

屋外装着型複合現実感のためのハイブリッド位置合わせ手法

佐藤 清秀 穴吹 まほろ 山本 裕之 田村 秀行

A Hybrid Registration Method for Outdoor Wearable Mixed Reality

Kiyohide Satoh, Mahoro Anabuki, Hiroyuki Yamamoto, and Hideyuki Tamura

Abstract - In this paper, a registration method for outdoor wearable mixed reality (MR) systems is described. Our approach is based on using a high precision gyroscope, which can measure 3DOF angle of head direction accurately, but with some drift error. We solved the drift problem with a vision-based drift compensation algorithm, which tracks natural features in the outdoor environment as landmarks from images captured by a camera on an HMD. This paper first describes the detail of the vision-based drift compensation method. Then, a calibration method for the orientation sensor is proposed. Finally, using results from an actual wearable MR system, a comparison of registration error with and without vision-based drift compensation demonstrates the feasibility of the proposed method.

Keywords: mixed reality, augmented reality, registration, outdoor, wearable.

1. はじめに

仮想物体や付加情報を現実空間に重畳表示する複合現実感(MR: Mixed Reality)技術[1]が注目されている。中でも、屋外アプリケーションへの応用に対する期待は高く、屋外で利用可能な装着型MRシステムに関する研究が活発に行われている[2][3]。

MRを実現する上で最も重要な技術課題の一つに、現実空間と仮想空間の位置合わせの問題がある。仮想の物体が現実空間にあたかも存在するがごとき感覚を体験者に与えるためには、現実と仮想の高精度な位置合わせが必須である。そして、それが達成できたときにはじめて、単なる情報提示手段に留まらない、ビジュアルシミュレーション等の新たな領域にMR技術を活用することが可能となる。

しかし、屋外での利用を想定した装着可能な機器構成で、精度の高い位置合わせを実現するMRシステムは、未だ実現されていない。そこで筆者らは、これらの要件を満たすようなシステムの構築を目標として、屋外装着型MRシステム「TOWNWEAR (Towards Outdoor Wearable Navigator With Enhanced and Augmented Reality)」の検討を進めてきた[4][5]。

本論文では、TOWNWEARにおいて筆者らが実現した、自然特徴追跡とジャイロセンサのハイブリッドによる、高精度な位置合わせ手法について述べる。第2章では、屋外装着型MRにおける位置合わせ問題

と、関連研究の取り組みおよび本手法のアプローチについて述べる。次に第3章および第4章において、本手法における自然特徴追跡と位置合わせアルゴリズムについて述べ、第5章において、姿勢センサの較正手法を述べる。最後に第6章において、実際に屋外装着型MRシステムを使用した評価実験により、手法の有効性を示す。

2. 屋外装着型MRのための位置合わせ手法

2.1 屋外装着型MRにおける位置合わせ問題

MRにおける現実と仮想の位置合わせの問題は、一般に、光学シースルー方式の場合にはユーザの視点の位置及び姿勢を、ビデオシースルー方式の場合にはビデオカメラの視点の位置及び姿勢を、いかに正確に計測するかに帰着される。仮想物体を描画するためには表示系やビデオカメラの内部パラメータを得る必要があるが、本論文では、これらのパラメータは何らかの手段によって事前に得られているものとする。

視点位置の移動がある特定の領域内に限定される用途であれば、その領域を計測範囲とする設置型のセンサと、画像処理によるマーカ追跡を利用したハイブリッド手法によって、高い精度の位置合わせが実現できる[6]。しかし、屋外を自由に歩き回るシステムを想定した場合には、移動範囲に制限を持たない非設置型のセンサが必要となる。

視点の「位置」の計測に関しては、非設置型のセンサで、設置型センサと同程度の精度を有する小型センサは存在しない。しかし、屋外環境において比較的遠

方を観察対象とする場合には、視点位置の厳密な計測は不要といえる。これは、位置合わせに必要とされる視点位置計測の精度が、一般に、視点から観察対象物体までの距離との相対的な関係によって決定されるためである。したがって、大まかな視点位置が既知であるか、あるいは、何らかの手段[†]で取得可能な状況であれば、位置合わせに関する検討の対象を視点の姿勢の計測のみに絞ることができる。

2.2 関連研究

これまでに提案された屋外装着型 MR システムの多くは、VR (Virtual Reality) の分野で従来から利用されている姿勢センサ (例えば、振動ジャイロや地磁気センサ) を姿勢の計測に用いている[2][3]。これらのセンサの精度は、MR の中でも仮想と現実の位置合わせをそれほど重要視しないタイプのアプリケーションには十分適用可能であるが、ビジュアルシミュレーションを行うのに足るような正確な位置合わせは期待できない。

一方、画像処理に基づいて位置合わせを行うことも、設置型センサに依存しない MR システムを実現するための選択肢として考えられる。しかし屋外では、

- マーカの貼付や照明条件の調整といった、環境の操作が困難である、
- 装着可能な機器構成を考えた場合に、計算資源が期待できない、

といった制約から、画像処理のみで位置合わせを行うことは困難である。仮に前述したような低精度なセンサとのハイブリッドによって位置合わせを行おうとしても、センサの精度が絶対的に不足しているため、画像処理に高い比重をおいた手法にならざるを得ず、計算量の問題は依然として残されてしまう。

