 分野の実世界マーカレス・トラッキング手法を，映画撮影という高い要求水準を満たすべく改良してきた累積経験である．S3D 化でステレオ画像対が獲得できることになれば，コンピュータビジョン分野で長年研究されてきた Computational Stereo の成果[6]を順次取り入れて，ソフトウェア面での性能向上を図ることが考えられる．

本稿で述べる第 1 次 S3D MR-PreViz システムでは，この考え方で従来のトラッキング法を改良しているが，今後のさらなる改良も想定したソフトウェア・アーキテクチャを採用することとした．

2.2 ハードウェア面での S3D 拡張

S3D MR-PreViz では，従来の MR-PreViz と同様に，実際の劇場映画制作の利用に供することができるよう，プロ仕様の S3D 撮影用機材を導入する方針を採った．それらを MR システムに適用することで，撮影現場での S3D 効果の試行錯誤を可能にする．具体的には，以下の 4 項目に留意した．

(1) 特注ステレオリグの導入：本格的な S3D 映像撮影のためには，ステレオリグを用いた基線長と輻輳角の設定が必須である．今回の MR-PreViz システムで配慮したのは，既存の MR-PreViz システムで利用していた同種の HD カメラ 2 台が設置でき，

かつ映画撮影用カメラの操作に通暁した撮影監督の現場での操作感を損なわないことである（このステレオリグの具体的な構成要件は，3.1 節に後述した）．

(2) ステレオリグの設定の MR 空間への反映：ステレオリグで設定したパラメータは正しく MR 空間のビジュアルに反映される必要がある．しかし，撮影時間を圧迫しないよう，素早く完了するものでなくてはならない．

(3) S3D 映像配信規格の切り替え：映像業界で標準となっている S3D 映像配信規格は実質存在しないため，様々な種類の 3D ディスプレイが存在する．映像制作者が用意したディスプレイの利用も想定し，より多くの規格を出力可能にする必要がある．

(4) 高解像度（HD: 720/24p）映像出力：S3D 効果は視聴者とスクリーンまでの距離やスクリーンの大きさ等の他に，スクリーンの解像度に依存する．よって，現場でより詳細な S3D 効果を検討可能にするためには，実時間かつ HD で MR-PreViz を表示する必要がある．また，ビジョンベースの位置合わせ手法を用いる本手法では，高解像度化によって生じる処理負荷への対策（高速化）が必要である．

2.3 ソフトウェア面での S3D 拡張

MR-PreViz ではリハーサル・パス法（Rehearsal Path Method; RPM）と呼ばれるビジョンベースのマーカレス位置合わせ手法を採用している[7]．この手法は，映像制作では，あらかじめ大まかなキャメラパスが既知であるという制約を設けることで，そのパス上での位置合わせを可能にする．具体的には，想定するパス上で予めシーケンスを撮影し，そこから抽出した特徴点の 3 次元位置や特徴量をランドマークデータベース（LMDB）に蓄え，それらをトラッキング時に参照することで位置合わせを実現する．

当然，ビジョンベース位置合わせの精度は撮影シーンに大きく依存するため，後に示すように設定できるキャメラパスには限界が存在する．一方，映画撮影では様々なパターンのキャメラワークを検討できることが，最終的な完成度を左右するため，想定できるキャメラパスの種類は豊富なほど良い．実際の映画撮影で明らかになった，映画撮影で多用されるキャメラワークの中で RPM が苦手とするものは以下の通りである．

(a) 位置を固定したキャメラでのパンニング
(b) ドリーイン（被写体に近づく）やドリーバック（被写体から遠ざかる）
(c) パンニングを含むトラック

これらの主たる原因は，RPM が，特徴点追跡におけるノイズの軽減及び処理量削減のために，平行移動を前提としているという点にある．(a) と (b) に関しては，単眼キャメラを能動的に動かしてステレオ視する方法をとる位置合わせ手法全般の問題である．映画撮影で一般的なレール上での撮影を考えると，平行移動できる方向に限りがあることがあり，特にこの問題への対策が困難になる．(c) に関しては，複雑なパスをできるだけ単純なパスに近似することでトラッキングを可能にしてきた．だが，そもそも LMDB 構築時のパスと撮影時のパスが異なることで，シーンの見え方が変わり，トラッキングが困難になるため，LMDB 構築時のパスと撮影時のパスは本来同じである必要がある（**図 2**）．

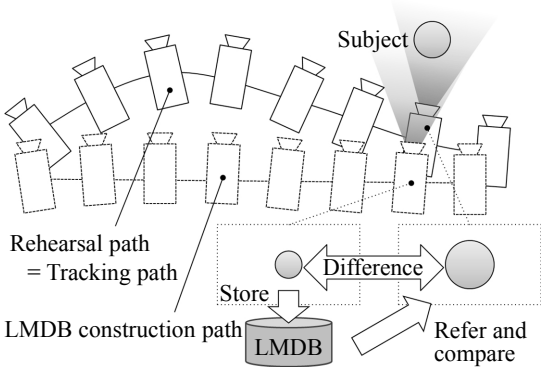


図 2 リハーサル・パスの平行移動による近似と問題
Fig. 2 Problem of approximating path for LMDB construction

