

引文格式:邓非,吴幼丝,胡玉雷,等.球形全景影像位姿估计的改进 EPnP 算法[J].测绘学报,2016,45(6):677-684. DOI:10.11947/j. AGCS.2016.20150411.

DENG Fei, WU Yousi, HU Yulei, et al. Position and Pose Estimation of Spherical Panoramic Image with Improved EPnP Algorithm[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(6): 677-684. DOI: 10.11947/j. AGCS.2016.20150411.

球形全景影像位姿估计的改进 EPnP 算法

邓 非^{1,2}, 吴幼丝¹, 胡玉雷³, 崔红霞⁴

1. 武汉大学测绘学院, 湖北 武汉 430079; 2. 武汉大学国家领土主权与海洋权益协同创新中心, 湖北 武汉 430079; 3. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063; 4. 渤海大学信息科学与技术学院, 辽宁 锦州 121013

Position and Pose Estimation of Spherical Panoramic Image with Improved EPnP Algorithm

DENG Fei^{1,2}, WU Yousi¹, HU Yulei³, CUI Hongxia⁴

1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Collaborative Innovation Center for Territorial Sovereignty and Maritime Rights, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 3. China Railway Siyuan Survey and Design Group CO., LTD., Wuhan 430063, China; 4. School of Information Science and Technology, Bohai University, Jinzhou 121013, China

Abstract: Spherical panoramic imaging can overcome the limitations of perspective imaging's range of view and achieve three-dimensional reconstruction and measurement with full coverage. The EPnP (efficient perspective-n-point) algorithm fit for ordinary image's position and pose estimation is improved and extended by this paper to put forward a robust and fast method to estimate spherical panoramic image's position and pose. Firstly, we construct the projection model of spherical panoramic image to extend the perspective plane imaging model of EPnP algorithm to the spherical imaging model; then with the improved EPnP algorithm basing on the condition equation that panoramic sphere center, image point and control point are collinear, we obtain the control points' coordinates in spherical panoramic image space; finally, we solve the spherical panoramic image's position and pose directly with the Horn absolute positioning algorithm. Compared with the position and pose estimation method of spherical panoramic image with the resection algorithm, the experiment results show that the method proposed in this paper can achieve higher robustness, higher efficiency without going through an iterative solution, and it can also achieve high accuracy with a few control points. Based on the panoramic camera stitching with non-strict center, the reprojection error can be controlled around 3.00 pixel level.

Key words: spherical panoramic image; position and pose estimation; EPnP (efficient perspective-n-point) algorithm

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (No. 41271431)

摘 要: 球形全景成像可以克服透视成像视场角的局限, 实现场景全覆盖的三维重建和量测。本文在普通影像位姿估计的 EPnP (efficient perspective-n-point) 算法上进行了改进和扩展, 提出了一种稳健快速的球形全景影像位姿估计算法。首先, 构建球形全景影像的投影模型, 将 EPnP 算法的平面透视成像模型扩展到球面成像模型; 然后, 采用基于全景球心、像点、控制点共线条件方程的改进 EPnP 算法求解控制点的球形全景像空间坐标; 最后, 利用 Horn 绝对定位算法直接解算全景影像位姿。与球形全景影像位姿估计的后方交会算法的对比试验结果表明, 本文提出的方法无须迭代求解, 更为稳健快速, 即使控制点数目较少也能达到高精度, 基于非严格共中心拼接的全景相机, 重投影误差可控制在 3.00 像素左右。

关键词:球形全景影像;位姿估计;EPnP(efficient perspective-n-point)算法

中图分类号:P232

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2016)06-0677-08

基金项目:国家自然科学基金(41271431)

球形全景影像是多台相机通过对 360° 拍摄的影像进行拼接,形成长方形影像,并投影到球面形成的,可视为以球心为投影中心、半径为焦距、球面为成像面、视场角为 360° 的虚拟相机拍摄的影像,其位姿估计解求的是类似相机位姿估计的旋转矩阵和平移向量。球形全景影像可全方位地体现场景细节信息,具有场景全覆盖的优势,在街景地图导航服务、景观地图^[1]、月球车巡视探测^[2]、虚拟现实以及移动机器人视觉^[3-5]等领域都有广泛应用。

针对全景影像的研究主要集中在如何实现相机检校^[6]、影像拼接缝合^[7-10]和影像匹配^[11-12]方面,关于球形全景影像位姿估计和三维重建的研究仍处于起步阶段,其中文献^[11]利用 GPS/IMU 提供的位姿初值进行球形全景影像序列光束法区域网平差,解算球形全景影像位姿;文献^[13-14]提出了基于相对定向-绝对定向、双球面投影几何的可量测球形立体全景模型,进行球形全景影像位姿估计和三维量测;文献^[15]提出了一种针对高噪声环境的蒙特卡罗解法,基于已知地理参考影像实现地面车载全景影像序列的精确定位;文献^[16]深入比较了多镜头组合型全景相机的严格成像模型和理想成像模型之间位姿估计和定位精度的差异;文献^[17]针对全景相机和定位定姿系统(POS)集成的车载移动测图系统,提出一种外方位元素标定的方法。

