

基于边缘特征的无砟轨道扣件定位方法

陈金胜, 陈兴杰, 彭乐乐, 张雯柏

(上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620)

摘要: 轨道扣件的精确定位是实现扣件缺陷检测的前提, 而常规的基于机器视觉的轨道扣件定位检测方法存在适应性差, 且易受光照强度及遮挡的干扰; 为了实现轨道扣件的快速精确定位, 提出基于边缘特征的轨道扣件定位方法; 通过在参考图像中选取标准扣件区域以生成匹配模板, 利用 Canny 边缘滤波算子获得边缘点的位置坐标及梯度方向; 在此基础上构建搜索模型并采用图像金字塔匹配搜索策略, 获得匹配分值的潜在匹配点; 并利用匹配阈值设定法, 逐层逐次跟踪潜在匹配点, 直至图像金字塔最底层, 以提高定位速度; 基于最小二乘法调整位姿参数, 使其达到亚像素级精度; 实验表明, 该方法具有鲁棒性强、定位速度快且不受光照变化及遮挡的影响, 定位精度达到 1/15 像素, 定位成功率大于 95%, 满足无砟轨道扣件定位需求。

关键词: 扣件定位; 边缘特征; 模板匹配; 图像金字塔; 最小二乘法

Locating Method of Ballastless Track Fastener Based on Edge Feature

Chen Jinsheng, Chen Xingjie, Pang Lele, Zhang Wenbai

(College of Urban Rail Transit, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: The precise positioning of the track fasteners is the prerequisite for the detection of fastener defects, while the conventional method of locating the track fastener based on machine vision is poor in adaptability and is susceptible to light intensity and shielding. In order to realize the rapid and accurate positioning of the track fastener, a method of locating the rail fastener based on the edge feature is proposed. By using the Canny edge filter operator, the position coordinates and the gradient direction of the edge point are obtained by selecting the standard fastener region in the reference image. On this basis, the search model is constructed and the image pyramid matching search strategy is used to obtain the matching score. And then use the matching threshold setting method to track the potential matching points one by one until the bottom of the image pyramid to improve the positioning speed. Based on the least squares method to adjust the pose parameters to achieve sub-pixel-level accuracy. The experimental results show that the method is robust and has good positioning speed and is not affected by illumination and occlusion. The positioning accuracy is 1/15 pixel, and the positioning success rate is more than 95%, which satisfies the positioning requirement of ballastless track fasteners.

Keywords: fastener positioning; edge feature; template match; image pyramid; least squares method

0 引言

轨道扣件用以联结钢轨与轨枕, 保持钢轨距离同时阻止钢轨与轨枕之间的纵横移动。轨道扣件的精确定位有助于扣件缺陷的检测, 对确保铁路的安全运营的具有重要意义^[1]。我国高速铁路以及地铁的轨道检测是在夜间进行的, 时间短任务重并且对于轨道扣件的检查基本上是采用人工巡检的方式, 极易受环境和人为因素的影响^[2]。如何快速、准确的定位扣件位置就成为十分首要的环节。

近年来, 随着视觉图像理论的快速发展和硬件设备功能的提高, 视觉图像处理技术以其非接触、快速、高精度、适用性强等优点在铁路轨道扣件定位方面的应用越来越多, 并且取得了很好的效果。马珊等^[3]采用 HOG 直方图对扣件特征进行描述, 然后利用汉明距离最邻近算法实现扣件的定位, 但是这种方法定位时间长而且容易受到干扰的影响; 吴梦等^[4]先通过统

计轨枕和钢轨区域的亮点从而实现对其大致区域的定位, 然后根据扣件位于钢轨及轨枕的交叉位置来实现其更进一步的定位提取, 但是这种方法对不同光照强度的图像定位适应性差而且精度不高; Xia 等^[5]采用灰度和梯度形结合的方法先粗定位轨枕位置, 再应用模板匹配的方法对扣件进行精确定位, 但是此方法粗定位效果差, 模板匹配时耗时较多。同时以上扣件定位方法均针对有砟轨道来实现的, 随着我国高速铁路大规模投入运营, 无砟轨道在总运营里程占比越来越高。较有砟轨道而言无砟轨道具有轨道板及轨枕区域纯净, 扣件及钢轨轮廓明显的特征, 同时高速铁路主要铺设在高架或隧道内, 拍摄图像受自然光照变化和遮挡的影响, 对扣件图像的定位要求除了定位精度高、匹配速度快还要求图像具有不受遮挡、光照变化的鲁棒性。总体而言, 采用基于像素的图像匹配方法具有精度高、鲁棒性强的优点, 而采用基于特征的图像匹配方法则具有速度快、运算量小的优点^[6-7]。

