

時系列複合現実感 (Timeline MR) の 概念形成と諸問題の考察

柴田 史久*¹ 入田 真帆*² 萩尾 恭兵*²
村上 鉄郎*¹ 木村 朝子*¹ 田村 秀行*³

Abstract --- We propose a novel technology “Timeline Mixed Reality (TL-MR),” which is an advanced form of AR/MR technology. This is a technology in which the temporal axis is introduced to the conventional AR/MR and it replaces only the region of interest in the current scene with the past real scenic imagery. In this paper, after clarifying the concept and significance of this new technology, we discuss challenging problems to be solved and user interface design for interactive TL-MR experience. We have developed two prototypes of outdoor TL-MR system and report the result of applying them to the real scene.

Keywords: mixed reality, diminished reality, timeline MR, systematic data acquisition

1 はじめに

日本バーチャルリアリティ学会が設立されたのは1996年3月であるが、その傘下で、早くも翌年7月に「複合現実感研究委員会 (SIG-MR)」[初代委員長：田村秀行]が発足している。通産省(当時)管轄の特別認可法人基盤技術促進センター出資事業として、「複合現実感システムに関する研究開発」(通称、MR研究プロジェクト)[研究期間:平成8~12年度][1][2]の開始に呼応して、その技術諮問委員会委員が中心となって設置されたものであった。

爾来、SIG-MRは活発な活動を行い、AR/MRは学会内で最も活気のある分野の1つとなった。既に8回もの論文誌特集を企画・実施し[3]、研究会開催は今回で62回を数える。当該分野で最も権威ある国際研究集会 ISMAR (Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality)を支える存在であり、長年日韓2国間でのKJMR (Korea-Japan Mixed Reality Workshop)も主催してきた。近年地域を拡大して、これをAPMAR (Asia-Pacific Workshop on Mixed and Augmented Reality)へと発展させている。上記「MR研究プロジェクト」と加藤博一博士が開発されたARToolkit[4]が世界を先導し、日本の存在感を大いに高めたが、その遺産を継承し、現在の我が国を取り囲む世界情勢に相応しい活動を続けている。

一方、本稿の共著者の1人(田村)が「複合現実感」の命名者であり、ISMARの設立者の1人であったことから、2003年立命館大学への着任時に、同

時に着任した柴田・木村が加わって、「MR研究拠点」を形成した。立場上、AR/MR技術の啓蒙活動、新たな研究の方向性提示を求められることが多く、少し背伸びしながら、先端研究開発と同時に技術デモ展示や広報活動を重視してきた。

例えば、2005年の「愛・地球博(愛知万博)」の日立グループ館のメイン企画の総合プロデューサーを依頼され、当研究室の成果を活用して開発されたMRアトラクションは、半年間で180万人が体験するところとなった。また、MR技術を映画制作での事前可視化に活用する「MR-PreViz」[5]はJSTのCRESTに採択され、その研究成果はハリウッドのVFX業界に少なからぬ影響を与えた。

AR/MR技術を発展させた研究テーマとしては、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)を提唱し、その基幹技術体系の整理や研究課題の明確化を進めてきた[6]。AR/MRが現実と仮想の「足し算」であるのに対して、DRは「引き算」である。単なる逆演算ではなく、完成度の高い実現は圧倒的に難しい。それゆえ、挑戦し甲斐があるテーマである。

VRの出現から30年余、SIG-MRの発足から20数年経つ。近年のVRブームの中で、AR/MRの実用化も本格化し、その用途の広がりには今昔の感がある。当然、学会委員会の立ち位置としては、更なる先端技術を求める声に応えなければならない。

本稿の筆頭著者(柴田)は、SIG-MRの現委員長の立場から、更なる背伸びをして、MR & DRの次なる発展形として「時系列複合現実感(TL-MR)」を提唱する。先人達の20年余に研究努力の産物の