例えば Youら[7]は、角速度センサの誤差を自然特徴追跡によって補正する手法を提案した。この手法は高精度な位置合わせを実現したが、計算量の問題から 10fps 強の描画更新レートを実現するためには SGI の Onyx2 を用いなくてはならなかった。

Kourogilら[8]は、予め蓄積したパノラマ画像に対するパターンマッチングと慣性センサから得られる角度情報の併用により位置合わせを行う手法を提案した。この手法は、ワイヤレス LAN で接続された PC クラスタに演算処理を行わせることで、ウェアラブル PC における計算資源不足の問題を克服した。しかし、実

時間処理を実現するために簡便なマッチングアルゴリズムを適用しているため、ぶれのない位置合わせを実現することはできなかった。

2.3 目標とアプローチ

屋外装着型 MR システムを検討するにあたり、筆者らは、以下に示すような目標を設定した。

- 高精度な位置合わせを行う。
- デオレートでの表示を行う。
- 実際に装着して屋外で利用可能なシステムを構築する。

前節で述べたように、画像処理に大きく依存した位置合わせ手法には、精度と更新レートとの間にトレードオフが存在する。しかし、このトレードオフを打ち消すのに十分なほどに処理能力を向上させたウェアラブル PC を作ることは、現状では困難である。一方、センサに関しては、例えば航空機制御等の分野では、光ファイバジャイロ (FOG: Fiber Optic Gyroscope)[‡]やリングレーザジャイロ (RLG: Ring Laser Gyroscope) に代表されるような、非常に精度の高い姿勢センサが用いられている。したがって、これらの姿勢センサを屋外装着型 MR システムに適用することにより、上記のトレードオフを解消することが期待できる。

本手法では、ジャイロセンサのドリフト誤差 (これは時間が経過するにつれて増加する) に起因した位置ずれが許容範囲を超える前に、画像処理に基づくドリフト補正を行うというアプローチによって、位置合わせを実現する。高精度ジャイロセンサ (ジャイロベースの 3 軸姿勢センサ) の多くは 3 軸の加速度センサを内蔵しており、方位角以外の 2 軸 (ピッチ角及びロール角) に関しては重力によるドリフト補正を行うことが可能である。したがって、画像処理によるドリフトの補正は、方位角に関してのみ考えればよい。

ドリフトの補正は、例えばビルの角や家の屋根のような屋外環境中の自然特徴をランドマークとして、その画像上での観測座標を検出し、センサ出力に基づいて算出した画像上における投影座標と比較することで行う。ランドマークの検出によってセンサの誤差を補正するという試み自体は従来からなされているものであり [9]、画像上からいかに正確かつ安定的にランドマークを検出するかが最大のポイントとなる。

以下では、視点の姿勢をオイラー角 (すなわち、 z 軸まわりの回転角 (ロール角) ϕ , x 軸まわりの回転

[†] TOWNWEAR では、視点位置の既知な利用可能地点を対象地域内に多数用意し、ユーザが ID 入力により利用地点を選択するという構成をとることで、広い範囲におけるシステムの利用を実現している。

[‡] ジャイロ自体は角速度センサであり、複数のジャイロと複数の加速度センサを組み合わせはじめて、3 軸の姿勢センサとして用いることができる。本稿では、このようなジャイロベースの 3 軸姿勢センサを便宜上「ジャイロセンサ」と呼ぶこととする。

角 (ピッチ角) ψ , y 軸まわりの回転角 (方位角) θ で表わすものとする. 各軸まわりの回転行列をそれぞれ $\mathbf{R}_z(\phi)$, $\mathbf{R}_x(\psi)$, $\mathbf{R}_y(\theta)$ とすると, 視点の姿勢を示す回転行列 \mathbf{R} は, それらの積である $\mathbf{R} = \mathbf{R}_z(\phi) \mathbf{R}_x(\psi) \mathbf{R}_y(\theta)$ によって構成される.

なお, 本手法は現実空間を撮像するカメラを必要とする手法であるが, その適用範囲はビデオスルー方式の MR システムに限定されるものではない. 光学スルーHMD (Head-Mounted Displays) にビデオカメラを装着することで, 光学スルー方式の MR システムに本手法を適用することも可能である.

3. ランドマークの検出

3.1 センサを利用したテンプレートマッチング

ランドマークの検出は, テンプレートマッチングによって行う. 一般に, 画像中におけるランドマークの 2 次元的な回転は, テンプレートマッチングを困難にする一つの要因となっている. 例えば, 図 1(a)に示すようなランドマーク L を, 図 1(b)の画像 I から検出するという状況を考える. このとき, 図 1(a)の画像から生成したテンプレート画像 T を用いた単純なテンプレートマッチングでは, 画像の回転の影響により安定したマッチングを行うことができない.

