

車両を利用したマルチユーザ体験型屋外 MR システム ～バーチャル平城宮復元プロジェクト～

大石岳史[†] 榎崎雄太[†] 千代裕介[†] 岡本泰英[‡] 佐藤啓宏[‡]
阪野貴彦[‡] 影沢政隆[‡] 池内克史[†] 角田哲也^{††}

[†] 東京大学大学院情報学環・学祭情報学府
[‡] 東京大学生産技術研究所 ^{††} (株) アスカラボ

E-mail: {oishi, narasaki, chishiro, okamoto, yoshi, vanno, kagesawa, ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp
kakuta@asukalab.co.jp

あらまし 本論文では車両を利用した、複数ユーザが同時に体験可能な複合現実感 (MR) システムを提案する。近年、文化財のモデル化、表示、解析などを目的とした e-Heritage 分野の研究が盛んに行われている。その中でも MR 技術は、失われた文化財を仮想的に復元展示する手法として注目されつつある。この復元展示で対象となる遺跡は屋外であることが多く、光源環境の変化などから様々な技術的課題が残されている。またこれまでの MR システムは個人で利用するものが主であり、さらに広範囲を移動できないといった問題があった。そこで我々は、車両を利用して遺跡内を移動しながら複数ユーザが同時に体験可能な復元展示 MR システムを提案する。また本システムを用いて奈良平城旧跡において行った実証実験の結果を示す。

キーワード 複合現実感, 全方位画像, 光学的整合性, 文化財復元展示

Multi-user MR System using Vehicle in Outdoor Environment – Virtual Reconstruction of Heijo Palace –

Takeshi OISHI[†] Yuta NARASAKI[†] Yusuke CHISHIRO[†] Yasuhide OKAMOTO[‡] Yoshihiro SATO[‡]
Atsuhiko BANNO[‡] Masataka KAGESAWA[‡] Katsushi IKEUCHI[†] Tetsuya KAKUTA

[†] Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo
[‡] Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

E-mail: † { oishi, narasaki, chishiro, okamoto, yoshi, vanno, kagesawa, ki }@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

Abstract This paper describes a system which allows multiple users to see the virtually reconstructed cultural heritage site using Mixed Reality (MR) techniques. Recent years, e-Heritage that aims to digitally archive, display and analyze the cultural heritage assets becomes one of the active research fields. Especially, the virtual reconstruction using MR technology is getting attention over the world. The cultural heritage sites that are target of the reconstruction are generally in outdoor environment. There remain a lot of issues to be solved. The MR system is made for personal use, and the users could not move freely in large spaces. Therefore, we propose a system that enables multiple users to enjoy the virtual reconstruction while moving around the heritage site using transportations. We also show the result of experiment that was held in Heijo-Palace in Nara prefecture.

Keyword Mixed Reality, Photometric consistency, Omni-directional camera, Cultural heritage

1. はじめに

近年、仮想物体を実世界に重畳して表示する複合現実感 (MR: Mixed Reality) 技術[1,2] を用いて文化財を仮想復元展示する試みが行われている[3-6]。CG アニメーションや VR コンテンツは PC のディスプレイ上やシアターなど屋内で鑑賞するのに対して[7]、MR では実世界の景観などの環境情報をそのまま利用できるため、ユーザはより高い臨場感を得ることができる。また一般に、発見された遺跡は現状保存が原則である

ため、観光振興の観点から文化財の整備や活用を求められる場合も多い。これに対して MR では、実世界の遺構に物理的な影響を与えずに効果的な展示を行うことが可能であるため、遺跡の保存と活用を両立することができるという利点もある。

この MR 技術を利用して遺跡地域を活性化する大きな枠組みとして、我々は交通システム (ITS)、ネットワークを利用した次世代型の観光・歴史教育サービスとしてクラウドミュージアムを提案している (図 1)。



図 1 クラウドミュージアム



図 2 電動トラム

地域の活性化には、ユーザが現地を訪れ、遺跡を回りながら感動を得て、さらに再びその地を訪れるサイクルシステムを作ることが重要である。アーカイブデータはクラウド上にあり、これらのデータにユーザが様々な方法でアクセスすることによって動機付け、学習、訪問、感動、再訪というサイクルを生み出すことができる。