上述球形全景影像位姿估计方法大多需要 GPS/IMU 提供已知的位姿数据,增加了数据采集的成本和复杂性;或者需要进行迭代,虽精度高,但位姿解算精度容易受到迭代初值的影响,算法效率低,鲁棒性差。为解决这个问题,本文引入了 Lepetit 和 Moreno 提出的透视成像摄像机高精度快速位姿估计算法 EPnP (efficient perspective-n-point)^[18],其核心思想是将 n ($n \geq 4$) 个物方点表示为 4 个虚拟控制点的加权和,通过物方点和像点的对应关系估计虚拟控制点的摄像机坐标,即可求得物方点的摄像机坐标,最后通过 Horn 绝对定位算法^[19]求解旋转矩阵和平移向量。由于 Horn 绝对定位算法至少需要 3 个控制点,为提高定位精度至少需要 1 个多余观测值,故

至少需要 4 个控制点,虚拟控制点取控制点个数范围最小值 4。该算法无须迭代求解,时间复杂度为 $O(n)$,且能达到较高的精度。

本文采用文献^[16]中的理想成像模型,构建了球形全景影像的投影模型和共线条件方程,提出了球形全景影像位姿估计的改进 EPnP 算法,并与球形全景影像位姿估计的后方交会算法进行比较。仿真试验和实际试验结果表明,本文提出的方法无须迭代求解,更为稳健快速,即使控制点数目较少也能达到高精度,重投影误差可控制在 3.00 像素左右。

1 球形全景影像的投影模型构建

球形全景影像是多台相机通过对 360° 拍摄的影像进行拼接,形成长方形影像,并投影到球面形成的。如图 1 所示,设全景球的半径为 r ,全景影像 $ABCD$ 长度方向水平覆盖整个球面,总长度 $W = 2\pi r$,宽度方向竖直覆盖半个球面,总长度 $H = \pi r$ 。以点 A 为原点,指向 B 为 x 轴,指向 D 为 y 轴,建立像平面坐标系,同时以球心 O 为原点,指向平面全景影像中心 G 在全景球上的对应点 H 为 y 轴,赤道截面为 Oxy 平面,建立像空间直角坐标系。长方形全景影像 $ABCD$ 上任意一点 $M(x, y)$,在球形全景影像上存在对应的映射点 $P(X, Y, Z)$,其对应的物方点在像空间坐标系中的坐标为 $P_c(X_c, Y_c, Z_c)$ 。

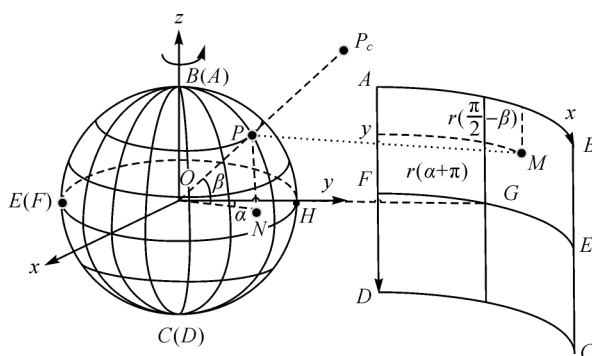


图 1 球形全景影像与平面全景影像的映射关系

Fig.1 The mapping relationship between spherical panoramic image and plane panoramic image

如图 1 所示,设点 P 在 Oxy 平面上的投影为

N 点,连接 ON 与 Y 轴的夹角为 $\alpha \in [-\pi, \pi]$, 与 OP 的夹角为 $\beta \in [-\pi/2, \pi/2]$, 顺时针为正, 逆时针为负, 则根据图 1 所示的映射关系, 点 M 和点 P 的坐标值可表示为如下形式

$$\left. \begin{aligned} x &= r(\alpha + \pi) \\ y &= r\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) \\ r &= \frac{W}{2\pi} = \frac{H}{\pi} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} X &= r \cos \beta \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \\ Y &= r \cos \beta \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \\ Z &= r \sin \beta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可推导得像平面坐标点 M 到球形全景像空间坐标点 P 的映射关系如式(3)

$$\left. \begin{aligned} X &= r \cos\left(\frac{\pi}{2} - \pi \frac{y}{H}\right) \cos\left(\frac{3\pi}{2} - 2\pi \frac{x}{W}\right) \\ Y &= r \cos\left(\frac{\pi}{2} - \pi \frac{y}{H}\right) \sin\left(\frac{3\pi}{2} - 2\pi \frac{x}{W}\right) \\ Z &= r \sin\left(\frac{\pi}{2} - \pi \frac{y}{H}\right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