提案手法では，カメラ校正で既知になるステレオリグのエピポーラ拘束を利用して，上に問題として挙げたパスでの MR-PreViz 撮影を可能にする．

3. 提案システム：S3D MR-PreViz

3.1 S3D 映像の入出力機構とシステム構成

実際の S3D 映像制作での利用を前提とした本システムでは，2.2 節 (1) の通り，S3D 撮影機材の導入とそれに合わせたシステム構成が必須である．まず我々は**図 3** に示す 2 つの S3D 映像撮影用ステレオリグを製作した．遠景と近景の撮影を可能にするステレオリグは，それぞれ平行リグ（基線長：210 – 400 mm，輻輳角：0 – 6°），ビームスプリッタリグ（基線長：0 – 120 mm，輻輳角：0 – 6°）と呼ばれる．

これらは，基線長と輻輳角を手動で調節できる機構を備えており，PreViz 撮影用途には十分な性能を備えている．ビームスプリッタリグは内部にハーフミラーを備えており，それにより分光することで最短 0 mm の基線長を設定できる．設定できる基線長の限界は利用するキャメラによって物理的に決定するため，上記の基線長の限界は，今回搭載するキャメラ（Sony 社製 PMW-EX3）を用いた場合の値である．また，設定できる輻輳角は，基線長を 65 mm とした時に，無限遠から約 620 mm の位置にコンバ



図 3　製作したステレオリグ Nac 3D Rig II
（左：ビームスプリッタリグ，右：平行リグ）
Fig. 3　Nac 3D Rig II for S3D MR-PreViz system
(Left: Beam-splitter rig, right: parallel rig)

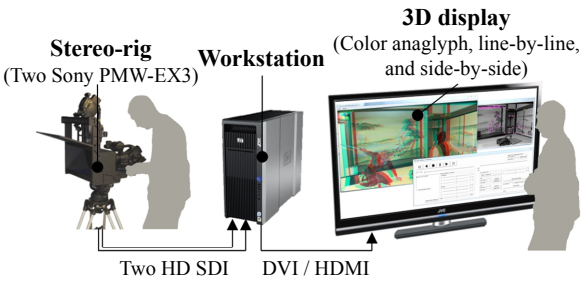


図 4　S3D MR-PreViz のシステム構成
Fig. 4　S3D MR-PreViz system configuration



(a) 奥行き感を強調した例
(a) Enhancing depth representation



(b) 飛出し感を強調した例
(b) Enhancing pop-up representation

図 5　S3D MR-PreViz が実現する S3D 効果
Fig. 5　S3D effects realized in S3D MR-PreViz system

ージェンスポイントを設定できることに相当する．この最短距離は，今回用いるキャメラのフォーカス範囲（マクロ［OFF］）の最短距離である 800 mm よりも短いため，十分であると言える．

搭載する左右のキャメラは，Genlock 機能により同期し，それぞれの映像は，Blackmagic 社製 DeckLink HD Extreme 3D+を備えたワークステーション（CPU: Xeon 5640 2.66 GHz, RAM: 12 GB, GPU: Quadro 4000）へ HD SDI を介して入力される．S3D 映像はワークステーション中で MR 合成され，JVC 社製 GD-463D10 にその MR-PreViz 映像を S3D 映像配信規格で出力することで表示する．このディスプレイはサイド・バイ・サイド，ライン・バイ・ライン，カラー・アナグリフでの表示が可能である．**図 4** に S3D MR-PreViz のシステム構成図を示す．

3.2 S3D 効果検討のためのワークフロー

前節で述べたシステムを利用して実現する，S3D 効果検討のワークフローは次の 6 ステップから成る．

1. LMDB 構築のためのステレオリグの設定
2. 1 の設定を 3 に利用するためのカメラ校正
3. LMDB 構築
4. MR-PreViz のためのステレオリグの設定
5. 4 の設定を MR 空間に反映するカメラ校正
6. S3D での MR-PreViz 撮影

本システムでは，基本的に，4 – 6 の 3 つのステップを，ステレオグラファが求める映像が得られるまで繰り返すことで視差量調節のための試行錯誤を可能にする．尚，1 – 3 は位置合わせ手法に関わる項目であり，シーンの光学的条件の大きな変更やシーン自体の変更がない限りやり直す必要はない．詳細は次章にて述べる．

3.3 ワークフロー実現のための機能実装

3.3.1 ステレオリグの設定の MR 空間への反映

2.2 節（2）の通り，撮影された実背景と合成される CG キャラクタの S3D 効果を一致させるために，ステレオリグ内の 2 つのキャメラの位置関係を正しく，かつ撮影時間を圧迫しないよう素早く推定する必要がある．

まず，左キャメラの位置姿勢は次章で説明する位置合わせ手法にて得られるものとする．S3D 効果を決定づける基線長と輻輳角に相当する，左キャメラから右キャメラへの回転行列 $\mathbf{R}$ と並進ベクトル $\mathbf{t}$ は Zhang の手法[8]を利用して，以下の式により推定する．尚，$\mathbf{R}_L$ と $\mathbf{t}_L$，$\mathbf{R}_R$ と $\mathbf{t}_R$ は左右のキャメラから校正物体への回転行列と並進ベクトルである．