*1 立命館大学 情報理工学部

*2 立命館大学大学院 情報理工学研究科

*3 立命館大学 総合科学技術研究機構

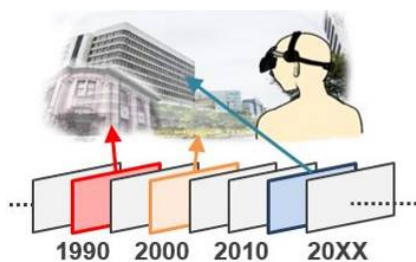


図1 タイムライン MR の概念図
 Fig.1 Concept of Timeline MR



図2 タイムライン MR 体験のイメージ
 Fig.2 Supposed style of Timeline MR experience

上に、次なる 20 年先の本格実用化を目指した挑戦課題を設定するという位置づけである。

本稿の以下の部分では、まずその定義、意義や想定できる用途を述べる。続いて、TL-MR の概念形成を行い、現時点で考えられる研究課題を挙げ、我々が試みた系統的観測と試体験の結果を考察し、何が難しいか、どこからアプローチすべきかを語る。

2 タイムライン MR の意義と用途

2.1 タイムライン MR とは？

正式名称を少し固い「時系列複合現実感」としたが、以下では、積極的に別称の**タイムライン MR (Timeline MR)**や略称の**TL-MR**を用いる。従来の MR が現実と仮想の実時間融合であるのに対し、**タイムライン MR**は時間軸上の複数点での実光景の融合表示を実現する。即ち、時間差のある「リアル+リアル」の合成である。

厳密に言えば、ここで我々が提唱する TL-MR の基本形では、時間軸上の任意の 2 時刻間の融合ではなく、片方は現在時刻であり、対象は体験者の眼前の光景である。AR/MR、DR と同様、体験者の立ち位置での現実世界を実時間対話形式で操作できることが必須条件であり、現実世界中の指定した注目領域（複数可）を過去の実世界映像に置き換える融合処理を達成するものである（図1）。MR が「足し算」、DR が「引き算」であるなら、TL-MR は過去の画像での「置換演算」であると言える。

現実空間を観測した素材データを、時刻を超えて自在に編集や加工を施し、融合表示をする際に MR 技術や DR 技術が必要となる。この新概念を具現化するためには、時間と共に変わり行く現実世界の光景から、3D 形状モデルとテクスチャをどのように獲得し、記憶しておくかが重要であり、この目的に合致した実世界光景の観測・蓄積・加工の技術体系を構築して行く必要がある。

2.2 関連技術や類似した利用法との比較

本 TL-MR に対しては、誤解も多いため、類似技

術と比較して、その意義を説明する。

■ 定点から間歇的に観測した静止画像を連続再生して、時間変化を超高速で見せる手法は、植物の生育状態観察等でよく用いられている。定点での系統的観測でなく、インターネット中に存在する撮影時期が異なるほぼ同一地点の多数の画像から、時間経過の高速再生を試みた研究例は既に存在している[7]。我々の TL-MR では、現在の光景の部分的な置き換えが可能で、（事前観測データが整っていれば）体験者の視点移動も可能である。

■ フル CG の VR 空間での未来の景観シミュレーションは定番であり、目の前の更地に建築予定の CG 製のビルを MR 合成するのも類した応用である。未来はいくらでも CG 合成できる。過去の実光景を現在に重ねるのが我々の TL-MR である。古代の建物を CG で再現し、遺跡の現場で AR/MR 合成する試みも頻繁に行われている[8]。時代考証は行っても、実際にその当時観測した光景ではない。

■ 一方、図2は体験時の現実の光景の一部を 1 年 4 ヶ月前の状態に擬似 TL-MR 処理した例である（この例は、オフラインのマニュアル処理）。2 棟の高層ビルの内、右手前のビルの建築中の観察映像から、そのビルだけを工事中の状態に戻している（工事中のビルにはクレーンがあり、左奥のビルの壁面が見える）。この例では、ビル 1 棟だけの処理例を示したが、1 シーン中の複数対象物や領域の、時間軸上の複数の出来事を扱い、効率良く、魅力的な情報提示を行なうのが TL-MR である。

2.3 用途と利用価値

TL-MR の応用として、まず考えられるのは、景観を重視する建築・都市計画・防災等の分野だろう。さらに、歴史教材の提示や、時間経過が意味をもつ考古学、スポーツ科学、医学等にも活用されて行くと思われる。観光目的にも有望で、現在の光景の一部を古き良き時代の景観に置き換える利用法は、人気を博すことが予想できる。

