

回転時の視点ずれのモデル化による 視点固定首振り撮影雲台の校正

竹葉 亮佑^{1,a)} 東海 彰吾^{1,b)} 坂本 一将^{1,c)}

概要：パノラマ雲台に設置したカメラで視点固定首振り撮影を行うと、得られた画像からは幾何学的に妥当なパノラマ画像の作成が行える。しかし、雲台の回転軸とカメラの光学中心点が一致していない場合、作られたパノラマ画像には被写体との距離の違いに起因するずれが現れる。それを防ぐために、カメラの光学中心点と雲台の回転軸を合わせる必要がある。雲台上のカメラを任意の方向に移動させながら撮影を行い、カメラキャリブレーションを行うことで雲台に乗せたカメラの軌跡を取得できる。その軌跡から雲台の回転軸とカメラの光学中心のずれを推定することができる。本研究では回転軸からのずれモデルを用いた U 字曲線推定の当てはめによりカメラ位置を調整し視点固定首振り撮影を実現する。さらに、首振り撮影とパノラマ画像合成実験により本手法の有効性を確認した。

キーワード：視点固定撮影, パノラマ雲台, キャリブレーション, ジンバル機構, パノラマ画像

The Camera Position Alignment on a Gimbal Head for Fixed Viewpoint Swiveling using a Misalignment Model

Abstract: When the camera sets on a gimbal head as a fixed-view-point, it is effective to generate a panoramic image. However if the projection center isn't aligned to the rotation center, the panoramic image contains difference with depth dependencies. By using Zhang's method, camera positions and directions for each swiveling situation are obtained with changing a mounted position of the camera by sliders with swiveling of the gimbal head. A position of the rotation center is estimated from movement of the camera positions. In this paper, we propose a method for it using a misalignment model with only one dimensional changing of the camera position to obtain the two dimensional ideal position for one rotation.

Keywords: Fixed viewpoint, Swivel camera, Calibration, Gimbal head, Panoramic image.

1. はじめに

現在、パノラマ画像はストリートビュー、デジタルカメラやスマートフォン等の機能として多くのアプリケーションで使われている。パノラマ画像を作成するには、主に二つの手法がある。一つは広角レンズ、または特殊なミラー構造を持つカメラを使い、一度の撮影で広角なパノラマ画像を作成する方法である。もう一方は視線方向を変えて撮影した複数枚の画像を統合することでパノラマ画像を作成

する方法である。前者は一度の撮影でパノラマ画像を作成できるが、比較的解像度の低いパノラマ画像となる。しかし、後者は視線を変えながらの複数回の撮影が必要であるものの、比較的解像度の高いパノラマ画像を作成できる。

本研究では、後者の方法を用いたパノラマ画像の作成を考える。この場合は視線方向を変えながら複数枚の画像を撮影する際、完全な手持ち撮影のほかに、首振り撮影できるカメラ雲台を使用する方法がある。いくつかの回転軸を持つ雲台の拘束を利用することで、搭載したカメラの視線方向の変更が容易となりパノラマ画像作成に適している。

この時、カメラの投影中心が回転によって移動しない「視点固定首振り撮影」を実現できるようにパノラマ雲台に乗せたスライダー上のカメラの位置調整をするための校

¹ 福井大学大学院工学研究科情報・メディア工学専攻、
福井市文京 3-9-1

a) r-takeba@monju.fuis.u-fukui.ac.jp

b) tokai@u-fukui.ac.jp

c) k-sakamoto@monju.fuis.u-fukui.ac.jp

正方法を提案する。具体的にはパン・チルト回転ができるパノラマ雲台に垂直・水平移動ができるスライダーを設置し、さらに、スライダー上に設置したカメラで様々な角度・位置から撮影した画像からカメラキャリブレーションを行いカメラの光学中心点を導き、その位置情報からカメラの光学中心点と雲台の回転軸の重なる位置を推定するものである。

本論文は5章からなる。続く2.では、視点固定首振り撮影について述べ、3.では本研究で使用する雲台と提案する校正手法について説明する。4.では提案手法の有効性を確認する実験について説明し、5.で本文をまとめ、今後の課題について述べる。