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_R \mathbf{R}_L^{-1} \quad (1)$$

$$\mathbf{t} = \mathbf{t}_R - \mathbf{R}\,\mathbf{t}_L \quad (2)$$

この校正は，S3D 効果の試行錯誤の上で何度も行われる作業である．そのため，自動化を行い，望ましい結果が得られるまでのやり直し作業を減らすことで，撮影時間を圧迫しないようにする．具体的には，画面を画像中心で 4 つの象限に分け，各象限で指定枚数の校正物体を自動で検出させることで，推定精度が大きく低下することを防ぐ．

尚，この方法は基線長が一定の長さより長い場合には機能しないため，ユーザが不要であると考えれば利用しないという選択も可能である．この校正は MR-PreViz 撮影中に実行できるモジュールとして用意した．また，作業自体も 1 – 2 分程度のため，実質，撮影時間を圧迫することは無いと考える．

本システムを用いて S3D 効果を変更した例を**図 5**

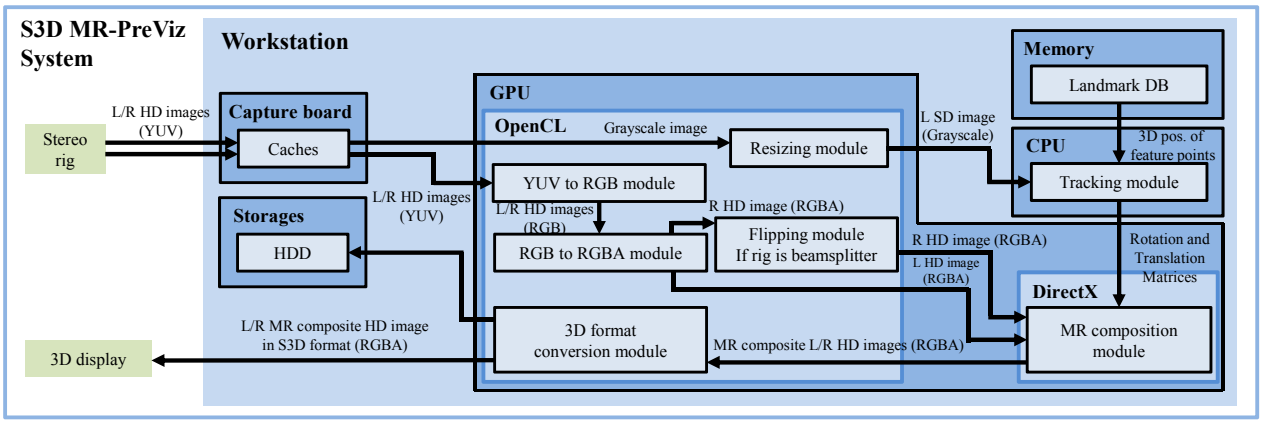


図 7　提案システムにおけるステレオリグから 3D ディスプレイまでのステレオ映像のデータフロー
Fig. 7　Data-flow of stereo images from a stereo-rig to 3D display

に示す．尚，紙面上で S3D 効果を確認するためにカラー・アナグリフで載せる．

3.3.2　S3D 映像配信規格の切り替え

2.2 節（3）の通り，撮影された S3D の MR-PreViz 映像はディスプレイが出力できる S3D 映像配信規格で出力されなければならない．本システムでは，採用した 3D ディスプレイで再生可能なサイド・バイ・サイド，ライン・バイ・ライン，カラー・アナグリフの 3 種を採用し，それらと左右各々の映像を実時間で切り替え可能にする．

3.3.3　高解像度（HD: 720/24p）映像出力

2.2 節（4）の通り，S3D 映像は低解像度ではその効果を知覚し難い上，先述の S3D 映像配信規格のうちサイド・バイ・サイドとライン・バイ・ラインは解像度が減少するため，可能な限り高解像度での出力が望まれる．そこで，本システムでは 720/24p (1280 x 720, 24 FPS) での出力を可能にする．

S3D MR-PreViz では，ビジョンベースのトラッキング法を用いること，従来の MR-PreViz と比較して，扱うフレームの解像度が高くなったこと，両眼分のフレームを扱うため各フレームの画像枚数が倍増したこと，両眼分のフレームを S3D 映像配信規格へ変換する必要があることから画像処理の高速化が必要である．そこで，OpenCL を用いて GPGPU により，画像処理群の高速化を図る．その画像処理のデータフロー図を**図 7** に示す．

4. ステレオリグを利用した位置合わせ手法

本章では，S3D MR-PreViz システムで用いられる位置合わせ手法について述べる．本手法では，今回製作したステレオリグを用いた RPM の LMDB 構築法を実現し，2.3 節で挙げた問題を解決する．