我々が期待を寄せているのは、豪雨による土砂崩

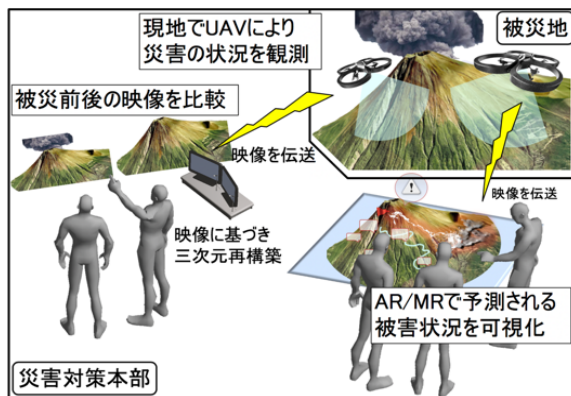


図3 大規模災害時の TL-MR の利用形態
 Fig.3 Usage of TL-MR at big disaster

れ、噴火や地震災害のような大規模災害時の緊急対策での利用である(図3)。ドローンで撮影され、地上にライブ送信されてくる映像に対して、災害前の地勢データの上に、災害発生時からの被災状況を順次 TL-MR 提示することにより、その後の適切な対策を考える一助となるだろう。一大学でできる実証実験ではないので、社会的関心を集め、大規模な観測計画態勢へと繋がることを期待している。

3 タイムライン MR の概念形成

3.1 対象世界と構成要素の分類

単純化して「リアル+リアル」と述べたが、違う時期に(一般的には)違う観測機器で実世界を捉えるゆえに、その融合は易しくない。対象領域がどのような形状や反射特性を有しているかでも、解決すべき問題の難易度は、大きく異なる。

いきなり万能の技術体系は作れないので、TL-MRの基幹技術を考えるために、体験者視点での実時間MR&DR処理を前提として、まず対象世界と取得画像を以下のように分類することから始めている。

■対象世界の分類 Structured vs. Unstructured: 現実世界の構成要素の大半が、幾何形状と表面属性を記述し得る(即ち、CG描画可能な)場合を「Structured」、それが全くできない場合を「Unstructured」とする。その間に数段階の中間形態を定義することを許容し、それを順次詰めて行く。

■シーン中の構成要素の分類: こちらは、第1段階として、以下のような分類から始めている。

- (1) SSSO (Simple Static Solid Object): 建築中のビル等、ある時刻では静止した剛体で、時間軸上の変化は許容するものとする。
- (2) RMC0 (Roughly Modeled Complex Object): 表面形状が複雑で正確なモデル化不能だが、ラフに外接多面体近似が可能な対象物。山や隙間なく葉がある樹木等がこれに相当する。
- (3) URAI (Unrenderable Remained Area on Image): 画像上で上記の2領域を除いたCG描画が

困難な残存領域。今後、上記の定義を増やして行くと、残存領域は減少する。

(4) S&G (Sky and Ground): 上記(3)の内、空と地面を別扱いして、観測画像中では特別にマークアップしておく。

3.2 観測&体験の3タイプ×3ステップ×2モード

TL-MR 体験には、対象となる関心領域に時間軸情報が含まれていることが前提であり、体験場所の選択や TL 情報の提示方法にも工夫が必要である。体験方法を整理しつつ、以下のように分類してアプローチすることにした。

【体験者視点と眺め方の3タイプ】

視認対象となる光景の眺め方/観測方法には、次の3つのタイプが存在すると考えている。

【タイプI】TL-MRの基本形である。地上のある地点で、体験者がHMDを装着するか、もしくはタブレット端末をかざして目の前の光景を眺める(これはAR/MRと同じ)。この視野内で、興味のある比較的少数の対象領域の時間的変遷を観る。

【タイプII】ビルの高層階、展望台、飛行船等から体験者が眼下の光景を俯瞰的に眺める場合で、タイプIよりも広域で、多数の建造物等の全部または一部を選択して、変遷を閲覧する。体験用の機器としては同じであるが、視野内の含まれる対象物が増えるので、当然、そのタイムライン情報も増えるので、後述のUI設計は変わらざるを得ない。