このクラウドミュージアムで重要なポイントとなる屋外環境における MR には様々な問題がある。MR で違和感のない合成画像を生成するためには、実世界と仮想世界との間の位置合わせを行い（幾何学的整合性）、両者の色・明るさ・陰影等を一致させる必要がある（光学的整合性）[8]。幾何学的整合性については画像中のマーカや特徴点、磁気センサやジャイロを用いた様々な手法が提案されている[9]。光学的整合性についてはシャドウマップ法やシャドウボリューム法を用いた影付け手法が提案されている[10-12]。しかし、屋外においては光源環境が複雑且つ急激に変化するため安定して動作させることは難しい。またこれらの手法は定点や狭い範囲での利用が想定され、さらに多人数で同時に体験できないという問題がある。

また MR による文化財復元展示の傾向として、これまで建物などモノの復元しか行われなかったという問題がある。静的なモノだけでなく、当時の人々の生活や、そのとき起こった出来事、つまりコトを見せることによってより高い臨場感を得ることができると考えられる[13]。また歴史上の人物を登場させることによってより高い学習効果を得ることも可能となる。エンタテインメントとして考えた場合も、人物モデルを登場させ、インタラクティブにストーリーを展開できればより魅力的なコンテンツを提供することができる。

そこで本稿では、移動車両（図 2）を利用して幾何・光学的整合性を実現しつつ、多人数が同時に体験可能な屋外型 MR システムを提案する。本システムは車両に搭載されたカメラによって撮影された映像を各ユーザに配信し、配信された映像に仮想物体を重畳することによって MR による復元展示を行う。実世界の撮影には全方位カメラを用い、ユーザ側では受け取った映像から視線方向の画像を切り出して仮想物体を重畳し

て表示する。車両の位置姿勢推定には GPS を用い、実画像を光源情報として仮想物体に実時間陰影付けを行う[12]。さらにコンテンツでは人物モデルを登場させることによって、モノ（建物）だけでなくコト（当時の儀式や生活の様子）の再現を行う。

以下、第 2 章では実シーンの取得と配信について、第 3 章では GPS を利用した安定的な車両の位置姿勢推定について述べる。第 4 章では自由視線画像生成のためのヘッドトラッキング手法について、第 5 章では平城旧跡において行った実証実験の結果を示す。第 6 章はまとめと今後の課題である。

2. 実シーンの取得と配信

本システムは車両に取り付けたカメラによって周囲の映像を取得し、これを各ユーザに配信して、ユーザ側の端末で仮想物体を重畳するという方式を取っている。本章では、全方位画像の取得と、実時間で取得した画像を配信する方法について説明する。

2.1. 実シーンの取得

全方位カメラを用いて実シーンを撮影した場合、車両自身が画像に大きく移りこんでしまうという点が大きな問題となる。カメラを車両の上、或いは脇につけた場合でも、画像中のほとんどの部分は車両を映していることになる。車両の映り込みを防ぐためにはカメラを車両から放せばよいが、この場合ユーザの視点とカメラが離れてしまうと、車両の外側に大きくせり出す必要があるため現実的ではない。

そこで 2 台の全方位カメラを車両の両脇に設置し、得られた画像を 50%ずつ合成することによって、映り込みの無い画像を生成した。それぞれのカメラ中心から外側の画像を用いることによって、車両を完全に消去することができる。この場合、二つのカメラに挟まれた空間は縮退しており、この空間内の物体つまり車両やユーザを見ることはできない。実シーンとしては、車両の前方・後方正面の一部（道路）が見えないだけなので、シーンとしては全く問題が無い。

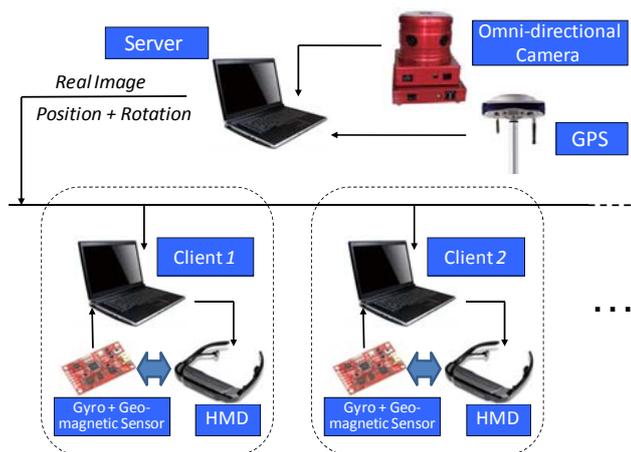


図3 システム概要

2.2. 画像配信の条件

本節では、サーバ側で生成した全方位画像列を各クライアントに配信する手法について説明する。動画配信に関してはストリーミングをはじめ様々な方法が考えられるが、今回のシステムに関しては、高品質な背景画像を遅延なく表示するため、次の条件を設定する。

