

防災研究・防災対策のための複合現実型情報提示 - ジオラマを利用した体験型動的ハザードマップ -

田村 秀行^{*1} 柴田 史久^{*1} 木村 朝子^{*1*2}
坂井 陸一^{*1*3} 横江 祥吾^{*4} 濱田 純也^{*1*5} 家崎 明子^{*1}

Mixed Reality Based Information Presentation for Disaster Prevention Studies and Disaster Measures
- Showing an Interactive Dynamic 3D Hazard Map Superimposed on Diorama -

Hideyuki Tamura^{*1}, Humihisa Shibata^{*1}, Asako Kimura^{*1*2}
Rikukazu Sakai^{*3}, Shogo Yokoe^{*4}, Junya Hamada^{*5}, and Akiko Iesaki^{*1}

Abstract - Mixed-Reality, a technique to superimpose CG images on the real scene, is expected as a new way of information visualization and presentation. We take up "Disaster Prevention Studies and Disaster Measures" as new application field of MR technology, and develop a system of visualizing simulations of the disasters that have occurred previously or have a possibility for occurring in the future. First, we developed a system of superimposing CG images on a diorama (geographical miniature model). Next, we implemented the application to observe the flood or fire simulation results or subsurface construction, and confirm the effectiveness. We also built an application to observe the history of fire disaster on the PC or MR space. Furthermore, we offer another suggestion that is the way to expand this system to mobile type to use it outdoors.

Keywords: Mixed Reality, Information Visualization, Disaster Prevention, Diorama,

1. はじめに

現実空間と仮想世界を融合する複合現実感 (Mixed Reality; 以下 MR) は、近年活発な研究開発が行われ、既に医療、建築・都市設計、工業製品の設計・組立、対話型エンターテインメント等への応用が試みられている[1][2]。MR 技術は人工現実感 (Virtual Reality; 以下 VR) の発展形であるが、実世界の自然な光景にも人工的な工作物上にも、コンピュータで生成した多様な電子データを重畳して表現できることから、フル CG 画像を用いる (狭義の) VR よりも用途は広く、新しい情報提示技術として期待されている。

我々は、MR 技術の新しい応用分野として、防災研究・防災対策を取り上げて研究を推進している。近年、かけがえのない人命や文化遺産を守るための防災対策や、万一災害が発生した場合にその影響を最小に食い止めるための防災研究への関心が高まり、

同分野から MR 技術の導入が強く要請されたためである。情報技術側から見れば、防災という目的は明確であるが、不正確な情報提供が許されない厳しい課題でもある。従って、このような課題に耐え得るように開発・改良された情報提示技術は、他の用途にも広汎な波及効果をもたらすことが期待できる。これは、情報提示技術の 1 つである MR 分野にとっても同様であり、そうした視点からこの応用分野を積極的に研究対象とすることは意義があると考えられる。

この分野への MR 技術応用は、想定災害現場での防災訓練、携帯情報端末への MR 情報提示を用いた避難誘導、災害後の設備復旧支援[3][4]等、様々な利用形態が考えられる。本研究では、そうした防災分野からの要望や要求水準を分析しつつ、実物体としてジオラマを利用し、その上に様々な想定災害や被災史の様子を MR 重畳表示して観察するシステムを開発した。その防災研究上の意義は後述するが、MR 技術側から見れば、静止しかつ表面に細かな凹凸や模様のある物体上への CG 映像表示が求められるので、現実空間と仮想空間の高い幾何位置合わせ精度が必要となる対象である。我々は、こうした具体的課題を解決することにより、MR 技術がどのように防災分野に受け入れられたかの実例を紹介することが、MR 研究分野にとっても意義深いと考える。

^{*1} 立命館大学情報理工学部

^{*1} College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

^{*2} 現在、独立行政法人科学技術振興機構 さきがけ

^{*2} PRESTO, Japan Science and Technology Agency

^{*3} 現在、株式会社セガ

^{*3} SEGA Corporation

^{*4} 村田機械株式会社

^{*4} Murata Machinery, Ltd.

^{*5} 現在、富士通エレクトロニクス株式会社

^{*5} Fujitsu Electronics Inc.



図 1 平面型ハザードマップ
Fig. 1 2D hazard map



図 2 立体型ハザードマップ
Fig. 2 3D hazard map

(消防防災博物館の Web ページ[7]より)

本論文では、まず第 2 章で主として想定災害のシミュレーション結果をジオラマ上に表示する MR システムについてその目的・意義を述べ、第 3 章で具体的なシステムや位置合わせ手法について述べる。第 4 章では、大量降雨による洪水と地震後の火災延焼シミュレーション結果の可視化と MR 表示を、第 5 章では地中の状況や被災史等を同様な MR 表示した結果について述べ、この結果、防災分野の専門家からはどのような評価を受けたかについて報告する。

2. 防災情報の MR 情報提示の意義

2.1. 大規模災害に備える MR 情報提示の形態

世界的に大規模災害が話題になる中、防災研究は多岐に渡り、最新技術を駆使して活発な研究が推進されている。情報通信技術関連では、とりわけ緊急時に局地に柔軟に通信網を構成できるアドホックネットワークなどの研究は活発である。その半面、土木・建築や都市工学を中心とした防災関連研究者の間で標準的に利用されているのは、市販の地理情報システム (Geographical Information System) の限られた機能であり、可視化技術・情報提示技術に関しては必ずしも最新技術が活用されていない。