同时, 点 P_c 、点 P 与全景球心 O 满足共线条件, 可列方程如式(4)

$$\frac{X}{X_c} = \frac{Y}{Y_c} = \frac{Z}{Z_c} \quad (4)$$

2 球形全景影像位姿估计的改进 EPnP 算法

2.1 位姿描述

EPnP 算法估计的是透视成像摄像机的位姿^[20], 可将球形全景影像视为以球心为投影中心, 半径为焦距, 球面为成像面, 视场角为 360° 的虚拟相机拍摄的影像, 从而通过 EPnP 算法求解球形全景影像的位姿。如图 2 所示, 球形全景影像的位姿由球形全景像空间坐标系 $OXYZ$ 相对于物方空间坐标系 $SX_wY_wZ_w$ 的旋转矩阵 R 和平移向量 T (全景球心 O 的物方空间坐标) 表示, 球形全景影像位姿估计即对 R 、 T 进行求解。

2.2 位姿估计算法

图 2 中, $\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ 为已知的控制点集, C_1, C_2, C_3, C_4 为虚拟控制点, 球形全景影像位姿估计的改进 EPnP 算法的关键在于以虚拟控制点为桥梁, 求解控制点在球形全景像空间坐标系下的坐标, 从而利用 Horn 绝对定位算法解求

R 、 T , 其流程如图 3 所示。

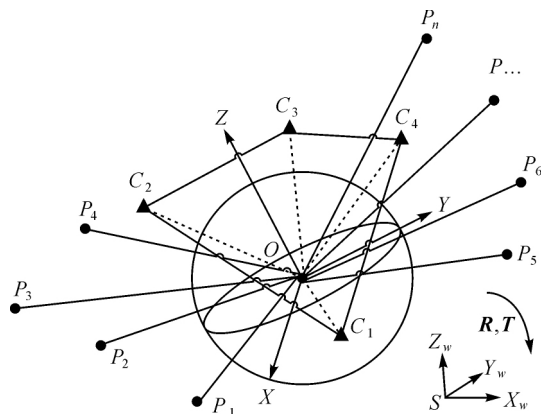


图 2 球形全景影像位姿估计图示

Fig.2 Position and pose obtainment representation of spherical panoramic image

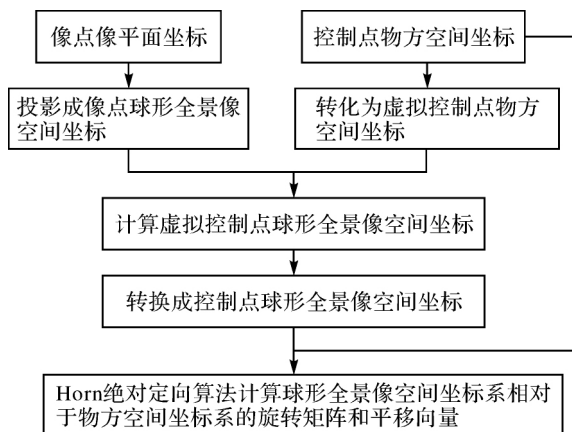


图 3 球形全景影像位姿估计流程图

Fig.3 Position and pose obtainment flow chart of spherical panoramic image

具体步骤如下:

(1) 确定虚拟控制点的物方空间坐标

设 $\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ 的物方空间坐标为 $P_w^i = [X_w^i \ Y_w^i \ Z_w^i]^T$ ($i=1, 2, \dots, n$), 下标 W 表示物方空间坐标系下的坐标, 通常虚拟控制点 C_1 取控制点集的重心, (C_2, C_3, C_4) 取控制点集主分量分解后的 3 个主分量, 其物方空间坐标系下的坐标为 $C_w^j = [X_w^{jC} \ Y_w^{jC} \ Z_w^{jC}]^T$ ($j=1, 2, 3, 4$)。

(2) 求解控制点表示为虚拟控制点的权重

控制点可表示为 4 个虚拟控制点的加权和, 使得求解控制点的球形全景像空间坐标时, 可通过求解虚拟控制点的球形全景像空间坐标系实现, 简化算法复杂度, 这也是虚拟控制点存在的意义。

设控制点的齐次坐标为 \bar{P}_w^i , 虚拟控制点的齐次坐标为 \bar{C}_w^i , 则二者的转换关系如式(5)

$$\bar{P}_w^i = \begin{bmatrix} P_w^i \\ 1 \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^4 k_{ij} \bar{C}_w^j = \sum_{j=1}^4 k_{ij} \begin{bmatrix} C_w^j \\ 1 \end{bmatrix} \quad i=1,2,\dots,n \quad (5)$$

由式(5)中 \bar{P}_w^i 最后一个齐次坐标 1 的转换关系可知, 转换系数满足 $\sum_{j=1}^4 k_{ij} = 1$, 故称加权和, 其中向量 $[k_{i1} \ k_{i2} \ k_{i3} \ k_{i4}]^T$ 为权重, 也称为控制点 \bar{P}_w^i 在以虚拟控制点 \bar{C}_w^i 为基的欧氏空间中的坐标, 即

$$[k_{i1} \ k_{i2} \ k_{i3} \ k_{i4}]^T = [\bar{C}_w^1 \ \bar{C}_w^2 \ \bar{C}_w^3 \ \bar{C}_w^4]^{-1} \bar{P}_w^i \quad (6)$$