【タイプIII】山頂設置の定点カメラやドローン搭載カメラからの観測映像をネット経由でライブ送信し、離れた場所にいる人間が映像モニターでTL-MR体験する。VRにおけるテレプレゼンス体験のTL-MR版と考えられる。体験者の眼前の光景を扱うという狭義のTL-MRには属さないが、前掲の図3のような用途がこれに相当し、応用分野は広がる。

【TL情報確認・選択手順の3ステップ】

TL-MR 体験時に提示され、体験者が情報選択する手順は、以下の3ステップを想定している。各々の工夫については、4.2節でも述べる。

(Step 1) TL情報が存在するスポットの表示: 体験の対象となる景観に対して、時系列情報(変化のあった時点の画像とその付帯情報)が存在する建築物や領域を、記号化してAR重畳表示し、体験者に視認したい場所を選択させる。

(Step 2) 選択スポットの時間的変遷の表示: 体験者が選択したスポットでの時間軸上の履歴(年表情報)を提示し、体験者はその全部もしくは一部を、TL-MR体験の対象として選択する。

(Step 3) 履歴中で選択された事象のTL-MR体験: 上記の履歴から選択された時間事象が、TL-MR体験の対象である。その事象に対応する画像データを

画像 DB から抽出し、しかるべき変換を加え、MR/DR 処理を施すことにより、図 2 右のような TL-MR 表示を達成する。

【体験時に景観を視認する 2 つのモード】

(a) **ライブモード**：体験の基本形は、AR/MR や DR 体験と同様に、対象景観の視認も TL-MR 情報提示も、(HMD でもタブレットでも) すべて同一画面に必要な情報をリアルタイム提示するモードである。当然、体験者視点の移動への実時間追従は易しくない。TL 情報の確認・選択を行う TL-MR 体験にとってオール・ライブのこのモードが有効とは限らない。
 (b) **フリーズモード**：対象景観を一旦静止画像として画面キャプチャをし、そのフリーズ状態で上記の (Step 1) と (Step 2) を実行するモードである。この方が TL 情報提示も選択もやりやすい。そのままフリーズ状態で (Step 3) を実行することも、ライブモードに戻って (Step 3) を体験することも、いずれも有り得る実行形態である。

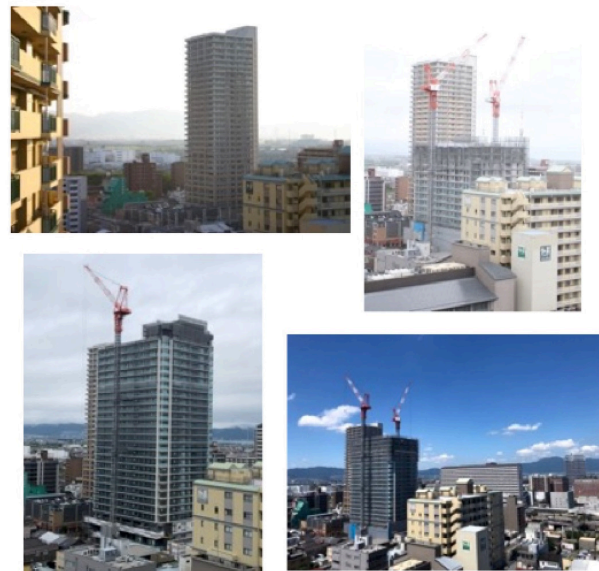


図 4 異なった時期に複数のカメラで撮影した画像
 Fig.4 Images acquired from various cameras at different date

4 研究課題と想定される問題点

4.1 TL-MR 用実世界光景の効率的な蓄積・管理

タイムライン MR 体験を魅力的なものにするには、中長期間に渡って、過去の現実世界の景観を観測・記録しておく必要がある。東京五輪のための新国立競技場建設や東京・渋谷駅前地区の大再開発級となると、計画的な観測も可能だが、一般的な市街地や自然景観ではそれも難しい。

