

複合現実感における写真測量学的手法を用いた位置情報の補正について

飛鳥建設 技術研究所 正会員 筒井 雅行 正会員 近久 博志
正会員 小林 薫 正会員 中原 博隆
正会員 松元 和伸 正会員 熊谷 幸樹

1. はじめに

筆者らは、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いる。開発した光学シースルー方式によるシステム¹⁾では、位置方位センサの精度に起因する位置ずれが生じやすいという課題がある。ここでは、CCD カメラによって被験者が見ている画像を取り込み、写真解析理論に基づいて位置情報を補正する手法について述べる。

2. 開発した MR システムと位置ずれの問題

写真 - 1 に、開発した MR 基本システムを示す。

被験者の位置と視線方向は、それぞれ、自動追尾機能付きのトータルステーションとジャイロセンサによってセンシングするトラッカベースを用いている。方位測定用のジャイロセンサ (IS300) は、3次元のジャイロ、加速度計および磁気計を備えている。しかし建設工事では、磁界が均一な場所での使用は少ないため、磁気計の機能は使用しない。このため、鉛直方向周りの回転に対してのみドリフトと呼ばれる見地角度のずれが、わずかに生じる²⁾。MR 体験が長時間にわたる場合、この蓄積誤差が増大し、現実空間と仮想空間との間に位置ずれが生じる。

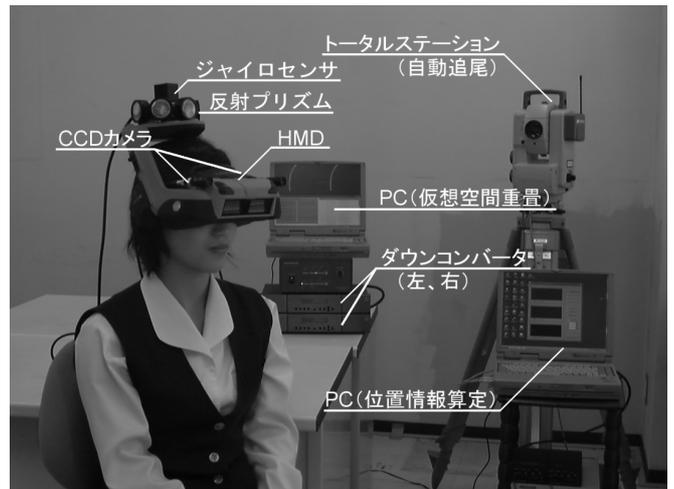


写真 - 1 MR 基本システム

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。

本システム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。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 次元的に一致させる手法であり、カメラ位置と姿勢情報に 3 次元的に正しい補正を加えるものではない。ここでは、本システムに 2 台の CCD カメラを設置し、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について述べる。

3. 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³⁾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、画角約 48°、焦点距離約 7.5mm の CCD カメラを用いる場合を想定し、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。

$$x = -c \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \quad (1) \quad y = -c \frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \quad (2)$$

ここで、c は焦点距離、(X₀, Y₀, Z₀) 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 $D_\omega D_\phi D_\kappa$ の要素である。カメラの焦点距離 c が既知である場合、3 点以上の基準点が与えられればカメラ位置キーワード：複合現実感, 写真測量, CCD カメラ, 位置合わせ, 画像認識

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、

$$\Delta x = x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \quad (3) \quad \Delta y = y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \quad (4) \quad r^2 = x^2 + y^2 \quad (5)$$

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 体験と同条件で被験者の HMD に装着した 2 台の CCD カメラのステレオペア画像によって、これらの内部標定要素をキャリブレーションしておく⁴⁾。

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け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 MR システムにおける位置補正では、初期のすべての近似値はトラックのセンシング結果を用い、以降の近似値はその時点で活用できるトラックの精度を考慮して、 κ と非自動追尾状態時の X_0, Y_0, Z_0 は前フレームでの解析結果を、その他はその時点でのトラックのセンシング結果を用いる。

表 - 1 に画像尺度 $S=1/1000$ の場合の解析に用いる重みの設定例を示す。

表 - 1 近似値に対する重みの設定例 (画像尺度 $S=1/1000$ の場合)

項目(外的精度)	キャリブレーション用重み	カメラ位置・姿勢追跡用重み
画像精度(10 μm)	1	1
基準点座標(0.1mm)	10^2	10^2
一般標点座標	10^{-2}	-
外部標定要素	カメラ位置 X_0, Y_0, Z_0	自動追尾状態: $10^2, 10^2, 10^2$ 非自動追尾状態: $10^{-4}, 10^{-4}, 10^{-4}$
	カメラ姿勢 ω, ϕ, κ	1, 1, 10^{-4}
内部標定要素 c, x_h, y_h, k_1, k_2	$10^{-5} \sim 10^{-2}$	Calibrated Value

4. 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. で示した写真解析手法では、カメラ画像上の座標の読取り精度が解析結果に及ぼす影響が大きい。画像尺度 $S=1/1000$ の場合、基準点精度 0.1mm に対する画像精度は 1/100 であり、1 画素単位での読取りでは、10mm 分の誤差が生じる。したがって、基準点抽出時の探索範囲内での RGB 値に対するパターン自動認識では、

前フレームで抽出した基準点 i の R 値($R_i(t)$)、G 値($G_i(t)$)、B 値($B_i(t)$)、幅($w_i(t)$)、高さ($h_i(t)$)を記憶しておく。

[切り捨て処理] (1) $R_i(t), G_i(t), B_i(t)$ の最大値($A_i(t)_{max}$)を取る A 値 (A は R、G、B のうちいずれかを意味する) が $A_i(t+1) < A_i(t)_{max} / 2$ である画素と、(2) $R(GB)$ 値それぞれにしきい値 $dR(GB)$ を設け、 $R(GB)_i(t) - dR(GB) < R(GB)_i(t+1) < R(GB)_i(t) + dR(GB)$ となる画素以外の画素を切り捨てる (重みを 0 とする)。

[連続性処理] 探索範囲に重み 0 の範囲が連続する画素の集合が 2 つ以上ある場合、その集合の幅 $w_i(t+1)$ と高さ $h_i(t+1)$ が最も $w_i(t), h_i(t)$ に近いもののみを抽出する。

探索範囲内の A 値に対する重み付き重心座標を求め、写真座標とする。

という処理を繰り返す。この手法を用いることにより、自動抽出に失敗することはなく、画像上の座標を 1/10 ~ 1/100 画素単位程度まで正確に取得することができる⁴⁾。

5. おわりに

写真解析理論に基づいて、CCD カメラ画像を MR システムの位置情報の補正に用いる手法を提案した。本手法をシステムに実装して室内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。今後、本システムをベースに、実際の使用条件下での MR 空間の各種整合性の検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 近久博志, 小林薫, 松元和伸, 中原博隆, 筒井雅行, 熊谷幸樹: 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, 2000. (投稿中)
- 2) Foxlin, E.: Initial Head-tracker Sensor Fusion by a Complementary Separate-bias Kalman Filter, Proc. VR Annual Int. Symp., Santa Clara, CA 1996.
- 3) Okamoto, A.: Ultra-precise Measurement Using Affine Transformation, Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.29, Commission V, pp.318-322, 1992.
- 4) 筒井雅行, 近久博志, 小林薫, 松元和伸, 中原博隆, 熊谷幸樹: 精密写真測量の建設現場への適用における撮影方法について, 第 35 回地盤工学研究発表会, 2000. (投稿中)