在分析了众多无砟轨道图像特征发现扣件的边缘最具有显著且可靠的特征信息, 国内外学者在基于像素和特征在表示及匹配^[8-10]方面也做出了一些卓越的研究。结合扣件图像的边缘特征进行模板匹配, 充分发挥上述基于像素和基于特征的匹配优点, 则能够满足无砟轨道扣件定位快速、精确、鲁棒性强的要求。

针对上述问题, 提出基于边缘特征的无砟轨道扣件定位方

收稿日期: 2017-09-01; 修回日期: 2017-10-23。

基金项目: 国家自然科学基金(51478258); 上海工程技术大学研究生科研创新项目(E3-0903-16-01255)。

作者简介: 陈金胜(1989-), 男, 河南开封人, 硕士研究生, 主要从事数字图像处理方向的研究。

陈兴杰(1975-), 男, 江苏南通人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事信号检测与图像处理方向的研究。

法。采用 Canny 边缘检测算子获得扣件模板和待搜索图像边缘点的坐标和梯度方向信息, 并以此为基础进行相似度量匹配。为了满足匹配的实时性要求设定停止标准, 同时采用图像金字塔的匹配搜索策略, 最后利用最小二乘法对匹配参数进行位姿调整, 使其坐标精度达到亚像素级。实验验证证明, 边缘特征的模板匹配方法对于存在光照变化、遮挡情况下的轨道扣件图像在保证快速匹配的同时, 其定位精度可以达到 1/15 像素。

1 相似度量

相似度量在图像匹配中用以衡量模板和待搜索图像之间的相似程度, 其值越大相似度越高。本文使用扣件模板和待搜索图像边缘点坐标及梯度方向, 作为计算相似度量的匹配信息。选取清晰无干扰的无砟轨道扣件图像构建匹配模板, 先对模板图像进行滤波, 再使用 Canny 边缘检测算子进行计算, 将模板图像转换为一个点集 $p_i = (r_i, c_i)^T, i = 1, \dots, n$, 其中每一个点 (r_i, c_i) 对应的梯度方向向量为 $d_i = (t_i, u_i)^T$ 。对待搜索图像进行同样的处理得到每个点 (r, c) 及其对应的梯度向量 $e_{r,c} = (v_{r,c}, w_{r,c})^T$ 。

将经过上述转换后模板图像进行仿射变换, 得到点集 $p'_i = Ap_i$, 梯度向量 $d'_i = (A^{-1})^T d_i$, 其中 A 为二阶标准旋转变换矩阵。为了使计算更方便分离出仿射变换中的线性平移分量, 转换后的模板图像能否对存在光照变化、遮挡条件下的待搜索图像具有鲁棒性的度量标准就是将它们所有像素点的方向向量作点积和。在待搜索扣件图像某个特定的点 $q = (r, c)^T$ 处, 计算变换过后模板与待搜索图像的相似度量值, 计算相似度量值的函数表示如下:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^T e_{q+p'_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t'_i v_{r+r'_i, c+c'_i} + u'_i w_{r+r'_i, c+c'_i} \quad (1)$$

将模板图像和待搜索图像使用同样的方法进行预处理, 然后应用式 (1) 计算模板及待搜索图像所对应边缘点梯度向量点积的总和。在轨道扣件图像存在部分被遮挡时, 由于被遮挡部分的边缘在待搜索图像中没有出现, 其相应部分梯度向量量值的总和就比较小, 则对点积总和基本上没有影响, 所以式 (1) 所计算的相似性度量对于部分遮挡情况下具有鲁棒性。在采用边缘提取算法求取图像边缘梯度向量时, 梯度向量的长度取决于图像的亮度, 所以式 (1) 中的相似度量算法受光照变化的影响。因此对式 (1) 进行归一化处理如下:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{d_i^T e_{q+p'_i}}{\|d'_i\| \|e_{q+p'_i}\|} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{t'_i v_{r+r'_i, c+c'_i} + u'_i w_{r+r'_i, c+c'_i}}{\sqrt{t_i^2 + u_i^2} \sqrt{v_{r+r'_i, c+c'_i}^2 + w_{r+r'_i, c+c'_i}^2}} \quad (2)$$

