

一种基于模糊阈值的直线拟合策略在铁路沿线 柱体检测及距离估计中的应用

李贻华^{1),2)} 刘云辉^{1),2)} 蔡宣平¹⁾

¹⁾(国防科学技术大学四院,长沙 410073) ²⁾(香港中文大学自动化与计算机辅助工程学系,香港)

摘要 首先提出了一种单幅图像中由边缘检测自动估计铁路沿线柱体到铁轨大致距离的方法,该方法主要通过
对铁轨及其沿线柱体的检测、分类识别和距离估计来完成。因为如何在有畸变和复杂背景的图像中准确和有效检
测边缘在图像处理和模式识别中一直是一个关键而困难的问题,为此提出了一种基于模糊阈值的直线连接拟合策
略,该策略主要包括 3 个步骤:边缘提取、角点检测和基于模糊阈值的直线递归拟合。该策略可以有效地在有图像
畸变和复杂背景的实际拍摄图片中通过参数控制获取感兴趣目标的直线边界。实验结果证明本文的直线拟合策
略是精确的和具有鲁棒性的,距离估计方法是有效的。

关键词 直线提取 直线拟合策略 模糊阈值 目标检测 模式识别 Kalman 滤波

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2006)08-1120-07

A Line Extraction Algorithm Based on Fuzzy Threshold Applied in Poles Detection and Distance Estimation

LI Gan-hua^{1),2)}, LIU Yun-hui^{1),2)}, CAI Xuan-ping¹⁾

¹⁾(National University of Defense Technology, Changsha 410073)

²⁾(Department of Automation and Computer Aided Engineering, Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China)

Abstract A novel method is presented to estimate the distance between the railway and the poles along the railway in one
image based on the edge extraction of the poles. It has three main parts which are poles and the railway detection, poles
classification and distance estimation. In the image with distortion and complex background, how to effectively and
accurately detect the edges of the target is a crucial and difficult issue for image understanding and pattern recognition. This
paper presents a robust straight-line extraction algorithm to solve this problem. This algorithm can extract the exact straight
line edges of interesting target in the image with distortion and the complexity of scenes based on a fuzzy threshold and line
fitting. The three main steps of the algorithm are edge detection, corner detection and the straight-line fitting based on fuzzy
threshold method. The experimental results on real images demonstrate that the straight-line extraction algorithm we
proposed is superiorly accurate and effective, and the distance estimation method is effective.

Keywords straight-line extraction, straight-line fitting, fuzzy threshold, target detection, partition recognition, Kalman
filter

1 引言

随着铁路运输业的快速发展,铁路运行安全和

监控管理变得越来越重要。为了对铁路沿线电力设
施进行辅助监控及管理,需要检测分类铁路沿线柱
状物并估计它们到铁轨的距离并为铁路沿线 3 维虚
拟系统提供相关信息,同时可以对距离铁轨太近的

基金项目:国家自然科学基金项目(60334010,60475029)

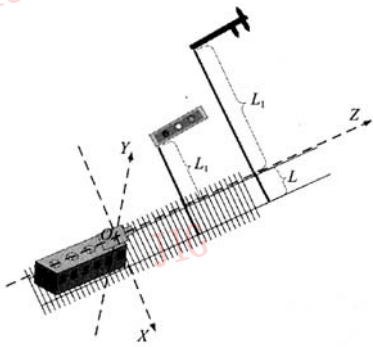
收稿日期:2005-03-04;改回日期:2005-10-08

第一作者简介:李贻华(1977~),男,国防科技大学电子科学与工程学院信息通信系博士研究生。研究方向为图形、图像处理与机
器视觉技术。E-mail: liganhua666@163.com

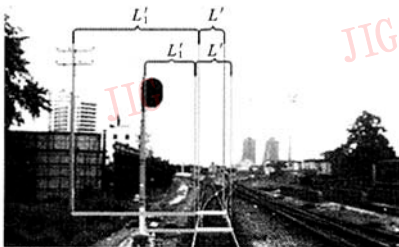
柱状体进行检测。本文提出了一种可以在复杂背景和畸变的图像中准确检测和提取感兴趣直线的直线拟合策略。对于单幅没有标定的相机拍摄的没有深度和 3 维信息的图片,基于该策略提出了一种可以自动地检测获取铁路沿线柱状物到铁轨的大致距离的估计方法。