4.1 想定する撮影対象とキャメラワーク

本手法は屋内外の撮影用セットやミニチュアを撮影対象として想定する．また，特徴点ベースの位置合わせ手法であるため，その検出が十分に行えることを前提とし，想定するキャメラワークや撮影方法には以下のような制約を設ける．

- 物理的制約からステレオリグは三脚に載せる
- 三脚用ドリーやレールに載せて移動する
- 基線長と輻輳角の撮影中の変更は行わない
- 撮影中のズームは行わない

尚，3.2 節で述べた通り，LMDB 構築のために行う基線長と輻輳角の設定と，MR-PreViz 撮影中に S3D 効果を変更するために行う基線長と輻輳角の設定は別である．そのため，S3D MR-PreViz 撮影で前者の設定が問題になることは無い．

4.2 提案手法

4.2.1　関連研究

後述する通り，本手法は Structure-from-Motion の概念の下，マルチベースラインステレオ法[9]を基本とし，ステレオマッチングを用いた特徴点追跡法を追加利用することを特徴とした LMDB 構築法である．これは，これまでのステレオカメラを用いる位置合わせ手法[10][11]には無い，本手法が寄与するところである．

また，本手法は，HMD を用いる場合[11]や自律ロボットに搭載する大きさのステレオカメラを用いる場合[12]と比較してもより長い基線長を設定できる点で有利である．なぜなら，ステレオビジョンによって得られる奥行き方向の誤差の範囲 ΔZ が基線長に反比例する以下の式で表されるからである．

$$\Delta Z = \frac{Z^2 p}{fB} \tag{3}$$

ただし，Z は推定された特徴点の奥行き値，p はピクセル間距離，f は焦点距離，B は基線長である．理論上，基線長が長ければ長い程高い推定精度が得られる．上記の関連研究を含め，ステレオカメラを用いる手法では，普通，基線長が 60 – 100 mm 程度と固定されていることが多い．一方で，ステレオリグを用い

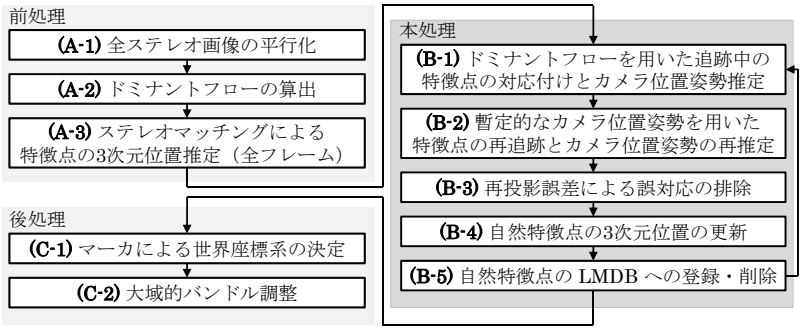


図 8　ステレオリグを利用した LMDB 構築のアルゴリズム
Fig. 8　Algorithm of LMDB construction using a stereo-rig

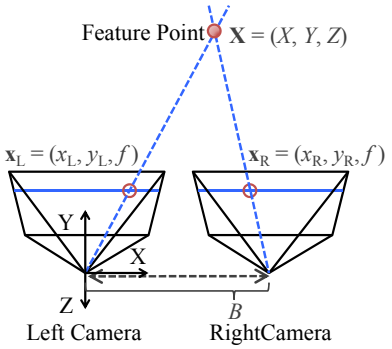


図 9　ステレオリグとその座標系
Fig. 9　Stereo-rig and its coordinates

る本手法では，これを撮影対象までの距離に応じて 0 – 120 mm と 210 – 400 mm の間で任意に設定可能である．よって，単純なステレオマッチングによって得られる推定精度，特に遠景の背景に対しての推定精度は関連研究よりも高く見積ることが可能である．

すなわち，机上での実験レベルでなく，実寸大の撮影用セット等での利用を想定するに十分な基線長を有しているため，ステレオマッチングによる結果をシーンのモデルデータとして扱うに十分な精度が得られることを前提としても問題ないと考える．

4.2.2　従来手法と提案手法の概要

単眼キャメラを用いた RPM の特徴点追跡法は，オプティカルフローの誤追跡を取り除く方法として，ドミナントフロー[12]と平面射影変換によるテンプレートマッチングの 2 つを取り入れていた[7]．この方法の問題点は，平行移動や撮影している背景が平面ということを前提とすることでノイズを減少させることができる分，2.3 節のキャメラワーク (a – c) での特徴点追跡が難しくなるという点である．

本手法では，この弱点を，校正されたステレオリグを用いて解決する．具体的には，ドミナントフローによる特徴点の探索に加え，ステレオキャメラのエピポーラ拘束を利用したステレオマッチングによって毎フレームで推定可能となる特徴点の 3 次元位置をシーンのモデルデータとして利用する．これを現フレームでのカメラ位置姿勢を用いて再投影することで，画像平面上での特徴点の探索窓を決定する．こうすることで，特徴点の 3 次元位置とキャメラの位置姿勢を考慮した特徴点追跡が可能となる．これを導入した提案手法のアルゴリズムを**図 8** に示す．

