

车载全景影像核线匹配和空间前方交会

曾凡洋^{1,2}, 钟若飞¹, 宋杨², 任苗³

1. 首都师范大学 三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048;

2. 广州市城市规划勘测设计研究院, 广东 广州 510060;

3. 江西省地理国情监测遥感院, 江西 南昌 330025

摘要: 全景相机车载移动系统可以获取带有精确位置和姿态信息的序列全景影像, 针对该影像数据, 提出一种构建全景核线影像的方法, 描述了在球面全景模型下构建全景影像之间核线几何约束的过程, 并推导出具体的公式, 然后在两张全景核线影像之间使用 SIFT 算法匹配同名点, 最后根据摄影中心、像点、物点 3 点共线的原理, 推导出全景影像的共线公式, 利用前方交会的原理计算出物点的空间 3 维坐标。实验结果表明, 本文方法可以降低全景影像匹配的复杂度, 提高匹配点数量和精度, 适用于实现基于全景影像的量测等功能。

关键词: 全景影像, 核线, 影像匹配, 前方交会, 移动测量系统

中图分类号: P237

文献标志码: A

引用格式: 曾凡洋, 钟若飞, 宋杨, 任苗. 2014. 车载全景影像核线匹配和空间前方交会. 遥感学报, 18(6): 1230-1236

Zeng F Y, Zhong R F, Song Y and Ren M. 2014. Vehicle panoramic image matching based on epipolar geometry and space forward intersection. Journal of Remote Sensing, 18(6): 1230-1236 [DOI: 10.11834/jrs.20144025]

1 引言

车载移动测量系统是一种十分重要的城市 3 维信息获取手段, 主要由全球定位系统 GPS/惯性测量单元 IMU、激光扫描系统以及相机等传感器集成。早期的车载移动测量系统主要由面阵相机获取实景影像, 随着激光扫描技术的成熟, 激光扫描仪逐渐成为车载移动测量系统中的标准配置。相对面阵相机, 全景相机具有成像一体化、360°大视场等优点, 国内外开始推出集成全景相机的车载移动测量系统。

车载全景影像由全景相机获取, 经过与 GPS/IMU 数据的融合处理, 可以得到带有精确位置和姿态信息的序列全景影像。Ikeda 等人(2003)介绍了一种对全景相机进行标定的方法, 对全景影像的球面模型进行了误差分析, 季顺平等(2013)和 Shi 等人(2012)是对全景影像的应用研究, 其中 Shi 等人利用全景相机和 GPS 在室外环境实现自动定位, 季顺平等(2013)利用多特征匹配对序列全景影像进行

匹配。极几何约束是立体视觉中十分重要的约束条件, 在摄影测量中用于生成核线影像, 进行同名点匹配。袁修孝等人(2008)提出一种基于 POS 数据的核线影像生成算法, 推导了核线影像与原始影像之间严密的几何关系; 康志忠等人(2006)则利用相对定向确定了对车载纵向摄影立体像对的核线几何关系, 从而生成核线影像并进行同名点匹配。

本文将核线约束引入到全景影像的球面模型中, 利用序列全景影像精确的位置和姿态信息, 构建全景影像像对间的核线约束, 推导全景球面模型下, 原始全景影像与全景核线影像之间严密的几何关系, 在全景核线影像之间进行灰度匹配, 并根据共线原理推导全景球面模型下同名像点空间前方交会的关系式。

2 全景影像核线匹配

采用加拿大 PointGrey 公司的 Ladybug 全景视觉系统, 该系统采用 6 台数字相机结合, 能够实时完

收稿日期: 2014-02-25; 修订日期: 2014-05-13; 优先数字出版日期: 2014-05-20

基金项目: 国家科技支撑计划(编号: 2012BAH34B01); 国家自然科学基金(编号: 41371434); 测绘地理信息与公益性行业科研专项经费(编号: 201412020)

第一作者简介: 曾凡洋(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为地图制图学与地理信息工程。E-mail: zengfanyang@whu.edu.cn