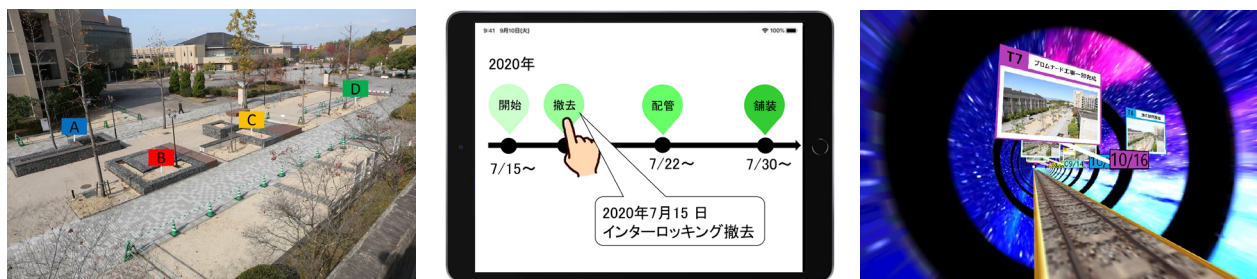
図 4 は、図 2 のために撮影した画像群の一部である。意図的にカメラも日照条件が異なる日に撮影している。完全な定点観測が実施できるのなら、それに越したことはないが、それでも体験時の視点が異なれば、個別の幾何位置合わせが必要となる。ましてや、画角や光学諸条件が異なるカメラで、自由な視点から撮影された画像群からの実時間 TL-MR 処理は、かなり困難な課題となる。撮影画像の変換・加工が必要となり、事前取得した大量の画像データの管理方法も本研究の大きな課題である。

4.2 現在と過去の実時間の効果的な融合表示

前節の課題を達成するには、裏方としてのかなりの研究努力が必要となるが、TL-MR の有効性や魅力をアピールするには、魅力的なキラーコンテンツの登場や TL-MR システムの心地よい操作性も必要と考えられる。そうした意図から、TL-MR に適した様々な UI デザインの検討も始めている。

図 5(a) は、3.2 節で述べた (Step 1) の比較的簡単な AR 表示例で、TL 情報を有する場所を示している。複数の建物がある景観の場合は、各建物の輪郭を強調表示したり、カラーの半透明板を重畳表示する方式等が考えられる。画面内に多数の候補領域がある場合は、AR 表示が重なり合わずに工夫が必要となり、所謂 View Management の出番となる。

図 5(b) は (Step 2) の具現化例である。左は単純な年表提示例で、これだけで内容を想像できるユーザにはシンプルな UI が好まれる。右は所謂タイムトンネル式表示で、時間軸トンネルを進むに連れて TL 情報が表示される移動進行型年表である。



(a) 提示対象の位置選択画面 (b) 期日指定画面 (左：簡易型年表, 右：タイムトンネル表示)

図 5 タイムライン MR 体験時の情報提示・選択操作の画面例

Fig.5 Screen example of information presentation and target selecting operation in Timeline MR experience

(Step 3)を含む TL-MR 体験全体では、単に固定場所での静的な重畳表示だけでなく、動的表現、透視や DR 処理を導入した視覚効果(VFX)、視点移動が可能な実時間臨場体験への拡張が考えられる。

5 プロトタイプ開発・試体験からの考察

上記のような概念形成、研究課題の整理を経て、体験システムの試作、試体験に臨んだ。

(1) 撮影対象；キャンパス内での改修工事

幸いにも、計画的に系統的撮影が可能な事象として、身近な学内でキャンパスプロムナードの大規模改修工事が行われた。造園工事が中心で、駅前再開発のような建造物ではなく、著名観光地の時代変化ほどコンテンツとしての魅力はないが、同時進行でその経過を撮影できる貴重な機会であるので、これを撮影対象とした。

