

基于投影矩阵的空间非合作目标三维重建

张丕辉¹, 宁 昕¹, 杨旭海²

(1. 西北工业大学航天学院, 西安 710072; 2. 中国科学院国家授时中心, 西安 710072)

摘 要:针对从摄像机运动恢复结构算法(structure from motion algorithm, SFM)重建结果精度低以及面片重建算法(patch-based multiview stereo, PMVS)计算时间长的缺点, 提出1种基于投影矩阵空间非合作目标三维重建算法。首先采用针孔模型对三维空间点到二维图像像素点投影关系进行理论推导, 然后利用对极几何约束原理求解出旋转矩阵和平移矩阵; 再由投影矩阵, 解算三维空间点坐标; 最后结合精密可控转台, 搭载双目相机进行仿真实验。仿真实验结果表明, 与 SFM 算法和 PMVS 对比, 重建结果点云个数分别增加了 22 倍和 9 倍, 所需时间分别减少了 5s 和 97s; 验证该算法的高可靠性、高重建精度和强实时性。

关键词:运动恢复结构算法; 三维重建; 基于面片的重建技术; 投影矩阵; 点云

中图分类号: TP242.6

文献标志码: A

文章编号: 2095-2783(2017)20-2320-06

Non-cooperative space target 3D reconstruction based on projection matrix

ZHANG Pihui¹, NING Xin¹, YANG Xuhai²

(1. School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. National Time Service Center, Chinese Academy of Science, Xi'an 710072, China)

Abstract: In video processing, the reconstruction precision of structure from motion (SFM) algorithm is low; meanwhile, the reconstruction process of patch-based multiview stereo (PMVS) technology is too complex and time-consuming. A 3D reconstruction algorithm based on projection matrix is proposed. Firstly, based on the principle of pinhole, deduces the projection between 3D point and image pixels in theory. Then by utilizing the principle of geometric constraints, to solve the rotation matrix and translation matrix. And then uses the projection matrix to solve the 3D point coordinates. Finally, combining with precision controlled turntable with binocular camera make a simulation experiment. Compared with the SFM and PMVS, the number of reconstruction points result has been increased by 22 times and 9 times, and the time has been reduced by 5 seconds and 97 seconds to verify the algorithm's strong real-time performance and high reliability and high reconstruction accuracy.

Keywords: structure from motion algorithm(SFM); 3D reconstruction; patch-based multiview stereo(PMVS); projection matrix; point cloud

随着航天技术的发展,人类对外太空资源的探索和开发越来越深入。航天器发生故障、失效或完成任务后被抛弃,将在空间自由漂浮,即成为太空垃圾。因此,以传统航天器的在轨维护^[1]、失效卫星清理^[2]、空间碎片清理^[3]、太空攻防^[4]等为目的的空间非合作目标捕获技术^[5]成为了空间机器人领域新的发展方向。而获取目标的准确位置信息是实现对其进行检测、逼近、交会对接及维修等操作的前提。因此,采用空间非合作目标三维重建技术^[6-7]来获取目标三维信息显得尤为重要。

目前,国内外学者围绕空间非合作目标三维重建已经开展了相关研究工作。Tomasì 等^[8]提出摄影重建方法,核心思想是利用因式分解法,从 2 张图像恢复出场景的几何结构和摄像机运动信息。Faugera^[9]提出采用不同的几何约束信息,将射影重建转化为欧氏空间的度量重建,但此方法仅适用于

各种几何条件约束下的对象,且要求存在射影重建。Pollefeys^[10]给出了更为普遍的方法,在摄像机的焦距长度变化情况下,用参数范围内自动缩放方法来实现度量重建。Longuet-Higgins 提出摄像机运动中恢复三维结构(structure from motion, SFM)^[11-13],主要思想是利用特征点检测及计算机几何约束关系等关键技术,计算出摄像机的内部参数及摄像机的方向、位置等信息,再重建出场景的三维结构模型。Furukawa 等^[14-15]提出基于面片的三维多视角立体视觉算法(patch-based multi-view stereo, PMVS),其思想主要分为 3 个部分:初始化特征点匹配^[16]、面片生成扩展、面片筛选。上述方法是基于三角测量法^[17]对空间点坐标进行求解,该求解过程计算耗时长,不能满足空间操作的实时性^[18]要求。

收稿日期: 2017-10-09

基金项目: 西北工业大学研究生创新创业种子基金资助项目(Z2017077); 中国科学院国家授时中心“科创计划”项目基金资助项目(Z20160240002)