VR 技術の応用としては、過去に火災発生時の仮想体験等が注目され、HMD 装着型や没入型スクリーンによる方式での利用例がある[5][6]。一方、MR 技術の応用事例はなく、MR 技術そのものも知られていない。防災研究・防災対策の有力関係者との交流で、MR 技術の特質を解説したところ、現実の光景や実在する物体に CG 映像を重畳表示でき、かつ実時間で視点移動できること、表示データを更新可能であることに大きな関心が寄せられた。数度にわたる議論の結果、特に意義があるとされたのは、以下のような用途である。

(a) 災害発生前の効果的情報提示：洪水・火災・土砂災害等のシミュレーション結果の想定現場での提示、地域住民への広報、都市基盤整備・災害対

- 策研究での多様なデータ表示等での MR 利用
- (b) 災害発生時の最新情報提示：被災時の避難誘導や 2 次災害を防ぐ措置等のために、最新の更新情報を現場の光景に重ねての MR 情報提示。
- (c) 災害発生後の適切な情報提示：大規模地震等の後に、ライフライン中心とした重要設備の被害状況の点検・復旧作業の支援のための MR 表示。

2.2. ジオラマへの動的ハザードマップ重畳表示

上記の中でも早期の実現が期待されたのは、(a)であり、防災研究の重要な成果である災害予測を可視化し効果的に見せる技術である。

現在広報目的で配布されているハザードマップは、豊かな表現力をもっているとは言い難い。その大半は、平面の地図上に災害範囲を塗りつぶしたのや、災害箇所を示したもの、グラフや数値データ等が表示されているに過ぎない(図 1)。平面地図は見慣れた地理情報との関連がつけやすいが、リアリティに欠け、住民に危機意識を与えにくい。鳥瞰視点で描いた立体型ハザードマップ(図 2)は視認性が増すが、時間的な変化までは表現できない。

一方、3D-CG で想定災害をアニメーション化したムービーを製作し、大型画面で提示すれば一気に説得力は増すが、そこまでの設備と経費を投入するならば、その場で視点や条件を変えて災害の様子を観察したいという要望が多くなる。動的なハザードマップを表示したい。それを防災対策会議や住民へのアピールに利用したいという声は、防災研究目的以上に、行政関係者から寄せられている。従来の情報提示手法に比べて、MR 技術が魅力的な体験型プレゼンテーションを提供できるという点が注目されている。

MR 技術の最も魅力的な用途としては、過去の災害や想定災害の現場に出かけ、実世界の光景に CG 製の想定災害を融合した屋外体験が思い浮かぶ。しかし、防災関係者の要望はもっと広範囲を俯瞰でき

ることであり、それも屋外の実光景に想定災害映像を融合させることよりも、対象地域のジオラマ（地形縮小模型）に CG 映像を MR 重畳表示することであった。

ジオラマ利用が好まれ、優先される理由としては、以下のように考えられる。

- (1) 平面地図に比べて、圧倒的に対象地域を識別しやすく、災害の規模も把握しやすい。換言すれば、行政担当者や地域住民にとっては、一見するだけでメンタルモデルが構成しやすい。地図上の多色刷りやモニタ表示に比べて、実物感のあるジオラマに異質な CG 映像を重ねることで、災害のみを注目しやすい。
- (2) 映像モニタやスクリーン上への動的ハザードマップ表示に比べて、ジオラマを床面や机上に設置し、対象地域を見下ろす形で複数人が同時体験できることは、防災対策会議でも効果大きい。
- (3) 高台からの眺望を利用した MR 体験は魅力的ではあるが、場所的制約が大きい。ジオラマならば、周囲のどの方向からでも観察できる。また想定災害を重畳表示しない場合でも、展示の意義があり、防災センター等への設置する価値がある。費用効果比も大きい。

一方、MR 技術側にとってみれば、縮小模型上への地理情報精度での CG 映像の重畳描画には、現実と仮想の高い位置合わせ精度が要求される。背景との間に距離があり、空中浮遊する CG 物体を合成する場合は容易であるが、静止した物体に密着し、CG 映像がブレない安定した MR 描画は難易度が高い。著者らの研究グループでは過去 20 例以上の MR システム構築経験があるが、これまでで最も精度と安定性を求められる課題であり、挑戦しがたい対象となった。

3. ジオラマへの MR 提示に適した位置合わせ法

3.1. ジオラマを用いた MR システム

災害の研究対象は京都市内とし、三条大橋付近を中心とした 6km × 5km の領域をカバーする縮尺 1/4,000 のジオラマが選ばれた（図 3）。本研究は 21 世紀 COE プログラム「文化財を核とした歴史都市の防災研究拠点」の一部として実施されたので、このジオラマには、市街地部分に鴨川や主要道路、代表的な建築物、神社・仏閣が、ほぼ正確な位置に作り込まれている。この縮尺では、家屋等を精密に再現するのは難しくコストもかかるので、その他一般のビルや家屋等はデフォルメして、京都市街地であることを識別できる程度に表現されている。即ち、京都市民であれば容易に場所の特定ができ、メンタルモデル構築を促進されるように作成されていると言える。

