

Journal of Image  
and Graphics

# 中国图象图形学报



ISSN1006-8961  
CN11-3758/TB

2012 8  
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所  
中国图象图形学学会主办  
北京应用物理与计算数学研究所

# 中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年8月 第17卷 第8期(总第196期)

## 目次

### 综述

可计算图像美学研究进展 ..... 王伟凝, 蚁静斌, 贺前华(893)

### 图像处理和编码

利用混沌 PSO 或分解的 2 维 Tsallis 灰度熵阈值分割 ..... 吴一全, 吴诗嫻, 张晓杰(902)

H. 264 并行编码中负载平衡方法 ..... 侯兴松, 刘大齐, 盛凯, 赖玉洁(911)

提升细节捕捉能力的非下采样轮廓波变换 ..... 郭洪, 李雪军(919)

SVD 域的图像高斯噪声强度估计 ..... 柳薇(923)

图像扩散去噪模型的分析与改进 ..... 傅绪加, 刘峰, 王信松(934)

小波域最小嵌入失真函数设计及其在隐写中的应用 ..... 李军, 潘峰, 杨晓元, 刘镇(946)

### 图像分析和识别

抗压缩的照片图像与真实感计算机图形识别 ..... 张荣, 王让定(953)

云的自适应阈值检测方法 ..... 黄茜, 王少龙, 徐道磊, 廖婷婷(960)

煤矸区分中的间隔灰度压缩扩阶共生矩阵 ..... 于国防(966)

离群样本划分的半监督模糊学习策略 ..... 宋晓宁, 杨静宇, 杨习贝(971)

多相 Chan-Vese 模型的直接对偶方法 ..... 刘存良, 潘振宽, 郑永果, 王国栋, 丁洁玉(979)

利用梯度信息快速提取直线边缘特征 ..... 夏军营, 徐小泉, 熊九龙(987)

2 维双树复小波不确定度加权融合的人脸识别 ..... 王仕民,叶继华,邓涛,王明文(995)

### 图像理解和计算机视觉

流形学习与非线性回归结合的头部姿态估计 ..... 范进富,陈锻生(1002)

### 计算机图形学

角点距离矩阵和同心圆划分的曲线描述与匹配 ..... 曾接贤,刘秀朋,符祥(1011)

弹性二次曲面模型下的 3 维形状表现与平滑 ..... 郝世杰,蒋建国,郭艳蓉,詹曙(1021)

### 医学图像处理

主动学习的白细胞图像自动分割 ..... 崔凤,潘晨,吴向平,徐军(1029)

### 遥感图像处理

Bregman 交替迭代遥感图像复原方法 ..... 徐焕宇,孙权森,罗楠,夏德深(1035)

基于各向异性 Markov 随机场的遥感影像亚像元尺度建筑物提取 ..... 李晓冬,凌峰,杜耘(1042)

## 中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 8 期

2012 年 8 月 16 日出版

**主管单位** 中国科学院

**主 办** 中国科学院遥感应用研究所  
中国图象图形学学会  
北京应用物理与计算数学研究所

**主 编** 李小文

**编辑出版** 《中国图象图形学报》编辑出版委员会  
北京 9718 信箱 邮编 100101  
电子信箱:jig@irsa.ac.cn  
电话:010-64807995 010-82614429  
网 址:www.cjig.cn

**印刷装订** 北京北林印刷厂

**广告经营许可证** 京朝工商广字第 0346 号

**总 发 行** 北京报刊发行局

**订 购** 全国各地邮局

**国外发行** 中国国际图书贸易总公司  
(中国国际书店)  
(北京 399 信箱 邮编 100044)

**Superintended by** Chinese Academy of Sciences

**Sponsored by** Institute of Remote Sensing Application,  
CAS China Society of Image and Graphics  
Institute of Applied Physics and Computational  
Mathematics

**Chief editor** LI Xiaowen

**Editor, Publisher** Editorial and Publishing Board  
of Journal of Image and Graphics  
(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)  
E-mail:jig@irsa.ac.cn

**Distributed by** Beijing Bureau for Distribution of Newspapers  
and Journals

**Domestic** All Local Post Offices in China

**Foreign** China International Book Trading Corporation  
(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)

**Printed by** Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

# Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 8 August 2012

## Contents

### Review

Review for computational image aesthetics ..... Wang Weining, Yi Jingjian, He Qianhua (893)

### Image Processing and Coding

Two-dimensional Tsallis gray entropy image thresholding using chaotic particle swarm optimization or decomposition  
..... Wu Yiquan, Wu Shihua, Zhang Xiaojie (902)

Load balancing for H. 264 parallel encoding ..... Hou Xingsong, Liu Daqi, Sheng Kai, Dun Yujie (911)

Non-subsampled contourlet transform algorithm to promote detail information capturing ability ..... Guo Hong, Li Xuejun (919)

Gaussian noise level estimation in SVD domain for images ..... Liu Wei (923)

Analysis and improvement of image diffusion denoising models ..... Fu Xujia, Liu Feng, Wang Xinsong (934)

Design of minimizing embedding impact function in DWT domain and its applications in steganography  
..... Li Jun, Pan Feng, Yang Xiaoyuan, Liu Zhen (946)

### Image Analysis and Recognition

Anti-compression approach to distinguishing photographic images and photorealistic computer graphics  
..... Zhang Rong, Wang Rangding (953)

Adaptive threshold approach for night-sky cloud inspection ..... Huang Qian, Wang Shaolong, Xu Daolei, Liao Tingting (960)

Expanded order co-occurrence matrix to differentiate between coal and gangue based on interval grayscale compression  
..... Yu Guofang (966)

Semi-supervised fuzzy learning strategy by using a way of partitioning the outlier instances  
..... Song Xiaoning, Yang Jingyu, Yang Xibei (971)

Direct dual method of Chan-Vese model for multiphase segmentation  
..... Liu Cunliang, Pan Zhenkuan, Zheng Yongguo, Wang Guodong, Ding Jieyu (979)