2. 視点固定首振り撮影

本章では、本研究で使用したパン・チルト雲台及びスライダーについて説明し、視点固定首振り撮影について述べる。

2.1 パノラマ雲台

図1は本研究で使用したパノラマ雲台、スライダーとカメラである。パノラマ雲台はパン・チルトの二軸に手で回転が行えるジンバル機構の雲台である。雲台に設置したスライダーによって、カメラを前後、上下、左右に移動することができる。本研究ではパン・チルト回転軸は互いに垂直に交わり、雲台の回転軸の交点を原点とした回転軸に沿う座標系(XYZ)と、スライダーの調整原点を基準としたスライダーの各軸に沿う座標系(xyz)を考え、対応する軸はそれぞれ平行であると仮定する。また、各座標系は右手系とする。

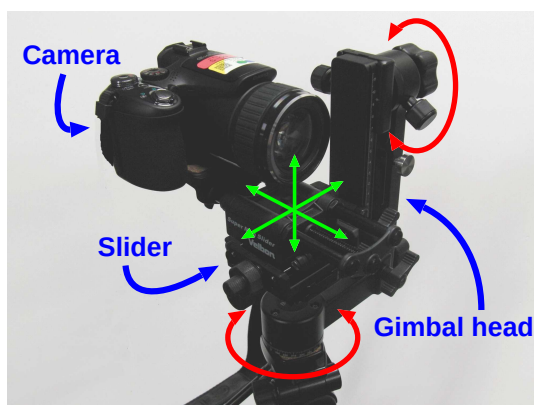


図1 パノラマ雲台

2.2 視点固定首振り撮影

パン・チルト雲台にカメラを搭載して首振り撮影を行う場合、一般的なカメラ設置で雲台を一定角度回転させながら撮影すると光学中心点は図2の左図のように雲台の回転軸を中心に動く。このように光学中心点が一致しない二視点から撮影した画像から、前方に配置した仮想的なスク

リーンに投影して貼り付ける方法でパノラマ画像を作成すると図2の左図のようにパノラマ画像には撮影対象物との距離に起因するズレが現れる。これは二視点の画像に撮影した撮影対象物が違う視線方向から投影され、それぞれ画像面上の違う位置に現れるためである。

しかし、図2の右図のように、雲台を回転させてカメラの視線方向を変えてもそれぞれの撮影方位で光学中心点が動かない位置にカメラ位置を調整することができれば、パノラマ平面に投影された同一の被写体の重なりにズレが生じない幾何学的に妥当なパノラマ画像が作成できる。このような、カメラの視線方向を変えても光学中心点の三次元位置が動かない首振り撮影は「視点固定首振り撮影」と呼ばれる[1]。

本研究で使用する雲台はスライダー位置を調整することでこの視点固定首振り撮影を実現することができる。しかし、搭載するカメラによって光学中心点の位置は違い、全てのカメラが同じ搭載位置で視点固定首振り撮影ができるとは限らない。そこで、本研究では搭載するカメラに対して適切な調整量を算出し、視点固定首振り撮影を実現するための校正方法について取り扱う。

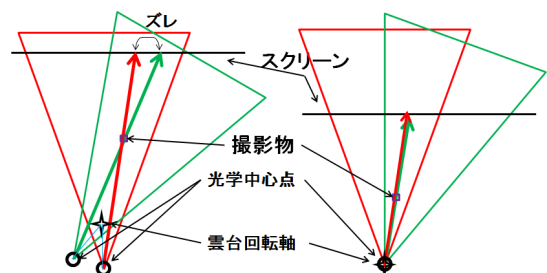


図2 視線方向を変えた撮影での像の重なり(左:回転中心と光学中心が一致しない場合、右:一致する場合)

3. 回転時の視点ずれのモデルに基づく校正手法

本章では、まず、パン・チルト雲台上のカメラ設置位置が理想的な位置からずれた場合のカメラ視点位置の移動の様子をずれモデルとして導出する。さらに、スライダー設定を変えながら首振り撮影したカメラの光学中心の移動量とその変化から、ずれモデルパラメータを推定する校正方法について説明する。