しかし, ジャイロセンサの誤差補正に画像情報を用いるという目的においては, ジャイロセンサの出力として得られるカメラのロール角が利用可能である. 得られたロール角で画像 I を回転させることで, 図 1(c)に示すような, 回転成分を除去した画像 I' を得ることができる. この画像 I' に対してテンプレートマッチングを行うことにより, 画像の回転の影響を軽減することができる.

一方, 他の 2 軸の姿勢 (ピッチ角及び方位角) につ

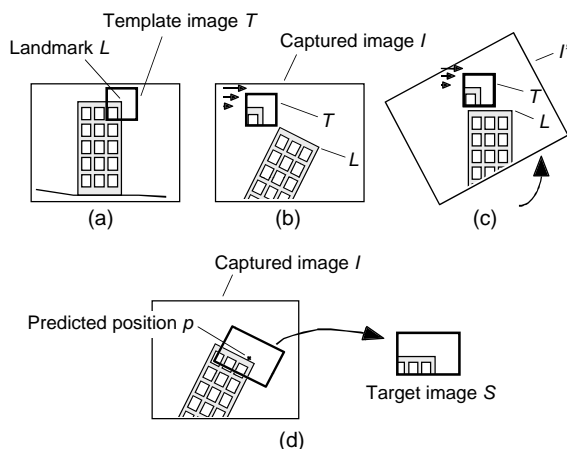


図 1 センサ情報を用いたテンプレートマッチング

Fig.1 Template matching by using gyroscope

いても, ジャイロセンサによる計測値が得られている. 方位角に関してはドリフト誤差を含んだ値であるが, 前フレームまでの処理によって, その時点におけるドリフト補正値が得られている. したがって, それらの値に基づいて, 画像 I 上におけるランドマーク L の大まかな位置が推定できる.

その推定位置の近傍領域に対してのみ上記の回転処理を行うことで, 図 1(d)に示したように, ランドマークの探索処理を行う対象であるターゲット画像を作成し, 探索の範囲を限定することができる. その結果, テンプレートマッチングによるランドマークの検出を, 高速かつ安定的に行うことが可能となる.

3.2 ランドマークの設定

一般的に, ランドマーク検出に基づいた位置ずれ補正を行う場合には, 画像上におけるランドマークの投影座標を算出するために, そのランドマークの世界座標系中における 3 次元位置が既知でなくてはならない. しかし, 本手法で取り扱うセンサの誤差は姿勢に関する要素のみであり, ユーザの視点位置を固定と仮定しているため, ランドマークの 3 次元位置は必ずしも必要ではない. すなわち, 視点位置からランドマークまでの距離情報は本質的には意味をなすものではなく, 視点位置からみたランドマークの「方向」を特定することのみが必要となる.

そこで本手法では, 世界座標系の原点を視点位置に平行移動させた座標系 (すなわち, カメラ座標系から姿勢成分を取り除いた座標系. この座標系を「初期カメラ座標系」と呼ぶことにする) を基準として, その座標系において適当な奥行きをもつ点としてランドマークの位置を設定する.

ランドマークの設定は, 撮影画像上におけるランドマークの撮像位置の指定によって行う. ある時刻に撮像された画像上において, ランドマーク L_i (i はランドマークの識別子) の撮像位置 p_i が指定されたとする. 一般に, 画像座標系上の 1 点が指定されればカメラ座標系中に任意の奥行きを持った 1 点が定義できるので, p_i に適当な奥行きを与えた座標をカメラ座標系におけるランドマーク位置 P_{C_i} とする. さらに, ジャイロセンサによって得られる同一時刻における視点の姿勢 \mathbf{R} に基づいて, 姿勢成分を取り除いた初期カメラ座標系におけるランドマーク位置 $P_{C_i}^0 = \mathbf{R}^{-1} P_{C_i}$ を算出する.

3.3 テンプレート画像の取得

ある時刻に取得された画像上におけるランドマークの投影座標は, 初期カメラ座標系で定義されるランドマークの座標と, ジャイロセンサによって得られる同

時刻における視点の姿勢に基づいて算出できる。テンプレート画像の取得は、このようにして推定されたランドマークの投影座標を中心として、ジャイロセンサによって得られるロール角だけ周辺の領域を回転させた $N \times N$ の矩形領域を抽出することで行う。

なお、以上で述べたランドマークの設定およびテンプレート画像の取得方法は、センサによって得られる姿勢が正確であることを前提にしている。したがってこれらの処理は、後述するセンサキャリブレーションの直後のように、ジャイロセンサのドリフト誤差が十分に無視できる状況において実行することが必要である。

3.4 ランドマークの検出

以上で設定したランドマークとそのテンプレート画像を用いて、以下の手順によってランドマークの検出を行う。

Step1: その時点のセンサ出力と、その時点までに導出したドリフト補正值に基づいて、画像上におけるランドマークの投影座標を推定する。すなわち、センサによる計測値として得られる時刻 t における視線の方位角を θ^t 、これまでの処理で既に算出されている方位角のドリフト補正值を θ_d^{t-1} とすると、 $\theta^t = \theta^t + \theta_d^{t-1}$ を視線の方位角として、ランドマークの推定投影座標を算出する。