Fast line edge feature extraction using image gradients ..... Xia Junying, Xu Xiaoquan, Xiong Jiulong (987)

Two-dimensional dual-tree complex wavelet transform uncertainty weighted fusion in face recognition  
..... Wang Shimin, Ye Jihua, Deng Tao, Wang Mingwen (995)

### Image Understanding and Computer Vision

Combining manifold learning and nonlinear regression for head pose estimation ..... Fan Jinfu, Chen Duansheng (1002)

### Computer Graphics

Representation and matching for planar curve based on corner distance matrix and concentric circles  
..... Zeng Jiexian, Liu Xiupeng, Fu Xiang (1011)

Three-dimensional shape representation and smoothing with elastic quadratic patch model  
..... Hao Shijie, Jiang Jianguo, Guo Yanrong, Zhan Shu (1021)

### Medical Image Processing

White blood cell image segmentation based on active learning ..... Cui Feng, Pan Chen, Wu Xiangping, Xu Jun (1029)

### Remote Sensing Image Processing

Bregman alternating iterative method for remote sensing image restoration ..... Xu Huanyu, Sun Quansen, Luo Nan, Xia Deshen (1035)

Building extraction at the sub-pixel scale from remotely sensed images based on anisotropic Markov random field  
..... Li Xiaodong, Ling Feng, Du Yun (1042)

中图法分类号: TP394.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)08-0987-08

论文引用格式: 夏军营, 徐小泉, 熊九龙. 利用梯度信息快速提取直线边缘特征[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(8): 987-994.

## 利用梯度信息快速提取直线边缘特征

夏军营, 徐小泉, 熊九龙

国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 长沙 410073

**摘要:** 立足于视觉检测系统的实时性需要, 提出一种利用梯度信息的快速直线边缘提取方法。该方法首先利用梯度信息和两点确定一条直线进行线段基元的快速定位和扫描; 然后对扫描得到的线段基元进行基于几何距离最小化的最佳直线拟合; 最后使用端点投影距离的方法对线段基元进行共线性检测, 连接共线的线段基元并对连接结果重新进行最佳直线拟合, 得到最终的直线边缘特征。实验结果表明: 该方法进行直线边缘特征提取的速度比目前文献中最快的 Hough 变换改进算法提高了 1 倍左右, 适应能力强, 可以满足视觉检测系统对直线边缘特征提取的实时性和精度要求。

**关键词:** 计算机视觉; 直线检测; 梯度; 线段基元; 直线拟合

## Fast line edge feature extraction using image gradients

Xia Junying, Xu Xiaoquan, Xiong Jiulong

College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

**Abstract:** In order to meet the real-time requirements of vision detection systems, an efficient line edge extraction method using image gradient is proposed. First, by using gradient information of the image and the property that two points define a line, line segments in the image are quickly located and scanned. Then, the scanned line segments are fitted through a method minimizing the geometric distances. Finally, a collinearity judging approach based on the projection distances of line segment endpoints is applied to all the line segments, after which the collinear line segments are linked together and re-fitted to obtain the final line edge features. Experimental results indicate that the time consumed by the proposed method is only about a half of the fastest improved Hough transform method. Furthermore, with the given parameters, the method is highly adaptable to different images. It can satisfy the real-time and precision requirements of the line edge feature extraction processes in various vision detection systems.

**Key words:** computer vision; line detection; gradient; line segment; line fitting

## 0 引言

直线边缘特征是图像中最主要的结构信息之一, 是理解图像的重要线索。直线检测是计算机视觉和图像处理中的一个基本任务, 广泛应用于摄像机标定<sup>[1]</sup>、道路边界识别<sup>[2]</sup>和工业检测<sup>[3]</sup>等领域。

研究者们提出过很多不同的直线检测方法, 其中基于 Hough 变换的方法应用最为广泛。Hough 变换<sup>[4]</sup>利用点和直线之间的对偶性, 把图像空间中的直线检测问题转换为参数空间中点的检测问题, 通过在参数空间进行简单的累加统计完成直线检测。该算法抗噪性能很强, 可以应用于低信噪比的图像, 但是运算量和内存消耗都很大, 在许多场合难以实

收稿日期: 2011-11-04; 修回日期: 2012-03-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)基金项目

第一作者简介: 夏军营(1983—), 男, 国防科技大学仪器科学与技术专业博士研究生, 主要研究方向为图像处理、视觉测量。E-mail: shenxjy@163.com

际应用。多分辨率 Hough 变换<sup>[5]</sup>利用由粗到精的搜索策略对 Hough 变换进行加速。概率 Hough 变换<sup>[6]</sup>通过对原始边缘图像进行随机抽样,减少参与计算的点数从而实现加速。随机 Hough 变换<sup>[7]</sup>在使用随机抽样的同时提出了“多对一”的映射机制,并使用动态链接表对参数空间进行管理,提高速度的同时也减少了存储空间占用。文献[8]使用局部不确定性度量的映射机制,提高了 Hough 变换的精度和抗噪性能。总的来说,这些改进还未能使 Hough 变换的复杂性得到根本的改变。

另外一类应用较为广泛的直线检测方法为基元聚类法,因为它们都是首先根据一定准则将同类的基元(像素或线段)组合到一起,然后进行直线拟合得到目标直线。基于像素聚类的方法<sup>[9]</sup>由于直接对灰度图进行操作,算法比较复杂。基于线段基元的方法,一般通过对边缘图像进行启发式连接<sup>[10]</sup>或链码跟踪<sup>[11]</sup>得到较短的线段,然后再对共线的线段进行分组和拟合得到不同的直线。文献[12]首先对图像进行分块和二值化,然后直接对二值化的分块图像进行链码跟踪得到线段基元,省去了边缘检测的过程,提高了速度。

