

透視投影因子分解法を用いた鏡面球映りこみ像の三次元形状推定

3D shape reconstruction by spherical mirror using perspective factorization method

○ 山田 毅 (九大) 原 健二 (九大) 倉爪 亮 (九大)
 岩下 友美 (九大) 長谷川 勉 (九大)

Tsu Yoshi YAMADA, Kyushu Univ., yamada@irvs.is.kyushu-u.ac.jp

Kenji HARA, Kyushu Univ., Ryo KURAZUME, Kyushu Univ.

Yumi IWASHITA, Kyushu Univ., Tsutomu HASEGAWA, Kyushu Univ.

This paper proposes a 3D shape reconstruction method using a moving camera and a spherical mirror based on the Perspective Factorization Method. Factorization method is quite useful for 3D reconstruction from image sequences. However there is a strict condition that all feature points must be observed in all images. In our method, a spherical mirror is placed in front of a camera and reflected feature points are tracked even if the tracking feature points go out of view due to the camera motion. This paper presents a basic concept of the proposed method and some results of fundamental experiments.

Key Words: 3D shape reconstruction, Perspective Factorization Method, Spherical mirror

1 はじめに

時系列で撮影された二次元画像からの三次元情報抽出は、コンピュータビジョンの分野において基本的かつ重要な研究課題である。この問題の解法のひとつとして、Tomasi-Kanadeの「因子分解法」がよく知られている¹⁾²⁾。これはカメラの外部パラメータを既知とせず、画像上での特徴点の軌跡のみからその三次元位置とカメラの運動を推定する手法である。線形計算のみで容易に実行でき、測定ノイズに対してロバストに結果を得ることができるが、アフィンカメラモデルを仮定しているため実システムでは推定精度が低いという欠点を持つ。そこで、アフィンカメラに対するTomasi-Kanadeの手法を反復し、透視効果を導入する手法がChristy-Horaudにより提案された³⁾。この手法は、反復計算を要するためロバスト性は低下するが、特徴点の三次元位置を高精度に推定できる。

一方、因子分解法においては、最初の画像フレームで選択された特徴点とその後の全フレームにおいて観測、及び追跡されている必要がある。しかし、実環境をカメラで撮影し、その三次元情報を推定する場合、最初の画像フレームで選択された特徴点がカメラの移動に伴い視野外に出てしまうことがある。

そこで本稿では、この問題への対処法として、カメラの光軸上に鏡面球を設置し、カメラ視野外の特徴点を鏡面球に映すことで継続して観測を行い、映りこみ点から特徴点の三次元位置を推定する手法を提案する。本手法は、Fig.1のように映りこみ点を仮想視点から見た透視投影像として近似し、透視投影因子分解法を適用することで高精度な推定を実現するものである。

2 特徴点の三次元位置推定手法

2.1 因子分解法

まず、一般的なアフィンカメラに対する因子分解法について説明する。 f 枚目の画像における第 p 特徴点 s_p の画像座標を $x_{fp} = (x_{fp}, y_{fp}) (f = 1, 2, \dots, F, p = 1, 2, \dots, P)$ とする。このとき

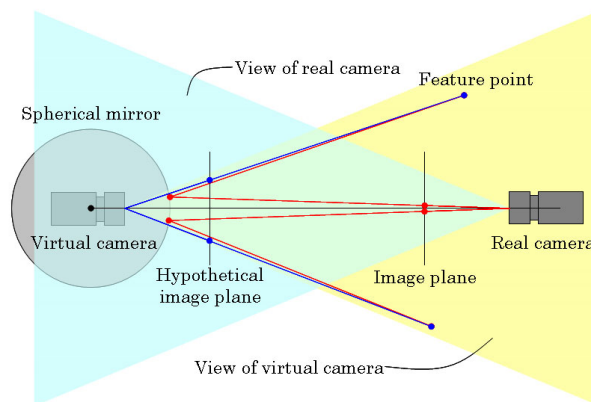


Fig.1 3D reconstruction from images reflected in a spherical mirror.