Step2: テンプレート画像の生成と同様の方法により、前記推定投影座標の周辺領域を探索処理のターゲット画像として抽出する。前記撮像推定位置から左右に $\pm m$ 画素、前後に $\pm n$ 画素の探索を行う場合には、ターゲット画像のサイズを $(N+2m) \times (N+2n)$ とすればよい。

Step3: 抽出したターゲット画像に対して、テンプレートマッチングを行う。

4. ドリフトの補正

ドリフト補正值の算出は、原理的には、1 つのランドマークの検出によって実現できる。ランドマーク L_i がターゲット画像上の座標 (u_i^t, v_i^t) で検出されたときの補正值の更新は、方位角のドリフトに関連する値である u_i^t を用いて、以下の手順で実現される。

Step1: 撮像画像上におけるランドマークの座標 $\hat{p}_i^t = (\hat{x}_i^t, \hat{y}_i^t)$ を次式によって求める。

$$\begin{cases} \hat{x}_i^t = x_i^t + u_i^t \cos \phi^t \\ \hat{y}_i^t = y_i^t - u_i^t \sin \phi^t \end{cases} \quad (1)$$

Step2: 画像座標 \hat{p}_i^t 、任意の奥行き、透視変換行列の逆行列を用いて、カメラ座標系におけるラン

ドマークの擬似座標 $\hat{P}c_i^t$ を設定する。

Step3: 回転行列 $\mathbf{R}'' = \mathbf{R}z(\phi^t)\mathbf{R}x(\psi^t)\mathbf{R}y(\theta^t)$ を用いて、 $\hat{P}c_i^t$ を初期カメラ座標 $\hat{P}c_i^0 = (\hat{X}c_i^0, \hat{Y}c_i^0, \hat{Z}c_i^0, 1)$ に変換する。

Step4: $\hat{P}c_i^0$ と Pc_i^0 の比較により、ドリフト補正值 $\Delta\theta_d^t$ を算出する。これらの値の間には、

$a\hat{P}c_i^0 = \mathbf{R}y(\Delta\theta_d^t)Pc_i^0$ (ただし a は定数) の関係が成立しており、この式を解くことにより、次式によって補正值 $\Delta\theta_d^t$ を求めることができる。

$$\Delta\theta_d^t = \arctan \frac{\hat{Z}c_i^0 Xc_i^0 - \hat{X}c_i^0 Zc_i^0}{\hat{X}c_i^0 Xc_i^0 + \hat{Z}c_i^0 Zc_i^0} \quad (2)$$

Step5: ドリフト補正值 θ_d^t を更新する。

$$\theta_d^t = \theta_d^{t-1} + \Delta\theta_d^t \quad (3)$$

以上で得たドリフト補正值 θ_d^t を用いることで、その時点での姿勢 $(\phi^t, \psi^t, \theta^t + \theta_d^t)$ が算出できる。

なお、複数のランドマークを使用することにより、補正の安定性を向上させることができる。2 点以上のランドマークが用いられている場合には、各ランドマーク L_i 毎に上記のドリフト補正值 $\Delta\theta_{di}^t$ を算出し、その平均値をドリフト補正值として用いればよい。この処理の過程で、テンプレートマッチングにおける対応付けの信頼度の高いランドマークのみからの情報を用いることにより、隠れ等の影響を受けにくくすることも期待できる。また、信頼性の高いランドマークが一定数以下の場合には補正值の更新を行わないようにすることも有効である。

5. センサキャリブレーション

前章まででは、センサ出力として世界座標系における視点の姿勢が得られているものと仮定していた。しかし実際には、センサの出力値はセンサ座標系におけるセンサ自身の姿勢であって、計測対象である世界座標系における視点の姿勢ではない。本章では、この座標変換を行うために必要なセンサキャリブレーションについて述べる。

5.1 座標系と未知パラメータの定義

ある座標系 A における座標系 B の姿勢を、座標系 A から座標系 B への座標変換を行う 3×3 の回転行列 \mathbf{R}_{BA} で表記し、世界座標系における視点の姿勢を \mathbf{R}_{vw} 、センサ座標系におけるセンサ自身の姿勢 (センサ出力) を \mathbf{R}_{st} とすると、 \mathbf{R}_{st} と \mathbf{R}_{vw} には以下の関係が成り立つ。

$$\mathbf{R}_{vw} = \mathbf{R}_{vs} \mathbf{R}_{st} \mathbf{R}_{tw} \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{R}_{TW} は世界座標系におけるセンサ座標系の姿勢を、 \mathbf{R}_{VS} はセンサから見た視点の相対的な姿勢を表わすものであり、これらを予め求めておくことで、センサ出力である \mathbf{R}_{ST} を \mathbf{R}_{VW} に変換することが可能となる。