如图 1 所示,放置摄像机在火车的前部,基本保持相机光轴和火车运行方向相同,在火车行进中前向拍摄图片。因为铁路沿线柱状物本身和表示其到铁轨距离的垂直线和相机光轴具有垂直关系,故有相同深度信息。这样在同一深度的平面中的景物在拍摄图像中的尺寸和实际尺寸有尺度变化关系。又因为我国铁轨的宽度具有统一标准,所以如图 1(b) 所示,在拍摄图像中检测到柱状物底部点位置和铁轨的两条边后,该点到铁轨的水平距离为 L'_1 ,同水平线上铁轨两边距离为 L' ,铁轨的实际宽度为 L ,由下式可以计算出柱体到铁轨的大致真实距离 L_1 。

$$L_1 = L'_1 \times L/L' \quad (1)$$



(a) 相机设置模型图



(b) 拍摄图片及简单距离估计模型原理

图 1 距离估计基本原理

Fig.1 The camera arrangement

直线可以看作是柱体边缘的主要特征,但是由于拍摄图像中的复杂背景和火车运动带来的畸变是

两个图像处理中一直很难解决的问题,很难精确检测柱体边界和底部。对于复杂背景的直线提取已经有很多的方法^[1,2],但是对于有畸变的图像的直线提取仍然是一个难于解决的问题。所以针对上述复杂背景和畸变问题,提出了一种主要基于直线拟合和模糊阈值的直线连接策略。该策略主要包括 3 个步骤:边缘提取、角点提取和基于模糊阈值的直线连接。同时在铁轨检测当中用到了卡尔曼滤波来完成铁轨边缘的跟踪提取。试验结果表明,本文提出的直线拟合策略是精确和具有鲁棒性的,而提出的距离估计方法得到的结果是有效的。本文主要介绍直线拟合连接策略的算法和在柱体到铁轨距离估计实例中的应用。

2 恶劣条件图像

使用灰度图像作为待处理图像。对于清晰简单的图像,用通常的直线提取方法(例如 Hough 变换, BURNS 直线提取等方法^[2])理论上应该是连续的直线,可以准确地确定直线的长度和位置。但是在恶劣的条件下,伴随着复杂背景和图像畸变的问题,在快速行进的火车上拍摄的图像中就很难和在清晰图像中一样检测直线和对直线定位了。主要有以下两方面的原因

(1) 复杂背景 由于柱体背景和亮度的剧烈变化,目标的直线边缘断裂为许多的不连续线段,这样很难在杂乱的线段中判断哪些线段是目标连续直线边缘的一部分。

(2) 图像畸变 由于在快速运动中,拍摄获得的图像的变形是很明显的。本应为垂直到铁轨的柱体边缘出现了弯曲和倾斜,使得直线变成了具有弧度的曲线。

3 直线连接拟合策略

直线常常作为一种重要特征来对人工场景和目标进行分析。为了解决在上述恶劣条件下拍摄图片中的感兴趣直线的提取问题,提出了一种直线连接拟合策略。其中主要包括边缘提取、角点提取和直线拟合 3 个步骤。

3.1 边缘提取

对于图像中边缘的提取有许多方法^[2,3],这里采用基于 Embedded Confidence 的边缘提取方法^[3],

因为该方法使用灵活,对噪声抑制效果好,并且边缘检测结果已经细化。

3.2 角点提取

现在对于图像角点提取的方法主要有以下 3 类: Harris 角点检测法^[4]、Susan 角点检测法^[5]和 CSS(curvature scale space corner detector)角点检测法^[6]。由于这里 CSS 角点提取可以对角点在边缘线上的曲率和角点之间的距离进行控制,因此这里采用 CSS 的角点检测方法,并在该方法中由上述使用的边缘检测方法完成边缘提取。

3.3 直线拟合

对于两条直线段,以图像中心为坐标中心,它们极坐标下方程表达式的一组参数角度 φ 和距离 r 可以完全和唯一地表示它们的共线与否,也就决定了它们的共线“相似度”。但是共线并不能说明它们之间一定存在边缘和它们是边缘断裂的两线段,这两条直线段的端点的最小距离越小且两线段中最短线段越长则存在边缘或有边缘检测出现断裂的可能性越大,所以这两个因素决定了它们的共线“相近度”。