1. 配信遅延はできる限り少なくする
2. 配信する画像は、サイズが 1024x1024x3 バイトのものを 6 枚 1 組としたものとする
3. ネットワークの実効通信速度を 100M byte/sec とする
4. 最大接続クライアント数は 20 程度とする
5. IP ベースのアプリケーションとする

第 1 の条件より、バッファリングを必要とするストリーム配信型のを除外、第 4 の条件より 1 対 1 で画像を共有するタイプのを除外、結局サーバで用意した大きな画像をクライアントに逐次送信する方式とした。

IP ベースの通信方法としては、TCP を使う方式と UDP を使う方式が考えられるが、今回の目的にはフレームレートが落ちてでも高品質なものが適するので、TCP を採用し、通信容量の制約から、圧縮率の高い jpeg 方式を用いて各画像を圧縮・配信することとした。1024x1024x3=3MB 程度の画像は 実用に耐えうる範囲で 1KB 程度に圧縮することができる。従って、このような画像 6 枚からなる 1 組分の圧縮画像データは 6KB ほどとなり、5MB/sec の通信容量に対して 8fps のフレームレートとなり、今回の目的には十分利用可能である。

2.3. ネットワーク配信

前節で述べたように、TCP/IP によるサーバ・クライアント方式で、サーバ側では画像を jpeg 圧縮し、それを配信、クライアント側ではそれを受信・展開して表示を行うという方式とする。配信画像を 6 枚 1 組の実装とすることで、サーバ側では 6 枚の画像を並列に圧縮可能であり、クライアント側でも表示時には同時に 6 枚すべての画像は必要としないため、展開の効率を高めることができる。

サーバの負荷減少、および通信容量増大のためにサーバからの配信画像をクライアントに橋渡しするスレーブも実装した。ユーザ数が多くなると、サーバに対してトラフィックが集中するため、サーバの下に複数台のスレーブを接続し、ボトルネックを解消することができる。2 段スレーブによる試みでは通信遅延が問題ないことも確認した。

2.4. 配信の実際と議論

前節の方式で画像配信を実装したが、実際に使用してみるといくつか問題が発生した。通信速度は十分であったが、jpeg 圧縮・展開に予想以上に時間がかかることが判明した。通信に要する時間はこれらに比べると無視できたが、Intel Core2duo 程度の CPU では圧縮展開に要する時間が 1 秒以上となり、実時間処理とは言えない。そこで x86 用 SIMD に拡張したライブラリを利用することによって高効率化を図った。これにより 2 倍程度の高速化が可能となった。

以上の経緯をたどり、最終的には、遅延が 0.25 秒程度、4fps での配信が可能となった。どういう配信方式がよいかは、通信環境やマシンの性能によって決定される。もし、クライアントマシンでの jpeg 画像展開に 0.25-0.3 秒かかれば、サーバ側でどんなに多くの映像を送ってもクライアント側では 3-4fps 程度しか表示できない。サーバマシンの速度が十分でない場合も同様である。しかし、無圧縮あるいは zip などに使われている Deflate アルゴリズムの圧縮では、通信速度が十分ではなくなり、やはり高いフレームレートを得ることは難しい。

このように、高解像度画像列の遅延を少なく配信する場合は、通信容量、画像圧縮・展開の速度、を勘案して適切な設計を行う必要がある。本システムでは画像の品質、フレームレートの両立に関しては、画像配信手法は最適とはいえないかもしれないが、十分満足できる結果が得られたと考えている。

3. 車両の位置姿勢推定

屋外の遺跡においては周辺に高い建物等がないことから、GPS による車両の位置姿勢推定を行う。ただ

し経路沿いの構造物の影響や、信号読み取り失敗などによる取得される値には外れ値やノイズが多く含まれる。そこで経路に対して適応的なカルマンフィルタを適用することによって、ノイズを除去した高精度な位置姿勢推定を行う。ここで、車両は決められたルートを行くものとする。走行状態（直線運動をしているのか、曲がりながら走行しているのか）は領域によっては事前に知ることができる。

これらの事前情報を考慮し、GPS 信号を入力情報として、場所によって適応的にノイズパラメータを変化させ、位置姿勢の高精度な推定を行う。姿勢に関しては、位置の時間変化から同様の適応的なカルマンフィルタを用いることで推定を行う。位置の座標値に関しては、GPS によって得られた緯度経度を国土交通省によって定められた平面直角座標系(平成十四年国土交通省告示第九号)に変換し、東向きを x 軸方向、北向きを y 軸方向として表記した。車両の高さ(z 値)については、事前計測において経路内ではほぼ一定であることが確認できたため、定数とする。また姿勢に関しては、平面を走行しているとみなしてヨー角のみを推定する。

