

複合現実感による地下空間の可視化に関する実験的研究 EXPERIMENTAL STUDY ON VISUALIZATION OF UNDERGROUND SPACE BY MIXED REALITY

筒井雅行*・近久博志*・小林 薫*・阿保寿郎*

Masayuki TSUTSUI, Hiroshi CHIKAHISA, Kaoru KOBAYASHI and Toshiro ABO

The authors have studied to apply Mixed Reality (MR) to the construction field. Mixed Reality was developed from virtual reality (VR), based on the real world augmented by virtual data in a computer. More than one viewers can experience MR by the developed video see-through system to realize MR on a PC display, which pictures of CCD cameras installed in a portable PC are used for aligning reference. This system is changed into a compact and is easy to apply it to the site compared with a conventional system.

In this paper, a calibration method of the camera lens, a method of position correction based on photogrammetry technique and results of site experiments of this MR system in an intersection area of a tunnel are described.

Key word: Mixed Reality, Visualization, Stereo-Camera, Video See-Through, Portable PC

1. はじめに

近年における情報技術の著しい発達は、建設分野においてもさまざまな影響を及ぼしている。なかでもコンピュータ技術は、計画・設計、建設機械の制御、工程や現場の管理などの分野において、目を見張る成果をもたらしている。筆者らは、こうした情報技術の中で、コンピュータによって生成した仮想空間を現実空間と整合させて、被験者に各空間の情報を相互に補強し合った世界を提供する、複合現実感 (Mixed Reality; MR) を建設分野に適用する研究を進めてきた。

ここでは、複合現実感 (MR) の概要、開発したビデオシースルー方式の MR システムについて、人間の目の替わりとなる非測定用 CCD カメラのキャリブレーションと位置合わせの手法について説明するとともに、施工中のトンネル交差部において本 MR システムの現場実験を行った結果について述べる。

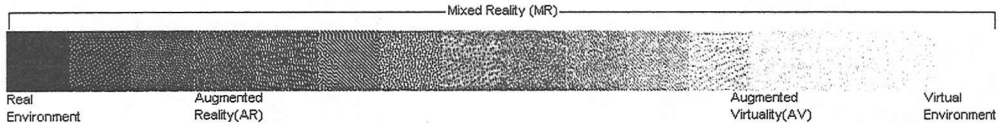
2. 複合現実感

2.1 複合現実感とは

複合現実感 (Mixed Reality; MR) とは、トロント大学の Milgram 教授が 1994 年に提唱した概念である。コンピュータ内に仮想空間を構築し、その中にあたかも存在するような体験をさせるのが従来の仮想複合現実感、可視化、ステレオカメラ、ビデオシースルー方式、携帯型 PC

* 正会員 飛鳥建設技術研究所

現実感（Virtual Reality; VR）であった。これに対して我々の実在する現実世界に立脚し、電子的な仮想データでこれを増強するAugmented Reality（AR）という概念が注目されてきた。視覚的な増強としては、透過（シースルー）型のHMD（Head Mounted Display）などを用いてCGデータを重ね合わせることで達成できる。このARに対立する概念として、仮想世界を現実世界の生情報で強化するAugmented Virtuality（AV）が考えられる。ARとAVの違いは、現実世界と仮想世界のいずれをベースとするかであるが、実際にはいずれに属するのか判然としないケースも多い。Milgram教授は、図－1に示すように、ARとAVには明確な境界はなく、スペクトルの的に連続であると考え、その全体をMixed Realityと呼んだ¹⁾。



図－1 Virtuality Continuum¹⁾

田村²⁾は、Milgramの用語や考え方を踏襲して、MR環境体験に次の4方式を想定した。

- ① 光学シースルー方式：現実世界は光を透過する眼鏡（HMDなど）を通して直接眺め、これに仮想環境からのビデオ映像を重畳させる方式。
- ② ビデオシースルー方式：体験者が本来自分の目で眺める現実世界を、カメラを通じてビデオ映像化し、ここに仮想環境の映像を重畳させる方式。
- ③ 実時間テレプレゼンス方式：②を拡張し、遠隔地の光景の実写映像を用いる方式。
- ④ 蓄積再生テレプレゼンス方式：③の方法をさらに拡張して、現実世界を多数のカメラを同期して撮影した映像を蓄積し、体験時に利用者の視点に応じた任意の光景を生成して、仮想空間と融合させる方式。