3.1 首振り撮影時の光学中心の移動とずれのモデル化

3.1.1 カメラの位置・姿勢の獲得

本研究ではカメラの位置・姿勢情報を獲得するため、一般的なカメラ校正でよく使用されるZhangの手法を用いた[2]。Zhangの手法によるキャリブレーションは規格が既知なチェッカーボードをいくつかの姿勢で撮影することで、カメラの内部パラメータを獲得し、さらにその内部パ

ラメータを元に撮影されたボードに対するカメラの位置姿勢を獲得するものである。ここでは、内部パラメータ推定後はチェッカーボードを固定し、雲台の首振りによるカメラの光学中心の位置の変化を獲得することにも利用する。

3.1.2 U字曲線によるずれのモデル化

今、雲台のパン回転のみを考え、前後方向のスライダー（Zスライダー）を調整した時に、雲台の回転に伴うカメラの光学中心の移動の様子を考える。

この時、カメラの光軸が雲台の回転中心からずれている状況であるとする、カメラの光学中心と雲台の回転中心の位置は一致しないため、雲台の回転に伴ってカメラの光学中心は円弧を描いて移動する。さらに、Zスライダー位置を変えると、図3のようにそれぞれの位置に応じた同心円状の移動軌跡が得られる。

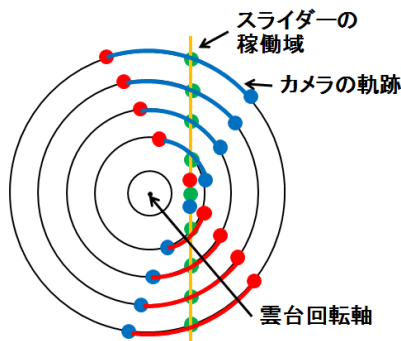


図3 光学中心点の軌跡

ここで、雲台の回転角 θ が一定である時、円弧の長さ l は雲台の回転中心とカメラの光学中心の各軸方向のずれ X_d, Z_d と Zスライダーの設定位置 z によって

$$l = 2\pi \frac{\theta}{360} \sqrt{X_d^2 + (Z_d - z)^2} \quad (1)$$

のように表すことができる。例えば、カメラの初期位置が雲台回転軸から X 軸方向に 5mm、Z 軸方向に 10mm 離れた時、スライダーを Z 軸方向に段階的に調整して 30° パン回転撮影すると、図4のような U 字曲線が得られる。

式(1)で表される U 字曲線の形状は X_d, Z_d, θ の三つのパラメータで変化する。X 軸方向のずれ量 X_d は U 字曲線の極小値、つまり最もカメラが雲台に近づいた時の距離を表す。また、Z 軸方向のずれ量 Z_d は U 字曲線の極小値を与える z の値として得られることになる（図5）。

このように、U 字曲線の極小値を示す時のスライダー位置が Z 軸における初期位置から雲台の回転軸までの距離を表し、極小値は光学中心点が雲台の回転軸に最も近づいた時の円弧の長さを表す。この極小値からスライダーと雲台回転軸の X 軸方向のずれ量が分かる。