3.1. 経路の分割

車両の効率的な位置姿勢推定のために、図 4 に示すように経路をあらかじめ幾つかの領域に区切っておく。図中ゾーン 2, 4 および 6 のようにほぼ直線からなる経路や、ゾーン 3 と 5 のようには 90 度右へ進行方向を変える領域もある。移動車両は走行しながら、現在属しているゾーンを決定する。決定の際には、後述の位置推定法から推定された過去 1 秒間の自己位置の平均を用いる。

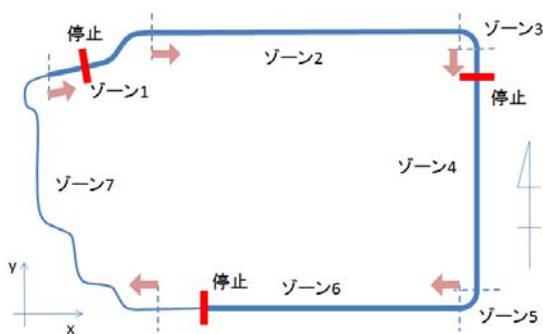


図 4 経路とゾーン分割

3.2. 適応型カルマンフィルタ

移動車両の走行の様子は、各ゾーンにおいて大きく異なる。例えば、図 4 のゾーン 2 においては、ほぼ等速に直線走路を停止することなく走行すると考えられる。一方ゾーン 4 と 6 では、途中で停車するため速度変化は大きいほぼ直線に走行し、ゾーン 3 と 5 では、速度を落として進行方向を 90 度右へ変えながら走行

する。このように、現在走行しているゾーンによって走行の様子が異なっているため、ゾーンに応じたトラム位置予測を行うことで、カルマンフィルタによる推定精度を向上できると考えられる。

線形のカルマンフィルタ [14] では、時刻 t において状態ベクトルを \mathbf{x}_t 、観測ベクトルを \mathbf{z}_t とすれば、

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{F}\mathbf{x}_{t-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_t + \mathbf{w}_t \quad (1)$$

$$\mathbf{z}_t = \mathbf{H}\mathbf{x}_t + \mathbf{v}_t \quad (2)$$

と記述できる。

今回、移動車両の制御に関する入力を使用しないため、入力ベクトル \mathbf{u}_t は無視する。本システムにおいては、式(1)のプロセスノイズ \mathbf{w}_t と、式(2)の観測ノイズ \mathbf{v}_t とをゾーンによって変化させることで、各ゾーンの走行に適応した位置推定を行う。

線形カルマンフィルタでは、状態ベクトル \mathbf{x}_t の変化を遷移行列 \mathbf{F} による線形運動として仮定している。ただし、前述のように走行場所によって線形運動の度合いが違うことがあらかじめ分かっているため、この事前情報を利用することで、カルマンフィルタによる位置推定をより高精度にできると考えられる。

ゾーン 2, 4, 6 のような場所では車両はほぼ直線走行のため、運動の線形性は強いと考えられる。したがって、プロセスノイズ \mathbf{w}_t を小さくする。一方、ゾーン 1, 3, 5 のような経路ではトラムは曲がりながら走行しており、線形運動から外れると考えられ、プロセスノイズを直線走行時のものより大きくする。

さらに GPS 信号の信頼性は、受信できている衛星の数に依存する。受信できている衛星数は多いほど精度が良いと考えられるため、受信衛星数が多いときには、観測ノイズ \mathbf{v}_t を小さくした。観測ベクトル \mathbf{z}_t に関しては、各ゾーンで車両の xy 座標値やヨー角の範囲が限定できるため、この範囲外の観測値が得られたり、予測地点より閾値以上に外れたりした場合には、予測地点を観測ベクトルとした。

3.3. 位置推定結果

実際に本手法を適用して位置を推定した結果を示す。使用した GPS 受信機はニコン・トリンブル社製 Trimble 5700 GPS であり、10Hz の周波数で現在位置を出力する。適応型カルマンフィルタの計算には、状態ベクトルとして、x, y 方向それぞれの位置と速度および、進行方向を示すヨー方向の角度と角速度を用いた。観測ベクトルには、x, y の GPS 出力および、それらの時間変化から求めたヨー角を使用した。また、車両の速度が閾値以下になった場合、トラムは停止したものとみなし、ヨー角は前時刻のものを保持するようにしている。

