魚眼カメラを用いた SfM による 3 次元復元 - カメラの運動の精度検証-

山野 史登[†] 增山 岳人[‡] 梅田 和昇[‡]

†中央大学大学院理工学研究科 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27

‡中央大学理工学部 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27

E-mail: † yamano@sensor.mech.chuo-u.ac.jp, ‡ {masuyama, umeda}@mech.chuo-u.ac.jp

あらまし 自動車の運転支援システムやロボットにおいては、一度に広範囲を3次元計測することが重要である.本論 文では、3次元計測を行うセンサとして魚眼カメラを用いる.魚眼カメラで取得した画像は大きく歪んでいるが、一度に広 範囲を観測でき、自動車等への搭載が容易である.我々は、魚眼カメラを用いた Structure from motion (SfM)による3次元環 境復元手法を提案している. 本論文では、3次元復元を行った際に得られるカメラ運動の推定精度を検証する.

キーワード 魚眼カメラ, Structure from motion (SfM), 3次元復元, カメラの運動

1. 序論

近年,自動車の運転支援システムやロボットの自 律化に関して様々な研究が行われている.これらの 研究では様々な環境情報を取得することが重要であ るが,特に 3 次元情報は幅広い用途において必要と される.本論文では3次元情報を取得するセンサと して単一の魚眼カメラを利用する.魚眼カメラは 180 度以上の視野角を持つ超広角カメラであり,比 較的安価かつ小型であるため自動車やロボットに搭 載しやすいという特長をもつ.しかし,魚眼カメラ で撮影した画像(以下「魚眼画像」と略記)には大 きな歪みがあるため,一般のカメラに比べて取り扱 いが困難である.また,一台のカメラで3次元復元 を行うには,カメラの移動前後の相対的な位置・姿 勢情報を推定する必要がある.

先行研究として,石井らは車載魚眼カメラを用いた Structure from Motion (SfM)による3次元復元手法を提案している[1]. この手法では魚眼カメラの歪を考慮して特徴点の座標の変換を行っている.他方, 光本らは2枚の魚眼画像を直接用いてSfMにより3次元復元する手法を提案している[2].本論文では, 光本らの手法を利用し,3次元環境の復元を行い, 推定されたカメラ運動の精度を検証する.

2. 内部パラメータ

本論文では Scaramuzza らが提案している汎用的 な全方位カメラモデルを用いる[3]. カメラモデルの 概略を図 1 に示す. ある 3 次元ベクトル $P = [X \ Y \ Z]^T$ とその点が画像上に投影される画像 左上 が原点の画像座標系における位置 $p = [u \ v]^T$, 画像中心 $p_0 = [u_0 \ v_0]^T$ の対応関係は次式のように表 される.

$$\boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{X} \\ \boldsymbol{Y} \\ \boldsymbol{Z} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \boldsymbol{u} - \boldsymbol{u}_0 \\ \boldsymbol{v} - \boldsymbol{v}_0 \\ -\boldsymbol{f}(\boldsymbol{\rho}) \end{bmatrix}$$
(1)

≈ は 同 次 座 標 と して 等 しい ことを表す. $\rho = \sqrt{(u-u_o)^2 + (v-v_o)^2}$ は投影点 p の画像中心 p_0 から の距離である.また $f(\rho)$ は ρ の多項式であり,次式 のように表される.

$$f(\rho) = a_0 + a_1 \rho + a_2 \rho^2 + a_3 \rho^3 + a_4 \rho^4 + \dots$$
(2)

本論文では、4次の項までの係数 a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 を カメラの内部パラメータとする. 画像中心 p_0 を含め た内部パラメータ I は以下の通りである.

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & u_0 & v_0 \end{bmatrix}^T$$
(3)



3.3 次元復元手法

3.1. 手法概要

1台の魚眼カメラから撮影位置の異なる画像を取得し、計測対象の3次元形状復元を行う.フローチャートを図2に示す.処理の手順は以下の通りである.