$$W = \begin{pmatrix} W_1 \\ \vdots \\ W_F \end{pmatrix}, W_f = \begin{pmatrix} x_{f1} & \cdots & x_{fP} \\ y_{f1} & \cdots & y_{fP} \end{pmatrix} \quad (1)$$

で表される行列 W を計測行列と呼び、それらの座標原点を特徴点の重心 (x_f, y_f) に移動した行列 W^* を修正計測行列と呼ぶ。

また、一般アフィンカメラモデルにおいて、第 p 特徴点の画像座標は以下の式 (2) で表される。

$$x_{fp} = A_f (R_f s_p + t_f) = B_f s_p + t'_f \quad (2)$$

ここで、 A_f はアフィン射影行列、 R_f, t_f はそれぞれ f 枚目の画像におけるカメラの回転行列と並進ベクトルである。また、簡単のため世界座標系の原点は特徴点の重心に一致すると仮定する。このとき、各特徴点の重心からの相対座標 x'_{fp} は

$$x'_{fp} = B_f s_p \quad (3)$$

となる。これを全ての特徴点を用いて表すと

$$\begin{pmatrix} x'_{f1} & x'_{f2} & \cdots & x'_{fp} \end{pmatrix} = B_f \begin{pmatrix} s_1 & s_2 & \cdots & s_p \end{pmatrix} \\ W_f^* = B_f S \quad (4)$$

となるから、全フレームについて考えると $W^* = BS$ となり修正計測行列 W^* がカメラ運動を表す行列 B と特徴点の三次元位置を表す行列 S の積に因子分解できることが分かる。

また、カメラ座標系の基底は正規直交基底を成す、すなわち $R_f R_f^T = E$ となるので

$$B_f B_f^T = A_f A_f^T \quad (5)$$

が成立する。しかし、一度の操作でこの条件を満たすように分解するのは困難であるため、次のように2段階に分けて分解する。

特徴点の画像座標に誤差がないと仮定したとき、 W^* の rank は3となる。そこで、特異値分解などを用いて W^* を以下のように分解する。これを射影復元と呼ぶ。

$$W_{(2F \times P)}^* = U_{(2F \times 3)} \Sigma_{(3 \times 3)} V_{(3 \times P)}^T \\ = \left(U \Sigma^{\frac{1}{2}} \right) \left(\Sigma^{\frac{1}{2}} V^T \right) \\ = M_{(2F \times 3)} S_{(3 \times P)} \quad (6)$$

ここで、ある正則な行列 A を考えると、 $MS = (MA)(A^{-1}S) = M'S'$ となり、一意に分解することができない。そこで、拘束条件(5)を満たすように正則行列 A を決定することで一意の分解を得る。これをユークリッド化という。ここで、 $B_f = M_f A$ 、 $Q = AA^T$ とすると、式(5)は次のように書き表される。

$$M_f Q M_f^T = A_f A_f^T \quad (7)$$

ただし、 M_f は M の第 $(2f-1)$ 列と第 $2f$ 列を要素に持つ 2×3 行列である。また、 Q は 3×3 対称行列であり、本質的に異なる3枚以上の画像があれば決定できる⁴⁾。

2.2 透視投影因子分解法

Christy-Horaud の手法 (以下 CH 法) は、アフィンカメラに対する因子分解法を繰り返し適用することで、入力画像 (中心射影像) から弱中心射影像 (または擬似中心射影像) を推定する手法である。ここでは、弱中心射影像の推定方法について説明する。CH 法は、大きく分けて次の3ステップから成る。