利用两条直线段的“相似度”和“相近度”来对直线集合进行两两判断拟合重组。模糊阈值被提出作为直线两两是否应该连接拟合的判断标准。在这里使用最小二乘法来拟合直线。

如果用 α 表示直线参数对 (φ, r) 中一个参数,那么另一条直线的对应参数和该参数的相似度将符合下式所示高斯分布:

$$d(x) = e^{-k(x-\alpha)^2} \quad (2)$$

$d(x)$ 表示两个对应参数的差别,而 x 表示和 α 对应的另外一条直线的方程参数。这里 $k > 0$, 并且可由下式计算得到:

$$\begin{cases} k = \frac{1}{2\sigma^2} \\ \sigma = \frac{aP_\alpha}{3} \end{cases} \quad (3)$$

这里意味着高斯分布的 3σ 点等于 aP_α (这里令 P_α 为 50%)。

因此相对两条直线中两对直线方程参数,任意一对的相似度可以由下式得到:

$$\mu_\alpha = \cos n_i (k_i (1 - d(x))) \quad (4)$$

这里令 $n_i = 3, k_i = \pi/2$ 。因此对于两条直线对应的两对参数,可以得到这两条直线的相似度^[12]的值为

$$\mu_1 = k_1\mu_r + k_2\mu_\varphi \quad (5)$$

$k_i (i = 1, 2)$ 表示每个参数的相似度对应的权值。可以认为两个参数对相似度的影响相同,则令 $k_1 = k_2 = 0.5$ 。

而对于两条直线的相近度可以构造方程由下式获得:

$$\mu_2 = e^{-D_{\min}/L_{\min}} \quad (6)$$

这里, D_{\min} 表示两条直线的端点的最小距离, L_{\min} 表示两条直线中较短的一条直线的长度。因此由式(5)、(6)和下式得这两条直线的模糊判断阈值为

$$\mu = k_3\mu_1 + k_4\mu_2 \quad (7)$$

这里 $k_i (i = 3, 4)$ 同样表示两个权值。这里认为相似度和相近度影响判断直线是否需要拟合连接的程度相同,故定义 $k_3 = k_4 = 0.5$ 。

4 距离估计方法

对于柱体到铁轨距离估计,采用由粗到精的处理方法。

其流程图如图 2 所示。

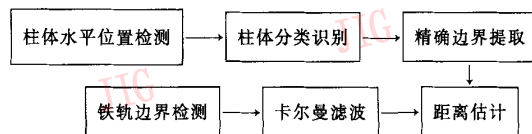


图 2 处理流程图

Fig. 2 The outline of the algorithm

4.1 柱体位置检测

由计算模型可知,图像中距离相机越远的柱体其计算误差越大。为了提高距离估计准确度,不检测和估计距拍摄相机较远的柱体和其距离。

图 3 所示是行进火车上拍摄的图片,由于大部分采集图像是在郊区采集获得,几乎大部分柱体顶部的背景是天空,基于该特征,首先对天空进行区域分割,如图 3(b) 所示,使用区域增长的分割方法进行分割。用垂直扫描线对于非天空区域从图像底部垂直向上到天空交界处停止建立垂直投影图,如图 3(c) 所示,柱体特征将不受顶部形状变化的影响。柱体特征和顶部坐标可以更明显和容易获得。这里对于投影图经过中值滤波之后用波峰的高度和宽度比来判断是否为柱体。本文用的阈值为 2。因此在投影图中检测点顶部坐标即为图像中柱体顶点坐标。



图 3 柱体顶点位置检测原理

Fig. 3 Shows the detection of top points of the poles in image

4.2 柱体分类识别

这里把检测柱体分为 3 类:电线杆、灯柱和一般柱体。对于检测到的柱体顶点由上至下,从柱体上一点向左右分别建立非天空区域水平投影直方图,及从柱体上一点水平向左右扫描到天空区域边界为止的扫描线长度作为水平投影直方图的相应位置方块高度值。如图 4 所示,在长度为 W 像素的范围内搜索左右对应水平投影直方图的第 1 个波峰对应的波峰的高度和宽度的比值为 P_L 和 P_R (如果存在),如果左或右边波峰不存在则 $P_L=0$ 或 $P_R=0$ 。

这里定义一个阈值 T ,从原理图容易得到下面柱体的定义分类公式。

$$\begin{cases} \text{电线杆} = \{\text{柱体} \cap \{P_L > T\} \cap \{P_R > T\}\} \\ \text{灯柱} = \{\text{柱体} \cap [\{(P_L > T) \cap (P_R = 0)\}] \cup [(P_L = 0) \cap (P_R > T)]\} \\ \text{一般柱体} = \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

