5C-07

全方位画像上のエピポーラ拘束を利用した 3D モデラ

河合直樹† 近藤孝夫† 田中美苗†

大日本印刷株式会社†

1 はじめに

コンピュータグラフィクス（CG）やバーチャルリアリティ（VR）では，表示する 3D データを事前に用意する必要がある．通常はモデリングソフトを用いた作業で 3 次元形状を制作するが，特殊なスキルが必要で制作コストが課題となる．制作スキルに頼らない制作手段として，距離センサを用いて 3 次元形状を作成するアプローチや，複数の写真に現れる被写体の視差から 3 次元位置を推定するフォトグラメトリなどの手法が提案されている．

一般的な透視投影法による写真ではシーンが一定の画角で撮影されているため，3 次元形状を推定できる被写体の大きさは限られる．一方で近年撮影が容易になった全方位画像ではカメラの周囲が全て写り込む利点があり，これを利用して単体の全方位画像中の特徴線から部屋の形状を直方体で近似して推定する手法[1]が提案されている．このような全方位画像を用いれば，視差からの 3 次元推定においても撮影位置を中心とした全方位で 3 次元形状を推定できる利点が期待される．

本研究では，2 枚の全方位画像間で成立するエピポーラ幾何を考察したうえで，2 画像上で対応する被写体を対応付けて 3 次元位置を推定しながらポリゴンとテクスチャを生成するモデラを試作した．実験ではエピポーラ拘束を導入した GUI により操作負荷が低減し，3 次元設計のスキルがなくても容易に 3D データを作成可能になることが確認できた．

2 提案手法

2.1 全方位画像のエピポーラ幾何

ステレオビジョンの分野では，一方の画像に現れる被写体が他方の画像のエピポーラ線上に出現することが知られている．キャリブレーションされた 1 組の正距円筒図法による全方位画像の場合，エピポーラ線が図 1 のように現れる[2]．この関係を定式化するために図 2 に示すように，サイズ$W \times H$の全方位画像上の画像座標系(X_I, Y_I)と，全方位画像の鉛直方向を軸としたローカル極座標系$(r_L, \theta_L, \varphi_L)$，ワールド座標を表す 3 次元直交座標系$(X_W, Y_W, Z_W)$，2 つの撮影位置を結んだ直線を軸とする共通軸極座標系$(r_C, \theta_C, \varphi_C)$を定義する．これらは式(1)～(3)に示す関係を利用して相互に変換可能である．

図 1 に示した全方位画像では，撮影した 2 地点を通過する直線がZ_W軸に一致するようにワールド直交座標系を定義し，かつ両画像の中心がZ_W軸負方向と一致するようにキャリブレーションした．任意の被写体は共通軸極座標系で同一方位φ_Cのエピポーラ線上で異なる天頂角θ_Cの位置に現れる．このときの天頂角の差$\Delta\theta_C$が 2 つの撮影地点から被写体を見た視差に相当する．

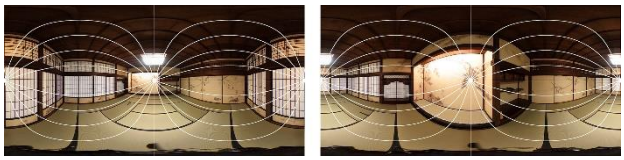

図 1．全方位画像におけるエピポーラ線

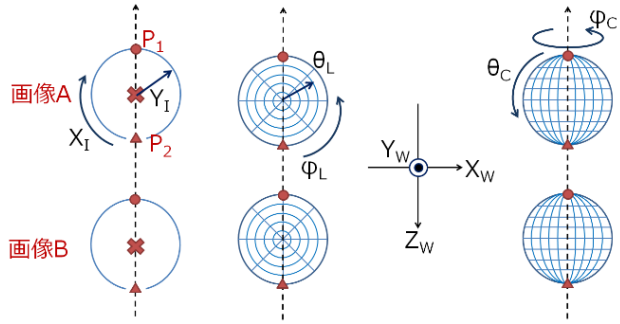

図 2．左より画像座標系，ローカル極座標系，ワールド直交座標系，共通軸極座標系

$$\theta_L = \pi \frac{Y_I}{H}, \quad \varphi_L = 2\pi\left(1 - \frac{X_I}{W}\right) \tag{1}$$

