



正距円筒図法による全方位画像間の方位調整に関する一考察

河合直樹¹⁾

1) 大日本印刷株式会社 (〒162-8001 東京都新宿区市谷加賀町 1-1-1, Kawai-N@mail.dnp.co.jp)

概要: 異なる地点で撮影した全方位画像を切り替えながら表示することで空間的な場面の変化を提示するサービスが広がっている。このような用途では各全方位画像で方位が一致する必要があるが、撮影時に正確にカメラを設置することは困難である。本研究では、全方位画像の標準的な投影法である正距円筒図法を対象として、2つの全方位画像の間で対応付けた少数の特徴点から撮影中心を結ぶ共通軸との交点位置を特定することで、2画像の方位を一致させる手法を提案する。

キーワード: 全方位画像, 正距円筒図法, エピポーラ, キャリブレーション

1. はじめに

近年、全方位を撮影可能なカメラが市販され、各種共有サービスでも全方位の画像や動画が扱えるようになったことで、実写を用いた VR の利用が手軽になってきた。利用者の操作に応じた方位を中心に全方位画像を切り出して表示することで空間の様子を詳しく示すことができる長所があり、不動産物件や施設の紹介、道路沿いの風景を表示するサービスなど実用的な分野でも利用が広がっている。

単体の全方位画像からでは撮影した位置における様子のみが提示されるため、広い空間全体の様子を提示するためには異なった地点で撮影した複数の全方位画像を順次切り替えて表示することが行われる。これにより利用者自身が移動したような効果が得られるが、このとき個々の全方位画像の撮影方向が不揃いであると場面の遷移時に予期しない方角が表示されてしまう。このため、空間を構成する全方位画像群は向きが統一されていることが好ましいが、撮影時に厳密に向きを揃えることは難しい。加速度センサや磁気センサで記録された撮影時のカメラの傾きを利用して補正することもできるが、センサの感度や記録精度に起因して実用上十分な補正結果が得られない。アプリケーションによっては手で向きを合わせる手段が備えられているが、目視で厳密に調整することは難しい。

本研究ではこの課題に着目し、2つの全方位画像の間で対応付けた少数の特徴点位置を用いて、自動的に方位を一致させる手法を提案する。

2. 関連研究と本研究の方針

2.1 関連研究

コンピュータビジョンやロボット制御の分野を中心に、撮影時の位置や姿勢を画像から推定する研究が報告されている。多くは透視投影画像を対象にしたものであるが、近年は全方位画像を対象にした研究も報告されている。

Fiala ら [1] はキューブ表現された全方位画像を対象とし

て、2画像間で対応付けた特徴点群から回転行列を推定することで、特徴点の空間位置を用いずに全方位画像の方位を一致させる手法を提案した。Kangni ら [2] はキューブ表現の各面が透視投影画像であることを利用して基礎行列と基本行列を推定する手法を提案した。これらの手法では、個々のキューブで異なる面に投影される被写体を考慮する必要がある。また、方位の調整のみを目的とすれば行列の推定は必ずしも必要ない。濱野ら [3] や松場ら [4] は正距円筒図法の全方位画像を対象に特徴点の対応のみから共通する軸の方向を求める試みを報告した。これらの手法では多数の特徴点に対応付ける必要があり、特徴点の誤検出が推定精度に影響を与える。

一方、正距円筒図法では上下の領域で被写体の歪みが大きくなるという性質があり、透視投影画像を前提にした SIFT などの特徴点抽出手段が不安定になるという課題がある。Taira ら [5] は回転に相当する変形を全方位画像に施すことで関心領域を歪みの少ない画像中央付近に移動させてから SIFT を適用する手法を提案している。

2.2 本研究の方針

本研究では VR システムでの利用を想定して、2つの全方位画像の方位を一致させる手法を提案する。この課題は2つの全方位画像の中心を通過する共通軸を特定し、共通軸と各画像の交点が全方位画像の中心に位置するように変換する問題に帰着する。共通軸を求めるためには対応付けられた特徴点を用いることとし、できるだけ少数の特徴点から、特徴点の3次元位置を推定することなく共通軸を求めることを目標とする。

