

# 基于边缘连接的快速直线段检测算法

董 晶 杨 夏 于起峰

(国防科学技术大学航天与材料学院, 湖南 长沙 410000)

**摘要** 直线特征反映了图像内容的几何信息,是图像理解、分析等高层处理及应用中的基本元素。针对人造目标图像,提出了一种基于边缘连接的快速直线段检测算法。此算法利用 Canny 检测边缘,结合主元方向和梯度方向信息连接方向相似的边缘从而得到候选直线段,最后根据主元一致性和直线误差度消除噪声、曲线等误检,并利用最小二乘拟合得到正确的直线段。实验结果表明所提算法在精确性和速度上均优于霍夫变换、相位编组、主成分分析等经典直线检测算法。

**关键词** 机器视觉;边缘提取;直线检测;主成分分析;方向连接

**中图分类号** TP391.9 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0315003

## Fast Line Segment Detection Based on Edge Connecting

Dong Jing Yang Xia Yu Qifeng

(College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410000, China)

**Abstract** Linear characteristic, which is the basic element of image understanding and analysis, gives important information about the geometric content of images. A fast algorithm based on edge connecting is proposed for detecting line segments in image which contains many artificial objects. The Canny detector is used for edge extraction. An edge connecting strategy which takes into account both the principal orientation and gradient direction is used for selecting candidates of line segments. Noise and curves can be removed from the candidates according to the coherence of principal and straightness errors. After that, the least squares method is used for extracting line segments from the rest candidates. The test result implies that the proposed algorithm is better than the classical component algorithms, such as Hough transform, phase grouping and line detection by principal component analysis, in accuracy and speed.

**Key words** machine vision; edge extraction; line detection; principal component analysis; orientation connecting

**OCIS codes** 100.2000; 150.1135; 100.3008

## 1 引 言

在人造目标图像中,直线是一种重要的几何特征,为图像理解、分析等高层处理提供了前提。高效地提取直线特征有利于提升人造目标的定位、测量和重建等后续处理的准确性。直线特征提取作为计算机视觉中的一个经典问题,被广泛应用于异常检测<sup>[1]</sup>、遥感图像处理<sup>[2]</sup>、海岸线检测<sup>[3]</sup>和摄像标定<sup>[4,5]</sup>等诸多领域。因此,研究快速准确的直线特

征提取算法具有十分重要的意义。

研究者们针对直线特征提取问题进行了大量研究,其中经典的算法包括:

1) Hough 变换及其改进算法。Hough 算法<sup>[6]</sup>利用 Canny 算子<sup>[7]</sup>提取边缘,然后对边缘点在参数(直线方向和截距)空间进行投票,最后将投票数超过阈值的参数对应的直线提取出来。对于直线段提取,还需要进一步利用长度和间隙阈值在直线方向

收稿日期: 2012-10-12; 收到修改稿日期: 2012-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(11002156, 11072263)资助课题。

作者简介: 董 晶(1984—),男,博士研究生,主要从事计算机视觉和摄影测量等方面的研究。

E-mail: luckyapple1756@gmail.com

导师简介: 于起峰(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事计算机视觉和摄影测量等方面的研究。

E-mail: jmgc108@vip.163.com

上分割和连接。Hough 变换算法对直线的间断和退化具有较强的稳健性,存在的缺点是忽略了边缘的局部方向性,相邻的边缘点在投票过程中毫无关联,不相关联的边缘点被巧合地累加,并且直线辨别时,合理选取阈值困难,导致对边缘密度高的材质区(如树叶草地)出现大量虚检;另外参数空间离散化时粒度过大会影响直线提取的精度,而粒度细化的代价是存储空间和计算量的急剧增加。针对后一种缺点,文献[8]提出了改进算法,即随机 Hough 变换,解决了参数空间离散化的问题,并缓解了 Hough 变换法对存储空间和计算量的需求。但对于背景复杂和噪声较强的图像,其计算量会增加,检测性能较标准 Hough 变换算法也会下降<sup>[9]</sup>。

2) 相位编组算法。相位编组法由 Burns 等<sup>[10]</sup>提出,算法将像素按梯度方向相似性分组得到直线区域(line-support regions),进而根据区域信息拟合得到直线段。相位编组法的特点是不需要事先进行边缘检测,能够检测对比度较低的直线段。相位编组算法利用了局部方向信息并拥有较快的计算速度,但在人造目标(如建筑)图像上的应用表明,相位编组算法会存在严重的误检或漏检<sup>[11]</sup>。