(3) 求解虚拟控制点的球形全景像空间坐标

在球形全景像空间坐标系下, n 个控制点的坐标为 $P_C^i = [X_C^i \ Y_C^i \ Z_C^i]^T$ ($i=1,2,\dots,n$), 虚拟控制点的坐标为 $C_C^j = [X_C^{jC} \ Y_C^{jC} \ Z_C^{jC}]^T$ ($j=1,2,3,4$), 下标 C 表示球形全景像空间坐标系下的坐标, 根据欧氏空间的线性不变性, 可知在球形全景像空间坐标系下, 控制点 P_C^i 和虚拟控制点 C_C^j 满足式(7)

$$P_C^i = \sum_{j=1}^4 k_{ij} C_C^j \quad i=1,2,\dots,n \quad (7)$$

根据控制点坐标 P_C^i 、像点坐标 $P_C^{i0} = [X_C^{i0} \ Y_C^{i0} \ Z_C^{i0}]^T$ ($i=1,2,\dots,n$) 与球心满足共线条件式(4), 即可列出 3 个等式如式(8)

$$\left. \begin{aligned} Y_C^{i0} Z_C^i - Z_C^{i0} Y_C^i &= 0 \\ Z_C^{i0} X_C^i - X_C^{i0} Z_C^i &= 0 \\ X_C^{i0} Y_C^i - Y_C^{i0} X_C^i &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

n 个控制点根据式(8)可列立 $3n$ 个齐次线性方程, 共有 $3n$ 个控制点坐标未知量, 为减少未知量的个数, 将式(7)代入式(8)可得

$$\left. \begin{aligned} Y_C^{i0} \sum_{j=1}^4 k_{ij} Z_C^{jC} - Z_C^{i0} \sum_{j=1}^4 k_{ij} Y_C^{jC} &= 0 \\ Z_C^{i0} \sum_{j=1}^4 k_{ij} X_C^{jC} - X_C^{i0} \sum_{j=1}^4 k_{ij} Z_C^{jC} &= 0 \\ X_C^{i0} \sum_{j=1}^4 k_{ij} Y_C^{jC} - Y_C^{i0} \sum_{j=1}^4 k_{ij} X_C^{jC} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

令 4 个虚拟控制点球形全景像空间坐标为 $X = [C_C^{1T} \ C_C^{2T} \ C_C^{3T} \ C_C^{4T}]^T$, 将像点像平面坐标已知值代入式(3)可得像点球形全景像空间坐标 P_C^{i0} , 则式(9)中仅有 X 为未知量。 n 个控制点根据式(9)可列成含 $3n$ 个方程的方程组, 其矩阵形

式如式(10)

$$MX = 0 \quad (10)$$

则矩阵 M 的核空间即为未知量 X 的解

$$X = \sum_{j=1}^N \delta_j V_j \quad (11)$$

式中, V_j 为 $M^T M$ 零特征值的特征向量; N 是 $M^T M$ 核空间的维数; δ_j 是未知值。根据欧氏变换的保距性, 4 个虚拟控制点相互间的距离可列式如式(12)

$$\|C_C^i - C_C^j\| = \|C_w^i - C_w^j\| \quad i, j=1,2,3,4 \quad (12)$$

将式(11)代入式(12)即可得含 6 个方程的方程组, 利用最小二乘原理可解得未知值 δ_j (为提高精度可以此为初值进行高斯牛顿迭代, δ_j 可快速收敛), 即求得 4 个虚拟控制点的球形全景像空间坐标 C_C^j , 从而根据式(6)解算出来的权重向量 $[k_{i1} \ k_{i2} \ k_{i3} \ k_{i4}]^T$ 获得 n 个控制点的球形全景像空间坐标 P_C^i 。

(4) 求解球形全景像空间坐标系相对于物方空间坐标系的旋转矩阵 R 和平移向量 T

根据 P_w^i 、 P_C^i 满足式(13), 可通过文献[19]提出的绝对定向算法直接解算球形全景像空间坐标系相对于物方空间坐标系的旋转矩阵 R 和平移向量 T (球形全景影像位姿)

$$P_w^i = RP_C^i + T \quad i=1,2,\dots,n \quad (13)$$

首先, 将 P_w^i 、 P_C^i 分别重心化为 $P_{w0}^i = [X_{w0}^i \ Y_{w0}^i \ Z_{w0}^i]^T$ 、 $P_{C0}^i = [X_{C0}^i \ Y_{C0}^i \ Z_{C0}^i]^T$, 如式(14)

$$P_{w0}^i = P_w^i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_w^i \quad P_{C0}^i = P_C^i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_C^i \quad i=1,2,\dots,n \quad (14)$$

