

一种彩色图像的直线段检测算法

刘雨晴^{**}, 钟宝江^{*}, 郑行家

(苏州大学计算机科学与技术学院, 江苏 苏州 215000)

摘要 当前的直线段检测算法均针对灰度图像设计和实现,在处理彩色图像时会抛弃其色彩信息,不利于获取高质量检测结果。为此,提出了一种针对彩色图像的直线段检测算法。对三个色彩通道分别应用 DiZenko 算子计算出其梯度矢量,并基于平均梯度强度和方向提取出图像中的边缘;再对边缘线段上的像素点进行跟踪、链接或分裂,以生成候选的直线段。最后,基于候选直线段上各点的梯度信息,利用 Helmholtz 准则排除由噪声形成的虚假直线段,从而得到最终的直线段集合。实验结果表明,与现有算法相比,新算法充分应用了图像的色彩信息,显著提高了直线段检测的性能,在 York 城市图像数据库上可将当前算法的最高精确率从 0.2207 提升为 0.2687,并获得了更高的 F -得分。

关键词 图像处理; 直线段检测; 彩色图像; 梯度方向; 边缘检测; 直线段验证

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.211002

Algorithm for Detecting Straight Line Segments in Color Images

Liu Yuqing^{**}, Zhong Baojiang^{*}, Zheng Hangjia

College of Computer Science and Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215000, China

Abstract The existing algorithms for detecting straight line segments are all designed for grayscale images. When implemented on color images, they discard the input image's color information; this is undesirable for accurately detecting straight line segments. To solve this problem, this study proposes an algorithm that directly detects straight line segments in color images. First, DiZenko operator is utilized to compute gradient vectors in three color channels, and image edges are extracted based on the average gradient magnitudes and orientations. Then, the pixels on each image edge are tracked and they are linked or split to generate candidate straight line segments. Finally, based on the gradients of the points on the candidate line segments, Helmholtz criterion is used to eliminate the false line segments caused by noise, yielding the final set of line segments. Experimental results show that the new algorithm can fully exploit the color information of the input image, leading to significantly improved detection efficiency when compared with the existing algorithms. On the YorkUrbanDB image database, the highest accuracy of the proposed algorithm increases from 0.2207 to 0.2687 and a high F -score is achieved.

Key words image processing; straight line segment detection; color image; gradient direction; edge detection; straight line segment verification

OCIS codes 100.3008; 110.2970

1 引言

直线段一般出现在人造物体边缘,包含场景中基本的几何信息和拓扑信息,可以为进一步理解和分析图像提供关键信息。传统的直线段检测算法一般基于 Hough 变换(HT)^[1-4]来设计和实现,而近期

的算法则更多地依赖图像的局部特征(如边缘^[5-8]、支持领域^[9-10]或 Linelet^[11]等)来完成检测。

目前直线段检测领域已有较多研究,主流算法在召回率、精确率和时间复杂度等方面都有良好的表现。然而,早期算法受计算设备性能的限制,在解决图像分析和理解任务时通常只考虑灰度图像。这

收稿日期: 2019-03-22; 修回日期: 2019-04-02; 录用日期: 2019-04-30

基金项目: 国家自然科学基金(61572341)、江苏高校优势学科建设工程资助项目

* E-mail: bjzhong@suda.edu.cn; ** E-mail: 20184227059@stu.suda.edu.cn

一做法延续至今,故现有的直线段检测算法均是针对灰度图像设计和实现的。即使现阶段可以用很低的成本获取彩色图像,惯用做法仍是将其转换成灰度图像再进行直线段检测。在这一过程中,部分以色彩表达的图像信息被抛弃,造成直线段丢失。此外,色彩的缺失也会导致被检测到的直线段出现端点位置不准确与线段不连续等问题。随着硬件设备在计算能力和存储能力等方面的持续提升,目前已有可能获取和处理彩色图像,从而实现场景更有效的分析与理解。

如果直接将现有的直线段检测算法推广应用于彩色图像,比如对红、绿、蓝(R,G,B)三个色彩通道分别进行检测,则一方面算法的时间复杂度比较高,另一方面如何对三通道检测结果进行合理融合也是个棘手的问题,并会导致算法复杂度进一步增加。为此,本文提出了一种彩色图像的直线段检测算法,通过DiZenko算子^[12]计算所有色彩通道中图像的平均梯度强度和方向,既回避了三通道检测结果的融合问题,又可有效控制检测过程的时间复杂度。在检测性能方面,新算法显著提升了直线段的精确率,从而获得了明显优于当前算法的检测效果。