- ・工事期間：2020年7月中旬から約3ヶ月+2ヶ月後、4ヶ月後に植栽追加。撮影日は計24日間。
- ・観測地点と撮影方法：建物の屋上、階段の踊り場からの静止画像俯瞰視点撮影、地上で歩きながらの全周カメラでの動画撮影。
- ・撮影条件：主たるスチル画像撮影は、ほぼ同一位置に三脚を設置し、一眼レフカメラ(Canon EOS 5D Mark III)で準定点観測。シャッター速度は1/250秒、絞り値はf/8に固定し、当日の天候に応じて、ISO感度を調整した。雲台を手動操作でパン、チルトし、視点を変化させた。レンズはCanon EF24-70mm F4Lの広角端と望遠端のみを使用。

(2) 蓄積したデータの品質の初期検討

図6は、屋上からの準定点観測画像の代表例である。完全固定の定点カメラ設置を申請せず、この方

法を採用したのは、マニュアル操作での誤差を吸収できるかを試す目的からである。

マニュアルでのカメラ位置姿勢の誤差は僅かであるが、幾何学的補正が必要となる。紙幅の制約から詳細は省くが、各画像中で工事区間以外の変換箇所から特徴点を選び、ホモグラフィ変換を施すことで、完全ではないが、かなりのレベルの幾何位置合わせが達成できた。複数画像の貼り合わせ目的には、写真測量用の機材が必要となるが、画面中央部付近の注目領域を切り出して TL-MR 重畳する目的には許容できるレベルであると評価している。

一方、各画像の光学的品質に関しては、明らかにその日の天候に左右されている。図4のような意図的に日照条件が異なる日に、露出値を調整せずに撮影した場合ほど顕著ではないが、TL-MR 体験時にその日の日照条件に合わせ込む光学的整合処理は必須と考えられる。

図7は、工事中に著しく視覚的に変化した特定対象(地下からの湧き水を利用して、水景観を与える小型建造物)の切り出し例である。この工事過程を見て楽しいかは不明だが、TL-MR 処理の対象には十分なり得ると考えた。

(3) 屋外 TL-MR 体験等プロトタイプ開発

HMD ベースとタブレット端末ベースで、2つのプロトタイプ・システムを開発・運用した。

最近、様々な HMD の市販されるようになったのは嬉しいが、まだ屋外で MR 体験するのに十分な商品は存在しない。高精度のヘッドトラッキング機能を有するものは光学 ST 方式であったり、ビデオ ST 機能有する HMD の場合は、屋外での AC 電源の利用に難があったりするためである。我々はプロトタ



図6 屋上からの準定点観測による工事区間の俯瞰画像
 Fig.6 Bird's-eye view image of the construction section by quasi-fixed point observation from the roof

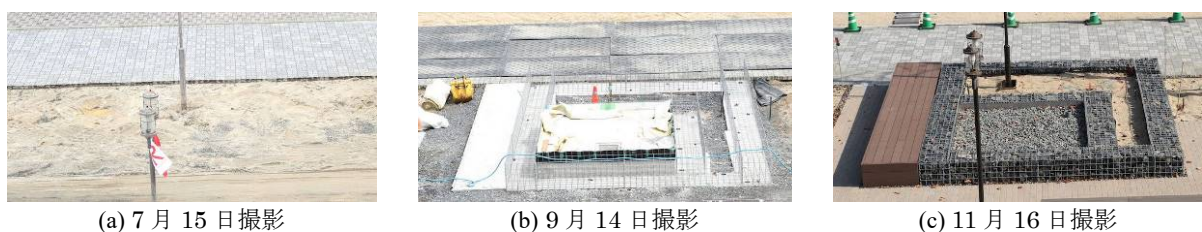


図7 注目領域(水景構造物)の工事過程の抽出結果
 Fig.7 Extracted results of the construction process of the region of interest (waterscape structure)

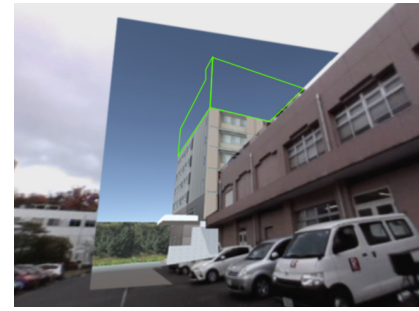


図8 タブレット端末での TL-MR 画面
(赤点線内を図7(b)に置き換えている)