针对以上算法存在的问题,本文提出了一种基于边缘连接的快速直线段检测算法。该算法将边缘主元方向和图像梯度方向相结合,增强了边缘连接对间断、噪声的抗干扰性,设计了一种快速的边缘方向连接策略,节省了计算时间,并根据主元一致性和直线误差度消除误检。算法能准确计算直线段的方向和端点,具有计算速度快、误检率低的特点。

## 2 方向提取

相位编组算法利用局部方向信息提取直线,但只考虑 8 个邻域方向,不能准确指派边缘的方向,在边缘方向相似性判别过程中容易误连和间断,从而导致虚检和漏检。本文采取连续的边缘主元方向和图像梯度方向,避免了方向离散化导致的虚检和漏检。

### 2.1 边缘的主元方向提取

利用主成分分析(PCA)算子提取边缘主元方向<sup>[12]</sup>,其原理在于边缘曲线在主元方向上的投影最大,如图 1 所示。

为了节省计算量,主元方向提取只在 Canny 检测到的边缘点进行。以边缘上一点  $P$  为中心,可以按以下公式计算边缘主元方向:

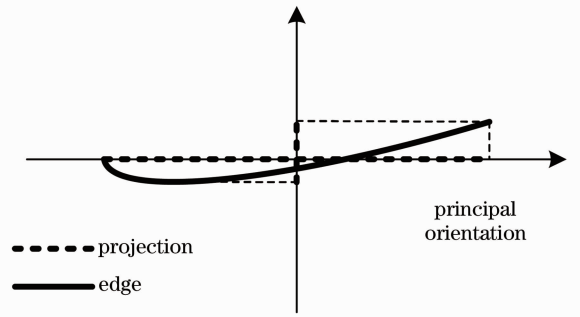


图 1 提取主元方向原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of principal orientation extraction

$$c_{11} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2, \quad (1)$$

$$c_{22} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^2, \quad (2)$$

$$c_{12} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_m)(y_i - y_m), \quad (3)$$

$$x_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad y_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (4)$$

$$\lambda_1 = \frac{1}{2} [c_{11} + c_{22} + \sqrt{(c_{11} - c_{22})^2 + 4c_{12}^2}], \quad (5)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{2} [c_{11} + c_{22} - \sqrt{(c_{11} - c_{22})^2 + 4c_{12}^2}], \quad (6)$$

$$\theta_p = \arctan \frac{\lambda_1 - c_{11}}{c_{12}} \text{ or } \theta_p = \arctan \frac{c_{12}}{\lambda_1 - c_{22}}, \quad (7)$$

$$C = \left| \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \right|, \quad (8)$$

式中  $(x_i, y_i)$  是算子窗口内与  $P$  连接(8 邻域)的边缘点  $p_i$  的坐标。(8) 式中  $C$  值越大则边缘曲线在主元方向上的投影与在垂直主元方向上投影的比越大,边缘方向一致性越高。

由于像素离散性问题,算子计算的方向存在误差。方向误差会给基于方向夹角的边缘连接带来不确定性,导致夹角过大的边缘被连接或夹角较小的边缘被判为间断。对一条离散直线,窗口越大,算子计算的方向就越精确,但计算量也越大。表 1 给出了算子窗口大小和夹角平均误差之间的关系。

表 1 窗口大小与夹角计算误差之间的关系

Table 1 Relation between window size and error

Size	Error $\overline{\Delta\theta}/(^{\circ})$
3×3	10.2
5×5	7.1
7×7	4.4
9×9	2.1
11×11	1.9

从表 1 中可以看到取  $9 \times 9$  大小的窗口时, 夹角平均误差为  $2.1^\circ$ , 通常边缘方向连接的夹角阈值取为  $22.5^\circ$ , 所以窗口尺寸为  $9 \times 9$  时, 不会带来过大的不确定性。