ジャイロと加速度センサの組み合わせで構成される3軸姿勢センサの多くは、加速度センサが重力方向を計測することで、センサ座標系の一つの軸（ここでは y 軸とする）を地平面に対して鉛直方向に向かせることができるという性質を有している。したがって、世界座標系の x - z 平面を地平面と並行に定義することにより、世界座標系とセンサ座標系の y 軸の方向を一致させることができる。

このとき、世界座標系におけるセンサ座標系の姿勢 \mathbf{R}_{TW} のうち、 x 軸および z 軸まわりの回転成分は単位行列となり、方位方向の回転成分 $\mathbf{R}_{y_{TW}}$ のみが未知となる。したがって、式(4)は以下のように変形される。

$$\mathbf{R}_{VW} = \mathbf{R}_{VS} \mathbf{R}_{ST} \mathbf{R}_{y_{TW}} \quad (5)$$

以上より、求めるべき未知のパラメータは、 \mathbf{R}_{VS} で表わされる3軸の回転角(ϕ_{VS} , ψ_{VS} , θ_{VS})および $\mathbf{R}_{y_{TW}}$ で表わされる方位角 θ_{TW} の4パラメータとなる。

5.2 視覚を手がかりとして用いたキャリブレーション

未知パラメータの全てを手作業で微調整しながら対話的に設定することは困難である。そこで、視点をある予め定めた世界座標系における初期姿勢 \mathbf{R}_{VW}^0 に移動させて、その時点でのセンサ出力 \mathbf{R}_{ST}^0 を取得し、 \mathbf{R}_{VW}^0 と \mathbf{R}_{ST}^0 に基づいて未知パラメータを算出することを試みる。

初期姿勢への視点の移動

視点を初期姿勢 \mathbf{R}_{VW}^0 に移動させるために、環境中に存在する現実物体（例えばビル）を視覚的なキューとして利用する。視点が初期姿勢に位置しているとの仮定の元で（すなわち、描画のカメラパラメータを初期姿勢 \mathbf{R}_{VW}^0 に設定して）キューとして用いるビルのワイヤーフレームモデルを描画し、これを、撮影画像

に重畳して HMD に表示する。

キューとして用いるワイヤーフレームデータの一例を図 2(a)に、この画像を撮影画像に重畳している様子を図 2(b)に示す。もし視点が初期姿勢に位置していれば、ワイヤーフレームが現実のビルに一致するはずである。ユーザは、現実のビルの像とそこに重畳したワイヤーフレーム映像が一致するように視点の姿勢の微調整を行い、図 2(c)のように十分に重なった時点で、特定のキーを押すといった入力を行えばよい。

未知パラメータの導出

ピッチ角およびロール角が 0 であるような姿勢 $\mathbf{R}_{y_{VW}}^0$ を初期姿勢として設定すると、式(5)より、

$$\mathbf{R}_{y_{VW}}^0 = \mathbf{R}_{VS} \mathbf{R}_{ST} \mathbf{R}_{y_{TW}} \quad (6)$$

の関係が成立する。 \mathbf{R}_{VS} の逆行列を \mathbf{R}_{SV} として、各軸周りの回転成分に展開すると、式(6)は、

$$\mathbf{R}_{z_{SV}} \mathbf{R}_{x_{SV}} \mathbf{R}_{y_{SV}} \mathbf{R}_{y_{VW}}^0 = \mathbf{R}_{z_{ST}}^0 \mathbf{R}_{x_{ST}}^0 \mathbf{R}_{y_{ST}}^0 \mathbf{R}_{y_{TW}} \quad (7)$$

となる。式(7)において、左辺と右辺のそれぞれが z , x , y 軸周りの回転成分の積となっているので、 z , x , y 軸周りの回転成分毎に恒等式が成立する。したがって、

$$\mathbf{R}_{z_{SV}} = \mathbf{R}_{z_{ST}}^0 \quad (8)$$

$$\mathbf{R}_{x_{SV}} = \mathbf{R}_{x_{ST}}^0 \quad (9)$$

$$\mathbf{R}_{y_{SV}} \mathbf{R}_{y_{VW}}^0 = \mathbf{R}_{y_{ST}}^0 \mathbf{R}_{y_{TW}} \quad (10)$$

となり、 $\mathbf{R}_{z_{SV}}$ および $\mathbf{R}_{x_{SV}}$ を求める事ができる。

一方、 y 軸に関しては $\mathbf{R}_{y_{TW}}$ 及び $\mathbf{R}_{y_{SV}}$ が未知であるので、このままでは求める事が出来ない。ここで、式(10)を回転角の関係で記述し変形すると、

$$\theta_{TW} = (\theta_{VW}^0 - \theta_{ST}^0) + \theta_{SV} \quad (11)$$

となる。したがって、ユーザが対話的に θ_{SV} の値を増減し、式(11)によって θ_{TW} を決定することで、位置ずれが解消されるようなパラメータの設定を容易に行うことができる。