Fig.8 TL-MR image on a tablet device



(a) HMD 搭載カメラでの実光景



(b) 奥のビル過去の状態

図9 HMD を利用した TL-MR 体験

Fig.9 TL-MR experience by a head mounted display

イブ開発に、HTC 社の VIVE Pro を利用した。

一方、スマートフォンと同じ OS を搭載したタブレット端末には充実した AR 機能を有するものが多く、そのメリットから、今回は Apple 社の 11 インチ iPad Pro を利用した。開発環境としてはいずれも Unity 2019 を利用している。

(4) 2つの TL-MR 実施&検討例

【TL-MR 実施例 1】階段の踊り場から、3つの水景構造物を含む景観を俯瞰視点で眺める体験である。タブレット端末をフリーモードで利用し、真ん中上部の構造部に予め用意した図7の画像群を次々と TL-MR 表示する。図8は図7(b)をフリーモードで当日の景観中に重畳表示している(赤い破線内)。ほぼ幾何位置合わせは達成しているが、長方形画像を重ねただけなので、その周辺部は背景とマッチしていない。静止画を熟視すると気がつくが、多数の TL-MR 画像を順次切り替えて見ていると、そうした不具合は余り気にならない。

【TL-MR 実施例 2】図9は HMD による実施例で、図2でイメージした体験を学内のある地点で実行しようとした例である。図9(a)は両眼立体視できる HMD の左右統合した画面例で、内蔵カメラによる現地景観である。内蔵カメラの性能から、あまり高画質ではない。図9(b)はその建設中の様子(7階以上がない)の TL-MR 表示である。HMD 内蔵カメラが低画質のため、過去に撮影した壁面テクスチャの画質も劣化させている。ただし、この単純な TL-MR 合成では、ビル壁面の色調だけでなく、空の色の違いも気になる。高レベルの TL-MR には、体験当日の日照に合わせた光学的整合が必要となる。

6 むすび

AR/MR/DR 技術の発展形として、新概念「時系列複合現実感(タイムライン MR)」を提案し、その概念形成の過程を示し、基本技術体系と研究課題の整理を試みた。従来の AR/MR や DR に比べて、時間軸を導入しただけで、問題は一気に難しくなるが、

約20年後の本格実用化を想定したテーマである。

提案者として、まずは現場の同時進行での系統的観測も試作システム開発も経験したが、まだまだ技術的に未熟であり、現時点では考えれば考えるほど難しく感じる。その一方で、TL-MR に適した用途を選び、その特性に応じた使い方をすれば、すぐにも関心を集める研究事例が作れるとも思える。

通常の研究発表とは異質の提案となったが、本稿が若い研究者の進むべき道標となれば幸いである。

謝辞 研究室内の隣接グループに属する大学院生・木村勇斗、学部生・結城大雅、任曉婷の諸君には、本研究に連携して各種作業を分担してもらったので、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 田村秀行:複合現実感研究プロジェクト, 計測と制御, Vol. 14, No. 9, pp. 645 - 648 (2002)
- [2] H. Tamura, H. Yamamoto, and A. Katayama: Mixed reality: Future dreams seen at the border between real and virtual worlds, *IEEE Computer Graphics & Applications*, Vol. 21, No. 6, pp. 64 - 70 (2001)
- [3] 「特集:複合現実感1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8」日本VR学会論文誌, Vol. 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25 (1999, 2002, 2005, 2008, 2011, 2014, 2017, 2020)
- [4] 加藤博一, M. Billinghamurst, 浅野浩一, 橋啓八郎: マーカー追跡に基づく拡張現実感システムとそのキャリブレーション, 日本VR学会論文誌, Vol. 4, No. 4, pp. 607-616 (1999)
- [5] 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 (2010.6)
- [6] 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~, 同上, Vol. 16, No. 2, pp. 239 - 250 (2011)
- [7] R. Martin-Brualla, D. Gallup, and S. M. Seitz: 3D Time-lapse reconstruction from Internet photos, *Int. J. Computer Vision*, Vol. 125, Issue 1-3, pp. 52 - 64 (2017)
- [8] 遺跡整備・活用研究会: 「デジタルコンテンツを用いた遺跡の活用」, 奈良文化財研究所 (2016)