

## ステレオ画像ベース複合現実感のための非測定用 CCD カメラキャリブレーション

飛島建設 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 松元 和伸  
 正会員 阿保 寿郎

## 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、被験者に両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、これまでに、開発した光学シースルー方式とビデオシースルー方式の MR システムとその建設工事への適用について報告してきた<sup>1),2),3)</sup>。ここでは、ビデオシースルー方式 MR で位置合わせのために最も重要な要素の一つである、非測定用カメラのキャリブレーションとその結果を用いたカメラ位置・姿勢を算定した結果について述べる。

## 2. 写真解析理論に基づくカメラ位置・姿勢の算定

写真-1に、ビデオシースルー方式の MR システムを示す。携帯型 PC に CCD カメラを設置し、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。PC に搭載した CCD カメラの位置と姿勢は、現実空間に配置した座標既知の標点を追跡し、以下に示す写真解析理論に基づく後方交会法によって算定する手法を用いている。測定用カメラのように、カメラのレンズディストーションが無視できる場合、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、 $(X_0, Y_0, Z_0)$  はカメラ投影中心の座標、 $(\varpi, \phi, \kappa)$  はカメラの姿勢であり、 $a_{ij}$  は回転行列  $\mathbf{D}_\varpi \mathbf{D}_\phi \mathbf{D}_\kappa$  の要素である。カメラの焦点距離  $c$  が既知である場合、3 点以上の基準点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  $(x_h, y_h)$ 、カメラのレンズディストーション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、

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

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

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (5)$$

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  $(X_0, Y_0, Z_0, \varpi, \phi, \kappa)$  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 2 台の CCD カメラの内部標定要素をキャリブレートしておく。



写真-1 ビデオシースルー方式 MR システム

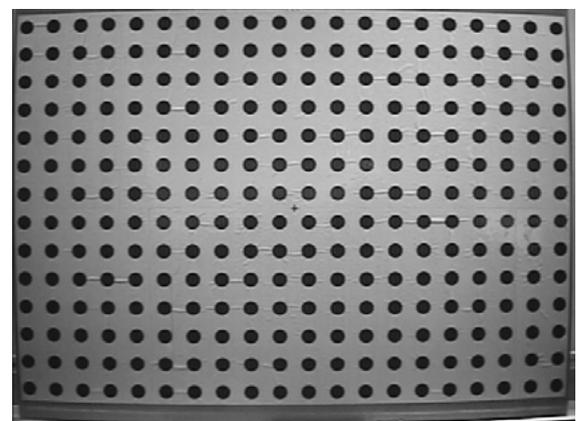


写真-2 テストパターン画像

キーワード：複合現実感,ステレオカメラ,画像ベース法,ビデオシースルー方式,レンズ歪曲収差,キャリブレーション  
 連絡先：〒270-0222 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬 5472 TEL 04-7198-7572 FAX 04-7198-7586

### 3. 非測定用カメラのキャリブレーション

写真-2にMRに使用するCCDカメラ（水平視野角48.2°，焦点距離約7.5mm，640×480画素）のキャリブレーションに撮影した画像を示す。使用したプレートには、280点の標点が60.0mmの正方格子で配列されている。このプレートを約1.3mの撮影距離で9方向から撮影した画像を用いて、全ての標点の写真座標を読み取り、CCDカメラの内部標定要素（ $c, x_h, y_h, k_1, k_2, k_3$ ）を求める。

### 4. キャリブレーション結果を用いたカメラ位置・姿勢の算定

キャリブレーションの結果を用いたカメラ位置・姿勢の算定実験結果を示す。

実験は、基準点を13点配置し、約2mの距離から撮影したステレオカメラの2画像を用いて行った。解析は、

- ① カメラの内部標定要素がすべて既知であるとして、キャリブレーション結果を与える方法、
- ② カメラの内部標定要素のうちレンズディストーションのみを既知として行う方法、
- ③ カメラの内部標定要素はすべて未知であるとしたセルフキャリブレーション法、