第一作者: 张丕辉(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向为图像处理、计算机视觉、三维重建

通信作者: 宁昕,副教授,主要研究方向为复杂空间系统设计、空间非合作目标视觉测量与三维重建,ningxin@nwpu.edu.cn

1 三维空间点坐标求解原理

对于空间任意点 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ (图 1), 在摄像机上的投影图像坐标分别为 p_1, p_2 。

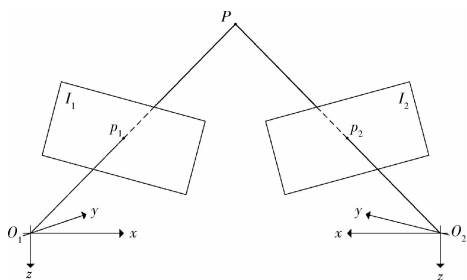


图 1 双目立体视觉数学模型

我们选取其中 1 个摄像机进行成像分析, 采用针孔模型对这种映射进行建模(图 2)。相机坐标系为 $O-X_c-Y_c-Z_c$, 三维空间点坐标为 $P(X, Y, Z)^T$, 成像点坐标为 $p(x, y)^T$, 图像坐标系为 $o-x-y$ 。从图中可以看出, 三维空间点坐标 $P(X, Y, Z)^T$ 和成像点坐标 $p(x, y)^T$ 存在相似三角形关系。

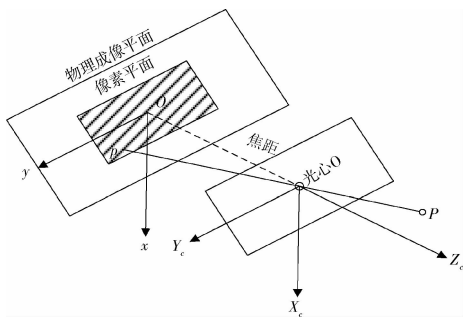


图 2 三维空间点投影到图像平面模型

根据相似三角形, 有:

$$\frac{Z}{f} = \frac{X}{x} = \frac{Y}{y} \quad (1)$$

整理得:

$$\begin{cases} x = f \frac{X}{Z} \\ y = f \frac{Y}{Z} \end{cases}$$

由于二维图像平面的坐标都是以像素形式表示, 此时我们引入像素坐标系。在成像平面固定着 1 个像素平面 $o-u-v$ 。设像素坐标在 u 轴上放大 α 倍, 在 v 轴上缩放了 β 倍, 同时原点平移了 $(u_0, v_0)^T$ (图 3)。

$p(x, y)^T$ 与像素坐标 $(u, v)^T$ 的关系为

$$\begin{cases} u = \alpha x + u_0 \\ v = \beta y + v_0 \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)中, 并把 αf 合并成 f_x , 把 βf 合并成 f_y , 得:

$$\begin{cases} u = f_x \frac{X}{Z} + u_0 \\ v = f_y \frac{Y}{Z} + v_0 \end{cases} \quad (4)$$

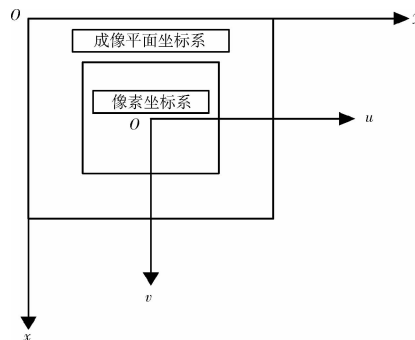


图 3 物理成像坐标系和像素坐标系的关系

式中: f 的单位为 m; α, β 的单位为 像素/m; f_x, f_y 单位为 像素。把式(4)写成矩阵形式:

$$\mathbf{Z} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 1 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \triangleq \mathbf{K} \mathbf{P} \quad (5)$$

式中: \mathbf{K} 为摄像机内参矩阵。此时, 把左摄像机系当作世界坐标系, 则右摄像机坐标系与左摄像机坐标系存在 1 个旋转和平移关系。

所以如何求解出这个旋转和平移关系成了求解三维空间点坐标的关键。在此, 可以采用对极几何约束对其进行求解(图 4)。从 2 张图像中找到了 1 对配对好的特征点 p_1, p_2 , 右图像与左图像存在的旋转关系和平移关系分别用 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 表示。2 个相机中心分别为 O_1, O_2 , 平面 $O_1 O_2 P$ 为极平面。