然后, 通过使 $\sum_{i=1}^n P_{w0}^i \cdot (RP_{C0}^i) = \sum_{i=1}^n (P_{w0}^i)^T RP_{C0}^i$ 最大化, 即最大化 $\text{Tr}[R^T \sum_{i=1}^n P_{w0}^i (P_{C0}^i)^T]$, 求得旋转矩阵 R , 进而根据式(13)求得平移向量 T 。

令矩阵 A 为式(15), 则问题可转化为求解使 $\text{Tr}[R^T A]$ 最大化的旋转矩阵 R

$$A = \sum_{i=1}^n P_{w0}^i (P_{C0}^i)^T \quad (15)$$

满足该条件的旋转矩阵 R 和相对应的平移向量 T 可表示如式(16)

$$\left. \begin{aligned} R &= A(A^T A)^{-1/2} \\ T &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{w0}^i - R \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{C0}^i \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

3 试验过程与效果分析

3.1 仿真试验

为测试球形全景影像位姿估计的改进EPnP算法(EPnP算法)的性能和受控制点数目、噪声水平的影响,首先进行仿真试验,并与球形全景影像位姿估计的后方交会算法(后方交会算法)进行比较。设平面全景影像大小为 $15\,000 \times 7\,500$ 像素,由于球形全景影像的控制点极少出现在球顶和球底的位置,故设置控制点像点坐标均匀分布在 $[0\ 15\,000] \times [1\,250\ 6\,250]$ 的像素区域内,旋转矩阵绕X、Y、Z轴的3个旋转角均匀分布在 $[0^\circ\ 45^\circ]$ 之间,平移向量在X、Y、Z轴方向上的偏移均匀分布在 $[-1\,000\ 1\,000]$ (单位为m)之间,控制点到球形全景影像的球心距离均匀分布在 $[10\ 100]$ (单位为m)之间。算法求得球形全景影像的位姿后,采用重投影误差来评价算法的精度。

3.1.1 控制点数目试验

控制点数目范围为 $[6\ 20]$ 个,步长为1,图像点添加在 $[0\ 2]$ 像素范围内的随机整数噪声,每个控制点数目下进行100次独立试验,再对计算时间和重投影误差取平均值,得到重投影误差结果如图4所示,由于仿真试验像点真实坐标已知,重投影误差为真误差。

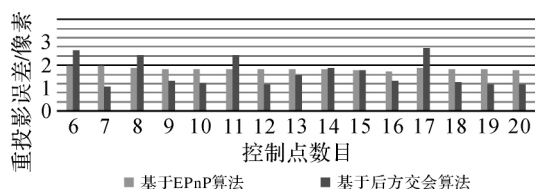


图4 控制点数目试验重投影误差

Fig.4 Reprojection error of the experiments changed with the number of control points

图4结果显示,在不同的控制点数目下,EPnP算法的重投影误差在 $[1.70\ 1.94]$ 像素之间,波动范围约为0.24像素,波动较小;后方交会算法的重投影误差大部分在 $[1.04\ 1.82]$ 像素之间,精度较高,但在控制点数目为6个、8个、11个、17个的试验中,其重投影误差在 $[2.40\ 2.74]$ 像素之间,大于添加的图像点噪声像素范围。试验表明,EPnP算法的精度受控制点数目变化的影响较小,比后方交会算法稳健。

3.1.2 图像噪声试验

试验中将控制点数目设为12个,图像点添加均值为0像素,标准差为 σ 像素的噪声, σ 在 $[1\ 20]$ 像素范围内变化,步长为1,进行100次独立试验,再对计算时间和重投影误差取平均值,得到重投影误差结果如图5所示,由于仿真试验像点真实坐标已知,重投影误差为真误差。

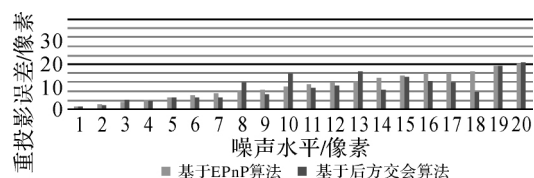


图5 图像噪声试验重投影误差

Fig.5 Reprojection error of the experiments changed with the noise level of image

图5结果显示,在不同的图像点噪声水平下,EPnP算法的重投影误差与对应的噪声像素标准差相当,说明该算法的计算精度受图像点噪声水平的影响较大;后方交会算法的重投影误差大部分情况下低于EPnP算法,但在噪声标准差为8像素、10像素、13像素的情况下,明显大于EPnP算法,说明后方交会算法的精度不稳定,波动大,鲁棒性较差。

此外,仿真试验结果中,EPnP算法的计算时间集中在0.45s左右,后方交会算法的计算时间集中在13s左右,表明EPnP算法的计算效率比后方交会算法提高了近30倍。

仿真试验结果表明,本文提出的方法具有理论可行性,更为稳健快速,即使控制点数目较少也能达到较高精度。实际应用中可以利用少量均匀分布的控制点,达到较好的位姿估计结果,从而节省成本并提高效率。