成影像采集、处理、拼接和校正等工作,配合高精度的 GPS 和 IMU,能够获取带有精确位置和姿态信息的高分辨率全景影像。

与传统的面阵相机向比,全景相机具有水平方向为 360° 、竖直方向接近 180° 的视场角,能够获取 360° 全景影像,与此同时,投影在平面上的全景影像几何畸变非常大,不利于相邻多张全景影像间的匹配。本文利用摄影测量中同名像对核线约束的原理,在两张相邻全景影像间构建对极几何约束,将两张全景影像纠正为核线影像,使影像匹配由 2 维匹配简化为一维匹配,缩小搜索范围,再结合常用的匹配算法进行影像匹配。

由于 Ladybug 全景相机 6 个镜头的摄影中心不一致,因此,如图 1 所示,其中 T_c 和 $T_{c'}$ 表示子相机 c 和 c' 的摄影中心, x 表示物点, U_c 和 $U_{c'}$ 表示对应的像点, S_c 和 $S_{c'}$ 表示物点 x 在球形投影面 S 上的投影点, G 表示全影摄影中心。将单个相机获取的影像投影到球面时,对于相邻两相机视野内的重叠部分,同名像点在球面上的投影会存在一定的误差,该误差对实际全景影像的影像大小可以用式(1)表示(Ikeda 等,2003),其中 D 表示目标点到两相机中心的距离, d 表示两相机中心间的距离, N 表示全景影像的球面 S 投影到平面影像上的像素数,当该式成立时,两相机的同名像点在球面上的投影差小于 1 个像素,此时,多相机不共心对全景影像没有明显影响;若该式不成立,则全景影像在镜头重叠区域会出现重影。

$$D > \frac{d}{2 \tan \frac{\pi}{N}} \quad (1)$$

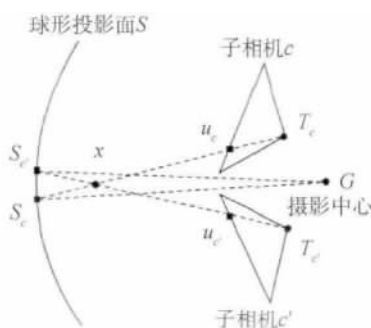


图 1 多相机不共心的影响(Ikeda 等,2003)

Fig. 1 Effect of disparity(Ikeda, et al., 2003)

2.1 全景影像核线约束

本文采用的全景相机是车载移动测量系统的核心部件之一,与 GPS/IMU 刚性连接,共同固定在

车体上方,车体移动时,全景相机按照车体行进等间距曝光,经过与 GPS/IMU 数据的融合处理,能够获取带有精确位置和姿态信息的全景影像。精确的位置和姿态信息是构建全景影像核线约束的关键。

本文中全景影像采用球面模型投影,如图 2 所示,本文用球面表示全景,球的坐标轴方向表示全景相机拍摄时的姿态, S 和 S' 表示的是两张全景的摄影中心。图 2 中目标物 x_1 在两全景球面的交点一定位于 x_1SS' 平面与两个全景球面的交线上,则这两条交线即为同名核线。然后全景影像在计算机中以平面影像的方式进行存储,该核线在平面的全景影像上表现为一条曲线,不便于核线匹配,因此,需要将该平面全景影像重新投影,使得核线在平面影像表现为一条直线。本文以 Se 和 $S'e'$ 为极轴(e 和 e' 为摄影基线 SS' 与两球面的交点),将全星球面重新展开到平面,核线在投影得到的新全景影像中表现为一列。具体过程如图 3 所示。