以上より、雲台の校正を行うためにはこの U 字曲線を作成し、極小値とその時のスライダー位置を推定することでカメラ位置を調整できる。

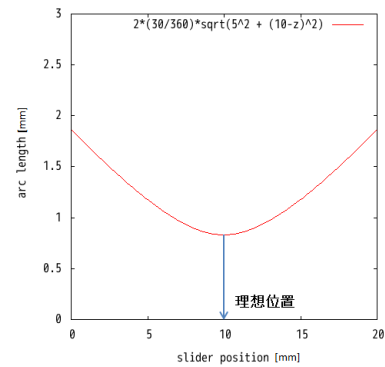


図4 U字曲線の例

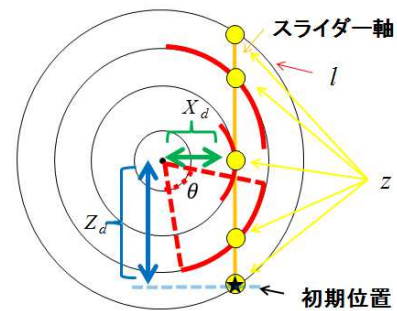


図5 ずれモデルパラメータ

3.2 撮影雲台の校正手順

3.2.1 校正手順

チェッカーボード上のある点をワールド座標系の原点とし、カメラのパン・チルト平面それぞれに対して以下の手順で適切なスライダー位置を推定する校正を行う。

- (1) 一定角度ごとにカメラを回転させ、チェッカーボードを撮影する。この時、どの撮影角度でもチェッカーボード全体が映っていることが条件である。
- (2) 雲台上のスライダーをある軸方向に一定幅移動して、(1)に戻る。この(1)、(2)の手順をスライダーの可動域の限界まで繰り返す。
- (3) Zhangの手法を用いて、撮影した画像群それぞれの位置・姿勢を表す外部パラメータを求める。求めたそれぞれのスライダー位置での円弧長をプロットしたグラフに対して U 字曲線をあてはめ、スライダーの校正位置を推定する。

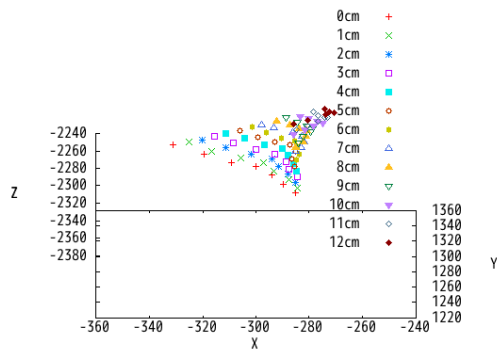
円弧長の計測と U 字曲線あてはめについては、続く節で詳しく述べることにする。

3.2.2 円弧の長さの計算

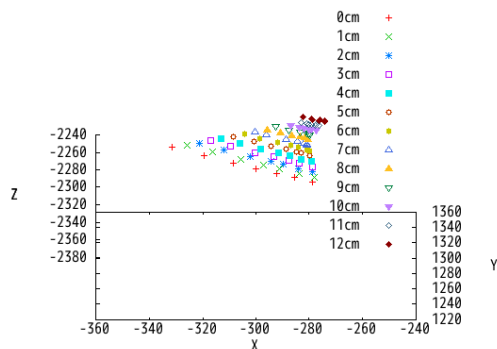
手順(3)では、一定角度毎に撮影した画像からカメラの外部パラメータ推定を行い、三次元空間中のカメラの光学中心点の移動軌跡を求め、移動した距離（円弧）を測る。

カメラが雲台上でパン回転（あるいはチルト回転）を行った場合、光学中心点は三次元空間中のある平面上に現れるはずである。しかし、実際に得られた光学中心点情報にはノイズや雲台回転時の僅かなカメラの上下の動きが含まれ

るため、完全には平面上に現れない。実際にカメラをスライダ初期位置から 1cm 間隔で 0~12cm まで調整、5° 間隔で 30° のパン回転撮影を行い、外部パラメータ推定を行うと図 6(a) のような結果になる。そこで、得られた光学中心点の位置情報から最小二乗法を用いて空間中のある平面を近似し、その面を回転平面として点群をその平面に投影することで図 6(b) のように補正する。



(a) 校正撮影時の光学中心点群



(b) 光学中心点群の回転平面への投影結果

図 6 校正撮影時の光学中心点群と平面への正射影補正結果

平面上に近似した各角度毎の光学中心点を直線で結び、円弧を折れ線で近似する。この時、円弧長 l を求める式は以下となる。

$$l = \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(X_i - X_{i-1})^2 + (Y_i - Y_{i-1})^2} \quad (2)$$

ここで、 X_i 及び Y_i は近似平面に投影されたカメラの i 番目の計測座標である。

パン回転 (X-Z 平面) 方向の校正で、カメラを移動させるスライダー軸が Z 軸であると仮定する。各スライダー位置と折れ線で近似した円弧の長さの関係を表す U 字曲線の式 (1) から雲台校正位置の推定を行う。