1. 入力画像を弱中心射影像と仮定し、因子分解法により特徴点の三次元位置を推定する。
2. 推定結果を元に、以下の式(8)から ε_{fp} を計算する。

$$\varepsilon_{fp} = \frac{k_f \cdot s_p}{t_{zf}} \quad (8)$$

3. 以下の式(9)を用いて特徴点を再計算し、因子分解法により特徴点の三次元位置を推定する。

$$\begin{pmatrix} x_{fp} \\ y_{fp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{x}_{fp}(1 + \varepsilon_{fp}) - \tilde{x}_{0f} \\ \tilde{y}_{fp}(1 + \varepsilon_{fp}) - \tilde{y}_{0f} \end{pmatrix} \quad (9)$$

以降、 ε_{fp} の変化量の最大値が適当に定めた閾値 E 以下になるまでステップ2とステップ3を反復する。ただし、 \tilde{x}_{fp} \tilde{y}_{fp} \tilde{x}_{0f} \tilde{y}_{0f} はそれぞれ以下の式で表される。

$$\tilde{x}_{fp} = \frac{i_f \cdot s_p + t_{xf}}{k_f \cdot s_p + t_{zf}} \quad \tilde{x}_{0f} = \frac{t_{xf}}{t_{zf}} \\ \tilde{y}_{fp} = \frac{j_f \cdot s_p + t_{yf}}{k_f \cdot s_p + t_{zf}} \quad \tilde{y}_{0f} = \frac{t_{yf}}{t_{zf}}$$

ここで、 i_f j_f k_f は f 枚目の画像におけるカメラの回転行列 R_f の列ベクトル、 t_{xf} t_{yf} t_{zf} は並進ベクトル t_f の要素である。

3 鏡面球を用いた特徴点の3次元位置推定

本手法では、鏡面球の中心が画像中心近傍に投影され、かつ鏡面球の境界円はほぼ真円になると仮定する。また、 f 枚目の画像における鏡像内の第 p 特徴点の画像座標 (x_{fp}, y_{fp}) は、鏡面球の境界円の中心 c_f を原点、画像の水平右向きを x 軸、鉛直下向きを y 軸とする画像座標系における座標であるとする。さらに、原点を視点に置き、水平右向きを X 軸、鉛直下向きを Y 軸、光軸に一致し、視点から鏡面球へ方向を Z 軸とするカメラ座標系 Σ_f を定義する。

3.1 映り込み点の座標変換

まず、以下の式にしたがって特徴点の画像座標 (x_{fp}, y_{fp}) を (θ_{fp}, ϕ_{fp}) の値に変換する。

$$\theta_{fp} = \arcsin \left(\frac{L}{R} \right) = \arcsin \left(\frac{\sqrt{x_{fp}^2 + y_{fp}^2}}{r_f} \right) \quad (10)$$

$$\phi_{fp} = \arctan \left(-\frac{y_{fp}}{x_{fp}} \right) \quad (11)$$

ここで、 r_f は f 枚目の画像における鏡面球の境界円の半径 [pixels] であり、 (θ_{fp}, ϕ_{fp}) は鏡面球中心 C と基準とする映り込み点 s'_{fp} の相対位置を示す (Fig.2)。

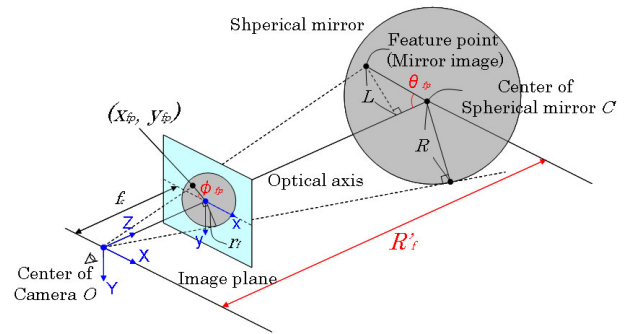


Fig.2 Calculate θ_{fp} and ϕ_{fp} about all feature points.