4.2.3　ステレオマッチング

S3D MR-PreViz で利用するステレオリグには 2 種類が存在するが，先述の通り，これはシーンまでの距離によって任意に設定する．例えば，S3D 映像撮影における基線長設定の目安となる，被写体までの距離の 1/30 に設定するという「1:30 ルール[13]」を用いてもよい．ただし，ステレオマッチングにより得られる特徴点の奥行き方向の分解能 ΔZ は式 (3) で定義されるため，基線長は可能な限り長く設定するのが好ましい．

先述の通り，S3D MR-PreViz の LMDB 構築における基線長と輻輳角の変更は，両眼立体視のためのそれとは別であり，影響しない．そのため，基線長と輻輳角に関して以下のような前提条件を置くことができる．

[前提条件 1] シーンによって基線長を変更可能
[前提条件 2] 輻輳角は 0°に設定可能

この条件で設定するカメラとその座標系を**図 9** に示す．キャリブレーションにより，ステレオ画像を平行化すると，以下の式により特徴点の 3 次元位置を算出できる．

$$\begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} \frac{B}{d}x_{\mathrm{L}} & \frac{B}{d}y_{\mathrm{L}} & \frac{B}{d}f \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

ただし，d は視差であり，ステレオマッチングにより得られる左画像と右画像での対応点の位置を $(x_{\mathrm{L}}, y_{\mathrm{L}})$ と $(x_{\mathrm{R}}, y_{\mathrm{R}})$ としたとき $x_{\mathrm{L}} - x_{\mathrm{R}}$ で表される．また，B は基線長である．この式 (4) を解くためには，左画像で検出した特徴点の右画像での対応点の探索が必要であるが，これはエピポーラ線上を，正規化相互相関 (Normalized Cross-Correlation; NCC) を用いたテンプレートマッチングにより検出する．ただし，この方法は式 (3) に示したピクセル間距離 p にも依存するため，十分な精度を得られない場合がある．そこで，サブピクセル精度でのステレオマッチングを行う．

今回，サブピクセル精度でのステレオマッチング法としてパラボラフィッティングを利用する．パラボラフィッティングとは，右画像にてピクセル精度で推定された 2 次元位置周りの相似度・相違度を用いて対称な 2 次曲線を決定し，その最大・最小値をとる位置をサブピクセル精度の推定位置 $(x_{\mathrm{C_sub}}, y_{\mathrm{C_sub}})$ とする手法であり，以下の式で表される．ここで，$\mathrm{R}(x, y)$ は画像平面上の位置 (x, y) における NCC で，$(x_{\mathrm{C}}, y_{\mathrm{C}})$ は右画像での先のテンプレートマッチングによって得られた対応点である．

$$\begin{bmatrix} x_{C_sub} \\ y_{C_sub} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{R(x_C-1,y_C)-R(x_C+1,y_C)}{2R(x_C,y_C)-4R(x_C-1,y_C)+2R(x_C+1,y_C)} \\ y_C \end{bmatrix} \quad (5)$$

4.2.4 アルゴリズムの詳細

ここでは，図 8 に示したそのアルゴリズムの詳細を前処理，本処理の順に詳説する．尚，後処理に関しては従来手法と同様のため，詳細は[5]に譲る．

【前処理】前処理では，リハーサル・パス上で撮影した連番画像（グレースケール，720 × 405 px）を入力とし，その連番画像への画像処理や後続の処理で必要となる情報を事前計算する．

(A-1) 校正により得られたパラメータを用いて，事前に全ての連番画像の歪みの除去及び平行化を施す．

(A-2) 上記の連番画像に対して，各フレーム間でのドミナントフローを算出する．

(A-3) 前項で説明したステレオマッチングにより，カメラ座標系を原点とした，全フレームでの特徴点の 3 次元位置を推定する．本手法では，追跡する特徴点の 3 次元位置が既知であることを利用するため，ステレオマッチングで対応点を見つけられなかった場合は，以降その特徴点を利用しない．

【本処理】本処理では，前処理で計算した特徴点の 3 次元位置を更新することで，最終的な 3 次元位置を決定する．よって，ステレオマッチングの精度が保障される限りで，2.3 節で述べた（a – c）のような平行移動ができないキャメラパスでも，カメラ位置姿勢を推定可能となる．具体的には，前処理で求めた特徴点の 3 次元位置を基に画像平面上での特徴点追跡を行うことで，各フレームでのカメラ位置姿勢を推定する．また，推定した特徴点の 3 次元位置とカメラ位置姿勢を基にマルチベースラインステレオ法で逐次特徴点を更新していくことで，LMDB に保存する特徴点を選別及び追加を行っていく．

(B-1) (A-2) にて求めたドミナントフローを利用して，前フレーム（$T = i - 1$）と現フレーム（$T = i$）の左画像での特徴点の対応付けを行う．対応付けには Sum of Absolute Difference (SAD) によるテンプレートマッチングを利用する．尚，ドミナントフローが得られなかったフレームに関しては，探索窓を初期値の 15×15 [px]から 25×25 [px]へと大きく設定することで対処する．それでも対応する特徴点が見つからない場合，その特徴点は追跡されなかったとみなす．2.3 節の（b）のようなキャメラパスの場合は，ドミナントフローが得られないためこれを適用することとなる．