式 (2) 所有的梯度向量都进行了归一化处理变为 1, 如果模板或待搜索图像丢失了某个边缘特征将产生一些随机的噪声, 随机噪声的梯度向量平均值对点积的总和基本不会产生影响, 则相似度量可以不受光照变化的影响。为了在现实环境下能够更好的匹配成功轨道扣件图像, 对相似度量式 (2) 进一步修改如下:

$$S = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{d_i^T e_{q+p'_i}}{\|d'_i\| \|e_{q+p'_i}\|} \right| \quad (3)$$

2 加快匹配速度措施

如果对整个待搜索扣件图像进行遍历搜索的话将耗费极大

的运算, 是个极其耗时的过程。针对轨道扣件检测的实时性要求, 必须采用更加快速有效的搜索匹配策略, 综合运用图像金字塔算法和设置匹配分值的停止标准提前终止相似度量运算来实现这一目的。

2.1 图像金字塔

对整个无砟轨道扣件图像进行相似度量运算是一项庞大的计算量, 其算法的时间复杂度为 $O(whn)$, 其中待搜索扣件图像的宽和高用 w 和 h 表示, n 表示模板图像中像素个数。由此可知, 模板及待搜索图像的大小决定了相似度量的时间复杂度。采用图像金字塔的分层搜索策略可以使算法的时间复杂度成指数级别降低, 所以构建模板及待搜索图像的图像金字塔是一种快速有效的方法。这是因为每增加一层图像金字塔, 相应的模板和待搜索图像中的点数都将变为原来的四分之一, 理论上而言其运算量将变为原来的十六分之一, 例如在图像金字塔第五层进行匹配时, 与原始图像计算量相比减少了 65536 倍, 无砟轨道扣件图像金字塔实例如图 1 所示。

经过对比验证使用 2×2 的均值滤波器来创建模板及待搜索图像的图像金字塔其构建效果最佳, 在能够识别扣件结构的最顶层金字塔进行完整的搜索来匹配相似性度量以定位潜在的匹配位置, 并依次将匹配结果跟踪映射到金字塔图像最底层。

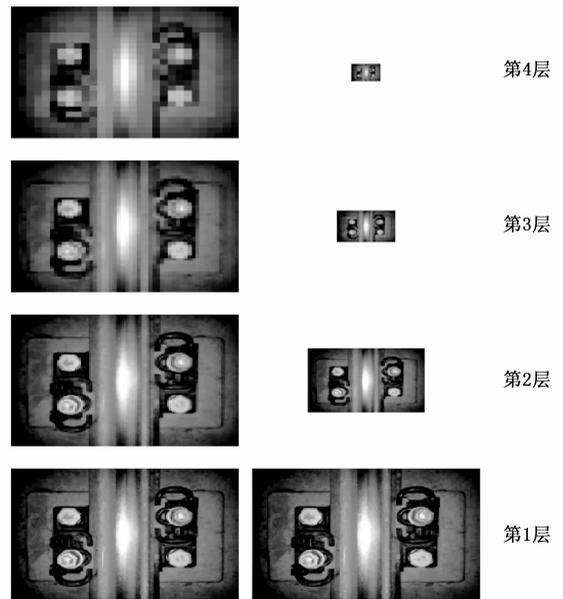


图1 无砟轨道扣件图像图像金字塔

2.2 停止标准

对整幅待搜索扣件图像进行匹配搜索时, 其潜在的归一化相似度量匹配分值将小于 1。匹配分值为 1 意味着待搜索扣件图像的结构特征和模板图像完全一样, 由于现实条件下存在各种干扰这种情况一般不会出现, 根据此特性设定一个适当的阈值 S_{min} , 在匹配分值达到 S_{min} 时就默认为模板及待搜索图像匹配成功来提前结束计算。设扣件模板图像前 j 个元素的归一化点积部分总和为 S_j , 其相似度量表示公式为:

$$S_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^j \frac{d_i^T e_{q+p'_i}}{\|d'_i\| \|e_{q+p'_i}\|} \quad (4)$$

