

车载三维信息采集系统的室内直线特征提取方法

陈春朋¹ 胡少兴¹ 张爱武²

(¹北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191
²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 100037)

摘要 基于航位推算方法定位的车载测绘系统(VBMMS)可以有效地解决使用全球导航卫星系统(GNNS)定位带来的系统失锁问题。但当系统采集空间三维信息时,由于航位推算方法的误差积累,会造成较大的系统定位误差,严重影响最终的测绘精度。针对此问题,提出了利用同步定位及地图创建(SLAM)的算法对系统进行位姿矫正。从激光点云中提取出准确的特征信息是实现系统同步定位及地图创建的前提,结合室内结构化环境的特点,提出一种基于角度阈值的提取直线特征的算法。将算法应用到自主研发的车载移动测图系统中,实现了快速准确的直线特征提取,实验结果证明了该算法的有效性。

关键词 机器视觉;车载三维信息采集;线性拟合;角度阈值;航位推算;同步定位及地图创建

中图分类号 TP274.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s209005

Extraction Approach Based on Line Feature in Indoor Environment for Vehicle-Borne Three-Dimensional Acquisition System

Chen Chunpeng¹ Hu Shaoxing¹ Zhang Aiwu²

(¹School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China
²Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application, Capital Normal University, Beijing 100037, China)

Abstract The location of vehicle-borne mobile mapping system (VBMMS) base on dead reckoning can effectively resolve the problem of the global navigation satellite system (GNSS) outages. Whereas, due to the accumulation of dead reckoning error, the VBMMS may result in large systematic positioning errors and serious impact the final mapping accuracy when acquiring the space three-dimensional (3D) information. In this paper, the simultaneous localization and mapping (SLAM) is proposed to correct the location of VBMMS. The accurate feature extraction from the laser cloud points is the prerequisite for the robotic simultaneous localization and mapping. Considering the structure of indoor environment, a line feature extracting method based on the angle threshold is proposed. The novel method is implemented in the self-developed vehicle-borne 3D acquisition system and the experimental results demonstrate the validity of this method.

Key words machine vision; vehicle-borne three-dimensional acquisition; linear fitting; angle threshold; dead reckoning; simultaneous localization and mapping

OCIS codes 100.6890; 110.3010; 280.3420; 150.6910

1 引 言

室内环境是车载移动测图系统的常见工作环境,如何使系统在没有先验地图的室内环境下实现

精确的定位和完整的地图创建,具有重要的实用价值。同步定位及地图创建(SLAM)技术是实现机器人快速精确定位的常用算法之一^[1~4]。其中采集环

收稿日期: 2012-03-18; 收到修改稿日期: 2012-07-06

基金项目: 国家自然科学基金(40601081、41071255)、国防基础预研(SDDX2008117)、博士学科点基金新教师项目(20070006031)和国家科技支持计划(2012BAH31B01)资助课题。

作者简介: 陈春朋(1989—),男,硕士研究生,主要从事三维激光扫描技术方面的研究。E-mail: abc2757447@163.com

导师简介: 胡少兴(1972—),男,副教授,主要从事三维激光扫描、计算机视觉等方面的研究。

E-mail: husx@buaa.edu.cn

境路标信息是实现 SLAM 算法的基础。但基于点特征的 SLAM 算法由于在数据关联及地图维护方面的复杂性,限制了其在大规模环境中的应用。

当系统处于室内环境的结构化工作时,提取激光扫描仪采集点云的直线特征更为容易。且与点特征相比,提取线段特征能有效减少特征数目、降低计算复杂度、提高系统自定位的实时性与可靠性,因此,近年来基于直线特征的 SLAM 方法大量出现。文献[5]基于对称性和扰动(SP)模型的框架,从激光扫描点中提取直线特征用于描述室内环境,提出了一种基于最优控制的主动同时定位与建图方法;文献[6]提出了一种结合点特征及其方向矢量计算邻接矩阵代替提取直线特征的方法,但这种方法需要为环境地图提供邻接矩阵,不适合大规模环境的应用;文献[7]使用极坐标形式的直线特征进行定位和导航,但由于缺乏线段端点信息,需要结合视觉传感信息才能决定线段端点;文献[8]利用改进的随机抽样一致算法(RANSAC)算法实现直线的拟合,但 RANSAC 算法本身需要随机构造大量的初始模型并逐一进行验证,计算效率较低;文献[9]利用改进的 Hough 变换算法进行直线特征提取,其缺点在于把大量密集的属于不同直线上的点误识别为同一直线上的点;文献[10~12]详细论述了各种基于图像像素信息的直线特征提取方法,不适用于本系统。