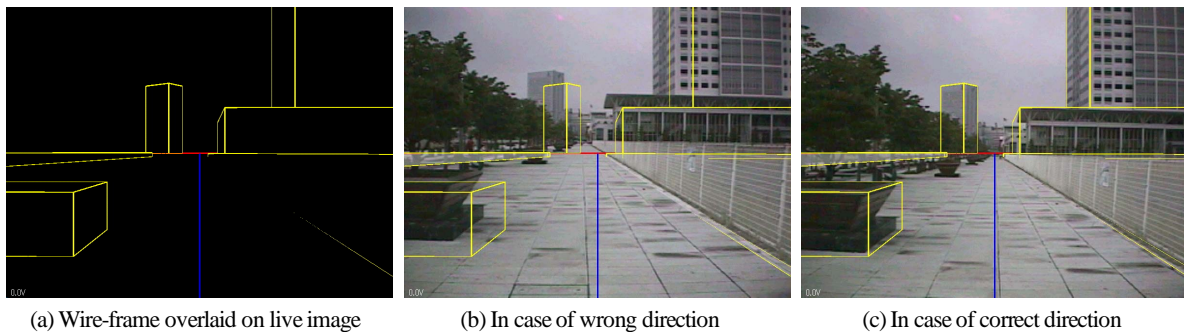


図2 初期姿勢への視点の移動

Fig.2 Transferring viewpoint to initial orientation \mathbf{R}_{VW}^0

6. 実験

以上で述べた位置合わせの枠組みを屋外装着型 MR システム TOWNWEAR[5]に実際に組み込み、その効果を確認した。以下にその詳細を述べる。

6.1 システムの構成

本手法を用いた屋外装着型 MR システムを実現するためには、頭部に装着可能であって、かつ、極力精度の高いジャイロセンサを用意することが重要である。ジャイロセンサの精度が高ければ、それだけ処理時間のかかる画像処理手法を適用することが可能となる。仮に、各軸方向に $\pm 0.1^\circ$ 程度の位置ずれを許容するとして、また、ドリフト補正値の演算に1分間の処理時間を要すると仮定すると、ドリフト誤差が $6^\circ/h$ 程度の精度を有するジャイロセンサが必要となる。また、重量に関しては、頭部に装着するおおよその限界である500g前後の重量であることが条件となる。

FOGには、ドリフト誤差が $100^\circ/h$ 以上のものから $0.01^\circ/h$ 以下のものまで、用途に応じて様々なクラスの機種が存在する[10]。重量は低精度なもので数百gであり、高精度なものの重量は数十kgに達する。これらのうち前述の条件は、中精度のクラスに分類されるFOGのスペックに概ね相当する。そこで筆者らは、同クラスのジャイロセンサであるトキメック TISS-5-70を姿勢センサとして選択し、これに要求事項を満たすような主に軽量化に関する改良を加えた TISS-5-40を作成した[5][11]。TISS-5-40の主な仕様を表1に示す。

HMDには、屋外用途向けに内製した光学シースルーHMD[4]を使用した。このHMDは両眼間の位置に $51^\circ \times 39^\circ$ の画角を有する1台のCCDカメラを内蔵しており、これによって得られる実写映像を位置合わせに利用することができる。TOWNWEARシステムは、光学シースルー方式のMRだけではなく、内蔵CCDカメラによって取得した実写映像にCG画像を重畳描画しこれをHMDへに表示することで、ビデオシースルー方式の表示を行うことが可能である。

計算機には、Mobile Pentium III 600MHzとSavage IXを搭載したB5サイズのノートPCである、東芝DynaBook SS 3480を使用した。また、CardBusタイプのビデオキャプチャカードである日立超LSIのMSVCC03を用いることで、16ビットフルサイズ画像のビデオレートでの取得を実現した。

TOWNWEAR[5]の機器構成を図3に示す。図に示したように、HMDとFOGはヘルメットに装着されている。また、他の機器(PC、バッテリー、電圧変換機、HMDコントローラ)は、ナイロン製のバック

パック内部に装備される。屋外環境において実際に実験を行っている様子を図4に示す。

6.2 ランドマークの設定

図5は、実験を行った地点から見たシーンの眺望を示したものである。図中の「 \square 」は実験に用いたランドマークの一部を示している。ランドマークの設定は、視点位置から十分遠方でありかつ画像上での特徴の際立っている点を目視によって選択し、その画像上での位置をマウスで指定することで行った。実験では、ユーザの周辺の10点の自然特徴をランドマークとして設定し、各ランドマークについて 50×50 画素のテンプレート画像を作成した。

探索範囲としては、予測位置に対して縦方向に ± 3 画素、横方向に ± 5 画素を設定した。テンプレートマッチングは、各画素の輝度値のSSD(Sum of Squared Difference)を評価値として行った。また、処理の安定性を向上させるために、十分な信頼度で2点以上のランドマークが同時に検出された場合にのみ、補正値の更新を行うこととした。

表1 TISS-5-40の主な仕様

Table 1 Specifications of TISS-5-40

パラメータ	スペック
静止時ドリフト	$1^\circ/h$
姿勢精度	ピッチ角 ロール角
	$\pm 0.5^\circ$ $\pm 0.5^\circ$
スケールファクタ	$\pm 0.1\%$
最大角速度	$458^\circ/sec$
更新レート	250 Hz
遅延時間	2 msec
重量	550 g