建設分野（建設現場）におけるMRシステムの適用に関しては、上記の分類で言えば、①光学シースルー方式（AR）が最適のように考えられる。しかし、実用面での現状の技術的課題から、この方式だけで対処するには問題点が多い。また、この他にも、実際には現地に行けない場合でも現地の映像を利用して仮想環境データと融合させる必要も生じてくることになる。

2.2 複合現実感の技術的課題

一般に、現実空間と仮想空間の融合（重ね合わせ）には、次のような解決すべき課題がある。

（1）空間的ずれの解消（幾何学的整合性）

現実世界と仮想世界の空間座標を一致させるには、被験者の位置・視点方向を正確に固定させ、観察視点の移動にも追従できる必要がある。位置合わせの問題は、被験者やカメラの3次元位置・姿勢を求める問題に帰着できる。そのための一般的な手法は、測量機器や磁気センサといった3次元トラッカを用いる手法（トラッカベース）である。これに対して、融合の対象となる画像の情報を直接用いる手法（画像ベース）がある。これらの手法の長所と短所を比較すると、表－1のようになる。それぞれに一長一短があるため、両者の併用が望ましいとされている。画像ベースの位置合わせの補助にトラッカを利用したもの³⁾や、逆に、磁気センサの誤差によって生じる位置ずれを画像情報によって補正したもの⁴⁾などが報告されている。

（2）画質的ずれの解消（光学的整合性）

仮想世界の映像が、コントラスト、色調などの要因で現実世界との重畳・合成時になるべく違和感が生じないような対策が必要である。画質的ずれの解消については、光学シースルー方式では、いかにHMDの性能向上がなされても画質の差は埋めようがない。これに対して、ビデオシースルー方式では、最近のCG技術を駆使することによって、実写画像と区別できないほどの画像の生成が可能である。

表－１ トラッカベース法と画像ベース法の比較

トラッカベース法	画像ベース法
誤差が大きい。	最終的に人間が感じる位置ずれを直接扱えるため、誤差が小さい。
視点の３次元位置を正確に復元しなくてはならない。	最終的に正しく見えれば必ずしも３次元の情報を復元しなくてもよい。
座標変換が煩雑である。	対象物体と画像間の座標変換だけを考えればよい。
行動範囲がトラックの有効範囲に限定される。	原理的には、行動範囲は限定されない。
環境に対する知識は不要である。	ランドマークが必要である。
	ランドマークの存在する範囲に融合対象が限定される。
動作が安定している。	ランドマーク抽出や識別といった画像処理の不安定さによりシステムの安定性に欠ける。

（３）時間的ずれの解消（時間的整合性）

被験者の視点位置や方向の変化により、そのセンシングと仮想環境の描画時間の分だけ遅延が生じ、現実世界の変化に対して遅れが生じる。表－１に示したように、画像ベース法を用いる場合には、コンピュータの処理能力にもよるが、システムが不安定となって遅れが生じやすい。

３．開発したMRシステム

建設分野におけるMRシステムの適用に関して、まず、現場での直接的な視覚と体性感覚との整合性に重点を置いて、光学シースルー方式のMRシステムを開発した。本システムの詳細については、文献 5)に譲るが、姿勢測定用のジャイロセンサに、ドリフトと呼ばれる見地角度のずれがわずかに生じ^⑩、MR体験が長時間にわたる場合にこの蓄積誤差が増大して、現実空間と仮想空間との間に位置ずれが生じる。また、位置測定用のトータルステーションも、障害物がある場合、正確な被験者位置の把握が困難となる。

このように光学シースルー方式のMRでは現実空間を直接観察するため、ビデオシースルー方式と比べて、現実空間に対する仮想空間の位置合わせに、より厳密な精度が要求される。そこで、センサの測定精度に大きな影響を受けないように、画像ベース法を用いたビデオシースルー方式のMRシステムを開発した。

ビデオシースルー方式のMRに対する位置合わせ手法の研究事例の多くは、位置ずれを２次的に一致させる手法であり、カメラ位置と姿勢情報に３次的に正しい補正を加えるものではない。ここでは、被験者の目の替わりとなる２台のCCDカメラを用いたビデオシースルー方式のMRシステムについて、写真解析理論に基づいて、被験者の位置と姿勢情報を直接的に算定する手法を中心として説明する。