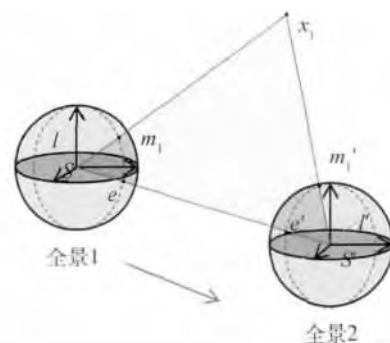


图 2 全景影像球面模型核线约束

Fig. 2 Epipolar geometry in spherical panorama

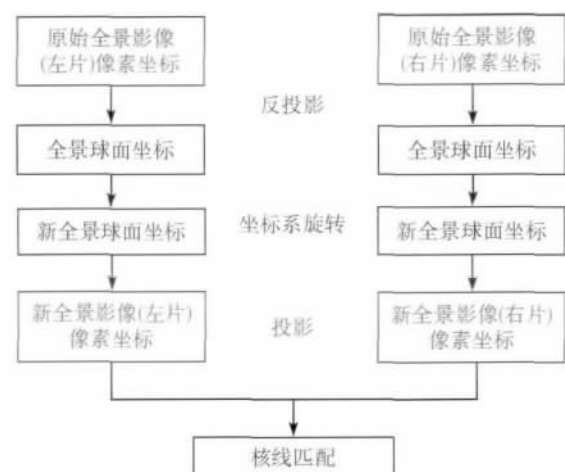


图 3 全景影像核线影像生成流程

Fig. 3 Process to generate panoramic epipolar images

(1) 计算全景球 2 摄影中心 $S'(x_2, y_2, z_2)$ 在全景球 1 的局部坐标系下的坐标为 (x_2', y_2', z_2') , 计算 SS' 与球 1 局部坐标系的夹角 A, B , 其中 A 是 SS' 在平面 XSY 上的投影与 Y 轴之间的夹角, B 是 SS' 与平面 XSY 的夹角, 将全景球 1 的局部坐标系绕 Z 轴顺时针旋转角度 A , 绕 X 轴顺时针旋转角度 $(\pi/2 - B)$, 则可以得到全景球 1 的新局部坐标系, 该坐标系以 SS' 方向为极轴。

$$\begin{bmatrix} x_2' \\ y_2' \\ z_2' \end{bmatrix} = R_s \cdot \begin{bmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \\ z_2 - z_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$B = \tan^{-1} \left(\frac{z_2'}{\sqrt{x_2'^2 + y_2'^2}} \right) \quad (3)$$

$$A = \tan^{-1} \left(\frac{x_2'}{y_2'} \right) \quad (4)$$

式中, (x_1, y_1, z_1) 、 (x_2, y_2, z_2) 为全景球 1、2 的摄影中心 S, S' 的绝对坐标, (x_2', y_2', z_2') 为 S' 在全景球 1 的局部坐标系下的坐标, R_s 为全景球 1 的局部坐标系与绝对坐标之间的旋转矩阵。

(2) 由全景影像 1 上的任一像素 (m, n) 计算该点在全景球 1 上的局部坐标 (x, y, z) :

$$\alpha = \frac{m - \frac{W}{2}}{\frac{W}{2}} \times 2\pi \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\frac{H}{2} - n}{\frac{H}{2}} \times \pi \quad (6)$$

$$\begin{cases} x = r \cdot \cos\beta \cdot \sin\alpha \\ y = r \cdot \cos\beta \cdot \cos\alpha \\ z = r \cdot \sin\beta \end{cases} \quad (7)$$

式中, W, H 为平面全景影像的影像宽高, r 为全景球的半径, 可以任意赋值, 后续计算会约去。

(3) 由全景球 1 的局部坐标系依次绕 Z 轴、 X 轴顺时针旋转角度 $A, (\pi/2 - B)$ 得到全景球 1 的新局部坐标系, 建立两坐标系间的关系式:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = R_x \cdot R_z \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, (x, y, z) 为全景球 1 局部坐标系下任一点的坐标, (x', y', z') 为该点在全景球 1 新局部坐标系下的坐标, R_x, R_z 分别为绕 X 轴、 Z 轴的旋转矩阵。

(4) 按步骤 (2) 相同的原理, 由全景球 1 新局部坐标 (x', y', z') 计算该点全景影像 1 上的像素坐标 (m', n') , 公式与步骤 (2) 中过程相反。

(5) 将全景影像 1 中每一个像素按前 4 步处理, 即可得到全景影像 1 的核线影像。

(6) 交换全景 1 和全景 2, 重复以上 5 步, 即可得到全景影像 2 的核线影像。

2.2 核线影像匹配

影像匹配方法主要可以分为基于特征的方法、基于区域的方法和基于频率的方法, 常用的方法有: 相关系数法、最小二乘影像匹配、跨接法影像匹配、SIFT 影像匹配和小波变换等。其中 SIFT 算法具有旋转缩放不变性、独特性和多量性等特点, 对复杂纹理具有较好的匹配效果, 本文选用 SIFT 算法对核线全景影像进行匹配。全景影像经过核线化处理, 且投影的方法一致, 在考虑误差的情况下, 匹配的搜索范围可以缩小到特定的几列, 提高了匹配的效率, 同时也可以排除一部分误匹配点。