由 (4) 式可知, 点积总和和中剩余的 $n-j$ 项都小于 1, 因此当部分和满足 $S_j < S_{min} - 1 + \frac{j}{n}$ (其中 S_{min} 为设定的阈值)

时,对应匹配分值的局部最大值也达不到设定的阈值 S_{min} 。满足上述条件时在第 j 个元素后就停止计算模板及待搜索图像的相似度量,因此设置停止标准的搜索策略非常高效。

3 提高匹配精度措施

采用图像金字塔逐步求精的方法得到像素级的定位精度,更精确的扣件定位有助于更好的保障轨道扣件缺陷的检测,使用最小二乘法进行多次位姿调整可以实现这一目标。设 $q_i = (r'_i, c'_i)^T$ 表示待搜索图像中点,模板图像中与其相对应的像素点为 p_i 。对模板和待搜索图像提取边缘,模板边缘点的梯度方向向量和待搜索图像的边缘相垂直,通过模板边缘点并与待搜索图像边界相切的直线方程表示为:

$$t_i(r - r_i) + u_i(c - c_i) = 0 \quad (5)$$

仿射变换后的模板图像,在待搜索图像中找到其欧几里得距离最小点作为潜在像素点,欧几里得距离计算公式如式(6)所示:

$$d_e = \sqrt{(r'_i - r)^2 + (c'_i - c)^2} \quad (6)$$

由式(5)推理可知 $t_i(r' - r_i) + u_i(c' - c_i) = 0$ 成立,将式(7)函数最小化可以求得位姿 a 更加精确的参数:

$$d(a) = \sum_{i=1}^n [t_i(r'_i(a) - r_i) + u_i(c'_i(a) - c_i)]^2 \rightarrow \min \quad (7)$$

基于最小二乘法调整位姿参数,可能影响到特征点之间的对应关系,因此,进行一次位姿调整不能达到预期效果,多次进行优化可以达到较高的定位精度。大量实验表明多于三次的迭代优化对于定位精度没有明显的提高,因此重复 2 到 3 次即可获得精确的亚像素定位。

4 实验结果与分析

为了评估验证上述匹配方法对扣件的定位性能,针对研究存在非线性光照变化、遮挡条件下轨道扣件图像,拍摄现实条件下可能遇到的无砟轨道扣件图像共计 1 000 张。各类图像拍摄的多少参考现实情况下可能发生的概率,图像类型及对应的

张数见表 1。模板和待搜索图像及其相应的二值化边缘图像如图 2 所示。

表 1 图像类型及对应的张数

光照类型	图像张数/张
线性光照	300
非线性强光照	200
非线性弱光照	200
非线性强烈光照	100
线性光照及遮挡	100
非线性光照及遮挡	100

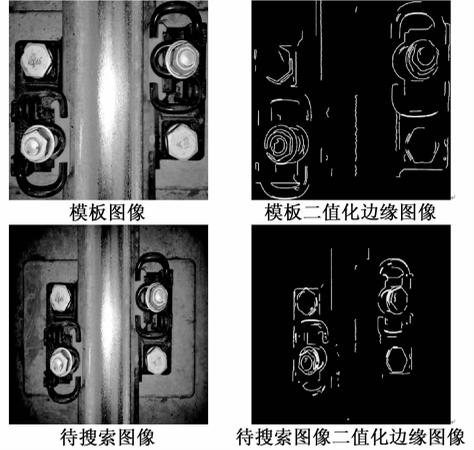


图 2 模板和待搜索图像及其相应的边缘图像

采用计算机参数为 Intel (R) Core (TM) i5-2300 CPU @2.80 GHz, MATLAB2014a 下进行编译。各类型待搜索扣件图像大小分为 256 pixel × 256 pixel、512 pixel × 512 pixel、1024 pixel × 1024 pixel 三种情况。按匹配成功张数、平均识别率、相同类型平均识别率、总体识别率进行整理,实验数据见表 2,各类型扣件图像定位结果如图 3 所示。