如果 H 为图像高度,这里由实验使 $W = \frac{H}{7}, T = 1.2$ 。

4.3 精确边界提取

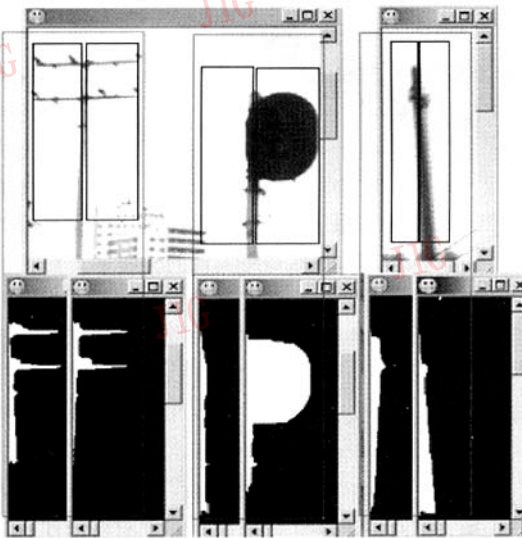
当柱体点得到之后应用上面介绍的直线连接拟合策略来完成柱体两边边界的准确提取。在这里应用了柱体两条主边界的相似对称性和存在底边终止线的终止性,其主要步骤如下:

(1) 以柱体检测顶点为上边中心点向下建立宽度为 W 的窗口区域,如图 5(a) 所示的黑色区域就是自动选择的窗口。

(2) 使用第 2 节所述的直线连接拟合策略提取直线。如图 5 为该策略的 4 个主要步骤的实验结果。注意在这里由于畸变等原因,柱体的边界接近垂直线,所以在角点提取之后每次拟合完直线只保留倾角在 $80^\circ \sim 110^\circ$ 之间的直线,其他的从直线集中删除。

(3) 在直线拟合连接之后的直线集中选择顶点左右两边最长的两条直线作为左右种子线,左边的为左种子线,右边的为右种子线。

(4) 在边缘检测结果图中由上到下从两条种子线中最低的端点到图像的底部和两条种子线之间的范围内检测第 1 条大于 $2/3$ 种子线间距的接近横向边界,再由柱体边界的对称性向下延长两条种子线到横向边界的最小纵坐标,向上到柱体顶点的纵坐标。这样完成柱体边界提取。



(a) 电线杆 (b) 灯柱 (c) 一般柱体

图 4 3 种柱体及其左右水平投影直方图

Fig. 4 The three kinds of poles and the horizontal projection histograms of left and right parts