具体处理过程如下: 首先, 将两张全景影像用上文的方法生成核线全景影像; 然后, 对两张核线全景影像进行 SIFT 匹配; 最后, 利用核线约束去除明显误匹配点。

3 全景影像前方交会

已有学者对 Ladybug 全景相机球面模型的误差进行了说明 (Ikeda 等, 2003; 季顺平等, 2013; Shi 等, 2012), 该误差由全景相机整体的摄影中心与 6 个相机单独的摄影中心不重合所致。由于该全景相机多个相机之间距离很近, 该误差实际影响较小, 该误差与目标物体到全景相机的距离反相关, 当该距离超过一定范围时, 造成的误差将小于一个像素。本文中车载移动测量中目标物到相机的距离一般较远, 故该误差可以忽略不计, 在此前提下, 全景球面模型中依然满足摄影中心、像点、物点 3 点共线的原理, 即共线条件方程依然成立 (图 4)。全景球面模型下, 两条同名光线在空间前方相交, 即可确定目标点的空间位置。本文没有套用共线条件方程, 而是根据 3 点共线的原理推导出全景球面模型中像点和物点间的关系式 (如式 (9)、(10) 所示), 然后考虑全景拍摄时刻位置和姿态, 在统一的摄影测量坐标系下, 列出相邻两个全景影像上同名像点与物点间的关系式, 最后利用最小二乘原理解算出物点的空间绝对坐标。

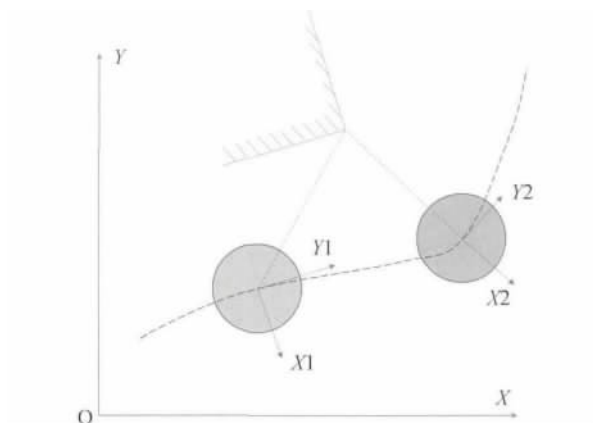


图4 全景影像球面模型空间前方交会

Fig. 4 Forward intersection of panoramic images

$$\begin{cases} \frac{x_T}{y_T} = \tan\left(\frac{m - \frac{W}{2}}{W} \cdot 2\pi\right) \\ \frac{z_T}{\sqrt{x_T^2 + y_T^2}} = \tan\left(\frac{\frac{H}{2} - n}{H} \cdot \pi\right) \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix} + T \quad (10)$$

式中, (x_T, y_T, z_T) 物点在全景球的局部坐标系下的坐标, (m, n) 为全景影像上像点的像素坐标, W, H 分别为全景影像的像素宽、高, (x_T, y_T, z_T) 为物点在统一摄影测量坐标系下的坐标, R, T 分别为摄影测量坐标系与全景球局部坐标系之间的旋转、平移矩阵, 由全景影像的姿态角和位置确定。

利用全景影像的空间前方交会, 可以在全景中实现量测功能, 同时, 在由同名点进行前方交会时, 根据平差残差的大小可以剔除一部分误匹配点, 进一步提高匹配的精度和量测的精度。

4 实验结果和分析

4.1 全景影像核线影像生成

采用首都师范大学研发的基于全景相机的移动车载测量系统作为实验平台, 采集了杭州某区域的街景数据, 并带有 GPS/IMU 数据, 经过组合导航处理, 将街景数据与组合导航数据融合, 得到带有位置和姿态信息的序列全景影像。

