

レンズ中心を一致させた多数カメラによる 全天球動画像撮影システムの開発

菊地 智[†], 神原 利彦[†], 関 秀廣[†]

水平方向 360 度垂直方向 180 度のあらゆる方向から 1 点に集まつてくる光線の情報を記録した画像は全天球画像と呼ばれており、その画像を高解像度かつ動画像で記録することが、知能ロボットやバーチャルリアリティの分野などで期待されている。多眼カメラを用いて動画像を撮影し、その動画像を矛盾なく貼り合わせて全天球画像を構築する既存の手法も提案されているが、各カメラのレンズ中心が別々の位置に存在しているため、視差による影響が発生し、うまく貼り合わせることができないという問題点があった。そこで、本手法では、鏡を用いることで、みかけのレンズ中心の位置を移動させることで、すべてのカメラのレンズ中心を 1 点に一致させて全天球動画像を撮影する新手法を提案する。シミュレーションでカメラと鏡の配置を設計し、その配置通りにカメラと鏡を固定するためのフレームを試作した。

Development of a Spherical Movie Capturing System with Multiple Cameras Whose Lens Centers are Set at an Unique Point

Satoshi KIKUCHI, Toshihiko KANBARA and Hidehiro SEKI

Some panoramic movie generation methods with an omnidirectional multi-camera system have been already proposed. However, in these methods all the focal points of cameras (all lens centers) exist in different positions. So, the generated movie doesn't have consistency when the near object causes a large disparity between the adjacent cameras. Thus, this paper describes how to generate a consistent panoramic movie with a unique focal point. Although the fact that a lens center of camera can be moved to a symmetrical position by a mirror is known generally, it is difficult to move it into a desirable position accurately. So, we propose a new method for concentrating the lens centers of all cameras into the unique point accurately by Zeng's camera calibration method. We have simulated arrangement of 26 cameras and 25 mirrors for building the omnidirectional multi-camera system.

1. 序論

山澤ら 1) の全方位カメラは、水平方向 360° の広範囲な視野を持つカメラとして知られ、様々な分野で使われている。上向きのカメラで双曲面ミラーを撮影する方式であるが、双曲面の（下側）焦点の位置にカメラのレンズ中心を設置することで、双曲面ミラーのミラー焦点へと向かってくる光線すべてが反射して（下側）焦点を通ることが数学的に証明されており、レンズ中心はこのミラー焦点の位置にあるとみなすことができる。だが、この全方位カメラには全体的に解像度が低いという問題点があった。また、水平方向は足元から 100° ほどの視野しかなく、真上は見えなかった。それに対し、廣田ら 2) は、1 台のラインスキャンカメラとそれを回転させる機構で高解像度な全方位画像（全天球画像）を撮影する手法を提案した。撮影に使う魚眼レンズのレンズ中心が回転運動で移動しないように中心軸とレンズ中心の位置を正確に合わせていた。だが、この手法では、回転に時間がかかり、1 枚の撮影時間が 11 秒と長く動画像の撮影はできない。

一方、池田ら 3) は複数台のカメラから同時に撮影した動画像を球面上で貼り合わせることで高解像度な全天球動画像を生成する手法を提案した。だが、各カメラのレンズ中心の位置が分散しており、唯一の点に一致してないために、近くの物体が 2 つのカメラから撮影されると視差が大きくなりうまく貼り合わせることができないという問題点があった。視差が発生するのは、レンズ中心が一致していないためである。遠藤ら 4) は複数カメラのレンズ中心が別々の場所にあっても、唯一の点をレンズ中心とする全天球画像を View Morphing の応用で生成する手法を提案した。だが、この手法では複数カメラで撮影された画像間での対応付けが必要で、View Morphing に処理時間を要すため動画像は生成できない。

筆者ら 6) 7) 8) 9) は、たとえ近くの物体を写しても視差を発生させないようにするため、複数台のカメラのレンズ中心すべてを唯一の点に一致させることで、この問題を解決する手法を提案した。本論文は、その続報である。