图1 直线段检测的应用。(a)遥感图像分析^[13-15];(b)图像匹配^[16];(c)消失点检测^[17];(d)物体检测^[18-19]

Fig. 1 Applications of straight line segment detection. (a) Remote sensing image analysis^[13-15]; (b) image matching^[16]; (c) vanishing point detection^[17]; (d) object detection^[18-19]

通过仿真实验发现,CannyLines算法^[20]在检测性能方面(精确率和召回率)优于现有的其他算法。该算法的主要思想如下:首先自适应设置Canny算子的低阈值和高阈值,获取图像的初始边缘线段;然后任意选取初始直线段中的一个像素点作为节点,利用该节点的梯度方向和梯度幅度得到候选直线段;最后,对候选的直线段进行验证,以控制错误检测的数量,得到最终检测结果。

2.2 彩色图像的边缘检测

受计算设备性能的限制,现有边缘检测算法均是针对灰度图像设计和实现的。为了解决图像信息丢失的问题,2017年Akinlar等^[5]提出了一种针对彩色图像的边缘检测算法,称为ColorEDV算法。

2 研究背景

2.1 直线段检测

直线段检测在遥感图像分析^[13-15]、图像匹配^[16]、消失点检测^[17]和物体检测^[18-19]等任务中被广泛应用(图1)。在直线段检测领域中,众学者提出了一系列算法(均基于灰度图像实现)。von Gioi等^[10]提出了一种基于“支撑领域”的检测算法,称为LSD(Line Segment Detector)算法,该算法能够有效控制错误检测的数量,并且具有参数自适应能力。Akinlar等^[6]提出了一种基于边缘信息的检测算法,称为EDLines(Edge Drawing Lines)算法,该算法能够在较短时间内获得较为准确的检测结果。Lu等^[20]提出了一种无参数的直线段检测算法,称为CannyLines算法,该算法能够有效降低噪声干扰,提取较精确的直线段结果。Almazan等^[21]在标准Hough变换的基础上,提出了MCMLSD(Markov Chain Marginal Line Segment Detector)检测算法,该算法应用马尔可夫链跟踪和自适应确定每个局部边缘,能够返回较长的直线段,从而具有较高的召回率。

该算法不仅能够提取出比现有检测算法更多的边缘段,还具有良好的时间性能。

梯度方向和梯度幅度的计算是边缘检测过程中的关键。灰度图只有一个色彩通道,只需对每个像素点进行一次计算即可,而彩色图像有三个通道分量,各分量存储的场景信息并不完全一致。因此,需要处理各种复杂情况。针对上述问题,Akinlar等^[5]使用DiZenko算子计算张量梯度,有效控制了算法的时间复杂度,并取得了良好的边缘检测效果。其算法的主要处理步骤如下:首先求出三个色彩通道的梯度矢量,计算出各像素点的平均梯度值;然后通过“锚点”计算和一种“智能路由”模型得到边缘线条;最后对边缘进行验证,以保证精确度。

3 彩色图像的直线段检测

3.1 算法思想与框架

在一幅场景中,物体和背景之间可以通过色彩差异来表达直线的存在。然而,图像灰度化后不同的色彩可能对应相同或相近的灰度,从而导致直线的消失或强度减弱。图 2(a)为 8×8 彩色棋盘图像,其中各色块具有相同的灰度强度。图 2(b)为 CannyLines 算法^[20]的检测结果。由于该算法将彩色

图像转换为灰度图像,色彩信息丢失,从而未能检测出任何直线段。本文算法直接针对输入的彩色图像进行直线段检测,其效果如图 2(c)所示。可以看到,图像中所有的直线段均能被正确检测。更多的仿真实验结果表明,当场景中的物体与背景之间具有相近的灰度强度但色调或饱和度不同时,尽管人类的视觉能够清楚地感知到物体上的直线段,但现有的基于灰度图的直线段检测算法^[3,6,10-11,20-22]经常出现漏检或错检,从而导致检测效果欠佳。