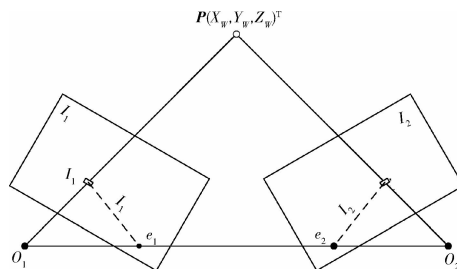


图 4 对极几何约束

根据式(5), 有:

$$\begin{cases} \mathbf{Z} \mathbf{p}_1 = \mathbf{K} \mathbf{P} \\ \mathbf{Z} \mathbf{p}_2 = \mathbf{K} (\mathbf{R} \mathbf{P} + \mathbf{T}) \end{cases} \quad (6)$$

采用齐次坐标, 把上式写成在非零常数下成立的等式:

$$\begin{cases} \mathbf{p}_1 = \mathbf{K} \mathbf{P} \\ \mathbf{p}_2 = \mathbf{K} (\mathbf{R} \mathbf{P} + \mathbf{T}) \end{cases} \quad (7)$$

取:

$$\mathbf{x}_1 = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{p}_1, \mathbf{x}_2 = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{p}_2 \quad (8)$$

$\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$ 是 2 个像素点的归一化平面上的坐标。代入式(7), 得:

$$\mathbf{x}_2 = \mathbf{R} \mathbf{x}_1 + \mathbf{T} \quad (9)$$

两边同时左乘 \mathbf{T}^T , 相当于两侧同时与 \mathbf{T} 做外积:

$$\mathbf{T}^T \mathbf{x}_2 = \mathbf{T}^T \mathbf{R} \mathbf{x}_1 \quad (10)$$

再同时左乘 x_2^T :

$$x_2^T T x_2 = x_2^T T R x_1. \quad (11)$$

观察等式左侧, $T x_2$ 是1个与 T 和 x_2 都垂直的向量。把它再与 x_2 做内积时, 得到0。

$$x_2^T T R x_1 = 0. \quad (12)$$

重新代入 p_1, p_2 , 有:

$$p_2^T K^{-T} T R K^{-1} p_1 = 0. \quad (13)$$

所以可以通过配对点的像素位置求解出 R 和 T 。

求解出 R 和 T 后, 再构造投影矩阵。根据相机坐标系与像素坐标系的关系, 设投影矩阵分别为 N_1, N_2 。将左摄像机坐标系看为世界坐标系, 则左、右两幅图像投影关系如下:

$$\begin{cases} N_1 = K_1 (I/0) \\ N_2 = K_2 (R/T) \end{cases} \quad (14)$$

式中: I 是 3×3 单位矩阵; R 为旋转矩阵; T 为平移矩阵。 K_1, K_2 分别是左右摄像机内参数。根据式(13), 已经求得 R 和 T 。

$$\text{设 } R = \begin{bmatrix} r_{i,11} & r_{i,12} & r_{i,13} \\ r_{i,21} & r_{i,22} & r_{i,23} \\ r_{i,31} & r_{i,32} & r_{i,33} \end{bmatrix}, T = [T_{i,x} \ T_{i,y} \ T_{i,z}]^T$$

$$\begin{cases} Z \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{i,u} & 0 & u_0 \\ 0 & f_{i,v} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{i,11} & r_{i,12} & r_{i,13} & T_{i,x} \\ r_{i,21} & r_{i,22} & r_{i,23} & T_{i,y} \\ r_{i,31} & r_{i,32} & r_{i,33} & T_{i,z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \\ Z \begin{bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{i+1,u} & 0 & u_0 \\ 0 & f_{i+1,v} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{i+1,11} & r_{i+1,12} & r_{i+1,13} & T_{i+1,x} \\ r_{i+1,21} & r_{i+1,22} & r_{i+1,23} & T_{i+1,y} \\ r_{i+1,31} & r_{i+1,32} & r_{i+1,33} & T_{i+1,z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (18)$$

$$\text{其中: } K_i = \begin{bmatrix} f_{i,u} & 0 & u_0 \\ 0 & f_{i,v} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; K_{i+1} = \begin{bmatrix} f_{i+1,u} & 0 & u_0 \\ 0 & f_{i+1,v} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