全方位画像の表現としては現在主流となってきた正距円筒図法を想定し、キューブ表現へ変換することなく直接扱う。また、画像は同一高度で鉛直に撮影されているという前提を導入する。この前提は一般的な三脚と水準器を用いて撮影することで成立し、実用的であるとする。

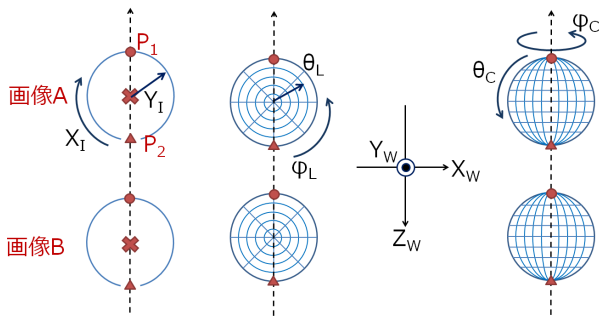


図 1: 画像座標系, ローカル極座標系, ワールド直交座標系, 共通軸極座標系.

3. 正距円筒図法におけるエピポーラ線の性質

3.1 空間中の複数のパノラマ画像の座標系

図 1 に本研究で考慮する 4 種の座標系を鉛直上方から観察した平面図を示す. それぞれの円は 2 つの全方位画像 A および B を示している. 左図では 2 つの全方位画像の方位が一致した状態を示しており, 2 つの撮影位置を通過する共通軸が正距円筒図法の画像の中心を貫いている. 以降, B から A へ向かう方向を共通軸の方向とし, 画像 A を前側画像, 画像 B を後側画像とよぶ. 各全方位画像は左上を原点として画素位置は (X_I, Y_I) で表される.

ローカル極座標系は正距円筒図法で表された全方位画像を極座標系で表したもので, 鉛直方向となす角度を天頂角 θ_L , 共通軸の負方向を基準に鉛直上方から観察して反時計回りになる方位角を ϕ_L と記し, θ_L と ϕ_L は画像座標系の Y_I および X_I とそれぞれ独立に線形関係となる. ワールド直交座標系 (X_W, Y_W, Z_W) は全方位画像の共通軸方向を Z_W 軸負方向にとった右手系座標系であり, 単位ベクトル (θ_L, ϕ_L) と (X_W, Y_W, Z_W) は相互に変換可能である. 共通軸座標系は共通軸方向を天頂方向とした極座標系である. 共通軸方向との角度を天頂角 θ_C , $-X_W$ 方向を基準として共通軸正方向から反時計回りの方位角を ϕ_C と記し, 単位ベクトル (θ_C, ϕ_C) と (X_W, Y_W, Z_W) は相互に変換可能である.

以降, 各画像上で共通軸と交わる 2 点を極点とよび, 共通軸前方の極点を P_1 , 後方の極点を P_2 と記す.

3.2 パノラマ対におけるエピポーラ線

図 2 は方位が一致している一組の全方位画像である. 各画像には, 共通軸極座標系における同一方位角を示す曲線 (子午線) を 15° 刻みで描いている. 方位が一致しているため両画像の中心には共通軸方向に位置する同じ被写体位置 (極点 P_1) が記録されており, 上下中央の両端には共通軸負方向に位置する同じ被写体位置 (極点 P_2) が記録されている. また, 2 枚の画像中で全ての被写体位置が共通軸極座標系の同じ方位角 ϕ_C 上に位置している. これらより, 方位が一致した一組の全方位画像においては, その共通軸極座標系において空間点の位置する方位角の子午線がエピポーラ線になるという性質があることがわかる.