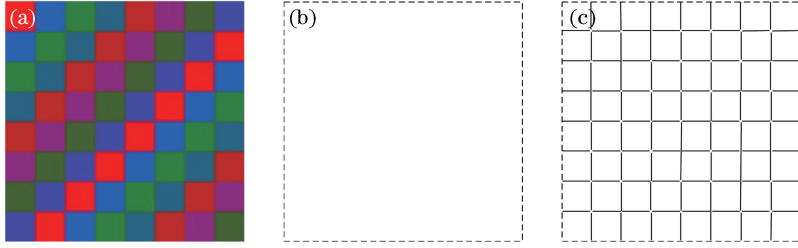


图 2 在灰度图像上直接检测直线段时的问题。(a)测试图像;(b) CannyLines 算法^[20]的检测结果(未能检测出任何直线段);(c)本文算法的检测结果

Fig. 2 Problem of direct straight line segment detection on gray-value images. (a) Test image; (b) detection result of CannyLines algorithm^[20] (no straight line segment is detected); (c) detection result of proposed algorithm

为了解决彩色图像的问题,一种简单的做法是分别对每个色彩通道计算梯度后累加,再基于累加的梯度进行计算。然而,该做法时间消耗较大,算法运行效率低。为此,通过 DiZenzo 算子计算图像的三通道梯度^[12],实现对图像色彩信息的隐式融合,使图像中不同颜色分量的相反矢量相互加强,从而有利于提取图像的色彩信息,解决直线段漏检和错检的问题。具体地,对于彩色图像 I ,三个色彩通道的分量记作 I_r 、 I_g 、 I_b ,分别表示红、绿、蓝通道中的图像层。设 u 和 v 为输入图像在 x 和 y 方向上的

偏导数,DiZenzo 算子定义为

$$g_{xx} = u \cdot u = \left| \frac{\partial I_r}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial I_g}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial I_b}{\partial x} \right|^2, \quad (1)$$

$$g_{yy} = v \cdot v = \left| \frac{\partial I_r}{\partial y} \right|^2 + \left| \frac{\partial I_g}{\partial y} \right|^2 + \left| \frac{\partial I_b}{\partial y} \right|^2, \quad (2)$$

$$g_{xy} = u \cdot v = \frac{\partial I_r}{\partial x} \frac{\partial I_r}{\partial y} + \frac{\partial I_g}{\partial x} \frac{\partial I_g}{\partial y} + \frac{\partial I_b}{\partial x} \frac{\partial I_b}{\partial y}. \quad (3)$$

由(1)~(3)式可得,梯度幅度 $g(x, y)$ 和梯度方向 $\text{dir}(x, y)$ 分别为

$$g(x, y) = \left\{ \frac{1}{2} [(g_{xx} + g_{yy}) + (g_{xx} - g_{yy}) \cos(2\theta) + 2g_{xy} \sin(2\theta)] \right\}^{\frac{1}{2}},$$

$$\text{dir}(x, y) = \theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2g_{xy}}{g_{xx} - g_{yy}} \right). \quad (4)$$

为了能够检测出更长、精确率更高的线段,对提取的每条边缘段进行最小二乘拟合,以提高参数累加效率,再进行链接或分裂(见 3.2 节),去除边缘段上的噪声。然后基于候选直线段上各点的梯度强度和梯度方向,利用 Helmholtz 准则确认其是否为真实直线段(见 3.3 节)。用函数 $\text{ColorEDV}(I_r, I_g, I_b, \sigma, \tau_1)$ 表示调用 ColorEDV 算法^[5]得到图像边缘的步骤,代码由原作者提供。其中, $\{I_r, I_g, I_b\}$ 为彩

色图像 I 在红、绿、蓝三个通道的图像层, σ 为高斯平滑的标准方差参数, τ_1 为最短线段长度的阈值。本文算法分别取 $\sigma = 0.7$, $\tau_1 = 7$,其主要步骤如图 3 所示。