3.2 实际影像数据试验

仿真试验表明球形全景影像位姿估计的改进EPnP算法具有理论可行性,下面测试其实际可行性。基于球形全景影像的实际数据位姿估计试验在武汉大学信息学部1号楼前进行,采用的相机为ladybug3和ladybug5,每个相机设立两个测站,大小为 8000×4000 像素,并提供12个控制点数据和96个检查点数据如图6所示。

图6中,12个控制点和96个检查点在全景影像中长度方向均匀分布,宽度方向集中在中心位置,这与大部分室外控制点和检查点只能依赖

建筑物进行采集以及相机与建筑物的距离有关。用实际数据进行球形全景影像位姿估计的改进 EPnP 算法(EPnP 算法),并与球形全景影像位姿估计的后方交会算法(后方交会算法)进行对比,对比试验中 12 个控制点的重投影误差(单位为像素)见表 1。

如表 1 所示,EPnP 算法中,ladybug3 测站 1 全景影像控制点重投影误差最大为 5.91 像素,均值为 2.80 像素;ladybug3 测站 2 全景影像控制点重投影误差最大为 7.52 像素,均值为 2.21 像素;ladybug5 测站 1 全景影像控制点重投影误差最大为 2.24 像素,均值为 0.94 像素;ladybug5 测站 2 全景影像控制点重投影误差最大为 2.95 像素,均值为 1.15 像素。后方交会算法中,ladybug3 测站 1 全景影像控制点重投影误差最大为 6.50 像素,均值为 2.49 像素;ladybug3 测站 2 全景影像控制点重投影误差最大为 3.68 像素,均值为 1.86 像素,其中该试验设置 Kappa 值为 0°时,算法无法收敛,设置为 90°时,算法才正常收敛;ladybug5 测站 1 全景影像控制点重投影误差最大为 2.65 像素,均值为 0.81 像素;ladybug5 测站 2 全景影像控制点重投影误差最大为 2.88 像素,均值为 1.10 像素。

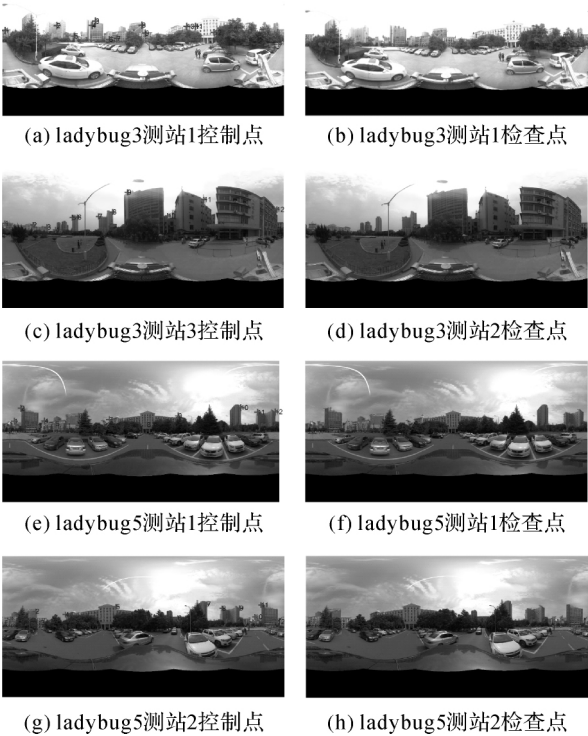


图 6 全景影像实际数据分布
Fig.6 The distribution of actual data in panoramic image

表 1 友谊广场控制点实验数据投影误差
Tab.1 The projection error of control point experiment data at friendship square 像素

点号	EPnP 算法				后方交会算法			
	ladybug3 (测站 1)	ladybug3 (测站 2)	ladybug5 (测站 1)	ladybug5 (测站 2)	ladybug3 (测站 1)	ladybug3 (测站 2)	ladybug5 (测站 1)	ladybug5 (测站 2)
1	1.47	1.48	0.28	1.31	2.27	3.19	0.50	1.51
2	1.33	1.14	0.12	1.40	1.66	2.00	0.42	1.28
3	5.91	0.47	0.37	0.88	6.50	0.17	0.47	1.00
4	1.97	1.32	0.14	2.95	2.01	1.40	0.50	2.88
5	1.16	0.90	1.74	0.58	1.05	1.28	1.19	0.72
6	1.95	0.96	2.24	1.15	1.08	1.47	2.65	1.01
7	4.34	0.48	1.39	1.23	3.30	0.45	0.74	0.76
8	1.88	1.52	1.63	1.02	2.65	1.51	0.57	0.84
9	1.66	3.05	0.96	1.51	1.98	3.68	0.55	1.73
10	2.57	2.51	0.06	1.25	3.42	1.20	0.11	1.00
11	4.71	7.52	0.80	0.08	2.42	3.36	0.68	0.33
12	4.59	5.17	1.52	0.42	1.54	2.65	1.32	0.14
均值	2.80	2.21	0.94	1.15	2.49	1.86	0.81	1.10