MR システムの体験者は、ビデオスルー HMD (Canon VH-2002) を使ってジオラマを覗き込むことで、PC で作成された CG 映像をジオラマ上に重畳描画された光景を眺めることができる。複数人の同時体験が可能であり、いずれかの体験者が観察している MR 映像を別の大型モニタで見るのが可能（3D ディスプレイがあれば、両眼立体視も可能）である。

現実空間と仮想空間の位置合わせ手法のベースとして、過去最も経験と実績のある磁気センサとマーカ認識のハイブリッド方式[8]を採用した。磁気センサによる頭部位置姿勢追跡だけでは、検出精度に誤差があり、ジオラマと CG 映像を地図的精度で重ねることが困難なためである。

一方、画像認識だけで頭部位置姿勢を求める方法では、大きな正方形マーカや同心円状のマーカを配置するものが主流である[9]。それでは肝心のジオラマが隠されてしまう大きな欠点があり、本目的には合致しない。またマーカが識別できた場合の位置合わせ精度は高いが、大きなジオラマを鳥瞰する視点では、俯角が浅く、マーカ識別にしばしば失敗するため、CG 映像が頻繁に ON/OFF されて安定性でも



図 3 京都市中心部のジオラマ

Fig. 3 Diorama of Downtown Kyoto



図 4 小さな赤い単色マーカの利用

Fig. 4 Use of small red markers

満足が得られない。実際、本研究の予備実験では、定評ある ARToolkit を用いて実験したが、頭を動かすたびに CG 映像が途切れ、安定した MR 表示が得られなかった。

しかる後に上記ハイブリッド方式を導入し、鴨川にかかる橋や大きな交差点にのみ単色のマーカを貼り付け、ジオラマ面を最大限に見せられるように配慮した(図4)。この方式では、体験者が自分の近くの領域を見下ろす場合には、確実にマーカを捉えることができるため、かなり安定した仮想と現実の幾何的位置合わせ精度を確保できた。ところが、一辺が 1.25, 1.5 m あるジオラマの向こう半分に視線を向けた場合、マーカが小さいため正しく識別できず、位置合わせの乱れが頻出した。しかしながら、マーカを大きくすることはできないので、恣意的に加えたマーカでなく、このジオラマ自身の画像特徴を用いるテンプレート・マッチング法で問題解決を図ることにした。

3.2. 実世界の画像特徴によるテンプレート・マッチング

対象となる実世界の光景の画像から特徴的な領域を選び出し、それをテンプレート照合することにより、マーカ認識に相当させる方法を用いる。本システムの場合には、対象となるジオラマは確定しているので、その中から大きな緑地に当たる領域をテンプレートとした。

以下は、本システムに実装した位置検出処理の概略である。

(1) 観測スクリーン座標系での特徴点座標値計算

磁気センサを元にした世界座標系から、観測スクリーン座標系への変換式を用いて、特徴点の観測スクリーン座標系での座標値を求める。

(2) テンプレート生成

HMD の概略の位置情報を用い、予め用意されている多視点でのテンプレート画像から、現在の視点に近い位置のテンプレート画像を選択する。そのテンプレート画像を HMD の位置姿勢を参考にして、回転・拡大縮小処理をして変形テンプレート画像を生成する(図5)。

(3) マッチング(照合)

マッチング精度を上げるために、生成されたテンプレート画像、入力画像(図6)共に2値化・エッジ検出を行い(図7)、得られた画像間で相関値を元に照合操作を実行する。

(4) 位置合わせ誤差の修正

上記マッチングの結果により、初期値として設定した磁気センサを元にした特徴点の座標値の差を補正する。

以上4つの処理を毎フレーム実行し、位置合わせ

を行っている。テンプレート照合を用いた補正によって、安定した精度の高い幾何位置合わせが達成できるようになった。

3.3. 導入手法の効果と意義

本手法により目標とする精度向上が図れたことは明らかであったが、その有効性を客観的に示すために下記の実験を行なった。

実験方法：磁気センサ単独の場合と上記照合法による補正が加わる場合での比較

観測時間：磁気環境の乱れが標準的な室内での672フレーム分

補正量：観察の結果、MR合成結果の画面(640×480画素)に対して、

x軸方向に平均10~15画素(最大40画素)

y軸方向に平均15~20画素(最大28画素)

の補正が行われていることが判明した。

臨界俯角：体験者がテンプレート領域を視認できている場合でも俯角約20度を臨界点として、それより浅い角度では上記照合法が正しく作動しない。ARToolkit マーカでは35ないし45度以上でも正しく識別しないことがあるから、この点でも、かなり堅牢で安定した結果が得られている。



図5 テンプレート
Fig. 5 Template region



図6 HMD内蔵カメラからの映像
Fig. 6 Image viewed from HMD

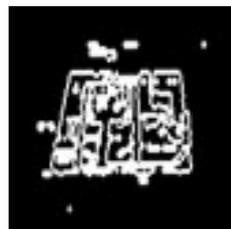


図7 微分演算後のエッジ画像
Fig. 7 Edge images by differentiation



図8 補正前(左)と補正後(右)
Fig. 8 Without correction (left) and the result (right)