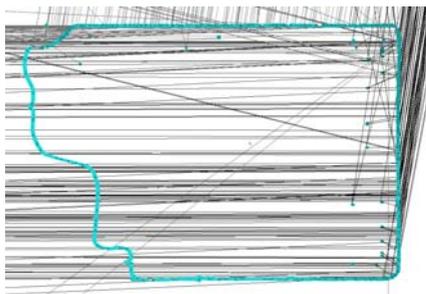


図 5 raw データによる車両位置



図 6 フィルタ適用後の車両位置

図 5 は、ノイズを含んだ出力をそのまま使用した車両位置である。GPS 受信機からのシリアル信号読み込みに失敗している箇所も多く存在し、このまま位置推定に利用することはできない。一方、図 6 は同データに適応型カルマンフィルタを適用して得られた結果を表示したものである。図 5 に比べ、ノイズや外れ値が軽減されていることが分かる。

このようにして求めた車両の位置姿勢を用いて、実画像に仮想物体を重畳することができる。次章では各ユーザのヘッドトラッキングについて説明する。

4. ヘッドトラッキング

ユーザが自由に視線方向を変えるためには、個々のユーザの姿勢を推定する必要がある。本節では、MEMS センサを使用したユーザのヘッドトラッキングについて述べる。本システムでは 1 台の車両に乗車する複数のユーザに対して、HMD を通してあたかもその時代のその場所に入り込んだかのような体験を提供することを目的としている。車両の移動中、ユーザは HMD を装着し、おのおの水平方向 360 度、仰俯角方向 -120 度 ~ +180 度どちらの方向でも好きな時に眺めることができる必要がある。

つまり各々のユーザが見ている方向を、実時間で取得する必要がある。通常、画像ベースの位置合わせでは光源の変化などから屋外環境では安定的に使用することは難しい。そこで、本システムでは MEMS 型姿勢センサを使用して姿勢推定を行う。

4.1. センサの特性

ジャイロを用いた場合、出力は前回相対角度で表されるため、誤差の蓄積つまりドリフトが問題となる。たとえ正確に調整したジャイロセンサであっても、時間の経過と共に熱などの原因による誤差が蓄積されていくため、大きなずれが生じてしまう。また、移動する車両上で使用するため、加速度センサから出力される値は不安定であり、重力方向の推定誤差が大きい。その結果、出力される姿勢にも誤差が大きいという問題もある。また急激に HMD を移動させた場合や大きな衝撃が加わった場合には、センサが大きな誤差を出力することもしばしば起こる問題である。

現在の風景に重ねて表示する CG モデルの位置を合わせるために、東西南北の絶対的な方向を正確に知る必要がある。そのためには磁場センサが有用であるが、広大な空間を移動した場合、場所によって磁場の条件が変わるため安定した方向を得られないという問題もある。

ただし、地磁気を用いる電子コンパスは応答速度が遅く、人の首ふり速度に追いつかないことがある。一方で、ジャイロセンサの応答速度は速く、人の首ふり速度に追従できるが、ドリフトの影響が大きいという問題がある。そこで、地磁気とジャイロをうまく使い分けることによって安定した姿勢推定を行う。

4.2. センサフュージョン

そこで、本節では、これらのセンサの誤差の問題を解決する手法について説明する。本システムでは、センサを 2 組用いて冗長性を持たせることで安定した姿勢の推定が可能となる。実際には 2 組のセンサの出力結果の相関を取り、それを信頼度を表すパラメータとして使用することで、誤差を排除する仕組みとした。その結果、移動するトラムの上で長時間使用しても、誤差の少ない姿勢を取得することができる MR 用 HMD 装置を実現した。6 日間の実証実験の期間中、センサの故障を除き、システムは安定に動作し続けた。

使用したセンサは SparkFun 社製の Razor9DOF センサ(加速度、ジャイロ、地磁気)である。加速度センサとジャイロを用いて推定したピッチ角とロール角を基に地磁気センサのヨー角を水平補正し、ピッチ角と絶対方向でのヨー角を求めた。つまり、本センサは電子コンパスとして使用した。

推定すべき姿勢は、地球の水平垂直および地磁気方向(以下、絶対方向)に対するピッチ角とヨー角である。ロール角は、他の二つの角度に比較して使用頻度が低く、また映像酔い防止のために除いてある。