計測されたいくつかのスライダーの z 値毎に得た円弧長

の計測値に対して、式 (1) で表される曲線を二乗誤差が最小となるようにあてはめ、最適な X_d, Z_d を求める。ここでは手動による複数回の回転撮影であるため、回転量の信頼性は高くない。そこで、カメラの回転量 θ も推定の対象として曲線のあてはめを行う。

パン回転方向の校正を行った後、チルト回転 (Y-Z 平面) 方向の校正を行う。既に Z 軸の校正ができてしていると仮定し、この段階ではスライダーの Y 軸を移動させながら校正のための計測を行う。そのため、U 字曲線の式は

$$l = 2\pi \frac{\theta}{360} \sqrt{Z_d^2 + (Y_d - y)^2} \quad (3)$$

で表される。曲線あてはめで変化させるパラメータは、Z 軸の雲台回転軸から初期位置までの距離 Z_d 、Y 軸の雲台回転軸から初期位置までの距離 Y_d 、回転量の θ の三つであり、推定された U 字曲線から Y 軸方向の校正を行う。

4. 実験

提案手法の有効性を確認するために、校正実験を行った。校正はパン回転平面 (カメラ座標系 X-Z 平面)、チルト回転平面 (カメラ座標系 Y-Z 平面) の順に行うこととする。カメラの解像度は 2816×2112 [pixel] とし、フォーカスは無限遠に固定されている。

4.1 パン回転による X-Z 平面上での校正

まずはじめに、パン回転平面 (カメラ座標系 X-Z 平面) の校正から行った。スライダはそれぞれの軸の可動域限界 (それぞれカメラの視野に対して X 軸は右方向、Y 軸は下方向、Z 軸は手前) まで移動させている。

カメラを Z 軸方向に移動させ、一定角度パン回転を行う。スライダーの Z 軸方向の可動域は 0cm~12cm であり、移動幅を 1cm とした。パン回転は 0°~30° まで回転させ、5° 刻みで撮影を行った。

校正手順に従い撮影を行い、外部パラメータ推定によって求められた光学中心点群が図 7 となる。さらに、この光学中心点群から円弧長さを測り、各スライダー位置での円弧の計測値に対して U 字曲線をあてはめた結果を図 8 に示す。また、この時の曲線は以下の式となった。

$$l = 2\pi \frac{31.7}{360} \sqrt{23.0^2 + (103.6 - z)^2} \quad (4)$$

この結果より、パン回転方向の校正は初期カメラ設置位置から Z 軸に 103.6mm、X 軸に 23.0mm 移動させたスライダー位置設定が、カメラの光学中心位置を雲台のパン回転の中心に最も近づけられることが分かった。

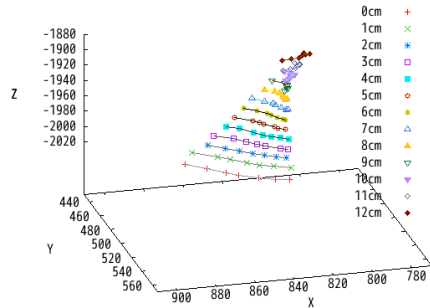


図 7 パン回転平面に正射影した光学中心点群

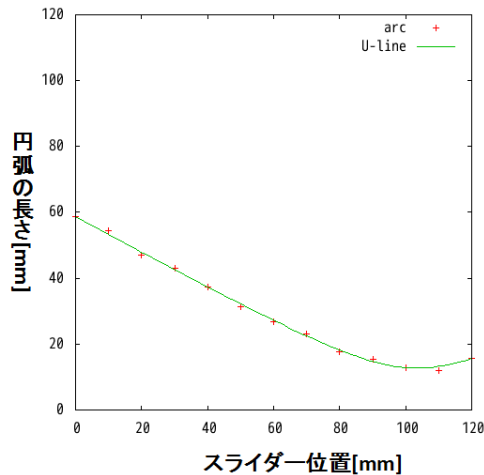


図 8 パン回転による校正で得られた U 字曲線

4.2 チルト回転による Y-Z 平面上での校正

次に、チルト回転平面（カメラ座標系 Y-Z 平面）の校正を行った。スライダの X 軸と Z 軸は前節の実験結果より求められた校正位置に調整している。

カメラを Y 軸方向に移動させ、一定角度チルト回転を行う。スライダの Y 軸方向の可動域は 0cm~10cm であり、移動幅を 1cm とした。チルト回転は 0°~25° まで回転させ、5° 刻みで撮影を行った。