3.2 直线段链接与分裂

在边缘检测步骤中得到一组边缘线段,边缘像素的位置容易受到各种噪声的干扰,最终导致直线段检测结果误差很大。为了提高本文算法的精确

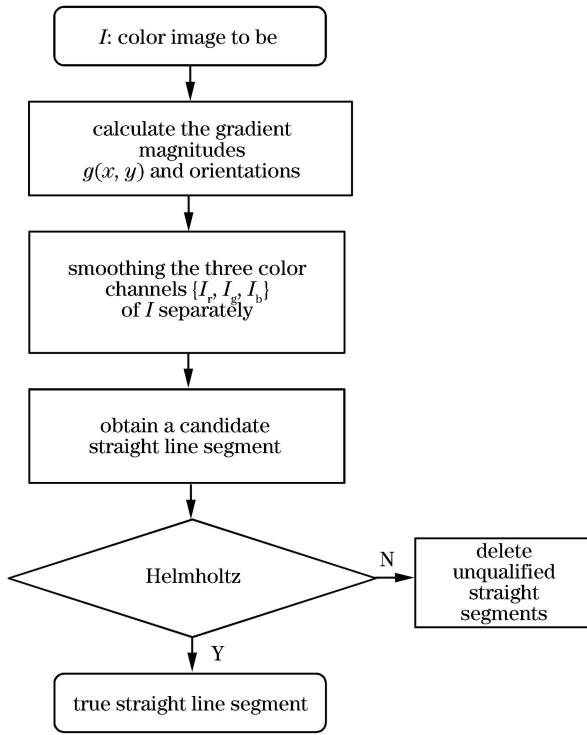


图3 彩色图像的直线段检测算法流程图

Fig. 3 Flow chart of straight line segment detection algorithm for color images

率,对提取的边缘线段作如下链接或分裂操作^[20]。具体可分为3步。

1)排序。对所有边缘像素点根据其梯度幅度进行快速排序。设待排序的 n 个元素存储在数组 $A[1, 2, 3, \dots, n-1]$ 中,排序过程如下:

①设置两个初始值分别为 $i=0$ 和 $j=n-1$ 的变量,并将数组的第一个元素作为关键数据,赋值给 k_{ey} ,即 $k_{ey}=A[0]$;

②从 j 开始向前搜索($j--$),直至找到第一个小于关键数据 k_{ey} 的值 $A[j]$,将 $A[j]$ 赋值给 $A[i]$;

③从 i 开始向后搜索($i++$),直至找到第一个大于关键数据 k_{ey} 的值 $A[i]$,将 $A[i]$ 赋值给 $A[j]$;

④重复②③两步,直至 $i=j$ 。

上述步骤执行一次即可至少确定一个元素的最终位置。因此,递归处理剩余数据即可得到所有像素点的排序结果。

2)链接。从具有最大梯度幅度的边缘点开始,将该边缘点周围8邻域梯度方向误差小于阈值的边缘点加入当前区域,并且标记这些边缘点为已使用。循环操作直至所有边缘点都被标记。

3)分裂。若某一矩形边缘区域中的任意两个端点之间的误差大于1像素,且此时该矩形边缘区域

的长度大于某个最小阈值 θ ,则该矩形边缘区段被分成两个区域。重复该步骤,直至所有的初始直线段均被处理。

3.3 直线段验证

直线段验证是当前直线段检测算法的关键步骤之一。复杂环境往往存在大量噪声,如地面杂草、阴影等。对于3.1节提取出的候选直线段,如果人为设定阈值来判断是否为真实的直线段,则会涉及到参数敏感性和算法稳定性等很多问题。在这方面,Gonzalez等^[23]、Desolneux等^[24-25]得出了噪声环境下出现错误检测的概率,并由此建立了抑制虚假线段出现的数学模型,称为Helmholtz准则,该准则在LSD和EDLines等算法中得到了很好的应用^[3, 6, 10-11, 20-22]。根据Helmholtz准则,当候选直线段在噪声环境下的期望值小于某个阈值时,会被认为具有感知意义。由此,保证了直线段检测过程在噪声影响下产生较低的错误率。von Gioi等^[10]基于Gonzalez等^[23-25]的理论,利用Helmholtz准则计算错误警报数(NFA),对初步提取的候选直线段进行验证,并将错误检测控制在较低范围内。

假设有一张 $N \times N$ 的图像,将长度为 n' 的直线段记为 L ,则 N_{FA} 可定义为

$$N_{FA}(n', k) = N^4 \times \sum_{i=k}^{n'} C_{n'}^i p^i (1-p)^{n'-i}, \quad (5)$$