３・１ 非線形ひずみを考慮した共線条件式によるカメラ位置と姿勢の算定

CCDカメラを用いた地上写真測量に用いられる写真解析理論には、中心投影変換に基づくものやAffin変換に基づくもの^⑦などがある。後者は、通常の写真と比較して、画角が極端に小さく撮影距離に対する被写体の起伏が小さいような場合で、十分な幾何学的精度が得られないような場合に適用される。以下、通常の射影幾何学に基づいたカメラ位置と姿勢の算定について説明する。

測定用カメラのように、カメラレンズのひずみ曲収差が無視できる場合、座標が(X, Y, Z)であるような点の写真座標(x, y)は、共線条件式(1), (2)で表される。

$$x = -c \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \quad (1)$$

$$y = -c \frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \quad (2)$$

ここで、 c は焦点距離、 (X_0, Y_0, Z_0) はカメラ投影中心の座標、 (ω, ϕ, κ) はカメラの姿勢であり、 a_{ij} は回転行列 $\mathbf{D}_\omega \mathbf{D}_\phi \mathbf{D}_\kappa$ の要素である。カメラの焦点距離 c が既知である場合、3点以上の座標が既知である点（基準点；Reference Point）が与えられればカメラ位置と姿勢は一義的に求められる。しかし、使用する CCD カメラは非測定用カメラであり、主点位置のずれ (x_h, y_h) 、カメラレンズのひずみ曲収差を考慮する必要があり、この場合、式(1)、(2)の共線条件式の左辺は、それぞれ、 $x - x_h - \Delta x$ 、 $y - y_h - \Delta y$ で表される。ただし、

$$\begin{aligned} \Delta x &= x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) & \Delta y &= y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) & (3) \\ r^2 &= x^2 + y^2 & & & (5) \end{aligned}$$

である。さらに、カメラの焦点距離 c も厳密には未知であるため、共線条件式は、外部標定要素 $(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)$ に加えて、内部標定要素 $(c, x_h, y_h, k_1, k_2, k_3, \dots)$ も未知数となって、繰り返し計算に時間を要する。そこで、位置補正計算を簡単に行うために、事前にMR体験と同条件で設置したCCDカメラの画像によって、これらの内部標定要素をキャリブレーションしておく。カメラレンズのキャリブレーションは、同一平面上に相対的な位置関係が正確に測定されている標点を多数配置したプレートを、MRで使用するCCDカメラ（画角約48°，焦点距離約7.5mm）で数方向から画面全体に写るようにして撮影した画像を用いて行う。この際、カメラ位置とカメラ姿勢は、トータルステーションとジャイロセンサを用いて正確に測定しておく。

共線条件式は、未知数（カメラ位置と姿勢）について非線形であるため、解析では未知数を近似値と微小補正量とに分解して非線形方程式を線形化し、繰り返し計算によって解を求める。本ビデオシースルー方式MRシステムにおけるカメラ位置の算定では、十分な精度を有するトラッカ（トータルステーションやジャイロセンサなど）を併用する場合は、初期の近似値はトラッカのセンシング結果を用い、以降は、カメラの画像に写る基準点を用いた画像ベース法によって得られるカメラ位置・姿勢の算定結果を用いる。

3.2 基準点の自動抽出

基準点は周囲と異なる色でマーキングしておき、初期画像でのみ、RGB情報を基にした抽出を手動で行う。第2フレーム以降は、全領域に対してRGB情報を基にした抽出を行うとマッチングに時間が掛かるので、前フレームでのカメラ位置と姿勢情報を基に各基準点のカメラ画像上の座標を逆算し、ある探索範囲を設けてRGB情報を基に基準点を自動的に抽出する。

3.3 ビデオシースルー方式MRシステムの構成

写真-1に示すように、開発したMRシステムは、上述の位置合わせの手法を用いたもので、携帯型PCにCCDカメラ2台を設置し、ビデオシースルー方式によってPC画面上で複合現実感を実現するもので、複数の被験者がMRを体験することができる。

図-2に開発した携帯型PCによるビデオシースルー方式MRシステムの全体構成を示す。上述の方法で算定されるカメラ位置・姿勢に合致するように、仮想空間の対象物の座標を変換し、カメラ視点から見える画像を生成してカメラ画像に合成する。この合成は、左右それぞれのカメラ画像で行われるが、ディスプレイへの表示方法はオプションとし、左あるいは右画像のみの単眼視表示あるいはステレオ表示が選択できる。