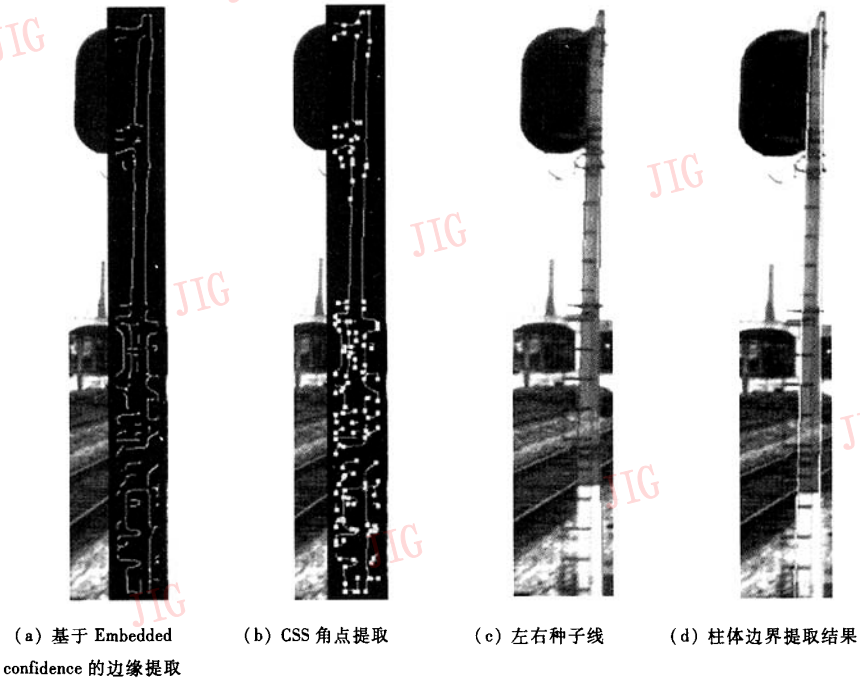


图 5 柱体主边界提取的 4 个主要步骤

Fig. 5 The experimental result of four main steps of precise edge extraction

4.4 铁轨边界检测

由于相机的设置方式,铁轨在拍摄图像的中下部,又因为铁轨一般比较清晰,容易从图像的底部向上利用跟踪法搜索检测到铁轨的边界。但是因为图像的噪声干扰和铁轨的叉道对跟踪的影响,使得铁轨边缘偏离或停止,所以这里利用卡尔曼滤波对信号运动模型的预测估计可以保持信号运动惯性的特点,这里用来对边界提取结果进行预测跟踪和平滑处理。图 6 是对应用铁轨边界跟踪和滤波的试验结果。

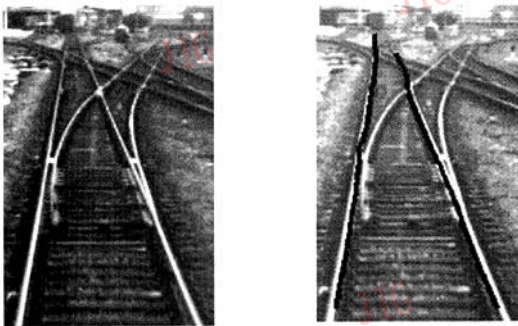


图 6 铁轨检测和滤波结果图

Fig. 6 The results of the railway detection with Kalman filter

5 试验结果

对行进火车上拍摄的 900×721 的灰度图像进行处理。在图 5 和图 7 显示了 4 幅典型的边界检测困难图片,其中图 5 矩形框表示将要检测柱体的所在区域。可以看出图 5(a)中和图 7 的 A 具有爬梯和行人的强噪声,图 5 和图 7 具有楼房、车站、管道和树木的复杂背景,图 7 的 D 和 E 具有很大的畸变,图 7 的 B、C 和 D 具有用较低的分辨率。对于此类 200 幅具有较大噪声干扰和畸变的图片作为输入图像。其中 198 幅图像的柱体被成功检测识别和准确的边界提取,只有两幅检测有误。图 8 显示图 7 的检测结果。实验中柱体顶部用不同灰度表示了柱体的种类结果如图 8 所示。我国铁轨的标准宽度是 1435cm,由式(1)可得到柱体到铁轨的大致真实距离。在实验拍摄的 200 幅实验图像中距离估计误差的均值为 257.63mm,均方差为 148.54mm,其中有在铁轨转弯处拍摄的图片的距离估计有相对大的误差,原因是拍摄图片检测的水平线不能和物理意义的距离线和对应铁轨宽度线对应。但是该方法在铁