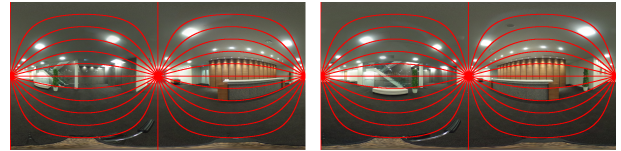


図 2: 方位が一致した前側および後側の全方位画像

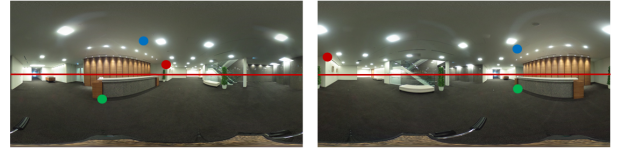


図 3: 方位が一致していない全方位画像

4. 提案手法

4.1 考え方

前章で確認したように, どの被写体も 2 つの全方位画像上で共通した方位角 ϕ_C 上に現れる. ところが図 3 のように補正前の全方位画像対では, 極点 P_1 および P_2 は赤線で示した中央ライン上のどの位置に現れるかが容易に特定できない. ある片側の画像について P_1 の位置が特定できれば P_2 は正対する方角に一意に定まるため, どちらか一方だけ (例えば P_1 の位置だけ) 求めれば良い. 一方で P_1 が現れる位置は画像 A と画像 B において独立であり相関はないため, P_1 を画像 A 上と画像 B 上の双方で特定するということが必要になる. 以上をまとめると, 画像 A 上で P_1 に相当する中央ライン上の位置を X_A , 画像 B 上で P_1 に相当する中央ライン上の位置を X_B , それぞれの画像の横幅を W_A および W_B とすると, $W_A \times W_B$ のサイズの 2 次元探索空間から求める位置の組み合わせである 1 点 $P_1 (X_A, X_B)$ を特定する問題と捉えることができる.

4.2 画像上の特徴点と極点位置の関係

いま, 図 4 に青い丸で示すように, 画像上に記録された無線機器の LED の位置を特徴点として与える. ここで仮に位置 X_1 が極点であると仮定すると, X_1 を軸方向とした共通軸極座標系において特徴点が位置する方位角は $\phi(X_1)$ となる. 一方で極点位置が X_2 であった場合, 特徴点の方位は $\phi(X_2)$ となる. このように, 画像上の特徴点が位置する共通軸極座標系の方位角は極点候補位置に依存している.

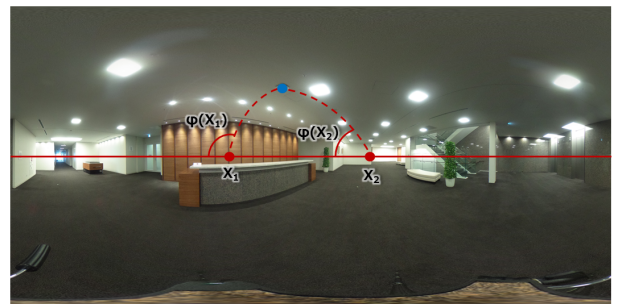


図 4: 極点位置に依存した特徴点の方位角

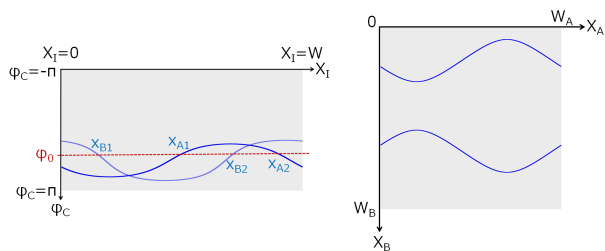


図 5: 1 特徴点による拘束

4.3 ひとつの特徴点による極点位置の拘束

探索空間から極点 P_1 の位置を特定するために、特徴点による拘束を考える。図 3 に青い丸で示した同じ被写体位置について、前節で考察した極点位置に依存した共通軸極座標系における方位角の変化を図 5 (左) に示す。ここでは前側画像の方位角変化を濃い青、後側画像の方位角変化を薄い青の曲線で示したが、どちらも一定の振幅を持った 1 周期の周期関数となることがわかる。図 2 で見たように、正しい極点で補正した場合、どちらの画像においても特徴点が同じ方位に位置する性質を利用して拘束条件を考える。例として $\phi_C = \phi_0$ となる方位を考えると、極点位置が前側画像で X_{A1} または X_{A2} となる場合、後側画像の極点位置は X_{B1} または X_{B2} に限定されることになる。