また、カメラ中心 O と鏡面球中心 C の間の距離を R'_f とすると、Fig.2 より $R'_f : R = \sqrt{f_c^2 + r_f^2} : r_f$ であるから

$$R'_f = R \sqrt{1 + \left(\frac{f_c}{r_f} \right)^2} \quad (12)$$

となる。ここで、 R 、 f_c はそれぞれ鏡面球の半径、およびカメラの焦点距離 [pixels] であり、既知であるものとする。

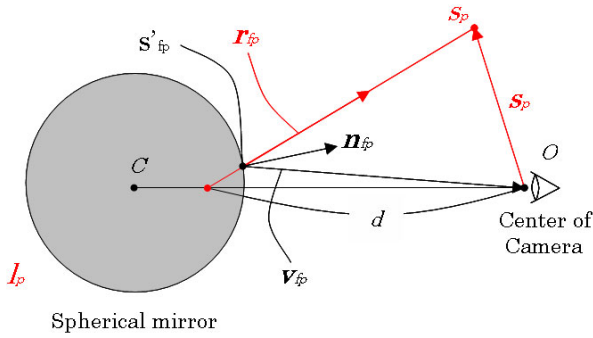


Fig.3 Geometrical relation among camera, spherical mirror, and feature point.

3.2 特徴点方向ベクトルの計算

鏡面球とカメラ、および特徴点の位置関係は Fig.3 のようになる。ここで、映りこみ点 s'_{fp} における視点方向ベクトルを v_{fp} 、法線ベクトルを n_{fp} とすると、 v_{fp} 、 n_{fp} は

$$v_{fp} = \begin{pmatrix} -R \sin \theta_{fp} \cos \phi_{fp} \\ R \sin \theta_{fp} \sin \phi_{fp} \\ R \cos \theta_{fp} - R'_f \end{pmatrix}$$

$$n_{fp} = \begin{pmatrix} R \sin \theta_{fp} \cos \phi_{fp} \\ -R \sin \theta_{fp} \sin \phi_{fp} \\ -R \cos \theta_{fp} \end{pmatrix}$$

となる。したがって、映りこみ点 s'_{fp} における正反射方向ベクトル r_{fp} は次のように表すことができる。

$$r_{fp} = \frac{2(v_{fp} \cdot n_{fp})}{|v_{fp}| |n_{fp}|} \frac{n_{fp}}{|n_{fp}|} - \frac{v_{fp}}{|v_{fp}|}$$

$$= \frac{1}{c} \begin{pmatrix} -(R - 2R'_f \cos \theta_{fp}) \sin \theta_{fp} \cos \phi_{fp} \\ (R - 2R'_f \cos \theta_{fp}) \sin \theta_{fp} \sin \phi_{fp} \\ (R - 2R'_f \cos \theta_{fp}) \cos \theta_{fp} + R'_f \end{pmatrix} \quad (13)$$

ただし、 $c = \sqrt{R^2 + R_f'^2 - 2RR'_f \cos \theta_{fp}}$ とする。したがって、特徴点 s_p の三次元座標 s_p は奥行きパラメータ t_{fp} を用いて

$$s_p = -v_{fp} + t_{fp} r_{fp} \quad (14)$$

となり、特徴点は Fig.3 に示される直線 l_p 上に存在すると分かる。

3.3 仮想視点位置の計算

式 (14) において $t_{fp} = 1/(R - 2R'_f \cos \theta_{fp})$ とすると、直線 l_p と光軸は点 $(0, 0, d)$ で交わり

$$d = R'_f \left(1 - \frac{R}{2R'_f \cos \theta_{fp} - R} \right) \quad (15)$$

となる。したがって、この点から特徴点 s_p を見ると、その像はあたかも透視投影に従うとみなせる。しかし、 θ_{fp} は変数であり、 d は一定の値にはならない。そこで、これらの値の平均値

$$d_c = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P R'_f \left(1 - \frac{R}{2R'_f \cos \theta_{fp} - R} \right) \quad (16)$$