図 8 に補正がある場合とない場合の比較結果を示す。かなり大きな量の実時間補正が行われていることが理解できる。

大きな人為的マーカを用いる方法に対するアンチテーゼとして、最近、対象とする実世界の自然特徴を利用する位置合わせ手法の研究が活発化している[11][12]。それらは、屋内外で体験者が大きく移動することを想定し、多様な景観に適応的に利用できることを目指した一般的な方法が大半である。

本研究のように、対象が特定のジオラマに限定でき、かつ体験者の立ち位置も想定できる場合には、かなり簡便なテンプレート照合法で達成できる利点がある。これは、計算時間を短縮する上でも、安定した結果を得る上でも好都合である。加えて、磁気センサとのハイブリッド法の場合、大体の視線方向や HMD の姿勢情報も利用できるため、事前に準備しているテンプレートを適応的に切り替えて用いることも可能である。

本研究では、要望のあったジオラマへの MR 情報提示に適した手法として上記を開発したが、この方法は地形モデルだけでなく、建築物のミニチュア、工業製品のラピッド・プロトタイプング結果、保守点検の対象となる対象物に MR 表示を行なう場合にも有効であると考えられる。

3.4. ポインティング&書き込み機能の実現

第 2 章で MR システムの利点として、複数人が同時に MR 空間を共有して、その場で議論できることを述べたが、そのためには対象領域を指し示すポインティング機能が重要である。しかしながら、単純にジオラマ上を指さしたのでは、想定災害等の CG 映像が手前に上書きされてしまう。

本格的に現実物体と仮想物体の相互隠蔽関係を矛盾なく描画するには、動的に変化する現実物体の位置と形状を正確に計測する高額な装置が必要となるが、この現象を避けるために、もっと簡便な方法で代用した。

ジオラマ盤上やそこに重畳表示された CG 映像を指し示すには、位置姿勢が追跡できるペン型デバイ



図 9 ポインティング機能と書き込み機能
Fig. 9 Functions of pointing and writing

スを十分上方からかざし、そのペン先の延長線上に CG 光線が発せられて、MR 空間上に書き込みができるようにした(図 9)。現実の応用には、この種の簡便な機能の実装が大きな意味をもつ。

4. 災害シミュレーション結果の MR 体験

4.1. 洪水シミュレーション結果の可視化

観測史上最大値を上回る降雨が上流の山岳部にあり、毎秒 300~1,200 m³の水が賀茂川、高野川に流れ込むことを想定した。洪水シミュレーションは、立命館大学理工学部都市システム工学科水工学研究室によってモデル化され、計算された結果を可視化して用いる。ここで、シミュレーション計算に用いている連続体の支配方程式は、以下の通りである[13]。

$$\begin{aligned} & \cdot \text{質量保存則} & \cdot \text{河床せん断力} \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 & \quad \tau_b = g \frac{n^2(M^2 + N^2)}{h^{7/3}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \cdot \text{運動保存則} \\ x: \quad \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial \beta u M}{\partial x} + \frac{\partial \beta v M}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \\ y: \quad \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial \beta u N}{\partial x} + \frac{\partial \beta v N}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} \end{aligned}$$

この計算結果を基に洪水の様子を CG 映像化し、ジオラマ上に重畳表示した(図 10)。

洪水シミュレーションは膨大な計算時間(約 1 週間)を要するため、体験中にパラメータを変化させて、直ちに再計算結果を描画・観察することはできない。しかしながら、浸水範囲の広がりを動的に観察したい、降雨条件もその場で変化させて結果を観察したいという要求が強いため、予めいくつか想定される条件下で行っておいたシミュレーション結果を細かな時間単位で保持しておき、それらを逐次読み出して表示していくことで、洪水のアニメーション表示を実現した(図 11)[14]。

また、洪水の様子を観察するのに有用な機能として、以下を実装した。

(a) 想定した条件(上流からの流入量,土砂による川



図 10 浸水状況の MR 観察風景
Fig. 10 Observation image of flood in the MR space

底の埋まり具合)を変更,浸水の程度を瞬時に切り替えて視認する機能

(b) 異なった条件での洪水の広がりや,同条件で異なった時刻での広がりを濃度や色の違いで比較できる機能(図12)。

4.2. 火災延焼範囲のMR表示

大地震による災害で最も懸念されるのは,建物の倒壊よりも,その後同時多発的に発生する火災による延焼である。京都市の市街地部分の大半は,国土交通省が定める「地震時等において大規模な火災の可能性があり重点的に改善すべき密集市街地」に該当しているが,今後10年以内の改善は見込めないと予想されている[15]。そこで,洪水による浸水に続いて,火災の延焼シミュレーション結果を随時MR体験できるようにした。

火災の延焼をセルオートマトン法を用いてモデル化する研究は,既に謝ら[16]や大貝ら[17]によってなされている。しかし,その結果はいずれも延焼の範囲を2次的に示しているに過ぎない。本研究では,ジオラマ上で3D-CG映像をMR重畳表示して,火災と感知,かつ延焼範囲の時間的変化を実感できるよ