本研究の特徴は、鏡でレンズ中心のみかけの位置を移動させる技術で、すべてのカメラのレンズ中心を唯一の点に一致させる点と、多くのカメラを使うことで高解像度の全天球動画像を撮影できる点にある。山澤ら 1) の手法では、1 台のカメラなので低解像度であった。廣田ら 2) や遠藤ら 4) の手法では、レンズ中心を唯一の点にして、高解像度を実現していたが撮影のための回転運動や View Morphing の処理等に時間がかかり動画像は撮影できない。池田ら 3) の手法では、動画像を撮影できたがレンズ中心を唯一の点にしていないため、大きな視差が発生する。そのため、近くの物体を写すと 2 台のカメラの境界上でうまく貼り合わせることができない。本手法では、これ

[†] 八戸工業大学大学院
Hachinohe Institute of Technology Graduate School of Engineering.

らの手法の欠点をすべて解決している。

2. 手法

2.1 レンズ中心を移動させる手法

カメラのレンズ中心はその名の通りレンズの中心に位置しているので、レンズの物理的な大きさが邪魔をして、2台のカメラのレンズ中心を単純に一致させることはできない。だが、鏡で「みかけのレンズ中心の位置」を移動できることが一般に知られている。例えば、図1はカメラを上から見たものである。 C_1 の位置にカメラのレンズ中心があり、逆三角形で示した領域はそのカメラが写す領域を表す。ここで、太線の位置に鏡を置くと、カメラのレンズ中心は

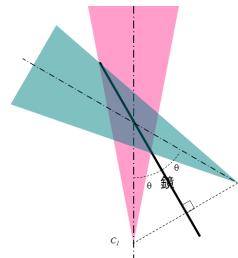


図1 カメラレンズ中心を鏡で対称な位置へ移動

C_1 の位置にあるのに、あたかも C_2 のレンズ中心の位置で左上斜め方向を撮影したかのような画像（ただし左右は反転した画像）が得られる。光学的には、カメラのレンズ中心は鏡という平面に対し対称な位置へと移動される。

2.2 カメラの画角とカメラ台数

レンズ中心を移動させる自由度は、カメラの画角に依存する。文献7)にて述べたように、この依存性には以下の3つの特徴がある。(1)鏡を用いてレンズ中心をカメラ画角の外へ移動させるには画角は 90° より小さくなければならない。(2)画角が 90° に近いほどレンズ中心を動かせる範囲は狭い。逆に 0° に近いほど、動かせる範囲は広い。(3)水平方向 360° 垂直方向 180° の視野を覆い尽くすためには画角が 0° に近いほど多数のカメラを必要とする。逆に画角が大きいほどカメラの台数は少ない。例えば、池田ら3)の手法では、広角なカメラ（画角 110° 以上）を使うことで、水平方向 360° 垂直方向約 130° の視界をわずか6台のカメラで覆っているが、(1)の条件に反するので鏡を使ってもレンズ中心は画角の外へは移動できない。

以上の特徴から、レンズ中心をある程度自由に動かせて、なおかつカメラの台数も

多過ぎないような画角という理由から 0° と 90° の中間の角度である 45° を最適なカメラ画角とみなす。

2.3 小菱形立方八面体を用いたカメラの3次元配置設計

本研究では、5)6)7)8)9)に示したように画角 45° のカメラを26台使う。この26台という台数は、図2左に示した四角錐を使って求めたものである。この四角錐は水平方向と垂直方向の画角が両方とも 45° のカメラの写す領域を立体的に表している。錐の尖鋭点がレンズ中心を、底面の正方形が画像平面を表している。

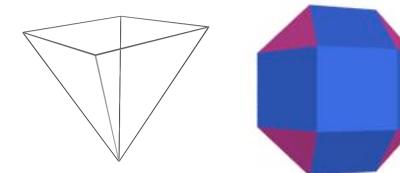


図2 小菱形立方八面体のCG

この四角錐を多数用意して、積み木のように、錐の尖鋭部が一点に一致するように組み合わせて、球に近い形状を組み立てると、四角錐18個を使って図2右に示したような立体ができる。この立体は小菱形立方八面体と呼ばれている準正多面体である。この多面体の中心が全カメラの一一致させるべきレンズ中心の位置を表している。