整理得:

$$\begin{cases} Z \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{i,u}(r_{i,11}X_w + r_{i,12}Y_w + r_{i,13}Z_w + T_{i,x}) + u_0(r_{i,31}X_w + r_{i,32}Y_w + r_{i,33}Z_w + T_{i,z}) \\ f_{i,v}(r_{i,21}X_w + r_{i,22}Y_w + r_{i,23}Z_w + T_{i,y}) + v_0(r_{i,31}X_w + r_{i,32}Y_w + r_{i,33}Z_w + T_{i,z}) \\ r_{i,31}X_w + r_{i,32}Y_w + r_{i,33}Z_w + T_{i,z} \end{bmatrix} \\ Z \begin{bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{i+1,u}(r_{i+1,11}X_w + r_{i+1,12}Y_w + r_{i+1,13}Z_w + T_{i+1,x}) + u_0(r_{i+1,31}X_w + r_{i+1,32}Y_w + r_{i+1,33}Z_w + T_{i+1,z}) \\ f_{i+1,v}(r_{i+1,21}X_w + r_{i+1,22}Y_w + r_{i+1,23}Z_w + T_{i+1,y}) + v_0(r_{i+1,31}X_w + r_{i+1,32}Y_w + r_{i+1,33}Z_w + T_{i+1,z}) \\ r_{i+1,31}X_w + r_{i+1,32}Y_w + r_{i+1,33}Z_w + T_{i+1,z} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (19)$$

消去 Z , 得

$$A \cdot \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = B. \quad (20)$$

$$A = \begin{bmatrix} f_{i,u}r_{i,11} + u_0r_{i,31} + r_{i,31}x_i & f_{i,u}r_{i,12} + u_0r_{i,31} + r_{i,32}x_i & f_{i,u}r_{i,13} + u_0r_{i,33} + r_{i,33}x_i \\ f_{i,v}r_{i,21} + v_0r_{i,31} + r_{i,31}y_i & f_{i,v}r_{i,22} + v_0r_{i,32} + r_{i,32}y_i & f_{i,v}r_{i,23} + v_0r_{i,33} + r_{i,33}y_i \\ f_{i+1,u}r_{i+1,11} + u_0r_{i+1,31} + r_{i+1,31}x_{i+1} & f_{i+1,u}r_{i+1,12} + u_0r_{i+1,32} + r_{i+1,32}x_{i+1} & f_{i+1,u}r_{i+1,13} + u_0r_{i+1,33} + r_{i+1,33}x_{i+1} \\ f_{i+1,v}r_{i+1,21} + v_0r_{i+1,31} + r_{i+1,31}y_{i+1} & f_{i+1,v}r_{i+1,22} + v_0r_{i+1,32} + r_{i+1,32}y_{i+1} & f_{i+1,v}r_{i+1,23} + v_0r_{i+1,33} + r_{i+1,33}y_{i+1} \end{bmatrix},$$

根据式(14), 便可以求出 N_1, N_2 。

根据式(6), 世界坐标系投影到像素坐标系有如下的关系:

$$\begin{cases} Zp_1 = N_1 \cdot P \\ Zp_2 = N_2 \cdot P \end{cases} \quad (15)$$

式中景深信息 Z 相同。像素坐标 p_1, p_2 在像素坐标系中已知, N_1, N_2 已经由式(14)求出。所以三维空间点 $P(X_w, Y_w, Z_w)^T$ 也便可以求出。

将此算法推广到任意的第 i 个点和第 $i+1$ 个点。根据式(14), 则有:

$$\begin{cases} N_i = K_i (R_i/T_i) \\ N_{i+1} = K_{i+1} (R_{i+1}/T_{i+1}) \end{cases} \quad (16)$$

将式(16)代入式(15), 得:

$$\begin{cases} Zp_i = N_i \cdot P \\ Zp_{i+1} = N_{i+1} \cdot P \end{cases} \quad (17)$$

展开得:

其中 A, B 的表达式如下:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} (x_i - f_{i,u} - u_0) T_{i,z} \\ (y_i - f_{i,u} - v_0) T_{i,z} \\ (x_{i+1} - f_{i+1,u} - u_0) T_{i+1,z} \\ (y_{i+1} - f_{i+1,u} - v_0) T_{i+1,z} \end{bmatrix},$$