## 2.2 图像梯度方向提取

文献[10]比较了多种图像的梯度方向提取算子, 并认为对于直线提取, 采用图 2 所示的两个  $2 \times 2$  模板计算方向是最佳选择。图 2(a)、(b)所示模板分别计算  $x$ 、 $y$  方向的灰度变化量  $g_x$  和  $g_y$ , 并按照下式计算图像梯度方向  $\theta_g$ :

$$\theta_g = \arctan(g_y/g_x). \quad (9)$$

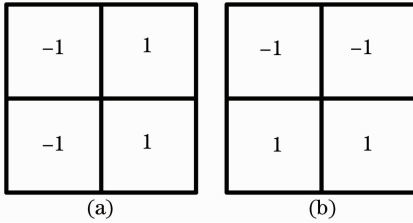


图 2 梯度方向计算模板

Fig. 2 Template for calculating gradient direction

过大的模板倾向于平滑图像, 致使图像细节丢失, 降低区分度。该算子的模板较小, 能节省计算量并能提升细节和区分度, 缺点是对噪声太敏感。

## 3 结合主元方向和梯度方向的边缘连接

原图像经方向提取生成了主元方向图和梯度方向图, 如图 3 所示, 二者各有特点。其中边缘[见图 3(b)]由 Canny 算法检测得到。Canny 算法采用了双阈值和非极大值抑制策略提升对噪声的抗干扰性, 但容易导致边缘间断。梯度方向图能较好地保留图像中低对比度线条的方向, 但是抗噪声能力差。在噪声较强的图像上, 线条的梯度方向一致性差, 无法进行相似性连接。因此本文算法采取了结合两种方向的边缘连接策略, 其中基于边缘主元方向的连接继承了 Canny 边缘检测抗噪声干扰的优点, 并且将连接判断和候选直线段限制在边缘点及附近梯度方向相似的区域, 节省了计算量。而后利用图像梯度方向连接, 弥补了基于主元方向连接产生边缘间断的不足, 提高了对低对比度直线的检测率。

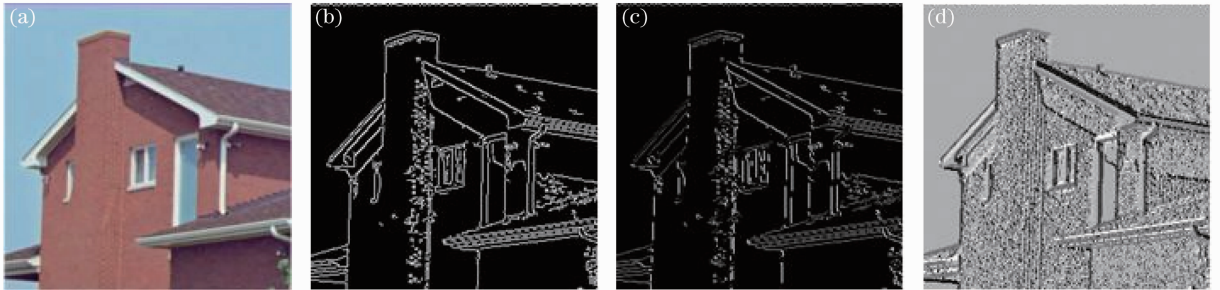


图 3 主元方向和梯度方向提取。(a)原始图像; (b)边缘; (c)主元方向图; (d)梯度方向图

Fig. 3 Extraction of principal orientation and gradient direction. (a) Original figure; (b) edge of original figure;

(c) principal orientation picture; (d) gradient direction picture

### 3.1 基于方向相似的边缘连接

边缘连接算法的任务是给定初始点和夹角阈值, 根据边缘主元方向图和梯度方向图得到一个连通点集作为候选直线段。表 2 给出了边缘连接算法的伪码, 包括以下 3 个主要步骤。

步骤 1: 在边缘方向图上根据(8)式计算一致性, 并按照一致性由高到低排序, 方向一致性高的边缘点被认为更可能是一条直线上的点, 所以选择一个一致性较高的点作为连通点集的初始点, 该点为新加入点, 其方向初始为连通点集的方向。其中一致性使用的是一种粗略排序方法, 计算复杂度为  $O(n)$ ,  $n$  为边缘点数。

步骤 2: 测试新加入点 8 邻域内边缘点与连通点集和方向的夹角, 若小于给定阈值, 则加入连通点

集并更新和方向, 继续对新加入的点做同样的边缘点测试。

步骤 3: 若没有新边缘点加入, 则测试新加入点的 8 邻域内梯度方向与连通点集和方向夹角, 若小于给定阈值, 则加入连通点集并更新和方向, 转步骤 2。否则连接结束。