四角錐の積み木18個だけでは、角にある三角の面が、ぽっかり空いてしまうので、水平方向 360° 垂直方向 180° の視野を覆い尽くしていることにはならない。そこで、三角形の面と多面体中心とを結ぶ三角錐をさらに8個使い、合計26個の積み木を使う。各積み木がカメラ1台を表しているので、26台のカメラが必要となる。

2.4 鏡の配置設計

2.1節の理論を用いて、なおかつ小菱形立方八面体の面のようにカメラを並べる並べ方をした場合の、鏡とカメラの配置を図3左に示す。この図の橙色の線がカメラ画角の境界線を表している。太線が鏡を表し、小さな四角形がカメラボディを表している。この図のようにレンズ中心を動かすために使う鏡の大きさは下部へ進むほど大きくなる。

次に、これらの鏡やカメラボディを空中に固定するために必要な枠組みを設計する。この断面図を基に、立体的に鏡とカメラを配置した設計CGを図3右に示す。

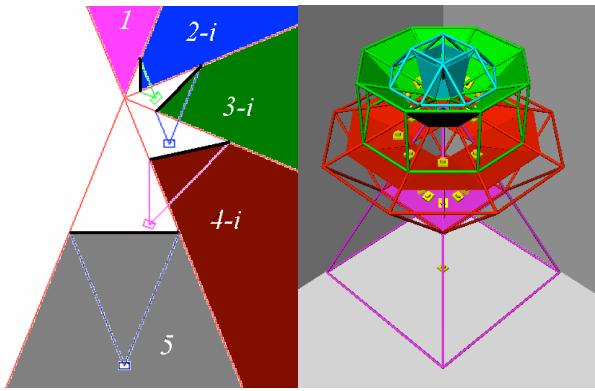


図 3 断面図(左)とカメラフレーム CG(右)

これは、内側に短い辺の小菱形立方八面体があり、その各頂点と、外側の大きな辺の小菱形立方八面体の対応する頂点とを直線で結んだワイヤーフレームモデルである。このフレームで鏡やカメラを支えなければならないので、上方から下方に進むにつれて外側の小菱形立方八面体の辺の長さは下方へ行くにつれて少しずつ大きくなる形状である。色が同じ部分は辺の長さが等しい。この図では、色のついた板の CG モデルで鏡の位置と大きさを示しており、黄色の長方形と円筒を組み合わせた CG でカメラの位置と向きを示している。

図 3 左に示したように、一番下のカメラだけは、自分自身が写りこむカメラとなる。どうしても自分自身が写りこむカメラが 1 台あることは避けられない。これは、鏡を使った場合であっても必ず発生する欠点であり、文献 4) でも述べられている。

2.5 レンズ中心を一致させる従来手法

光学的に正確に、2 つの隣り合うカメラのレンズ中心を一致させるためには、レンズ中心の 3 次元的なずれ量を計測できなければならない。このずれ量の計算と表示のために、AR-Toolkit を利用する方法を提案した手法については文献 6) 7) 8) 9) に示す。以下にその概略を述べる。AR-Toolkit とは拡張現実感というバーチャルリアリティの分野で提案された手法をパソコン上で実装したソフトウェアライブラリである。

カメラ 1、カメラ 2 の 2 台の隣り合うカメラのレンズ中心のずれ量を計測するためには、図 4 に示したようなキャリブレーションボードをカメラ 1 とカメラ 2 の両方で撮影する。キャリブレーションボードには、AR マーカーと呼ばれる平面上の模様が描かれており、その 2 つ並んだ AR マーカーを各カメラで撮影する。左マーカーと右マーカーは、 u 軸方向に既知の距離 D だけ離れているものとする。

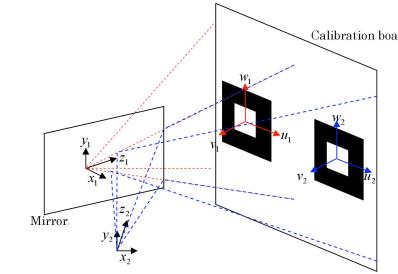


図 4 レンズ中心を一致させるための較正手法

AR-Toolkit はこの画像を認識・処理して、カメラ座標系 (3 次元) と AR マーカー座標系 (3 次元) の間に相対的な幾何関係 (並進ベクトル t と回転行列 R) を計測し推定する。カメラ 1 で左マーカーを写し、 t_1 と R_1 が推定される。カメラ 2 で右マーカーを写し、 t_2 と R_2 が推定される。そして、左マーカー座標系と右マーカーの座標系が同一平面にあり、 u 軸方向に距離 D だけ離れているという条件から、カメラ 1 とカメラ 2 のレンズ中心のずれ量 ΔT は次式で計算される。

$$\Delta T = R_1^{-1}t_1 - R_2^{-1}t_2 - \begin{bmatrix} D \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (1)$$