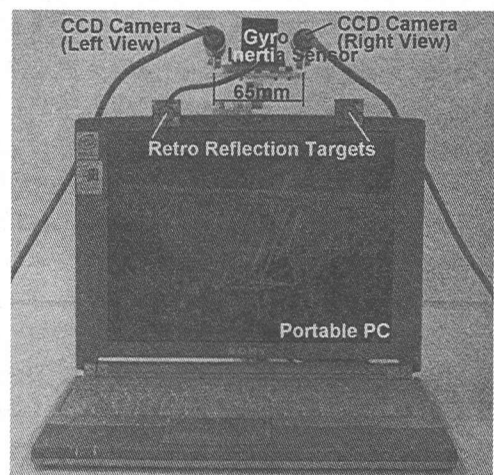


写真-1 携帯型 PC による MR システム
(ビデオシースルー方式、単眼視表示)

ようになっている。ステレオ表示には種々の方法があるが、本システムでは、通常CRTディスプレイ(非ステレオディスプレイ)に、StereoGraphics社の上下分割方式⁸⁾に従って左右の画像を表示することによって、液晶シャッターメガネを装着した被験者が3次元的なMRを体験することができるようになっている。

4. MRシステムの建設現場への適用

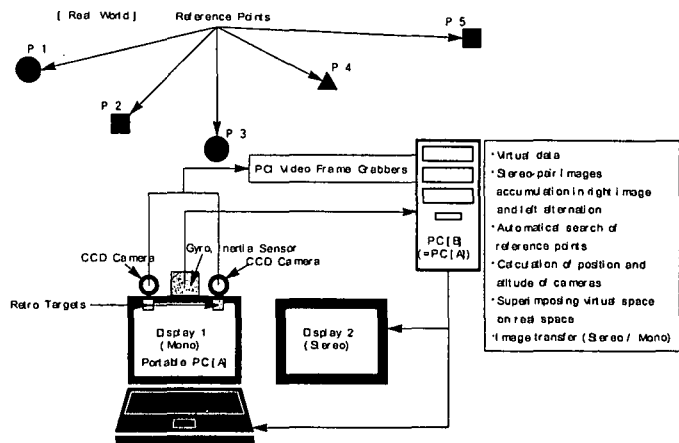


図-2 携帯型PCによるビデオシースルー方式MRシステム構成図

4.1 MRシステムによる地下空間の可視化

都市部における地下埋設物、トンネルの交差部や近接部あるいは地下発電所などのように、地下空間内に様々な構造物が3次元的に複雑に配置される場合、新設の構造物の建設にあたっては、地質構造も含めた構造物相互の干渉問題を中心として、詳細かつ厳密な設計と施工管理が要求される。3次元CADでこれらの構造物を正確にモデリングし、それらの仮想データを本MRシステムによって現地の画像に重畳させて可視化することによって、地下空間における建設工事の設計と施工の円滑な進行を支援することが可能である。

図-3に、53°の角度で斜坑と本坑が交差するトンネル工事の交差部に、開発したビデオシースルー方式のMRシステムを適用した結果を示す。このトンネル交差部では、様々な施設を複雑な手順で施工するため、相互の位置関係を正確に把握し、支保構造に合理的な補強を加える必要があった。

MRシステムを用いることによって、地下空間の建設工事の各段階において、

- ① 計画段階：構造物・施設の配置計画、完成形のシミュレーション、
- ② 設計段階：3次元数値解析モデル作成、細部設計（支保部材の取合いなど）、
- ③ 施工段階：作業手順の確認、構造物部材の設置位置確認、

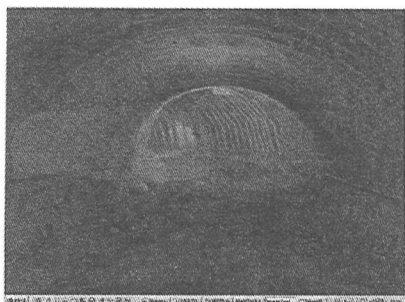
などの様々な支援やシミュレーションをコンピュータ上で行うことが可能である。

4.2 その他の建設工事へのMRシステムの適用例

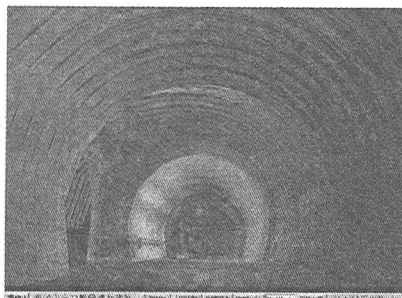
図-4は、トンネル工事の土捨場の現場で、現況および将来115,000m³の掘削ズリを盛立てた形をMRシステムによって可視化したものである。画像ベース法による位置合わせ手法を用いることにより、広範囲にわたる建設工事においても、精度良く仮想空間と現実空間の融合が図られていることが分かる。