$$X_w = r_L \sin\theta_L \sin\varphi_L, \quad Y_w = r_L \cos\theta_L, \quad Z_w = r_L \sin\theta_L \cos\varphi_L \tag{2}$$

$$r_C = \sqrt{{X_w}^2 + {Y_w}^2 + {Z_w}^2}, \quad \theta_C = \cos^{-1}\left(-\frac{Z_w}{\sqrt{{X_w}^2 + {Y_w}^2 + {Z_w}^2}}\right), \quad \varphi_C = \tan^{-1}\left(-\frac{Y_w}{X_w}\right) \tag{3}$$

2.2 天頂補正と方位較正

前述したキャリブレーションを実現するために，2 枚の全方位画像に天頂補正と方位較正を施す．天頂補正は画像毎に少数の垂直線分を指定して補正パラメータを求められるが，垂直線分を自動抽出した全自動処理［3］も可能である．方位較正は少数の頂点対位置を指定して得られた補正パラメータに基づいて，各画像をスクロール処理（画像を水平に移動してはみ出した領域を左右反対方向にコピー）することで実施できる[2]．

2.3 エピポーラ拘束

3 次元空間中の任意の点は 2 枚の全方位画像上で図 1 に示した同一のエピポーラ線上に出現するため，一方の画像で選んだ特徴点の相手方位置を特定するには，他方の画像で同一エピポーラ線上だけを探索すれば十分であ

A 3D Modeler Constrained by Epipolar Geometry on Omnidirectional Images

† Naoki Kawai, Takao Kondo and Mina Tanaka・Dai Nippon Printing Co., Ltd.

Copyright ©2023 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.

る．具体的には，一方の画像上の特徴点の画像座標(X_I, Y_I)から式(1)～(3)の関係より共通軸極座標系での方位角φ_Cを特定でき，他方の画像ではφ_Cのエピポーラ線上に限定して探索し，天頂角θ_Cを特定する．θ_Cは$0\sim\pi$の範囲をとり，画像上ではθ_Cの増加に伴いエピポーラ線上を画像中心から左右いずれかに移動し，端にたどり着く．この間座標値X_Iはθ_Cの増加に対して単調増加（画像上左半分の場合は単調減少）するため，探索は媒介変数を介することなく対応するX_Iのみを求める問題に帰着する．

このエピポーラ拘束は，自動処理で対応を探索する場合だけでなくマウスドラッグなどの手作業で頂点対を指定する場合にも成立する．画像上の点の位置は 2 自由度であるが，エピポーラ拘束により 1 自由度となり，ドラッグ操作ではマウスポインタのX_I座標値に対応するエピポーラ線上の点に拘束することで作業負荷を低減できる．精度面ではφ_Cが同一になることが保証される．

2.4　頂点の 3 次元座標値

2 画像上で対応付けられた頂点は，その視差から 3 次元直交座標系での位置が特定できる．ここで，2 画像の撮影位置がZ_W軸上で距離 1.0 離れているものとし，後方カメラ位置C_Bを原点$(0,0,0)$，前方カメラ位置C_Fを$(0,0,-1)$とする．2 点の共通軸極座標系での方位角φ_Cは同一であり，φ_C方向の大円を含む断面を考えると，点は図 3 に示すようにC_Bからはθ_B方向，C_Fからはθ_F方向に観察される．原点から点までの距離r_Cは式(4)で計算でき，得られた$(r_C, \theta_B, \varphi_C)$を共通軸極座標系からワールド直交座標系に変換することで，対象の頂点座標が得られる．

$$r_C = \frac{\tan\theta_F}{\cos\theta_B(\tan\theta_F - \tan\theta_B)} \qquad (4)$$