近来也有一些算法结合了以上两类算法的优点。文献[13]采用了一种基于直线参数不确定度的核映射机制,以线段基元为单位进行 Hough 变换,显著提高了算法效率,是目前执行速度最快的一种 Hough 变换改进算法。

基于线段基元的直线检测算法,由于不受参数量化影响,可以得到比 Hough 变换精度更高的直线参数,算法也相对简捷。但是,对于结构复杂的图像,由于会得到大量的无效线段基元,加之目前还没有很高效的线段共线性判别方法,导致其运算量也可能很大,无法满足各种视觉检测系统的需要。本文基于两点确定一条直线的性质提出一种利用梯度信息的线段基元提取方法,不仅速度很快,而且可以自动滤除无效边缘点,结合一种基于端点投影距离的线段合并策略,显著提高了直线特征的提取速度。此外,本文采用基于几何距离最小化的估计方法对直线参数进行求解,直线特征的提取精度也得到了改善。

## 1 线段基元的提取

基于“两点确定一条直线”的“多对一”映射机

制在随机 Hough 变换<sup>[7]</sup>中被提出以后,影响了许多算法<sup>[14-15]</sup>;将梯度信息应用于 Hough 变换<sup>[6]</sup>也可以明显提高算法的效率,但是目前文献中还没有明确把这两者结合起来的先例。本文将这两者结合起来,首先利用共线边缘点梯度方向接近的性质确定共线点对,然后沿共线点对所确定的直线方向扫描得到线段基元,得到了一种高效的线段基元提取方法。

### 1.1 共线点对的检测

理想情况下,同一条直线边缘上的点,应该具有相同的梯度方向,实际上,受图像数字化的量化效应以及图像噪声的影响,各点的梯度方向往往会与理想的方向出现一定的偏差。一个点的支撑直线定义为沿其梯度方向的垂直方向经过该点的直线,由于该点的理想梯度方向只可能位于其实际梯度方向两侧的对称范围内,于是过定点  $P_a$  的直线边缘也应该位于以该点为顶点的两个对称的扇形区域内,且这两个扇形区域被该点的支撑直线平分,其上下两条边界直线的梯度分别为理想梯度方向取值范围的两个边界,如图 1 所示。图 1 中  $N_a$  为  $P_a$  的梯度向量,  $L$  为  $P_a$  所在的直线边缘,  $N$  为  $L$  的法向量( $P_a$  梯度的理想方向),  $L_a \perp N_a$  为  $P_a$  的支撑直线,阴影部分为  $P_a$  的支撑区域,  $L_1$  和  $L_2$  分别为其上下边界,代表最大梯度方向偏差对应的直线。

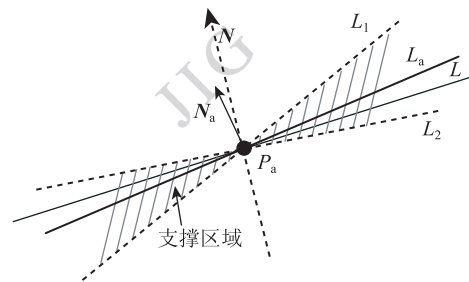


图 1 边缘点的支撑区域

Fig. 1 Support area of an edge point

对  $P_a$  来说,和它共线的每个点都位于其支撑区域内,反之,  $P_a$  也位于和它共线的任意一点的支撑区域内。根据这个特点,可以得到判断一个边缘点是否在直线上的一个简单方法。在  $P_a$  支撑直线上与其相隔一定距离处,沿  $P_a$  的梯度方向在其支撑区域内搜索,一定能够得到另一个边缘点  $P_b$ ,使得  $P_a$  也落在  $P_b$  的支撑区域内,如图 2 所示。反过来说,如果在  $P_a$  的支撑区域内找到了这样的  $P_b$ ,则认为过  $P_a$  和  $P_b$  有一条直线。

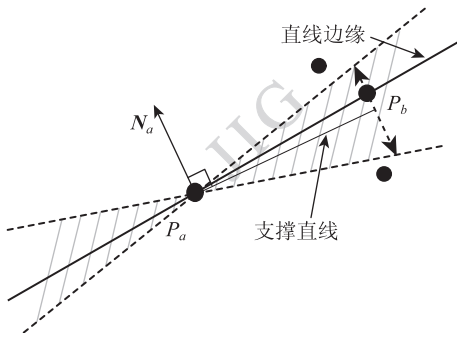


图 2 由  $P_a$  搜索  $P_b$  的原理

Fig. 2 The principle for searching  $P_b$  with  $P_a$

上述方法虽然可以自动滤除不在直线上的干扰点,但是也可能得到一些虚假的共线点对。如图 3 所示,由于直线边缘  $L_1$  和  $L_2$  相距很近,且斜率偏差很小,分别位于  $L_1$  和  $L_2$  上的点  $P_a$  和  $P_b$  也被认为是共线的。对于这些虚假的共线点对,后面进行直线段扫描和验证的过程中可以自动剔除,具体过程见 1.2 节。如果已知边缘图像中断裂情况较少,则还可以直接对这些虚假共线点对进行判别:设  $P_a$  与  $P_b$  的中点为  $P_m$ ,对  $P_m$  进行测试,如果  $P_m$  不是边缘点则说明  $P_a$  与  $P_b$  不共线,应该予以剔除。