式中: $C_{n'}^i$ 为排列组合,即从 n' 中取 i 个; p 为一个像素点和一个线段对齐的概率。在LSD算法中,将其设置为 $1/8$ 。

上述验证过程仅使用了边缘点的方向信息。因为梯度方向是“最简单的局部对比度不变更的信息”^[20],所以仅使用梯度方向作为线段验证条件时,如果梯度幅度小,就会出现梯度方向不稳定的问题。显然,当不同线段具有相同长度和相同数量的对准点时,高梯度幅度的线段比低梯度幅度的线段具有更强的特征。受Helmholtz准则的启发,Lu等^[20]提出了 N_{FA} 的新表述,即

$$N_{FA}(L) = N_{FA}(n', k) \times N_{FA}(S) = N^4 \times \sum_{i=k}^{n'} C_{n'}^i p^i (1-p)^{n'-i} \times N_p \times H(u)^{n'}, \quad (6)$$

式中: S 为某连接边缘段; u 为 S 中点的最小梯度幅度; N_p 为所有连通线段的总数; $N_{FA}(L)$ 为直线段 L 的错误警报数; $N_{FA}(S)$ 为连接边缘线段 S 的错误警报数; $H(u)$ 为任意水平线上的某点大于 u 的概率。基于 $N_{FA}(L)$ 的计算,可以检测出具有更多对齐点和更强梯度的直线段。

4 实验结果与分析

为了验证本文算法的性能,将目前被认为是唯一可以用于客观测评直线段检测结果的数据库——York 城市图像数据库^[26-27]中的 102 张图片(室内 45 张,室外 57 张)作为测试数据,并选取了当前最具代表性的 6 款算法进行对比,包括 LSD 算法^[10]、EDLines 算法^[6]、CannyLines 算法^[20]、MCMLSD 算法^[21]、Linelet 算法^[11]以及 ELSDc 算法^[22]。这些

算法的代码由原作者提供(可在互联网上获得),且相关参数均为默认值。

图 4 和图 5 分别是参与测评的 7 款算法对数据库中第 25 张和第 42 张图像的检测结果。图 4 为房屋框架的外部环境,直线段清晰有序,其中一根柱子被绿色植物遮挡。图 5 为一座建筑的室内环境。从检测结果可以看出,对于平均像素值变化不大但人眼能明显区分的直线段(图中用阴影突出表示的部分),部分算法检测困难,而本文算法能准确检测到这些直线段。

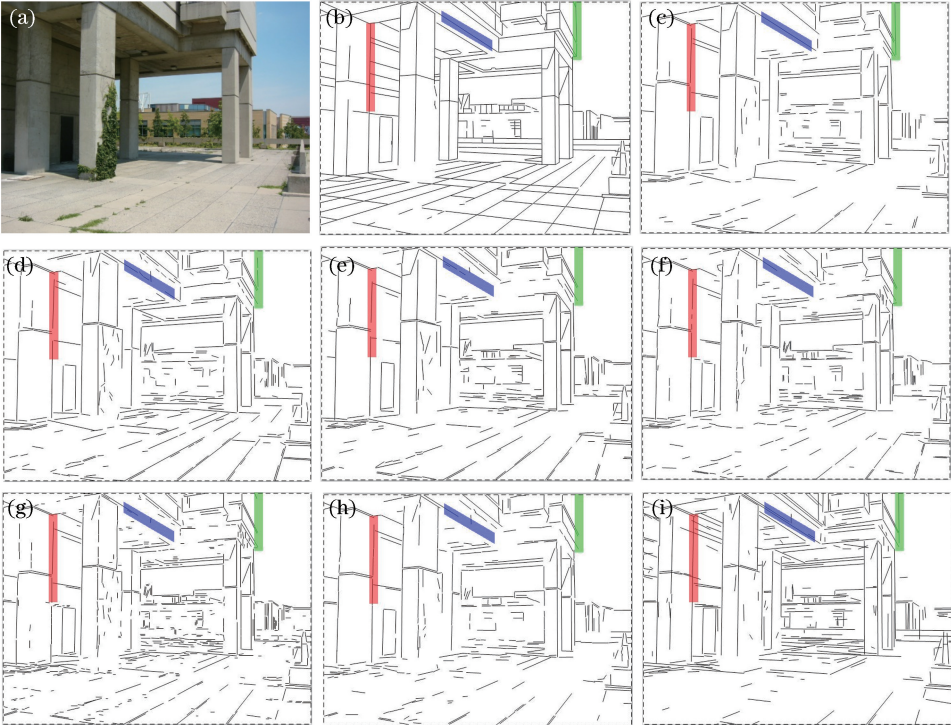


图 4 不同算法在 York 城市图像数据库第 25 张图像上的检测结果。(a) Image # P1020867 (640×480);(b) ground truth;(c) ours;(d) CannyLines^[20];(e) EDLines^[6];(f) ELSDc^[22];(g) Linelet^[11];(h) LSD^[10];(i) MCMLSD^[21]