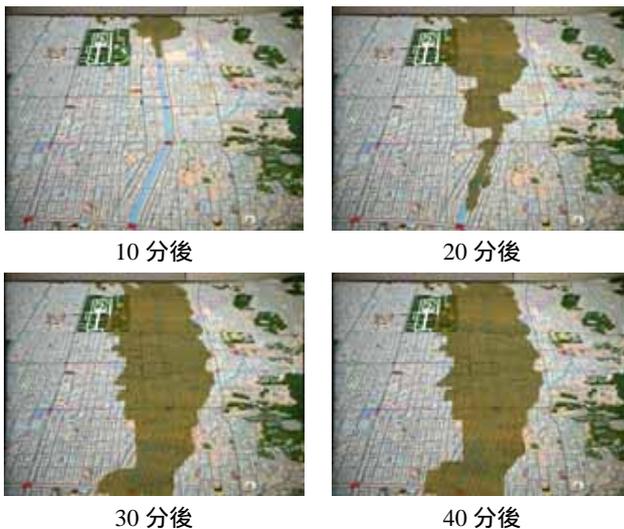


図11 浸水進行のアニメーション
Fig. 11 Animation of flood progress



図12 色調の違いによる比較表示
Fig. 12 Comparison by difference of tone

うな可視化及び情報提示方法を考案し,実装した。延焼シミュレーションは,大貝らのモデルを若干簡略化した次式を採用した。

$$F_{ij} = \dots M_{ij} \cdot W_{ij} \cdot L_{kl}$$

ここで, F_{ij} は燃焼・延焼時の様々な条件を示す調整係数, M は建造物の種類により各セルの燃焼性, W は風向・風速の影響で近隣のセルに燃え移る可能性, L は出火後のセルの激しく燃えている度合い(燃焼レベル)を示すパラメータである。本研究では,文献[18]の調査結果をもとに, M の分布を求め,そこから L を計算した。

計算と表示の単位となるセルは余り細かく分割すると炎が小さくなって見にくくなるので,今回は地上で20m×20mの領域をセルとし,対象となるジオラマを300×250(計75,000個)のセルに分割した。

最新のCG技術ではパーティクル法等を用いればかなりリアルな炎を描出できるが,多数のセルの個々を火災表現し,かつそれをMR体験という実時間演算の制約下で実行するのは容易ではない。また,あまり精密な火災の表現を適用しても延焼範囲を鳥瞰したいという用途には適していない。そこで,燃焼中の各セルは図13のような炎の面をもつ仮想物体であり,図14のような炎のテクスチャ画像をその面に貼り付ける簡便な方法を選んだ。その結果は,図15のようなジオラマ上へのMR表示である。静止画で見ると稚拙な感じを受けるが,HMDを介して動画で見ると燃え盛る火災をシンボル化して表現しているので,延焼の方向や範囲を直観的に捉えやすいと,関係者からは好評であった。

具体的なCG描画には,主として以下のような工夫を凝らしている。

炎のテクスチャは8枚用意し,これを順次切り替えてゆらいでいるように見せる。

炎面は立体感を感じるよう14の頂点をもつ曲面とし,真上から見ても炎らしく見えるように,ジオラマに対して45度傾けて配置した(図16)。また,炎の面が常に観察者の正面を向くよう「ビルボード法」を用いて面を制御した。

燃焼レベルが最大値に達した後は「焼け跡」状態になるが,これは半透明の黒で表現して,ジオラマ面が透けて見えるようにした。

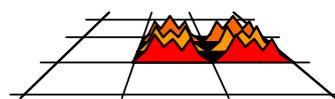


図13 延焼可視化のイメージ
Fig. 13 Image of spread flame

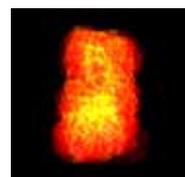
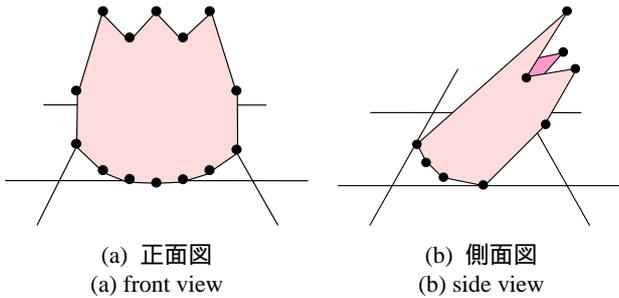


図14 炎のテクスチャ
Fig. 14 Texture of flame



図 15 延焼の進行の様子（北東の風が吹いている場合）

Fig. 15 Simulation of spread (a situation of the northwest wind)



(a) 正面図
(a) front view

(b) 側面図
(b) side view

図 16 炎のオブジェクト

Fig.16 Images of flame object

5. その他の可視化結果の提示

ジオラマをベースとした MR 情報提示技術が確立したので、その防災関連研究に有用なデータを可視化し、MR 表示することを様々試みた。以下は、その代表的な 2 例である。

5.1. 地下構造情報の可視化

地震後災害に関してだけでなく、地震研究のための役立つデータをジオラマに重畳させて見る機能を提供することにした。これまで、地下構造を効果的に提示する有効な方法がなかったため、我々はジオラマ上に地中の情報を浮かび上げさせ、3D-CG 像として立体映像表示する独自の表現手段を考案した。本システムは、利用者が視点移動しながら、以下のデータをじっくりと観察できることを目標とした。