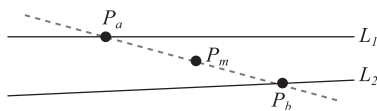


图 3 虚假共线点对的示意图

Fig. 3 The false positive collinear point pair

前面介绍的检测过程虽然简单,却并不容易编程实现,下面给出一种高效的程序实现方案。从左到右,从上到下依次对边缘图像上的点进行扫描。每得到一个边缘点,先根据梯度信息对其支撑直线的方向进行判断,如果其支撑直线接近于平行  $x$  轴,则沿  $y$  轴方向进行共线点的搜索,反之沿  $x$  轴方向进行搜索。为叙述方便,设其  $x$  轴方向和  $y$  轴方向的梯度分别为  $G_x$  和  $G_y$ ,后面的介绍均以二者同号且  $G_y$  大于  $G_x$  的情况为例进行,其他的情况可依此类推。如图 4 所示, $P_a$  为当前边缘点,取  $P_a$  支撑直线上与  $P_a$  水平距离为  $d_1$  的点  $P_c$  (满足条件的点有两个,此处应选择尚未扫描到的那一个),沿  $y$  轴方向,以  $P_c$  为中心  $d_2$  为半径搜索得到另一个边缘点  $P_b$ ;取  $P_b$  支撑直线上沿相反方向与  $P_b$  水平距离为  $d_1$  的点  $P_d$ ,若  $P_a$  正好也沿  $y$  轴方向落在以  $P_d$  为中心  $d_2$  为半径的范围内,则可以认为  $P_a$  和  $P_b$  共线。

如果搜索不到  $P_b$  或  $P_a$  与  $P_d$  沿  $y$  轴方向的距离大于  $d_2$  则认为  $P_a$  不是直线边缘上的点。

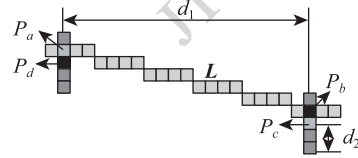


图 4 由  $P_a$  搜索  $P_b$  的示意图

Fig. 4 Searching  $P_b$  with  $P_a$

算法中  $d_2$  和  $d_1$  的比值确定了  $P_a$  梯度方向偏差的容许范围,为保证算法的执行速度, $d_2$  不宜取得过大,因而  $d_1$  也不能过大。同时,为了使  $P_a$  和  $P_b$  的连线与实际直线的方向足够接近, $d_1$  也不能取得过小。这里取  $d_2 = 4, d_1 = 20$ ,对应的偏差范围随  $P_a$  梯度方向的不同约在  $11.5^\circ \sim 22.6^\circ$  之间波动。由于常用的边缘检测方法都会先对图像进行高斯平滑处理,这个条件通常可以覆盖所有的直线边缘点。

### 1.2 线段基元的提取

按 1.1 节中方法得到共线点对  $(P_a, P_b)$  后,以  $P_a$  为起点,沿  $P_a \rightarrow P_b$  方向以及相反方向进行扫描,将连续扫描到的边缘点记录下来就可以得到该线段的完整信息。为增加程序的鲁棒性,扫描路径上的点及其沿  $y$  轴方向的两个相邻点都作为扫描对象,图 5 中给出了沿  $P_a \rightarrow P_b$  方向扫描的示意图,沿  $P_b \rightarrow P_a$  方向的扫描与此类似,只是不再对  $P_a$  和  $P_b$  之间的部分进行扫描。为适应直线边缘出现断裂的情况,一旦扫描过程连续前进了  $d_3$  还不能得到下一个边缘点则停止扫描(取  $d_3 = 2$ ,取  $d_3$  为 0 则为连续扫描)。如果  $(P_a, P_b)$  确实在一条直线边缘上,则扫描路径在经过  $P_a$  或  $P_b$  之后还会持续一定长度。据此可以对扫描得到的线段进行进一步的检验,如果线段上点数小于  $d_4$  (取  $d_4 = 32$ ,一般有  $d_4 \geq d_1$ ),则判定为虚假线段。如果一条线段通过了测试,则可以将扫描过的边缘点全部清除。对于如图 3 所示的虚假共线点对,由于在  $P_a$  和  $P_b$  之间会有很大的间断 ( $> d_3$ ),因而无法通过线段扫描和验证的过程。

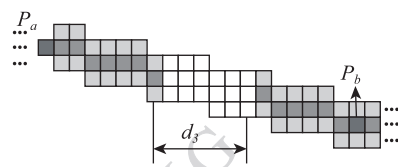


图 5 线段基元的扫描示意图

Fig. 5 Procedure of line segments scanning

### 1.3 线段基元提取算法流程

综合前面的分析,可以得到如下的线段基元提取算法流程:

- 1) 顺序扫描边缘图像,得到一个边缘点,记该点为  $P_a$ 。
- 2) 按照 1.1 节中的方法搜索与  $P_a$  的关系满足条件的边缘点  $P_b$ ,若成功转步骤 3), 否则转步骤 4)。
- 3) 按照 1.2 节中的方法对  $(P_a, P_b)$  确定的线段进行扫描,若得到满足条件的线段,记录该线段并清除其上所有的边缘点;否则,丢弃该线段。
- 4) 继续扫描边缘图像,得到一个新的边缘点,将其记为  $P_a$  并转步骤 2); 如果遍历图像还没得到新的边缘点,算法结束。

由于步骤 2) 的执行过程很快,而且得到的虚假共线点对很少,该算法关键部分(步骤 3))的复杂度与提取到的线段数量近似成正比,相比之下,Hough 变换算法在无效边缘点上也要花费大量的处理时间,这是本方法运算效率更高的主要原因。

## 2 线段基元的连接

由于 1.2 节中线段基元的扫描方向往往和直线边缘的实际方向有一定偏差,对于较长的直线边缘一次扫描只能覆盖其中的一段,因而由一条直线边缘可能得到几条共线的线段基元。这就需要根据一定的准则对线段基元进行分类,将共线基元连接起来得到真实的直线边缘。目前还没有广泛使用的分类方法,一般是直接根据直线参数对线段进行聚类<sup>[12]</sup>,速度虽然很快,但容易出现错误聚类,为此本文提出了一种基于端点投影距离的判别方法,显著减少了错误分类的概率。