Fig. 4 Detection results of different algorithms on the 25th image of York City Straight Line Database. (a) Image # P1020867 (640 × 480); (b) ground truth; (c) ours; (d) CannyLines^[20]; (e) EDLines^[6]; (f) ELSDc^[22]; (g) Linelet^[11]; (h) LSD^[10]; (i) MCMLSD^[21]

记 T_p (true positive) 为真阳性,即正确检测的直线段长度之和; F_p (false positive) 为假阳性,即错误检测的直线段长度之和; F_n (false negative) 为假阴性,即漏检的直线段长度之和。为更加清楚地说明直线段检测算法的性能,通过以下 4 个评价指标进行客观、定量的评估。

1) 精确率(Precision)。它是检测到的所有直线段中正确直线段占人工标注图中直线段的比例,计算公式为

$$P = \frac{T_p}{T_p + F_p}. \quad (7)$$

2) 召回率(Recall)。它是正确检测直线段长度

与人工标注图中直线段长度的比值,计算公式为

$$R = \frac{T_p}{T_p + F_n}. \quad (8)$$

3) IOU (Intersection over Union)。它是检测结果与人工标注图的交集并上其并集,计算公式为

$$I_{OU} = \frac{T_p}{T_p + F_p + F_n}. \quad (9)$$

4) F -得分(F -score)。它是精确率和召回率的调和平均数,定义为

$$F = \frac{(1 + \beta^2)PR}{\beta^2 P + R}, \quad (10)$$

式中: β 为精确率和召回率的比值,本文认为精确率

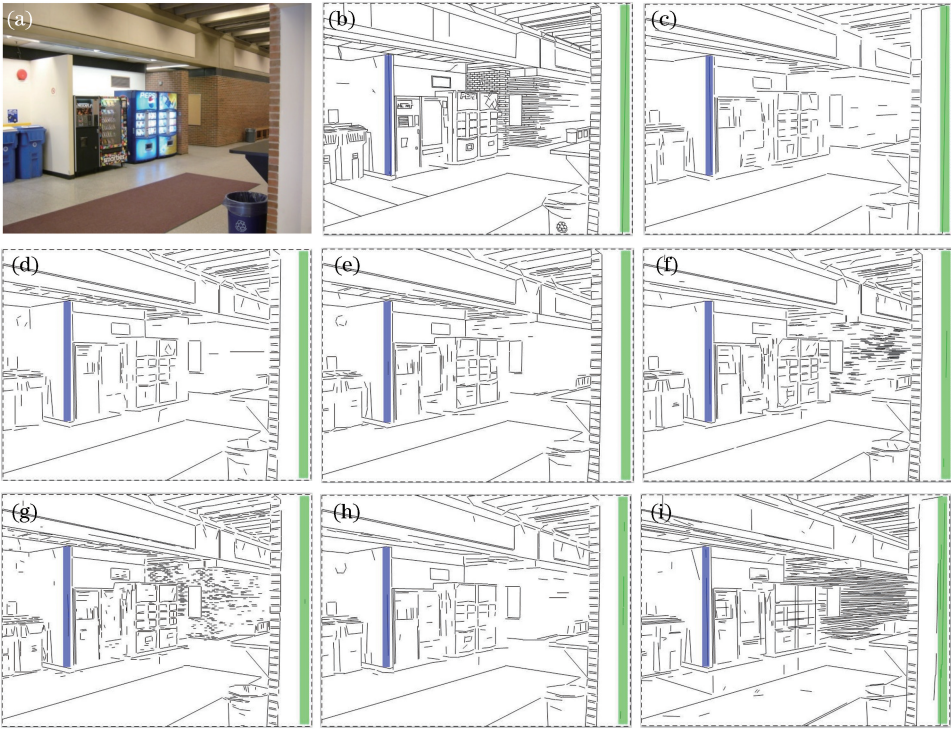


图5 不同算法在 York 城市图像数据库第 42 张图像上的检测结果。(a) Image # P1040814 (640×480);(b) ground truth; (c) ours;(d) CannyLines^[20]; (e) EDLines^[6]; (f) ELSDc^[22]; (g) Linelet^[11]; (h) LSD^[10]; (i) MCMLSD^[21]