図3 システム外観

Fig.3 System appearance



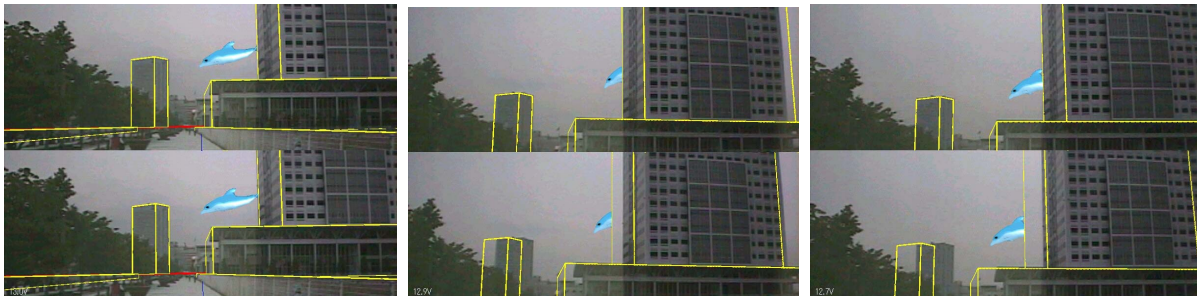
図4 屋外での実験風景

Fig.4 Experiment in outdoor environment



図5 実験に使用したランドマーク（一部）

Fig.5 Part of landmarks used in experiment



(a) 2 min. after sensor alignment

(b) 20 min. after sensor alignment

(c) 40 min. after sensor alignment

図6 融合結果（上段：補正あり，下段：補正なし）

Fig.6 Augmented images with/without drift compensation

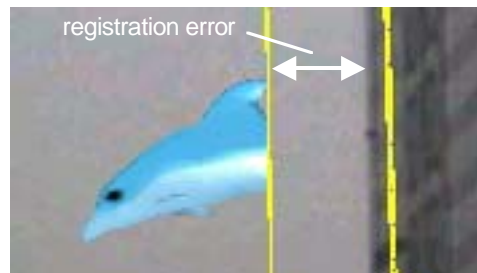
6.3 実験結果

位置ずれ補正の有効性を確認するために、同一の撮影画像とセンサ出力を用いて、画像処理による補正を行った場合と、画像処理による補正を行わなかった場合の融合画像の生成を同時に行った。提案手法はビデオスルー方式だけではなく光学スルー方式にも適用可能な手法であるが、誤差の評価を行うために、実験はビデオスルー方式によって行った。図4に示すように、オペレータはマンホールカバーの上を立ち位置として、周辺 360° を自然に見回しながら、表示画面のスクリーンダンプを2分ごとに取得した。

図6に、補正を行った場合（上段）と補正を行わなかった場合（下段）の融合結果を示す。画像上に表示されている仮想物体は、主なビルドのワイヤフレームと、空中を遊泳している一匹の仮想生物（イルカ）である。図6(a)はセンサキャリブレーションから2分後の融合画像であり、両者の間に目立った違いは認められない。図6(b)はキャリブレーションから20分後の融合結果である。補正処理を行わない場合はセンサドリフト誤差に起因する位置ずれが発生している（画像中央の現実のビルの後ろに隠れるはずのイルカが、下段では正確に隠蔽されていない）が、補正処理を行った場合はこの位置ずれが生じていない。図6(c)は40分後の結果であり、補正処理を行うことで依然として高精度な位置合わせが実現されていることが確認できる。図7に、図6(c)の画像の拡大図を示す。



(a) with drift compensation



(b) without drift compensation

図7 融合結果（拡大図）

Fig.7 Augmented images (close-up)

位置合わせ精度の定量的評価を行うために、ランドマークとは異なる数点の特徴点を用いて、目視で測定したこれらの点の画像上における実際の撮像座標と、これらの点の推定投影座標との距離の平均値を算出した。図8に、40分間にわたって求めた位置ずれの変化を示す。同図に示したように、補正を行わない場合には、12分毎に約 1°（約 12画素）の割合で位置ず

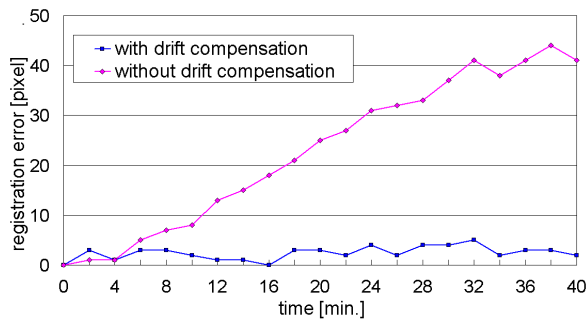


図8 誤差の比較 (補正あり vs. 補正なし)