因此可得

$$[X_w, Y_w, Z_w] = \mathbf{B} \mathbf{A}^{-1}.$$

根据式(21),任意二维像素特征点所对应的三维空间点坐标 $\mathbf{P}(X_w, Y_w, Z_w)^T$ 便可以求出来。

2 三维重建仿真实验

将卫星模型放在精密可控转台上,可控转台转速控制在 $3^\circ/\text{s}$ 。然后用双目相机对卫星模型进行成像,选取左、右摄像机的第 1 帧(图 5)作为 3 维重建系统的输入,重建结果作为输出。并且我们采用相同的图像特征点提取^[19-20]、特征点匹配^[21-22]、深度信息获取^[23-24]算法。

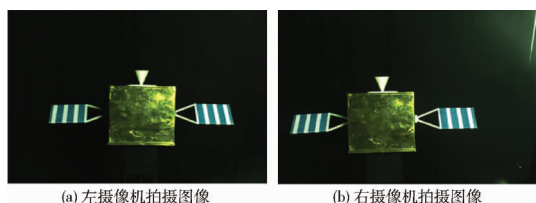


图 5 左右摄像机第 1 帧图像

2.1 基于场景结构和摄像机运动的恢复三维重建(SFM)

SFM 是通过多视图几何中的三角测量原理来计算三维空间点坐标。首先从不同角度观察到同一目标的同一特征点,再根据三角定位建立起图像特征点的匹配对信息,最后计算三维点坐标。应用 SFM 算法对其进行三维重建,最后在 MATLAB 中显示的点云个数是 19 636 个,重建所需时间是 20 s。选取 2 个不同视角的结果。

从图 6 和图 7 中可以看出,重建出来的点云结果看起来很稀疏,存在很大的“洞”。使最终的重建结果包含的信息很少,重建精度不高。

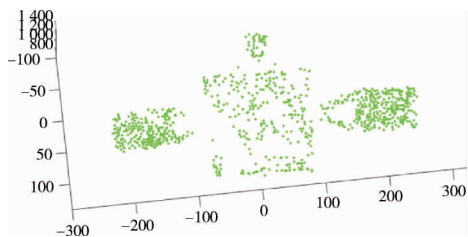


图 6 SFM 三维重建视图 1

2.2 基于面片的多视角三维重建(PMVS)

由于该算法的点云是由稀疏点云扩展得到的。所以可以在 SFM 算法重建的基础上进行点云扩展,最后在 MATLAB 中显示的点云个数是 43 019 个,重建所需时间是 112 s。选取 2 个不同视角的 3 维点

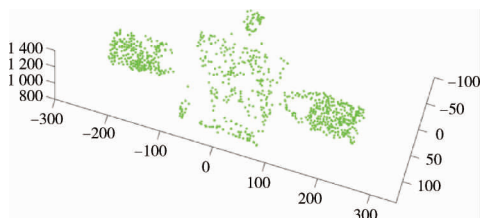


图 7 SFM 三维重建视图 2

云结果。

从图 8 和图 9 可以看出,与 SFM 算法相比,点云数量明显增多,但由于是在稀疏点云的基础上扩展得到的,致使重建时间增加。不能满足空间非合作目标三维重建的实时性要求。

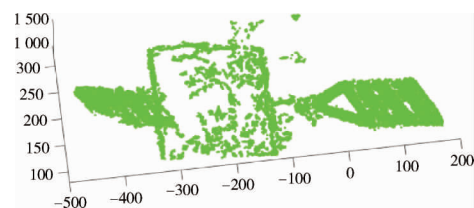


图 8 PMVS 三维重建视图 1

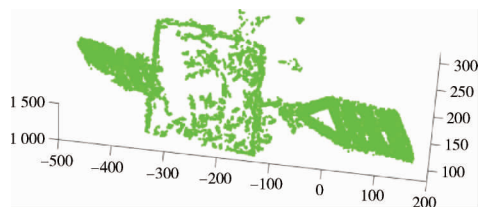


图 9 PMVS 三维重建视图 2

2.3 基于投影矩阵三维重建

根据本文提出的算法对卫星图像三维空间点坐标进行解算,最后在 MATLAB 中显示的点云个数是 458 048 个,重建所需时间是 15 s。同样选取 2 个不同视角的三维点云结果。

从最后的重建结果图 10 和图 11 可以看出,重建出来的结果相对 SFM 算法重建出来的结果,得到的点云个数明显增多,并且不存在那么多的误差点和空洞状态,重建出来的结果表面信息完整,重建精度更高;相比于 PMVS 算法重建结果,本文算法重建所需的时间远远小于 PMVS 算法重建所需时间,大大地提高了三维重建的时效性。