### 3.2 快速方向相似性判断及和方向更新

一般的方向相似性连接算法都是直接利用方向角度, 若夹角小于给定阈值, 则更新连通点集的和方向。由于连接从方向一致性高的边缘点开始, 大多数情况下方向相似性判断是成功的, 此时需要计算 2 次反正切和正、余弦各 1 次。本文提出一种利用矢量夹角余弦的快速方向相似性判断及和方向更新算法, 直接使用单位化方向矢量计算余弦值作为方

向相似性判断依据,并更新和方向矢量,从而避免了三角函数计算。在本文实验所使用的计算平台上,这种快速算法将边缘连接的计算时间减少至原来的36%。表3对比了利用方向角度计算和利用方向矢

量计算两种算法的相似性判断与连通点集的和方向更新过程,其中 $(g_x, g_y)$ 代表当前点方向矢量, $(d_x, d_y)$ 代表和方向矢量, $\nu$ 和 $\tau$ 分别为夹角阈值( $22.5^\circ$ )和余弦阈值(0.924)。

表2 边缘连接算法

Table 2 Algorithms of edge connecting

Input: edge orientation image $\theta_p$ ; gradient orientation image $\theta_g$ ; flag image $F$ ; initial point $(x, y)$ ; angle tolerance $\nu$ .	
Output: a region of pixels $E$ and its orientation $\bar{\theta}$ .	
1	$E \leftarrow (x, y); \bar{\theta} \leftarrow \theta(x, y);$
2	$d_x \leftarrow \cos \bar{\theta}; d_y \leftarrow \sin \bar{\theta};$
3	for each pixel $p$ in $E$ do
4	for each $t$ neighbor of $p$ and $F(t)$ not set do
5	if $t$ is an edge pixel and $\text{diff}[\theta_p(t), \bar{\theta}] < \nu$ then
6	add $t$ to $E$ ; set $F(t)$ ; update $\bar{\theta}$ with $\theta_p(t)$ ;
7	end
8	end
9	if number of pixel in $E$ is not change then
10	for each $t$ neighbor of $p$ and $F(t)$ not set do
11	if $\text{diff}[\theta_g(t), \bar{\theta}] < \nu$ then
12	add $t$ to $E$ ; set $F(t)$ ; update $\bar{\theta}$ with $\theta_g(t)$ ;
13	end
14	end
15	end
16	end

表3 两种不同计算方法对比

Table 3 Comparison of calculating in two different ways

	Angle calculation	Vector calculation
Similarity check	$\theta_g \leftarrow \arctan(g_y/g_x); \text{bool} \leftarrow  \theta_g - \bar{\theta}  < \nu;$	$\mathbf{d} \leftarrow (d_x, d_y); \mathbf{g} \leftarrow (g_x, g_y);$ $\text{bool} \leftarrow  (\mathbf{d}/\ \mathbf{d}\ ) \cdot (\mathbf{g}/\ \mathbf{g}\ )  > \tau;$
Update the orientation	$d_x \leftarrow d_x + \cos \theta_g; d_y \leftarrow d_y + \sin \theta_g;$ $\bar{\theta} \leftarrow \arctan(d_y/d_x);$	$d_x \leftarrow d_x + g_x/\ \mathbf{g}\ ;$ $d_y \leftarrow d_y + g_y/\ \mathbf{g}\ ;$
Time comparison	1.00	0.36

## 4 直线段检测

主元方向或梯度方向相似的点,经过第三节的连接算法将得到一连通点集。为了避免边缘被过度分离和连通点集过小,方向相似性判断时,对不同方向点保持了一定容忍度,这也使连通点集包含了边缘噪声和曲线。直线段检测的任务便是消除噪声和曲线的干扰,识别直线特征,并提取出直线段的起点和终点。直线段检测算法分为三个步骤:基于主元一致性的直线判别,基于直线误差度的分割,最小二乘拟合直线并计算起始点。图4给出了直线段检测算法流程。

对每个包含点数不小于给定阈值  $N(15 \text{ pixel})$  的

连通点集[图5(a)],作进一步的直线段检测。首先利用主元一致性作为直线段的初始判别,其原理与边缘的主元方向提取相同,但是利用连通点集中所有的点按照(1)~(6)式和(8)式计算一致性,若小于给定阈值  $C$  则舍弃。主元一致性判别计算复杂度为  $O(n)$ ,  $n$  为连通点集点数。由于后续的处理计算量较大,该步骤可以消除大多数不合格的连通点集[图5(b)],从而节省计算时间。对于舍弃的点将不能作为起始点,但可以作为连接点被其他连通点集使用。