用其中任意相邻的两张全景影像作为实验对象, 首先根据本文方法构建了全景核线影像, 实验效果如图 5 所示, 相同列号即为同名核线, 如图中红

线所示, 从整体效果上看, 两幅影像中对应列经过的场景相同, 核线影像基本正确。为了进一步验证核线的匹配精度, 人工从两幅核线全景影像中选取一定数量同名点, 计算其列号的差值, 统计得出, 该差值在 0—14 像素之间, 平均值为 4.7 像素, 标准差为 3.84 像素。

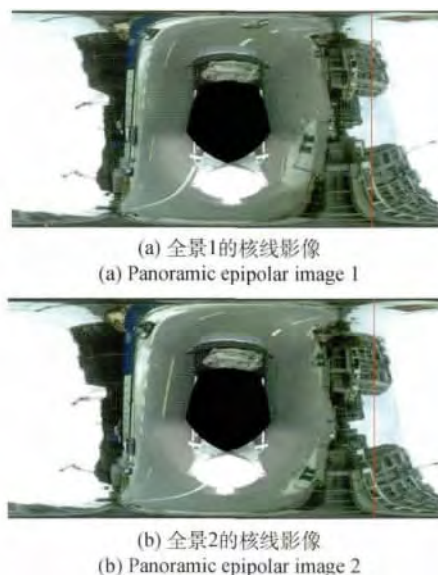


图5 全景核线影像生成实验效果

Fig. 5 Experimental results of generating panoramic epipolar images

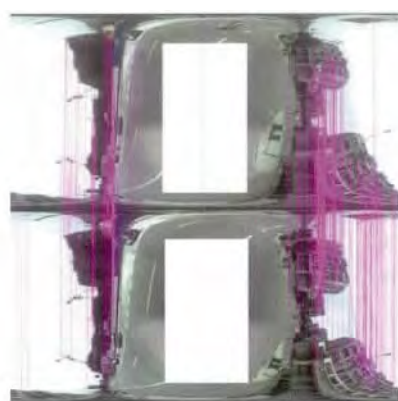
4.2 核线影像匹配

本文核线影像的分辨率为 2048×1024 , 利用 SIFT 算法提取两全景核线影像的特征点, 左右片分别提取 5252、5137 个特征点, 匹配时则将同名点列号差值限制在 20 像素内, 共得到 400 对同名点, 如图 6(a) 所示。

为了验证全景影像核线化对影像匹配的作用, 本文对同一组原始全景影像使用完全相同的参数设置进行 SIFT 匹配, 左右片分别提取 3395、3377 个特征点, 共匹配 504 对同名点, 如图 6(b) 所示。从图 6(b) 中可以看到存在一些明显的误匹配点(图中斜率较大的连线), 而对于全景核线影像匹配加入了核线约束, 去除了核线影像中列号差值较大的点对, 因此, 图 6(a) 中则看不到明显的误匹配点对。本实验表明, 将核线约束用于全景影像匹配可以减少误匹配点, 提高匹配精度。

4.3 匹配点空间前方交会

为验证全景球模型共线公式的正确性, 在原始全景影像上人工采集了部分同名点, 保证同名点的



(a)全景核线影像SIFT匹配(去除车体)
(a) SIFT match in panoramic epipolar images



(b)原始全景影像SIFT匹配(去除车体)
(b) SIFT match in origin panoramic images

图6 全景影像 SIFT 匹配实验结果

Fig. 6 Experimental results of SIFT match in panoramic images

正确性,然后利用本文的公式进行计算,再将计算得到的坐标与实际点云坐标(本次实验的原始数据在采集全景影像的同时也采集了点云数据)对比。其结果显示,在排除同名光线交会角过小(10° 以下)或者目标距离相机过远(超过100m)情况时,计算得

到的物方坐标在 X、Y、Z 方向的精度(将计算所得坐标与实测坐标较差,通过公式 $\mu = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n}}$, ($i = X, Y, Z$) 计算 X、Y、Z 各自的平均中误差)分别为 11 cm、17 cm 和 10 cm(表 1),表明本实验前方交会精度较高,结果符合预期情况,表明本文提出的公式正确。