此外,试验也得到了 96 个检查点的重投影误差(单位为像素),其结果见表 2。

表 1、表 2 试验结果显示,两种球形全景影像位姿估计方法的控制点重投影误差和检查点重投影误差都达到了 3.00 像素左右的平均精度,说明利用少量均匀分布的控制点数据进行位姿估计可

得到较好的检查点重投影精度,即位姿估计结果较好。对于 ladybug3,两种球形全景影像位姿估计方法得到的重投影误差差值在 0.94 像素以内;而对于 ladybug5,重投影误差差值则在 0.60 像素内,说明两种方法位姿估计精度相当,但 EPnP 算法的计算时间为 0.36 s 左右,后方交会算法的计

算时间为 13 s 左右。由此可知,本文提出的方法 高精度、快速的球形全景影像位姿估计方法。
时间效率比后方交会算法提高了 30 倍多,是一种

表 2 友谊广场检查点实验数据投影误差
Tab.2 The projection error of check point experiment data at Friendship Square 像素

点号	EPnP 算法				后方交会算法			
	ladybug3 (测站 1)	ladybug3 (测站 2)	ladybug5 (测站 1)	ladybug5 (测站 2)	ladybug3 (测站 1)	ladybug3 (测站 2)	ladybug5 (测站 1)	ladybug5 (测站 2)
最大值	7.16	11.92	8.65	5.51	7.80	7.31	9.28	5.95
均值	2.81	3.66	2.67	1.70	2.44	2.72	2.86	1.10

由仿真试验和真实数据试验可以得出以下
结论:

(1) 本文中 EPnP 算法计算效率比后方交会
算法提高了 30 倍左右,其中 EPnP 算法的时间复
杂度为 $O(n)$,后方交会算法的时间复杂度为
 $O(n * iter)$, n 为控制点个数,iter 为迭代次数。

(2) 无须位姿初值迭代求解的 EPnP 算法精
度比后方交会算法略低,但在位姿初值不合适
的情况下,后方交会算法将难以收敛到理想值或者
不收敛,导致解算精度差,鲁棒性不高。

(3) EPnP 算法的重投影误差与图像点噪声
水平成正比的规律表明,不宜选用拼接误差过大
的全景影像(单相机光心和全景虚拟光心的距离
不可忽略)进行位姿估计。

由文献[16]可知,在单相机光心和全景虚拟
光心距离可忽略的前提下,单张全景影像拼接误
差与控制点到全景虚拟光心的距离有关,近距
离控制点成像会引起较大的拼接误差,ladybug 相
机的最佳拼接半径为 20 m,故一般不采用 10 m
以内的控制点。

本文提出的方法针对的是广泛采用的全景理
想成像模型,它是建立在球形全景影像不存在拼
接误差或者拼接误差可以忽略不计的前提下的,
而对于体型较大的多镜头组合式相机,由于单相
机光心和全景虚拟光心的距离不可忽略,球形全
景影像存在明显的拼接误差,采用本文建立的球
形全景影像投影模型将导致位姿估计误差较大。
文献[16]提出的全景严格模型,为解决这一问题
提供了方向,全景影像严格模型位姿估计的改进
EPnP 算法有待于进一步研究。

4 结 论

本文构建了球形全景影像的投影模型和共线
条件方程,并引入 EPnP 算法进行改进,提出了一

种快速的球形全景影像位姿估计算法,解决了基
于球形全景影像进行三维重建需要位姿数据的问
题,使其不再依赖 GPS/IMU 位姿数据,降低了数
据采集成本。与球形全景影像位姿估计的后方交
会算法对比试验表明,本文提出的方法无须迭代
求解,更为稳健快速,重投影误差可控制在
3.00 像素左右,且即使控制点数目较少也能达到
高精度,可在实际应用中实现使用少量控制点进
行位姿估计和三维重建,提高效率。

参考文献:

[1] 李霖,于忠海,李桢,等. 全景景观地图中地形局部变形研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(11): 1335-1338, 1343.
LI Lin, YU Zhonghai, LI Zhen, et al. Local Terrain Deformation in Panoramic Maps [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(11): 1335-1338, 1343.
[2] 张烁,李群智,温博,等. 玉兔号月球车全景相机的正交变换投影模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(7): 804-808.
ZHANG Shuo, LI Qunzhi, WEN Bo, et al. Orthogonal Projection Model of Jade Rabbit Lunar Rover Pancam[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(7): 804-808.
[3] TONG Guofeng,LIU Ran, TAN Jindong. 3D Information Retrieval in Mobile Robot Vision Based on Spherical Compound Eye[C] // Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Karon Beach, Phuket; IEEE, 2011; 1895-1900.
[4] TONG Guofeng, WU Zizhang, WENG Ninglong, et al. An Omni-directional vSLAM Based on Spherical Camera Model and 3D Modeling [C] // Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation, Beijing; IEEE, 2012; 4551-4556.
[5] TONG Guofeng, GU Jiuhong. Locating Objects in Spherical Panoramic Images [C] // Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics,