### 2.1 线段基元的连接方法

首先需要得到线段基元确定的直线参数,目前一般是通过线段上的点进行最小二乘拟合得到其直线参数<sup>[12]</sup>。根据文献[16]的分析,这种方法并

不能得到最优结果。为此本文使用基于几何距离最小化的估计方法对线段基元进行直线拟合,以得到最优的直线参数。设线段基元  $l$  包含的点的数量为  $n$ ,其上任意一点的坐标为  $(x_i, y_i) (i = 1, \dots, n)$ ,  $l$  的重心为  $(\bar{x}, \bar{y})$ , 直线方程使用极坐标形式的标准方程

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (1)$$

则  $l$  的最优拟合直线必然经过  $(\bar{x}, \bar{y})$ , 且其方向向量  $[\cos \theta \quad \sin \theta]^T$  为协方差矩阵  $M$  (式(2)) 的最大特征值所对应的特征向量<sup>[16]</sup>。由于方向相差 180 度的两条直线是不可区分的, 此处规定  $\theta \in [0, 180)$ , 超出该范围的  $\theta$  首先要调整到该范围之内。将  $(\bar{x}, \bar{y})$  和  $[\cos \theta \quad \sin \theta]^T$  代入式(1)即可求出  $\rho$ 。

$$M = \begin{bmatrix} x_1 - \bar{x} & y_1 - \bar{y} \\ x_2 - \bar{x} & y_2 - \bar{y} \\ \vdots & \vdots \\ x_n - \bar{x} & y_n - \bar{y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 - \bar{x} & y_1 - \bar{y} \\ x_2 - \bar{x} & y_2 - \bar{y} \\ \vdots & \vdots \\ x_n - \bar{x} & y_n - \bar{y} \end{bmatrix} \quad (2)$$

获得所有线段基元的直线参数后,使用迭代过程对它们进行分类和连接。为确保显著的线段基元优先获得处理,首先按照长度信息(线段基元包含的点数)进行排序。选择序列中未完成连接的最长线段基元作为种子基元  $l_s$ , 依次将其后的线段基元  $l_k$  与其进行共线性测试,选取通过测试的基元中与  $l_s$  位置最临近的  $l_k$ , 连接到  $l_s$ , 从序列中删去  $l_k$  并重新对  $l_s$  进行直线拟合。此过程反复进行直至不再存在与  $l_s$  共线的  $l_k$  则认为  $l_s$  完成了连接, 将其从序列中删去, 然后对下一个基元进行连接。

优先连接位置临近的线段基元可以最大限度的保证算法的正确性。两个线段的临近性用两者相距最近的两个端点间的距离  $d_k$  表示(图 6(a))。对于包含多个物体的图像,如果不希望不同物体的直线边缘被连接到一起,可以设定一个最大阈值  $T_d$ , 只有  $d_k$  不超过  $T_d$  时才将  $l_k$  与  $l_s$  进行连接。本文默认取  $T_d = 200$ , 一般可以将所有共线线段都连接起来。

判断两个线段是否共线的最直观的方法是对相

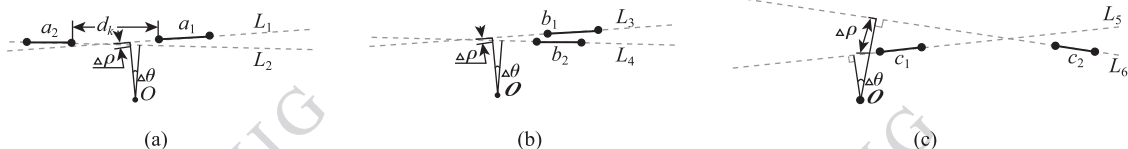


图 6 共线线段的示意图

Fig. 6 Examples of collinear line segments

应的直线参数进行比较,如图6(a)所示, $a_1$ 、 $a_2$ 分别是两条线段基元, $a_1$ 的拟合直线为 $L_1$ , $a_2$ 的拟合直线为 $L_2$ , $L_1$ 与 $L_2$ 的 $\theta$ 参数和 $\rho$ 参数都很接近,因而可认为两者共线,文献[12]中使用的就是这种方法。实际上这种方法仅仅使用了线段的全局信息,而线段间的位置关系和线段长度等信息则完全被忽视了,因而很容易出现误判,如图6(b)所示,虽然线段 $b_1$ 、 $b_2$ 的拟合直线 $L_3$ 、 $L_4$ 的参数也很接近,但 $b_1$ 和 $b_2$ 却不能认为是共线的。图6(c)则给出了另一种情况,线段 $c_1$ 、 $c_2$ 的拟合直线 $L_5$ 、 $L_6$ 的参数相差较大,但是由于 $c_1$ 和 $c_2$ 都比较短,拟合参数容易有较大偏差,因而它们也可能是共线的。

为此,提出一种基于端点投影距离的判别方法对线段基元进行共线性测试。如图7所示,将 $l_k$ 的两个端点 $A_k$ 和 $B_k$ 垂直投影到 $l_s$ 对应的拟合直线上,如果 $l_k$ 与 $l_s$ 共线,则两个投影距离 $d_A$ 和 $d_B$ 都应该很小。为防止相距较近且近似平行的两个线段被判定为共线,设定两个阈值,采用判据(本文中 $T_1=2$ , $T_2=4$ )

$$\begin{cases} \text{Min}(d_A, d_B) \leq T_1 \\ \text{Max}(d_A, d_B) \leq T_2 \end{cases} \quad (3)$$

如果两个判据都得到满足,则认为 $l_k$ 与 $l_s$ 共线,其中

$$\begin{cases} d_A = |\rho_s - x_A \cos \theta_s - y_A \sin \theta_s| \\ d_B = |\rho_s - x_B \cos \theta_s - y_B \sin \theta_s| \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\rho_s, \theta_s$ 为 $l_s$ 的直线参数, $(x_A, y_A)$ 和 $(x_B, y_B)$ 分别为 $A_k$ 和 $B_k$ 的坐标。