まず各画像から特徴点を抽出し,対応点を求める. 次にカメラのレンズ中心から特徴点の3次元空間上 の点に向かう光線ベクトルを式(1)から求める.この 光線ベクトルを用いてカメラの位置・姿勢(外部パ ラメータ)を推定し,推定された外部パラメータか ら特徴点の3次元座標を初期推定する.特徴点の逆投 影誤差の2乗和を最小化するバンドル調整により外 部パラメータと特徴点の3次元座標をより精度良く 推定する.最後に3次元データからドロネー分割を用 いて三角網を生成しテクスチャマッピングで3Dモ デルを生成する.



3.2. 対応点探索手法

光本らの手法を用いて2枚の魚眼画像から対応点 を求める.ただし、本論文では誤対応点を除去する ために、抽出した特徴点間のユークリッド距離が一 定の範囲内にある場合のみ対応点とする.また、連 続した画像間で順次対応点を求める方法を導入する. 処理を以下に示す.画像がN枚あるとし、対応点を 求めたい画像をimg_iとimg_{i+1}とする.

- img_{i-1}とimg_iから得られた対応点を記録
- img_iとimg_{i+1}のそれぞれで特徴点を抽出
- (3) (2)で抽出した img_iの特徴点位置のうち,(1)
 で記録した img_iの特徴点位置と一致しない
 ものを除外
- (4) (3)の処理で残った img_iの特徴点と img_{i+1}の特 徴点の対応点を探索
- (5) (4)で得られた対応点で、特徴点間のユークリッド距離がしきい値より大きいものを誤対応とみなし除去
- (6) (1)~(5)の処理を繰り返し、N枚の画像において特徴点を追跡

以上の処理で残った,1枚目及びN枚目の画像に おける特徴点を用いて対応点探索を行う.

特徴点抽出には画像のスケール変化や回転に不変な AKAZE 特徴量[4]を用いる.

4. 実験

図3の魚眼カメラを移動ロボット(Pioneer, P3-AT) に搭載し,屋外での3次元環境の復元実験を行った. 対応点探索にN枚の画像を用いる場合,2枚の画像 のみを用いる場合(光本らの手法に対応)での結果 を比較する.

4.1. 実験環境

本実験では,魚眼レンズに SPACE 社の TV1634 を,カメラに Point Grey Research 社の Dragonfly2 (1024[pixel]×768[pixel])を利用し,移動ロボットに Pioneer 社の P3-AT を利用した.内部パラメータは 表1に示したものを用いた.

実験環境を撮影した魚眼画像の一例を図 4 に示 す.カメラ座標は図 5 の通りである.図 3 のような 魚眼カメラを搭載した移動ロボットを,カメラの光 軸方向である Z 軸方向に並進移動させ撮影を行っ た.基線長が 60[cm]となるまで 10[cm]毎に撮影し た (N=7).



図3魚眼カメラを搭載した移動ロボット



図4 実験環境の魚眼画像



表1内部パラメータI

a_0	-4.040×10^{2}
a_1	0.000
a_2	9.484×10^{-4}
<i>a</i> ₃	-4.681×10^{-7}
a_4	1.288×10^{-9}
<i>u</i> ₀	5.515×10^{2}
v ₀	3.829×10^{2}

4.1.1.2 枚の画像を用いた場合の実験結果

図 6(a)及び(b)はそれぞれ 基線長 60[cm]で撮影し た 3 次元復元結果の正面図と俯瞰図であり,図 7 は テクスチャマッピングを行った結果である.図 6(a)、 (b)より,計測環境は概ね復元ができていることが分 かる.しかし,復元結果にはいくつかの外れ値が存 在している.これらの主な原因として以下の 2 点が 挙げられる.1 点目は除去しきれなかった誤対応点, 2 点目は歪みが大きい箇所の特徴点である.これら の影響により,一部の領域でテクスチャの貼り付け に失敗した.

表 2 にカメラの運動の各成分の推定結果を示す. $T = \begin{bmatrix} T_x & T_y & T_z \end{bmatrix}^T$ (ただし $\|T\| = 1$ に正規化)はカメラの 並進運動を, a, β , γ は X, Y, Z軸回りの回転を表 す. 真値は $T_x = 1$, $T_y = T_z = 0$, $\alpha = \beta = \gamma = 0$ である. 表 2 よりカメラの運動は正確に推定できていること が分かる.