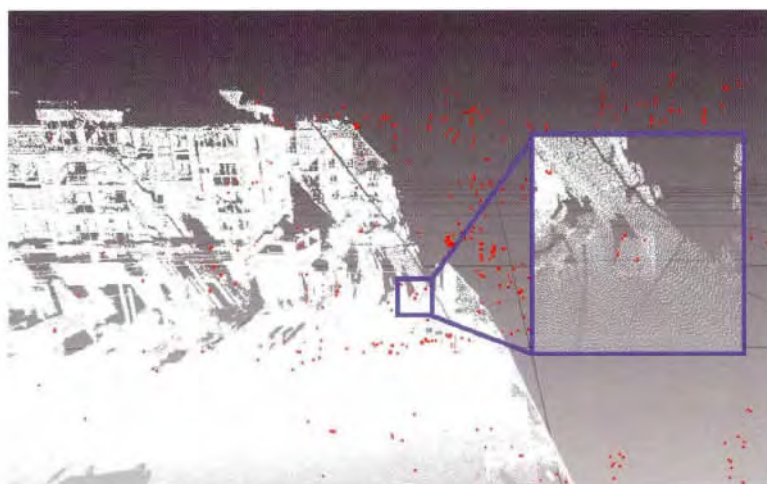
表1 全景前方交会精度

Table 1 Accuracy of panoramic intersection

	点数/对	X 精度/cm	Y 精度/cm	Z 精度/cm
人工量取	13	11	17	10
SIFT 核线匹配	10	5	14	25

为了验证 4.2 节实验中核线匹配的精度,将 4.2 节中得到的匹配点反投影到原始全景影像上,即可得到原始全景影像 1 和 2 之间的同名点,利用式(8)(9)进行前方交会,计算同名点的物方坐标。从这些匹配点中挑选 20 个匹配效果较好的点,将其计算所得物方坐标与点云上拾取的物方坐标进行对比,用上文相同的精度评定方法,得到精度如表 1 所示,可以看出其精度与人工量取同名点时计算所得坐标精度相近,表明 SIFT 核线匹配精度较高,能够得到较为准确的同名点对。

将所有的匹配点与实际点云叠加显示,如图 7 所示,从图中可以看出两类数据可以较好地叠合在一起,但部分点有一定误差。部分点误差较大可能的原因包括:(1)本身同名点匹配中一部分误匹配点没有剔除;(2)同名点前方交会的交会角过小或者目标较远;(3)全景影像位置姿态的误差。



(a)前方交会计算点与点云叠加
(a) Superimposed intersection points on point cloud



(b)匹配点
(b) Matched points



(c)前方交会点
(c) Intersection points

图7 点云与前方交会计算点叠加

Fig. 7 Superimposed intersection points on point cloud

5 结 论

针对全景球面模型,提出一种生成全景核线影像的方法,并利用全景核线影像进行立体匹配,最后推导了全景影像前方交会公式。实验表明,本文核线影像生成精度较高,能够降低全景影像匹配的难度,提高同名点匹配数量,在匹配正确的情况下,前方交会能够得到精度较高的物方点坐标,说明本文方法正确可行。

进一步研究工作将从提高匹配精度着手,剔除误匹配点;同时,进一步利用核线的优势,结合全景影像的特点对影像匹配算法进行改进,提高匹配点的精度和数量;然后,在空间前方交会中,将在更多的全景影像中寻找同名点,提高前方交会的精度,同时也可以剔除一部分误匹配点,从而更好地应用于全景影像的量测和建模。

参考文献(References)