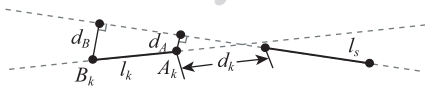


图7 线段共线性判别的示意图

Fig. 7 Example of line segments collinearity judgement

该判据不仅依赖于线段的直线参数,还与线段间的位置关系和线段长度有关,不仅可以区分直线参数相差过大的线段,对于直线参数较为接近但由于位置关系不能认为共线的线段(如图6(b))也具有较强的区分能力,因而要优于直接使用直线参数的判定方法。考虑到线段间的位置关系的不对称性,以 $l_k$ 为投影基准得到的投影距离与上述以 $l_s$ 为投影基准得到的投影距离一般是不一样的,因而该判据依赖于投影基准的选择。一般而言,以较长线段为投影基准得到的最大投影距离会较小。因而为了避免这种不对称现象引起的判定结果的不确定

性,本文一律使用较长的线段作为投影基准,这也是在进行线段分类和连接之前首先要按照长度信息对它们进行排序的一个原因所在。

虽然上述判据并不复杂,但是由于连接过程是一个反复迭代的过程,对于线段基元很多的图像,总的运算量也不能忽视。为进一步减少连接过程的运算量,在应用该判据之前首先进行一次预判断,所用判据如式(5)所示,式中阈值 $T_\rho$ 和 $T_\theta$ 应设为较大的值(本文中 $T_\rho=12$ , $T_\theta=8^\circ$ ),以免如图6(c)中所示的共线线段被错判为不共线。

$$\begin{cases} |\rho_s - \rho_k| \leq T_\rho \\ |\theta_s - \theta_k| \leq T_\theta \text{ 或者 } |\theta_s - \theta_k| \geq (180^\circ - T_\theta) \end{cases} \quad (5)$$

由于每次连接后都重新进行了直线拟合,最后得到直线边缘的同时也得到了其参数。

## 2.2 线段基元连接的算法流程

综合上面分析,可以得到线段基元的连接算法流程如下:

- 1) 对所有线段基元进行直线拟合。
- 2) 按照长度信息对线段基元进行排序。
- 3) 选择第1个线段基元作为种子基元 $l_s$ 。
- 4) 依次选择 $l_s$ 后面的线段基元 $l_k$ ,并将其与 $l_s$ 进行共线性测试。如果没有通过测试的基元,转步骤6);如果有,记录下所有满足条件的基元以及其与 $l_s$ 的临近性度量,转步骤5)。
- 5) 选取记录中与 $l_s$ 最邻近的基元,若其与 $l_s$ 的临近性度量大于 $T_d$ ,转步骤6);否则将该基元连接到 $l_s$ 并将其从序列中删去,重新对 $l_s$ 进行直线拟合,转步骤4)。
- 6) 将 $l_s$ 从序列中删去,如果序列中没有剩余的线段基元则算法结束,否则转步骤3)。

## 3 实验与分析

为检验本算法的有效性,选取一系列图片对其进行了测试,同时选取经典Hough变换(SHT)算法和文献[13]中的基于核映射机制的Hough变换(KHT)算法用于比较。所有测试程序在Visual C++ 2005环境下编译运行,硬件平台为Pentium IV 2.4 G, 2 G内存。本文算法的测试程序基于开源视觉算法程序库OpenCV2.1开发完成;KHT测试程序使用文献[13]作者网站<sup>[17]</sup>上的源代码重新编译得

到,所用参数为该作者推荐的值,其中,角度量化间隔为  $0.5^\circ$ ,长度量化间隔为 0.5 像素;SHT 测试程序使用 OpenCV 的库函数,量化间隔与 KHT 保持一致,检测阈值取为 60。所有算法的输入均为测试图像经过 Canny 算子检测得到的边缘图像。

### 3.1 检测性能

下面以 3 幅典型的图片为例对 3 种算法的检测性能进行比较。第 1 幅为 OpenCV 的测试图像,如图 8(a)所示,大小为  $400 \times 300$ ,图 8(b)一(d)分别为 3 种算法的检测效果。第 2 幅为一个 T 型零件的实物照片,如图 9(a)所示,大小为  $384 \times 384$ ,图 9

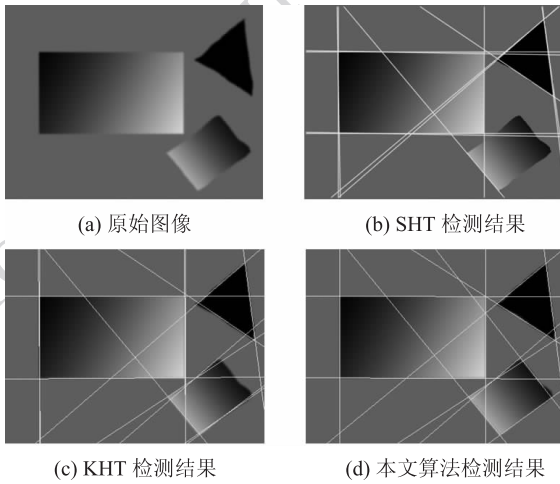


图 8 OpenCV 测试图像实验结果

Fig. 8 Experiment result of the OpenCV test image

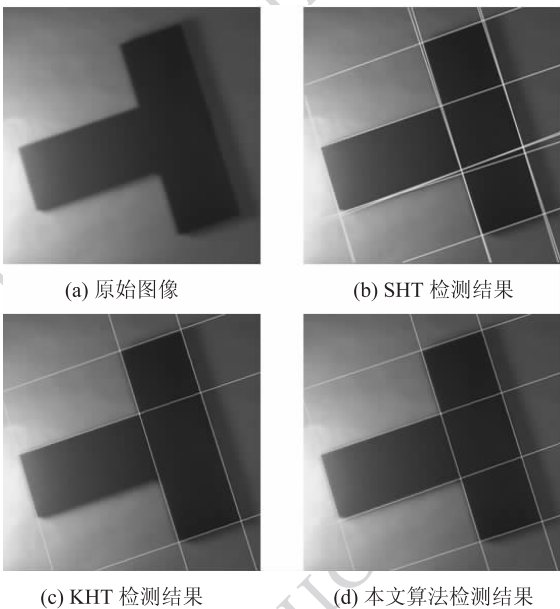


图 9 零件照片实验结果

Fig. 9 Experiment result of the workpiece picture

(b)一(d)给出了 3 种算法的提取结果。第 3 幅为摄像机标定常用的棋盘格模板照片,如图 10(a)所示,大小为  $512 \times 512$ ,3 种算法的提取结果由图 10(b)一(d)给出。为便于比较分析,另将 3 幅图的检测结果共同列于表 1 中。