次に，ここで得られた 3D-2D の対応関係から PnP 問題を解くことで，現フレームでの暫定的なカメラ位置姿勢 $\mathbf{M}_{i_tmp}$ を求める[14]．この際，誤対応を

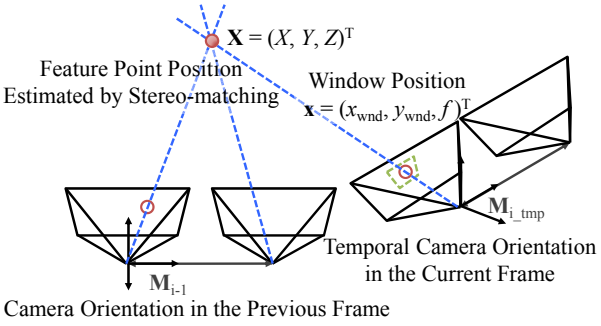


図 10 提案手法での特徴点追跡法
Fig. 10 Feature points tracking of proposed method

Progressive Sample Consensus (PROSAC) 法[15]を利用して排除する．その優先度にはテンプレートマッチングの結果を用いる．

(B-2) ここで，ドミナントフローによる予測で対応付けた特徴点と予測では対応を得ることができなかった特徴点の両方の再探索を行う（**図 10**）．まず，左キャメラの暫定的な位置姿勢 $\mathbf{M}_{i_tmp}$ において，特徴点の 3 次元位置を再投影した位置に探索窓を設定する．この操作は以下の式で表される．

$$\begin{bmatrix} x_{wnd} & y_{wnd} & f \end{bmatrix}^T = \mathbf{P}\mathbf{M}_{i_tmp}^{-1} \begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

ただし，(x_{wnd}, y_{wnd}) は再投影された 2 次元位置，$\mathbf{P}$ は左キャメラにおける射影行列である．この時，追跡中の特徴点の 3 次元位置は (B-4) にてマルチベースラインステレオ法を用いて推定された暫定値が，そうでない点は (A-3) にてステレオマッチングを用いた暫定値が使われる．つまり，全特徴点においてこの操作が行われる．よって，これまでに推定された特徴点の 3 次元位置と $\mathbf{M}_{i_tmp}$ が精度よく推定されている限り，特徴点の 3 次元位置とキャメラの位置関係を考慮した探索窓の設定が可能になり，ドミナントフローのみでは追跡できなかった特徴点を追跡可能にする．

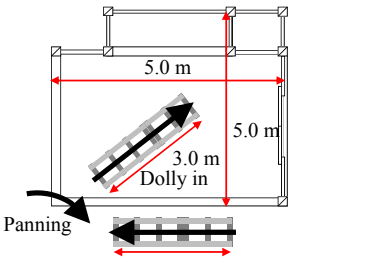
次に，ここで得られた 3D-2D の対応関係から，(B-1) と同様に PnP 問題を解き，現フレームでの最終的なカメラ位置姿勢 $\mathbf{M}_i$ を求める．また，ここでも，PROSAC 法を利用して誤対応を排除する．尚，$\mathbf{M}_i$ の推定精度が低く，再投影誤差の平均が $\mathbf{M}_{i_tmp}$ で求めたものよりも大きかった場合 $\mathbf{M}_{i_tmp}$ を最終的なカメラ位置姿勢とする．

(B-3) (B-2) で求めた最終的なキャメラの位置姿勢から求められる特徴点の再投影誤差が 5 px 以上の点は，誤対応点の可能性があるので排除する．

(B-4) 閾値 *th* フレーム以上追跡された特徴点に対して，追跡された全フレームにおける左画像とそこでの位置姿勢を用いて，マルチベースラインステレオ法により特徴点の 3 次元位置を推定し，ステレオマッチングにより求めた 3 次元位置を更新する．尚，



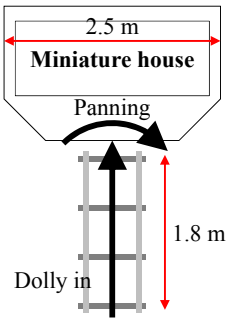
(i) 撮影用セット
(i) Set



(ii) 撮影用セットでのパス
(ii) Paths in the set



(iii) ミニチュアセット
(iii) Miniature set



(iv) ミニチュアセットでのパス
(iv) Paths in the miniature set

図 11　対象シーンと実験用キャメラパス
Fig. 11　Scenes and camera paths for examination



図 12　MR 合成結果（パンニング，
上：撮影用セット，下：ミニチュアハウス）
Fig. 12　MR composition
(Panning, Top: Set, Bottom: Miniature house)