ϕ_C を 0 から π まで変化させながら同時にとり得る X_A と X_B の組み合わせを探索空間にプロットした結果を図 5 (右) に示す。このように、両画像に特徴点をひとつ設定することで、存在可能な極点位置の組み合わせが 2 本の曲線上に限定されることがわかる。

4.4 複数の特徴点による極点位置の特定

新たに図 3 に赤い丸で示した位置 (壁の角部) に特徴点を追加し、同様の手順で方位角の変化と探索空間での拘束条件を赤い曲線で追記した図を図 6 に示す。ふたつの特徴点を導入したことで、両画像における極点の存在可能位置が、探索空間でそれぞれの特徴点による曲線の交点が示す 4 通り (Q_1, Q'_1, Q_2 および Q'_2) に限定できた。ここで Q_1 と Q'_1 , および Q_2 と Q'_2 は両画像上の X 位置が画像幅の $1/2$ 離れているが、このことはローカル極座標系で方位角に π の位相差があることを示しており、一方が前方の極点 P_1 であった場合、他方は後方の極点 P_2 となる関係であることがわかる。

さらに図 3 に緑色の丸で示した特徴点 (木部の角) による拘束を追加した結果を図 7 に示す。図 6 にて得られた極点候補のうち、緑色の曲線が通過する Q_1 および Q'_1 のみが共通軸極座標系において 3 特徴点と同じ方位角に位置できることから、極点位置を特定することができる。

4.5 共通軸の前後方向に関する考察

最後に Q_1 と Q'_1 のどちらが前方の極点 P_1 であるかを特定する問題が残っている。ここで、共通軸の前方に向けて方位を一致させたパノラマ画像対に見られる被写体位置を考察すると、すべての被写体について、前側画像で後側画像より共通軸極座標系の天頂角 θ_C が大きくなる箇所に位置

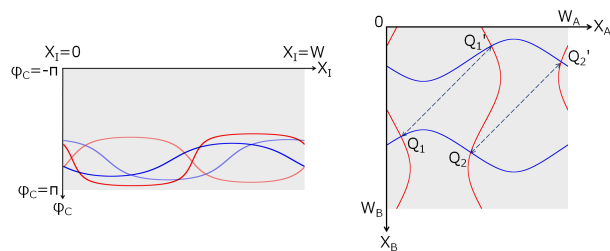


図 6: 2 特徴点による拘束

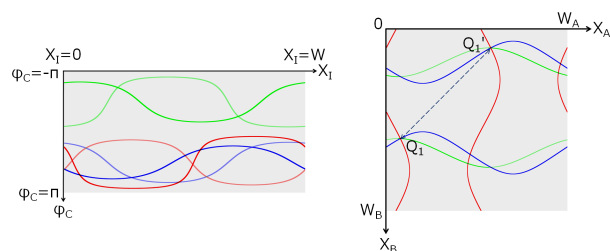


図 7: 3 特徴点による拘束

するという関係が成立する。従って、ある特徴点について、 Q_1 が前方極点 P_1 と仮定して共通軸極座標系の天頂角 θ_C を計算し、上述の関係が成立すれば Q_1 を、成立しなければ Q'_1 を前方極点 P_1 として確定することができる。この例では Q_1 が前方極点 P_1 となる。

5. 実験結果

5.1 画像の修正結果

図 3 に示した原画像対の方位を図 7 で得られた極点位置 Q_1 が中心となるように補正し、エビポーラ線群を記入したものが図 2 である。本実験では水準器を用いて水平に調整した三脚に装着した RICOH 社製 THETA S にて、同一高度で 2 か所の撮影を行った。また、図 3 に付した特徴点 3 点の位置は手動で指定した。図 2 に示した補正結果からは、得られた極点が両画像で被写体の同一箇所を示していること、指定した特徴点だけでなくすべての被写体が共通軸極座標系で同じ方位角上に出現していることが確認でき、補正は妥当であったことが検証できた。