の3通りの方法で行った。なお、②の方法では、基準点数を7点および9点の場合でも行った。①は測定用カメラとして正しいカメラの内部標定要素が得られているステレオシステムを仮定したもの、②はカメラの焦点距離は撮影距離によって微小ながら変化するものの、いわゆる単焦点レンズのピント位置の相違によってもレンズディストーションの変化は無視できると仮定したもの、③はキャリブレーションに存在する誤差やキャリブレーション後に内部標定要素が変化する場合を想定したものである。

上記の解析ケース一覧とカメラ位置・姿勢の算定誤差の最大値を表-1に、解析結果（2台のカメラ位置 $X_0, Y_0, Z_0$ とカメラ姿勢 $\omega, \phi, \kappa$ の算定結果）をそれらの実測値との差で整理した結果を図-1に示す。

表-1 解析ケースとカメラ位置・姿勢の算定誤差

CASE	解析方法	基準点数	算定誤差最大値	
			姿勢	位置
1	①	13	52.5"	7.0mm
2	②	7	9.6"	2.8mm
3		9	6.0"	2.1mm
4		13	6.3"	2.2mm
5	③	13	37.0"	6.3mm

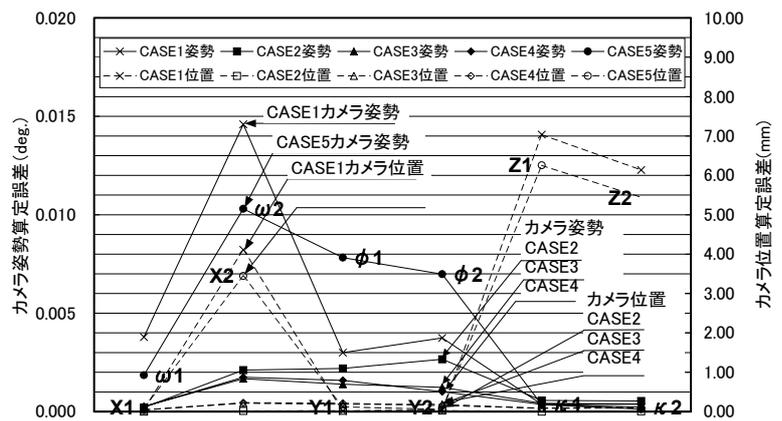


図-1 カメラ位置・姿勢の算定結果

### 5. まとめ

算定結果から、まず、CASE1（解析方法①）では、カメラ位置で7.0mm、カメラ姿勢で52.5"と算定誤差が最も大きくなっている。次に、CASE5（解析方法③）では、CASE1より誤差は小さいものの、カメラ位置で6.3mm、カメラ姿勢で37.0"の算定誤差が生じている。これらは、ピント位置（焦点距離 $c$ ）がキャリブレーション時から変化しているにもかかわらず、これを既知量としてキャリブレーションの結果を用いたり、基準点13点のみからカメラ位置・姿勢の他に全てのカメラの内部標定要素を求めようとしているために誤差が大きくなるものと考えられる。これらの問題を解決するために用いた解析方法②（CASE2, 3, 4）の結果では、カメラ位置で2.1mm~2.8mm、カメラ姿勢で6.0"~9.6"にまで算定精度は向上した。

ビデオシースルー方式MRの位置ずれの補正方法に関する報告の多くは、いわゆる“見え方”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は少ない。一般のステレオシステムは、本MRシステムで用いているような非測定用のカメラのように、レンズディストーションや微小な焦点距離の変化の影響は大きいと考えられる。ここで示した手法を用いることによって、室内実験でのスケールでは、カメラ位置・姿勢の算定精度をカメラ姿勢で約6"にまで向上することができた。今後、屋外の現場スケールで本手法を用いることにより、非測定用カメラによるビデオシースルー方式MRシステムの位置合わせの精度を検証していく予定である。

### 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，CS-226，pp.452-453，2000. 2) 筒井雅行，近久博志，小林薫，松元和伸，中原博隆，熊谷幸樹：画像ベース法を併用した携帯用PCによる複合現実感システムの開発，土木学会第56回年次学術講演会，CS3-012，pp.184-185，2001. 3) 筒井雅行，近久博志，小林薫，阿保寿郎：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，地下空間シンポジウム論文・報告集，第8巻，pp.211-216，2003.