校正手順に従い撮影を行い、外部パラメータ推定によって求められた光学中心点群が図 9 となる。そしてこの光学中心点群から円弧の長さを測り、各スライダ位置での円弧の長さの計測値に対して U 字曲線あてはめを行った結果を図 10 に示す。この時の曲線は以下の式で表される。

$$l = 2\pi \frac{25.9}{360} \sqrt{14.5^2 + (14.7 - y)^2} \quad (5)$$

この結果より、チルト回転方向の校正は初期カメラ設置位置から、Y 軸に 14.7mm 移動させたスライダ位置設定が、カメラの光学中心位置を雲台のチルト回転の中心に最も近づけられることが分かった。

4.3 校正結果と考察

実験より、スライダ初期設定位置から、X 軸に 23.0mm、Y 軸に 14.7mm、Z 軸に 103.6mm 調整した位置が最もカメラ

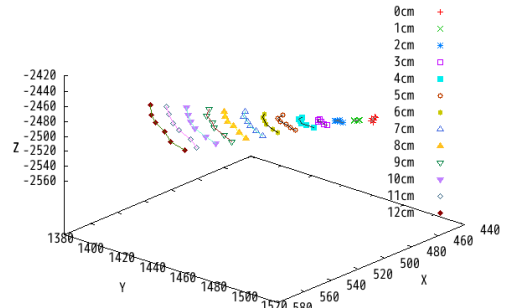


図 9 チルト回転平面に正射影した光学中心点群

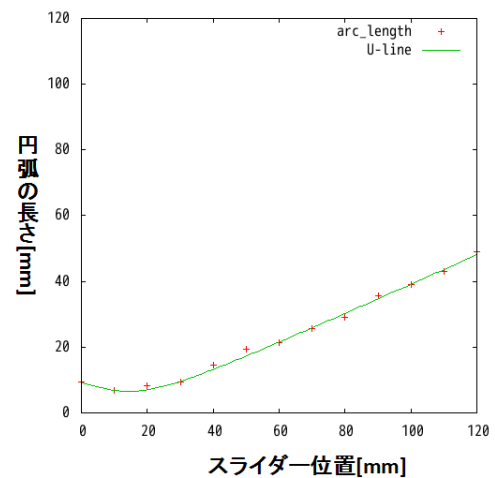


図 10 チルト回転による校正で得られた U 字曲線

の光学中心が雲台の回転軸に近くなる設定であることが推定された。結果検証のため、校正前の雲台と校正後の雲台で作成できるパノラマ画像を比較する。

パノラマ画像は、視線の異なる二枚の画像の一方を射影変換させ、もう一方の画像に重ね合わせて作成する。射影変換に使用する射影行列はカメラの回転成分のみを用いたホモグラフィ行列である。

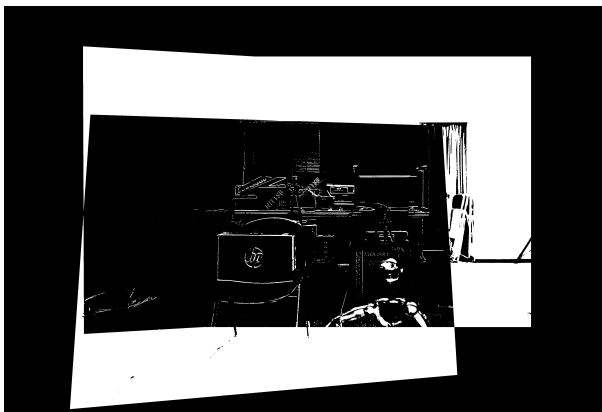
まず、校正前の雲台を使用して、設置した位置から視線方向を変えずに撮影した画像、-10° パン回転撮影した画像、-10° パン回転 -10° チルト回転した画像、計三枚の画像から作成したパノラマ画像が図 11(a) であり、画像上のズレを白画素で表す差分画像が図 11(b) となる。