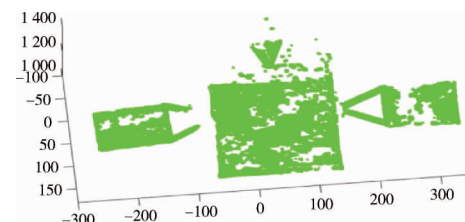


图 10 基于投影矩阵重建结果视图 1

最后再对 3 维点云添加纹理信息,得到结果如

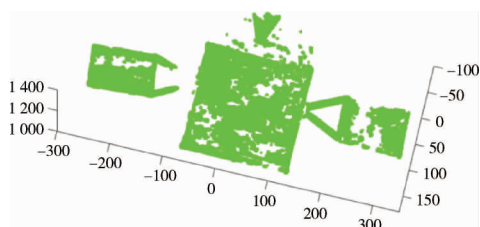


图 11 基于投影矩阵重建结果视图 2

图 12。从结果中看,重建结果与输入图像反映的信息也很相似。

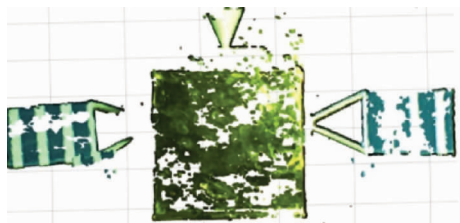


图 12 基于投影矩阵重建结果

3 重建结果分析对比

通过对 SFM 算法、PMVS 算法和本文算法进行实验,分别得到不同的重建结果。本文分别对重建结果点云个数和重建所需时间做统计,采用三维重建精度和算法实时性两项指标对上述 3 种结果做算法性能检验,最后从算法原理上对产生的结果进行分析。

从图 13 可以看出,本文算法重建结果点云个数是 PMVS 算法得到点云个数的 10 倍,是 SFM 算法得到点云个数的 23 倍。再对应到重建结果上,能看到图 10 和图 11 表面信息更完善,说明本文算法得到的重建结果精度更高。并且本文算法所需要的时间比 SFM、PMVS 两者算法所需时间都要少,说明本文算法实时性更强。

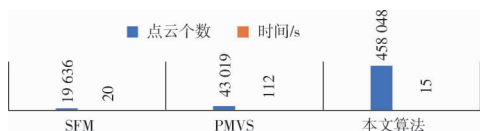


图 13 SFM、PMVS、本文算法实验结果对比

产生上述的结果的根本原因在于 SFM 算法是通过对图像特征点进行匹配,再进行三维空间点坐标解算。其本质是对初始图像三角定位,需要特定的配准点。如果配准点数目较少时,计算出来的三维点数也会相应的减少,不能真实准确地反应 3 维空间场景目标。基于面片的多视角 3 维重建技术 (PMVS),尽管能得到稠密点云,重建精度有所提升。但由于稀疏点云扩展到稠密点云时需要使用大量网格计算等,给重建过程增加了很大的计算量,使得重建时间长。同时在扩展过程中容易出现误差点,致使最后重建精度降低。由于本文算法能够满足对任

意图像配准点 i 和 $i+1$ 重建,这其实相当于 1 个扩展过程,所以最后得到的点云个数会增加。但这个扩展只是简单的数学计算,不会增加重建时间。

4 结 论

从仿真实验结果来看,本文提出的基于投影矩阵空间非合作目标三维重建方法,能够有效地得到密集点云,使三维重建精度增加,更加精确地描述三维空间场景的特征。在算法实时性上,尽管时间相比于 SFM 算法和 PMVS 算法都有所减少,但是仍需要 15 s,对于高速运动的空间目标还存在一定得缺陷,仍存在改进的空间。因此,如何在保证高重建精度的前提下缩短重建时间,将是未来研究工作的 1 个重点。

[参考文献] (References)