カメラ 1 を固定し、カメラ 2 を少しずつ動かし実時間でベクトル ΔT を求め続けて、 ΔT がゼロベクトルになるカメラ 2 の位置と姿勢を見つければ、そこがレンズ中心の一致する場所となる。

2.6 レンズ中心を一致させる新手法

前節で述べた従来手法では、精密な位置合わせが難しいことが実験でわかった。カメラをわずか 1mm だけ並行移動させただけなのに、わずかなずれ量しか発生しなかったりした。その主な原因は、AR-Toolkit が推定する射影行列の精度の悪さにあった。特に奥行方向の推定精度が悪かった。そこで、本論文では新たな推定手法を提案する。内部パラメータと外部パラメータの両方をカメラキャリブレーションで精度良く求める手法としては、Zeng の手法 11) が挙げられる。これは、画像処理ライブラリ Open CV でも実装されている手法である。図 5 に示したようなチェスパターを平面に貼り付け

て、1つのカメラで様々な姿勢の平面を撮影し、そのチェスパターんから特徴点を抽出してキャリブレーションに使う手法である。

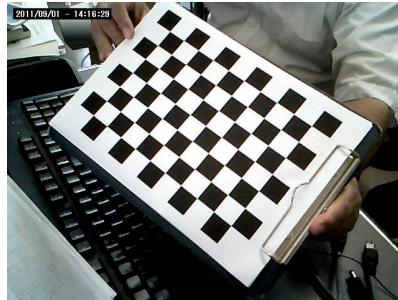


図5 キャリブレーションのためのチェスパターん

ARToolkitでも内部パラメータおよび外部パラメータを求めているが、特徴点の数がチェスパターんに比較してARマーカーの方が少ないために、精度が低い。また、Zengの手法では、最小自乗解として内部パラメータおよび外部パラメータを求めた後で、画像上での誤差を尤度として最尤推定を行い、内部パラメータおよび外部パラメータを再推定している。AR-Toolkitではこの再推定の処理がないので精度が低下している。以上の理由から、ARマーカーの代わりにチェスパターんを2つ水平に並べたキャリブレーションボードを用意して、それぞれのカメラで撮影する。Zengの手法で、事前に内部パラメータを算出しておき、1枚の画像をキャプチャしてから、特徴点抽出と、外部パラメータの推定および、最尤推定による再推定を行い、そこから前節の(1)式でレンズ中心のずれ量を算出する。画像をキャプチャしてからずれ量算出までの処理を高速化して、リアルタイム（動画）でのずれ量算出を行う。このずれ量が0に近くなるように、隣り合うカメラの位置・姿勢を微調整する。

2.7 動画像を取りこむ手法

1つのカメラで640画素×480画素のカラー（RGB 3色）画像を30fpsのフレームレートでキャプチャすると、 $640 \times 480 \times 3 \times 30 \times 8 = 221,184,000 \text{ bps}$ となり、最大転送速度が800MbpsであるIEEE1394b規格でもわずかに3台しか接続できない。そこで、画素数を320画素×240画素のカラー（RGB 3色）画像を15fpsのフレームレートでキャプチャすると、データ転送速度が $27,648,000 \text{ bps}$ となり、これならば28台のカメラが接続できる計算になる。本手法では、26台のカメラすべての同期をとって撮影する必要があるために、同期信号を備えているIEEE1394bカメラを使用する。

2.8 画像を球面に投影する手法

レンズ中心を一致させた各カメラからの動画像に対しては、光学的な補正と幾何学的な補正を行う。ホワイトバランスを統一しておき、同じ色の物体がどのカメラで写されても同じ色で撮影されるように補正する。補正手法については、池田ら³⁾と同様の手法を用いる。幾何学的な補正に対しては、Zengらの手法でも求められるレンズ歪によるひずみを補正する。補正後の画像に対し、球面への投影を行う。その投影には、鏡の境界線を手がかりにする。