5. おわりに

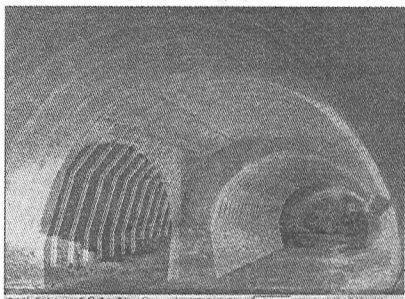
ステレオ画像をベースとした携帯型PCによるビデオシースルー方式MRシステムの地下空間の可視化への適用について、トンネル交差部での事例を中心に報告した。本システムを、室内および現場レベルで検証した結果、カメラ位置と姿勢の補正に関して良好な結果が得られた。MR技術は、これまで施工中の建設工事の分野に適用されることがほとんどなかったものであるが、建設分野の広い範囲に適用が可能な技術である。今後は、リアルタイムに違和感なく各種の支援を行えるように本システムの各種整合性を検討して行きたい。



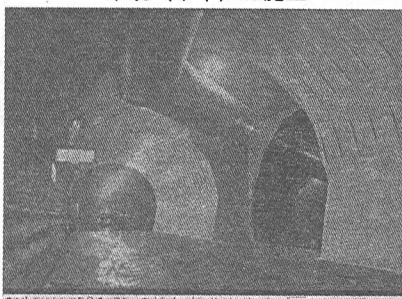
斜坑から本坑へ



本坑（下半）の施工

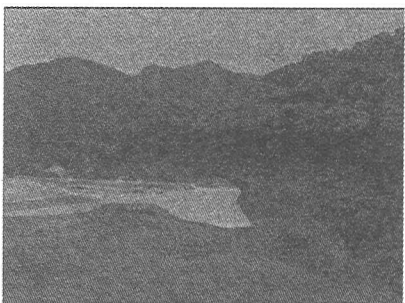


隅角部の施工

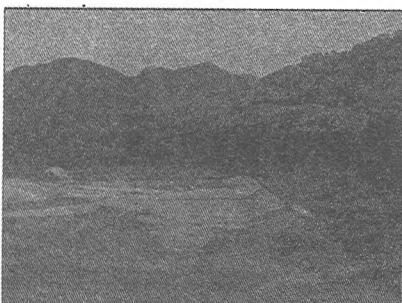


交差部インバートの施工

図－3 MRシステムによるトンネル交差部の可視化



現況



115,000m³ 盛立時の形状

図－4 MRシステムによる土捨場の完成形シミュレーション

6. 参考文献

- 1) Milgram, P. & F. Kishino : A Taxonomy of Mixed Reality Visual Display, IEICE Trans. Inf. & Sys., E77-D, 12, pp.1321-1329, 1994.
- 2) 田村秀行：複合現実感研究プロジェクト、電気情報通信学会総大、ISS-1-4, 1997.
- 3) 横小路泰義, 菅原嘉彦, 吉川恒夫：頭部装着型ディスプレイのための視覚と加速度を用いた位置追跡法、日本バーチャルリアリティ学会第2回大会論文集, pp.121-124, 1997.
- 4) Bajura, M. & U. Neumann : Dynamic Registration Correction in Video-based Augmented Reality Systems, Computer Graphics and Applications, 15, 5, pp.52-60, 1995.
- 5) 近久・小林・松元・中原・筒井・熊谷：建設工事へ適用するために開発した複合現実感システムについて、土木学会第55回年次学術講演会講演概要集, CS-226, pp.452-453, 2000.
- 6) Foxlin, E. : Initial Head-tracker Sensor Fusion by a Complementary Separate-bias Kalman Filter, Proc. VR Annual Int. Symp., Santa Clara, CA 1996.
- 7) Okamoto, A. : Ultra-precise Measurement Using Affine Transformation, Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 29, Commission V, pp.318-322, 1992.
- 8) Lipton, L. : Coming Attraction: Stereo Vision on Your Workstation, Mechanical Engineering, 112, 3, pp.36-39, 1990.