本文结合室内结构化环境的特点,提出了一种基于角度阈值的点云分割算法,实现对点云数据的快速分割、提取及线性拟合。最终的实验结果表明,算法能够对激光点云数据进行准确的线性拟合,且计算复杂度并未增加,为 SLAM 算法的后续步骤提供了良好的基础。

2 系统简介

图 1 为自主研发的三维信息采集系统的示意图,其中 2D laser 是一个二维激光扫描仪,同时做为舵机带动旋转的三维信息获取模块。其工作原理可表述为,上位机通过通信系统控制系统平台及三维激光采集系统的运动。航位推算系统实时采集系统平台的位姿信息,并与三维信息采集系统采集的点云数据进行融合,从而达到获取空间三维信息的目的。二维激光采集系统通过采集空间直线特征信息,为后续实现 SLAM 算法提供良好的基础。

3 线段拟合

线段拟合算法的基本思想:判断哪些点属于同

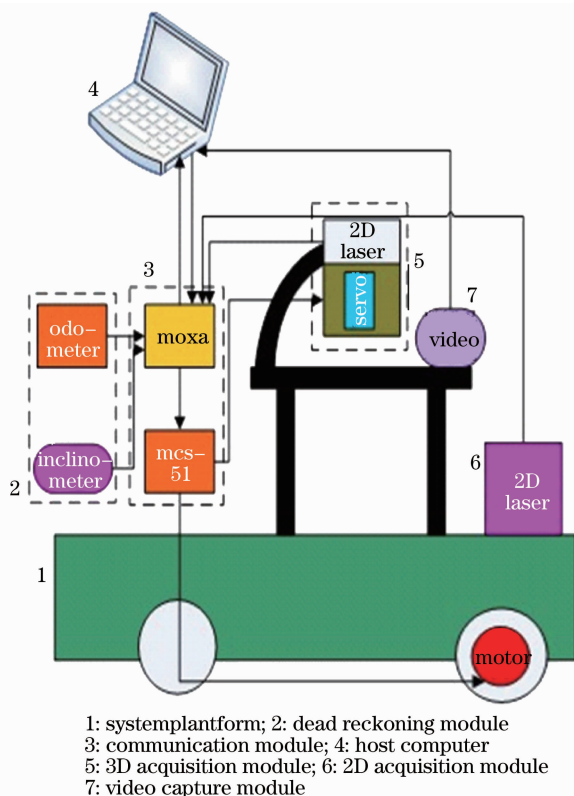


图 1 车载三维信息采集系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of vehicle-borne 3D acquisition system

一条直线,然后对这些点利用最小二乘误差原则进行拟合。所以在讨论如何进行线段拟合之前,首先要对点云的共线性约束条件做以下说明:

1) 属于同一拟合直线点云之间的距离需小于一个阈值,这是因为室内环境不是完全的静态环境,行人的走动等会生成一些点云杂点,对点云进行基于间距的分割可有效地滤除此类杂点。

2) 属于同一拟合直线的点云与邻域点云连线的夹角小于一个阈值,保证每个分割的点云区块是统计线性的。

3.1 点云分割

激光测距仪的原始坐标是以极坐标表示的,包含所测物体相对测距仪的距离信息及角度信息,通过坐标变换将采集的点云数据转化到世界坐标系下。

假设某一时刻,测距仪中心在世界坐标系中的位置为 (x_i, y_i, θ) ,测距仪采集的第 i 个点 p 的距离为 d_i 。所用激光测距仪为 SICK-LMS291,设置其扫描范围为 180° ,角分辨率为 0.5° ,如图 2 所示。那么,每个点 p 在世界坐标系下的坐标 (x_i, y_i) 为