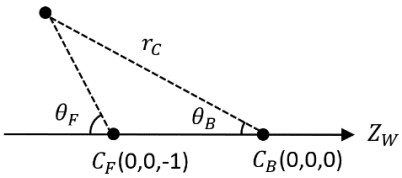

図 3．3 次元位置の推定

2.5　テクスチャ生成

生成したポリゴンを CG で描画する際には，各面にマッピングするテクスチャが必要になる．テクスチャマッピングでは平面のテクスチャを線形にポリゴンに投影するため，像に歪みが含まれる正距円筒図法では適正にマッピングできない．そのため各ポリゴンに対応する 3 次元の矩形領域に対して全方位画像の画素値を投影することで各面に対応した透視投影のテクスチャを得る．

3　プロトタイプ実装

C++と OpenGL を用いて提案手法を対話型のモデラとして実装し，手法の有効性を確認した．基本機能として画像上への頂点の配置，頂点位置の移動による 2 枚の画像上での対応付け，4 頂点の選択によるポリゴンの定義を行う機能を備える．補助機能として，表示系操作（各画像を独立に拡大縮小，移動）の他，エピポーラ拘束に従って頂点位置の移動を相手方のφ_CとマウスポインタのX_Iで特定する機能，天井と床の高さを推定し各頂点の高度を一致させる機能，典型的な構造である水平面や鉛直面のフラグを設定してポリゴンの向きを拘束する機能を実装した．

図 4 にプロトタイプの GUI 画面と，生成したデータの 3D 表示例を示す．プロトタイプを用いて 2 名の被験者（3D 制作業務の経験者 1 名と未経験者 1 名）によりそれぞれ 3 組の全方位画像からエピポーラ拘束を使用した場合と使用しない場合で 3D データ作成の作業時間を計測した結果，エピポーラ拘束を使用した場合では作業時間が平均で約 77%に短縮できた．品質的な効果として，両画像で設定したφ_Cが一致しない場合ポリゴンやテクスチャにズレが生じるが，エピポーラ拘束によりこのような品質低下が回避できることも確認できた．また，一般的に 3 次元空間上の 4 点は同一平面を構成できないが，頂点の高度較正（床や天井高への一致）や水平面/鉛直面の設定に応じた頂点位置の較正処理を導入することでポリゴンを適正に生成できることを確認した．

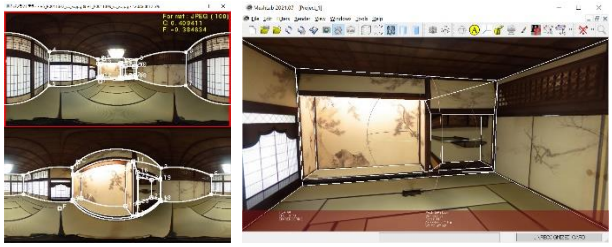

図 4．モデラの GUI と 3D 表示例

4　むすび

本研究では，室内で撮影した 2 枚の全方位画像を表示して，2 画像上で対応する位置を指定した頂点の視差から 3 次元座標を算出し，指定した点の接続関係からポリゴンデータとテクスチャ画像を生成する手法を提案した．提案手法では全方位画像のエピポーラ幾何を考察し，頂点操作時の可動範囲にエピポーラ拘束を設けることで 2 自由度の操作を 1 自由度に削減でき，操作負荷を低減した．また，面を水平面や鉛直面に指定する機能を付加したことにより，設定操作上の誤差を是正した．実験により視差から推定した 3 次元位置でポリゴンが適正に生成されること，ポリゴンに対応するテクスチャが生成され歪むことなくマッピングされることが確認できた．

課題として片側の画像で不可視な面ではポリゴンが適切に推定できず 3D 表示でテクスチャの歪みが顕著に認められる．人工的な建造物は Manhattan World Assumption として仮定できる 3 次元直交座標系に平行な面で構成される構造が多く，隣接面との接続関係等のコンテキストに基づいた不可視面推定の余地があると考える．

参考文献

[1] 河合直樹；近藤孝夫；田中美苗．全方位画像を利用した簡易的な空間モデリングの検討．情報処理学会第 82 回全国大会講演論文集．2020.

[2] 河合直樹．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， 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会論文集, 22B-4, 2018.

[3] Naoki Kawai. A method for rectifying inclination of panoramic images. In ACM SIGGRAPH 2019 Posters (SIGGRAPH '19). ACM, Article 23, 2 pages.

Copyright ©2023 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.