Fig. 5 Detection results of different algorithms on the 42th image of the York City Straight Line Database. (a) Image # P1040814 (640 × 480); (b) ground truth; (c) ours; (d) CannyLines^[20]; (e) EDLines^[6]; (f) ELSDc^[22]; (g) Linelet^[11]; (h) LSD^[10]; (i) MCMLSD^[21]

和召回率同样重要,因此设 $\beta=1$ 。

表 1 给出了参与测评的算法的客观测评结果,其中加粗显示的数据表示参与测评算法能够达到的最高水准。可以看出,新算法在直线段检测的精确率方面明显优于当前算法,达到 0.2687。在召回率方面,MCMLSD 算法^[21]的效果最好,主要原因在于 MCMLSD 算法是基于 Hough 变换实现的,而其他算法则是利用图像局部特征来执行直线段检测的。根据观察,Hough 变换的应用有利于召回更多的直线段,但在直线段的端点位置,基于局部特征的算法具有更高的准确率。如图 4~5 所示,MCMLSD 算法的检测结果中存在很多冗余线段,部分线段在原图上并不存在(即错检)。因此,MCMLSD 算法虽然召回率较高,但在实际检测效果上并无优势。IOU 指标和 F -得分综合了算法在精确率和召回率两个方面的性能,本文算法均取得了最好的结果。在时间复杂度方面,CannyLines 算法^[20]处理一张三通道的图像约需 0.164 s,而新算法仅需 0.0629 s,前者约为后者的 2.64 倍。

5 结 论

现有的直线段检测算法均是基于灰度图像实现

表 1 不同算法在 York 城市图像数据库上的客观测评结果
Table 1 Objective evaluation results of different algorithms on YorkUrbanDB database

Algorithm	Precision	Recall	IOU	F -score
Ours	0.2687	0.4560	0.1997	0.3240
LSD ^[10]	0.2207	0.4536	0.1712	0.2843
EDLines ^[6]	0.2066	0.4279	0.1592	0.2668
CannyLines ^[20]	0.2307	0.4771	0.1818	0.2991
MCMLSD ^[21]	0.2070	0.6150	0.1806	0.2981
ELSDc ^[22]	0.2078	0.4789	0.1661	0.2775
Linelet ^[11]	0.2061	0.5063	0.1688	0.2810
PPHT ^[3]	0.0497	0.3343	0.0442	0.0823

的,随着计算机硬件设备性能的不断提升,获取图像色彩信息的成本越来越低。然而,如果直接将当前算法用于彩色图像的直线段提取,就需融合三个直线段的检测结果,容易导致算法的时间复杂度增加。因此,本文提出了一种彩色图像的直线段检测算法。首先,通过 DiZenko 算子计算梯度矢量,并基于平均梯度强度和方向提取出图像中的边缘。然后,对初始直线段进行链接或分裂,筛选出图像候选的直线段。最后,利用 Helmholtz 准则得到真实的直线段。实验结果表明,本文算法在直线段的精确率方面显