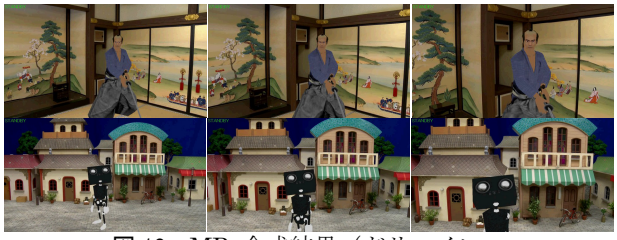


図 13　MR 合成結果（ドリーイン，
上：撮影用セット，下：ミニチュアハウス）
Fig. 13　MR composition
(Dolly in, Top: Set, Bottom: Miniature house))

この閾値 *th* は，キャメラワークによって適宜変更するものとする．

(B-5) 追跡開始フレームのカメラ位置，特徴点の 3 次元位置，追跡終了フレームのカメラ位置が成す角度が 3 度以上となる特徴点を LMDB に登録する．また，登録後の特徴点でも，継続して追跡し続けた結果，再投影誤差の標準偏差が 1 px 以上のものは誤対応の可能性を考慮して，LMDB から取り除く．

4.3 性能評価実験

4.3.1 実験目的と実験内容

本実験の目的は，提案手法を用いて，2.3 節で示したキャメラパス (a – c) でトラッキングが行えるかの確認，従来手法との精度比較，客観的な精度評価の 3 つを行うことである．本実験では，それぞれを以下の方法で確認する．

実験 1：MR 合成結果
実験 2：推定パスの可視化と再投影誤差の比較

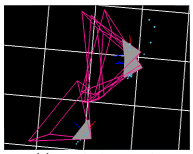
本実験での撮影対象は，実際の映画撮影を想定して，**図 11** に示した屋内の撮影用セットとミニチュアハウスとする．前者では (a – c)，後者では (a) と (b) を行う．尚，ステレオリグの基線長は，前者に対しては 400 mm に，後者の (a) に対しては 100 mm，(b) に対しては 200 mm に設定する．また，前節で述べた閾値 *th* は，経験則的に，(a) と (b) では 30 フレーム，(c) では 50 フレームとした．

4.3.2 実験結果と考察

【実験 1】撮影用セットとミニチュアハウスにおいて，(a) により構築した LMDB を利用して MR 合成した結果を**図 12** に，同様に (b) による結果を**図 13** に示す．尚，(c) に関しては，結果が確認しにくいため割愛するが，問題なく MR 合成できた．また，純粋な位置姿勢推定精度を確認するため左キャメラの画像のみを載せる．これらの結果から，(a – c) で，問題なく MR 合成できていることが分かる．よって，単眼キャメラを用いた従来手法では困難であったキャメラパス (a – c) において，提案手法が有効に機能することが確認できた．

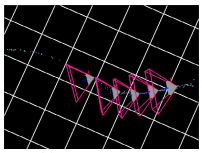
【実験 2】撮影用セットにおける，(a – c) での LMDB 構築時のキャメラパスをそれぞれ**図 14**，**図 15**，**図 16** に示す．図 14 では，従来手法を用いた場合，推定されたキャメラパスがパンを行っているように円弧を描いていないが，提案手法では円弧を描いていることが分かる．図 15 では，従来手法では，直線レール上を被写体に向かって移動しているようには描かれていない．一方で，提案手法はより高精度にそのパスが描かれていることが分かる．図 16 でも図 15 と同様に，従来手法を用いた場合，直線レールから外れるパスが存在するが，提案手法ではそういったことなく精確に推定されていることが分かる．

図 14 と図 15 の結果における，LMDB に登録されたランドマーク数と再投影誤差の平均と標準偏差を，**表 1** と**表 2** にそれぞれ示す．尚，図 16 の結果は他の 2 つと同様の傾向が見られたため割愛する．表 1 と表 2 の結果から，再投影誤差については，提



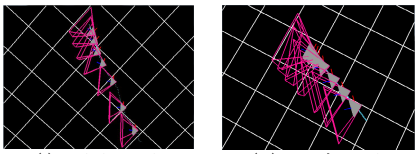
(i) 従来手法 (ii) 提案手法
(i) Conventional (ii) Proposed

図 14 推定されたキャメラパス（パンニング）
Fig. 14 Estimated camera path (Panning)



(i) 従来手法 (ii) 提案手法
(i) Conventional (ii) Proposed

図 15 推定されたキャメラパス（ドリーイン）
Fig. 15 Estimated camera path (Dolly in)



(i) 従来手法 (ii) 提案手法
(i) Conventional (ii) Proposed

図 16 推定されたキャメラパス（パンニングを含むトラック）
Fig. 16 Estimated camera path (Track with panning)

表 1 再投影誤差の比較（パンニング）
Table 1 Comparison of reprojection error (Panning)

	# LM	Reprojection error: mean (px)	Reprojection error: SD (px)
Conventional	165	1.51	0.83
Proposed	76	0.87	0.52

表 2 再投影誤差の比較（ドリーイン）
Table 2 Comparison of reprojection error (Dolly in)

	# LM	Reprojection error: mean (px)	Reprojection error: SD (px)
Conventional	146	2.03	1.34
Proposed	115	0.77	0.47

案手法の方が少ないことが分かる．また，提案手法での，登録された LM 数が従来手法よりも少ないのは，カメラ位置姿勢の推定誤差が少ないことから，同じ特徴点が重複して登録されていないためだと考えられる．