を取り、点 $(0, 0, d_c)$ を仮想カメラの位置とする。このとき、仮想カメラの向きは実カメラに相対する向きとする。

3.4 選択可能な特徴点の範囲

仮想カメラ座標系において特徴点 s_p の像が透視投影に従うためには、特徴点 s_p が鏡面球上の点 s'_{fp} より実カメラ側になければならない。すなわち、式 (13) において r_{fp} の Z 値が負であるから、以下の式 (17) を満たすような特徴点を選ぶとする。

$$(R - 2R'_f \cos \theta_{fp}) \cos \theta_{fp} + R'_f < 0 \quad (17)$$

3.5 映り込み点の三次元位置推定

仮想カメラ座標系において、特徴点 s_p の三次元座標 s_p^* は以下の式 (18) で表される。

$$s_p^* = t_{fp}^* \begin{pmatrix} (R - 2R'_f \cos \theta_{fp}) \sin \theta_{fp} \cos \phi_{fp} \\ (R - 2R'_f \cos \theta_{fp}) \sin \theta_{fp} \sin \phi_{fp} \\ -(R - 2R'_f \cos \theta_{fp}) \cos \theta_{fp} - R'_f \end{pmatrix} \quad (18)$$

したがって、仮想カメラ座標系における画像座標 (x'_{fp}, y'_{fp}) は、以下の式 (19) で表される。

$$\begin{pmatrix} x'_{fp} \\ y'_{fp} \end{pmatrix} = -\frac{(R - 2R'_f \cos \theta_{fp}) \sin \theta_{fp}}{(R - 2R'_f \cos \theta_{fp}) \cos \theta_{fp} - R'_f} \begin{pmatrix} \cos \phi_{fp} \\ \sin \phi_{fp} \end{pmatrix} \quad (19)$$

上式を用いて映りこみ点の画像座標を変換し、透視投影因子分解法を用いることで映りこみ点の三次元位置を推定する。

4 シミュレーション実験

4.1 実験環境

3DCG 作成ソフトを用いて映りこみ点のある仮想画像を作成し、提案手法により映りこみ点の三次元位置の推定実験を行った。本実験では、Fig.4 に示すように 5 枚の画像について 12 個の特徴点を手動で選択し、追跡を行った。また、因子分解法と CH 法それぞれを用いて特徴点の三次元位置を推定し、その結果を比較した。ただし、因子分解法は入力画像を弱中心射影と仮定した。

4.2 実験結果

因子分解法による復元結果と CH 法による復元結果をそれぞれ Fig.5, Fig.6 に示す。図より、CH 法を用いることで復元形状の歪みが小さくなっていることが分かる。しかし、どちらの手法においても同一平面上に復元されるはずの特徴点 1~8 が同一平面上に復元されておらず、奥行き復元が適切に行っていないことが分かる。これは、映りこみ点が厳密には透視投影に従わず、式 (16) を用いて近似しているためと考えられる。したがって、実際にはこの値を初期値として非線形最小化を行うなどの処理が必要である。

また、以下の点から、現在の実装では画像や特徴点の取得方法は大きく制限される。

1. 全ての特徴点が全てのフレームにおいて式 (17) を満たす必要がある。したがって、最初のフレームで式 (17) を満たす特徴点がある場合、その後のフレームで式 (17) を満たさなくなる場合、そのような特徴点は排除しなければならない。