3次元地下構造のメッシュデータ

データ点数：3072 点

メッシュ間隔：100m

京都盆地のボーリングデータ

データ点数：約 2000 点

座標系：公共座標系第 1 系

(1) 地層の断面と境界面の表示

メッシュデータを用いて地層の断面と各層の境界面（層上面）を表示する（図 17）。地中データが十分に密に存在する場合に対して、以下の表示機能を実現した。

- ・任意範囲の地層の上昇表示
- ・地形の切断による任意断面表示

- ・地層断面のワイヤフレーム切替え表示

- ・各地層の境界面表示

本システムでは、ジオラマ上の任意の領域を指定し、地下構造を表示できる。また、地層の断面をワイヤフレーム表示に切替え、覗き込んで各層の境界面を観察できる。なお、この表示では地表面はジオラマの表面ではなく、航空写真の画像データをテクスチャとして貼り付けている。

(2) ボーリングデータの表示

地中データは計測が容易でなく、地下構造モデルを形成するのに十分な量のデータが入手できるとは限らない。そこで計測データが疎な場合を想定し、以下の機能をもつボーリングデータの表示方法を開発した（図 18）。

- ・ボーリング調査の計測地点の表示
- ・ボーリング地点でのデータの柱状図表示
- ・地表面のワイヤフレーム切替え表示

本機能により、データの疎密状態、計測地点におけるデータを視認できるので、地上・地下のデータ対応や各データの信頼性等が把握できる。

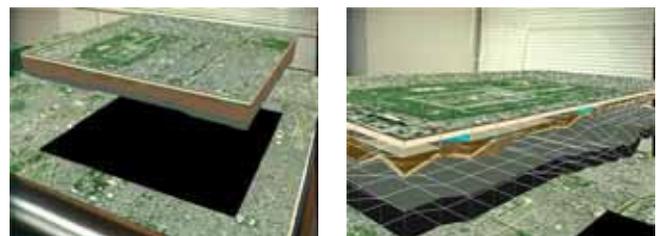


図 17 地層の断面と境界面の MR 表示

Fig. 17 Images of the cross and cutoff section of stratum

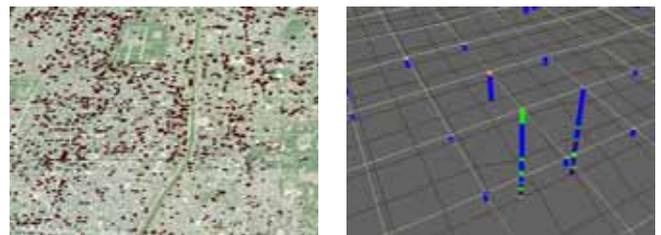


図 18 ボーリングデータの表示
(左：計測点、右：柱状図)

Fig. 18 Images of boring data
(Left: measure points, right: histogram)

5.2. 文化財被災史の可視化とMR表示

防災関連研究者からは、歴史都市に存在する神社・仏閣やその中に保存されている仏像・宝物等の文化財の被災（その大半は火災による消失）の歴史を可視化し、時間的・空間的に把握できることが望まれている[19]。図19は、その要望に応じて被災史を文化財の所在地上に柱状表示したものである（図18とよく似た形態が好まれるのは、地震学者は既にこの種の表現に慣れ親しんでいるためかも知れない）。この柱は、ある種の年表であり、時間軸を示している。

この被災史空間内全体を概観しながらウォークスルーする機能や、柱上での被災時期をクリックすればその被災状況をCGアニメーションとして示す機能を提供した。個々の柱を注視して被災間隔やその復旧時期を直観的に把握できることが好まれている。

ここまでは、PC画面上での実装であるが、この3D-CG表示を先述のジオラマ上にMR表示することも達成した（図20）。これが大きな障害もなく容易に移植できたのは、先に堅牢な頭部位置姿勢追跡技術が確立していたからである。