全般に若干の誤差が認められる領域があるが、水準器の目視による調整が厳密でなく撮影時の鉛直方向が正しくとれなかったことが影響していると思われる。

5.2 ビュー補間による画像遷移の確認

ここでは 2 つの全方位画像を用いてビュー補間によりウォークスルーを表示する用途を例にして方位の修正結果の妥当性を検証する。

図 8 にビュー補間の原理となる被写体と視点位置との関係を図示する。2 つの全方位画像の共通軸 t 上の仮想視点からある被写体を臨む方位 β_V は、 $t = 0$ および 1 に位置する原画像からその被写体を臨む方位 β_B および β_A を用いて、被写体の具体的な位置を求めることなく以下の式で特定できる。

$$\tan \beta_V = t \tan \beta_A + (1 - t) \tan \beta_B \quad (1)$$



図 9: 生成された中間ビュー

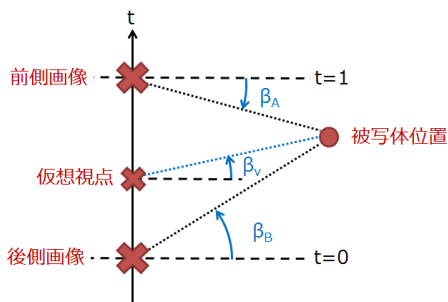


図 8: 仮想視点における被写体位置

ここで方位 β は共通軸極座標系の天頂角 θ_C から計算できる。

$$\beta = \theta_C - \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

共通軸極座標系での子午線が各被写体を臨む方向を拘束するエピポーラ線となるので、原画像の各画素を対応するエピポーラ線に沿って式 (1) で得られる方位 β_V に移動させることで、仮想視点位置 t におけるビューを生成する。

仮想視点での全方位ビューを生成した結果を図 9 に示す。

ここでは図 2 に示した補正結果を入力として、手作業にて 800 点の特徴点を与え、上から順に $t = 1.0, 0.75, 0.5, 0.25, 0.0$ の各位置でビューを生成した。隠れ面に起因する歪みが生じているものの、場面の遷移は概ね自然であり、極点が妥当に検出された結果、各方位角がエピポーラ線として適切に機能したことがわかる。

6. むすび

本研究では少数の特徴点を指定することで正距円筒図法で投影された全方位画像対の方位を一致させる手法を提案した。1 対の全方位画像を用いて検証を行い、目視により各被写体が妥当にエピポーラ線上に位置することを確認した。また、2 地点の中間ビューを生成して自然な場面遷移がみられたことから、エピポーラ線が適切に作用する妥当な補正結果が得られたことを確認した。本研究では原画像の撮影高度は同一で鉛直方向は合っているという前提を導入したが、この前提は一般的な三脚と水準器を用いて撮影することで満たすことができ、多くの場合で実用的であると考えられる。

一方で、この前提が除外できれば撮影時の制約がなくなり、全方位画像による VR の利用がさらに手軽になることが見込めるため、今後は天頂方向も同時に補正できるように一般化したい。また、本研究の検証では特徴点は手作業で与えたが、SIFT などの特徴点マッチングを併用することで全工程を自動化することが期待できる。

参考文献

- [1] Mark Fiala and Gerhard Roth. Automatic alignment and graph map building of panoramas. In *Haptic Audio Visual Environments and their Applications, 2005. IEEE International Workshop on*, pp. 6–pp. IEEE, 2005.
- [2] Florian Kangni and Robert Laganier. Epipolar geometry for the rectification of cubic panoramas. In *Computer and Robot Vision, 2006. The 3rd Canadian Conference on*, pp. 70–70. IEEE, 2006.
- [3] 濱野優輝. パノラマ画像の位置方位推定を用いた PasQ 空間構築方法の改善. PhD thesis, 岡山県立大学情報系工学研究科修士論文, 2011.
- [4] 松場亮太郎, 國島丈生, 横田一正ほか. D-023 パノラマ仮想空間構築のための ransac を用いた方位推定方法 (d 分野: データベース). 情報科学技術フォーラム講演論文集, Vol. 12, No. 2, pp. 135–136, 2013.
- [5] Hajime Taira, Yuki Inoue, Akihiko Torii, and Masatoshi Okutomi. Robust feature matching for distorted projection by spherical cameras. *IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications*, Vol. 7, pp. 84–88, 2015.