对通过测试的连通点集再利用直线误差度准则将噪声和曲线部分与直线部分分离。直线误差度<sup>[13]</sup>是利用点到直线的距离,来衡量实际直线与理

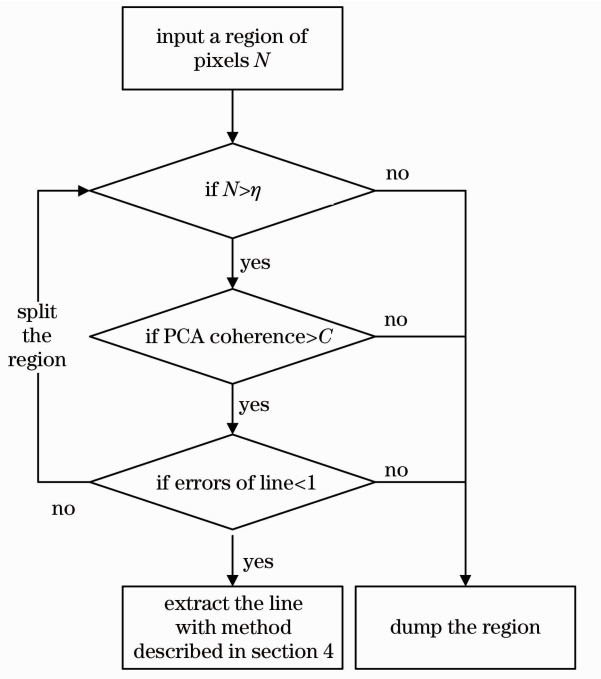


图 4 直线段检测算法流程图

Fig. 4 Flow chart of line segments detection algorithm

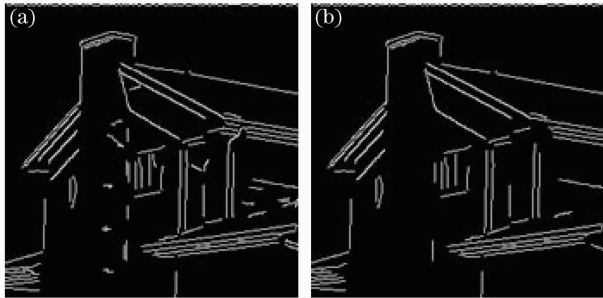
图 5 利用主元一致性消除曲线和噪声。(a)消除前；  
(b)消除后

Fig. 5 Remove curve and noise by coherence of principal components. (a) Before removal; (b) after removal

想直线的偏差。设  $L$  是连通集内相距最远的两个端点  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$  确定的一条直线, 则连通集中点  $(x_i, y_i)$  到直线  $L$  的距离  $d_i$  可以按下式计算:

$$d_i = \frac{|(x_2 - x_1)(y_1 - y_i) + (y_2 - y_1)(x_i - x_1)|}{\sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2}} \quad (10)$$

直线误差度定义为点到直线的最大距离  $d_{\max}$ 。若  $d_{\max}$  不小于阈值  $l$  (1 pixel), 则认为该连通点集不能作为一条直线段。连通点集将从到直线  $L$  距离最大的点分割成两个连通点集, 再分别衡量直线误差度。该过程一直迭代直到连通点集数目小于阈值  $(\eta)$  被抛弃或是  $d_{\max}$  小于阈值  $l$  被接受。被接受的连通集将通过最小二乘法拟合为直线。设理想直线