6. 専門家の反応と評価

第2章で触れたように、本研究は防災関連研究プロジェクトの一部として実施されたものである。まず、同プロジェクトに参加する都市工学・防災分野

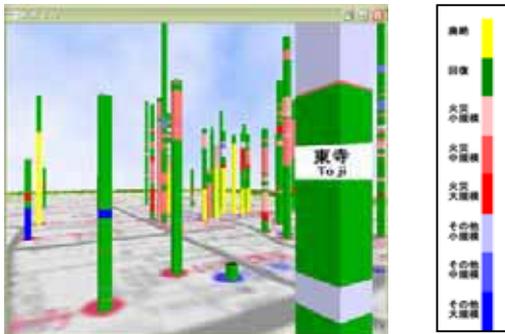


図 19 文化財被災史の可視化

Fig. 19 Visualization of fire disaster history

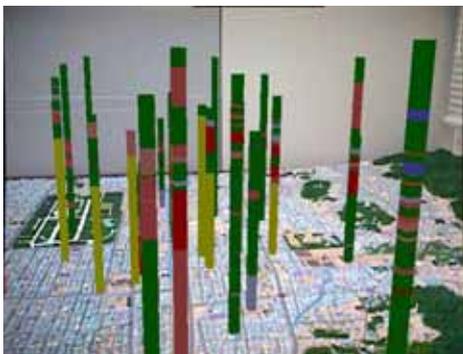


図 20 文化財被災史のMR表示

Fig. 20 Visualization of fire disaster history on the diorama

の研究者や行政機関の防災担当者の要望を聴取し、数ヶ月にわたる議論を経て具体的なテーマを選択し、第4章、第5章に述べた実問題のアプローチを行なった。第3章に述べたシステムと手法は、4.1の洪水シミュレーションを対象として開発し、この研究基盤を確立した後に、以降の応用へと向かった。いずれの場合も、途中で専門家や利用者の要望を取り入れ、満足度を向上させるよう改善した。

以下、この共同研究に関わった専門家やデモ体験に参加した人々と、得られた意見・評価の概略である。

[参加したプロジェクトと共同研究者]

- ・21世紀COEプログラム「文化財を核とした歴史都市の防災研究拠点」及びハイテク・リサーチ・センター整備事業「防災と安全のための複合大規模センサシステムおよびロバストネットワークの構築」に参加
- ・京都大学・防災研究所、立命館大学・歴史都市防災センター、NPO法人・災害から文化財を守る会の関係者（土木・建築系、都市工学の研究者を中心に、文系の災害史研究者も含む）
- ・「体験者、協力者、意見聴取者」
- ・京都市消防局、国土交通省近畿地方整備局、滋賀県、長野県、姫路市等の防災行政担当者
- ・知恩院、清水寺、善光寺、姫路城、冷泉家等の歴史的文化財の所有者・管理者

[「防災システム研究会」「京都歴史災害研究会」「人為的災害からの防御に関する研究会」の参加者及び参加企業]

- ・国連防災世界会議・パブリックフォーラム「文化遺産を災害から守るために」の参加者

[反応と評価]

- ・ハザードマップは静的・平面的なものとの固定観念のある専門家ほど、動的な表示に感激し、さらに視点移動や対話型操作で条件選択できるようにと要求がエスカレートする傾向が強い。
- ・構造計算や物理シミュレーションのプログラムに長けた研究者も、可視化技術やグラフィック表示は市販GISの既存機能に頼っていることが多く、新たな情報提示技術への願望が大きい。MR技術は驚きをもって迎えられた。
- ・MR目的でのHMDの装着には、予想したほどの抵抗はなく、魅力的な機能があれば、十分受け入れられる。現実と仮想の位置合わせ精度でも、大きな不満はなかった。その半面、画質面での不満は大きく、改善が望まれた。
- ・強い要望があっただけあって、他の研究者、見学者にも、ジオラマへのMR表示という概念は好評で、早速導入の検討を始めた地方自治体もある。

- ・体験者視点の映像の大型モニタへの同時表示は好まれた。HMD を装着せず、単眼カメラを操作してMR 合成画像をモニタ表示する利用法も好まれた。この種の体験を録画し、プレゼンすること自体に大きな要望がある。
- ・防災研究の専門家たちは、手法の一般化、共通化を求めるよりも、対象地域や文化財の選定を重要視し、その都度、その対象に応じたMR 表示機能を強化して行くことを望む傾向がある。総じて言えば、本研究の成果はいずれも大きな満足を与えたとの評価を受けた。

7. むすび

我々は、複合現実感技術の新しい応用分野として防災研究・防災対策分野を取り上げ、なかんずくジオラマに災害シミュレーション結果をMR 重畳表示できるシステムを開発し、各種防災関連情報を提示することを試みた結果を報告した。

今や、医学・医療分野と画像情報処理の密接な関係を否定する人はいない。コンピュータによる画像再構成、医用画像による診断支援、手術シミュレーション等は、常に画像情報処理技術を向上させる役割を果たして来た。その源となる医用画像処理の研究は、40 年間以上前の数件の論文に端を発している。

同じことが、今後、防災関連研究と情報可視化技術、情報提示技術にも成り立つのではないかと思われる。地球規模での災害への対策が重要視される中で、防災研究・防災対策への関心は高まり、研究開発投資がますます増加して行くことが予想される。そう考え、本論文ではその端緒となる試みを紹介した。

MR 研究分野にとっても、こうした新規応用分野は良い実問題を与えてくれる恰好の対象である。本稿で述べたジオラマ上へのMR 提示のために工夫した位置合わせ手法などは、従来手法を見直す良いきっかけとなった。

前節で述べたように、防災分野からは、共通の枠組みでは解決できない個別の要求が次々寄せられている。著者等のグループでは、災害時の避難経路提示や災害後の設備復旧支援にMR 技術を応用する研究にも着手しているが、かなり手法的には異なるので、本論文では扱わず、機会を改めて報告・紹介する予定である。

謝辞

洪水シミュレーション結果のご提供は、本学都市システム工学科水工学研究室のご好意によるものである。本研究の実験や検討の一部は、研究室に在籍した学生、大川卓哉君の協力を得た。皆様に深甚の