4.3. 相関を用いた信頼度評価

二つのセンサのヨー角の相関を計算し、相関が高い間は 2 つのセンサが共に安定に動いていると判断して、

絶対方向を示す地磁気センサの値を使ってヨー角の補正を行う（図6）．相関の計算は次式に従う．

$$r_{xy} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (3)$$

ここで、 r_{xy} は x と y の相関、 x_i は x の i 番目のサンプル、 y_i は y の i 番目のサンプルを表す．

一定時間相関が高い値を示していれば、地磁気センサのヨー角を信頼して使用する．つまり、 $r_{xy}(t)$ を時間 t における r_{xy} の関数として T を一定期間としたとき、

$$r = \frac{1}{T} \sum r_{xy}(t) \quad (4)$$

$$Yaw = \begin{cases} Yaw_{mag} & (\text{if } r > \text{threshold}) \\ Yaw_{gyro} + Yaw_{adj} & (\text{if } r \leq \text{threshold}) \end{cases} \quad (5)$$

とする． T 及び threshold は経験的に与える． Yaw は出力されるヨー角、 Yaw_{adj} は補正項で最後に使用された Yaw_{mag} の値、 Yaw_{mag} は地磁気センサの値から、 Yaw_{gyro} はジャイロセンサの値からそれぞれ算出したヨー角である．

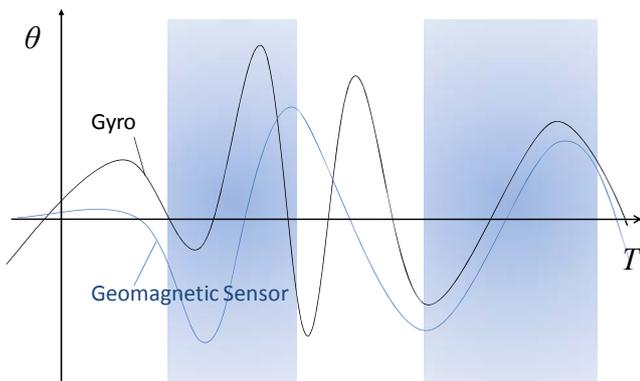


図7 センサフュージョン

5. 実証実験

本システムの有用性を確認するために、奈良県平城旧跡において、電動トラムを利用して実証実験を行った．電動トラムに本システムを設置し、延べ6日間に渡って一般に公開実験を行った．この電動トラムによるMR体験システムは最大12名が同時に体験可能である．

平城宮の復元モデルは平城旧跡歴史資料館において上映されているVRコンテンツに使用されているものを利用した．ただし実際のモデルは平城京全体を復元しているが、今回のコンテンツではトラムの軌道上から見える範囲のみを抜粋して用いた．



図8 複数カメラによる人物の撮影

5.1. 人物モデル生成・表示

人物モデルは複数のカメラを人物の周囲に配置して（図8）、同期撮影することによって様々な方向から自由に見ることが可能なモデルを作成した．使用したカメラは Point Grey Research 社の FLEA2 で、8 台のカメラを使用した．解像度は 1280x960、最大フレームレートは 30fps である．ただし実際には 10fps 程度で撮影を行った．

複数方向から撮影した画像のそれぞれから人物領域のみを抽出する必要がある．領域抽出には Video SnapCut を用いた．この手法は初期フレームの前景の境界を指定する必要があるが、前フレームとの比較によって境界形状を考慮した確率マップを用いることで、背景と前景の色が近い場合でも比較的精度良く前景を抽出することが可能である．

今回は3次元復元を行わず、表示は純粋なビルボードとして行った．視点と人物モデルの位置に応じて、単純に近い方向から撮影された画像に切り替えて表示を行った．

5.2. シナリオ再生

CGアニメーションやVRシステムと異なり、シナリオの再生はトラムの移動に伴って行う必要がある．しかし、トラムの移動速度は周回ごとに異なり、またGPSのデータにも誤差が含まれるため、ある程度の範囲の領域を設定して再生のトリガとする必要がある（図9）．基本的にトリガの範囲は一定が良いが、広すぎるとタイミングの制御が困難となり、狭すぎるとイベントが発生しないと問題も起こるため、トラムの移動速度に応じて設定した．また一つのイベントの時間が長い場合、終了する位置が大きく外れてしまう場合がある．そのため時間が長いイベントの後のイベントは、範囲を大きめに設定した（図9）．