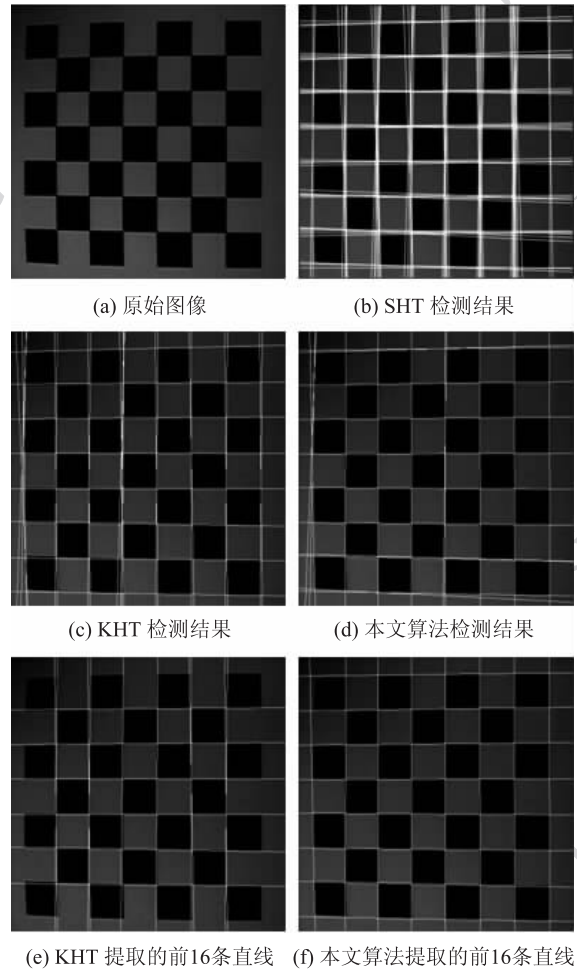


图 10 标定模板照片实验结果

Fig. 10 Experiment result of the chessboard picture

表 1 3 种算法的检测结果比较

Table 1 Detection result comparison of the three methods

图像	直线 条数	SHT 结果		KHT 结果		本文结果	
		正确	错误	正确	错误	正确	错误
图 8(a)	12	8	5	11	3	12	0
图 9(a)	7	7	5	6	0	7	0
图 10(a)	16	16	63	16	12	16	6

由表 1 和图 10(b)可以看出,SHT 检测到了不少虚假直线,这是由于参数量化效应导致参数空间产生了虚假峰值;如果虚假峰值较大,还会使真实的

直线被漏检,如图 8(b)所示。KHT 由于改进了映射机制,明显降低了峰值扩散的程度(如图 10(c)),但未能彻底解决这个问题;而且,由图 9(c)还可以看到,该算法有时会漏掉一些 SHT 能正确检测的直线。本文算法对前两幅图中的直线边缘,全部都正确检测了出来;至于对第 3 幅图的检测结果比理想结果多出了 6 条直线,是因为摄像机镜头的畸变使得棋盘格边缘的直线所成的像过于弯曲,以至于相应的线段基元未能正确连接所致。由于 KHT 和本文方法的检测结果都是按显著性由高到低的顺序输出的,图 10(e)(f)分别给出了 KHT 和本文方法检出的前 16 条直线,可以看出,本文方法输出的结果正确对应了理想的 16 条直线,而 KHT 则在漏掉了外围 4 条直线的同时仍保留了 4 条虚假的直线。

值得注意的是,对于许多图像,如果结合先验的信息,SHT 和 KHT 通过调节控制参数也可以达到更好的检测效果。但是,实际应用中根据每幅图像去调节算法的控制参数是不现实的,这也是其他许多直线检测方法的弊端之一。本文方法虽然也用到了较多的参数,但这些参数适应不同图像的能力要强得多,除  $d_3$  和  $T_d$  外使用本文给出的参数一般都可以得到较好的效果。 $d_3$  表示算法容许的边缘断裂程度,而  $T_d$  则决定了需要合并到一起的两条直线段的最大距离,两者的单位都是像素,实际应用中很容易根据需要进行设置。如果图像中存在相距很近且平行或接近平行的边缘,则  $T_1$  和  $T_2$  也可能对算法的结果产生较大影响,如果不希望这样的直线边缘被合并,可以将  $T_1$  和  $T_2$  都设为很小的值,否则应当将它们适当调大一些。由于采用了几何距离最小化的估计方法,本算法的提取精度比 Hough 变换方法或文献[12]中对各线段基元对应的直线参数简单求均值的方法都要高。

### 3.2 算法效率

3 种算法分别对 3 幅测试图像进行检测所消耗的时间如表 2 所示,所有结果为运行 100 次求平均值所得。可以看出,本文算法的执行速度比 SHT 提高了约 14 倍以上,比 KHT(目前文献中最快的 Hough 变换改进算法)也提高了将近 1 倍。而且,包含 Canny 算子的运算时间在内,本文算法对  $512 \times 512$  大小的图像进行直线检测所需时间共约 15ms,足以满足各种实时检测系统的要求。相比之下,文献[12]中基于图像分块二值化和链码跟踪的算法

在相当的硬件条件(Pentium IV 2.8 G)下同样使用 VC 进行开发,对  $256 \times 256$  大小的图像检测时间为几十毫秒,其实时性比本文算法明显要差。