これらの結果を見ると、校正前の雲台で作成したパノラマ画像には撮影対象物の距離に応じてズレが現れていることがわかる。そのズレはカメラに近いほど顕著である。この結果から校正前の雲台ではカメラの光学中心点が雲台の回転軸と一致していないことが分かる。

次に、校正後の雲台で撮影した三枚の画像から作成したパノラマ画像が図 12(a) であり、画像上のズレを白画素で表す差分画像が図 12(b) となる。



(a) パノラマ合成画像



(b) 重複領域の差分画像

図 11 校正前のパノラマ合成結果



(a) パノラマ合成画像



(b) 重複領域の差分画像

図 12 校正後のパノラマ合成結果

これらの結果より、校正後の雲台で作成したパノラマ画像は校正前の雲台で作成したものと比べ、画像上のずれが大幅に減少していることが分かる。しかし、手前の撮影物には若干のずれが現れている。この理由については以下で述べる。

パン回転方向校正後に行ったチルト回転方向校正時に求められた U 字曲線の式から、Z 軸方向に 14.5mm 移動させた位置が最も雲台に近い位置であることが分かる。本来ならば、パン回転方向の校正後にチルト回転方向の校正を行えば U 字曲線の極小値は 0mm になるはずである。しかし、実際には計測誤差や計算誤差によりこのような値が残ってしまう。

したがって、今回求めた校正位置はまだ完全に雲台回転軸とカメラの光学中心点が重なる位置ではない。そのため、図 12(b) のようなズレが残ったと考えられる。

このズレをなくすため、U 字曲線の極小値を 0mm にするのが理想的であるがカメラの焦点距離と撮影対象物までの距離により無視できる場合がある (付録 A.1 を参照)。

図 13 は本研究で使用した解像度 (2816 × 2112) で、カメラ間が 14.5mm ずれている設定での、被写体距離と画素ズレ量の関係を表したグラフである。

このことから、チルト回転においては 44529.5mm 以上離れた所にある撮影対象物でもズレなくパノラマ画像が作成

できる。もしくは、カメラの解像度を下げることで、チルト回転においても 44529.5mm 以内の撮影対象物でもズレなくパノラマ画像の作成が行える。

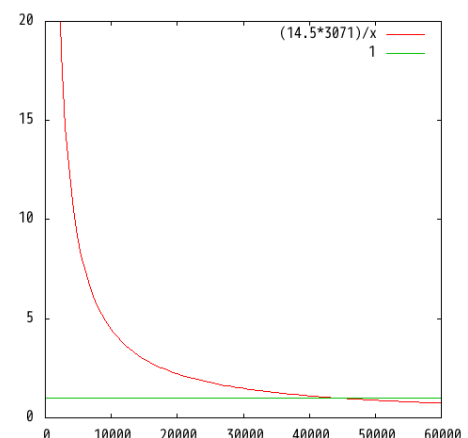


図 13 光学中心点が 14.5mm ずれている時の厳密性

5. まとめと今後の課題

雲台回転軸からの位置ずれに応じたモデル化と計測値に対する U 字曲線推定を行うことで雲台回転軸とカメラの光学中心点を一致させることができ、良好なパノラマ画像合成を行えるような、視点固定首振り撮影を可能とする雲台の校正を実現した。

今後の課題は、U 字曲線推定の高速化、精度向上やパノラマ画像作成自動化等がある。高速化に関しては再急降下法等を用いて極小値を求める速度を上げ、精度向上に関しては校正を複数回行うことで、より正確な理想位置の推定が行える。またパノラマ画像作成自動化に関しては、センサ情報からカメラの回転角度を取得し、回転角度成分のみからホモグラフィ行列を求め、パノラマ画像を作成することもできる。他にもリアルタイムでの校正など実用化に向けての改善が必要である。