音響効果も同様に領域を設定して、再生のタイミングを図る必要がある．ナレーションは位置情報を必要

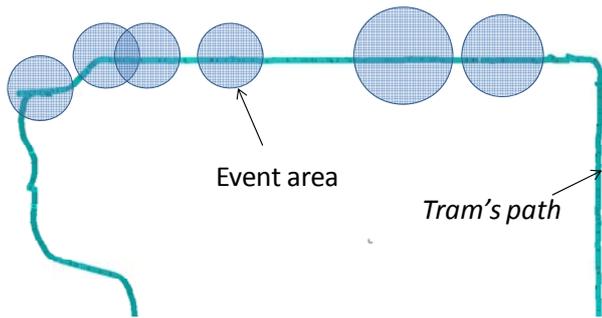


図 9 イベントの発生領域と

としないため、イベントと連動して開始、終了すればよい。音響効果はそれぞれが発せられる位置と周波数特性によって効果範囲が異なるので、それぞれの効果範囲に合わせて領域を設定した。

5.3. アンケートによる評価

本実証実験では、MR システム体験後のユーザにアンケート調査を実施した。このアンケートでは、現実感・臨場感、遺跡に対する興味などに関する主観的な評価を行った。回答者は 10 代から 80 代までの 1313 名である。年齢は 60 代が 35%と最も多く、続いて 50 代が 20%と高齢者が多いことが分かる。また男女比は 4:6 と女性の方が多かった。

CG によって仮想復元された文化財に現実感・臨場感を感じるかという質問に対して、とても感じたと回答した人は 31%、やや感じたと回答した人は 53%と多くの人が本システムによって MR 復元された文化財に対して現実感・臨場感を感じたと回答している。今回対象としている平城京に対する理解が深まったかという質問に対しては、とても高まったと答えた人が 25%、やや高まったという人が 52%であった。本実験の体験時間は約 5 分程度と非常に短い時間であるが、それに対しては十分な学習効果が得られるのではないかと推測できる。

今回は表示装置として HMD を利用したが、表示装置として適正であるか調査するために、表示装置としてどのようなものが望ましいか質問した。その結果ゴーグル装置 (HMD) と回答した人は 42%、大型ディスプレイと回答した人は 52%であった。HMD に対する不満の声は自由記入の中にも多く見られ、視野角が小さい、重くて掛け難いなどの意見が多かった。図 6 の体験の様子を見ても分かるように、HMD に MEMS 型センサを取り付けたため、ユーザは手で支えている必要があった。コストとの兼ね合いもあるが、視野角が広くユーザの視野と表示される画角が同じになるようなシステムが理想的であると考えられる [15]。ただし、VR システムに多く見られるいわゆる VR 酔いを感じ



図 9 MR システム体験の様子

る人は少なかったようである。これは自分の身体運動に応じて視点が変化するため、HMD の大きな利点である。

車両と MR 体験の組み合わせに対するアンケートは自由記入形式とした。良い点としては、やはりその場の空気を感じながら体験できる、現在と過去の比較が明確にできるという意見が多かった。また遺跡の広さを実感できる、広範囲で体験できるという点も車両型 MR のメリットである。乗り物自体に乗る楽しさがあるという意見もあり、観光のツールとして実用性が高いと言える。車両特有の振動や揺れについては、臨場感があって良いという意見に対して、映像が見えにくい、乗り物酔いするといった意見もあった。

悪い点としては、決まったルートでしか見られない、自分のペースで見られないといった意見があり、個人で自由に歩き回りたいという意見が多かった。また雨天時の回答として天候に左右されるという意見もあり、これは屋外 MR の根本的な問題であると言える。本システム特有の問題としてはカメラ位置と視点が異なると臨場感が薄れるというものがあった。各 HMD にカメラが付いているのが理想的であるが、実用的な面から考えた場合、本システムのように一台のカメラによって撮影された映像を共有するというのはい一つの解であると考えられる。

改善すべき点は多々意見として挙げられたものの、総じてこのような試みを続けていく、他の場所でも行って欲しいという意見が多かった。システムの改良に加えて、コンテンツの改良、拡充も今後の大きな課題であると考えられる。

6. おわりに

本稿では、遺跡現地において文化財の仮想復元展示を実現するために、複数人が同時に体験可能な車両を用いた MR システムを提案した。複数台の全方位カメラ



図 10 仮想物体の合成結果

によって撮影された実画像を各クライアントに配信し、この画像に仮想物体を重畳することによって遺跡現地において仮想復元展示を行った。トラムの位置姿勢推定には GPS を用い、ノイズを除去するために経路に対して適応的なカルマンフィルタを適用した。ユーザの姿勢推定にはジャイロと地磁気センサを組み合わせ、これらのセンサから得られるデータの相関を取ることで安定した推定を実現した。