5. まとめ

本論文では，実際の映画撮影を想定した事前可視化システムである MR-PreViz の S3D 映画撮影用の拡張を行った．この拡張では，実用性を考慮したハードウェア面の拡張だけに留まらず，ステレオリグを利用した位置合わせ手法の改良というソフトウェア面の拡張も行った．ハードウェア面の拡張では，映画撮影でも用いられるステレオリグを製作及び導入し，ステレオリグの校正機能の追加により MR-PreViz での S3D 効果を試行錯誤できるようにした．また，ステレオ画像を扱うことで増加した画像処理負荷を軽減するために GPGPU を利用して高速化を施した．ソフトウェア面の拡張では，校正したステレオリグのエピポーラ拘束を利用することで，これまでトラッキングすることが難しかったキャメラパスでのトラッキングを可能にし，更に精度向上を達成した．最後に，実験を通してそれらを確認した．

以上より，S3D 映画制作を支援する MR-PreViz システムの技術基盤はこれで完成し，実用に供する態勢が整った．他に類のない研究開発であるので，会員読者の参考となるよう，実世界を対象とした本システムの設計方針・実装の技術的側面を記したが，今後実運用して行くとともに，撮影現場で遭遇する課題に対して分析・検討し，改善方法を見出して行く．また，位置合わせ手法に関して，遠景で視差が得られない場合のように，本手法での性能向上が望めないシーンへの対策等，更なる利便性と精度向上を目指した改良も予定している．

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 VR 学会誌，Vol. 15, No. 2, pp. 32 – 36, 2010.

[3] 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”，日本 VR 学会論文誌，Vol. 12, No. 3, pp. 343 – 354, 2007.

[4] S. Heinzle, P. Greisen, D. Gallup, C. Chen, D. Sander, A. Smolic, A. Burg, W. Matsusik, and M. Gross: “Computational stereo camera system with programmable control loop,” ACM SIGGRAPH, 2010.

[5] S. J. Koppal, C. L. Zitnick, M. F. Cohen, S. B. Kang, B. Ressler, and A. Colburn, “A view-centric editor for stereoscopic cinema,” *IEEE CG&A*, Vol. 31, No. 1, pp.20 – 35, 2011.

[6] M. Z. Brown, D. Burschka, and G. D. Hager: “Advances in computational stereo vision,” IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 25, No. 8, pp. 993 – 1008, 2003.

[7] 樋下航，一刈良介，天目隆平，柴田史久，田村秀行：“ランドマークデータベースに基づくカメラトラッキング法の高速化と安定化”，信学技報，Vol. 109, No. 373, pp. 255 – 260, 2010.

[8] Z. Zhang: “Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations,” Proc. ICCV, pp. 666 – 673, 1999.

[9] M. Okutomi and T. Kanade: “A multiple-baseline stereo,” IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 15, No. 4, pp. 353–363, 1993.

[10] 神原誠之，大隈隆史，竹村治雄，横矢直和：“ビデオシースルー型拡張現実感のための実時間ステレオ画像合成”，信学論 D-II，Vol. J82-D-II, No. 10, pp. 1775 – 1783, Oct. 1999.

[11] F. A. Moreno, J. L. Blanco, J. Gonzalez-Jimenez: “Stereo vision-specific models for particle filter-based SLAM,”

Robotics and Autonomous Systems, vol. 57, no. 9, pp. 955 – 970, 2009.
[12] D. Wagner, T. Langlotz, and D. Schmalstieg: “Robust and unobtrusive marker tracking on mobile phones,” Proc. ISMAR, pp. 121 – 124, 2008.
[13] B. Mandebru: “3D movie making: Stereoscopic digital cinema from script to screen,” Focal press, 2009.
[14] F. Moreno-Noguer, V. Lepetit, and P. Fua: “Accurate non-iterative O(n) solution to the PnP problem,” Proc. ICCV, pp. 1 – 8, 2007.
[15] O. Chum, and J. Matas: “Matching with PROSAC - progressive sample consensus,” Proc. CVPR on CVPR, Vol. 1, pp. 220 – 226, 2005.

（2012 年 2 月 27 日受付）

[著者紹介]

森 尚平（学生会員）



2011 年立命館大学情報理工学部メディア情報学科卒．現在，同大学院博士前期課程在学中．複合現実感による両眼立体視可能な事前可視化システム，コンピュータビジョン，隠消現実感の研究に従事．

一刈 良介（正会員）



2005 年立命館大学理工学部情報学科卒．2010 年同 大学院理工学研究科博士後期課程修了．博士（工学）．同総合理工学研究機構ポストドクトラルフェローを経て，2012 年 4 月より，南カリフォルニア大学 Institute for Creative Technologies, Postdoctoral Research Associate．複合現実感，コンピュータ・グラフィックス等の研究に従事．IEEE，ACM SIGGRAPH，電子情報通信学会，映像情報メディア学会の会員．

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准教授．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，同情報理工学部メディア情報学科教授．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．