方程为

$$y = ax + b, \quad (11)$$

则最小二乘直线拟合即求解最小化问题

$$\min \sum [y_i - (ax_i + b)]^2. \quad (12)$$

直线段的端点为连通点集中相距最远的两个端点在直线上的投影点。

## 5 实验结果及性能分析

### 5.1 对比测试

图 6 给出了分别使用本文算法、标准 Hough 变换、相位编组和文献[12]提出的 PCA 直线检测算法对近景建筑图像的直线检测结果。Hough 变换由于没有考虑直线的连通性和方向性特点, 在密集点区导致大量误检并且无法正确检测出直线段的起始和结束位置。相位编组算法的误检率要低于 Hough 变换, 但在对比度较高的区域容易误检出短直线, 并且对直线的方向计算不准确, 左屋檐的直线方向出现了明显的错误。文献[12]的算法与本文算法同样使用了主成分分析, 但结果中有漏检直线并且直线的方向偏差较大, 原因在于该算法直接对没有提取方向信息的边缘分组。这样分组随意性大, 一个像素点可能被分给多组边缘, 容易受噪声干扰, 从而在对分组边缘进行直线检测时, 不仅计算量较大(同一像素点被多次分组则需检测多次), 而且阈值难于选取, 过高的阈值会导致漏检直线, 过低的阈值会使直线提取受到噪声干扰, 参数计算不准确。尽管文献[12]使用了相对阈值方法来改善这一问题, 但在很多情况下无法单靠阈值将分组过程中包含进来的噪声与直线有效区分。本文算法借助方向信息进行连接后再检测, 结果中只有少量误检, 并且正确计算出直线段的起始位置和方向。

草地区域由于存在大量曲线, 容易产生直线误检。图 7 给出了四种直线检测算法针对草地图像的检测结果。通过比较不难发现本文提出的算法和文献[12]提出算法的误检直线数量较低, 其次是相位编组, Hough 变换算法对这种密集材质区虚检率最高。

表 4 给出了四种算法的计算时间以及实验环境和两组测试图像的信息。本文算法的两组实验时间均优于另外三种算法。综合比较测试的结果, 本文算法对要求误检率低、直线段提取准确性高的实时任务有良好的适用性。



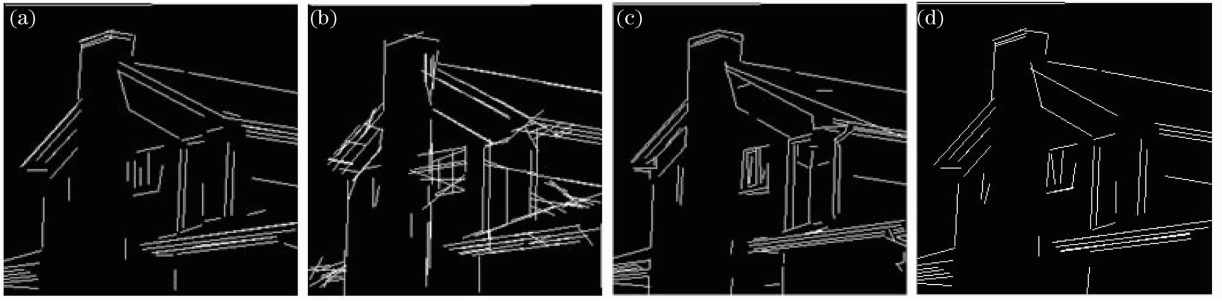


图 6 不同算法对建筑物图像的检测结果。(a)本文算法；(b) Hough 变换；(c) 相位编组；(d) 基于 PCA 的算法  
Fig. 6 Detection results of different algorithms for an image of a building. (a) Proposed algorithm; (b) Hough transform; (c) phase grouping; (d) PCA based algorithm