3. 実験

3.1 カメラ台の試作

図3右に示したCGのカメラフレームを直径1cmのステンレス中空丸棒で製作した。部材と部材の間は溶接で接続した。完成したカメラフレームを図6に示す。鏡には軽量のアクリルミラーを使用する。カメラには、Point Gray Research社製のIEEE1394bカラーカメラ Firefly MVを使用する。

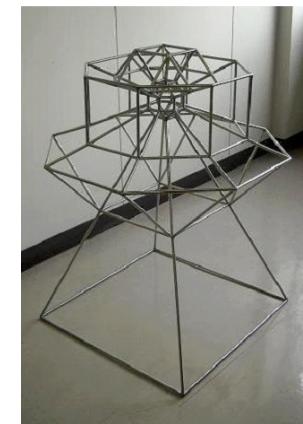


図6 ステンレス中空丸棒で製作したカメラフレーム

3.2 キャリブレーション

AR-Toolkitによる並進ベクトル t と回転行列 R の推定と、Zengの手法による並進ベクトル t と回転行列 R の推定との比較実験を行った。OpenCV上で実装されているZengらの手法では、保存済みの画像28枚からオフラインで内部パラメータを推定し、その後に保存済みの画像からオフラインで外部パラメータを推定する仕様である。

るため、これをオンラインで推定するようプログラムを改造している。

4. 結論

複数台のカメラすべてのレンズ中心を 1 点に一致させて、全天球動画像を撮影するシステムを構築する手法を提案した。AR-Toolkit ではなく、Zeng の手法からレンズ中心の位置を推定する手法を提案した。カメラの画角を 45° として、具体的に 26 台のカメラと 25 枚の鏡の配置を 3 次元的に設計した。鏡のサイズなどの詳細な部分まで設計を進め、カメラフレームを製作している。今後は、図 3 右のよう、フレーム上にカメラと鏡を設置し、試作機の実装を進める。同様に、Zeng の手法を動画像用にオンラインで動作するよう改造したソフトウェアを作成し、すべてのレンズ中心を一点に一致させることを今後の課題とする。

参考文献

- 1) 山澤ほか「移動ロボットのナビゲーションのための全方位視覚センサ」信学論 D-II, Vol.J79-D-II, No.5, pp.698-707, 1996
- 2) 廣田ほか「高精細全天球撮像システムの構築」日本 VR 学会第 9 回大会論文集, pp.139-142, 2004.
- 3) S. Ikeda et. al."High resolution panoramic moviegeneration from video streams acquired by an omnidirectional multi-camera system", Proc. of IEEE Int. Conf. on MFIIS, pp.155-160, 2003.
- 4) 遠藤ほか「超多眼カメラによる全天周画像の再構成」情報処理学会論文誌 Vol.43, No.SIG11, 2002.
- 5) 神原ほか「焦点を一致させた多数カメラ全方位画像撮影システムの開発」平成 19 年度電気関係学会東北支部連合大会, p.211, 2007,
- 6) 神原ほか「焦点を一致させた多数カメラ全方位画像撮影システムの開発」日本 VR 学会第 12 回大会論文集, pp.359-362, 2007,
- 7) 神原ほか「レンズ中心を一致させた多数カメラによる全天球動画像撮影システムの開発」日本 VR 学会第 13 回大会論文集, pp.167-170, 2008,
- 8) 深持ほか「レンズ中心を一致させた多数カメラ全天球動画像撮影システムの開発」2009 年信学会総合大会論文集, p.287, 2009,
- 9) 神原ほか「複数台のカメラすべてのレンズ中心を一致させた全天球動画像撮影システムの開発」日本 VR 学会第 14 回大会論文集, 2009,
- 10) 神原ほか「レンズ中心を一致させた多数カメラによる全天球動画像撮影システムの開発」日本 VR 学会第 15 回大会論文集, pp.154-157, 2010,
- 11) Zeng, A flexible new technique for camera calibration". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11):1330-1334, 2000.