$$x_i = x_i + d_i \cos(0.5i\pi/180 + \theta), \quad (1)$$

$$y_i = y_i + d_i \sin(0.5i\pi/180 + \theta). \quad (2)$$

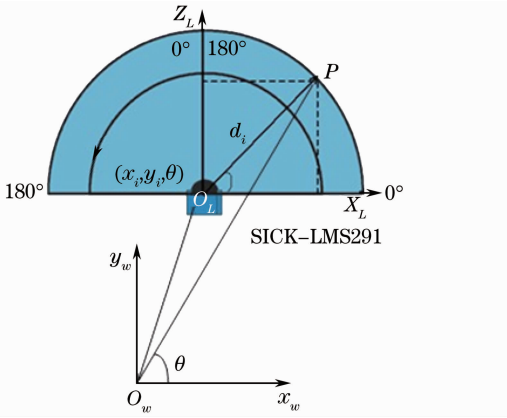


图 2 激光极坐标系到世界坐标系的转换
Fig.2 Conversion from laser polar coordinate system to world coordinate system

考虑到激光测距仪扫描的连续性,可以认为如果连续扫描的 2 帧数据间的距离大于一个阈值,那么此处可作为两条直线的分界点。所以在提取直线特征之前,需要先把每次扫描的数据进行分割。

如果连续两个采样点的距离小于一个阈值,这两个采样点属于同一个区块。如果连续两个采样点 p_j, p_{j+1} 的距离大于一个阈值 d ,数据帧就从这个地方分隔开。最后,就把 1 帧距离数据分隔成几个区块。分隔的区块表示为 R_i ,每一个区块包含从第 S_i 到第 E_i 个点,其中 S_i 和 E_i 分别是该区块的开始点和结束点,如图 3 所示。但由于行人等遮挡,直接进行点云分割可能存在两个问题:1) 激光脉冲扫描到行人身体上导致的杂点区块(S_{i+1}, E_{i+1});2) 将本属于同一区块的点云 E_i 及 S_{i+2} 分割到两个不同区块中。问题 1) 可基于杂点区块包含点云数量较少的特点,通过限定区块最少点云数量对杂点区块进行有效滤除。问题 2) 的解决办法在后续的最小二乘拟合部分进行详细讨论。

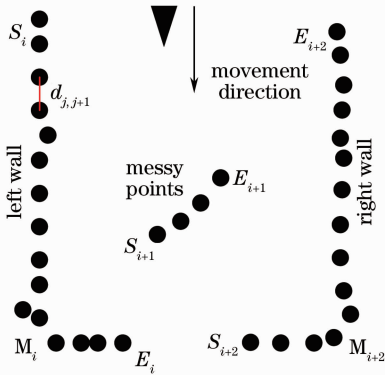


图 3 基于距离阈值的点云分割
Fig.3 Cloud points segmentation based on distance threshold

3.2 找寻线性区块

采样点分割完毕后,部分区块是线性的,可直接进行直线拟合。部分区块可能仍是非线性的,不能直接用直线进行线性拟合,需要进行继续分割。直到分割到采样点的每个区块都是统计线性的,再进行线性拟合。

鉴于室内环境结构化的特点,提出一种基于角度阈值的线性测试方法,如图 4 所示。

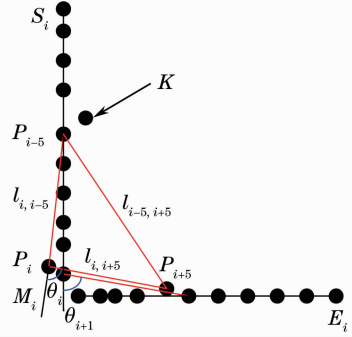


图 4 基于角度阈值的点云分割
Fig.4 Cloud points segmentation based on angle threshold

对一个分割的区块中的每个采样点 P_i ,与其前面的第五个点 P_{i-5} 连线生成直线 $l_{i,i-5}$,与其后面的第五个点 P_{i+5} 连线生成直线 $l_{i,i+5}$,前五点与后五点连线生成直线 $l_{i-5,i+5}$ 。 $l_{i,i-5}$ 与 $l_{i,i+5}$ 之间的夹角为

$$\theta_i = \pi - \arccos\left(\frac{l_{i,i-5}^2 + l_{i,i+5}^2 - l_{i-5,i+5}^2}{2l_{i,i-5}l_{i,i+5}}\right), \quad (3)$$