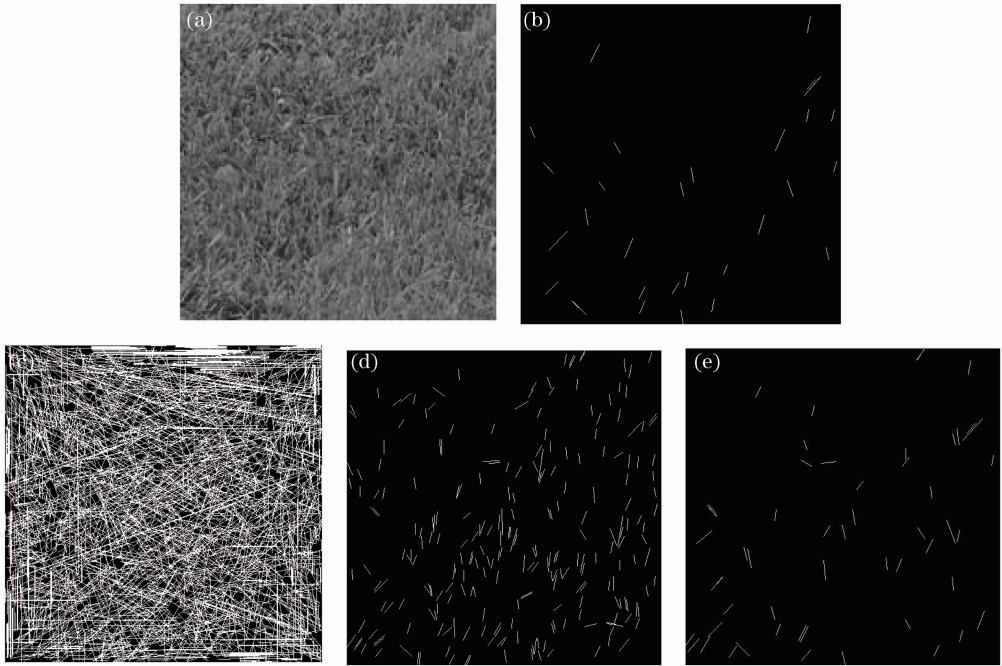


图 7 不同算法对草地图像的检测结果。(a)原图像；(b)本文算法；(c) Hough 变换；(d)相位编组；(e) 基于 PCA 的算法  
Fig. 7 Line segments detection results of grass ground image. (a) Original image; (b) proposed algorithm; (c) Hough transform; (d) phase grouping; (e) PCA based algorithm

表 4 不同算法的计算时间  
Table 4 Time of different algorithms

Hardware	Image	Hough transform	Phase grouping	PCA based algorithm	Proposed algorithm
CPU: Intel i380M 2.53 GHz	Building: 256 pixel×256 pixel	0.047 s	0.015 s	0.025 s	0.014 s
	Lawn: 512 pixel×512 pixel	0.722 s	0.178 s	0.342 s	0.141 s

## 5.2 性能测试

本文使用图像数据库<sup>[14]</sup>的 30 幅测试图像对算法进行了性能测试。测试图像可以分为近景拍摄目标图像、航拍图像和序列图像三组,每组 10 幅图像。表 5 给出了 3 组图像使用本文算法提取直线的平均误检率  $r_f$ 、准确率  $r_a$  和漏检率  $r_m$ ,  $r_f$ 、 $r_a$  和  $r_m$  的计算公式可见文献[11]。

表 5 算法性能测试结果  
Table 5 Results of performance test

	Target in close range	Aerial images	Sequence images
$r_f$	0.021	0.053	0.127
$r_a$	0.971	0.959	0.931
$r_m$	0.029	0.041	0.069

图 8 和图 9 给出了本文算法对航拍图像和序列图像的具体处理结果,对近景拍摄目标图像和材质图像具体处理结果可见对比测试。图 8(a)为原图像,

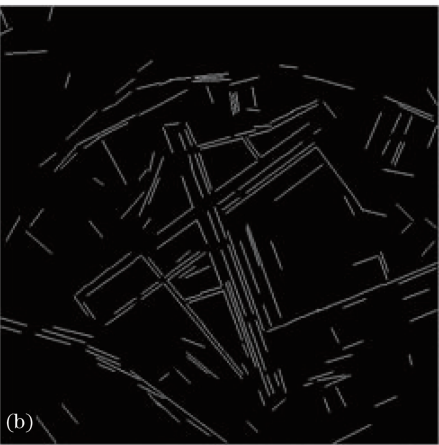


图 8 本文算法对机场图像的检测结果。(a)原图像; (b) 检测结果

Fig. 8 Line segments detection result in airport image by algorithm proposed in this paper. (a) Original image; (b) detection result

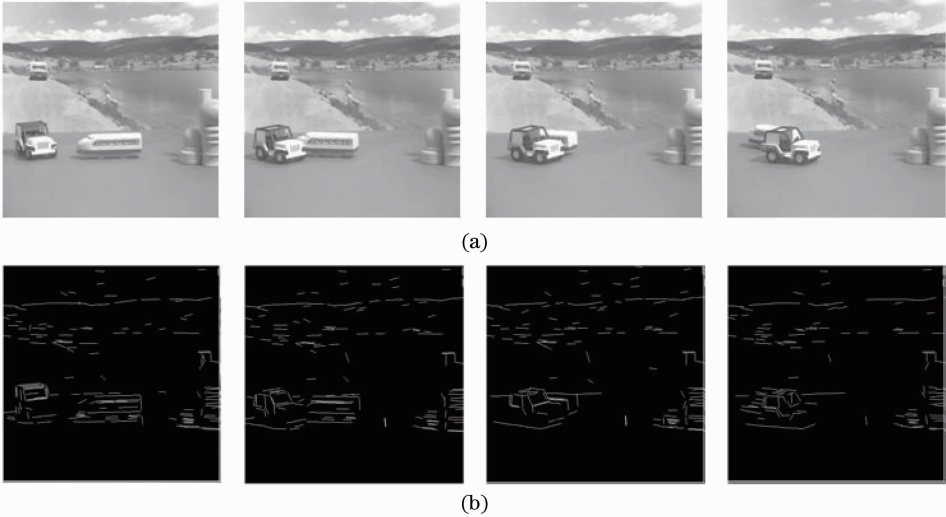


图 9 本文算法对运动目标序列图像的直线段检测结果。(a)原图像; (b)检测结果

Fig. 9 Line segments detection result in sequence images of moving targets by algorithm proposed in this paper.