また,表2のいずれの基線長においても真値に近い値となっているものの,運動成分の推定精度は基線長の長さで異なる.この理由としては以下の2点が考えられる,1点目は除去しきれなかった誤対応点,2点目は基線長が短いほど視差が小さく精度が悪くなることが考えられる.

4.1.2. 複数画像を用いた場合の実験結果

図 8(a)及び(b)に3次元復元結果の正面図と俯瞰図 を示す.図 8(a),(b)より,計測環境は概ね復元でき ていることが分かる.しかし,4.1.1項の結果と同様 に外れ値が存在する.また,視差の小さい対応点が 多い領域ではテクスチャの貼り付けが失敗している. そこで視差が小さい箇所が多く現れる画像中心付近 の点を除去し、テクスチャマッピングを行った.画 像中心から 120[pixel]以内の距離にある特徴点を除 去することとした.テクスチャマッピングを行った 結果を図9に示す.画像中心付近の点を除去するこ とにより、テクスチャの貼り付けに失敗する領域は 減ったが、一部の領域では貼り付けに失敗している. この原因として 4.1.1 項で述べた誤対応点と歪みの 大きい箇所が挙げられる.

表3に推定されたカメラ運動の各成分の結果を示 す.各成分は 4.1.1 項で述べたものと同様である. 表3より,カメラの運動は正確に推定できているこ とが分かる.

また,4.1.1 項と同じ移動距離である 60[cm]で、2 枚の画像だけで対応点探索した場合の結果と比較す る.図 6,8より,複数画像の場合の方が特徴点数が 増え,誤対応点の数も減っていることがみてとれる. しかし,視差の小さい対応点も多くなっていること が分かった.推定されたカメラの運動はどちらの場 合でも概ね正しい推定値が得られた.

以上の結果から3次元復元の際のカメラの運動が 正確に推定されていることが検証され,また推定精 度は誤対応点数,基線長に影響されることが確認で きた.

5. 結論

本論文では,魚眼カメラを用いた SfM による 3次 元環境復元を行い,カメラの運動の精度を検証した. 実験により,カメラの運動は正確に推定されている ことが確認された.今後の展望としては,外れ値の 除去,歪みの大きい箇所の点の復元精度の向上を図 る.

文 献

- [1] 石井純平,酒井修二,伊藤康一,青木孝文,安 藤敏之,柳拓良:"車載魚眼カメラを用いた走 行環境の3次元復元の検討",第15回画像認 識・理解シンポジウム論文集, IS3-35、(2012)
- [2] 光本尚訓, 寺林賢司, 新垣洋平, 下村倫子, 梅田和昇: "魚眼カメラを用いた Structure From Motion による 3D 環境計測", 第 14 回ロボティクスシンポ ジア予稿集, pp.71-76 (2009)
- [3] D. Scaramuzza, A. Maritinelli, and R. Siegwart: "A Toolbox for Easily Calibrating Omnidirectional Cameras," Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2006), pp.5695-5701 (2006)
- [4] P.F. Alcantarilla, J. Nuevo, and A. Bartoli : "Fast Explicit Diffusion for Accelerated Features in Nonlinear Scale Spaces," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 34, 7, pp.1281-1298 (2011)







()...

図 63 次元復元結果(2 枚)



図7 テクスチャマッピング結果(2枚)

表	2	推定	された	力;	メラ	の運動	(2枚)
---	---	----	-----	----	----	-----	------







図 83 次元復元結果(複数枚)



図9テクスチャマッピング結果(複数枚)

衣う 推正されに ルメフの 理動(復 剱	(複数枚))運動	ラの	メ	たカ	され	推定	表 3	
-----------------------	-------	-----	----	---	----	----	----	-----	--

	真値	20[cm]	40[cm]	60[cm]		真値	推定值
T_x	0.000	0.264	0.152	0.073	T_x	0.000	0.081
T_y	0.000	-0.138	0.020	0.013	T_y	0.000	0.012
T_z	1.000	0.954	0.988	0.997	T_z	1.000	0.996
α [rad]	0.0000	0.0029	-0.0024	-0.0019	α [rad]	0.0000	-0.0012
β [rad]	0.0000	-0.0055	0.0004	0.0037	β [rad]	0.0000	0.0025
γ [rad]	0.0000	0.0017	0.0010	0.0039	γ [rad]	0.0000	0.0038