其下一采样点与其周围临近五点连线所组成的夹角为

$$\theta_{i+1} = \pi - \arccos\left(\frac{l_{i+1,i-4}^2 + l_{i+1,i+6}^2 - l_{i-4,i+6}^2}{2l_{i+1,i-4}l_{i+1,i+6}}\right). \quad (4)$$

设置分割的角度阈值为 α ,若 $\theta_i > \alpha$ 且 $\theta_{i+1} > \alpha$,说明连续两个采样点与其临近五点组成直线的夹角过大,存在拐角,该采样点为分割点。若 $\theta_i > \alpha$, $\theta_{i+1} < \alpha$,说明该点为奇异点,如图 4 中 K 点,将其滤除。若 $\theta_i < \alpha$,则认为这 11 个点共线,进行下一采样点与其临近点的线性测试。这种方法不仅可以对点云进行更加合理的分割,还能剔除部分奇异点,使后续的直线拟合精度更高。

3.3 最小二乘拟合

经过分隔、再分隔后的区块由一组统计线性的采样点组成。虽然是统计线性的,但这些采样点并不是绝对地在一条直线上,而是分散在直线的两侧附近。可以用一条直线来近似这个线性的区块。已知线性区块内采样点的坐标,利用最小二乘拟合方

法可得出一条直线方程,使区块内所有采样点到这条直线的距离平方和最小。若每个线性区块包含 n 个激光点云 $[x(i), y(i)] (i=1, 2, \dots, n)$, 设直线斜截式方程为

$$y = kx + b, \quad (5)$$

式中未知参数 k, b 满足:

$$\begin{cases} k = \frac{\sum [x(i) - \bar{x}][y(i) - \bar{y}]}{\sum [x(i) - \bar{x}]^2}, \\ b = \bar{y} - k\bar{x} \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(i), \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y(i)$ 。

将未知参数 k, b 解出后,便可得出拟合的直线。但在实验过程中发现若一个线性区块垂直或近似垂直于 x 轴时,拟合出的线段有较大误差。若一线性区块拟合出的线段斜率 k 的绝对值大于一定值,认为此直线近似垂直于 x 轴,需将此线性区块中的所有点云绕原点顺时针旋转 90° ,使点云区块近似平行于 x 轴,再用(6)式进行拟合,然后将所拟合的线段绕原点逆时针旋转 90° ,便可得到理想的拟合线段。

在直线分割中,由于问题 2) 导致本属于同一条直线的线性区块 (M_i, E_i) 和 (E_{i+2}, M_{i+2}) 被拟合成两条线段(图 3),所以对最终拟合的线段需要进行同线性判断。同线性判断的方法是:若一条扫描线中,有几个线性区块拟合的线段斜率 k 及截距 b 都近似相等,认为这几个线性区块属于同一条直线。对这几个线性区块的点云进行合并,用(6)式进行重新拟合,得到最终的拟合线段。

3.4 直线特征降维

由于 SLAM 算法的计算量与特征参数的数量呈多项式关系,传统方法在表示直线特征时,需要 4 个参数,过多的参数会增加计算量,影响系统的实时性。为提高算法的计算速度,需对所拟合的直线特征进行降维。采用世界坐标系零点 to 拟合直线的垂

足坐标 (x_{i0}, y_{i0}) 代替所拟合的直线特征,如图 5 所示。

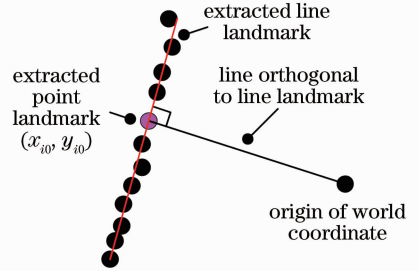


图 5 直线特征转化到点特征

Fig. 5 Extracted a line feature as a point

基于上述分析,整个算法可表述为以下几步:

- 1) 分割点云数据,计算一条扫描线内点云间距,并在距离大于设定阈值 d 的点云处将点云分割成几个区块。
 - 2) 对每个区块中的点云,计算其与邻域点云连线之间的夹角,在夹角大于某阈值处将点云再次分割,保证每个分割后的区块是统计线性的。
 - 3) 用最小二乘法拟合每个线性区块中的点云,拟合完毕后对所有拟合线段进行同线性判断,对符合同线性条件的线段,将其对应的线性区块融合,并重新进行线段拟合。
 - 4) 将拟合成的特征线段进行降维,用世界坐标原点到所拟合直线的垂足坐标表示特征。
- 特征提取完毕后,将其与状态空间里的已有特征进行匹配。若存在匹配特征则对机器人位姿进行更新,若不存在,则说明采集特征为新的环境特征,添加到状态空间中,实现地图更新。

4 实验分析

为验证上述算法,在自主开发的车载移动测绘系统平台上进行了实验,试验场地为实验室回形走廊,如图 6 所示。

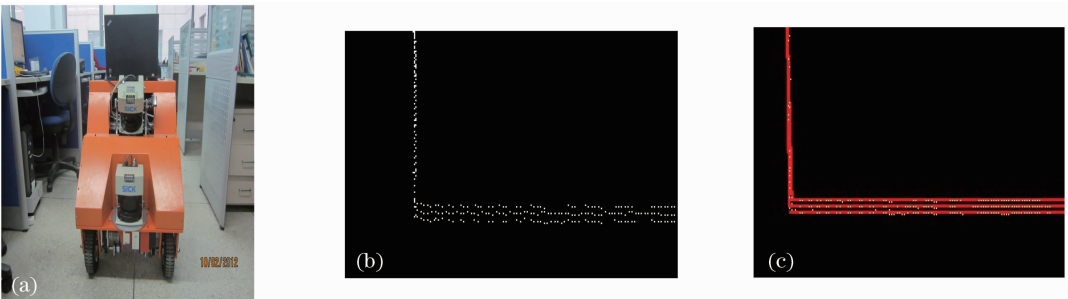


图 6 (a) 车载移动测图系统; (b) 回形走廊局部点云; (c) 直线拟合结果

Fig. 6 (a) Vehicle-borne mobile mapping system; (b) portion cloud points of loop corridor; (c) result of linear fitting

运用本文提出的算法,对采集的回形点云数据进行直线拟合,由图 6 可以看出,本算法可对点云进行准确线性拟合。将由线性拟合采集到的线段特征作为环境路标,应用 SLAM 到算法中,如图 7 所示。

采集回形走廊中含有明显特征信息的 12 个点云进行数据进一步的比较与分析,如表 1 及图 8 所示。

从表 1 及图 8 中可以明显看出,利用本文提出的直线拟合方法提取的直线特征,有效地解决了 SLAM 算法中特征提取的问题,提高了系统的定位精度。

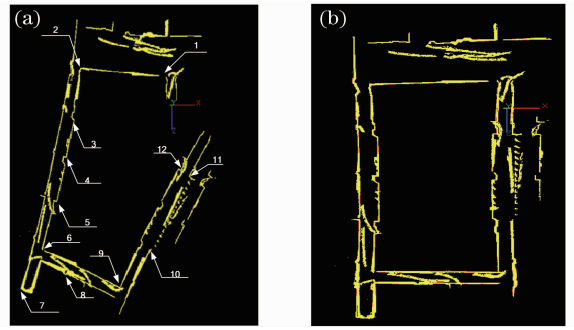


图 7 (a) 环形走廊的原始点云数据;(b) 环形走廊的校正后点云数据

Fig. 7 (a) Primitive cloud points of the circular corridor; (b) correction cloud points of the circular corridor

表 1 环形走廊特征点云的数据比对

Table 1 Feature cloud points comparison of the circular corridor

Serial number	True datas /mm	Original datas /mm	Calibration datas /mm
1	(-1230, -4200)	(-1139.5, -4332.6)	(-1287.2, -4562.4)
2	(-18030, -4200)	(-18621.2, -6497.6)	(-18062.0, -4182.7)
3	(-17400, 5080)	(-20186.3, 2916.6)	(-17125.1, 5106.2)
4	(-17400, 12300)	(-21745.6, 9442.4)	(-17052.4, 12449.2)
5	(-17400, 20100)	(-23814.8, 17400.2)	(-17561.3, 19865.0)
6	(-18030, 29100)	(-26760.1, 26005.1)	(-17779.4, 29025.3)
7	(-19930, 37300)	(-30826.6, 33093.4)	(-19617.5, 37152.7)
8	(-11500, 31000)	(-21629.3, 30370.3)	(-11492.7, 30839.7)
9	(-1030, 29100)	(-10827.1, 32809.7)	(-1058.2, 29098.1)
10	(830, 20200)	(-4526.2, 26132.2)	(831.9, 20083.1)
11	(830, 4660)	(3563.2, 12833.3)	(759.6, 4463.4)
12	(-1150, 4660)	(1807.6, 11822.9)	(-1244.3, 4558.4)