(a) Original images; (b) detection result

直线检测可以作为对运动目标检测、跟踪和姿态估计等应用的前期处理。图 9 中本文算法对包含运动目标的序列图像的直线检测结果表明,算法在背景中静止区域检测到的直线段大多保持不变,而对运动目标(汽车模型和火车模型)检测的直线段能保证相邻图像间有较强的对应性。

## 6 结 论

提出了一种基于边缘连接的快速直线提取算法。该算法利用边缘的主元方向和图像梯度方向信

息快速连接方向相似点,并结合基于主元一致性和直线误差度的直线判别方法有效检测直线,降低对曲线、噪声等的误检,最后计算得到直线段的方向、端点等参数信息。算法具有准确性高、误检率低和计算速度快的特点,可为目标识别、视觉测量、位置估计等提供有利条件。目前,算法仍然存在对交叉直线无法完整检测以及参数较多、难于自适应调整的问题,需要进一步研究改进。

## 参 考 文 献

1 Xiang Shoubing, Su Guangda, Chen Jiansheng *et al.*. Brick stack

- anomaly detection and recognition based on machine vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0715002
- 向守兵, 苏光大, 陈健生 等. 基于机器视觉的码坯异常检测与识别[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0715002
- 2 Wang Wenfeng, Zhu Shuhua, Feng Yihao *et al.*. Parallel edges detection from remote sensing image using local orientation coding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0315001
- 王文锋, 朱书华, 冯以浩 等. 基于局部方向编码的遥感影像平行边缘识别[J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0315001
- 3 Zeng Wenjing, Wan Lei, Zhang Tiedong *et al.*. Fast detection of sea line based on the visible characteristics of marine images[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0111001
- 曾文静, 万磊, 张铁栋 等. 基于海面可见光图像的海界线快速检测[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0111001
- 4 Hu Wenchuan, Qiu Zurong, Zhang Guoxiong *et al.*. *In-situ* calibration method for large-scale space angle optical measurement system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(10): 1008006
- 胡文川, 裘祖荣, 张国雄 等. 大尺寸空间角度检测系统的现场标定方法[J]. *中国激光*, 2012, **39**(10): 1008006
- 5 Guo Tao, Da Feipeng, Fang Xu *et al.*. Camera calibration under small field of view[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(8): 0808001
- 郭涛, 达飞鹏, 方旭 等. 小视场环境下的摄像机标定[J]. *中国激光*, 2012, **39**(8): 0808001
- 6 R. O. Duda, P. E. Hart. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures[J]. *Commun. ACM*, 1972, **15**(1): 11~15
- 7 J. Canny. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, **8**(6): 679~689
- 8 L. Xu, E. Oja. A new curve detection method: randomized Hough transform[J]. *Pattern Recognition Lett.*, 1990, **11**(5): 331~338
- 9 H. Kälviäinen, P. Hirvonen, L. Xu *et al.*. Probabilistic and non-probabilistic Hough transforms: overview and comparisons [J]. *Image and Vision Computing*, 1995, **13**(4): 239~252
- 10 J. B. Burns, A. R. Hanson, E. M. Riseman. Extracting straight lines[J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, **8**(4): 425~455
- 11 Ding 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
- 丁伟利, 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
- 12 Y. S. Lee, H. S. Koo, C. S. Jeong *et al.*. A straight line detection using principal component analysis [J]. *Pattern Recognition Lett.*, 2006, **27**(14): 1744~1745
- 13 Zhu Lingjian, Li Zhaosuo, Liu Junhua *et al.*. Straightness-error measurement with laterally modulated polarized light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 955~959
- 朱凌建, 李照锁, 刘君华 等. 横向调制偏振光测量导轨直线度[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 955~959
- 14 A. Weber. The USC-SIPI Image Database [DB/OL]. <http://sipi.usc.edu/database/>

栏目编辑: 李文喆