著优于其他算法,降低了直线段错检和漏检的概率,获得了最高的 F -得分。

参 考 文 献

- [1] Zhang Z J, Hao X Y, Liu S L, *et al.* Line detection based on Hough one-dimensional transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0412005.
张振杰, 郝向阳, 刘松林, 等. 基于 Hough 一维变换的直线检测算法[J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0412005.
- [2] Duda R O, Hart P E. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures[J]. *Communications of the ACM*, 1972, 15(1): 11-15.
- [3] Matas J, Galambos C, Kittler J. Robust detection of lines using the progressive probabilistic Hough transform [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2000, 78(1): 119-137.
- [4] Qiao Y Q, Xiao J H, Huang Y H, *et al.* Randomized Hough transform straight line detection based on least square correction [J]. *Journal of Computer Applications*, 2015, 35(11): 3312-3315, 3320.
乔寅骐, 肖健华, 黄银和, 等. 基于最小二乘修正的随机 Hough 变换直线检测[J]. *计算机应用*, 2015, 35(11): 3312-3315, 3320.
- [5] Akinlar C, Topal C. ColorED: color edge and segment detection by edge drawing (ED)[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2017, 44: 82-94.
- [6] Akinlar C, Topal C. EDLines: a real-time line segment detector with a false detection control[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2011, 32(13): 1633-1642.
- [7] Chan T S, Yip R K K. Line detection algorithm[C]// *Proceedings of 13th International Conference on Pattern Recognition*, August 25-29, 1996, Vienna, Austria. New York: IEEE, 1996: 126-130.
- [8] Topal C, Akinlar C. Edge drawing: a combined real-time edge and segment detector[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2012, 23(6): 862-872.
- [9] Desolneux A, Moisan L, Morel J M. Meaningful alignments [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2000, 40(1): 7-23.
- [10] von Gioi R G, Jakubowicz J, Morel J M, *et al.* LSD: a fast line segment detector with a false detection control[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, 32(4): 722-732.
- [11] Cho N G, Yuille A, Lee S W. A novel linelet-based representation for line segment detection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2018, 40(5): 1195-1208.
- [12] di Zenzo S. A note on the gradient of a multi-image [J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1986, 33(1): 116-125.
- [13] Tang G F, Xiao Z F, Liu Q, *et al.* A novel airport detection method via line segment classification and texture classification [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(12): 2408-2412.
- [14] Li X, Liu Y Q, Bian C J, *et al.* Inshore ship detection method in optical remote sensing images using local salient characteristics [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2016, 21(5): 657-664.
李轩, 刘云清, 卞春江, 等. 局部显著特征下的光学遥感图像舷靠舰船检测[J]. *中国图象图形学报*, 2016, 21(5): 657-664.
- [15] Miao Q G, Weng W Q, Xu P F. Novel algorithm for recognition of bridge in remote sensing image [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(7): 1698-1701.
苗启广, 翁文奇, 许鹏飞. 遥感图像中无水桥梁识别新算法[J]. *电子学报*, 2011, 39(7): 1698-1701.
- [16] Lian L, Li G H, Zhang J, *et al.* An automatic algorithm for infrared and visible image registration based on parameter step estimation [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(9): 1829-1838.
廉蒹, 李国辉, 张军, 等. 基于参数分步估计的红外与可见光图像自动配准算法[J]. *电子学报*, 2012, 40(9): 1829-1838.
- [17] Kroeger T, Dai D X, van Gool L. Joint vanishing point extraction and tracking [C] // *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, June 7-12, 2015, Boston, MA, USA. New York: IEEE, 2015: 2449-2457.
- [18] Xu Y Z, Yu G Z, Wu X K, *et al.* An enhanced Viola-Jones vehicle detection method from unmanned aerial vehicles imagery [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(7): 1845-1856.
- [19] Dong J, Yang X, Yu Q F. Fast line segment detection based on edge connecting [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0315003.
董晶, 杨夏, 于起峰. 基于边缘连接的快速直线段检测算法[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0315003.
- [20] Lu X H, Yao J, Li K, *et al.* CannyLines: a

- parameter-free line segment detector[C] // 2015 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), September 27-30, 2015, Quebec City, QC, Canada. New York: IEEE, 2015: 507-511.
- [21] Almazán E J, Tal R, Qian Y M, *et al.* MCMLSD: a dynamic programming approach to line segment detection[C] // 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), July 21-26, 2017, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE, 2017: 5854-5862.
- [22] Pătrăucean V, Gurdjos P, von Gioi R G. Joint a contrario ellipse and line detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(4): 788-802.
- [23] Gonzalez R C, Woods R E. Digital image processing [J]. Prentice Hall International, 2008, 28(4): 484-486.
- [24] Desolneux A, Moisan L, Morel J M. Computational gestalts and perception thresholds [J]. Journal of Physiology-Paris, 2003, 97(2/3): 311-324.
- [25] Desolneux A, Moisan L, Morel J M. From gestalt theory to image analysis [M] // Interdisciplinary applied mathematics. New York, NY: Springer, 2008, 34: 1225-1259.
- [26] Denis P, Elder J H, Estrada F J. Efficient edge-based methods for estimating Manhattan frames in urban imagery[M] // Forsyth D, Torr P, Zisserman A. Computer vision-ECCV 2008. Lecture notes in computer science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008, 5303: 197-210.
- [27] Coughlan J M, Yuille A L. Manhattan world: orientation and outlier detection by Bayesian inference [J]. Neural Computation, 2003, 15(5): 1063-1088.