- Karon Beach, Phuket: IEEE, 2011: 818-823.
- [6] 徐芳, 梅文胜, 张利. 线阵全景相机检校模型研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(4): 417-421.
XU Fang, MEI Wensheng, ZHANG Li. The Calibration Model of Linear Array Panoramic Cameras[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(4): 417-421.
- [7] 李晓辉, 周荫清, 王祖林. 基于曲面拼接的球面全景生成算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(6): 668-671, 681.
LI Xiaohui, ZHOU Yinqing, WANG Zulin. Spherical Panorama Creating Algorithm Based on Curve Surface Mosaic[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(6): 668-671, 681.
- [8] 龚琪慧, 吴健平, 王洁华, 等. 基于全景图的3维实景制作及其与GIS集成研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2012, 35(6): 33-37.
GONG Qihui, WU Jianping, WANG Jiehua, et al. The Research of the Production of 3D Real Scene and the GIS Integration Thereof Based on Panorama[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2012, 35(6): 33-37.
- [9] TONG Guofeng, PANG Xiaolei, YE Ning, et al. A Precise Spherical Camera Model Based on Multi-camera System[J]. Journal of Computational Information Systems, 2013, 9(3): 897-905.
- [10] BROWN M, LOWE D G. Automatic Panoramic Image Stitching Using Invariant Features[J]. International Journal of Computer Vision, 2007, 74(1): 59-73.
- [11] 季顺平, 史云. 车载全景相机的影像匹配和光束法平差[J]. 测绘学报, 2013, 42(1): 94-100.
JI Shunping, SHI Yun. Image Matching and Bundle Adjustment Using Vehicle-based Panoramic Camera[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(1): 94-100.
- [12] 张正鹏, 江万寿, 张靖. 光流特征聚类的车载全景序列影像匹配方法[J]. 测绘学报, 2014, 43(12): 1266-1273. DOI: 10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0172.
ZHANG Zhengpeng, JIANG Wanshou, ZHANG Jing. An Image Match Method Based on Optical Flow Feature Clustering for Vehicle-borne Panoramic Image Sequence[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(12): 1266-1273. DOI: 10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0172.
- [13] 刘帅, 陈军, 孙敏, 等. 一种球形立体全景的三维量测算法与实验[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(1): 15-22.
LIU Shuai, CHEN Jun, SUN Min, et al. A Three Dimensional Measurement Approach and Experiment Based on Spherical Panorama[J]. Journal of Geo-Information Science, 2014, 16(1): 15-22.
- [14] 刘帅, 陈军, 孙敏, 等. 双球面投影几何可量测全景模型的构建[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(4): 657-665.
LIU Shuai, CHEN Jun, SUN Min, et al. Measurable Panorama Construction Based on Binocular Spherical Projective Geometry[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2015, 27(4): 657-665.
- [15] 季顺平, 史云. 高噪声环境下基于参考影像的车载序列影像定位方法[J]. 测绘学报, 2014, 43(11): 1174-1181. DOI: 10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0181.
JI Shunping, SHI Yun. Georegistration of Ground Sequential Imagery with Geo-referenced Aerial Images in High Noise Environments[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(11): 1174-1181. DOI: 10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0181.
- [16] 季顺平, 史云. 多镜头组合型全景相机两种成像模型的定位精度比较[J]. 测绘学报, 2014, 43(12): 1252-1258. DOI: 10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0169.
JI Shunping, SHI Yun. Comparison of Two Sensor Models for Multi-camera Rig System in Measurements[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(12): 1252-1258. DOI: 10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0169.
- [17] 石丽梅, 赵红蕊, 李明海, 等. 车载移动测图系统外方位元素标定方法[J]. 测绘学报, 2015, 44(1): 52-58. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20130203.
SHI Limei, ZHAO Hongrui, LI Minghai, et al. Extrinsic Calibration for Vehicle-based Mobile Mapping System[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(1): 52-58. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20130203.
- [18] LEPETIT V, MORENO-NOGUER F, FUA P. EPnP: An Accurate $O(n)$ Solution to the PnP Problem[J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 81(2): 155-166.
- [19] HORN B K P, HILDEN H M, NEGAHDARIPOUR S. Closed-form Solution of Absolute Orientation Using Orthonormal Matrices[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1988, 5(7): 1127-1135.
- [20] 王佩军, 徐亚明. 摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005.
WANG Peijun, XU Yaming. Photogrammetry[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005.

(责任编辑:陈品馨)

收稿日期: 2015-08-12

修回日期: 2016-04-10

第一作者简介: 邓非(1976—)男,博士,教授,研究方向为数字摄影测量。

First author: DENG Fei(1976—), male, PhD, professor, majors in digital photogrammetry.

E-mail: fdemg@sgg.whu.edu.cn

通信作者: 吴幼丝

Corresponding author: WU Yousi

E-mail: yousiwu@whu.edu.cn