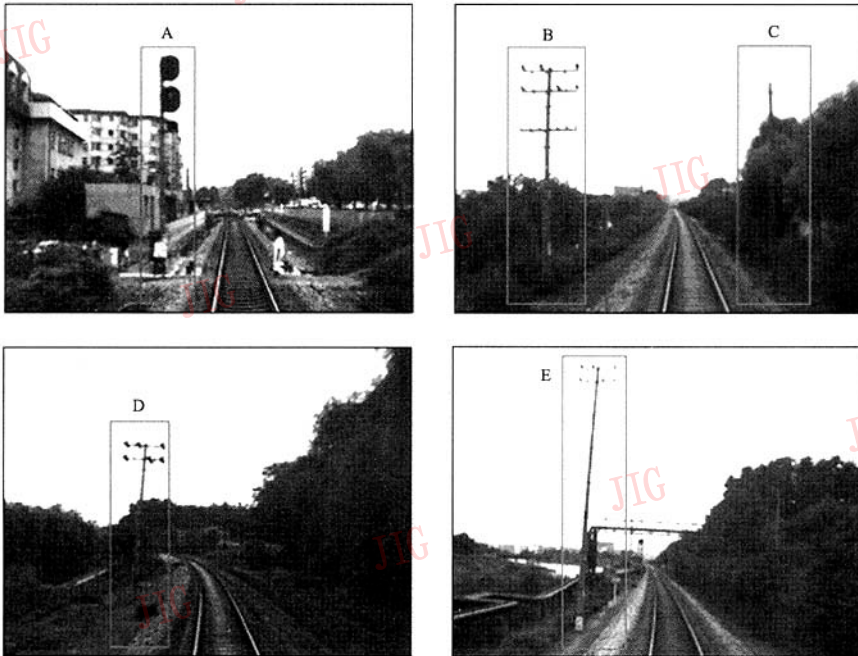


图 7 输入图像

Fig. 7 The input images

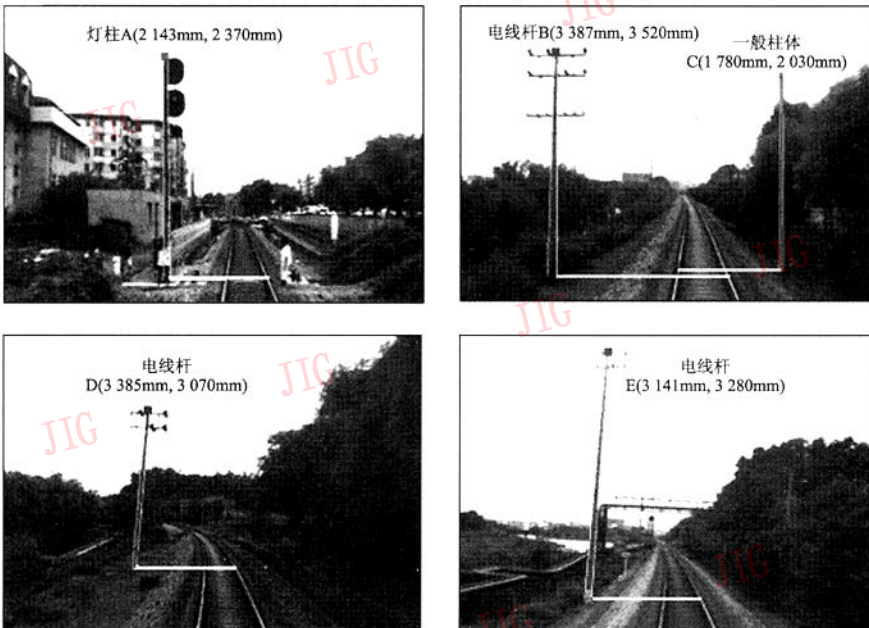


图 8 图 7 的检测试验结果(检测距离,实际距离)

Fig. 8 The experimental results of the distance detection

路沿线连续拍摄的图像中检索并分类铁轨沿线柱体,可以标注出它们距离估计值。并为铁路沿线电

力设施柱体部分 3 维虚拟漫游系统提供检测数据。实验结果表明该距离估计方法是有效可行的。

6 结 论

提出了一种利用模糊阈值来进行递归直线连接拟和的直线边缘提取算法。并基于该算法介绍了一个在行进火车上拍摄的无深度信息图像中检测分类铁路沿线柱体并估计其到铁轨距离的方法。该直线边缘提取算法可以有效解决图片中复杂背景和图像畸变对直线边缘检测带来的边缘断裂和变形的问题。实验结果表明该策略能够有效准确地检测提取在较大噪声下有形变的直线。最终的距离检测结果是有效可行的。

参考文献 (References)

- 1 Nevatia R, Babu K R. Linear feature extraction and description[J]. *Compute Graphics Image Processing*, 1980, 13(3): 257 ~ 269.
- 2 Burns J B, Hanson A R, Riseman E M. Extracting straight lines[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence*, 1986, 8(4): 425 ~ 455.
- 3 Meer P, Georgescu B. Edge detection with embedded confidence [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, December 2001, 23(12): 1351 ~ 1365.
- 4 Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector[A]. In: *The 4th Alvey Vision Conference* [C], Manchester, UK, 1988: 147 ~ 151.
- 5 Smith S M, Brady J M. SUSAN: A new approach to low level image processing [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 23(1): 45 ~ 78.
- 6 Mokhtarian F, Suomela R. Robust image corner detection through curvature scale space[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(12): 1367 ~ 1381.
- 7 Zhou D X, Li G H, Liu Y H. Effective corner matching based on delaunay triangulation [A]. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation* [C], New Orleans, LA, USA, 2004: 2730 ~ 2735.