- [1] SWARTWOUT M, MACKE J, BENNETT K, et al. The Bandit: An automated vision-navigated inspector spacecraft [C]// Logan, Utah: Proceeding of the 17th AIAA/USU Conference on Small Satellitess, 2007.
- [2] 李于衡, 杨开忠, 单长胜, 等. 地球同步轨道废弃卫星清理方法初步研究[J]. 中国科学:技术科学, 2011(2): 205-212.
LI Yuheng, YANG Kaizhong, SHAN Changsheng, et al. Preliminary study on methods of cleaning satellites in geostationary grbit [J]. Science China : Science Technical, 2011(2): 205-212. (in Chinese)
- [3] 孙志兵, 梁建烈, 张荣之. 空间碎片清理方式与总体思路[J]. 广西民族大学学报(自然科学版), 2017, 23(1): 55-59.
SUN Zhibing, LIANG Jianlie, ZHANG Rongzhi. Space debris clearance method and general idea [J]. Journal of Guangxi University for Nationalities(Natural Science Edition), 2017, 23(1): 55-59. (in Chinese)
- [4] 韩洪涛, 王友利. 国外空间攻防能力现状与趋势分析[J]. 中国航天, 2015(9): 21-25.
HAN Hongtao, WANG Youli. Present situation and trend of space attack and defense capability abroad [J]. China Aerospace Science and Technology Corporation, 2015(9): 21-25. (in Chinese)
- [5] 任宇琪. 面向空间非合作目标捕获的位姿测量方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
REN Yuqi. Research on pose estimation methods of non-cooperative space objects towards space grapple applications [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [6] ZHANG Y K. Method of scattering centers association and 3D reconstruction for non-cooperative radar target [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(9): 2076-2082.
- [7] IZADI S, NEMCOMBE R A, KIM D, et al. Kinectfusion: real-time dynamic 3d surface reconstruction and interaction [C]// ACM SIGGRAPH 2011 Talks. [S. l.] ACM, 2011: 23.

- [8] TOMASI C, KANADE T. Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2002, 9 (2): 137-154.
- [9] FAUGERA O D. What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig [C]// *European Conference on Computer Vision*. [S. l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2002: 563-578.
- [10] POLLEFEYS M, GOOL L V, VERGAUWEN M, et al. Visual modeling with a hand-held camera [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 59 (3): 207-232.
- [11] LONGUST-HIGGINS H C. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections [J]. *Nature*, 1981, 293(5828): 133-135.
- [12] SINHA S N, STEEDLY D, SZELISKI R. A multi-stage linear approach to structure from motion [M]// *Trends and Topics in Computer Vision*. [S. l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2012: 267-281.
- [13] SNAVELY N, SEITZ S M, SZELISKI R. Skeletal graphs for efficient structure from motion [C]// *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2008. CVPR 2008. New York: IEEE Conference on. IEEE, 2008: 1-8.
- [14] FURUKAWA Y, PONCE J. Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2010, 32(8): 1362-1376.
- [15] FURUAWA Y, PONCE J. Accurate camera calibration from multi-view stereo and bundle adjustment [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2009, 84(3): 257-268.
- [16] 胡明昊, 任明武. 一种快速实用的特征点匹配算法[J]. *计算机工程*, 2004, 30(9): 31-33.
- HU Minghao, REN Mingwu. A fast practical method for console point matching [J]. *Computer Engineering*, 2004, 30(9): 31-33. (in Chinese)
- [17] YAOWEN L V, XIPING X U. Structural parameters design of binocular vision measuring system [J]. *Opto-electronic Technology*, 2016, (2): 13-19.
- [18] LIN Zhixin. Space robot [J]. *Robot Technology and Application*, 2005(4): 48-54.
- [19] ZHANG G, ZENG Z, ZHANG S, et al. SIFT matching with CNN evidences for particular object retrieval [J]. *Neurocomputing*, 2017(238): 399-409.
- [20] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant key-points [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [21] GU H, CHEN G, CAO W. Image match algorithm based on feature point with bidirectional threshold [C]// *International Conference on Neural Networks and Brain*. New York: IEEE, 2005: 1464-1468.
- [22] 周秀芝, 王润生. 自适应窗口快速立体匹配[J]. *计算机学报*, 2006, 29(3): 473-479.
- ZHOU Xiuzhi, WANG Runsheng. Fast stereo matching using adaptive window [J]. *Chinese Journal of Computer*, 2006, 29(3): 473-479. (in Chinese)
- [23] XU K, ZHOU J, WANG Z. A method of hole-filling for the depth map generated by Kinect with moving objects detection [C]// *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*. New York: IEEE, 2012: 1-5.
- [24] IZADI S, IM D, HILLIGES O, et al. KinectFusion: real-time 3D reconstruction and interaction using a moving depth camera [C]// *ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. New York: ACM, 2011: 559-568.