謝辞

本研究の一部は (独) 情報通信研究機構の委託研究として行われた (課題 143 イ 105, 143 カ 204)。

参考文献

- [1] T. Wada and T. Matsuyama, “Appearance Sphere: Background Model for Pan-Tilt-Zoom Camera”, Proc. of 13th ICPR, pp.A-718-A-722, 1996.
- [2] Z.Zhang, “A flexible new technique for camera calibration”, IEEE Trans. PAMI, Vol.22, No.11, pp.1330-1334, 2000.
- [3] R.Takeba,T.Shibata,S.Tokai,H.Hase”A Method if Camera Position Alignment in a Gimbal Head for Fixed View-point Swiveling”, IWAIT2013,1C-4,2013.

付 録

A.1 校正の厳密性について

雲台の回転軸とカメラの光学中心点が完全に一致している場合、奥行きに依存しないパノラマ画像の作成が行える。しかし、この校正位置の調整は撮影対象物までの距離とカメラの解像度によって厳密性が異なる。

光学中心点がずれた二視点のカメラを平行ステレオの状態であると仮定すると、両カメラに映る撮影対象物のズレ量 (視差) d は

$$d = \frac{bf}{Z} \quad (\text{A.1})$$

で表される。ここで、 b は二視点のカメラの距離、 f はカメラの焦点距離、 Z は撮影対象物までの距離である。

この式より、両カメラの光学中心点の距離 b が大きくなるほどパノラマ画像上に現れるズレが大きくなることが分かる。

しかし、撮影対象物までの距離 Z が遠くなるほどズレは

小さくなり、一画素以下にズレが収まった時、パノラマ画像上にズレとして現れなくなる。また、焦点距離 f が小さいほど、一画素あたりの画角が大きくなる分、画素単位のズレ量が小さくなり、結果としてズレが生じなくなる。同様に、同じ焦点距離であっても解像度が低ければ一画素あたりの画角が大きくなるので、画素単位のズレ量が小さくなり、パノラマ画像上にズレが生じなくなる。

逆に、撮影対象物が近いほど、また、カメラの焦点距離が遠く解像度が高いほど撮影対象物が占める画素領域が大きくなり、より厳密な位置調整が必要となる。

図 A.1 はある一定の解像度 (2816 × 2112) で、二視点間の距離の大きさによって生じる、被写体の距離とその像のズレの関係を表したものである。たとえば、光学中心点間の距離が 3mm の時は撮影対象物が 9213mm 以上離れているとパノラマ画像上にズレとして現れなくなる。同様に光学中心点間の距離が 5mm の時は 15351mm 以上、7mm の時は 21497mm 以上離れているとズレとして現れなくなる。このように、光学中心点間の距離が離れるほどパノラマ平面上に現れる撮影対象物のズレが一画素以下に収まるまで距離が遠くなり、近いほど撮影対象物のズレが一画素以下に収まるまでの距離が近くなる。

しかし、実際にはカメラの光学中心点は平行ステレオの状態ではなく、回転量によって視線方向も異なり、前述した撮影対象物のズレが一画素以下に収まるまでの距離よりは短くなる。今回記した条件は最もズレが現れやすい状況を仮定したものであり、この条件以下の設定ならばズレの現れないパノラマ画像が作成できることを示している。

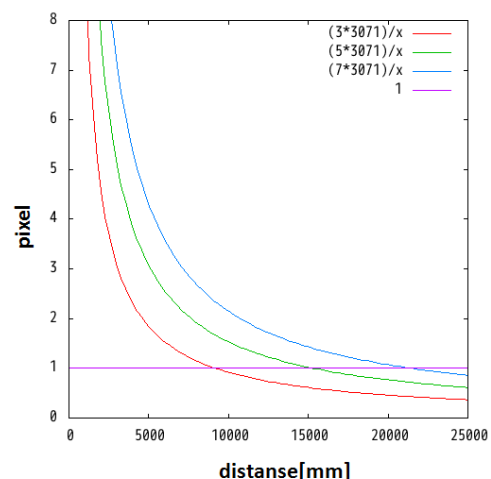


図 A.1 視点移動量毎の被写体距離と視差の関係