感謝の意を表します。

本研究の一部は、文部科学省の21 世紀COE プログラム「文化財を核とした歴史都市の防災研究拠点」及びハイテク・リサーチ・センター整備事業「防災と安全のための複合大規模センサシステムおよびロバストネットワークの構築」の支援により実施された。

参考文献

- [1] 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.
- [2] S. K. Feiner (田村秀行訳): "複合現実感がひらく第3の視界", 日経サイエンス, 2002 年7 月号, pp. 40 - 49.
- [3] 佐々木亮一, 林佑司, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: "複合現実型情報提示とその防災研究への応(4) ~ モバイル端末を用いた災害時復旧支援システム", 信学総大, A-16-12, 2007.
- [4] 岩倉寛幸, 松中正法, 柴田史久, 木村朝子, 田村秀行: "モバイル複合現実感による災害時の設備復旧支援", 歴史都市防災シンポジウム論文集, pp. 195 - 202, 2007.
- [5] D. L. Tate, L. Sibert, T. King: "Virtual environments for shipboard firefighting training," Proc. IEEE VRAIS, pp. 61 - 68, 1997.
- [6] 須賀昌昭: "VR 技術を用いた火災体験シミュレータ"fire cube"の開発", フジタ技術研究報告, No. 42, pp. 43 - 48, 2006.
- [7] <http://www.bousaihaku.com/cgi-bin/hp/index.cgi>
- [8] 佐藤清秀, 山本裕之, 田村秀行: カメラと3次元センサの組み合わせによる現実空間と仮想空間の位置合わせ手法, 日本VR学会論文誌, Vol.4, No.1, pp. 295 - 302, 1999.
- [9] 佐藤清秀, 内山晋二, 田村秀行: 複合現実感における位置合わせ手法, 同上, Vol. 8, No. 2, pp. 171 - 180, 2003.
- [10] <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>
- [11] 加藤博一, 汐崎徳男, 橋啓八郎: "テクスチャー画像からオンライン生成されたテンプレートのマッチングに基づく拡張現実感のための位置合わせ手法", 日本VR学会論文誌, Vol. 7, No. 2, pp. 119 - 128, 2002.
- [12] 中川知香, 佐藤智和, 横直直和: "自然特徴点ランドマークデータベースを用いた投票に基づく静止画像からのカメラ位置・姿勢推定", 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2006)講演論文集, pp. 249 - 254, 2006.
- [13] 土木学会編: 水理公式集 - 平成11年版 -, 第2編, 丸善, 1999.
- [14] <http://www.rm.is.ritsumei.ac.jp/movie/diorama.mpg>
- [15] 国土交通省: "「地震時等において大規模な火災の可能性があり重点的に改善すべき密集市街地」の地区数, 面積一覧", 2003.
- [16] 謝孟春, 坂本尚嗣, 藤田克志, 小倉久和: "都市火災シミュレーションへのセルオートマトンの適用", 福井工業高等専門学校研究紀要, 第35号, pp. 19 - 24, 2001.
- [17] 大貝彰, 郷内吉瑞: "CA による延焼シミュレーションモデルの開発 - 防災まちづくり支援ツールとして -", 地域防災リサーチコア年報 No.1, pp. 49 - 54, 2004.
- [18] "京都市建物実態調査", 立命館大学21世紀COE プログラム「文化遺産を核とした歴史都市の防災研究

拠点」, 2004

- [19] 土岐憲三: “文化財の被災史のビジュアライゼーション”, 立命館大学 21 世紀 COE プログラム「文化遺産を書くとした歴史年の防災研究拠点」, pp.66-69, 2005

(2007 年 3 月 26 日受付)

[著者紹介]

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。情報処理学会論文賞, 人工知能学会功労賞等を受賞。

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。現在, 米国 セントラル・フロリダ大学にて学外研究を行う。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。2004 年日本 VR 学会学術奨励賞受賞。

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, 2003 年立命館大学理工学部助教授, 2004 年同 情報理工学部助教授を経て, 2007 年 4 月より科学技術振興機構さきがけ研究員, 立命館大学総合理工学研究機構客員教授。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。2001 年より 2002 年まで Mayo Clinic にて Special Project Associate。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。2006 年本学会学術奨励賞等受賞。

坂井 陸一 (非会員)



1982 年 9 月岐阜県岐阜市生まれ。2005 年立命館大学理工学部情報学科卒。2007 年同 大学院理工学研究科博士前期課程修了。同年 4 月, (株)セガ入社。現在, 同 第 1AM 研究開発部所属。

横江 祥吾 (非会員)



1983 年 9 月滋賀県草津市生まれ。2006 年立命館大学理工学部情報学科卒。同年 4 月, 村田機械(株)入社。現在, 同 情報機器事業部技術本部所属。

濱田 純也 (非会員)

1983 年 6 月鳥取県東伯郡市生まれ。2007 年立命館大学理工学部情報学科卒。同年 4 月, 富士通エレクトロニクス(株)入社。現在, 同 アプリケーションエンジニアリング本部所属。

家崎 明子 (学生会員)



1983 年京都府八幡市生まれ。2006 年立命館大学理工学部情報学科卒。現在, 同 大学院理工学研究科博士前期課程在学中。複合現実型視覚刺激が触印象に与える影響の調査・研究に従事。電子情報通信学会学生会員。