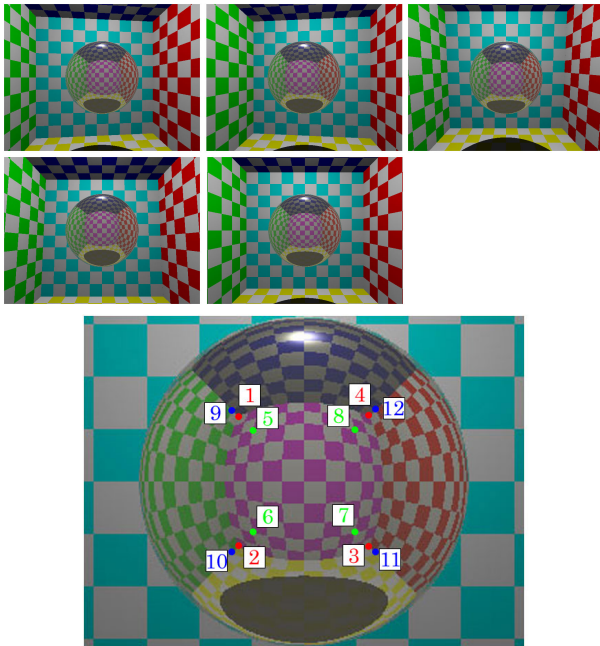


Fig.4 Input images and feature points.

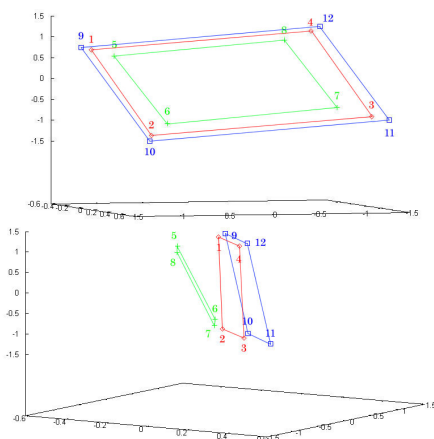


Fig.5 Simulation result(weak perspective).

2. 画像中心付近に投影された特徴点を選択すると、復元精度が著しく低下する。これは、式 (15) において d の値が非常に大きく (画像中心では無限大) になってしまい、近似による誤差が大きくなるためと考えられる。追跡の途中で画像中心近傍を通る特徴点についても同様である。

そのため、映りこんでいない特徴点と統合するなどにより、これらの問題を解決することが今後の課題である。また、現在は鏡面球中心が画像中心近傍に投影されることを前提としているが、今後はそれを前提としない方法も検討する。

5 むすび

鏡面球に映りこんだ特徴点を仮想視点から見た透視投影像として近似し、透視投影因子分解法を適用することで三次元位置を推定する手法を提案した。また、仮想画像に対して本手法を適用することで、映り込み画像から特徴点の三次元位置の推定を行った。

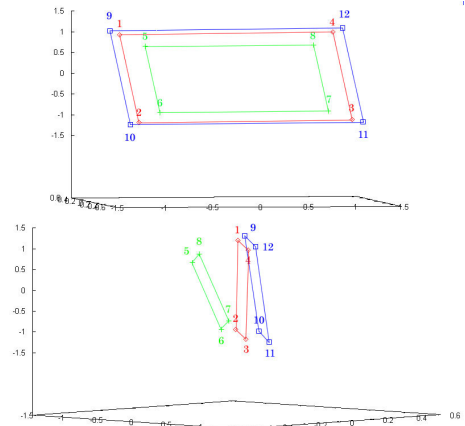


Fig.6 Simulation result(perspective).

文献

- [1] C.Tomasi and T.Kanade, "Shape and Motion from Image Streams Under Orthography: A Factorization Method", IJCV, vol.9, No.2, pp.132-154, 1992
- [2] C.J.Poelman and T.Kanade, "A Paraperspective Factorization Method for Shape and Motion Recovery", IEEE Trans. PAMI, vol.19, No.3, pp.206-217, 1997
- [3] S.Christy and R.Horaud, "Euclidian Shape and Motion from Multiple Perspective Views by Affine Iterations", IEEE Trans. PAMI, vol.18, No.11, pp.1098-1104, 1996
- [4] 蔵田 武志, 藤木 淳, 坂上 勝彦, "ロバスト推定を用いた一般アフィン射影モデルの因子分解法", 電子情報通信学会 技術研究報告, PRMU98-194, pp.17-24, 1999