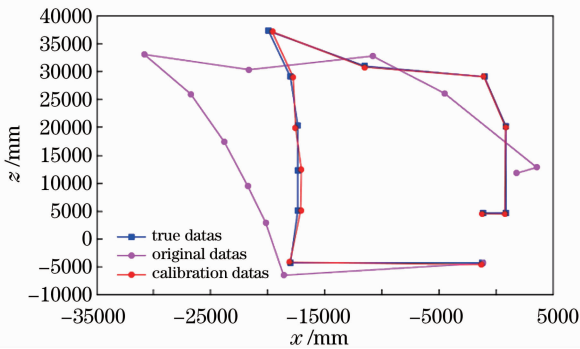


图 8 修正效果

Fig. 8 Result of calibration

5 结 论

从实验结果看出,本算法实现了对点云数据的准确线性拟合。将拟合得到的直线特征作为 SLAM 算法中的环境路标,正确地实现了 SLAM 算法,并最终提高了整个系统的定位精度。

参 考 文 献

- 1 J. A. Castellanos, J. M. M. Montiel, J. Neira *et al.*. The SPMAP: a probabilistic framework for simultaneous localization and map building [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1999, **15**(5): 948~952
- 2 W. Burgard, D. Fox, H. Jans *et al.*. Sonar-based mapping with mobile robots using EM[C]. San Francisco: Proceedings of the Sixteenth International Conference on Machine Learning, 1999. 67~76
- 3 A. Eliazar, R. Praa. DP-SLAM: fast, robust simultaneous localization and mapping without predetermined landmarks[C]. Acapulco: Proceedings of the 18th international joint conference on Artificial Intelligence, 2003. 1135~1142
- 4 R. M. Eustice, H. Singh, J. J. Leonard *et al.*. Visually mapping the RMS Titanic: conservative covariance estimates for SLAM information filters [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2006, **25**(12): 1223~1242
- 5 Wu Tao, Sun Fengchi. An active SLAM approach based on line segment feature in indoor environment[J]. *Robot*, 2009, **31**(2): 166~170
- 6 武涛, 孙凤池. 一种基于直线特征的室内环境主动 SLAM 方法[J]. *机器人*, 2009, **31**(2): 166~170
- 7 Chen Jiaqian. Reserch on Autonomous Mapping of Mobile Robot [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009

- 陈家乾. 移动机器人自主创建环境地图的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009
- 7 K. O. Arras. Feature-based Robot Navigation in Known and Unknown Environments [D]. Lausanne: Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2003
- 8 Pan Guorong, Gu Chuan. Research on fitting line automatic extraction algorithm of 3d laser scanning[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2009, **29**(1): 57~63
- 潘国荣, 谷 川. 三维激光扫描拟合直线自动提取算法研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2009, **29**(1): 57~63
- 9 J. Cha, R. H. Cofer, S. P. Kozaitis. Extended hough transform for linear feature detection[J]. *Pattern Recognition*, 2006, **39**(6): 1034~1043
- 10 Yu Weili, Wang Wenfeng, Zhang Xuguang *et al.*. Extracting straight lines from building image based on edge orientation image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2904~2911
- 于伟利, 王文锋, 张旭光 等. 基于边缘方向图的建筑物直线特征提取[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2904~2911
- 11 J. B. Brian, A. R. Hanson, E. M. Riseman. Extracting straight lines[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, **8**(4): 425~455
- 12 Y. S. Lee, H. S. Koo, C. S. Jeong. A straight line detection using principal component analysis [J]. *Pattern Recognition Lett.*, 2006, **27**(14): 1744~1754

栏目编辑:李文喆