表 2 各类型待搜索图像的匹配时间和识别率

图像类型	图像总张数	图像大小 (pixel × pixel)	匹配成功张数	平均匹配时间/ms	平均识别率/(%)	相同图像类型平均识别率/(%)	总体识别率/(%)
线性光照	300	256 × 256	296	75	98%	99.33%	95.36%
		512 × 512	300	130	100%		
		1024 × 1024	300	202	100%		
非线性强光照	200	256 × 256	186	81	93%	95.17%	
		512 × 512	191	140	95.5%		
		1024 × 1024	194	217	97%		
非线性弱光照	200	256 × 256	181	79	90.5%	95.00%	
		512 × 512	193	138	96.5%		
		1024 × 1024	196	207	98%		
强烈光照	100	256 × 256	92	83	92%	94.67%	
		512 × 512	95	145	95%		
		1024 × 1024	97	224	97%		
线性光照及遮挡	100	256 × 256	92	80	92%	94.33%	
		512 × 512	94	139	94%		
		1024 × 1024	97	216	97%		
非线性光照及遮挡	100	256 × 256	91	86	91%	93.67%	
		512 × 512	94	143	94%		
		1024 × 1024	96	230	96%		

由表 2 可知, 线性均匀光照条件下图像相同类型平均识别率最高为, 为 99.33%, 其中 512 pixel \times 512 pixel、1 024 pixel \times 1 024 pixel 大小情况下识别率为 100%, 最低为非线性光照及遮挡情况下, 为 93.67%; 平均匹配时间耗时最少为 256 pixel \times 256 pixel 时, 在 80 ms 左右, 满足快速性的要求, 耗时最多为 1 024 pixel \times 1 024 pixel 时, 在 200 ms 左右, 说明相同大小不同干扰类型扣件图像耗费的匹配时间相差不大, 主要跟待匹配扣件图像大小有关; 其余相同图像类型下的平均识别率都在 94% 左右, 总体识别率为 95.36%, 这验证了本方法具有很好的稳定性和鲁棒性。在定位精度方面, 达到 1/15 像素, 实现亚像素级别的精确定位。从图 3 可以看出对于轨道扣件图

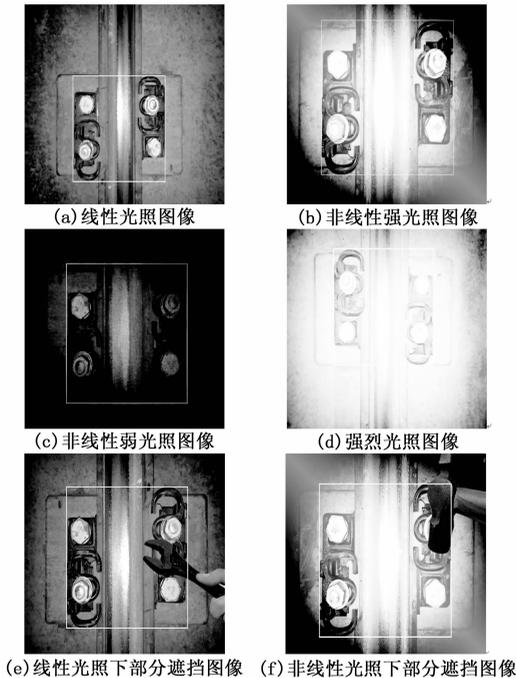


图 3 待搜索图像在存在遮挡、非线性光照变化条件下匹配结果

像存在线性、非线性光照、遮挡条件下, 都可以实现精确的定位。综合而言, 本文所采用方法对于无砟轨道扣件图像存在线性、非线性光照、遮挡条件下具有鲁棒性强, 同时具有定位速度快, 精度高的优点。

5 结论

本文将基于像素与基于特征的图像匹配方法相结合, 提取扣件边缘点坐标和梯度向量作为匹配信息, 提出一种基于边缘特征的无砟轨道扣件定位方法。通过设置停止标准及采用图像金字塔加快匹配速度, 使用最小二乘法提高匹配精度。实验检测证明该方法对于无砟轨道扣件图像出现线性、非线性光照及部分遮挡情况下, 能够得到很好地匹配效果, 在满足快速、稳定的前提下可以达到高精度的匹配结果。