また本システムの有用性を確認するために、奈良県平城旧跡において電動トラムを用いた実証実験を行った。アンケート調査の結果、本システムは文化財復元展示の方法として非常に有用であることが分かった。またトラムを利用することによって、利便性やエンタテインメント性の向上が図れることが分かったため、観光のツールとしての利用が大いに期待できる。一方、様々な技術的な課題が浮き彫りとなったため、これらを生かして今後システム、コンテンツの改良を進めていきたいと考えている。

謝辞

本研究は文部科学省「デジタル・ミュージアムの展開に向けた実証実験システムの研究開発」の支援を受けて行われました。実証実験に際しては平城遷都 1300 年記念事業協会ならびに NHK エンタープライズの方々には多大なご協力を頂きました。人物モデル、シナリオの作成に際しては、奈良文化財研究所の杉山洋氏に色々ご指導頂きありがとうございました。復元モデルの組込みに際しては凸版印刷の方々にご協力を頂きました。また運営に当たり奈良女子大学城教授と城研究室の学生の方々に大変お世話になりました。この場で厚く御礼申し上げます。

文 献

[1] 田村秀行, 大田友一: “複合現実感”, 映情学誌, 52, 3, pp.266-272 (March 1997)

- [2] R. Azuma, Y. Baillot, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier, and B. MacIntyre, “Recent Advances in Augmented Reality,” IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 21, No. 6, pp. 34-47, Nov. 2001.
- [3] K. Utsugi, T. Moriya and H. Takeda: “Making of a virtual world of heijokyo from historical knowledge”, Proc. Int. Conf. on Virtual Systems and Multimedia (VSMM2001), pp.455-462 (2001)
- [4] 安藤真, 吉田和弘, 谷川智洋, 王燕康, 山下淳, 葛岡英明, 廣瀬通孝: “スケーラブルVRシステムを用いた教育用コンテンツの試作-マヤ文明コパン遺跡における歴史学習-”, 日本バーチャルリアリティ学論誌, 8, 1, pp.65-74 (2003)
- [5] M. Callieri, P. Debevec, J. Pair and R. Scopigno: “A realtime immersive application with realistic lighting: the parthenon”, Computer & Graphics, 30, 3, pp.368-376 (2006)
- [6] V. Vlahakis, N. Ioannidis, J. Karigiannis, M. Tsotros, M.I Gounaris, D. Stricker, T. Gleue, P. Daehne and L. Almeida: “Archeoguide: an augmented reality guide for archaeological sites”, IEEE Computer Graphics and Applications, 22, 5, pp.52-60 (2002)
- [7] K. Ikeuchi, T. Oishi, J. Takamatsu, R. Sagawa, A. Nakazawa, R. Kurazume, K. Nishino, M. Kamakura and Y. Okamoto, “The Great Buddha Project: Digitally Archiving, Restoring, and Analyzing Cultural Heritage Objects,” International Journal of Computer Vision, Vol. 75, No. 1, pp. 189-208, Oct. 2007.
- [8] N. Sugano, H. Kato and K. Tachibana: “The effects of shadow representation of virtual objects in augmented reality”, Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR03), pp.76-83 (2003)
- [9] M. Kanbara and N. Yokoya: “Geometric and photometric registration for real-time augmented reality”, Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR02), pp.279-280 (September 2002)
- [10] 佐藤いまり, 林田守広, 甲斐郁代, 佐藤洋一, 池内克史: “実光源環境下での画像生成: 基礎画像の線形和による高速レンダリング手法”, 信学論 (D-II), J-84-D-II, 8, 1234-1242, (August 2001)
- [11] M. Haller, S. Drab, and W. Hartmann: “A Real-Time Shadow Approach for an Augmented Reality Application Using Shadow Volumes”, Proc. Symp. on ACM Virtual Reality Software and Technology (VRST' 03), pp.56-65 (October 2003)
- [12] 角田哲也, 大石岳史, 池内克史: “影付け平面を用いた複合現実感における高速陰影表現手法”, 映情学誌, 62, 5, pp.788-795 (2008)
- [13] 大石岳史, 大藏苑子, 川上玲, 阪野貴彦, 池内克史, “全方位カメラを用いた光源環境と対象物の同時撮影法に基づく人物モデルの MR システムへの重畳”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2009), July. 2009.
- [14] R. Kalman, “A new approach to linear filtering and prediction problems,” Trans. ASME - Journal of Basic Engineering, pp. 35-45, 1960.
- [15] S. Uchiyama, K. Takemoto, K. Satoh, H. Yamamoto, and H. Tamura: “MR Platform: a basic body on which mixed reality applications are built”, Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR02), pp.246-253 (2002)