Fig.8 Registration errors with/without drift compensation

れが増大した。一方、位置ずれ補正を行った場合には、位置ずれを常に5画素(約 0.4°)以下に抑えることができた。

6.4 パフォーマンスの評価

ドリフト補正值の更新は、ドリフトによって顕著な位置ずれが生じる前に行われればよい。そこで、ドリフト補正值を演算する補正值演算ループと、融合画像の生成を行う描画ループを二つのスレッドに分割し、それぞれに独立した更新レートを与える実装を行った。

描画ループの更新レートはグラフィックスのコンテンツに強く依存したものであるが、例えば図6に示した画像では、補正なしの場合で約22fps、補正ありの場合で約18fpsであった。また、実写画像にワイヤフレームのみを重畳した場合には、いずれの場合も30fps以上の更新レートが達成された。

ドリフト補正值の更新レートは画像中に撮像されているランドマークの数に依存して変化するものであるが、前節の実験ではおよそ2秒毎であった。このレートはジャイロセンサの精度からいうと十分過ぎるものである。このことは、描画スレッドと補正值演算スレッドのプライオリティを調整することによる描画更新レートの改善の余地や、あるいは、より計算時間を要する対応探索手法を適用することによる光源変化や隠れに対するロバストさの向上の余地が、まだ残されていることを示しているものといえる。

7. まとめ

以上のように、本論文で示した位置合わせ手法及び機器構成により、正確な位置合わせの可能な屋外装着型MRシステムを実現した。屋外装着型MRの実用化のためには、今後、視点位置移動への対応と、システムの軽量化および低コスト化を進めていくことが重要といえる。

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 CG&A*, vol.21, no.6, pp.64-70, 2001.
- [2] T. Höllerer, S. Feiner, and J. Pavlik: Situated documentaries: Embedding multimedia presentations in the real world, *Proc. ISWC'99*, pp.79-86, 1999.
- [3] 廣瀬, 廣戸: 屋外領域型展示空間における画像と対象物の重ね合せ, 日本バーチャルリアリティ学会第5回大会論文集, pp.385-388, 2000.
- [4] 原, 穴吹, 佐藤, 山本, 田村: 屋外装着型複合現実感システムの検討と試作, 同上, pp.407-410, 2000.
- [5] 穴吹, 佐藤, 山本, 田村: 屋外装着型複合現実感システムの開発と応用, 日本バーチャルリアリティ学会第6回大会論文集, pp.277-280, 2001.
- [6] 佐藤, 山本, 田村: 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, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.4, no.1, pp.295-302, 1999.
- [7] S. You, U. Neumann, and R. Azuma: Orientation tracking for outdoor augmented reality registration, *IEEE CG&A*, vol.19, no.6, pp.36-42, 1999.
- [8] M. Kourogi, T. Kurata, K. Sakaue, and Y. Muraoka: Improvement of panorama-based annotation overlay using omnidirectional vision and inertial sensors, *Proc. ISWC 2000*, pp.183-184, 2000.
- [9] M. Bajura and U. Neumann: Dynamic registration correction in video-based augmented reality systems, *IEEE CG&A*, vol.5, no.15, pp.52-60, 1995.
- [10] 中村茂: 船舶用高精度光ファイバジャイロの開発, *レーザー研究*, vol.26, no.4, pp.318-321, 1998.
- [11] K. Sawada, M. Okihara, and S. Nakamura: A wearable attitude measurement system using a fiber optic gyroscope, *Proc. ISMR 2001*, pp.35-39, 2001.

(2002年1月31日受付)

[著者紹介]

佐藤 清秀 (正会員)



1996年筑波大学大学院博士課程工学研究科修了。同年4月キヤノン(株)入社。1997年2月から2001年3月まで(株)MRシステム研究所に出向。現在、キヤノン(株)MRシステム開発センターMR技術第一研究室に所属。複合現実感の研究に従事。博士(工学)。

穴吹 まほろ（正会員）



1998年東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程修了。同年4月キヤノン(株)入社。同年7月から2001年3月まで(株)MRシステム研究所に出向。現在、キヤノン(株)

MRシステム開発センターMR技術第一研究室に所属。ユーザ・インタフェース、バーチャル・リアリティの研究に従事。情報処理学会会員。

山本 裕之（正会員）



1986年大阪大学大学院基礎工学研究科修士課程修了。同年キヤノン(株)入社。1990年～1992年マクギル大学知能機械研究所客員研究員。1997年2月より(株)エム・アール・システム研究所出向。2001

年4月キヤノン(株)復帰。現在、MRシステム開発センターMR技術第一研究室室長。本学会複合現実感研究委員会幹事。三次元画像計測・認識、アクティブビジョン、バーチャルリアリティ、複合現実感、画像メディアの研究に従事。工学博士。

田村 秀行（正会員）



1970年京都大学工学部電気工学科卒。電子技術総合研究所主任研究官を経て、1986年キヤノン(株)入社。現在同社MRシステム開発センター所長。工学博士。1998年より静岡大学情報学部講師。1997年1月より2001年3月まで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。本学会理事及び同複合現実感研究委員会委員長。