参考文献:

- [1] 刘甲甲. 铁路扣件图像特征提取与识别方法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [2] 刘馨, 穆颖, 张斌. 基于计算机视觉的钢轨扣件检测算法研究 [J]. 华东交通大学学报, 2017, 34 (2): 72-77.
- [3] 马姗姗. 铁路扣件识别的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [4] 吴梦. 轨道缺陷自动检测系统的图像处理技术研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [5] Xia Y, Xie F, Jiang Z. Broken Railway Fastener Detection Based on Adaboost Algorithm [A]. International Conference on Optoelectronics and Image Processing [C]. IEEE, 2011: 313-316.
- [6] 刘军, 白雪. 基于梯度方向直方图与高斯金字塔的车牌模糊汉字识别方法 [J]. 计算机应用, 2016, 36 (2): 586-590.
- [7] 陈沈铁, 钱徽, 吴铮, 等. 模板图像匹配中互相关的一种快速算法 [J]. 传感技术学报, 2007, 20 (6): 1325-1329.
- [8] Peter A M, Rangarajan A. Maximum likelihood wavelet density estimation with applications to image and shape matching. [J]. IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2008, 17 (4): 458.
- [9] 周封, 杨超, 王晨光, 等. 基于随机 Hough 变换的复杂条件下圆检测与数目辨识 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34 (3): 622-628.
- [10] 吴晓军, 邹广华. 基于边缘几何特征的高性能模板匹配算法 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34 (7): 1462-1469.
- [11] 曹亚陆, 杨乐, 刘全胜, 等. 一种带二次等式约束的卡尔曼滤波目标跟踪算法 [J]. 软件学报, 2013, 32 (7): 659-665.
- [12] Kalal Z, Mikolajczyk K, Matas J. Tracking-learning-detection [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34 (7): 1409-1422.
- [13] Luo R, Ying L I, Qian G, et al. Particle Filter Algorithm Based on Improved Adaptive Resampling [J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 34 (3): 1635-1641.
- [14] Xiao J, Stolkin R, Leonardis A. An enhanced adaptive coupled-layer LGTracker++ [A]. IEEE International Conference on Computer Vision Works, ICCVW [C]. 2013, 137-144.
- [15] 王民, 周兆镇, 李昌华, 等. 基于像素点灰度差的 Harris 角点检测算法 [J]. 计算机工程, 2015, 42 (6): 227-230.
- [16] Song H J, Ming Z, Hu S. The real-time target track process system design and the fast arithmetic research [J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2005, 27 (3): 474-477.
- [17] 刘云清, 姜会林, 佟首峰. 大气激光通信中稳定跟踪器件及算法研究 [J]. 中国激光, 2012, 37 (5): 124-131.

(上接第 165 页)

参考文献:

- [1] 王鑫, 徐立中. 图像目标跟踪技术 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2012.
- [2] 覃为广, 宋鸿陟, 彭红星, 等. 改进的自适应颜色属性目标跟踪算法 [J]. 计算机工程与设计, 2016, 37 (3): 803-808.
- [3] 谢永华, 胡学岭, 张恒德. 基于多尺度分析的地基云图自动识别的研究 [J]. 计算机仿真, 2014, 31 (11): 212-216.
- [4] Feng L, Liu Z, Qi J. Study of target detection methods in video tracking system [J]. Microcomputer & Its Applications, 2014, 31 (4): 1356-1361.
- [5] Ning J, Zhang L, Zhang D, et al. Robust mean-shift tracking with corrected background-weighted histogram [J]. IET Computer Vision, 2012, 17 (1): 62-69.
- [6] Li W, Lin Y, Fu B, et al. Cascade Classifier Using Combination of Histograms of Oriented Gradients for Rapid Pedestrian Detection [J]. Journal of Software, 2013, 8 (1): 1532-1539.
- [7] 杨蕾. 基于云台摄像机的异常事件实时检测跟踪系统的设计与实现 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
- [8] 刘博, 陈剑, 周平, 等. 基于多特征的实时立体视觉检测方