对于各种 Hough 变换算法,总会有大量的无效边缘点被访问,而且只要被访问到,每个点的运算量都是差不多的,这是 Hough 变换效率较低的根本原因之一。本文方法中大部分无效边缘点在消耗了很小的计算量之后就被直接丢弃了,仅有少部分参与后面的算法过程,方法的运算量与图像中直线边缘上点的数量近似成正比,因而效率很高。

表 2 3 种算法的运行时间比较

Table 2 Run time comparison of the three methods

图像	执行时间/ms			
	Canny 算子	SHT	KHT	本文方法
图 8(a)	5.5	16.4	2.3	1.1
图 9(a)	6.9	16.7	2.2	1.2
图 10(a)	12.4	67.3	7.1	2.3

由于需要保留梯度信息,本文方法占用的内存空间比随机 Hough 变换等算法要多(但要少于标准 Hough 变换),不利于直接在内存受限的系统中应用。但是,由于方法中对边缘图像和梯度图像都是顺序访问的,对于内存受限的系统,可以只在内存中保留边缘图像和梯度图像的若干行,处理完最前面几行之后,将其丢弃并读入新的行继续进行处理。和其他基于线段基元的方法<sup>[11-12]</sup>相比,本文方法消耗的固定内存稍多,但是由于可以自动滤除无效边缘点,动态内存的消耗比这些方法要少,而大量使用动态内存会使程序运行较慢,这也是本文方法速度更快的原因之一。此外,由于是采用拟合的方法得到直线参数,其精度不会受量化间隔的影响,不像 SHT 或 KHT 那样为了达到一定的精度必须减小量化间隔,从而需要更多的内存和更长的时间。

## 4 结 论

本文立足于视觉检测系统的实时性需要,针对现有直线检测方法的不足,提出了一种高效的直线边缘特征检测方法,着重研究了利用梯度信息的线段基元快速提取方法和基于端点投影距离的线段基元连接方法。实验结果表明,本文方法不仅能够比

现有方法更快地得到较高精度的直线边缘特征,而且算法各控制参数的适应能力也要强于现有方法,可以满足各种视觉检测系统对实时性和精度的要求,具有广阔的应用前景。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Escalera A D L, Armingol J M. Automatic chessboard detection for intrinsic and extrinsic camera parameter calibration [J]. *Sensors*, 2010, 10(3): 2027-2044.
- [ 2 ] Chen J, Xu Y C, Zhao M, et al. A Randomized Hough transform based on road edge identification algorithm [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(5): 905-911. [陈军,徐友春,赵明,等. 基于随机 Hough 变换的道路边界识别算法研究[J]. 中国图象图形学报,2009,14(5):905-911.]
- [ 3 ] Li L CH, Feng W D, Yu Q F. Fast automatic detecting of cross based gradient direction [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(3): 351-356. [李立春,冯卫东,于起峰. 根据边缘梯度方向的十字丝目标快速自动检测[J]. 光学技术,2004,30(3):351-356.]
- [ 4 ] Richard O D, Peter E H. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures [J]. *Graphics and Image Processing*, 1972(15): 11-15.
- [ 5 ] Yue D X, Huang X S. Method of line detection based on improved multiresolution Hough transform [J]. *Computer Simulation*, 2006, 23(9):76-79. [岳冬雪,黄新生. 基于改进的多分辨率 Hough 变换的直线检测方法[J]. 计算机仿真,2006,23(9):76-79.]
- [ 6 ] Galambos C, Kittler J, Matas J. Gradient based progressive probabilistic Hough transform [J]. *Image Signal Processing*, 2001, 148(3):158-165.
- [ 7 ] Xu L, Oja E, Kultanen P. A new curve detection method: randomized Hough transform (RHT) [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1990, 11(5):331-338.
- [ 8 ] Ma L, Mao J Y. Local uncertainty measure based multi-line detection algorithm for work-pieces in noised images [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2010, 15(4):624-630. [马莉,毛俊勇. 噪声环境下基于局部不确定性度量的多直线检测算法[J]. 中国图象图形学报,2010,15(4):624-630.]
- [ 9 ] Burns J B, Hanson A R, Riseman E M. Extracting straight lines [J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 1986, 8(4): 425-455.
- [ 10 ] Nevatia R, Babu K R. Linear feature extraction and description [J]. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*. 1980, 13(3):257-269.
- [ 11 ] Lu G Q, Xu H G, Li Y B. Line segment detection based on chain code detection [J]. *Computer Engineering*, 2006, 32(14): 1-3. [鲁光泉,许洪国,李一兵. 基于链码检测的直线段检测方法[J]. 计算机工程,2006,32(14):1-3.]
- [ 12 ] Zhang J W, Zhang Q H. Line-edge feature extraction based on ergodic block [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 662-668. [张建伟,张启衡. 基于块遍历的直线边缘特征提取[J]. 光学精密工程,2009,17(3): 662-668.]
- [ 13 ] Fernandes L A F, Oliveira M M. Real-time line detection through an improved Hough transform voting scheme [J]. *Pattern Recognition*, 2008, 41(1): 299-314.
- [ 14 ] Chutatape O, Guo L F. A modified Hough transform for line detection and its performance [J]. *Pattern Recognition*, 1999, 32(2): 181-192.
- [ 15 ] Chen T C, Chung K L. A new randomized algorithm for detecting lines [J]. *Real-Time Imaging*, 2001, 7(6): 473-481.
- [ 16 ] Wu F C. *Mathematical methods in computer vision* [M]. Beijing: Science Press,2008: 307-309. [吴福朝. 计算机视觉中的数学方法[M]. 北京:科学出版社,2008:307-309.]
- [ 17 ] Fernandes L A F. Real-time line detection through an improved Hough transform voting scheme [EB/OL]. [2011-10-27]. <http://www.inf.ufrgs.br/~laffernandes/kht.html>.