- Fangi G and Nardinocchi C. 2013. Photogrammetric processing of spherical Panoramas. *The Photogrammetric Record*, 28(143): 293 – 311 [DOI: 10.1111/phor.12031]
- Ikeda S, Sato T and Yokoya N. 2003. Calibration method for an omnidirectional multicamera system. // *Proc. SPIE 5006, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems X*. SPIE, 499 – 507 [DOI: 10.1117/12.474073]
- Ji S P and Shi Y. 2013. Image matching and bundle adjustment using vehicle-based panoramic camera. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 42(1): 94 – 100 (季顺平, 史云. 2013. 车载全景相机的影像匹配和光束法平差. *测绘学报*, 42(1): 94 – 100)
- Kang Z Z, Zheng S Y, Zhang Z X and Tan Y M. 2006. Epipolar image generation and corresponding point matching based on vehicle-based images along optical axis. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 31(7): 582 – 585 (康志忠, 郑顺义, 张祖勋, 谭玉敏. 2006. 车载纵向摄影影像的核线影像生成与同名点匹配. *武汉大学学报(信息科学版)*, 31(7): 582 – 585)
- Shi Y, Ji S P, Shi Z C, Duan Y L and Shibasaki R. 2012. GPS-supported visual SLAM with a rigorous sensor model for a panoramic camera in outdoor environments. *Sensors*, 13(1): 119 – 136 [DOI: 10.3390/s130100119]
- Yuan X X and Wu Z L. 2008. A method of Epipolar image generation based on POS data. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 33(6): 560 – 564 (袁修孝, 吴珍丽. 2008. 基于POS数据的核线影像生成方法. *武汉大学学报: 信息科学版*, 33(6): 560 – 564)
- Yuan X X. 2008. POS-supported bundle block adjustment. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 37(3): 342 – 348 (袁修孝. 2008. POS辅助光束法区域网平差. *测绘学报*, 37(3): 342 – 348)
- Zhang J Q, Pan L and Wang S G. 2003. *Photogrammetry*. Wuhan: Wuhan University Press (张剑清, 潘励, 王树根. 2003. *摄影测量学*. 武汉: 武汉大学出版社)

Vehicle panoramic image matching based on epipolar geometry and space forward intersection

ZENG Fanyang^{1,2}, ZHONG Ruofei¹, SONG Yang², REN Miao³

1. Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application, Ministry of Education, College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;
2. Guangzhou Urban Planning Survey and Design Research Institute, Guangzhou 510060, China;
3. Jiangxi Province Institute of Remote Sensing Monitoring of Geographical Conditions, Nanchang 330025, China

Abstract: Vehicle-mounted mobile system based on panoramic camera can obtain panoramic images with exact position and posture information. Based on these data, we propose a method to generate panoramic epipolar images. First, we describe the process of constructing geometric constraints between two panoramic images in the spherical panorama model. Then the two panoramic epipolar images are matched using the SIFT algorithm. Finally, according to the principle that the center of photography, namely image point and object point, are collinear, the collinearity equation of the panoramic images are deduced and the three-dimensional coordinates are calculated by the principle of the forward intersection.

The following steps are used to generate panoramic epipolar images. First, the baseline direction is determined according to the position and attitude of two panoramas. The Z axis of the panorama is then turned to the baseline direction by two rotations. Finally, the panorama is projected to the plane image according to the new coordinate.

The two panoramic epipolar images are matched using the SIFT algorithm to remove certain error matching points by panoramic epipolar geometry. This paper does not apply the conventional collinearity equations, but derives the relations between image point and object point in spherical model, and then in a unified coordinate system, derives the relations between corresponding image points in panoramic images and object point. Finally, the three-dimensional coordinates are calculated by the principle of forward

intersection. The coordinates (three values: $X Y Z$) for a pair of corresponding points can be calculated by four equations (one image corresponds to two equations) .

Three experiments were designed to verify the validity of the methods. In the first experiment, generating panoramic epipolar images, the column numbers of the homonymous points in two panoramic epipolar images are close, indicating that the epipolar images are correct. In the SIFT matching experiment, no obvious error matching points were observed for the panoramic epipolar image matching. In the final experiment, the three-dimensional coordinates was calculated using the panoramic intersection. The object space points calculated with the points in the point cloud were then compared to obtain the coordinate accuracy of about 10 cm to 20 cm.

Experimental results showed that the proposed method to generate panoramic epipolar images is effective, achieves the correct panoramic collinearity condition equations, can reduce the difficulty in panoramic image matching, improves the quantity and precision of the matching, and can be used to implement measurement based on panoramic images.

Key words: panoramic image, epipolarline, image match, intersection, mobile measurement system